

완결과제 최종보고서

일반과제(○), 보안과제()

(과제번호 : PJ010174)

기후변화시나리오에 근거한 사과, 포도, 감귤, 인삼, 천궁, 당귀작물의 생산영향평가
(Impact Assessment based on Climate Change Scenarios (RCP) in Apple,
Grape, Mandarin, Ginseng, Cnidium, and Korean Angelica.)

국립원예특작과학원

연구수행기간

2014. 02. 01. ~ 2016.12. 31.

농촌진흥청

제 출 문

농촌진흥청장 귀하

본 보고서를 “기후변화시나리오에 근거한 사과, 포도, 감귤, 인삼, 천궁, 당귀작물의 생산영향평가”(개발기간 : 2014. 02. 01. ~ 2016. 12. 31.) 과제의 최종보고서로 제출합니다.

제1세부연구과제 : 기후변화 시나리오를 적용한 사과 생산영향평가

제2세부연구과제 : 기후변화 시나리오를 적용한 포도 생산영향평가

제3세부연구과제 : 기후변화 시나리오를 적용한 감귤 생산영향평가

제4세부연구과제 : 기후변화 시나리오를 적용한 인삼 생산영향평가

제5세부연구과제 : 기후변화 시나리오를 적용한 약용작물(천궁, 당귀) 생산영향평가

제1협동연구과제 : 전자기후도를 활용한 RCP시나리오 적용 주요 과수작물, 인삼, 약용작물
재배의 미래 잠재적 재배적지 시·공간 분석

제2협동연구과제 : 미래 기상요인(RCP 적용)에 따른 주요 과수작물의 유전자 발현양상 구명

제3협동연구과제 : 미래 기상요인(RCP 적용)에 따른 인삼, 약용작물의 유전자 발현양상 구명

2017. 2. 27.

제1세부연구기관명 : 국립원예특작과학원

제1세부연구책임자 : 한 현 희

참 여 연 구 원 : 한 점 화, 류 수 현, 정 재 훈

제2세부연구기관명 : 국립원예특작과학원

제2세부/협동연구책임자 : 손 인 창

참 여 연 구 원 : 문 경 환, 송 은 영, 위 승 환, 정 성 민, 오 순 자

제3세부연구기관명 : 국립원예특작과학원

제3세부연구책임자 : 문 영 일

참 여 연 구 원 : 강 석 범, 이 혜 진, 한 승 갑, 손 인 창, 오 순 자

제4세부연구기관명 : 국립원예특작과학원

제4세부연구책임자 : 김 장 욱

참 여 연 구 원 : 김 영 창, 김 동 휘, 김 기 홍

제5세부연구기관명 : 국립원예특작과학원

제5세부연구책임자 : 김 용 일

참 여 연 구 원 : 김 진 원, 신 건 수, 안 태 진, 김 영 국

제1협동연구기관명 : 주식회사 에피넷

제1협동연구책임자 : 김 성 기

참 여 연 구 원 : 이 인 정, 안 문 일, 박 주 현, 윤 성 미

제2협동연구기관명 : 영남대학교

제2협동연구책임자 : 윤 해 근

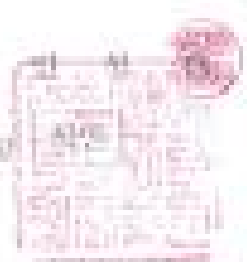
참 여 연 구 원 : 안 순 영, 김 선 애, 김 은 수, 이 국 진

제3협동연구기관명 : 건국대학교

제3협동연구책임자 : 정 우 석

참 여 연 구 원 : 박 나 영, 박 봉 숙, 김 남 훈, 이 다 연, 허 지 혜

주관연구책임자 : 윤 건 원
주관연구기관장 : 국립원예특작과학원장



농촌진흥청 농업과학기술 연구개발사업 운영규정 제51조에 따라 보고서
일련에 봉착합니다.

보고서 요약서

과제번호	PJ010174		연구기간	2014.2.1.~2016.12.31.(3년)	
연구사업명	단위사업명	농업공동연구			
	세부사업명	농업기후변화대응체계구축			
	내역사업명	농업분야 기후변화 대응기술개발			
연구과제명	주관과제명	기후변화 시나리오에 근거한 사과, 포도, 감귤, 인삼, 천궁, 당귀 작물의 생산영향평가			
	세부(협동) 과제명	(1세부) 기후변화 시나리오를 적용한 사과 생산영향평가 (2세부) 기후변화 시나리오를 적용한 포도 생산영향평가 (3세부) 기후변화 시나리오를 적용한 감귤 생산영향평가 (4세부) 기후변화 시나리오를 적용한 인삼 생산영향평가 (5세부) 기후변화 시나리오를 적용한 약용작물(천궁, 당귀) 생산영향평가 (1협동) 전자기후도를 활용한 RCP시나리오 적용 주요 과수작물, 인삼, 약용작물 재배의 미래 잠재적 재배적지 시·공간 분석 (2협동) 미래 기상요인(RCP 적용)에 따른 주요 과수작물의 유전자 발현양상 구명 (3협동) 미래 기상요인(RCP 적용)에 따른 인삼, 약용작물의 유전자 발현양상 구명			
연구책임자	구분	연구기관		소속	성명
	1세부	국립원예특작과학원		과수과	한현희
	2세부	국립원예특작과학원		온난화대응농업연구소	손인창
	3세부	국립원예특작과학원		감귤연구소	문영일
	4세부	국립원예특작과학원		인삼과	김장욱
	5세부	국립원예특작과학원		약용작물과	김용일
	1협동	(주) 에피넷		-	김성기
	2협동	영남대학교		원예생명과학과	윤해근
	3협동	건국대학교		응용생물과학과	정우석
총 연구기간 참여 연구원 수	총: 39 명 내부: 20 명 외부: 19 명		총 연구개발비	정부: 660,000천원 민간: 500,000천원 계: 1,160,000천원	
위탁연구기관명 및 연구책임자			참여기업명	(주) 에피넷	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
				보고서 면수 298 매	

〈 국 문 요 약 문 〉

연구의 목적 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 고온조건에 따른 주요 과수와 약용작물의 생산성과 품질 변화 및 유전자 발현 확인 - 기후변화시나리오 적용 주요 과수약용작물의 재배지 변동 예측지도 개발 				
연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> - RCP시나리오에 따른 온도 환경별 주요 과수와 약용작물의 생리·생육 반응 구명 <ul style="list-style-type: none"> · 대상작물: 과수(사과, 포도, 감귤), 약용(인삼, 천궁, 당귀) · 미래 기온조건에 따른 생물계절, 생산성 및 품질 변화 확인 - 온도에 따른 작물별 유전자 특이반응 검정 <ul style="list-style-type: none"> · 주요 biotic/abiotic stress에 반응하여 특이적으로 발현되는 유전자 발현양상 비교 · 기후변화(온도상승)에 대응한 특이발현유전자군의 대량 개발 - 주요 과수와 약용작물의 재배지 변동 예측지도 제작 <ul style="list-style-type: none"> · 대상작물: 사과, 배, 복숭아, 포도, 단감, 감귤, 인삼, 천궁, 당귀 · 재배지 변동 예측지도 개발 <ul style="list-style-type: none"> · 시간해상도: 현재~ 2100년까지 10년 단위 · 공간해상도: 30m급 <p>→ 현재 미래 재배지 변동 예측정보는 웹서비스 중</p>				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	<ul style="list-style-type: none"> - 주요 과수와 약용작물의 기후변화 대응 연구기초·기반자료 제공 <ul style="list-style-type: none"> · 기후변화에 따른 주요 과수와 약용작물의 생산성 및 품질 변화 예측 기술 개발 - 기후변화 관련 농업정책 추진과 영농의사결정 지원 - 기후변화 대응 내재해성 과수 품종 육성 효율증진 - 내재해성 과수 품종육성을 위한 분자생물학적 육종소재 개발 - 분자생물학적 정보에 기초한 기후변화 피해 예측 모델 개발 정보제공 <ul style="list-style-type: none"> → 기후변화에 따른 주요 과수와 약용작물의 수급불안 경감 기여 				
중심어 (5개 이내)	고온	생물계절	생산성	지구온난화	지리정보

〈 Summary 〉

Purpose& Contents	<ul style="list-style-type: none"> - Determination of productivity, quality variation and gene expression in major fruit and medicinal crops under high temperature condition. - Development of cultivation suitability map of major fruit and medicinal crops applied climate change scenarios. 				
Results	<ul style="list-style-type: none"> - Determination of growth and physiological response in major fruit and medicinal crops under the temperature conditions based on RCP scenarios. <ul style="list-style-type: none"> · Object: fruit crops (apple, grape, citrus), medicinal crops (ginseng, cinidium, Korean angelica) · Confirming the changes of biotic season, productivity and quality in major fruit and medicinal crops - Evaluation of genes expressed differentially to high temperature <ul style="list-style-type: none"> · Analysis of expressions of genes in response to abiotic stress · Development of mass genes responding to high temperature and analysis of their function in fruit coloration - Development of cultivation suitability map of major fruit and medicinal crops. <ul style="list-style-type: none"> · Object: fruit crops (apple, pear, peach, grape, sweet persimmon, citrus), medicinal crops (ginseng, cinidium, Korean angelica) · Development of cultivation suitability map <ul style="list-style-type: none"> · Time resolution: from now until the year 2100 (every 10 years) · Spatial resolution: 30×30m <p>→ Currently, forecasting information is in service via web-service.</p>				
Expected Contribution	<ul style="list-style-type: none"> - Provision of basic research data against climate change in major fruit and medicinal crops <ul style="list-style-type: none"> · Development of yield (quality) prediction technique of major fruit and medicinal crops under the climate change. - Support for agriculture policy and decision making related to climate change. - Contribution to increase the efficiency of breeding fruits resistant to high temperature - Contribution to the development of novel germplasm to be used in fruit breeding program - Contribution to development of effective evaluation system for damages by climatic changes 				
Keywords	high temperature	biotic season	productivity	global warming	geographic information

〈 목 차 〉

제 1 장	연구개발과제의개요	1
제 2 장	국내외 기술개발 현황	4
제 3 장	연구수행 내용 및 결과	6
제 4 장	목표달성도 및 관련분야에의 기여도	273
제 5 장	연구결과의 활용계획 등	274
제 6 장	연구과정에서 수집한 해외과학기술정보	275
제 7 장	연구개발성과의 보안등급	278
제 8 장	국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비현황 ...	278
제 9 장	연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적 ...	278
제 10 장	연구개발과제의 대표적 연구실적	279
제 11 장	기타사항	281
제 12 장	참고문헌	282

제 1 장 연구 개발 과제의 개요

제1절 연구 개발 목적

지구온난화에 따른 기후의 변화는 모든 산업에 영향을 미치지만 농업, 수산업, 축산업 등의 1차 산업에 미치는 경제적 피해가 가장 클 것으로 생각된다. 기후변화에 관한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC) 제 4차 보고서(2007)에 따르면 지난 100년간 전 지구의 온도는 0.74℃ 상승하였으며, 전 지구적으로 1.5 ~ 2.5℃ 상승할 경우 동식물의 20 ~ 30%가 멸종하고 지리적 분포의 변동이 크게 발생할 것이라고 예측하였다(IPCC 제 4차 보고서, 2007). 우리나라는 지구온난화의 영향으로 지난 100년간 평균기온이 1.5℃ 상승하였고, 이 영향으로 개화시기가 빨라졌으며, 그 결과 작물들의 재배적지가 변동하고 있다. 그리고 기상청 기후변화시나리오(2011) 보고서에 의하면, 한반도의 기온은 증가 추세가 뚜렷하게 나타나며, 현재와 비교하여 RCP8.5 시나리오에서는 6.0℃ 까지 상승할 것으로 전망하고 있다. 또한, RCP8.5 시나리오에 의하면 한반도의 강우량은 현재와 비교하여 21세기 후반에 대략 18.7%가 증가할 것으로 전망하고 있다(표 1).

이와 같이 기후변화에 따라 기온이 상승하게 되면 현재 국내에서 주로 재배되고 있는 온대성 작물의 재배지 및 작기·작형 등 작물별 작부체계에 많은 변화가 있을 것으로 생각된다. 2013년에 실시한 ‘기후변화에 대한 농가의 인식 체감도 조사’에서는 시설원예, 과수, 특용작물 부문이 상대적으로 기후변화에 대한 영향정도를 높게 느끼고 있었으며(농촌경제연구원, 2013), 특히 과수와 인삼, 당귀, 천궁과 같은 약용작물의 경우 노지에서 여러 해 생육을 시켜야 하는 작물로 기후변화에 상당히 민감하게 반응할 것이기 때문에 기후변화에 의해 작물별 재배지가 현재보다 북상하고 재배면적 역시 축소될 뿐 아니라(Hwang 등, 2012), 생산성 및 품질 등이 크게 변동할 것으로(윤성호 등, 2001) 예측된다.

따라서 본 연구는 이미 제작된 RCP 적용 농업용 미래상세농업기후도(2013)를 바탕으로 국내 주요 과수작물인 사과, 배, 복숭아, 포도, 단감, 감귤(온주밀감, 만감류), 인삼, 천궁, 당귀 등 9작물의 재배지 변동 예측지도를 제작하고, 농업에 적용 가능한 디지털농업기후도 제작·보급하기 위해 연구를 수행하였다. 또한 기후변화 시 현재에 비해 크게 변화할 것으로 예상되는 사과, 포도, 감귤, 인삼, 천궁, 당귀 등 6작물의 미래환경조건에 따른 생산영향평가를 수행하는 한편, 최종적으로는 기후변화(온도상승)에 대응하여 특이적으로 발현하는 유전자군을 대량으로 개발하여 향후 기후변화에 따른 대응책의 정보와 재료를 제공하고자 연구를 수행하였다.

표 1. RCP 시나리오 미래 전망(자료출처 : 기상청)

RCP 시나리오		RCP 4.5(540ppm)	RCP 8.5(940ppm)
전지구평균	기온(℃)	+3.4℃	+6.0℃
	강우량(%)	+17.3%	+20.4%

제2절 연구 개발의 필요성

기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제시한 기후변화시나리오(RCP, representative Concentration Passway)에 따르면 지난 100년간 연평균 기온은 0.6℃ 상승하였으며, 2100년에는 CO₂ 농도가 약 2배정도 상승하고, 기온은 2.6~4.8℃ 상승하는 등 장기적으로 기온 상승과 같은 기상환경의 변화가 예상되고 있다(IPCC, 2013). 특히 한반도의 연평균기온은 2046부터 2065년까지 3.0℃, 2081년부터 2100년까지는 5.9℃ 증가하며, 특히, 내륙지역일수록 고위도지방일수록 또 겨울철에 상승폭이 크고 일 최고기온보다는 일 최저기온의 상승이 클 것으로 전망하고 있다. 작물의 개화, 품질, 수확시기 등에 영향을 미치는 일조시수는 서서히 낮아지고, 폭염일수의 증가, 영하일수의 감소 등으로 향후 농업에 영향을 미칠 것으로 예측되고 있다(기상청, 2012).

온도와 이산화탄소는 작물이 생육에 필수적인 환경요인으로 작물의 생육, 형태분화 및 생리반응에 커다란 영향을 준다(Ahn and Vergara, 1969; Oh 등, 2014). 또한 적정 범위를 벗어난 온도와 이산화탄소 조건에서는 다양한 생리장애와 병 발생의 원인이 되므로(Lim 등, 2000; Park 등, 2002) 작물의 생산량에 결정적인 영향을 미치기도 한다. 따라서 미래 기후변화 환경조건인 상승된 기온 및 이산화탄소 농도는 재배작물의 작형 및 재배적지 뿐 아니라, 재배작물까지도 변화시켜 농업분야의 큰 변화가 발생할 것으로 전망된다.

기후변화에 대한 농가의 인식 체감도는 시설원예, 과수, 특용작물 부문이 상대적으로 영향 정도를 높게 느끼고 있어서 주요 과수와 약용작물로서는 유념해야 할 사항이라고 생각된다. 이러한 기후변화는 과수 재배에서 많은 변화를 가져오는데, 지난 30년간 사과 ‘후지’와 배 ‘신고’의 만개기가 빨라짐에 따라, 봄철 서리 피해의 위험도가 높아졌고(서형호, 2007), 고온성 생리장애인 일소 및 밀 증상, 포도 및 사과의 착색불량 등이 증가하였다(류수현 등, 2015). 독일의 경우 지난 10년간 생육기간이 10일 늘어났으며(Chmielewski와 Rotzer, 2001), 영국은 과거 재배가 어렵던 사과 ‘브레이번’ 품종의 생산량이 늘어나는 등(Webster, 2005) 환경변화에 따라 재배 상에 많은 변화와 제약이 따른다. 인삼, 천궁, 당귀 등 약용작물의 경우 기능성 식·의약품의 원재료로 최근 수요가 늘고 있는 중요작물이나, 고온에 매우 취약하여 국내재배시 안정성이 떨어지고 수입의존도가 높은 문제가 있다. 또한 최근 온난화로 인해 가장 피해가 심한 약용작물로, 향후 기후변화로 인해 국내 재배가능지가 크게 감소할 것으로 예상되어 기후환경에 대한 생산 및 품질 영향 평가가 시급하다.

따라서 기후변화 시 대응대책을 선제적으로 수립하기 위해서는 주요 과수 및 약용작물을 대상으로 기후변화에 따른 재배지 변동 예측지도의 제작 및 보급을 통해 기후변화에 대응한 정책 수립을 지원하는 한편, 미래 환경요인에 따른 작물별 생산성과 품질 변화 등 영향평가 연구수행을 통해 기후변화 시 수급물량의 변화를 예측할 수 있는 기술 개발이 필요하다. 또한 고온처리에 따른 작물별 특이반응을 검정하고, 주요 biotic/abiotic stress에 반응하여 특이적으로 발현되는 유전자 발현양상 비교하고, 최종적으로는 기후변화(온도상승)에 대응하여 특이적으로 발현하는 유전자군을 대량으로 개발함으로써 기후변화 시 발생하는 생산성 및 품질 변화를 보다 명확히 구명하고 육종 방향의 재설정 등 향후 기후변화에 따른 대응책의 정보와 재료를 마련할 필요가 있다.

제3절 연구 개발 범위

본 연구는 기후변화에 따른 주요 과수 및 약용작물의 생산영향평가의 1단계 연구사업으로 주요 과수 및 약용작물의 연구부서 또는 기관과의 업무협력체계를 구축하여 기후변화에 의한 생산예측 체계를 고도화 할 수 있도록 업무를 공유하고 의견을 수렴할 수 있도록 체계화하였다.

기후변화에 따른 각 작물의 생육특성과 생리반응 구명 연구는 주요 과수작물인 사과, 포도, 감귤과 인삼, 천궁, 당귀 등 6작물을 공시하여 온도구배하우스를 중심으로 연구를 수행하였으며, 필요에 따라 Walk in Growth Chamber 및 파이토타론 등 기후변화 전문 연구시설을 이용하여 생장 전기간 또는 일정 기간 동안의 정밀환경을 조성하였다. 본 연구의 결과로 기후변화에 따른 생물계절 변화, 생산성, 품질 및 기능성 물질의 변화 등을 구명하였고, 이를 이용해 기후변화에 따른 수급 관련 정책 수립 시 기초자료로 제공하였으며 작물 연구부서의 재배법 및 육종 방향 수립에 제공할 계획이다.

기후변화시나리오를 근거한 미래 재배지 변동 예측지도는 국내 주요 과수작물인 사과, 배, 복숭아, 포도, 감귤, 단감과 인삼, 천궁, 당귀 등 약용작물 등 총 9개 작물을 대상으로 작성하였다. 평년(1981-2010), RCP4.5, RCP8.5 기후변화시나리오를 기반으로 한 농업용 상세 전자기후도를 활용하여 각 작물의 재배지(재배적지, 재배가능지, 저위생산지) 구분 기준을 설정하였고, 그 기준에 따라 2020년대부터 2090년대까지의 10년 단위 재배지 변동 지도와 행정구역 단위 통계 자료를 제작하였다. 작물별 제작되는 재배지 변동 지도의 공간해상도는 농가 단위로 확인할 수 있도록 고해상도 30m급이며, 시간 해상도는 월 단위 기후변화시나리오를 활용하여 2010년대부터 2090년대까지 10년 단위로 평균하여 표출하였다.

유전자 반응 연구에서는 사과, 포도, 감귤과 인삼, 천궁, 당귀의 고온처리에 따른 특이반응을 검정하고, 주요 biotic/abiotic stress에 반응하여 특이적으로 발현되는 유전자 발현양상 비교하고, 최종적으로는 기후변화(온도상승)에 대응하여 특이적으로 발현하는 유전자군을 대량으로 개발하여 향후 기후변화에 따른 대응책의 정보와 재료를 생산하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술 현황

현재 국내의 농작물 기후변화 대응연구는 다양하게 진행되고 있다. 기상환경 변화에 따른 원예작물 생리반응 연구로는 온도 및 이산화탄소 농도를 조절할 수 있는 연구시설을 이용하여 고온, 고농도 CO₂에 대한 작물 반응을 조사하거나(이 등 2006), 배추의 생리 생육반응에 관한 연구 등이 진행되었다(손 등 2015). 특히 과수작물에 대해서는 미래 시나리오 기후조건에서 사과 ‘후지’의 재배적지를 GIS기반의 탐색기법을 이용하여 설정하였으며(Yoon 등, 2009), 지구 온난화 및 도시화에 의해 ‘후지’ / M.9에서 가장 큰 문제는 착색불량이며(Wang 등, 2011), 사과 주산지의 기온상승에 따른 후지의 과실품질 변화 예측 연구도 수행되고 있다(사공동훈 등, 2011). 김창명(2002)은 제주도 온주감귤을 대상으로 개화시기, 생육단계별 과실크기, 생산량, 품질에 관련된 기상요인의 영향력을 계측하였으며, 과채류의 공급이 재배면적뿐만 아니라 생육단계별 기상요인의 변화에 따른 단위당 수확량에 의해 크게 변동된다는 보고도 있다(이용선, 2004). 또한 기상요인 변동이 과실 품질에 미치는 영향을 제시한 보고도 있었는데, 착색은 성숙기 일평균기온이 12~13℃일 때에 가장 양호하고, 성숙기의 기온과 음(-)의 상관관계가 있으며, 당도는 일조시간이 많을수록 높아지는 등 생육기의 기상요소가 과실의 품질에 커다란 영향을 주고 있음을 제시하였으나, 기상요인이 과실의 단위당 수확량 결정요인에 미치는 영향은 제시하지 않았다(서형호, 2005). 이산화탄소에 따른 작물 반응과 관련한 연구는 기온상승에 따른 벼 생장, 수량 및 품질을 검토한 실험(이충근 등, 2012), IPCC 기후변화 시나리오에 따른 일부 작물의 재배지 및 생산성 변화 예측 연구가 수행되었다. 인삼, 천궁, 당귀의 기후변화 대응 연구 수행은 내병성, 성분특성 등의 연구 외에 주로 수량 증대를 위해 기상요소와 관련된 인삼의 온도에 대한 생리반응(Park, 1979; Park, 1980), 광량 및 광질이 고려인삼 생육과 품질에 미치는 영향(Cheon 등, 1991), 생육시기별 광량조절이 인삼 지상부 생육에 미치는 영향(Cheon 등, 2003), 온도와 일장조건이 인삼의 생육 및 개화에 미치는 영향(Ahn 등, 1986) 등의 연구가 주로 인삼 생육이 특정 기상요인에서 적합한 범위를 구명하기 위해 수행되었을 뿐, 기후변화와 관련된 연구는 많지 않은 실정이다. 따라서 기후변화에 대응하여 인삼의 고품질화, 생산의 안정성을 증대시키고, 향후 육종방향 설정에도 효과적으로 이용하기 위해 기후변화시나리오를 적용한 미래 기후에서의 인삼 생산 영향평가에 대한 연구가 필요한 실정이다.

농경지 단위의 상세 전자기후도 제작에 관한 연구는 국내에서도 상당히 진전되어 있다. 우리나라와 같이 지형이 복잡한 농경지의 국지 기상을 예측하는 기술이 오랫동안 누적되어 왔다(윤진일, 2010; 윤진일 등, 2001). 농촌진흥청 국립농업과학원에서는 우리나라 61개 작물을 대상으로 토양환경정보시스템 ‘흙토람’ (<http://soil.rda.go.kr>)에서 토양특성 및 일부 기후요소를 고려하여 웹 기반의 재배적지 지도 서비스를 운영하고 있다. 2011년도 전북산림환경연구소에서는 장수군 산림을 대상으로 GIS 기반의 오미자 재배적지 분석 연구를 수행하였다. 이와 같이 전자기후도를 활용한 기후변화 대응 농업정보를 제공함으로써 주요 과수작물의 미래 기후변화 대응책 확립에 기여하고 있다. 하지만 기후변화에 따른 동절기 초저온에 따른 피해조사와 내한성 품종육성을 위한 분자표지 개발 및 내한성과 관련한 특이유전자 대량발굴 연구 등이 수행되고 있으나, 기후 변화 및 과실 생육기의 분자생리학적 접근 및 도출된 결과를 이용해 농업정보를 생산한 연구는 전무한 실정이다.

제 2 절 국외 기술 현황

IPCC는 국제공동프로젝트로 기후변화시나리오를 이용한 작물생산 시뮬레이션 기술을 농업 기후변화영향평가의 핵심기술로 판단하고 연구결과를 제5차 보고서에 수록(www.agmip.org)하고 있다. 기후변화에 따른 과수의 반응 메카니즘과 생산성 변화를 생리생태 및 분자학적인 수준으로 구명, 시뮬레이션 모델을 이용 미래 기후변화 시나리오에 따른 과수의 생산성 변화 구명 연구(미농무성 ARS)가 수행되고 있고, 유럽 다국가 공동연구체인 MARS(Monitoring Agricultural ResourceS)에서 EU 전 지역에 대한 농작물의 생육과 생산량을 모니터링하고 예측하는 CGMS(Crop Growth Monitoring System)를 개발 운영하고 있다. 일본에서는 온난화 영향을 평가하는 맵이나 만상해, 발육불량 등의 대응 기술을 개발하고 있다. 일본에서는 2003년에 이미 『平成 15년도 과수생산구조에 관한 조사보고서』를 통하여 과수농업에 대한 기상변동의 영향에 관한 조사 보고서를 작성한 바 있으며 주요 과수에 대해 지구온난화 전략적 대응체제를 확립하기 위하여 「적응추진협의회」가 활동하고 있다.

Haisheng Chen(2013)은 중국에서 토양 유기물 함량 및 기후조건(연 강수량, 연 누적 일조시간, 연평균기온, 서리 미발생 일 수 등)을 활용하여 담배 재배적지를 선정하였다. 미국 일리노이 대학에서는 일리노이주에서 재배되고 있는 414개 작물에 대한 토성, 토양, pH, 배수등급 및 기후조건(일 최고·최저기온, 강수량, 겨울 극 최저기온, 적산온도 등)을 활용하여 재배 최적지를 구분하는 연구를 진행하였다.

다양한 식물과 과수의 유전자발현 연구를 위한 transcriptome 분석이 활발히 진행 중에 있으며, 과수에서는 microarray 기술을 이용한 분석이 주로 보고되어 왔으며 RNA-sequencing 기술은 현재 진행 중에 있다. 과수의 저온요구도 충족 및 동해저항성과 관련한 유전자의 발현분석과 유용유전자의 대량발굴에 관한 연구도 역시 microarray 기술을 많이 활용하고 있으며 유용한 유전자를 대량으로 발굴하여 활용하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

Transcriptome 분석을 통해 과실의 발육단계별로 특이적으로 발현이 조절되는 유전자를 대량발굴하고 있으며, 과수(사과, 포도, 오렌지 등)의 생육에 있어서 고온 및 자외선, 이산화탄소 농도 변화 등에 따른 유전자의 발현에 관한 연구가 활발히 진행되어 많은 정보를 축적하고 있다. 최근에는 식물의 transcriptome 분석을 위해서 Next generation sequencing기술을 이용한 연구 및 활용성 증대를 위한 연구가 활발하게 진행 중에 있다.



그림 1. 일리노이주를 대상으로 Cron, Soybean, Miscanthus 재배적지지도

제 3 장 연구 수행 내용 및 결과

제1절 기후변화시나리오를 적용한 사과 생산영향평가

가. 연구수행 내용

생육온도별 사과나무의 생리반응을 보기 위하여 ‘후지’ 3년생을 온난화대응농업연구소의 온도구배하우스에 2014년 3월에 재식하였다. 온도구배하우스는 대기 온도를 기준으로 대기온도보다 약 +5℃까지 구간별로 대조구(생육기 평균기온 20.9℃), L(생육기 평균기온 22.5℃), M(생육기 평균기온 24.3℃), H(생육기 평균기온 25.3℃)로 4 시험구로 처리하였다. 2014년부터 2016년까지 3년에 걸쳐 BBCH(Hack 등, 1992)를 이용한 생물계절을 조사하였으며, 영양생장과 생식생장량 조사 및 과실품질 조사를 실시하였다.

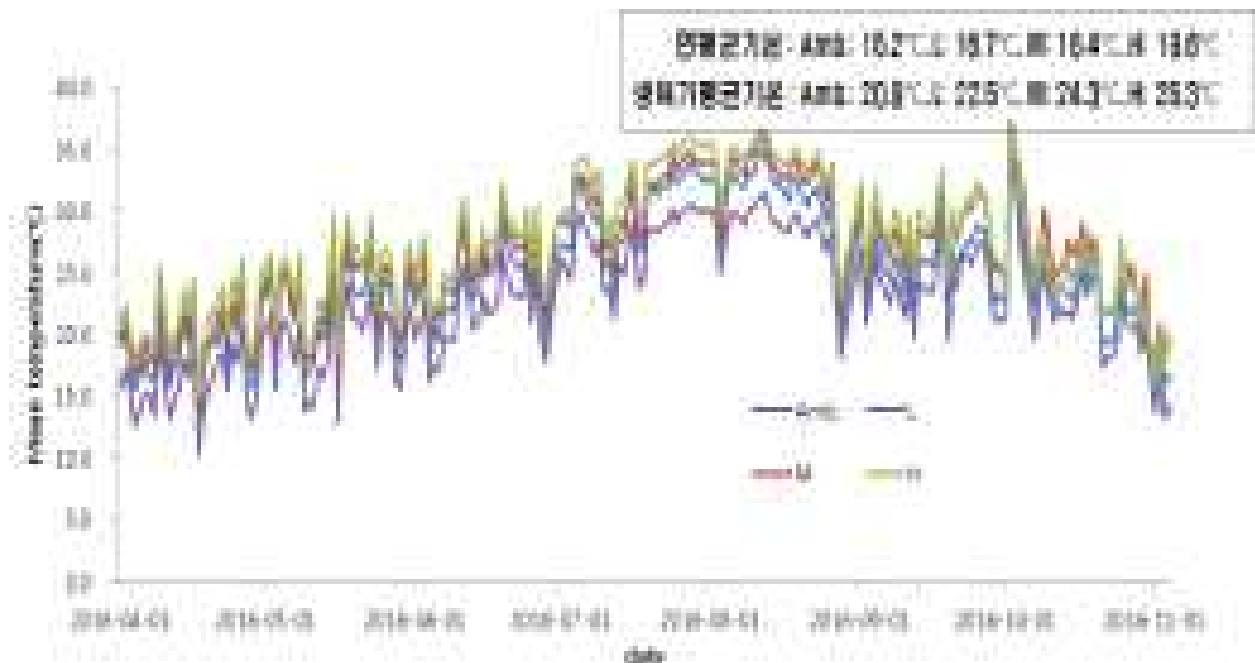


그림 1. 2016년도 온도구배하우스 구간 별 기온 변화

또한, 기후변화 시나리오에 근거한 이산화탄소처리의 생리반응을 확인하기 위하여 2년생 ‘후지’ 사과나무를 포트에 재식하여 2015년과 2016년에 자연광 온실향온(Phytotron)에 4월 말부터 6월 말까지 약 2달에 걸쳐 CO₂의 농도를 현재의 대기수준, 600ppm, 800ppm, 1,000ppm으로 처리하여 생리반응을 분석하고자 영양생장과 물질대사를 조사하였다.

나. 주요 결과

생육온도별 나무의 접목 부 10cm부위를 매년 같은 시기에 측정을 하였다. 재식 당년인 2014년에는 처리간에 차이가 없었으며, 2015년에는 M처리구에서 가장 많이 자랐다. 2014년에 비해 재식 3년차인 2016년의 생장량에 대한 비율에서는 M처리구에서 가장 많았으며 대조구에서 가장 적게 증가하였다(표 1). 이는 사과나무의 신초 생장은 기온이 높을수록 왕성해지나 30℃를 넘게 되면 신초생장이 둔해진다는(Lakso 와 Goffinet, 2003)연구결과와 일치하여 기온이 상승할수록 직경은 증가하나 그림 1에서 보는 바와 같이 너무 고온에서는 다시 직경의 증가가 둔해지는 결과를 얻어냈다.

표 1. 생육온도별 나무 직경 변화(단위:mm)

Treatments	2014.6(A)	2015.6	2016.6(B)	B/A
Amb.	27.3 a	38.5 b	49.7 a	1.82 b
L	23.3 a	38.4 b	46.0 a	1.97 ab
M	24.8 a	44.7 a	52.7 a	2.13 a
H	23.0 a	38.2 b	45.3 a	1.97 ab

생육온도별 만개기를 2014~2016년까지 조사하였으나, 2014년은 재식 당년이어서 데이터에서 제외하고 2015~2016년의 2년간의 조사를 실시하였다(표 2). 만개기는 BBCH(Hack 등, 1992)의 기준에 의하여 조사하였으며, 2015년의 경우 4월 13일조사에서 H처리구는 이미 만개기에 도달하였으나, 대조구에서는 4월 20일경에 만개기에 도달하였다. 이는 2016년도 비슷한 경향이어서 대조구와 H처리구에서의 만개기의 차이는 약 7일 정도 차이가 났다. 이는 대조구와 H처리구의 온도차이가 평균 4.4℃로, 3월과 4월의 평균기온이 높으면 개화가 빨라진다는 이전의 보고(Fujisawa 와 Kobayasho, 2007)와 일치하였다. 다만, 본 연구에서는 구체적인 온도조건과 7일이라는 구체적인 시간을 제시하고 있다. 이전의 보고(김수옥 등, 2009)에서 남한 전역에 사과 ‘후지’가 재식되었다고 할 때, 만개기는 전국 평균적으로 보면 현재 평년에 비해 2011-2040년 평년에는 4.5일 정도 앞당겨지지만 2041-2070년 평년에는 10일 가량 빨라진다고 하였다. 따라서 본 연구에서의 온도에 따른 만개기의 변화는 미래 만개기 예측 자료로 유용하게 쓰일 것으로 생각된다.

만개 후 인공수분을 하여 착과시켰으며 2차 적과 후 주당 과실 착과량을 조사하였다(표 3). 주당 착과량은 2015년과 2016년 모두 처리간에 차이는 없었으나, 2016년의 경우 일부 처리구에서 조류에 의한 피해가 발생하여 처리간에 편차는 많이 발생하였다.

표2. 생육온도별 만개기 조사(BBCH, 2015~2016)

Treatments	2015			2016		
	April 6	April 13	April 20	April 6	April 13	April 20
Amb.	58.3 c	64.3 c	66.8 a	58.8 c	66.6 a	68.5 a
L	59.8 b	64.8 bc	67.0 a	61.3 b	66.5 a	68.8 a
M	60.8 b	65.8 ab	67.5 a	63.8 a	66.7 a	68.8 a
H	63.3 a	66.3 a	67.7 a	65.0 a	66.7 a	69.0 a

표 3. 생육온도별 주당 과실 착과량

Treatments	2015	2016
Amb.	52.67 a	52.33 a
L	57.50 a	66.67 a
M	55.50 a	83.50 a
H	56.33 a	68.00 a

과실 착과 후 횡경의 비대를 2015년과 2016년에 걸쳐 조사하였다(표 4, 표5). 2015년에는 만개 후 약 56일경(만개기가 처리별로 다르나 모든 처리구가 만개기인 4월 20일을 만개기로 정함)에는 L처리구에서 가장 비대하였으나 최종 수확기인 10월 27일에는 대조구와 L처리구에서 횡경의 비대가 가장 컸다. 2016년 역시 생육온도가 가장 높은 H처리구가 가장 과실 횡경 비대량이 작았다. 이는 개화 후 초기 기온(개화 후 6~8주)이 높을수록 세포분열이 왕성해져 초기 과중 및 과실 크기가 커지나(Calderón-Zavala 등, 2004), 기온이 30℃를 넘으면 과실비대가 억제된다는 보고(Tomana, 1983)를 미루어 보아, 상대적으로 높은 생육온도 처리구인 H처리구가 횡경의 비대가 적은 것으로 생각되었다.

표 4. 생육온도별 과실 횡경 비대 현황(2015, 단위 : mm)

Treatments	June 16	July 10	August 21	October 27
Amb.	55.2 b	65.1 a	74.8 a	100.7 a
L	59.5 a	68.9 a	77.1 a	100.1 a
M	56.8 ab	68.7 a	75.2 a	95.5 ab
H	56.0 b	67.7 a	72.4 a	91.7 b

표 5. 생육온도별 과실 횡경 비대 현황(2016, 단위 : mm)

Treatments	May 31(A)	September 5(B)
Amb.	44.0 a	83.9 a
L	42.2 ab	84.5 a
M	42.7 ab	84.2 a
H	40.8 b	70.8 b

생육온도별 과실의 착색을 비교하기 위하여 9월의 같은 시기에 각 처리구마다 사진 촬영을 하였다(표 6). 또한 그 시기에 착색도를 알아보고자 Hunter value를 조사하였으며 그 결과는 표 7과 같다. 표 6에서 보는 바와 같이 대조구의 착색이 가장 좋았으며 생육온도가 높을수록 착색이 낮아졌다. 또한 착색도도 같은 경향이어서, Hunter a 값이 대조구가 가장 높았으며 생육온도가 높아질수록 값이 낮아져 H처리구에서 가장 낮았다. 사과와 달리 생육기 기온이 높을수록 성숙이 촉진되면서 과중, 가용성 고형물 함량 및 에틸렌 발생량이 높아지지만, 착색은 감소하는 것으로 밝혀졌다(Tomana 와 Yamada, 1988; Warrington 등, 1999).

최종 수확기의 과중에서는 2015년에는 무처리구가 가장 무거웠으나 2016년에는 차이가 없었으며, 당도는 무처리구나 생육온도가 무처리구보다 약간 높은 처리구인 L처리구에서 높게 나타났다. 착색도를 나타내는 Hunter a값은 표 7과 같은 결과를 보였다.(표 8). 이는 앞에서도 언급한 바와 같이 ‘후지’의 과피 안토시아닌 함량은 만개 후 146일부터 190일까지의 평균기온이 14~15℃ 일 때 가장 많았다는 보고(이한찬, 1999)와 30℃ 이상의 고온에서는 오히려 억제된다는 연구결과(Tomana, 1983)로 설명될 수 있을 것이다.

이상의 결과를 종합해보면 사과 ‘후지’에서는 기온 상승에 의해 만개기가 빨라지고 영양생장도 많이 이루지지만, 지나친 고온은 영양생장과 과실비대가 억제되고 가장 문제시 되는 착색이 불량해지는 결과를 얻었다. 다만, 착과량에는 온도 상승이 문제가 되지 않아 생산량보다는 과실 품질에 영향을 많이 끼친다는 결론을 얻을 수 있었다.

표 6. 생육온도별 과실 착색도(2015~2016)

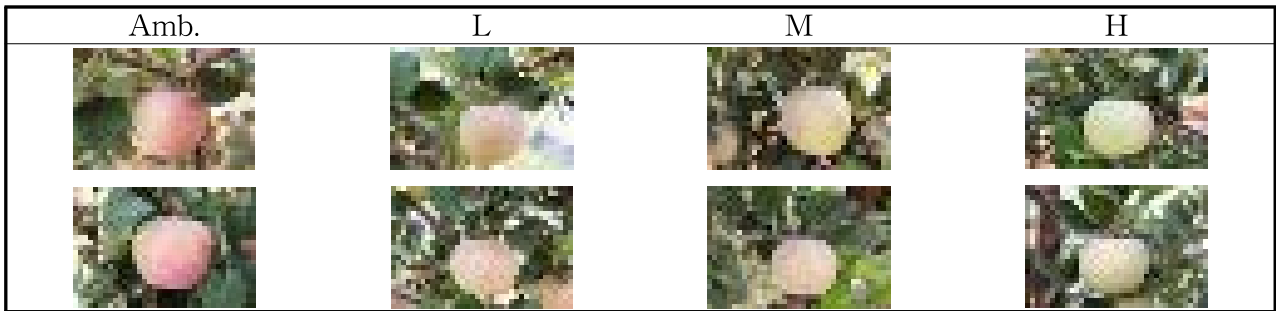


표 7. 생육온도별 착색도

Treatments	Hunter L		Hunter a		Hunter b	
	2015(9.10)	2016(9.23)	2015(9.10)	2016(9.23)	2015(9.10)	2016(9.23)
Amb.	61.55 a	58.64 a	2.94 a	0.36 a	25.08 c	25.88 b
L	65.90 ab	63.31 a	-0.08 b	0.26 a	27.11 bc	27.19 b
M	64.90 ab	65.47 a	-0.04 b	-2.59 ab	29.80 ab	30.92 a
H	68.43 a	66.14 a	-4.65 b	-3.40 b	31.96 a	32.83 a

표 8. 생육온도별 과실품질(2015~2016)

Tre.	Fruit weight(g)		Sugar contents(°Bx)		Hunter a	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Amb.	427.4 a	265.5 a	15.4 a	13.2 ab	15.16 a	5.32 a
L	404.2 ab	293.7 a	15.1 ab	13.9 a	11.32 bc	3.97 a
M	339.3 bc	283.5 a	13.9 c	12.4 b	13.05 ab	-3.53 b
H	311.5 c	267.7 a	14.2 bc	13.1 ab	6.58 c	-4.45 b

CO₂ 농도에 따른 사과나무의 영양생장량을 2015년과 2016년 2년에 걸쳐 조사하였다(표 9). 신초의 길이, internode, 나무당 신초수, 그리고 엽면적을 조사하였는데 모두 유의차가 나지 않았다. 이는 일반적으로 CO₂의 농도가 높을수록 영양생장이 많아지는 결과와 일치하지 않았는데, 아마도 CO₂ 농도 처리 기간이 짧아서(2개월) 그 영향이 미비했을 것으로 생각된다. 엽당 엽면적은 CO₂농도가 높으면 감소하는 경향이었으나 유의성은 인정되지 않았고 엽의 단위면적당 무게는 CO₂ 농도가 높으면 증가되었다는 이전의 보고(권과 한, 2012)가 있어서 추가적인 실험이 필요하다.

표 9. CO₂ 처리별 영양 성장량

Tre.	Shoot length(cm)		internode		Shoot number/tree		Leaf area(cm ²)	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Amb.	35.6 a	44.1 a	1.84 a	1.89 a	14.2 ab	20.3 a	31.8 a	34.7 a
600ppm	34.2 a	40.1 a	1.88 a	1.85 a	16.8 a	20.7 a	30.8 a	31.7 a
800ppm	33.9 a	44.0 a	1.89 a	1.91 a	16.8 a	22.3 a	31.3 a	36.1 a
1,000ppm	34.3 a	43.9 a	1.87 a	1.86 a	11.8 b	21.7 a	32.9 a	34.3 a

그림 2는 CO₂ 처리별 잎의 엽록소 함량을 조사한 성적이다. 2015년과 2016년의 2년에 걸친 조사에서 2015년에는 엽록소a가 처리간에 차이가 나지 않았으며 엽록소b는 무처리구에서 가장 높았다. 반면, 2016년의 경우는 엽록소a의 함량은 무처리구에서 가장 높았으며, 엽록소b 또한 무처리구가 다른 처리구보다 높았다. 엽록체에 전분이 과다하게 축적되면 축적된 전분이 엽록체 막구조를 물리적으로 압박하여 파괴하기 때문에 광합성속도가 저해될 수 있다고 하였다(김과 이, 2001).

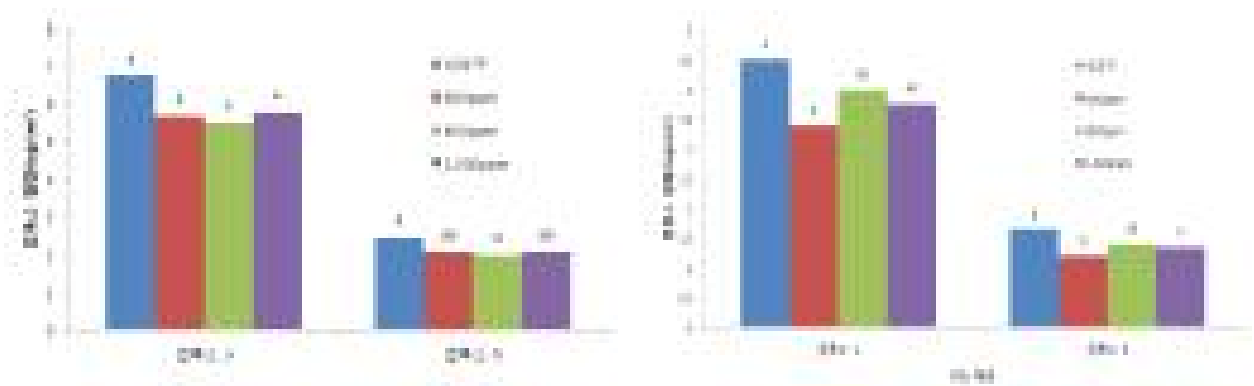
그림 2. CO₂ 처리별 잎의 엽록소 함량(좌:2015, 우:2016)

그림 3은 CO₂ 처리별 잎과 과실의 전분 함량을 조사한 성적이다. 잎에서의 전분함량은 무처리가 다른 처리구보다 가장 낮았으며 과실에서는 처리구간에 차이가 발생하지 않았다. 이를 현미경으로 과육조직과 잎의 구조를 분석하였다(그림 4). 과육조직에서는 대조구에서 전분이 적었으나 이는 1년차의 결과로서 과실이 충분하지 않은 상태였다. 그림에도 불구하고 이전의 연구에서와 같이 사과에서 CO₂의 농도 상승은 전분의 축적이 많았는데 이는 온도보다는 CO₂ 농도에서 더 영향을 받은 것으로 보고하고 있다(권과 한, 2012). Kim 등(2006)은 생장이 끝난 후 잎의 광합성 능력은 감소되는데, 이는 주로 엽록소의 파괴, 엽록체의 광인산화작용의 감퇴, 광합성 효소인 Rubisco의 분해 및 활성 저하 등이 주원인이라고 하였다. 대기중의 CO₂농도가 높아지면 광합성활동이 활발해져 잎의 전분이 많아지지만, 생육 적온이상의 고온에서는 호흡작용이 왕성해져 양분의 소모가 많아진다는 보고(이 등, 2009)도 있다.

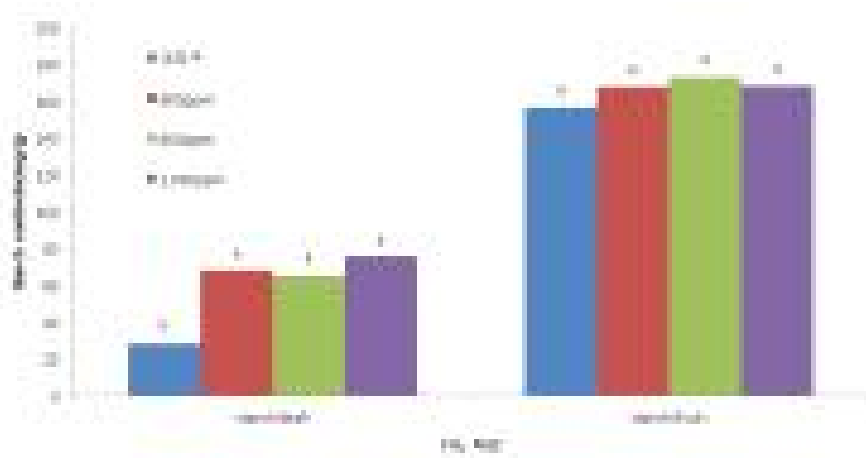


그림 3. CO2 처리별 잎과 과실의 전분 함량(2016)

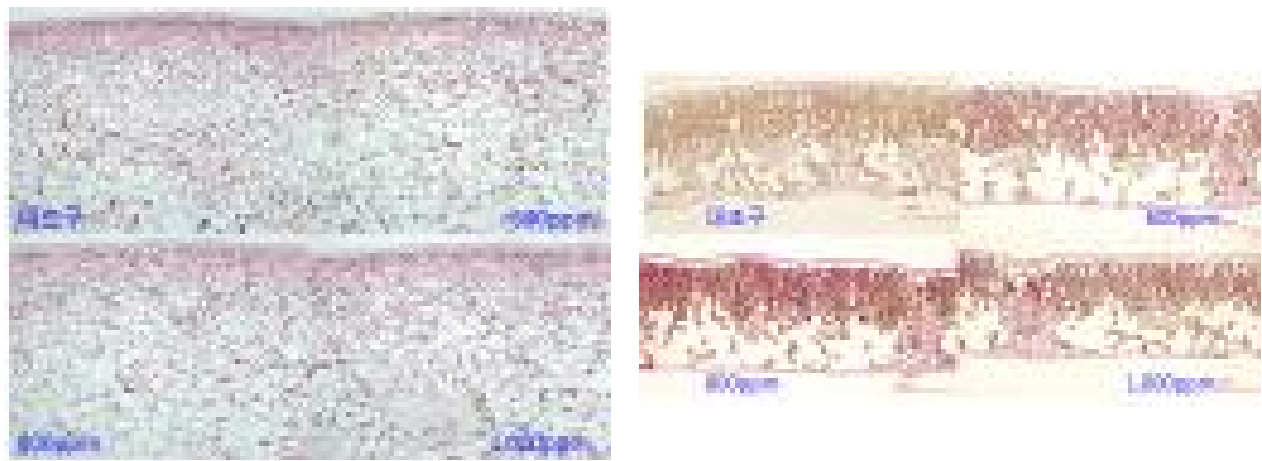


그림 4. CO2 처리별 과육조직(좌, 2015) 및 잎의 구조(우, 2016)

협동과제의 “온도별 처리에 따른 사과 유전자 발현 분석” 연구 수행을 위하여 사과 ‘후지’ 품종을 대상으로 국립원예특작과학원 과수과의 자연광온실(Phytotron)에서 1) 25℃ 구 : 23/27, 야간/주간, 2) 30℃ 구 : 28/32, 야간/주간, 3) 32℃ 구 : 30/34, 야간/주간, 4) 35℃ 구 : 33/37, 야간/주간으로 2015년 9월 15일부터 17일까지 0, 24, 48시간으로 각각 처리하여 광합성 및 전분합성관련 유전자, DEG로 선발된 유전자의 발현확인을 실시하였다.

전자기후도 작성을 위한 사과, 배, 복숭아 생육조건 관련 기초자료 확보를 위하여 여러 문헌들을 조사하였으며(오성도 등, 2004) 여러 번의 관련 전문가 협의를 거쳐 재배적지, 재배가능지, 저위생산지 또는 부적지로 구분하였다(표 10, 표 11, 표 12). 수체 생육에 영향을 미치는 온도는 낮은 기온은 생장에 나쁜 영향을 주고, 높은 온도는 광합성에 좋은 영향을 주어 수체 생장뿐만 아니라 개화, 과실발달을 좋게 한다. 따라서 기온을 중심으로 생육조건을 제시하였다.

사과의 경우, 세계적으로 유명한 주산지가 생육기 연평균기온 13.5~18.5℃ 사이에 있으며, 배는 일평균기온이 10℃ 이상의 연간 일수가 240~215일 정도면 생육이 양호하다. 이 이상의 온

도는 생장 생리대사에 지장을 주기 때문에 생육에 지장을 준다. 복숭아는 눈의 발아 전에 뿌리 생장이 일어난다. 그러므로 겨울이 온난하면 뿌리의 활동이 일찍 시작되어 수액이동이 이루어지고 눈이 발아의 징후를 보이는데 이때 갑작스런 저온은 눈의 동해를 발생한다. 그래서 사과나 배보다 극최저기온이 상대적으로 낮다. 신초의 정상적인 생육은 배와 같이 10℃ 이상의 연간 일수가 240~215일 정도면 생육이 양호하다(오성도 등, 2004).

표 10. 전자기후도 작성을 위한 사과 생육조건 제공

기후요소	재배적지	재배가능지	저위생산지 또는 부적지
생육기 평균기온	14.5~18.5	13.5~14.5, 18.5~19.5	<13.5, 19.5<
연평균기온	7.5~11.5	6.5~7.5, 11.5~12.5	<6.5, 12.5<
성숙기 평균기온	10.0~20.0	-	<10, 20.0<
극최저기온	-30<	-32	-35

표 11. 전자기후도 작성을 위한 배 생육조건 제공

기후요소	재배적지	재배가능지	저위생산지 또는 부적지
생육기 평균기온	18.5~21.5	17.0~18.5, 21.5~23.0	<17.0, 23.0<
연평균기온	11.5~15.5	10.0~11.5, 15.5~17.0	<10.0, 17.0<
발아기 평균기온	10.5~13.5	8.5~10.5, 13.5~15.5	<8.5, 15.5<
극최저기온	-25<	-30.0~ -25.0	<-30.0

표 12. 전자기후도 작성을 위한 복숭아 생육조건 제공

기후요소	재배적지	재배가능지	저위생산지 또는 부적지
생육기 평균기온	18.0~23.0	16.0~18.0	<16.0, 23.0<
연평균기온	11.5~15.5	10.5~11.5, 15.5~16.5	<10.5, 16.5<
극최저기온	-20.0<	-23~-25	<-25

제2절 기후변화시나리오를 적용한 포도 생산영향평가

1. 연구수행 내용

가. 기후변화시나리오에 근거한 온도처리가 포도 생육 및 생리반응에 미치는 영향

(1) 시험재료 및 재배관리

본 연구는 기후변화에 따른 포도의 수체 생육 및 과실 특성 변화를 구명하기 위하여 국립원예특작과학원 온난화대응농업연구소의 온도구배하우스에 2013년 4월에 2년생 ‘거봉’ 포도를 정식하여 2014년부터 2016년까지 3년간 시험을 수행하였다. 온도구배하우스는 폭 2.5m × 길이 27m의 규모로 자연광과 온풍기를 이용해 대기온도부터 최대 대기온도+6.0℃ 조건까지 온도구배가 연중 이루어지는 가능한 시설이다(그림 1) 본 연구의 온도구 설정은 온도구배조건을 이용해 총 4수준의 온도구(A구, 대기기온과 유사한 온도구; B구, 대기기온 대비 약 1.5~2.0℃ 상승조건; C구, 대기기온 대비 약 3.0~4.0℃ 상승조건; D구, 대기기온 대비 약 4.5~6.0℃ 상승조건)로 구분하였다. ‘거봉’ 포도의 수형은 시설 특성 상 개량 일자형 수형을 채택하였으며 2013년 4월에 자람새가 일정한 2년생 ‘거봉’ 포도를 주간거리 2m 간격으로 정식하였고, 시비 등 관리는 유핵포도의 관행재배에 준하여 관리하였다.

(2) 생물계절

(가) 온도구배하우스 내 ‘거봉’ 포도 생물계절 조사

BBCH scale을 이용해 포도의 생육단계를 총 100단계로 구분하여 조사기준으로 사용하였다. 본 연구에서는 발아기, 접엽기, 만개기, 변색기, 수확기를 중점적으로 조사하였으며, 일반적으로 7-10일 간격, 발아기와 만개기, 변색기 등 주요 생육단계에는 3-4일 간격으로 조사하였다. 온도구마다 수체 단위로 조사하여 평균하여 생물계절을 특정하였다.

(나) ‘거봉’ 포도의 기준온도 및 저온고온 요구도 구명 및 미래 변화 예측

‘거봉’ 포도의 기준온도 및 저온·고온요구도를 구명하기 위해 2002년부터 2013년까지 경기도 수원 지역의 ‘거봉’ 포도 작황자료와 기온자료를 Cesaraccio가 2006년 제시한 순차휴면모형에 적용하였다. 도출된 ‘거봉’ 포도의 기준온도, 저온 및 고온요구도와 2015년부터 2016년까지 온도구배하우스의 온도구별 일최고·최저기온, 발아일과 만개일 자료를 이용해 순차휴면모형에 적용하여 검증하였다. 미래 기온상승조건에서 ‘거봉’ 포도의 발아일과 만개일 예측을 위해 포도 주산지 중 하나인 경상북도 상주시의 최근 5년간(2012~2016년)의 기온자료를 기준으로 2.0℃, 4.0℃,

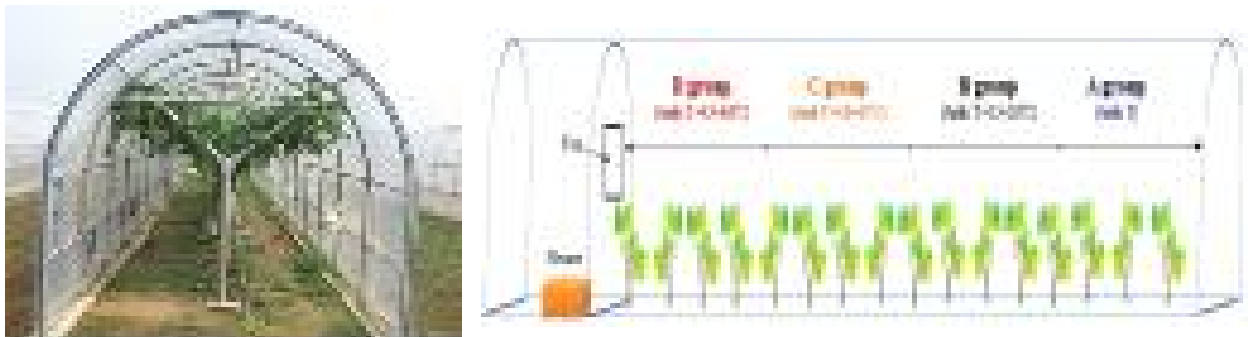


그림 1. 온도구배하우스와 온도구 설정

6.0℃ 상승시켜 각각의 발아와 만개일의 변화를 예측하였다.

(다) 수체생육 및 과실특성 조사

‘거봉’ 포도의 주간직경, 신초직경 등 수체의 생육특성을 생육기 중 경시적으로 조사하였다. 온도구별로 수확시기를 2단계로 구분하여 수확하였으며, 과방중과 과립수는 온도구별 1주단위로 모든 과방을 전수조사하여 조사하였다. 과립크기는 과립이 착립하여 조사가 가능한 시기인 만개 후 약 14일 이후부터 과방의 상단부 과립을 표시하여 7일 간격으로 변화를 조사하였다. 착색도는 칼라차트, 색차계, 안토시아닌 등 세가지 방법을 이용해 조사하였다. 칼라차트를 이용한 육안판별법은 변색기 이후부터 수확기까지 조사하였으며, 색차계는 수확기 40과립을 무작위로 선별해 측정하였다. 안토시아닌 분석은 1,2차 수확기에 온도구별 정상적인 생육을 보였던 과방을 대상으로 무작위로 과립을 선별해 분석하였다.

(라) 기후변화시나리오 적용 미래 잠재생산량 예측지도 개발

2015년과 2016년 실험결과를 이용 ‘거봉’ 포도의 1주당 생산량을 구하였다. 이를 이용해 생육기(4-10월) 기온과 상관관계 확인 후 예측식을 도출하였다. 예측식은 6협동과제에서 2014년에 발표한 미래 기후변화시나리오를 적용한 포도 재배지 변동 예측지도를 이용해 잠재 생산량 예측지도를 작성하였다. 기존의 재배지변동 예측지도의 경우 재배적지, 재배가능지, 저위생산지(재배부적지) 등 3단계로 구분되어 있으나 본 연구에서는 재배적지는 재배 시 생산성 및 품질이 우수한 지역으로, 저위생산지는 재배 시 경제적 이윤창출이 어려운 지역으로 정의하였다. 재배가능지의 경우 도출된 예측식을 이용해 품질에 대한 고려 없이 재배적지와 동일하게 잠재생산량이 100, 90, 80, 70% 지역으로 4수준으로 구분하여 지도로 표출하였다.

나. 이산화탄소 농도에 따른 포도 생육 및 생리반응 구명 연구

(1) 시험재료 및 재배관리

본 연구는 전라북도 전주시에 위치한 국립원예특작과학원 내 실시간 온도 기반인 파이트론을 이용해 이산화탄소 농도를 400, 600, 800, 1000ppm으로 다르게 설정하여 수체의 생육 및 생리반응 변화를 구명하였다(그림 2). 포도는 3년생 ‘거봉’ 품종을 공시하여 용적 40L의 포트에 정식한 후 발아기 이전인 4월 1일에 처리를 실시하여 6월 30일까지 90일간 처리하였다. 시비 및 수분관리 등 재배관리는 포도 표준재배법에 준해 관리하였다.

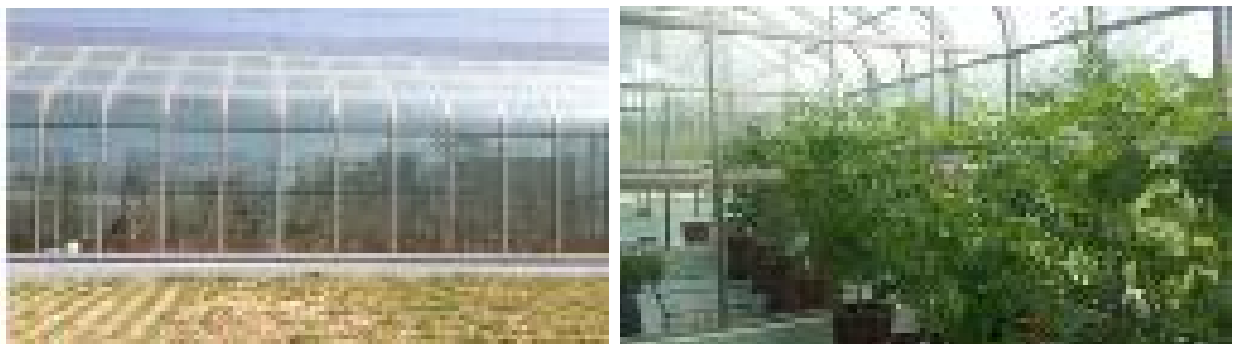


그림 2. ‘거봉’ 포도의 이산화탄소 처리 시설 및 전경

(2) 수채 생육특성 조사 및 분석

‘거봉’ 포도의 생육조사는 신초길이, 신초직경은 경시적으로 조사하였으며, 신초중, 엽중 및 엽서별 엽면적은 시험 종료 후 전수 조사하였다. 광합성, 기공전도 등 생리반응은 6월 28일 성엽을 선정하여 PPFD 0~2000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 범위로 측정하였다.

잎의 형태적 관찰은 실험 종료일인 6월 30일에 잎 조직 절편을 2×2mm 크기로 채취하여 2.5% glutaraldehyde에 넣은 즉시 조직에 포함되어 있는 기포를 제거하였다. 모든 과정은 4℃에서 진행되었으며 1차 고정 90분간 처리 후 0.1M phosphate buffer(pH 7.2)로 15분 간격으로 4~5회 세척하였다. 2차 고정으로는 1% osmium tetroxide로 4℃에서 90분간 처리한 후, 0.1M phosphate buffer(pH 7.2)로 20분 간격으로 4~5회 세척한 후 마지막 phosphate buffer에서 하룻밤을 경과한 후 탈수하였다. 탈수 후에는 epon의 조직 내 침투를 더 용이하게 하기 위해 ethanol과 propylene oxide를 1:1로 섞은 용액에 sample을 15분간 경과시킨 후 순수 propylene oxide에 15, 15, 30분간 침지한 후 epon에 매몰(embedding)하기 위하여 propylene oxide와 epon을 2:1, 1:1로 섞은 용액에 처리하였다. 새로운 epon으로 바꾸어 15분간 처리한 후 epon+D.M.P 30(epon의 1.5% 첨가)을 시료 절편과 함께 silicon mold에 넣어서 60℃에 4일간 열중합시켜 epon block을 만들어 초미세절편기(Ultracut R, Leica Co)를 이용하여 1,500nm의 두께로 시료를 절단하여 slide glass 위에 치상하고, 60℃에서 5시간 이상 건조시킨 후 염색하였다. 염색 과정은 제작된 조직 절편은 0.5% periodic acid(H_5IO_6) 용액에 30분간 담근 후 증류수로 10분간 2~3번 세척, Schiff's reagent에 15분간 처리, 1% sodium bisulfite 용액에 5분간 처리, 흐르는 물로 30분간 세척하는 순서로 실시하였다. 염색이 끝난 시료는 광학현미경(Axioskop 2, Carl Zeiss Co., Germany)으로 100배로 검경·촬영하였다.

FT-IR(Fourier transform infrared) 스펙트럼 조사는 Tensor 27(Bruker Optics GmbH, Ettlingen, Germany)를 사용하였고, DTGS(deuterated triglycine sulfate) 검출기로 분석하였다. 추출된 sample 중 5 μl 를 384-well ZnSe plate에 분주하여, 37℃ hot plate에서 약 20분간 건조한 후 ZnSe plate는 Tensor 27에 장착된 HTS-XT(Bruker Optics GmbH) 고효율 자동화 장치를 이용하여 스펙트럼을 조사하였다. FT-IR 스펙트럼 데이터의 다변량 통계분석을 위해 먼저 FT-IR 스펙트럼 데이터의 baseline 교정, normalization 및 mean centering 등 스펙트럼의 전처리 과정을 R 프로그램(version 3.3.1, Auckland, New Zealand)을 이용하여 수행하였고, Baseline 교정을 위해 FT-IR 스펙트럼 분석 영역의 양 끝점 (1,800-800 cm^{-1})의 흡광도를 0으로 조정하였으며 실험상의 오차를 최소화하기 위하여 각 스펙트럼을 동일 면적으로 normalization 하였다. 가공된 FT-IR 스펙트럼 데이터는 NIPALS 알고리즘을 이용하여 R 프로그램(version 3.3.1)에서 PCA (Principal component analysis)와 PLS-DA (Partial least square discriminant analysis) 분석을 수행하였다.

2. 연구결과

가. 기후변화시나리오에 근거한 온도처리가 포도 생육 및 생리반응에 미치는 영향

(1) 2014~2015년 온도구배하우스 내 온도구별 기온변화

연구기간 중 온도구배하우스 내 각 온도구별 기온변화를 관측한 결과는 그림 3과 표 1과 같다. A온도구 기준 2014년 연평균기온은 15.5℃, 2015년 15.2℃, 2016년 15.6℃로 포도의 적정 연평균 기온범위에 준하였다. 3년간 A구와 D구간 연평균기온차는 3.2~4.1℃ 범위로 목표했던 4.5~6.0℃ 기온차보다 조금 낮은 수치이었다. 그림 3에서처럼 온도구배하우스는 겨울철에 온도구배차가 적고 생

육기(4월~10월) 온도구배차가 큰 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 주로 다룰 과실의 생산성, 품질에 영향을 미치는 시기인 4월~10월까지의 평균 기온차는 이보다 온도구배차가 크게 형성되고 본 연구에서는 년차간 비교를 하기 때문에 적게 형성되는 온도구배차는 극복할 수 있었다.

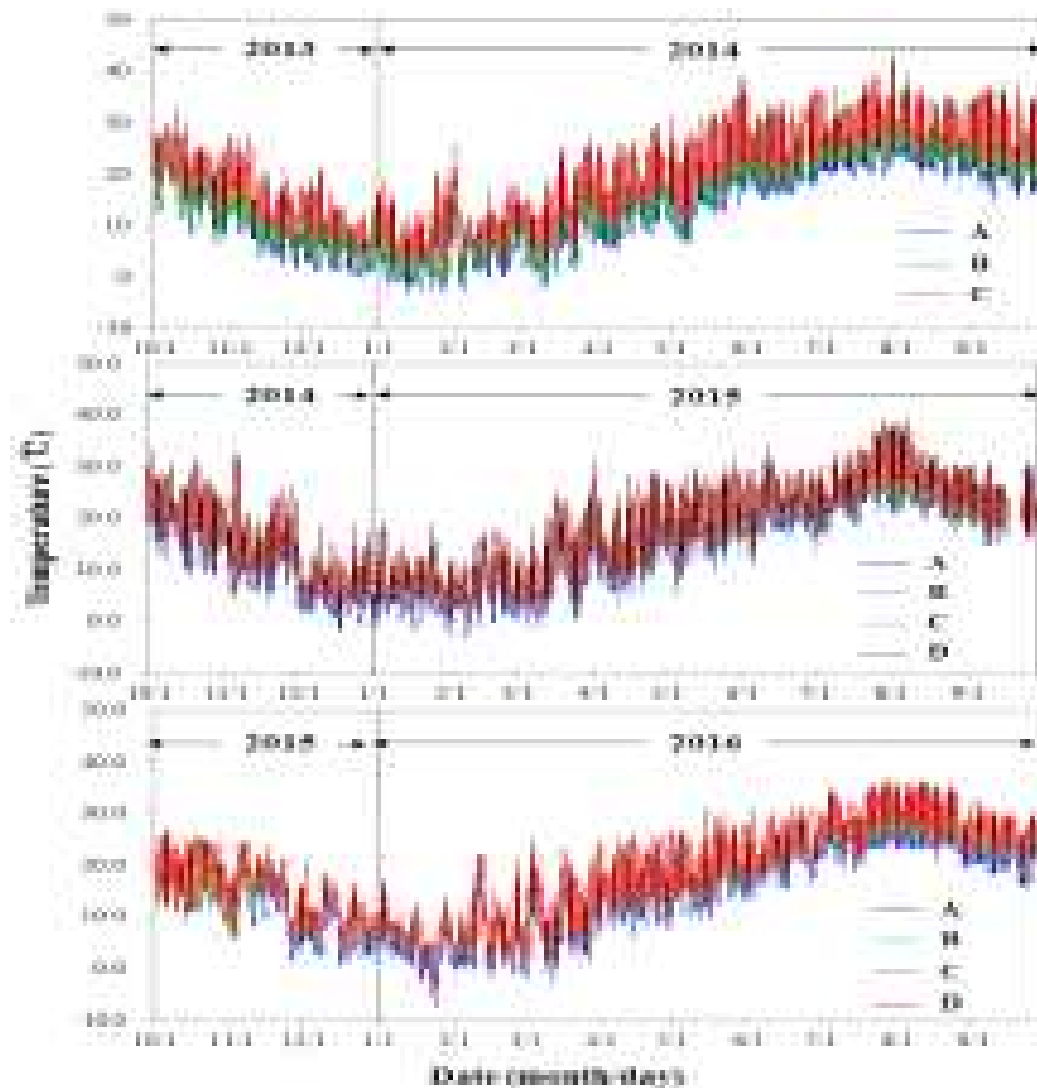


그림 3. 3년간 온도구배하우스 내 기온

표 1. 2014~2016년 온도구배하우스 내 온도구별 기온특성

	2014			2015			2016		
	YMT ^z	FYMT ^y	GMT ^x	YMT	FYMT	GMT	YMT	FYMT	GMT
A	15.5	15.4	20.3	15.1	14.8	20.3	15.6	15.6	21.4
B	17.6	17.3	23.2	16.0	15.9	21.0	16.5	16.5	22.2
C	19.5	19.5	25.0	16.9	16.8	21.9	17.3	17.3	23.0
D	-	-	-	18.4	18.1	23.3	18.7	18.8	24.5

z, 연평균기온; y, 휴면고려 연평균기온(전년도 10월 1일~당해년도 9월 30일 평균기온); x, 생육기 평균기온(당해년도 4월1일~10월 31일 평균기온)

본 연구에서는 포도라는 온대과수작물에 대한 연구를 수행하기 때문에 휴면에 대한 고려가 필요하다. 따라서 연평균기온의 개념을 하나 더 추가하였는데 실제 14년도 연평균기온이라면 2014년 1월 1일부터 동년 12월 31일까지의 평균기온을 의미하나 본 연구에서는 온대과수의 휴면을 고려해 전년도 10월 1일부터 당해 9월 30일까지의 평균기온을 ‘휴면고려 연평균기온’으로 명칭하여 사용하였다.

(2) 생물계절

(가) 기온에 따른 생물계절 변화

기온에 따른 ‘거봉’ 포도의 생물계절 변화는 표 2와 그림 4와 같다. 유목기이었던 2014년도 결과를 제외하고 2015년과 2016년도의 결과를 비교한 결과, 2015년도는 최고 고온구인 D구가 3월 30일에 발아하기 시작하여, C구(4월 2일), B구(4월6일), A구(4월10일) 순으로 발아하였다. 2016년 역시 D구(3월 27일), C구(4월 2일), B구(4월3일), A구(4월6일) 순으로 고온구일수록 발아가 앞당겨졌다. 만개일 역시 2015년도는 고온구인 D구는 5월 17일에 만개되어 C구(5월20일), B, A구(5/26) 순이었으며, 2016년에 D구(5월6일), C구(5월12일), B구(5월15일), A구(5월19일) 순으로 순차적으로 만개되었다. 발아일과 만개일은 일반적으로 A구와 D구 간 9~13일 정도 차이를 보였으며 연차에 따라서는 고온이었던 2016년의 생물계절이 2015년보다 다소 앞당겨지는 것을 확인할 수 있었다. 변색기와 수확기 역시 동일한 해에서는 고온구일수록 앞당겨졌으나, 연차 간 비교했을 때 2016년도 변색기는 C와 D구, 수확기는 D구가 2015년도에 비해 오히려 지연되었다. 이 같은 결과는 온도적응성이 높은 포도가 한계범위 내의 고온조건에서는 생물계절이 앞당겨지나, 2015년도에 비해 생육기 평균온도가 약 1℃ 정도 높았던 2016년에는 C와 D구가 착색에 대한 한계온도를 초과했기 때문에 착색에 지장을 받아 지연된 것으로 생각되었다.

표 2. 2015, 2016년 온도구배처리에 따른 ‘거봉’ 포도의 생물계절 변화 비교

Treatments		Date (month/day)				
		Bud breaking	Leaf development	Full bloom	Veraison	1'st Harvest
2015	A	4/10	4/17	5/26	7/23	8/31
	B	4/6	4/16	5/26	7/16	8/27
	C	4/2	4/14	5/20	7/6	8/25
	D	3/30	4/5	5/17	7/1	8/15
	DI ^z (days)	12	12	9	22	15
2016	A	4/6	4/10	5/19	7/18	9/1
	B	4/3	4/8	5/15	7/14	8/29
	C	4/2	4/4	5/12	7/11	8/16
	D	3/27	4/1	5/6	7/3	8/16
	DI (days)	10	10	13	15	15

z, A와 B온도구 간 날짜차이

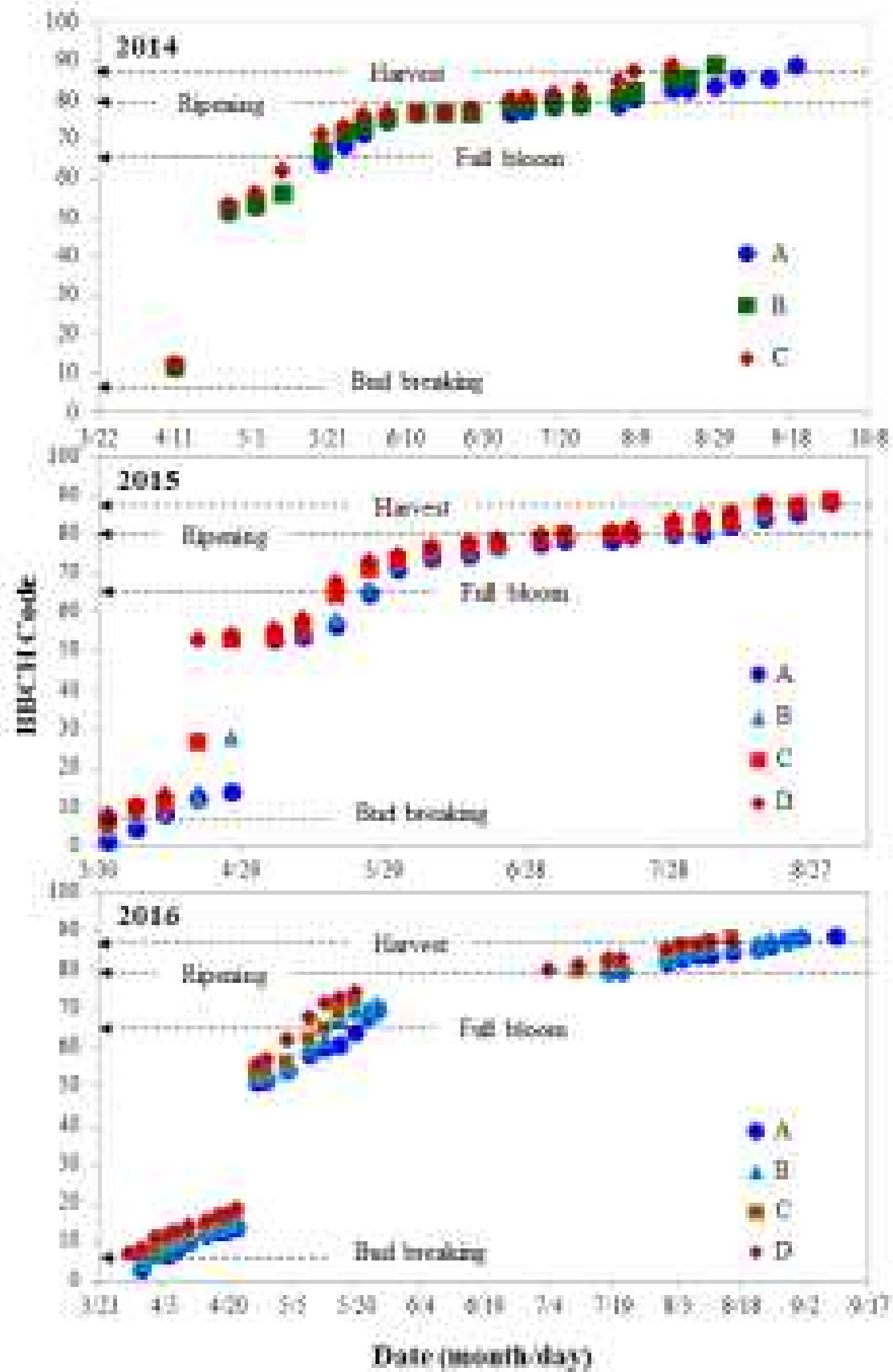


그림 4. 포도 ‘거봉’의 연차별(2014~2016년) 생물계절 변화 양상

(나) 순차휴면모형 이용 ‘거봉’ 포도의 발아·만개일 예측

현재까지 발아기와 만개기를 예측하는 방법으로 다중회귀모형, 발육속도모형 및 순차휴면모형 등 여러 방법이 있다. 그 중 순차휴면모형은 내생휴면이 끝남과 동시에 환경휴면이 시작된다고 가정한 모형(Cannell and Smith, 1983; Hanninen, 1990; Linkosalo, 2000)으로 저온요구도(Cd)와 적산가온(Ca)의 개념을 사용하여, 발아기를 예측하는 모형으로, 저온요구도(CR)가 휴면심도에 다다르기 이전까지 꽃눈은 휴면상태를 유지하다가(내생휴면해제, breaking rest), 이후 적산가온이 저온요구도와 같아질 때를(환경휴면해제, overcoming quiescence) 발아기로 정의하며 발아 후 개화까지 적산가온량을 고온요구도(requirement, HR)라 부른다(김진희 2013). 국내외 많은 연구자들은 Cesaraccio 등 (2004, 2005, 2006)이 제시한 Chill day 모형을 여러 과수작물이나 지역에 적용해 왔다. 예를 들어, Farajzadeh, 등(2010)은 이란의 사과나무의 발아기를 추정하는데 Chill day 모형을 적용한 바 있으며, 국내에는 김진희 등 (2013b)은 기후변화시나리오에 따른 한반도 봄꽃 개화일을 전망하는데 Chill day 모형을 사용한 바 있다. 본 연구에서는 Cesaraccio 등, (2006)가 제시한 Chilling and forcing 모형을 사용하여 미래 상승된 기온조건에서 ‘거봉’ 포도의 발아기와 만개기를 예측하였다.

① ‘거봉’ 포도의 기준온도, 저온요구도 및 고온요구도 구명 및 검증

‘거봉’ 포도의 기준온도 및 저온·고온요구도를 구명하기 위해 2002년부터 2013년까지 경기도 수원 지역의 작황자료(표 3)와 기온자료를 활용하였다. 2002년부터 2013년까지 작황자료와 기온자료를 Cesaraccio가 제시한 순차휴면모형에 적용하여 기준온도(T_c)와 저온요구도(C_R), 고온요구도(H_R)를 추정한 결과, 발아와 만개를 위한 ‘거봉’ 포도의 기준온도는 7.0°C 이었으며, 저온요구도 150.0, 고온요구도 610.9가 가장 오차범위가 적은 값으로 나타났다(그림 5)

표 3. 과거 2002~2013년까지 수원지역 ‘거봉’ 포도의 발아일 및 만개일

	Year											
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Bud breaking	4/13	4/20	4/15	4/24	4/25	4/23	4/19	4/18	-	-	-	-
Full bloom	5/29	6/1	6/2	6/5	6/5	6/8	6/4	6/2	6/9	6/12	5/29	6/7

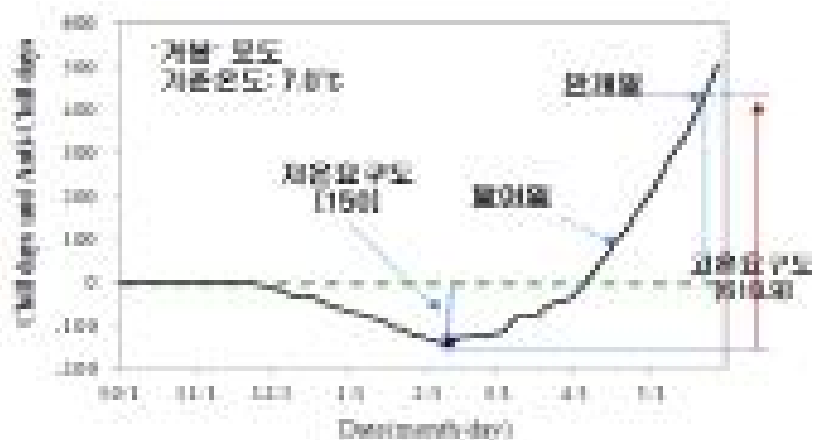


그림 5. ‘거봉’ 포도의 기준온도(T_c)와 저온요구도(C_R) 및 고온요구도(H_R)

이와 같이 산정된 ‘거봉’ 포도의 기준온도(T_c)와 저온요구도(C_R), 고온요구도(H_R) 값을 chill day 모형에 적용해 2015년부터 2016년까지 온도구배하우스에서 조사한 각 8개의 온도구의 기온자료로 각 온도구의 ‘거봉’ 포도의 발아일과 만개일을 예측하여 생물계절 조사자료와 비교하였다(그림 6). chill day 모형을 이용해 예측값과 관측값의 차이는 발아일은 5.73일, 만개일은 4.14일로 나타나 기존의 발육속도모형을 통해 발아기를 예측한 결과가 약 4일 정도이었던 결과에 비해(Yoon 등, 2011) 예측력은 조금 떨어졌다. 이는 2016년도에 가장 높았던 D구의 경우 만개일이 온도구배하우스 내 고온구에서 조사한 결과에서 실제 고온에 의해 발아일이 앞당겨졌음에도 불구하고 chill day 모형을 적용했을 때 12일이 지연되게 예측되어 관측치와 큰 차이가 발생하였다. 이는 기준온도 등 산정할 때 수원지역의 발아일과 만개일 및 수원지역의 기상자료를 이용했기 때문에 이보다 높은 온도구배하우스 내 고온구에 적용하기엔 무리가 있었던 것으로 추정되었다. 따라서 이를 보완하기 위해서는 보다 넓은 온도역의 여러 지점에서 재배된 포도의 발아일과 만개일 결과를 이용해 기준온도(T_c)와 저온요구도(C_R), 고온요구도(H_R) 값을 재산정할 필요가 있다고 생각되었다. 하지만 본 연구에서는 포도의 발아기 뿐 아니라, 만개기까지 예측하기 위해 발아일과 만개일 예측이 가능한 chill day 모형을 사용하여 예측한다. 또한 현재 포도 주산지의 10월부터 6월까지 기온자료가 2016년도 온도구배하우스 내 D구에 비해 낮은 온도조건이므로 미래 예측에는 무리가 없을 것으로 판단되었다.

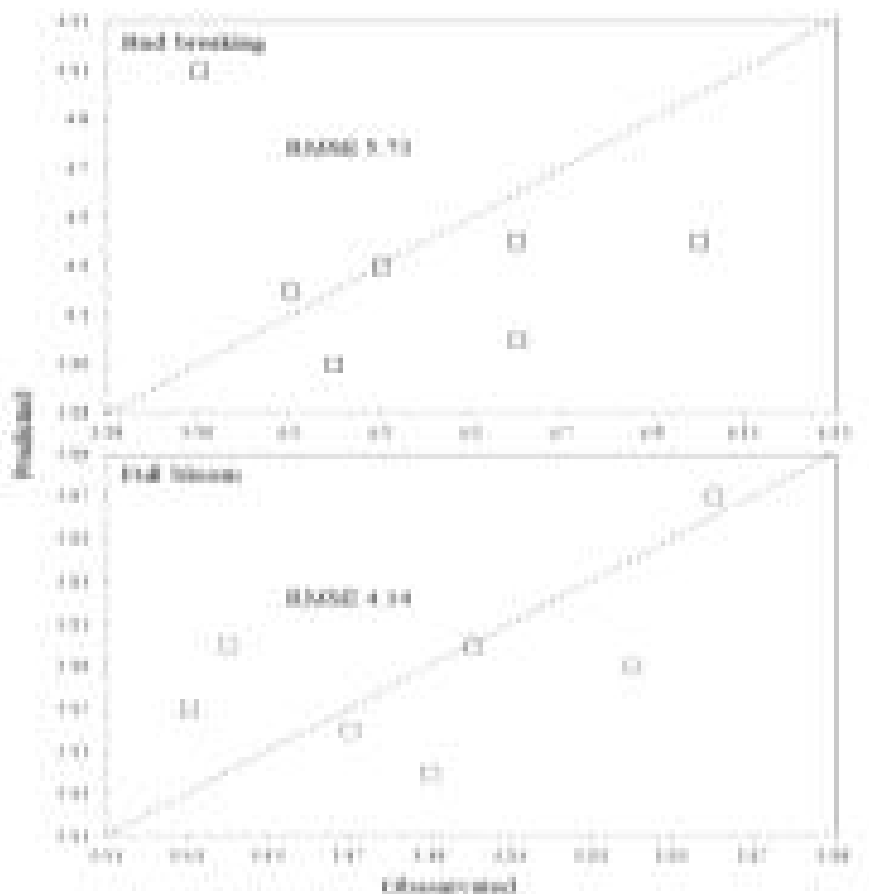


그림 6. 포도 ‘거봉’의 생물계절 관측치와 chill day 모형 이용 예측치와의 발아·만개일 비교

② 포도 주산지의 발아·만개일 예측

산정된 ‘거봉’ 포도의 기준온도, 저온 및 고온요구도를 이용해 미래 상승된 기온조건에 따른 발아일과 만개일을 예측하였다. 예측지역은 포도 주산지이면서 기상관서가 있는 경상북도 상주시로 설정하였으며 기상청의 일별 최고·최저기온자료(최근 5년간; 2012~2016; 그림 7)를 이용해 이를 기준으로 +2.0, 4.0, 6.0℃ 높여 미래 상승된 기상조건을 생성하였고 이를 chill day 모형에 적용하였다.

상주지역의 미래 기온자료를 chill day 모형에 대입한 결과(그림 8), ‘거봉’ 포도의 최근 5년 간 평균 발아일과 만개일은 각각 4월 15일, 5월 28일이었으나, 2.0℃ 상승 조건에서는 4월 5일과 5월 18일로 약 10일 정도, 4.0℃ 상승 조건은 3월 27일, 5월 9일로 6.0℃ 상승조건에서는 3월 18일과 4월 28일로 앞당겨질 것으로 예측되었다. 따라서 기온이 6.0℃ 상승한다는 RCP 8.5 시나리오의 2090년대에는 ‘거봉’ 포도가 현재의 발아기와 만개기보다 약 30일 정도 앞당겨질 것으로 예측되었으며 이로 인해 이상기상에 의한 저온피해 등이 문제될 것으로 예상되었다.

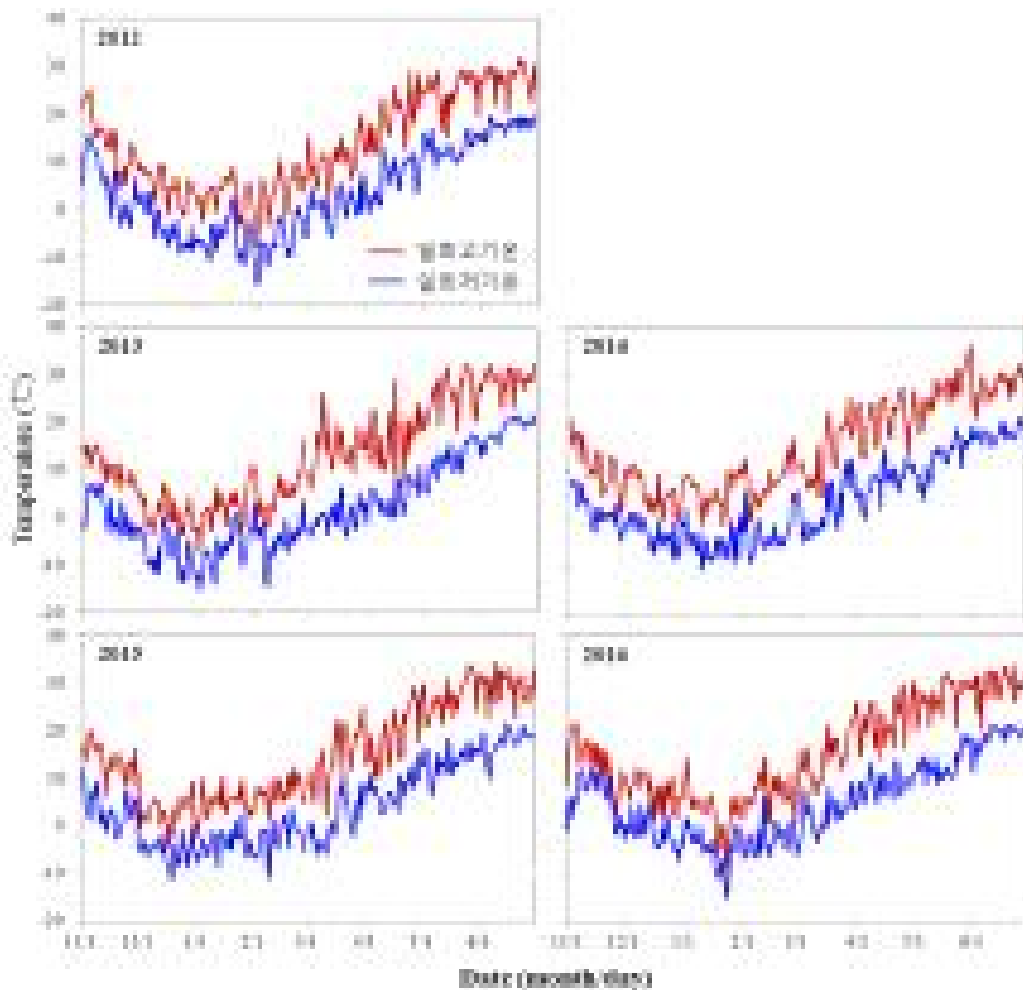


그림 7. 포도 주산지(경상북도 상주시)의 최근 5년간 일최저·최고 기온

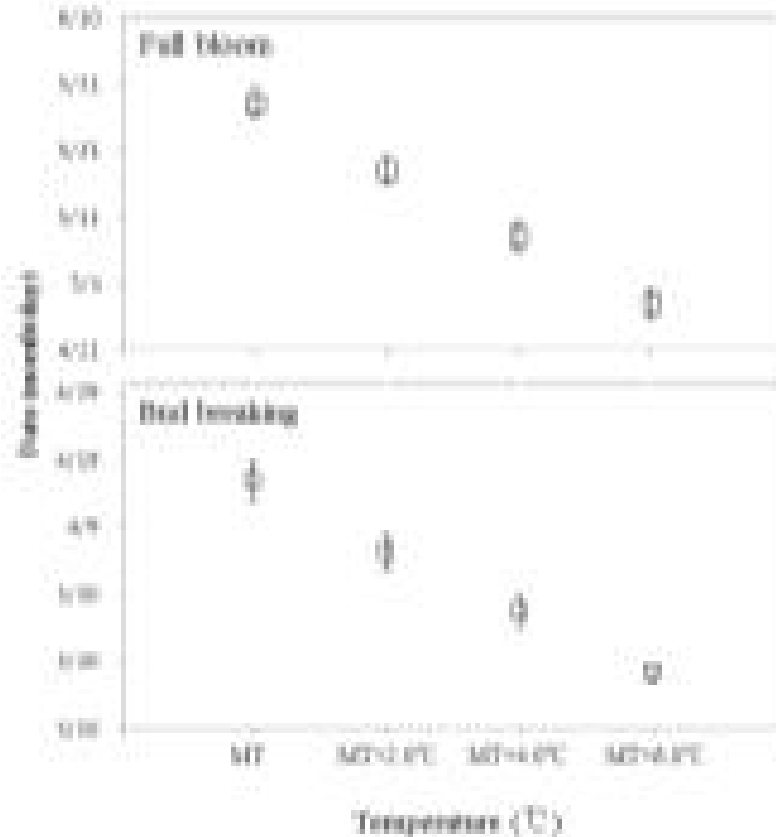


그림 8. Chill day모형 이용 미래 상승기온에 따른 경상북도 상주시의 ‘거봉’ 포도의 발아 만개일 예측

(3) 수체 생육 변화

(가) 주간부 생장

일반적으로 과수작물 등 목본류의 주간직경은 수체생육의 건전도를 확인할 수 있는 지표 중 하나이다. 2014년부터 2016년까지 ‘거봉’ 포도의 주간직경 변화를 조사한 결과(그림 9), 2013년도 정식 시에는 자람새가 비슷한 수체를 선정했기 때문에 처리구 간 주간직경 차가 없었다. 2014년도 측정 초기에는 고온구였던 C구의 주간직경이 가장 낮은 수치를 보였고 A와 B구는 유의하지 않게 높았으나, 6월 30일을 기점으로 A와 B구의 주간직경이 C구에 비해 크게 증가하였다. 2015년도에는 생육기 중 B구가 가장 높았고 A, C, D구 순으로 감소하였으며 2016년도에는 B, C구가 온도구 중 가장 큰 주간직경을 보인 반면, A구와 D구의 주간직경이 크게 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이는 2014년도에는 ‘거봉’ 포도 수령이 3년 차로 착과된 과실량이 많지 않았기 때문에 오로지 온도요인 만이 주간직경에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

온도는 식물의 생리생태에 큰 영향을 미치는데 이는 생육적온을 초과하는 온도조건 하에서 원예작물은 광합성률이 저하되고 호흡률이 증가하기 때문에(Zamski and Schaffer, 1996; Lakso and Seeley, 1978) 순광합성률이 감소하여 수체 생육이 크게 저하된다(Faust, 1989; Tomana and Yamada, 1988; Saure, 1990). 2014년도 생육기 중 온도구별 광합성과 호흡률을 측정한 결과(그림 10), 광합성률은 고온구일수록 광합성률이 소폭으로 증가하나, 호흡률은 약 2.3배 증가하는

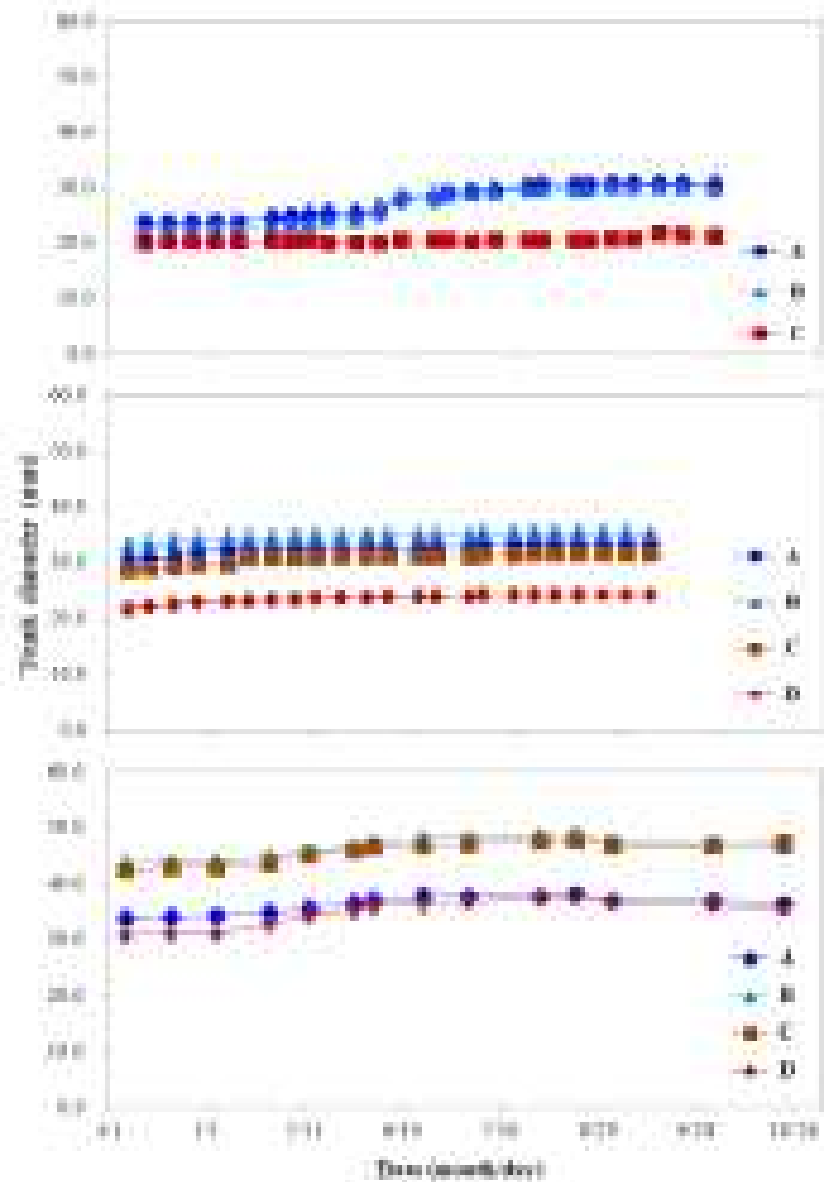


그림 9. 온도구배처리에 따른 ‘거봉’ 포도의 주간직경 변화

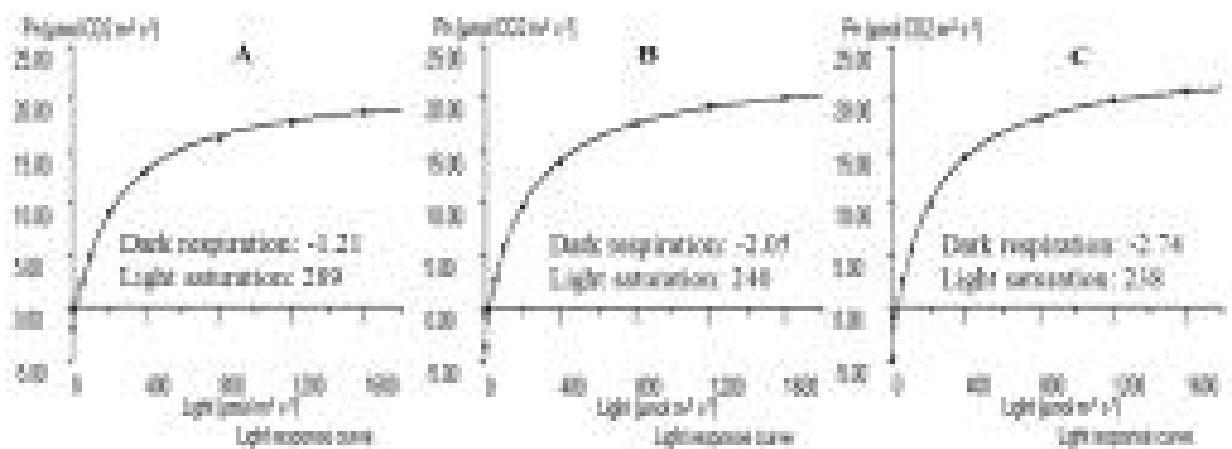


그림 10. 온도구배처리가 포도 ‘거봉’의 PPFD별 광합성률 및 호흡량에 미치는 영향

것으로 나타나 C구의 경우 호흡량 증가에 의해 체내 동화산물량이 감소하여 주간직경 등 수체 생육이 제한받았다고 생각되었다. 2015와 2016년 역시 전반적으로 위의 결과와 유사하였으나, 2016년도는 대기기온과 유사한 조건인 A구와 가장 고온구인 D구의 주간직경이 비슷한 수치를 보여 앞의 결과와 상반되었다. 이 같은 결과는 A구의 경우 다른 온도구에 비해 낮은 온도이기 때문에 생육기가 상대적으로 짧으며, 2015년도와 2016년도 모두 높은 착과량 및 과실생산량을 보였으므로 과실 비대를 위해 앞에서 생산된 동화산물이 분산되어 주간직경 생장이 제한받았기 때문이라고 생각되었다.

(나) 신초직경 및 수세 변화

온도구배 처리에 따른 생육기 기온이 수세와 신초직경에 미치는 영향은 그림 11과 같다. 대기기온과 가장 가까운 A구의 신초 자람새는 ‘거봉’ 포도의 정상적인 수세를 보였으나, B구는 전반적으로 강했고, C구는 강하거나 약한 신초가 불균일하게 혼재되어 성장하였다. D구는 전반적으로 신초의 생장이 약한 것으로 관찰되었다. 광합성은 온도의 변화에 좌우되는데 임계범위 내의 고온에 의해서 효소가 촉매되며 생화학 반응속도를 증가시키므로 광합성이 증가한다. 또한 이러한 고온조건은 잎의 온도 상승에 영향을 미치는 광합성 과정에 영향을 주어 기공전도도에 영향을 주므로 잎과 대기의 수증기압차를 증가시키는데(Lloyd and Farquhar, 2008), Kirschbaum는 지구온난화와 같은 온도상승구에서는 수증기압차가 상대적으로 증가하기 때문에 식물체의 증산량이 상승한다고(Kirschbaum, 2000; Kirschbaum, 2004) 하였다. 하지만 임계범위를 이상의 온도조건에서는 광합성과 관련된 많은 효소가 기능을 상실하기 때문에 광합성이 저하하며(Bieto and Talon, 1996), 이로 인해 앞서 언급한 바와 같이 수체의 생장이 억제될 수 있다.

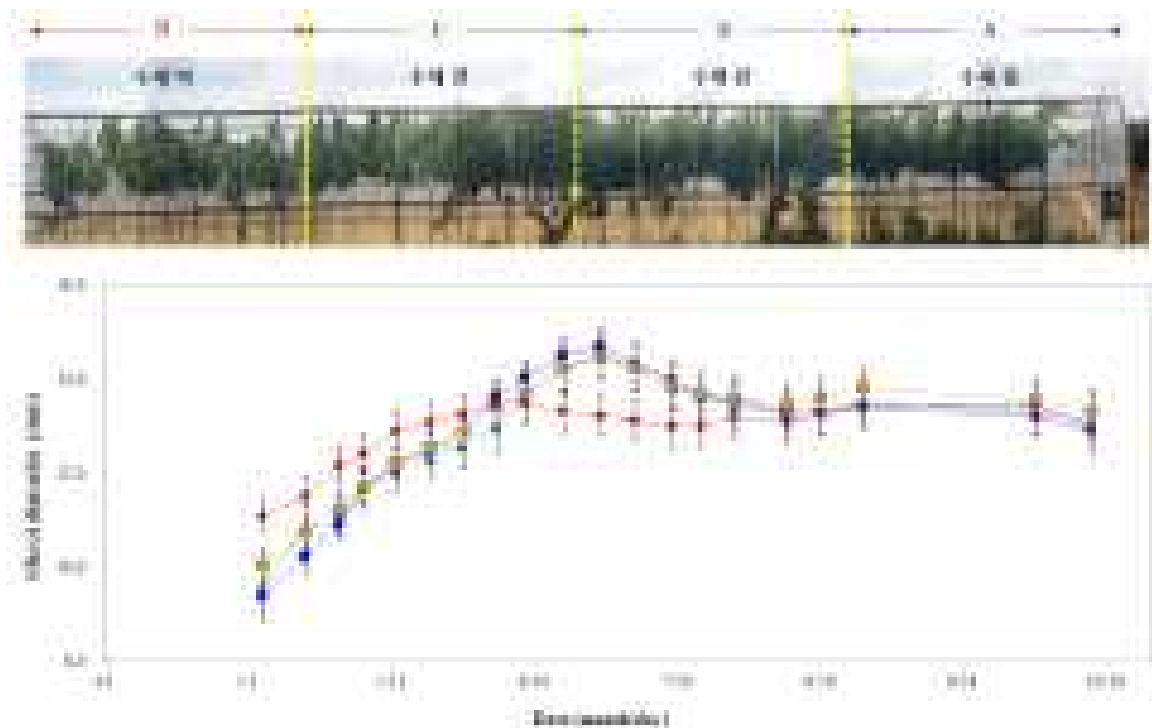


그림 11. 온도구배처리에 따른 ‘거봉’ 포도의 수세와 신초직경 변화

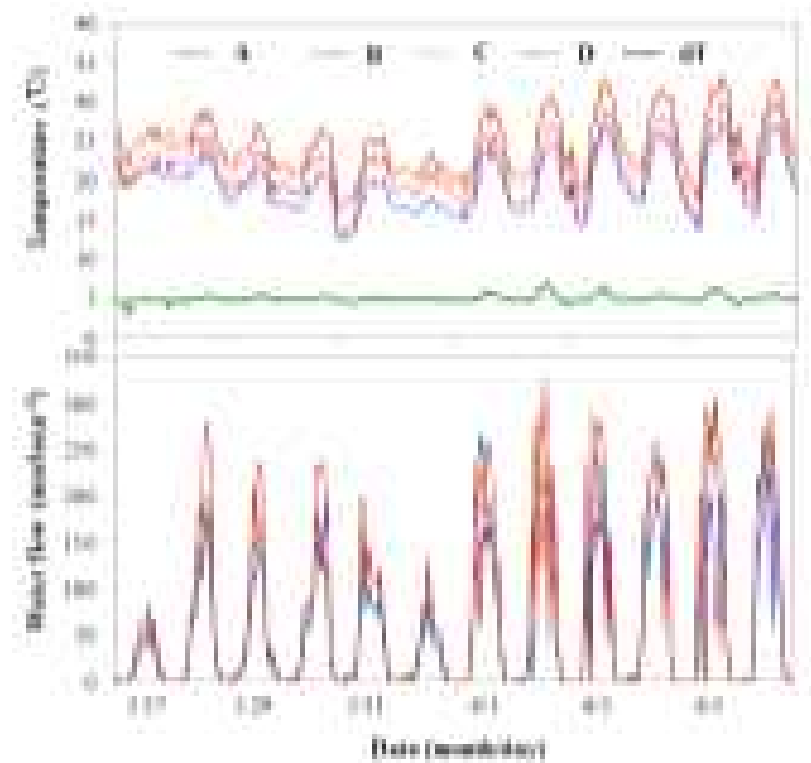


그림 12. 온도구배처리에 따른 ‘거봉’ 포도의 수액흐름 변화

본 연구의 D구의 경우는 ‘거봉’ 포도의 생육에 임계점에 가까운 온도범위이었기 때문에 수체의 생장이 억제된 것이라 생각되었다. 반면 B와 C구의 경우 강한 수세를 보인 것은 수증기 압차의 증가로 증산이 왕성해지므로 토양수분과 함께 흡수되는 무기양분량이 증가되었기 때문이라고 추정되어진다. 실제로 그림 12와 같이 온도조건에 의해 수액의 흐름은 변화를 보였는데 고온조건에서 ‘거봉’ 포도의 수액흐름은 증가하는 경향을 보여 고온에 의한 양수분 흡수량 증가를 설명할 수 있었다. 다만 위의 수액흐름은 본 연구에서처럼 수분공급이 원활했을 경우에 한하며 수분공급이 제한받는다면 오히려 고온에 의해 수분스트레스 현상이 극심하게 발생했을 것이다. 본 실험에서는 유핵포도의 관행적인 재배방법을 따랐기 때문에 만개 전에 적심을 처리하여 신초길이는 확인할 수 없었다.

신초의 직경은 고온구인 D구가 생물계절이 앞당겨지면서 신초직경이 타 온도구에 비해 이른 생장을 보이거나 6월 초순에 들어서면서 역전되며 생육 후반까지 가장 낮은 수치를 보였다. 생육 중반에는 A구가 B, C구에 비해 높은 신초직경을 보이는 듯하지만 7월 초순을 기점으로 신초직경의 감소폭이 커져 B, C구와 유사해졌다가 8월 말부터 C구의 신초직경이 타 온도구 중 가장 두꺼웠던 것으로 나타났다. 생육중반의 A구의 신초직경은 일종의 착시현상으로 판단된다. 다시 말하면 A구는 B, C구에 비해 저온조건으로 과실비대기가 늦으므로 C, D구가 6월말~7월초에 왕성한 과실비대를 하여 신초로 동화산물의 전류가 분산되는 반면, A구는 과실로의 동화산물 전류가 아직 이루어지지 않아 신초직경의 생장이 왕성했던 것으로 생각된다. 위 결과를 종합했을 때 기후변화에 의해 현재(연평균기온 15℃, 생육기 평균기온 21℃)보다 약 1~2℃ 상승하는 고온 조건에서는 포도의 수세가 현재보다 오히려 강해질 것이라 생각되며 그 이상의 고온조건에서는 수세가 오히려 쇠약해질 것으로 예측되었다.

(4) 과실 생육 및 품질 특성

(가) 과실 생육특성

2015년과 2016년 온도구배처리에 의한 ‘거봉’ 포도의 과실생육을 조사한 결과(표 4), 과방중은 2015년에는 B구가 2016년에는 A구가 557.6g으로 온도구 중 가장 높은 과방중을 나타낸 반면 D구가 가장 낮았다. 과립중은 2015, 2016년 모두 D구를 제외한 온도구에서 통계적으로 유의하지 않게 높은 수치를 보였다. 과립수는 2015년에는 A와 B구가 각각 43.5, 44.7개로 가장 높은 수치를 보였으나, 2016년에는 A구가 54.3개로 다른 온도구보다 높은 과립수를 보여 과방중에 과립의 크기도 영향을 미치지만 과립수의 확보가 더욱 중요한 요인으로 작용한다고 판단되었다.

만개기 이후 1차 적립 이전 과방길이, 과립수, 과립밀도 및 착립률을 조사한 결과(그림 13), 과방길이는 C구와 D구가 A와 B구에 비해 길거나 비슷했으나 과립수가 적어 과립밀도가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 착립률 역시 온도구 중 가장 높았던 A구를 100%로 가정했을 때 온도가 높아질수록 감소하여 고온구일수록 과방중, 과립수가 감소한다는 결과를 반증하였다. 2015년도 생육기 기온은 A구가 20.3℃, B구 21.0℃, C구 21.9℃, D구 23.3℃이었으며, 2016년에는 A구 21.4℃, B구 22.2℃, C구: 23.0℃, D구 24.5℃로 2015년 대비 2016년이 약 1℃ 이상 높았다. 이와 같이 생육기 기온을 과방중과 과립수 등 생산성 간 관련성을 보았을 때 생육기 기온이 21.4℃에서 과방중과 과립수의 확보가 유리하다는 결과를 얻을 수 있었다.

표 4. 2015년과 2016년 온도구배처리에 따른 ‘거봉’ 포도의 과실특성

Treatments		Cluster Wt. (g)	Berry Wt. (g)	No. of berry (ea)	Berry size (mm)	
					length	Diameter
2015	A	495.3 ab	10.8 a	43.5 a	25.9 b	25.8 b
	B	527.5 a	11.7 a	44.7 a	29.0 a	28.0 a
	C	449.8 bc	10.8 a	42.3 b	29.1 a	27.9 a
	D	431.2 c	10.1 b	42.8 b	26.7 ab	25.1 b
2016	A	557.6 a	10.0 a	54.3 a	27.5 a	27.0 a
	B	452.2 b	9.7 a	44.8 b	26.5 a	26.0 a
	C	410.0 c	9.5 a	41.9 b	25.3 b	24.5 b
	D	405.9 c	9.1 b	42.9 b	24.8 b	24.9 b

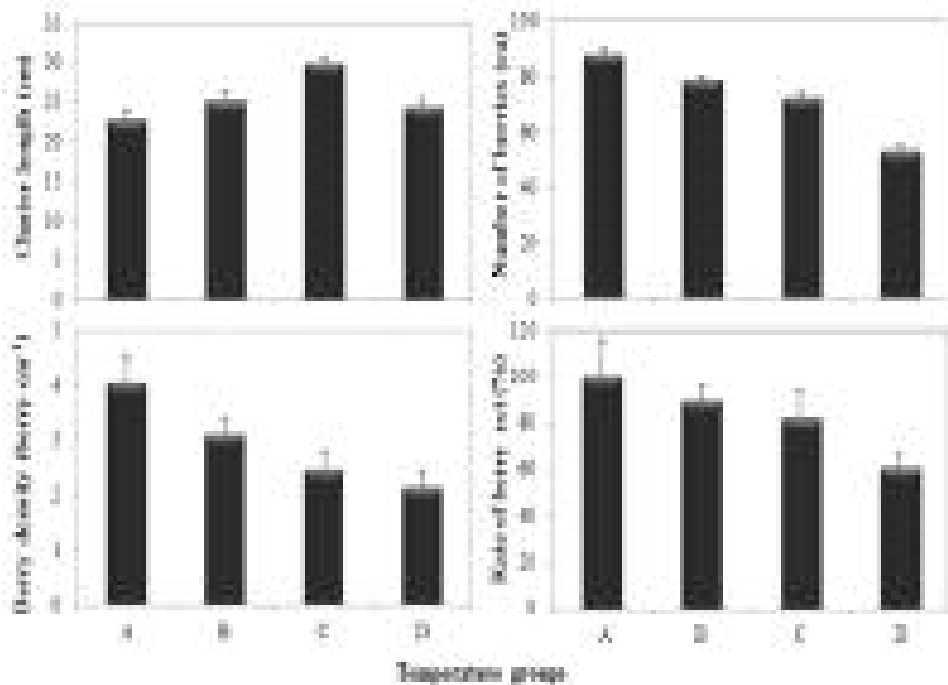


그림 13. 결실 이후 ‘거봉’ 포도의 온도구배처리별 착립 특성

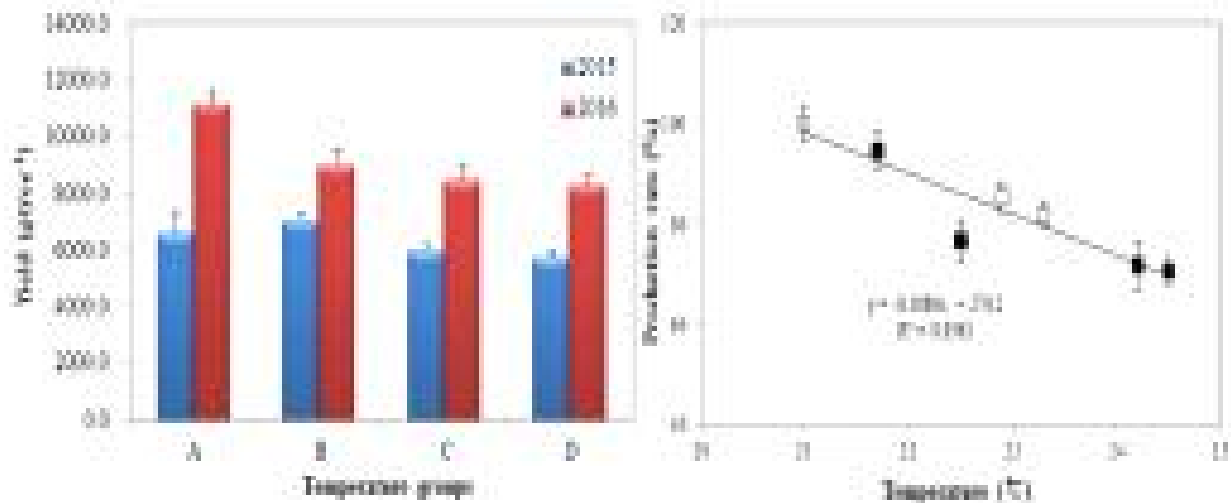


그림 14. 온도구배처리에 따른 ‘거봉’ 포도의 1주 당 생산량 및 기온과 생산율과의 상관관계

온도구배처리에 따른 ‘거봉’ 포도의 주당 생산량을 조사한 결과(그림 14), 2015년도 A구는 6.6kg, B구 7.0kg, C구 5.6kg, D구 5.8kg으로 B구가 가장 높은 주당 생산량을 보였다. 2016년도에는 A구는 11.2kg, B구 9.0kg, C구 8.5kg, D구 8.3kg으로 A구가 가장 높아 과방중과 유사한 결과를 보였다. 년차간 주당 생산량 차이는 시험수가 2015년에 4년생이므로 수관이 비교적 발달한 2016년의 5년생에 비해 주당 생산량이 낮았다. 따라서 이를 보완하기 위해 2015, 2016년에 주당 생산량이 가장 높았던 온도구를 100%로 환산한 후 각 온도구의 생산율을 산정하여 온도 간 관계를 확인한 결과, $Y = 8.1886X + 270.2$ (결정계수 0.86)의 예측식이 도출되었다.

위 예측식을 이용해 6세부과제에서 도출된 미래 기후변화시나리오 적용 포도 재배지 변동 예측지도의 재배가능지를 주당 생산량을 기준으로 4단계로 추가 분류하여 미래 생산성을 예측한 결과는 그림 15와 같다. 예측지도에서 잠재생산성 100%는 재배적지에서 확보할 수 있는

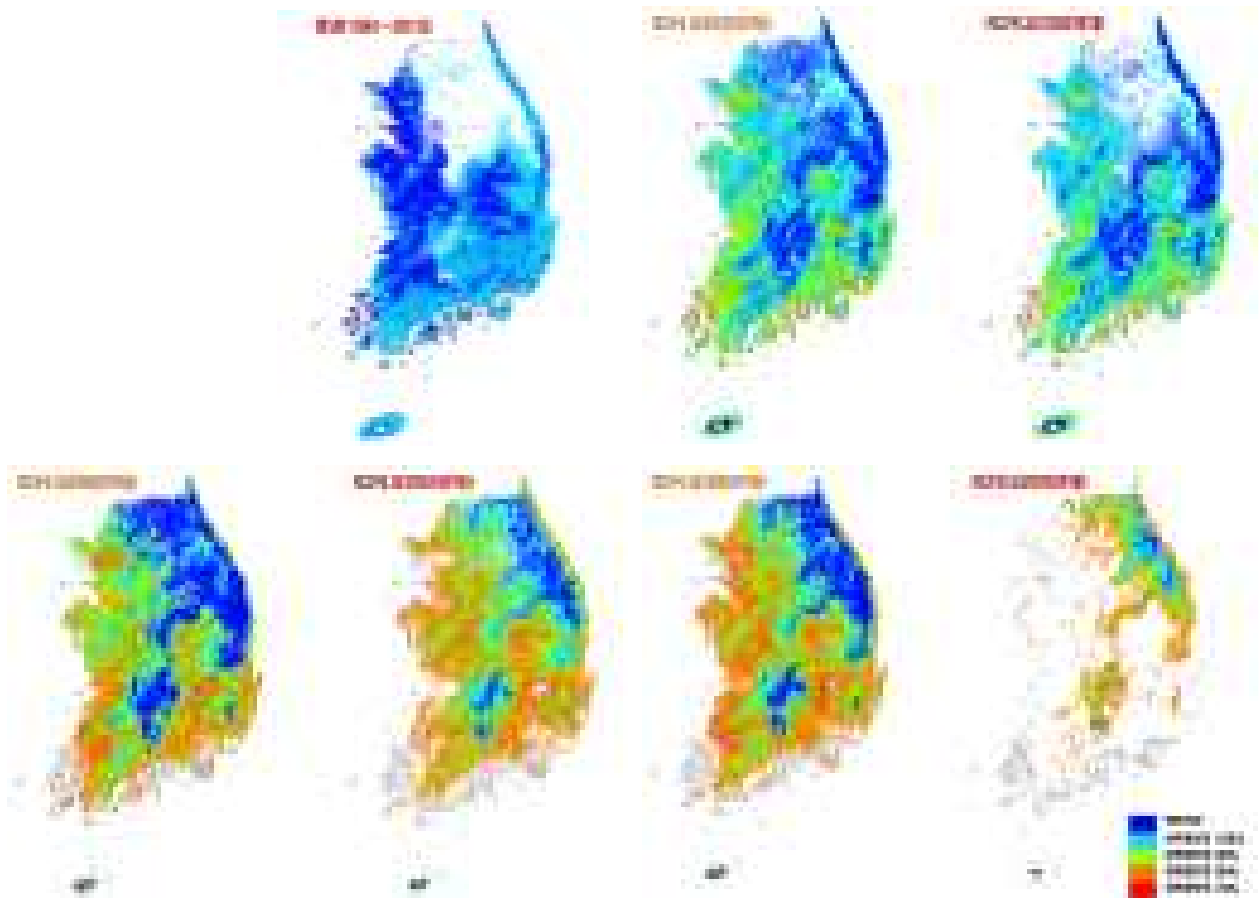


그림 15. 생육기 평균기온을 이용한 기후변화시나리오별 포도 생산성 변화 예측지도

포도 생산량으로 수령에 따라 조금씩 생산량이 달라지기 때문에 백분율을 이용해 보다 현실적으로 적용 가능하도록 잠재생산성으로 정의하여 분류하였다.

(나) 과실 품질특성

포도의 품질특성 기준은 일반적으로 과실의 형태와 착색도, 당함량 등을 들 수 있다. 본 연구에서 온도구배처리에 따른 ‘거봉’ 포도의 수확기 과실 품질특성을 조사한 결과, 과신평형을 좌우하는 과립밀도는 A구가 과경 1cm 당 2.82개의 과립이 확보되어 다른 처리구에 비해 과립밀착도가 높은 것으로 나타났다(표 5). 이는 착립 이후 1, 2차에 걸쳐 1과방 당 목표과립수를 60립으로 설정하여 적립을 하였지만 C, D구의 경우 수정 후 착립률이 저하되어 목표 과립을 확보하기가 어려웠고, 목표 과립을 확보하였어도 수확기까지 고온구였던 C, D온도구에서 주로 발생했던 축과 등 생리장애에 의해 과립이 유실되었기 때문에 과립밀착도가 저하되었다. 당함량은 온도구 중 C구가 19.0° Brix로 가장 높았으며, B(18.6° Brix), D(18.0° Brix), A(17.9° Brix) 구 순으로 감소하여 고온에 의해 당함량이 감소한다는 기존의 연구와 상반되는 결과를 보였다. 물론 그림 16의 7월초와 8월초의 광합성률 변화와 같이 7월초에는 모든 온도구에서 광합성률이 차이가 유사한 수치를 보였으나 하계 극서기인 8월초에는 대기기온보다 고온일수록 광합성률이 크게 감소하는 것을 볼 수 있었고 특히 D온도구의 광합성률이 현저히 감소하는 경향을 보였다. 이와 같이 기존의 여러 연구에서도 임계범위 외의 고온조건에서는 동화산물 생성 저하

및 호흡률 증가에 의해 동화산물량이 제한되어 과실로의 전류가 원활하지 않기 때문에 당함량이 감소한다고 보고되었다. 하지만 본 연구에서는 기존의 여러 연구와 상반된 결과를 보인 이유는 고온구일수록 착립불량과 축과발생으로 인해 고온구의 과방중이 감소하여 남은 과실로 동화산물이 집중된 반면, A구와 같이 충분히 과실을 확보하였기 때문에 과실로 동화산물이 분산 전류되었기 때문에 당함량의 크게 증가하지 않은 것이라 생각되었다.

표 5. 온도구배처리별 과실 품질 변화

Treatments	Berry density (berries·cm ⁻¹)	SSC (°Brix)	Hunter value			Anthocyanin (mg·cm ⁻³)	
			a	b	L	1st	2nd
A	2.82 a	17.9 b	4.9 a	-0.78 ab	23.0 a	1.50 c	2.54 b
B	2.32 b	18.6 ab	5.3 a	-1.32 b	23.2 a	2.39 b	2.91 a
C	2.17 b	19.0 a	5.4 a	-0.94 ab	23.3 a	2.24 b	2.04 c
D	2.23 b	18.0 b	4.8 a	-0.37 a	24.0 a	2.96 a	1.65 d

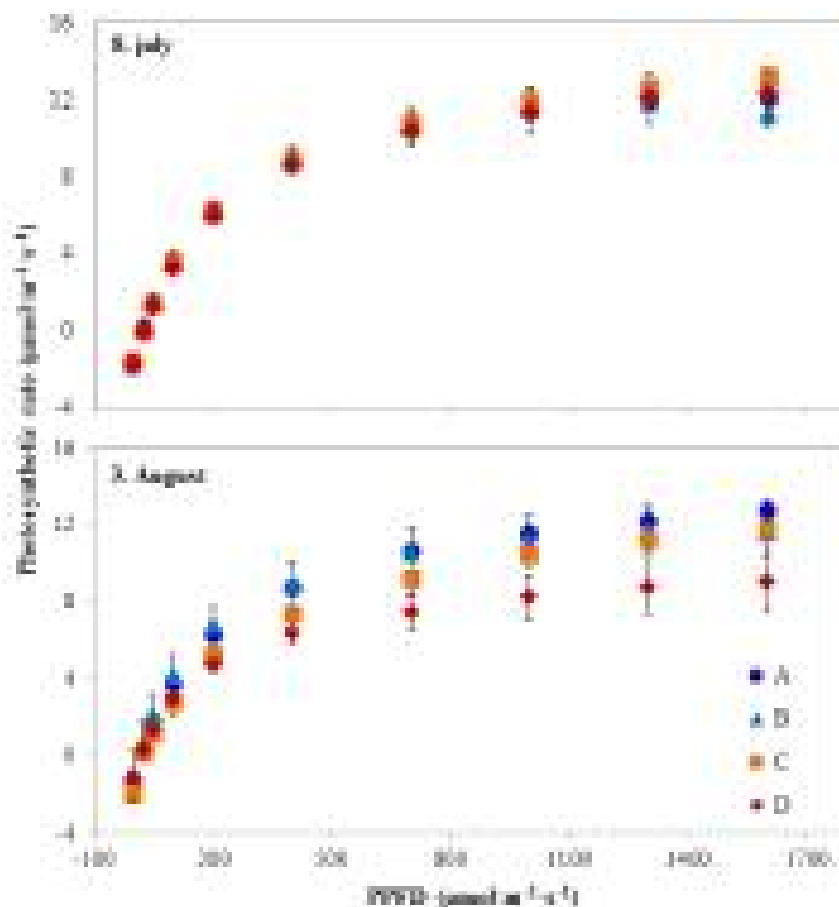


그림 16. 온도구배처리에 따른 ‘거봉’ 포도의 광합성 및 증산량 변화

착색도의 경우 2014년과 2015년도 조사결과가 상반되어 착색도조사와 안토시아닌함량 분석을 병행하여 수행하였다. 착색도 조사결과 hunter a와 L은 통계적으로 유의하지 않아 온도에 따른 착색정도의 차이를 확인할 수 없었다. 하지만 각 온도구의 1차 수확일의 안토시아닌 함량은 D구가 $2.96\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ 로 처리구 중 가장 높은 수치를 보인 반면, A구가 $1.50\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ 로 가장 낮은 수치를 보였다. 2차 수확 때에는 B온도구가 $2.91\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ 로 가장 높은 안토시아닌 함량을 보였으며 A($2.54\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$), C($2.04\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$), D($1.65\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$)구 순으로 유의하게 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 온도구에 따라 1, 2차 수확일의 안토시아닌 함량이 상반된 결과에 대해 두가지 가설을 들 수 있다. 첫째는 포도는 변색기부터 변색 2주간 기온조건에 의해 착색이 결정되는데(Yamane 등, 2006) 고온구일수록 변색기와 같이 생물계절이 앞당겨졌기 때문에 고온구가 하계의 높은 기온을 회피하여 1차 수확일의 착색이 오히려 양호했다는 것이다. 둘째는 앞서 언급한 당함량의 경우와 같이 고온구의 경우 착립불량 및 축과에 의해 목표한 과립수를 확보하지 못해 나무당 과실량이 감소하여 남은 과실로 동화산물이 집중되고 이로 인해 높은 안토시아닌 함량을 보였을 가능성이 있다. 실제로 첫 번째 가설과 같이 2016년도 각 온도구의 변색 시작일은 A구 7월18일, B구는 7월14일, C구는 7월11일, D구는 7월3일로 고온구일수록 변색 개시일이 빨랐다. 변색개시일부터 변색 후 14일까지의 평균기온을 측정한 결과, A구 28.0°C , B구 28.3°C , C구 28.7°C , D구 28.3°C 로 온도구간 큰 차이를 보이지 않아 고온구가 하계의 고온을 회피했기 때문에 높은 안토시아닌 함량을 축적한 것으로 추정되었다. 2차 수확 시 D구의 안토시아닌 함량은 크게 감소하는 등 고온구일수록 안토시아닌 함량이 감소하는 경향을 보였는데 이는 고온구 내에서도 과방단위로는 변색 개시일이 조금씩 달라 변색개시일이 늦은 과방이 있기 때문에 하계의 고온조건에 의해 착색이 현저히 불량해진 것으로 생각되었다. 실제로 변색기 이후부터 수확기까지 컬러차트를 이용해 육안으로 포도의 착색정도를 조사한 결과에서도 D구는 다른 온도구에 비해 변색개시일이 빨랐으나 8월 10일 이후에는 착색이 진행되지 않아 수확기에는 오히려 다른 온도구에 비해 낮은 착색도를 나타냈다(그림 17).

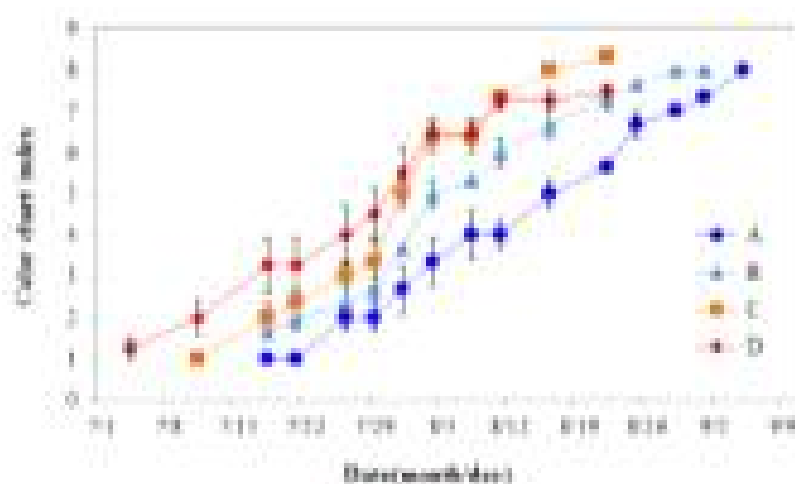


그림 17. 온도구배처리에 따른 ‘거봉’ 포도 착색 변화

나. 이산화탄소 농도에 따른 포도 생육 및 생리반응 구명 연구

(1) 수체생육

이산화탄소 농도에 따른 ‘거봉’ 포도의 신초길이가 변화를 조사한 결과(그림 18), 생육초기인 5월 19일(발아 후 32일)에는 1000ppm처리구가 111.3cm로 처리구 중 가장 높았던 반면, 400과 600ppm처리구가 97.6, 94.8cm로 낮은 신초 성장을 보였다. 하지만 6월 9일에는 모든 처리구의 신초길이가 비슷한 수치를 보였으며, 시험 종료일인 6월 30일(발아 후 74일)에는 400ppm처리구의 신초길이가 277.4cm로 가장 길었으며, 600ppm 276.7cm, 1000ppm 269.1cm, 800ppm 269.1cm 순으로 감소하여 고농도의 이산화탄소 처리에 의해 신초 생장이 둔화되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 6월 30일 신초의 생체중 역시 유의하지 않지만 고농도의 이산화탄소 처리일수록 감소하는 경향을 보였으며, 신초직경 역시 400ppm처리구가 처리구 중 가장 높은 수치를 보여 오히려 400ppm에서 건전한 생육을 보였음을 확인할 수 있었다. 이 같은 결과는 이산화탄소 농도를 흡수하여 광합성을 시작하는 생육초기에는 일시적으로 고농도의 이산화탄소가 신초의 생육에 상조적인 역할을 하지만 발아 후 50일이 경과하면서 고농도의 이산화탄소 처리의 신초 생육이 둔화되고 이후에는 현재 대기 중 이산화탄소 농도인 400ppm처리구에 비해 오히려 신초 생육이 저하된다는 것을 의미한다.

6월 30일 신초를 전량 회수하여 엽서별 엽면적을 측정하였다(그림 19). 기부부터 20매까지 엽면적은 이산화탄소 농도와 관계없이 유사한 경향을 보였으나, 20매 이후 엽부터 400ppm처리구의 엽면적이 600ppm 이상의 처리구 엽면적보다 유의하게 증가하였고 엽수도 약 4매정도 더 전엽한 것으로 나타났다. 일반적으로 포도 잎은 1매가 전개되는데 2~3일 정도 소요되는 것으로 알려져 있어 형태적 차이를 보인 20매째 잎의 경우 최초 전엽 후 약 50일이 경과된 시점에 전엽된 잎으로 볼 수 있다. 이산화탄소 농도에 따라 발아일은 큰 차이가 없었으므로 고농도의 이산화탄소 처리구에서는 엽 발생 후 50일 이후부터 ‘거봉’ 포도의 신초가 400ppm처리구에 비해 전엽속도가 감소하고

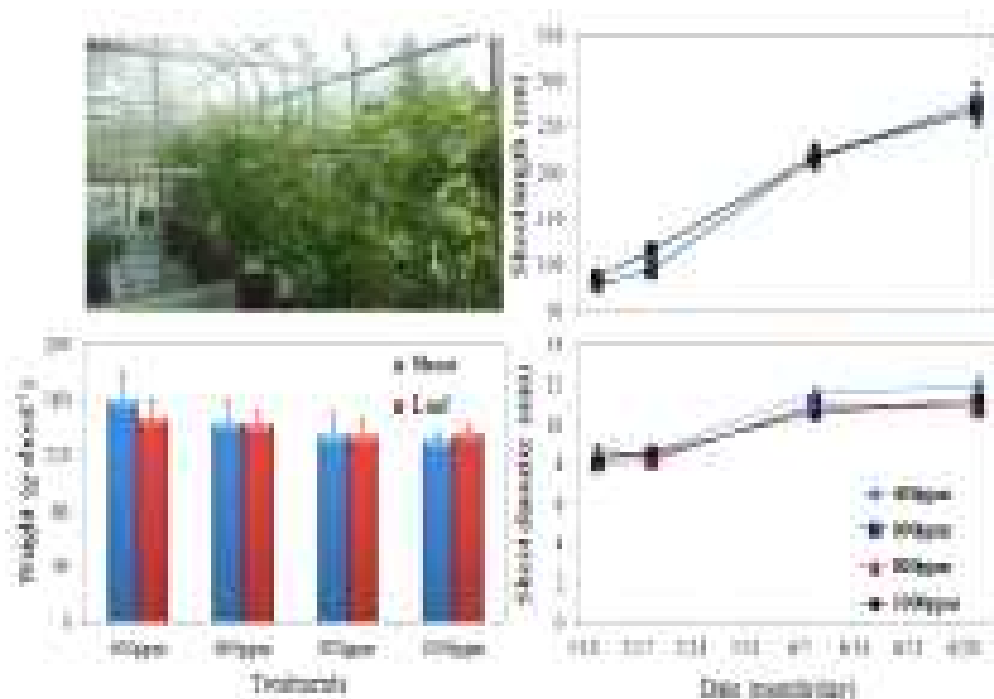


그림 18. 이산화탄소 농도처리가 포도 신초의 생장에 미치는 영향

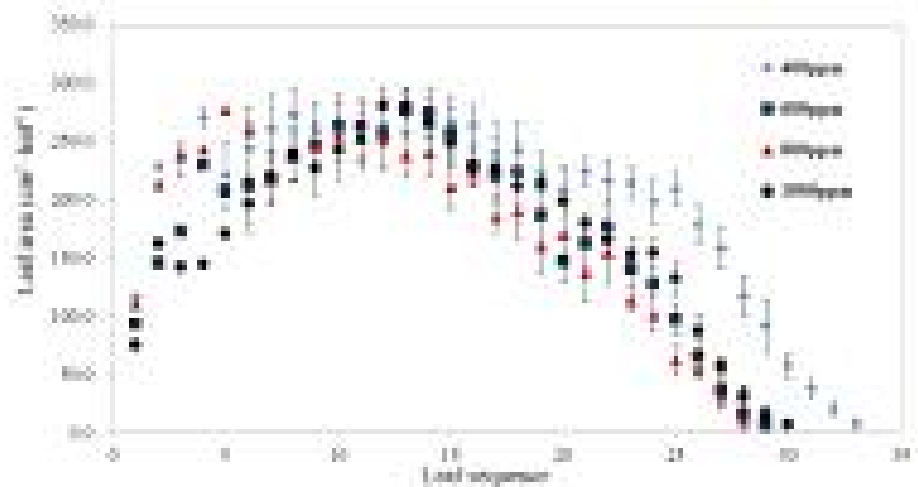


그림 19. 이산화탄소 농도처리가 포도의 엽서별 엽면적에 미치는 영향

잎 발달이 저하된다는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 전엽속도 및 엽면적 감소현상은 수관 전체의 광합성률 감소와 밀접한 관련이 있으므로 영양생장만을 고려했을 때 고농도의 이산화탄소 조건 하에서는 현재 대기상태에 비해 동화산물의 확보가 상당히 불리해질 것으로 판단되었다.

(2) 생리반응 및 형태적 변화

이산화탄소 농도가 ‘거봉’ 포도에 광합성률과 기공전도도에 미치는 영향은 그림 20과 같다. 광량이 증가함에 따라 광합성률과 기공전도도 모두 대기 중 이산화탄소 농도인 400ppm처리구가 고농도의 이산화탄소 농도처리구보다 높은 수치를 보였다. 선행연구에서는 고농도의 이산화탄소 처리 시 생육초기 광합성률은 고농도의 이산화탄소처리일수록 높게 나타났으나(자료 미제시), 시일이 경과하면서 급격히 감소하여 ‘거봉’ 포도의 잎은 고농도의 이산화탄소 조건 하에서 일정 기간이 경과하면 광합성률이 저해되는 것을 알 수 있었다. 이는 대기 중 이산화탄소의 농도가 증가하면 식물체 내 광합성 기관까지 이산화탄소의 확산이 용이하기 때문에 영년생 작물인 포도와 목화의 광합성률이 증가하여 생산량이 증가한다는 Kimball 등(2002)의 실험과 상반된 결과를 보였다. 6월 30일 처리구별 잎의 엽록소함량을 조사한 결과, 400ppm처리구는 고농도의 이산화탄소처리구에 비해 월등하게 엽록소함량이 높았으며 고농도의 이산화탄소를 처리할수록 엽록소 함량이 감소되었다. 이는 고농도의 이산화탄소 조건에 의해 장시간 노출될 경우 잎의 엽록소가 산화소실되면서 엽록소 함량 감소 및 잎의 황화현상이 발생하였기 때문으로 추정되었다. 이와 같이 고농도의 이산화탄소 처리에 의해 엽록소가 감소된다면 고농도 처리 시 광합성률이 감소된다는 본 연구의 결과를 설명할 수 있다.

이산화탄소 농도 처리에 따른 ‘거봉’ 포도 잎의 엽육조직을 형태적으로 관찰한 결과(그림 21), 400ppm처리구는 엽단면이 두껍고 엽육세포 내 전분립이 처리구 중 가장 많아 건전한 생육을 보였다. 하지만 고농도의 이산화탄소처리구일수록 엽단면이 얇아지고 전분립의 밀도가 감소하여 생육이 불량했음을 추정할 수 있었다. 특히 1000ppm처리구의 경우 엽 내 전분립이 거의 관찰되지 않았다. 물론 전분립은 광합성에 의해 동화산물의 생성이 많아지면 전분립의 밀도가 높아지지만 타 기관으로 전류가 되지 않을 경우도 엽육조직에서 많이 관찰된다. 따라서 형태적 관찰만으로는 특정할 수 없지만 앞에서 언급한 400ppm처리에서 엽록소의 함량 및 광합성률의 증가와 같은

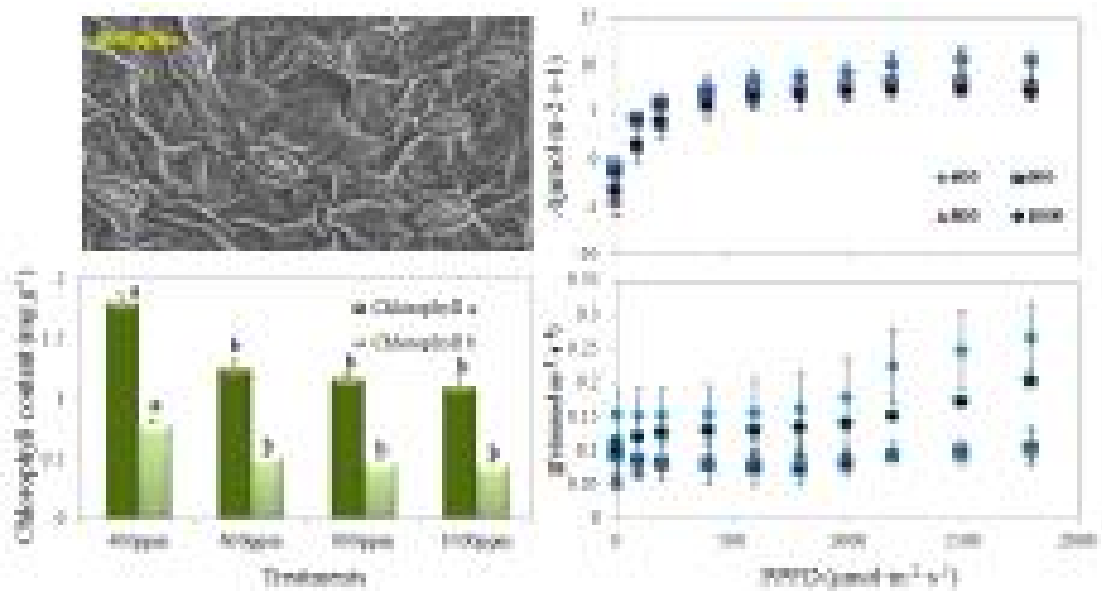


그림 20. 산화탄소 농도처리가 포도의 엽록소함량 및 광합성률, 기공전도도에 미치는 영향

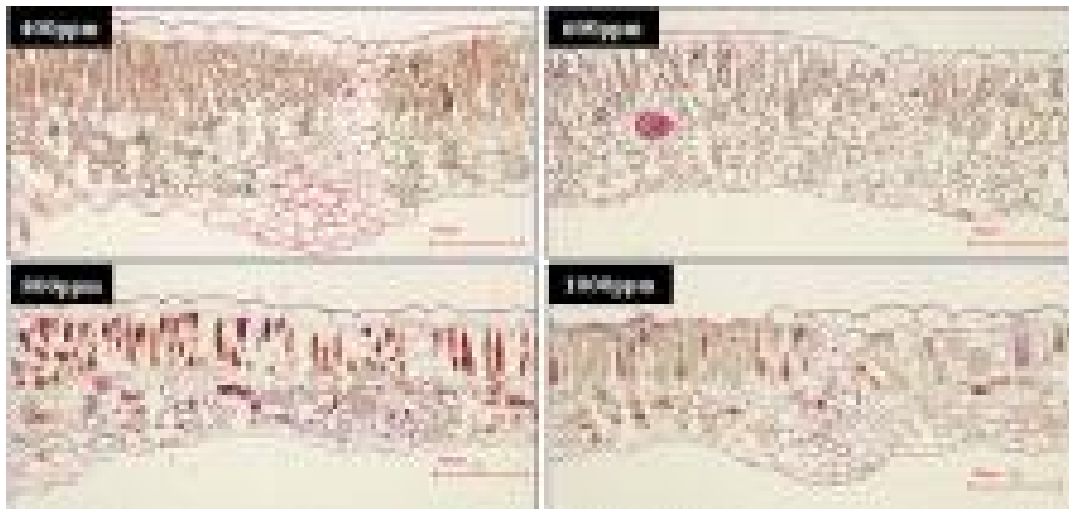


그림 21. 이산화탄소 농도 처리에 따른 포도 엽육조직의 형태적 변화. 6월 30일 시료 채취

생리반응 결과를 감안했을 때 대기농도와 같은 400ppm처리에서는 건전히 생육하는데 반해 이상의 이산화탄소 농도에서는 생육불량이 발생할 것으로 생각되었다.

이산화탄소 농도별 처리가 ‘거봉’ 포도의 생육상태에 미치는 영향을 구명하기 위해 대사체 분석을 수행하였다. FT-IR 스펙트럼의 1700-1500, 1500-1300, 1100-950cm⁻¹ 주요 부위는 각각 특정 화합물들을 나타내는데, 주로 Amide I 과 II을 포함하는 아미노산 및 단백질계열의 화합물들의 질적, 양적 정보를 나타내고(P=O, C=O, N-H, C-C 그리고 C=C), phosphodiester group을 포함한 핵산 및 인지질의 정보가 반영이 되고(CH₂와 P=O), 단당류나 복합 다당류를 포함하는 carbohydrates 계열의 화합물들이 질적, 양적 정보가 반영(C-O, C-C 그리고 C-O-C)되어 나타냄. 이처럼 FT-IR 스펙트럼 상의 질적, 양적 차이가 포도 품종이 함유하고 있는 아미노산이나 단백질, 지방산, 그리고 탄수화물 계통의 화합물들의 질적, 양적 차이가 현저하게 나타남을 의미한다(그림 22A). PCA 상에서는 대사체 분석을 보면 CO₂ 처리에 따라 저농도에서 고농도로 이동하는 것을 볼 수 있고, 개체간의 차이가 뚜렷하게 나타났다(그림 22B). FT-IR loading value를

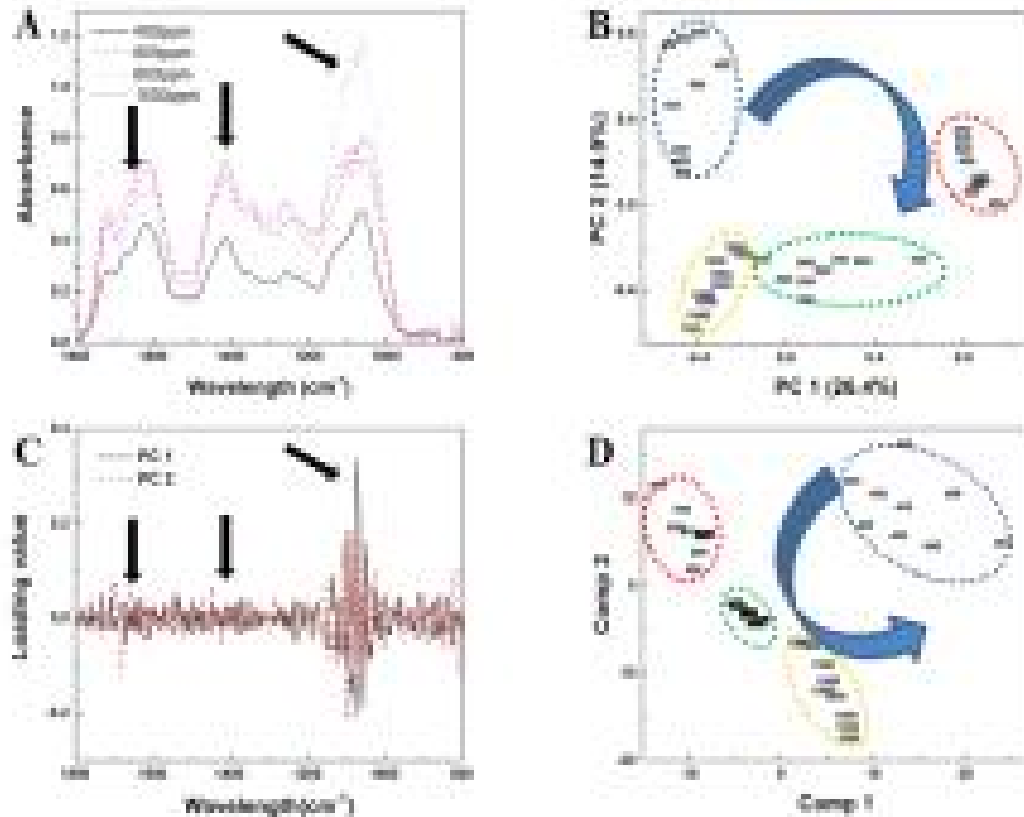


그림 22. CO₂ 농도 증가에 따른 ‘거봉’ 포도의 1차 대사체 분석.

A: absorbance, B: PCA, C: loading value, D: PLS-DA

확인한 결과, PC 1과 2를 분류하는 중요한 기준은 1650-1550과 1100-950cm⁻¹ 부위임을 알 수 있었으며(그림 22C), 1650-1550과 1100-950cm⁻¹ 부위는 FT-IR 스펙트럼상에서 차이를 나타냈던 부위(그림 22A)와 일치하였다. PLS-DA 분석의 경우 PCA 분석 보다 CO₂ 처리 식별이 뚜렷하게 나타났다(그림 22D).

CO₂ 농도별(400, 600, 800, 1000ppm) 처리하여 발아 후 74일 쯤 생육상태를 대사체 분석으로 확인하였다. 1차 결과와 동일하게 FT-IR 스펙트럼의 1700-1500, 1500-1300, 1100-950cm⁻¹ 주요 부위에서 뚜렷한 차이를 나타냈다. 이처럼 FT-IR 스펙트럼 상의 질적, 양적 차이가 포도 품종이 함유하고 있는 아미노산이나 단백질, 지방산, 그리고 탄수화물 계통의 화합물들의 질적, 양적 차이가 현저하게 나타남을 의미하는 것으로 FT-IR 스펙트럼 분석은 CO₂가 포도에 미치는 영향을 확인하는 수단으로 활용이 가능할 것으로 보인다(그림 23A). PCA 상에서 대사체 분석한 경우 CO₂ 처리에 따라 저농도에서 고농도로 이동하는 것을 볼 수 있고, 개체간의 차이가 뚜렷하게 나타났다(그림 23B). FT-IR loading value를 확인한 결과, PC 1과 2를 분류하는 중요한 기준은 1650-1550과 1100-950cm⁻¹ 부위임을 알 수 있었다(그림 23C). 1650-1550과 1100-950cm⁻¹ 부위는 FT-IR 스펙트럼상에서 차이를 나타냈던 부위(그림 23A)와 일치하였고, 이 부위가 나타내는 amide I, II와 carbohydrates 계열의 화합물들이 양적, 질적 차이를 보였다(그림 23C). 또한 PLS-DA 분석의 경우 PCA 분석 보다 CO₂ 처리 식별이 뚜렷하게 나타났다(그림 23D).

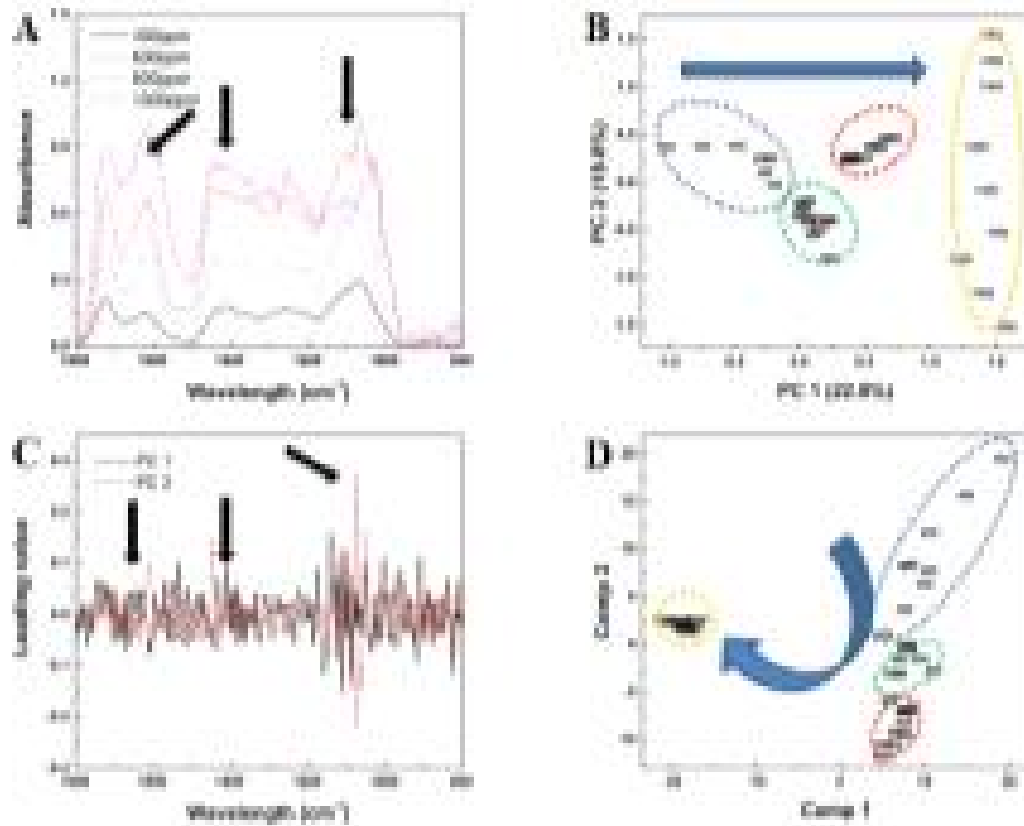


그림 23. CO₂ 농도 증가에 따른 ‘거봉’ 포도의 2차 시료(밭아 후 74일) 대사체 분석.

A: absorbance, B: PCA, C: loading value, D: PLS-DA

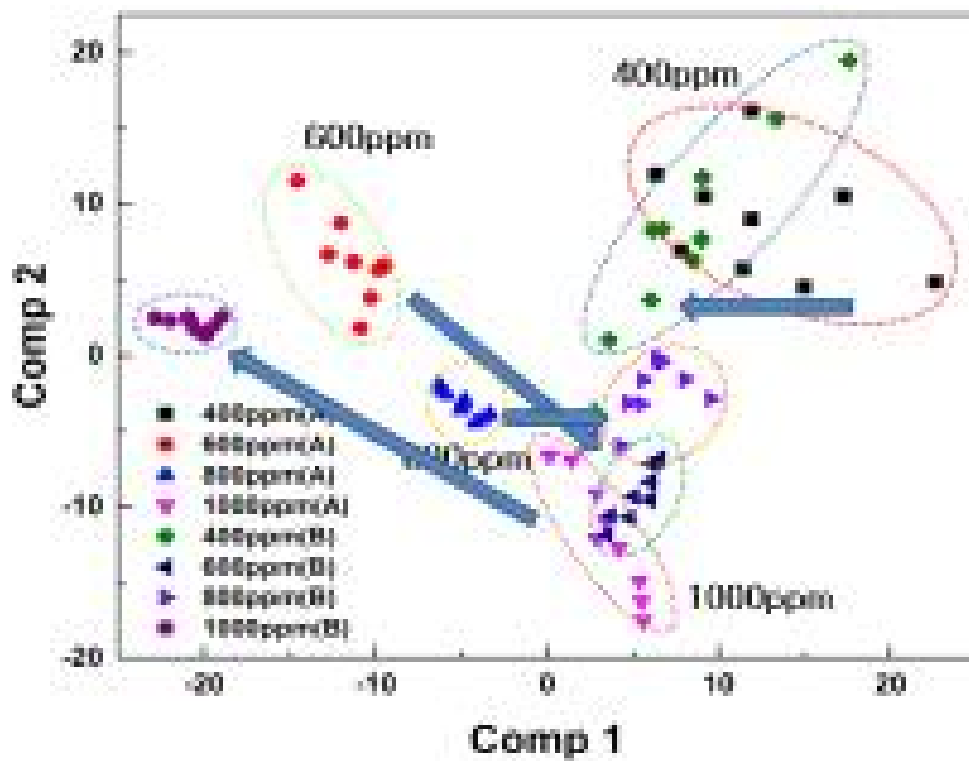


그림 24. CO₂ 농도 증가에 따른 ‘거봉’ 포도의 1, 2차 시료(밭아 후 74일) 대사체 비교

1차와 2차 대사체 분석을 비교한 결과, CO₂ 처리의 의한 ‘거봉’ 포도의 생육 변화를 볼 수 있었다(그림 24). 400ppm 처리에서는 대사체의 변화가 없는 것으로 판단되고, 600ppm과 800ppm 처리는 생육 시 나타나는 대사체의 변화가 생육 초기에 600ppm이 높았으나, 생육 후기에는 800ppm과 같아지는 것을 볼 수 있었다. 하지만 1000ppm 처리에서는 생육 초기보다 후기에 대사체 변화가 확연히 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

미래 기후변화시나리오에 따르면 RCP8.5시나리오 기준으로 대기 중 이산화탄소 농도가 약 940ppm에 이를 것으로 전망하고 있다. 많은 연구에서 대기 중 이산화탄소는 식물의 광합성에 꼭 필요한 환경요인으로 동화산물 생성에 도움을 주기 때문에 작물의 생육을 건전하게 유지할 수 있으며 지구 온난화현상이 심해진다고 하더라도 고온조건에 의한 생육불량을 상쇄시킬 수 있다고 전망하고 있다. 하지만 본 연구에서는 현재 대기 중 이산화탄소 농도보다 높은 경우 ‘거봉’ 포도의 생육초기에는 일시적으로 광합성률이 상승하여 생육에 유리한 측면이 있지만, 일정 기간이 경과하면 오히려 생육불량의 원인이 될 수 있을 것으로 예측되었다. 좀 더 정확한 예측을 위해서는 고온조건과 고농도의 이산화탄소처리를 병행하는 한편, FACE시설 등을 이용해 장기적으로 이산화탄소 농도에 따른 작물의 생육 및 품질특성을 연구할 필요가 있을 것으로 생각된다.

제3절 기후변화시나리오를 적용한 감귤 생산영향평가

1. 연구수행 내용

가. RCP시나리오에 따른 미래 환경요인별 감귤 생리·생육반응 구명

(1) 기상환경에 따른 감귤의 생리·생육반응 분석

(가) 주요처리내용

기상환경에 따른 감귤의 생리·생육반응을 구명하고자 온주밀감 하례조생(*Citrus unshiu* Mar. haraejosaeng) 5년생과 부지화[(*Citrus unshiu* × *C. sinensis*) × *C. reticulata*] 5년생을 이용하였다. 길이 25m, 폭 2.7m의 온도구배하우스 내에서 품종별 12주를 2m 간격으로 2013년도 3월에 재식하고 1년 동안 성장시킨 후 2014년부터 조사에 이용하였다. 온도구배하우스는 입구쪽은 개방되어 있으며 반대편은 막혀있는 형태로 환풍기와 난방기를 이용하여 온도를 조절하는 형태로 구성되었다. 온도구배하우스 내 수분은 점점관수로 공급하였으며 필요시 엽면 살포하였다. 처리온도는 외기온에 따라서 가장 온도가 높은 쪽의 온도 센서의 온도차이가 6℃가 넘지 않도록 유지하였으며 연중 온도차이가 되도록 관리하였다. 외기온도를 노지로 하여 외기온도보다 2℃ 정도 높은 구를 A(T1), 4℃ 정도 높은 구를 B(T2), 6℃ 정도 높은 구를 C(T3)구로 간단히 A, B, C구로 하여 표기하였다.

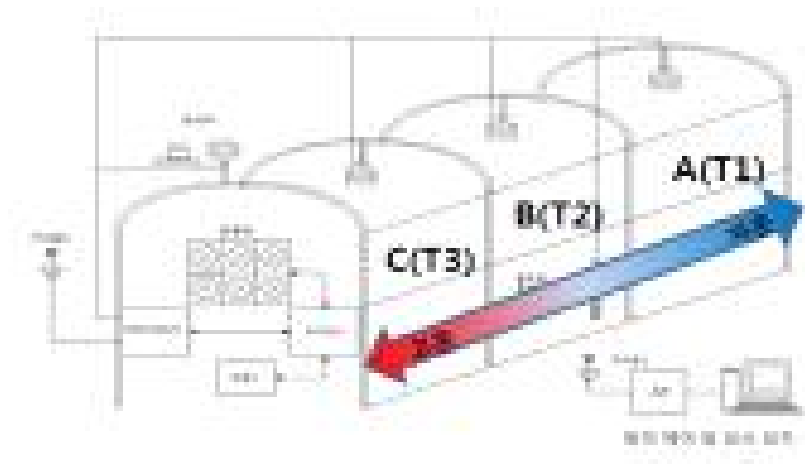


그림 3-1. 온도구배하우스 내 처리구 배치

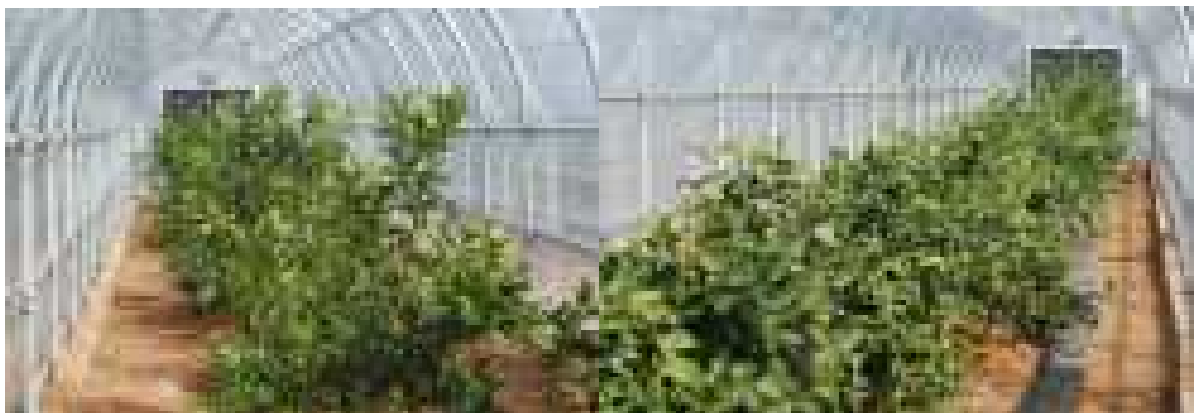


사진 3-1. 온도구배하우스 내 부지화(왼쪽) 및 온주밀감(오른쪽) 재식 상태

(나) 주요조사항목

① 기상환경조사

조사포장에서의 온도조사는 지상부로부터 2.5m 높이에 설치한 온도센서(1400-101, LI-COR Inc., Lincoln, USA)를 이용하였으며 태양복사에너지는 지상부로부터 2.5m 높이에 설치한 광센서(LI200X, LI-COR Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 재배기간 동안의 온도와 태양복사에너지는 데이터로거(CR1000, Campbell Scientific Inc., Logan, USA)에 연결하여 1시간 간격으로 기록하였다. 온풍기와 환풍기를 이용 비닐하우스 내부에서 외부온도와 0~6℃도 차이가 나도록 제어를 구축하고 원격지 감시 장치에서 온도구배하우스의 실시간 외부/내부 온도/광변화 그래프 및 제어상태가 감시가 되도록 구축하였으며 무선으로 통신이 가능한 형태로 구성하였다. 원격지 감시 장치에서 제어장치에 저장된 측정데이터 및 제어 운영프로그램 수집 및 변경이 가능하도록 하고 원격지 감시 장치에 별도의 운영 프로그램 설치 없이 웹브라우저 상에서 자료수집기 고유 IP 입력으로 무선으로 자동 연결되어 자료수집장치에서 운영되는 프로그램이 upload 되어 쉽게 실시간 감시 및 데이터 수집이 가능하도록 구축하였다. 원격지 감시 장치와 별도로 AP(access point)가 내부 네트워크에 접속 되었을시 개인 PC에 별도의 운영 프로그램 입력 없이 웹브라우저를 이용 자료수집기 고유 IP 번호 입력만으로 실시간 측정 및 제어 상태가 감시되도록 하고 차후 환경 측정 센서 및 제어기능 추가 요구시 별도의 추가 장비 없이 구현이 되도록 제어장치 구축하였다.

② 생육조사 및 분석방법

㉑ 생육조사 관리

5년생 하례조생 및 부지화를 각 온도구배하우스 당 12주를 재식하고 조사수의 전정, 시비, 병해충 방제 등 일반관리를 하며 적과(화)나 적엽 등 착화 및 착과량과 관련된 작업과 관수 등을 실시하였다.

㉒ 발아기 및 개화기 조사

발아기는 한 나무 전체의 눈 50%가 3mm이상 자란 날을 기준으로 하고, 한 나무의 전체 꽃봉오리의 80%정도가 개화한 날을 만개기로 하였다. 발아기 및 개화기 조사는 발아 또는 개화시점부터 2~3일 간격으로 온도구배하우스 전체 나무를 대상으로 동일한 사람이 계속 조사하여 최대한 오차를 줄이고 각 온도구별로 발아 및 개화기는 조사주 4주의 평균으로 하였다.

㉓ 착화(과)량 및 착과율 조사

착화량은 2014년에는 나무 전체 꽃수를 산출하였고, 2015년과 2016년에는 만개 직전에 1주당 4개 방향에서 착화수가 중간정도이고 200매 내외의 구엽을 가진 측지 각 1개씩 나무당 모두 4개를 표지하고 구엽과 꽃수를 세어 꽃수를 구엽수로 나눈 값(화엽비)으로 표기하였다. 착과량은 생리낙과가 완료된 7월 하순부터 8월 상순사이에 착화량 조사시 표지 해둔 가지의 과실수를 세었으며 착과율은 착화량 및 착과량을 조사한 측지의 과실수를 처음에 조사한 꽃수로 나누고 이 값에 100을 곱하여 백분율로 나타내었다.

㉔ 과실크기 및 1일 비대량

과실 횡경은 2차생리낙과가 끝나는 7월 중순에 1주당 온주밀감은 직과 5개, 부지화는 유엽과 5개씩을 나무의 중간부분을 중심으로 임의 선정하여 각각 표지 한 후 주기적으로 digital caliper로 측정하였다. 측정간격은 보통 1개월에 2회 조사하였지만 해마다 정확한 일수가 동일하지 않아 상순과 중순으로 표기하였다. 측정위치는 과실의 적도부분에서 횡경이 가장 큰 부분을 측정. 과실의 1일 비대량은 특정시기에 조사된 횡경에서 앞서 조사된 횡경을 뺀 후 조사간격인 일수로 나누어 계산하였다.

㉞ 가용성고형물 및 산함량

가용물고형물 및 산 함량은 과중을 조사하기 위하여 1주당 2~5과씩 채취한 과실의 껍질을 벗긴 후 과육부분을 나무별로 모아 착즙기로 착즙하여 측정에 이용. 착즙시 과실크기에 의한 오차를 줄이기 위해 각 과실은 가장 작은 과실을 기준으로 이 보다 큰 과실은 작은 과실의 무게와 같은 량의 양념만을 넣어 과실의 과즙이 모두 같은 양이 되도록 함. 과즙은 일반 디지털 당도계를 이용하고 산함량은 NaOH를 이용한 적정 산함량을 측정하였다.

㉟ 착색분석

색도색차계(Chromameter, CR400, Minolta, Japan)를 이용하여 온주밀감은 8월 1일부터 1개월에 2회, 부지화는 9월 1일부터 1개월에 2회, 12월까지 1주당 평균정도 크기의 과실 5개씩을 측정하였다.

(2) 온도차이에 따른 감귤의 착색 및 품질 반응 분석

기상환경이 감귤의 착색에 미치는 영향을 구명하고자 Walk in Growth Chamber와 온도구배 하우스를 이용하였다. 2014년도에는 온난화대응농업연구소에 설치된 Walk in Growth Chamber에서 화분에 심어진 온주밀감 및 부지화 5년생을 이용하여 9월부터 처리하였다. 처리온도는 17℃(M, 야간 14~주간 20℃), 20℃(M-3℃, 야간 17~주간 23℃), 23℃(M+3℃, 야간 20~주간 26℃), 26℃(M+6℃, 야간 23~주간 29℃)로 설정하였다. 온도구배하우스에서는 시험1의 방법으로 수행하였으며 온주밀감 및 부지화를 이용하여 주산지 착색이 시작되는 9월부터 수확기까지 처리하였다.

(가) 주요조사항목

① 기상환경조사

시험1과 비슷한 방법으로 조사하였다.

② 생육조사 및 분석방법

㉠ 과실횡경 및 1일 비대량

과실 횡경은 온도구배하우스내 화분을 입고한 9월 1일부터 온주밀감은 직과 5개, 부지화는 유엽과 5개씩을 나무의 중간부분을 중심으로 임의 선정하여 각각 표지 한 후 주기적으로 digital caliper로 측정하였다. 측정간격은 1개월에 1회 측정(매월 1일)하고 측정위치는 과실의 적도부분에서 횡경이 가장 큰 부분을 측정. 과실의 1일 비대량은 특정시기에 조사된 횡경에서 앞서 조사된 횡경을 뺀 후 조사간격인 일수로 나누어 계산하였다.

㉡ 가용성고형물 및 산함량

당 및 산 함량은 과중을 조사하기 위하여 1주당 2~5과씩 채취한 과실의 껍질을 벗긴 후 과

육부분을 나무별로 모아 착즙기로 착즙하여 측정에 이용. 착즙시 과실크기에 의한 오차를 줄이기 위해 각 과실은 가장 작은 과실을 기준으로 이 보다 큰 과실은 작은 과실의 무게와 같은 양의 양념만을 넣어 과실의 과즙이 모두 같은 양이 되도록 함. 과즙은 일반 디지털 당도계를 이용하고 산함량은 NaOH를 이용한 적정산함량을 측정하였다.

㉔ 착색분석

색도색차계(Chromameter, CR400, Minolta, Japan)를 이용하여 온주밀감은 9월부터 1개월에 2회, 부지화는 11월부터 1개월에 2회 1주당 평균정도 크기의 과실 5개씩을 측정하였다. 과피의 엽록소 함량은 위에서 채취한 과실 20개중에서 着色이 평균적인 2개의 과실을 골라 1과실에서 다시 평균이 되는 과피부분 2곳을 선정하여 직경 1cm의 과피조각을 취하여 50ml 삼각 flask에 넣고 N, N-dimethylformamide 10ml를 가하여 호일로 봉한 후 암조건 75℃에서 5시간동안 항온 침출하였다(Moran과 Dan, 1980). 침출액은 분광광도계(HP, 미국)로 647nm, 664.5nm에서 흡광도를 측정하여 정량하였다. 카로티노이드 함량 분석을 위하여 photo diode array (PDA) detector가 장착된 UPLC (H-Class, Waters Co., USA)를 이용하였다. 표준물질로는 β -carotene(Sigmaaldrich Co., USA)을 구입·이용. 과실 추출액의 분광특성 및 과색 분석 감귤 과실 추출액의 분광특성의 분석에는 microplate reader (Eon-C, Biotek Co., USA)를 이용하고 450nm에서 흡광도를 측정하였다.

2. RCP 기후변화 시나리오에 따른 생물계절(착색기) 변동예측 지도 제작

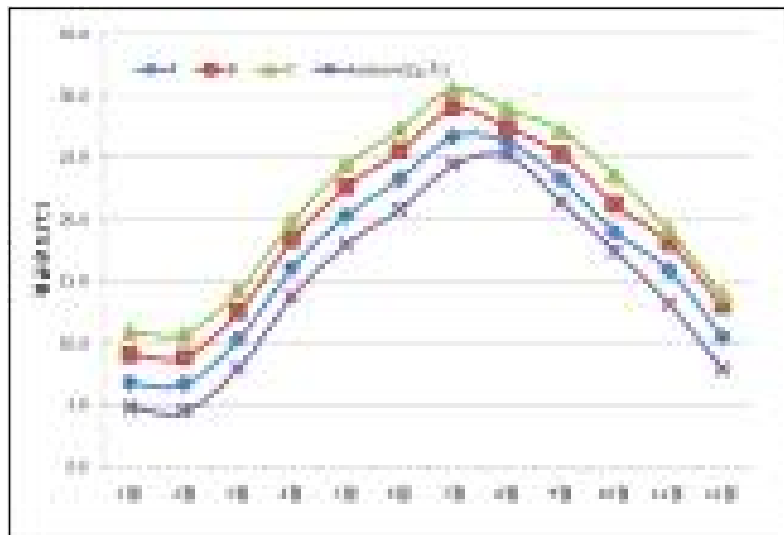
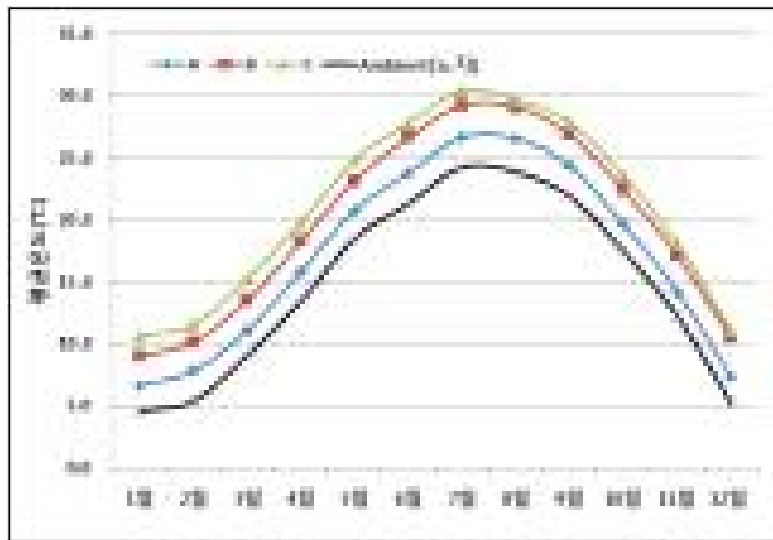
감귤 착색기 변동 예측 지도는 기후변화시나리오(2100년까지 예측)를 바탕으로 재배적지의 기준을 적용시켜 과거 30년 평균, 2010년대부터 2090년대까지 10년 단위로 재배지를 예측한 과수재배적지(총 19圖), 시군구 단위로 재배적지, 가능지, 저위생산지 면적 자료를 제공하기 위해 제작된 과수재배적지 지도를 바탕으로 작성되었다. 착색기 변동예측지도는 기후변화시나리오 RCP 4.5, 8.5를 적용하여 시·공간적으로 2020에서 2100년(10년단위)까지 1km해상도, 전국단위로 작성하였다. 변화예측 적용 기상요소로는 일평균기온을 적용하였고 대상품종은 온주밀감을 이용하였다.

2. 주요 결과

가. RCP시나리오에 따른 미래 환경요인별 감귤 생리·생육반응 구명

(1) 기상환경에 따른 감귤의 생리·생육반응 분석

온도구배하우스내 년중 평균온도변화를 보면 겨울철에는 외기온도가 5℃로 내외로 시작하여 여름철에는 25℃ 정도를 유지하였다. 온도가 가장 높은 T3구인 경우 겨울철에는 11℃ 내외를 유지하다가 여름철에는 31℃ 정도로 외기온도보다 6℃ 높게 온도가 유지되었다. 각 처리별 온도처리에 의한 온도 변화는 감귤의 생물계절, 과실비대, 과실품질 등을 연구하는데 좋은 조건을 유지하였다.



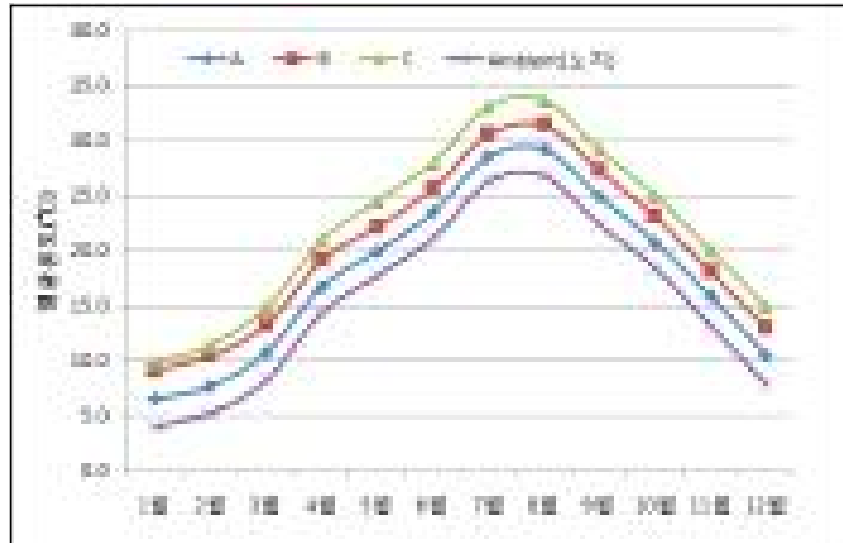


그림 3-2. 온도구배하우스(정실) 내 월별 평균온도의 변화(위, 2014년; 중간 2015년; 아래, 2016년)

온주밀감 발아기와 만개기는 온도가 높을수록 빠른 경향을 나타내었으며 해에 따라서 다소 차이가 있었지만 대체로 비슷한 경향을 나타내었다(표 3-2). 온주밀감의 노지 발아기는 연도에 따라서 4월 5일에서 4월 11일 정도였지만 A구는 3월 20일에서 3월 22일, B구는 3월 6일에서 3월 15일, C구는 3월 3일에서 3월 9일로 온도가 높을수록 발아가 빨랐다. 노지 만개기는 5월 14일에서 5월 19일사이였지만 A구는 4월 28일에서 4월 29일, B구는 4월 14일에서 4월 20일, C구는 4월 9일에서 4월 13일로 온도가 높을수록 개화가 빠른 경향을 보였다. 온도가 높을수록 조기에 개화하는 것은 여러 보고에서 알려진 사실이며(Inoue, 1990; Moon and Kim, 2001), 본 연구에서도 이와 유사하게 나타났다.

발아기부터 만개기까지의 일수는 해에 따라서 조금 다른데 2014년에는 발아부터 만개까지 대체로 38일정도가 소요되었지만 2015년도와 2016년에는 온도가 높은 C구가 외기온도에 비해 소요일수가 줄어들었다. 부지화도 온도가 높을수록 발아기나 만개기가 빨라 온주밀감과 비슷한 경향을 보였다. 단지 부지화는 유엽화의 개화가 늦어 전체적으로 온주밀감에 비해 만개기는 늦어지는 것으로 파악되었다.

봄순길이는 온도가 높을수록 부지화나 온주밀감 모두 길어지는 상태를 나타내었으며 온주밀감은 부지화에 비해 2배 이상 봄순 길이가 증가하였다(표 3-3). 부지화에서 봄순 길이가 증가하는 것은 바람직한 상태이지만 온주밀감은 봄순 길이가 증가하면 가지가 늘어지는 현상이 나오면서 나무가 변잡스럽게 된다. 엽면적도 온도가 높을수록 부지화나 온주밀감 모두 증가하였으며 온주밀감이 부지화에 비해 넓은 경향을 보였다. 하나의 액아당 발아수는 부지화, 온주밀감 모두 온도가 높을수록 적은 경향을 보였는데 이는 온도가 높으면 발아속도가 빨라 잠재되어 있는 눈이 발아할 가능성이 낮기 때문에 순이 적게 발아하고 길게 자라는 습성을 가지게 된다. 부지화 재배시 문제점 중의 하나가 봄순이 액아 마다 발아할 뿐 아니라 1개의 액아에서 2-3개의 새순이 발생하여 그대로 두면 가지 길이도 짧고 잎이 아주 작은 빈약한 가지가 되어 수세가 쇠약해지므로(Matsumoto, 2001) 농가들이 순을 솎는데 많은 시간과 노동력이 소모되는 본 연구에서도 온도가 낮을수록 주당 발생하는 봄순의 수가 많고 길이는 짧아지는 양상을 보였으나 높은 온도에서는 봄순의 수가 적어지고 길이가 길어지는 양상을 보여 앞으로 온도가 높아짐에 따라 부지화의 노지 재배 조건은 점점 양호하고, 엽면적이 넓어지고 순길이가 길어지는 온주밀감은 다소 불리할 것으로 판단된다.

표 3-1. 온도구배하우스 내 부지화의 온도별 발아 및 만개기

온도	2014년도		2015년도		2016년도	
	발아기	만개기	발아기	만개기	발아기	만개기
A	3/9	4/25	3/22	5/4	3/18	4/29
B	3/2	4/15	3/14	4/24	3/8	4/18
C	2/27	4/4	3/9	4/14	3/4	4/11

표 3-2. 온도구배하우스 내 온주밀감의 온도별 발아 및 만개기

온도	2014년도		2015년도		2016년도	
	발아기	만개기	발아기	만개기	발아기	만개기
노지 (Ambient)	4/11	5/19	4/9	5/16	4/5	5/14
A	3/20	4/29	3/22	4/29	3/21	4/28
B	3/11	4/20	3/15	4/17	3/6	4/14
C	3/5	4/13	3/9	4/9	3/3	4/10

표 3-3 온도구배하우스 내 부지화 및 온주밀감의 봄순 길이, 발아수

품종	처리구	봄순길이 (cm)	엽면적 (cm ²)	발아수 /액아
부지화	A	12.9±1.9	10.9±1.8	1.12±1.0
	B	16.5±2.0	15.5±2.0	0.85±1.0
	C	19.0±2.1	17.4±2.0	0.99±1.0
온주밀감	A	24.4±1.3	22.1±2.2	1.03±1.0
	B	26.2±1.2	25.3±2.2	0.41±0.8
	C	38.5±1.3	29.2±2.3	0.45±0.8



사진 3-2. 온도구배하우스 내 부지화 온도별 생육단계의 변화(2015년)



사진 3-3. 온도구배하우스 내 온주밀감 온도별 생육단계의 변화(2015년)

착과율은 발생한 꽃에서 생리낙과하여 남은 과실의 비율을 나타내는 것으로서 품종 간에 차이가 있었다(표 3-4). 부지화는 온도가 높을수록 착과율이 증가하는 경향을 보였고 착과율도 낮았지만 온주밀감은 온도가 높을수록 착과율이 감소하여 생리낙과가 많음을 알 수 있었고 착과율은 부지화보다 대체적으로 높은 경향을 보였다. 착화량과 착과량은 온도차이에 따른 차이가 없었다. 착과율이 높은 것은 과실생장에 부정적으로 작용할 가능성이 있다. 부지화 재배시 봄철 발아 및 개화시기의 온도가 낮을 경우 과실비대가 제대로 이루어지지 않아 작은 과실이 증가한다고 보고된 바 있다(Matsumoto 등, 1972). 온도가 상승할수록 높은 온도에 의해 온주밀감의 생리낙과는 증가할 가능성이 크며, 그 대신 부지화는 온도가 상승할수록 자방의 충실도가 커져서 생리낙과가 적고 착과율이 증가할 가능성이 있다고 판단된다. Inoue(1989)는 온도가 높을수록 온주밀감의 형태적 화아분화기부터 개화까지의 일수는 적어지고 꽃은 작아지는데 낙과에 영향을 미치는 개화시의 자방 크기도 작아졌으며 이 경향은 유엽화보다 직화에서 뚜렷이 나타났다고 하였고, Takagi 등(1982)은 온주밀감에서 개화기 전후의 고온조건이 화기 및 유과의 발달에 미치는 영향을 조사한 결과 개화기의 고온조건에 의해 화기 크기가 작아져 낙과가 증대되었다고 하는데 본 연구에서도 비슷한 경향을 나타내었다.

감귤은 고온에서 낙과가 많으며(Bustan과 Goldschmidt, 1998; Kobayashi 등, 1967; Kihara와 Konaka, 2000) 일반적으로 꽃이 많이 피면 초기 낙과가 증가하여 착과율은 낮아진다(Guardiola, 1981; Takagi 등, 1987). 본 연구에서도 온주밀감인 경우 고온에서 착과율이 떨어지는 경향은 비슷하였으나 부지화인 경우 다소 완화되는 경향이 있는데, 앞으로 검토되어야 할 사항이라고 판단된다.

고온에 의해 낙과가 촉진되는 이유로 Bustan과 Goldschmidt(1998)는 그레이프후루트는 매년 20,000 ~ 50,000개의 꽃을 피우지만 그 중에 0.5 ~ 2.5%가 수확기에 남는데 과실생장에 필요한 전체 탄수화물 소비량의 10 ~ 20%가 개화에 투자되므로 개화 동안에 매일 꽃이 필요로 하는 탄수화물량은 매일 잎에 의해 생산되는 탄수화물보다 많기 때문에 낙과가 이루어지며 고온은 꽃의 호흡률을 증가시키고 개화기간을 단축시켜 낙과를 증가시킨다고 하였다.

표 3-4. 온도구배하우스 내 부지화 및 온주밀감의 착과율(%)

품종	처리구	2014년	2015년	2016년
부지화	A	7.3±1.6	3.8±1.4	5.8±1.3
	B	7.3±1.7	5.4±1.4	6.4±1.2
	C	18.0±2.3	4.6±1.3	8.4±1.3
온주밀감	A	18.6±2.0	24.3±1.8	38.1±1.9
	B	23.1±1.9	30.1±2.0	28.4±1.8
	C	10.9±1.7	22.3±1.5	15.8±1.6

과실의 횡경과 종경은 온도가 높을수록 이른 시기부터 증가하여 과실비대가 진행되는 데 대부분 성숙기에 이르러서는 과실크기가 비슷하였지만, 부지화는 온주밀감보다 높은 온도에서 과실생장이 높은 경향을 보였다(그림 3-3). 감귤 과실 생장은 보통 S자형을 나타내는데 온주밀감은 온도가 높을수록 초기생장은 좋지만 결국 성숙기에 가서는 온도에 관계없이 비슷한 상태를 나타내었다. 다만 온도가 높은 구는 여름철 혹서기에 강한 햇빛과 높은 고온에 의해 과실생장량이 더딤을 알 수 있었는데, 앞으로 기후변화에 의해 여름철 온도가 매우 높아지면 과실생장량이 느리게 진행될 수 있는 가능성이 있다고 판단된다.

부지화는 높은 온도에서 과실종경이 발달하였으며 과실 횡경도 종경과 마찬가지로 측정시기에 관계없이 높은 온도에서 크게 생장이 이루어졌다. 그러나 온주밀감은 고온일수록 종경 비대가 왕성하다고 하였고(Nii 등, 1970), 개화기의 고온 조건에 의해 과경부의 생장이 왕성하여 기형과가 발생하였다고 하는데(Takagi 등, 1982) 본 시험에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 온도가 높은 구나 낮은 구가 밤낮 온도교차가 비슷했기 때문이라고 생각된다. 과형지수는 큰 차이를 나타내지 않았다. Nii 등(1970)은 온도가 조생온주밀감의 비대 및 품질에 미치는 영향을 구명하고자 15, 20, 25, 30℃ 구로 나누어 조사한 결과 횡경비대 및 중량생장은 20℃, 25℃에서 가장 좋고 종경비대는 고온구일수록 좋았으며 Utsunomiya 등(1982)은 온주밀감 과실의 온도를 15, 23, 30℃로 제어하여 과실의 비대생장과 성숙에 미치는 영향을 조사한 결과 과중, 과피중 모두 23℃에서 가장 무거웠고 30℃에서 가벼웠다고 하는데 본 연구에서 초기생장은 온도가 높은 구가 빠른 경향을 보였지만 성숙기에 가서는 비슷한 결과를 보였다.

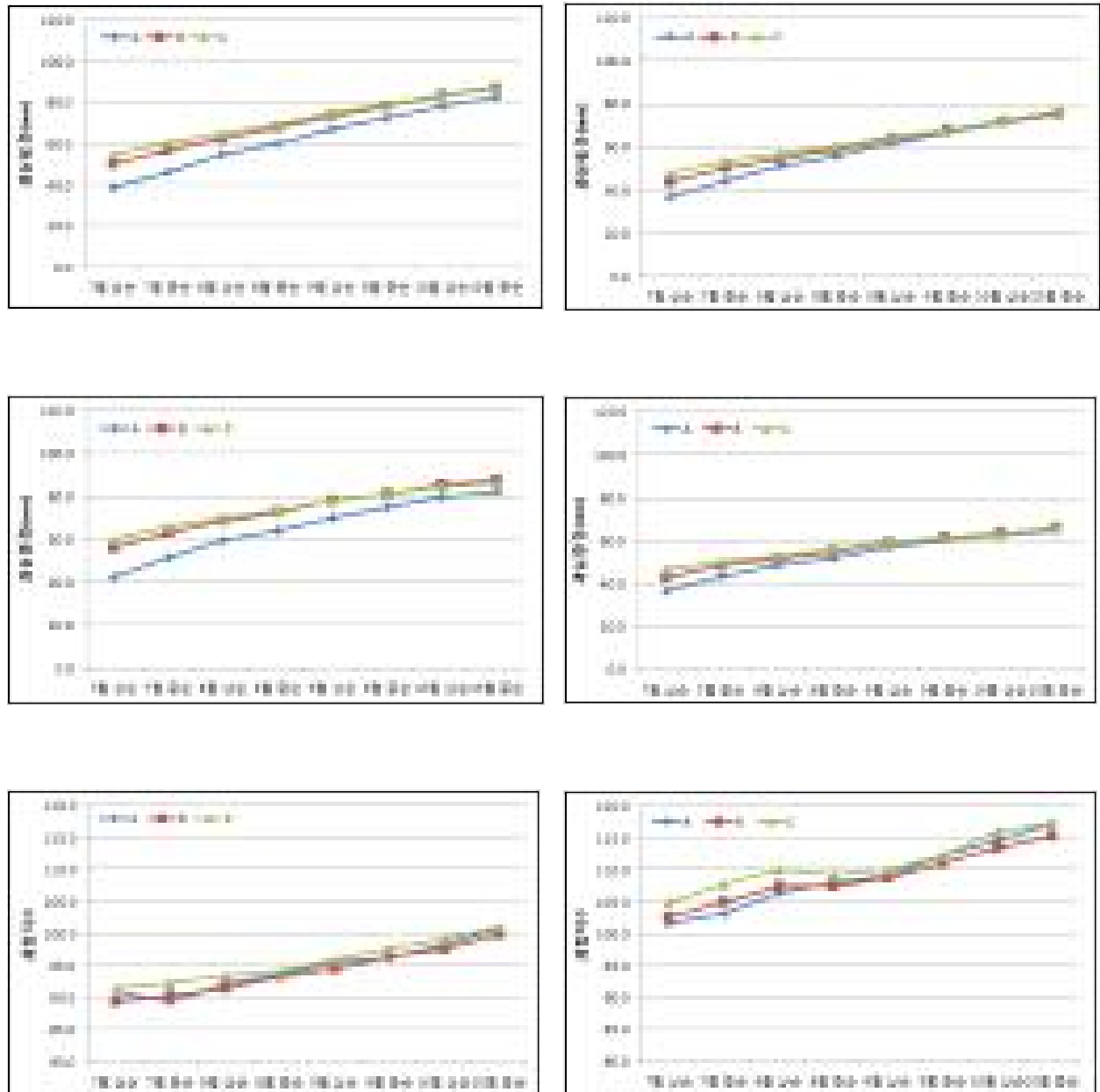


그림 3-3. 온도구배하우스 내 부지화(왼쪽) 및 온주밀감(오른쪽)의 과실크기 변화(2014~2016년 평균)

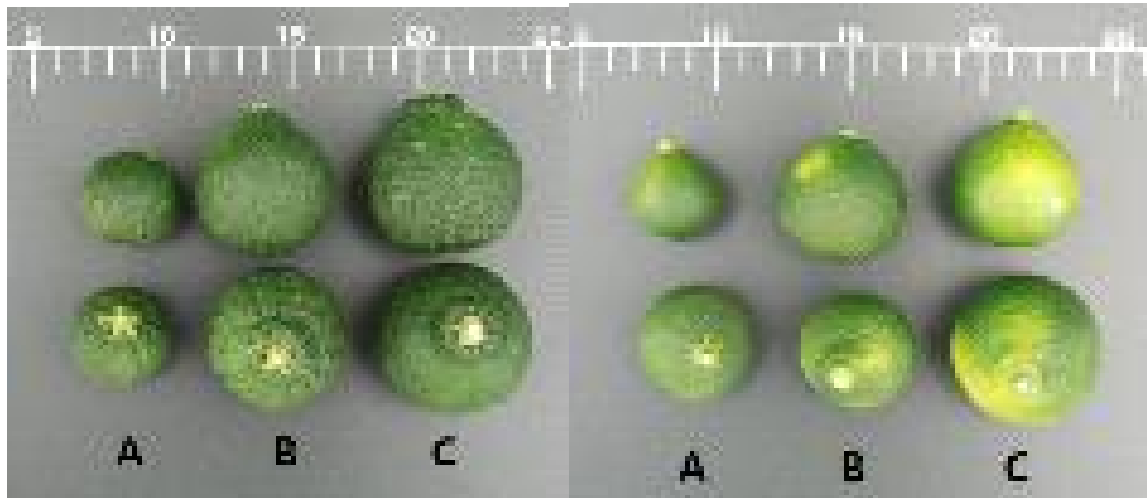


사진 3-4. 부지화(왼쪽) 및 온주밀감(오른쪽) 과실상태(2014.6.28.)

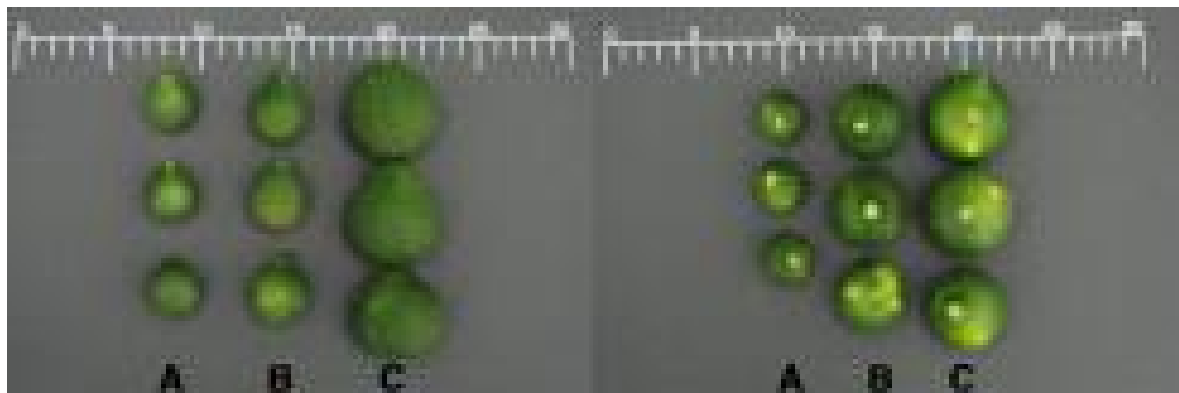


사진 3-5. 부지화(왼쪽) 및 온주밀감(오른쪽) 과실상태(2015.6.17)

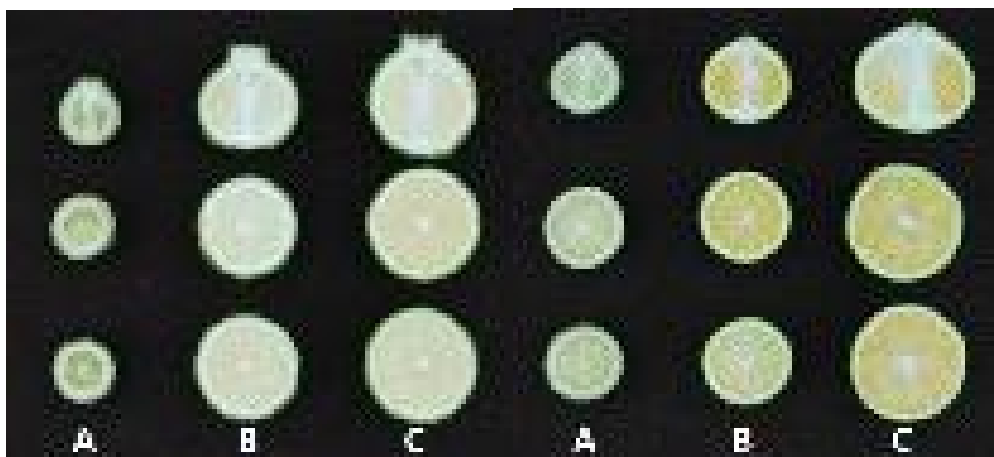


사진 3-6. 부지화(왼쪽) 및 온주밀감(오른쪽) 과실 단면(2016.7.6.)

일소는 겨울철 나무가 밤에 얼었다가 낮에 햇빛의 직사에 의하여 나무가 장해를 받는 경우와 여름철 건조하고 고온이 될 때 강한 햇빛에 의하여 고온장해를 받는 경우가 있다. 식물체의 대부분 조직들은 온도가 45℃ 이상이 되면 높은 온도로 인해 광저해 스트레스를 받게 되고 일정 시간 이상 노출되면 결국 고사하게 된다고 한다.

본 시험에서도 7월부터 온도가 높아질수록 일소발생은 증가하며 외기온보다 4℃가 높으면 11.6%, 6℃가 높으면 13.3% 일소가 증가하여 수량을 감소시켰다(그림 3-4). 일반적으로 일소는 8월 말 이후 착색이 시작될 때 온도가 높으면 많이 발생한다. 그러나 과실이 청귤일 경우도 일소가 발생할 수 있는데 일소가 발생될 당시의 온도는 일평균 33℃ 내외였으며 낮 최고기온은 40℃ 이상 상승했으며, 광의 세기는 $700\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 이상이 3시간 이상 지속되어 착색이 시작되지 않더라도 이러한 조건이 되면 일소가 발생할 수 있다. 본 시험에서는 B, C구에서 일소과 발생이 많았는데 C구는 7월 25일 내외에서 40℃ 이상 온도가 상승하고 광의 세기도 $700\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 이상 될 때 일소가 발생하기 시작하였고 B구는 7월 29일 내외에서 비슷한 조건에서 일소과가 발생하기 시작하였다(그림 3-5, 그림 3-6). B구나 C구든 최고온도와 태양복사에너지가 합치될 때만 일소과가 발생하여 어느 한 가지 요인을 줄여주면 일소과를 예방할 수 있다고 판단된다. 앞으로 기후변화에 의해 여름철 온도가 상승하면 노지온주밀감이나 일반 만감류에서 일소가 증가할 가능성이 매우 크기 때문에 이에 대한 대책을 조속한 시일 내에 마련해야 된다고 판단된다.

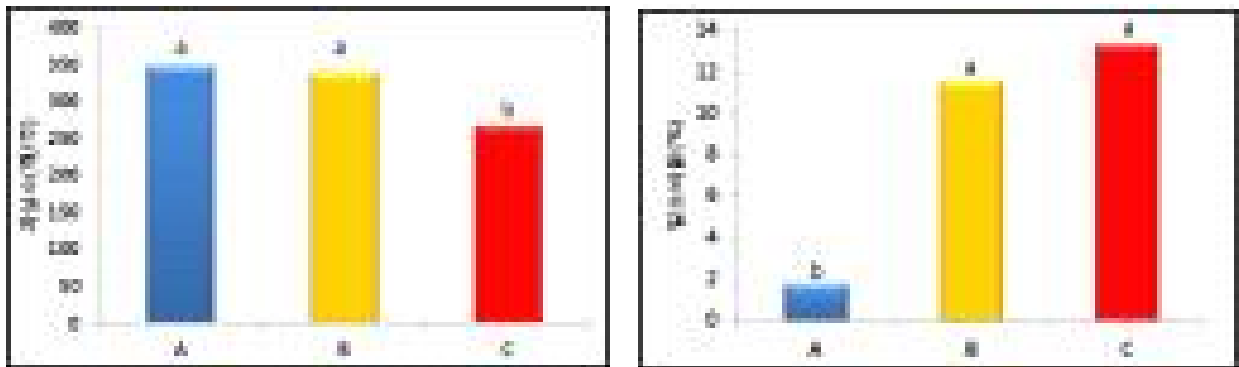


그림 3-4. 온주밀감 온도별 과실수 및 일소 비율차이

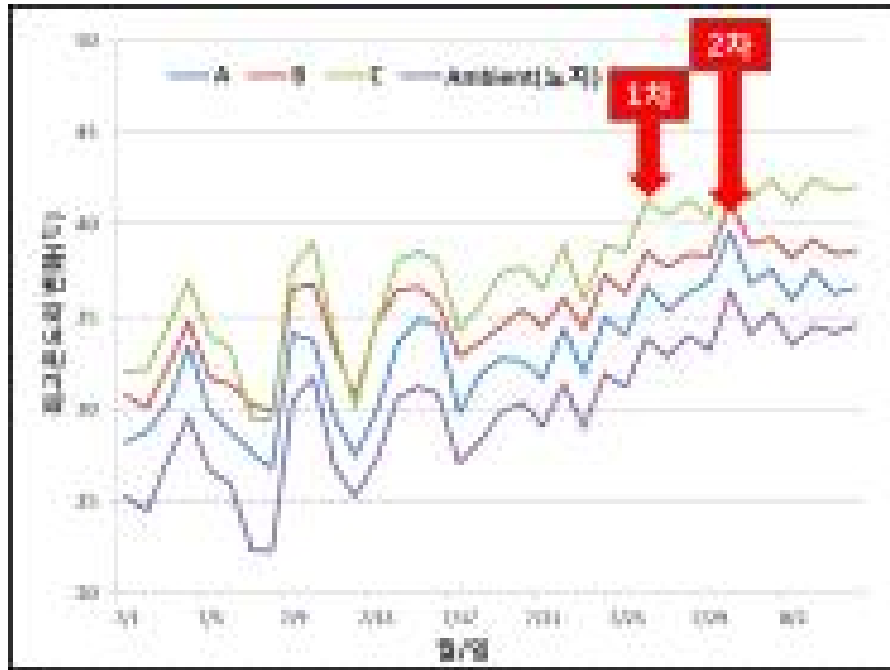


그림 3-5. 최고온도변화 및 일소발생시기. 1차는 C구에서 일소가 처음 발생한 시점이며, 2차는 B구에서 일소가 발생하는 시점임

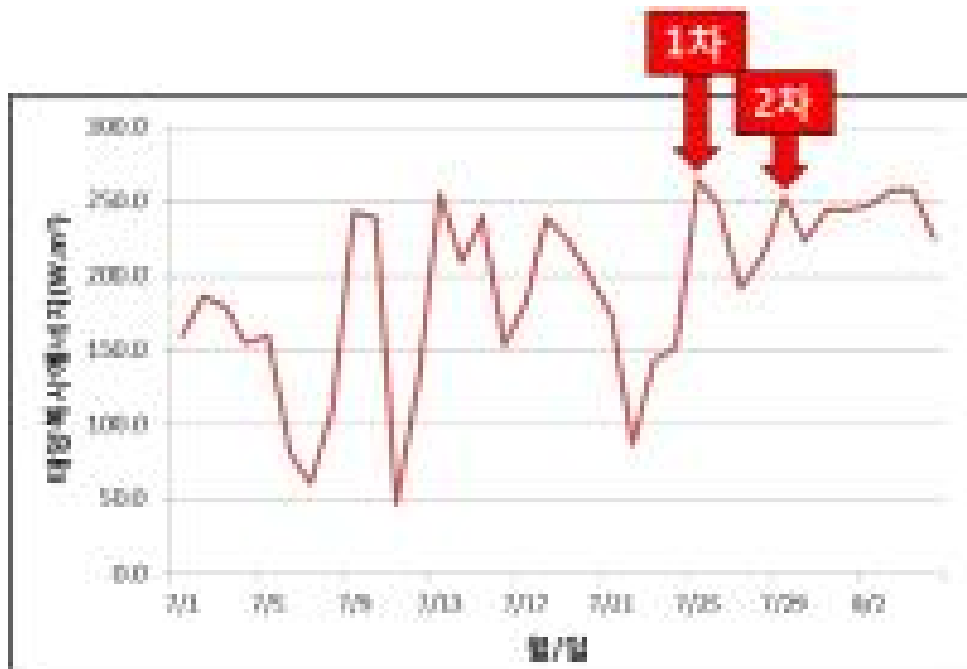


그림 3-6. 태양복사에너지 변화 및 일소발생시기. 1차는 C구에서 일소가 처음 발생한 시점이며, 2차는 B구에서 일소가 발생하는 시점임



사진 3-7. 착색기 이전 과실의 일소발생 유형들

생육기 온도 상승처리가 성숙기 부지화 및 온주밀감의 가용성고형물 함량에 미치는 영향을 살펴본 결과 온도가 높을수록 가용성고형물 함량이 높아지는 경향을 보였지만 처리간에 큰 유의차는 나타나지 않았다(표 3-5). Richardson 등(1996)은 만개기부터 수확기까지 높이 1.8m, 폭 1.2m의 터널피복 하우스와 무처리로 나누어 온주밀감의 과실생장과 당의 축적에 미치는 영향을 조사한 결과 온도가 높은 터널피복 하우스에서 당함량이 증가하였다고 하였지만 본 시험에서는 유의한 결과는 일부를 제외하고는 나타나지 않았다. 이는 온도가 높을수록 조기에 성숙기에 이르러서 가용성고형물 함량이 높을 것으로 기대했지만 온도가 높을수록 호흡소모도 많아져 가용성고형물 함량 증가가 더딘 것으로 판단되었다. 수관외부의 과실은 온도가 낮은 수관내부의 과실보다 당 함량이 높고 산 함량이 낮을 뿐 아니라 착색이 좋아지며(Izumi 등, 1990) 햇빛이 비추고 온도가 높은 남쪽 수관상부가 당 함량이 가장 높고 산 함량이 가장 낮는데(Syvertsen과 Albrigo, 1980), Iwagaki와 Kato(1982)도 초기 개화된 과실에서 당함량이 높았다고 하는데, 본 연구와 같이 기후변화의 영향을 목적으로 수행한 연구에서는 하우스 내의 온도가 너무 높으면 당의 증진보다는 소모하는 쪽으로 대사가 바뀌기 때문이라고 생각된다.

온도에 따른 산 함량은 부지화 및 온주밀감에서 온도가 높을수록 낮아졌는데 특히 C구에서 산 함량 감소폭이 컸다. 만숙계통인 부지화는 일반적으로 노지나 하우스에서 재배할 때 산 함량이 높은 경향이 있는데 온도가 높을수록 산 함량이 낮아져 오히려 긍정적인 효과를 나타내는데, 이는 고온에서 산 함량이 낮았다고 한 Iwagaki와 Kato(1982)의 보고와 유사하였다. 산 함량이 높은 단점을 가지고 있는 부지화는 온난화가 될수록 오히려 품질이 향상될 수 있는 가능성이 있다. 반면 온주밀감은 온도가 높을수록 산 함량이 저하되는 경향을 나타내었는데 가을철 강수량이 더해지면 당도와 산 함량이 동시에 낮아서 품질에 좋지 않은 영향을 줄 것으로 판단되었다. Matsumoto 등(1972)은 과수원의 위치도 당 함량 및 산 함량에 영향을 미치는데 해발고는 당 함량에 영향을 미치지 않았지만 산 함량에 영향을 미쳐 해발고가 높아 온도가 낮은 지역일수록 산 함량이 높아지고 특히 해발 200m 이상에서는 산 함량이 현저하게 높았다고 하였고, Huh(1973, 1975)는 유기산 함량은 해안에서 거리가 멀수록 또는 표고가 높을수록 증가했다고 하는데, 온도가 높아지면 산 함량이 낮아지는 것은 일치하는 경향을 보였다.

착색은 온도가 높아질수록 늦어지는 경향이 보였지만 유의적인 차이는 일부 결과에서만 나타났다. 다만 생육초기부터 온도가 높은 C구는 성숙기에도 착색이 진전되지 않은 것으로 보아 온도 상승은 착색에 부정적인 영향을 줄 것으로 판단되었다.

표 3-5. 생육기 온도 상승처리가 성숙기 부지화 및 온주밀감의 가용성고형물 함량 (° Bx)에 미치는 영향

월/일 처리	부지화			온주밀감		
	2014년	2015년	2016년	2014년	2015년	2016년
A	11.5 a	14.1 b	13.0 b	9.4 b	8.9 a	8.4 a
B	12.0 a	15.7 a	15.1 a	9.4 b	9.5 a	8.9 a
C	10.8 a	14.8 ab	14.3 a	9.9 a	9.8 a	8.9 a

※ 조사시기는 부지화는 2014년은 12월 상순, 2015년과 2016년은 1월 하순, 온주밀감은 10월 하순에 조사하였음.

표 3-6. 생육기 온도상승처리가 성숙기 부지화 및 온주밀감의 산함량(%)에 미치는 영향

월/일 처리	부지화			온주밀감		
	2014년	2015년	2016년	2014년	2015년	2016년
A	1.9 a	2.2 a	2.1 a	1.0 a	1.6 a	0.9 a
B	1.5 ab	1.9 ab	1.5 b	1.1 a	0.9 b	0.8 a
C	1.1 b	1.5 b	1.2 b	1.2 a	0.8 b	0.9 a

※ 조사시기는 부지화는 2014년은 12월 상순, 2015년과 2016년은 1월 하순, 온주밀감은 10월 하순에 조사하였음.

표 3-7. 생육기 온도상승처리가 성숙기 부지화 및 온주밀감의 착색 a값에 미치는 영향

월/일 처리	부지화			온주밀감		
	2014년	2015년	2016년	2014년	2015년	2016년
A	13.8 a	21.1 ab	23.6 a	7.8 a	6.3 a	5.0 a
B	12.4 ab	22.0 a	23.6 a	3.2 ab	6.6 a	-4.6 a
C	3.4 b	20.1 b	22.4 a	-2.6 b	7.6 a	-8.8 a

※ 조사시기는 부지화는 2014년은 12월 상순, 2015년과 2016년은 1월 하순, 온주밀감은 10월 하순에 조사하였음.

(2) 온도차이에 따른 감귤의 착색 및 품질 반응 분석

(가) 감귤의 착색 및 품질 반응 분석(온도구매하우스 내)

온도구매하우스 내 감귤의 착색 및 품질 반응 분석을 위해 착색기 이후의 온도 환경을 조성하였다(그림 3-7, 그림 3-8). 도련 및 하례에서 노지 및 온도구매하우스의 평균 온도를 조사한 결과 노지에서 일평균온도가 착색에 적합한 20℃ 이하로 떨어지는 시기는 10월 이후였다. 온도가 높은 C구는 11월이 지나서 일평균 온도가 일평균 온도가 20℃ 이하로 떨어지는 경향을 보였다.

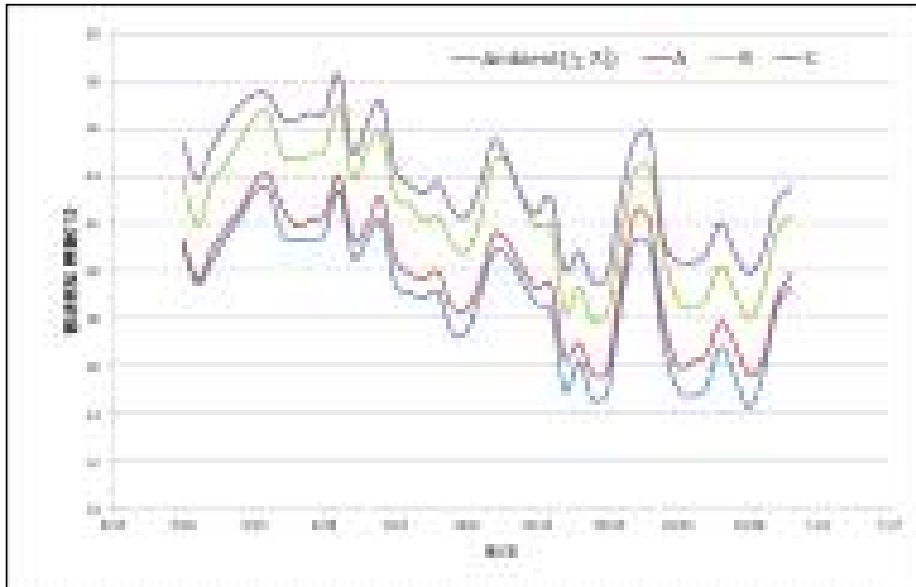


그림 3-7. 온도구매하우스(도련) 내 일별 평균온도의 변화(2014년)

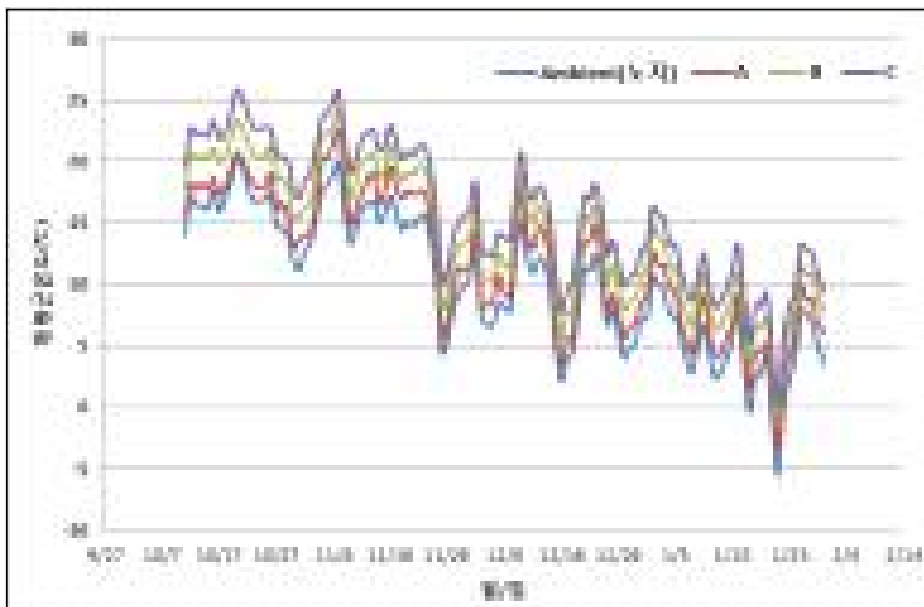


그림 3-8. 온도구매하우스(하례) 내 일별 평균온도의 변화(2015년)

과실크기는 온도 차이에 따라 큰 차이를 보이지 않았지만 온도가 가장 높은 C구에서 과실의 일일 증가량이 커지는 경향을 보였다(그림 3-9). 일반적으로 과실의 횡경과 종경은 온도가 높을수록 이른 시기부터 증가하여 과실비대가 진행되는데, 성숙기에서 온도가 높은 것은 그 다지 과실 비대량에는 영향을 주지 않은 것으로 생각된다. 다만 온주밀감은 성숙 후반부에 껍질이 분리되는 부피현상을 보이는데 이는 과실이 커지기보다는 과실내의 생리적인 노화현상으로 생각된다. 앞으로 성숙기의 온도가 과실의 비대에 미치는 영향을 보기 위해서는 보다 정밀한 연구가 필요하다고 판단된다. 본 시험에서는 외기환경과 온도구배하우스 환경이 온도의 영향보다는 수분의 영향을 받았다고 생각되며, 같은 수분환경일 때 온도가 높아지면 과실비대도 더 좋아질 것으로 추측된다.

성숙기 온도 차이에 따른 가용성고형물 함량은 처리전과 비교해 볼 때 다소 차이가 있었다(표 3-8). 2014년부터 2016년 3년 모두 온도가 높은 C구는 노지에 비해 처리전보다 처리후가 당도가 낮은 경향을 보였다. 이는 앞의 연구처럼 온도가 높을수록 가용성고형물 함량이 높을 것으로 기대했지만 온도가 높을수록 호흡소모도 많아져 가용성고형물 함량 증가가 더딘 것으로 판단되었다. Mukai 등(1992)은 온주밀감 과실품질에 미치는 가을철 온도의 영향을 조사하기 위하여 20-25℃, 15-20℃ 처리를 한 결과 15-20℃ 처리에서 과실비대가 잘 되고 당 함량도 높았다고 하였는데 이는 온도가 과실의 당 함량에 영향을 미치고 있음을 보여준다. 산 함량은 온도가 높을수록 낮은 경향을 보였지만 큰 차이는 없었다. 단지 온도가 높은 C구에서 산 함량 저하가 컸다.

착색은 온도가 낮은 노지구에서는 빠른 속도로 진행되었지만 온도가 높은 A, B, C구에서는 착색의 진행이 늦었다(그림 3-10, 사진 3-8, 3-9). 특히 온도가 가장 높은 C구는 착색이 11월이 되어도 진행이 늦게 나타나 앞으로 기후변화에 의해 온도가 높아지면 온주밀감의 착색 지연은 자연적으로 늦어질 가능성이 크다고 생각된다. 과피의 클로로필 및 전카로티노이드 함량을 보면 온도가 높을수록 클로로필 함량이 높고 전카로티노이드 함량이 낮았는데(표 3-9) 특히 온도가 높은 B구와 C구는 전카로티노이드 함량이 낮아 높은 온도 조건하에서는 착색이 제대로 이루어지지 않는 것으로 나타났다. 감귤 과피의 착색은 엽록체내 엽록소가 파괴되는 한편 카로티노이드의 생합성으로 엽록체가 유색체로 전환되므로써 이루어지는데 온도가 높아지면 엽록체가 유색체로 전환되는 것이 늦어질 가능성이 크다. Nii 등(1970)은 온주밀감 과즙중의 당 함량은 20℃ 전후에서 증가되었고 산 함량은 비대기에는 25℃, 성숙기에는 20 ~ 25℃에서 잘 감소하였지만 15, 30℃에서는 쉽게 감소하지 않았다고 하였으며, Utsunomiya 등(1982)은 과즙중의 유기산 함량은 과실온도가 높을수록 낮았고 당 함량은 23℃에서 가장 높았으며 착색은 온도가 낮을수록 빨랐다고 하였는데 본 연구의 결과도 이와 유사하였다.

성숙기 온도 차이에 따른 부지화의 가용성고형물 및 산 함량은 처리 간에 큰 유의차는 보이지 않았다(표 3-10). 과피의 착색은 성숙초기에는 온도가 높을수록 착색이 지연되었지만 수확기에는 큰 차이를 보이지 않았다(그림 3-11). 부지화의 온도 적응성 연구는 지속적으로 검토해야 할 사항이라고 생각된다.

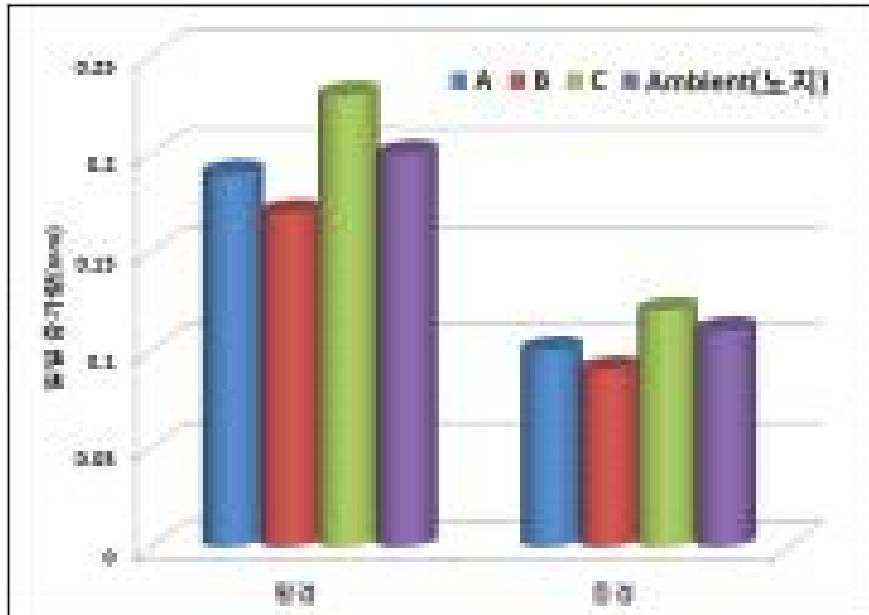


그림 3-9. 성숙기 온도 차이에 따른 온주밀감 과실크기 일일 증가량(2016)

표 3-8. 성숙기 온도차이에 따른 온주밀감 가용성고형물 및 산 함량

처리구	가용성고형물 함량(° Bx)						산 함량(%)					
	2014년		2015년		2016년		2014년		2015년		2016년	
	처리 전	처리 후	처리 전	처리 후	처리 전	처리 후	처리 전	처리 후	처리 전	처리 후	처리 전	처리 후
Ambient (노지)	7.1	11.8	10.8	14.1	8.6	10.2	2.0	1.1	4.2	1.8	1.1	1.1
A	7.4	11.4	10.6	12.9	9.4	9.5	2.0	1.1	4.4	1.8	1.0	0.9
B	7.4	11.9	10.1	12.9	8.0	9.8	2.0	1.0	3.9	1.7	0.9	0.8
C	7.8	11.3	10.3	13.0	9.1	7.9	1.9	1.0	3.9	1.3	1.4	0.8

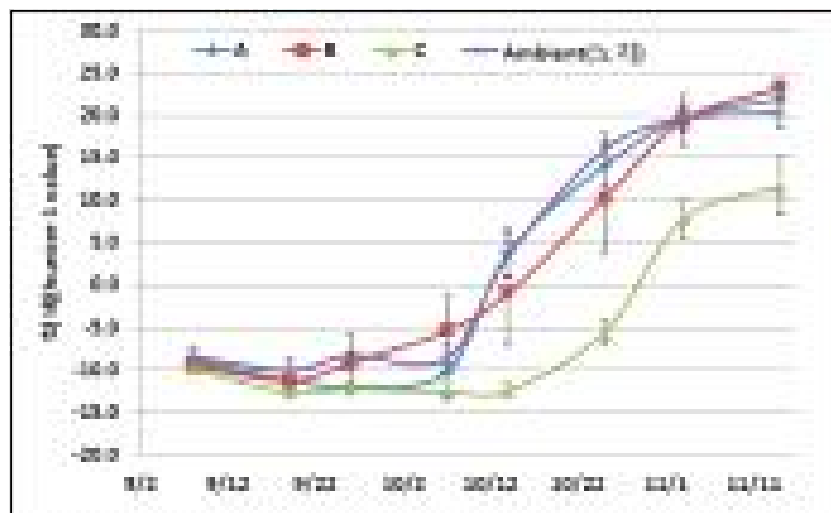
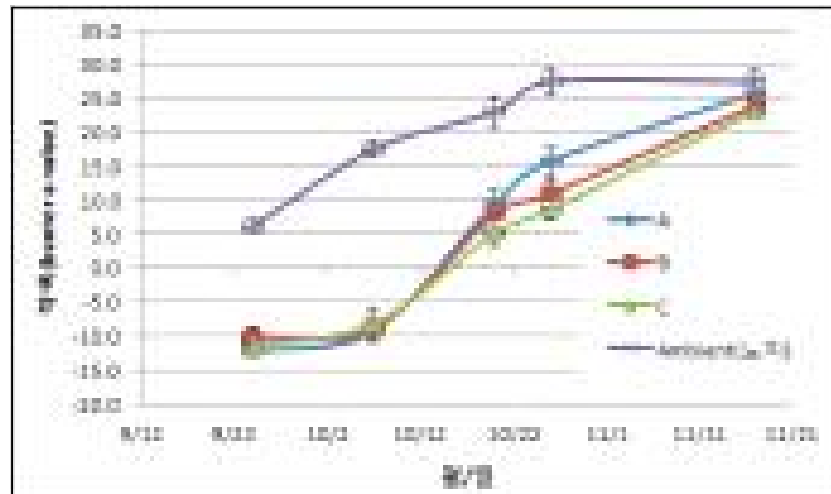
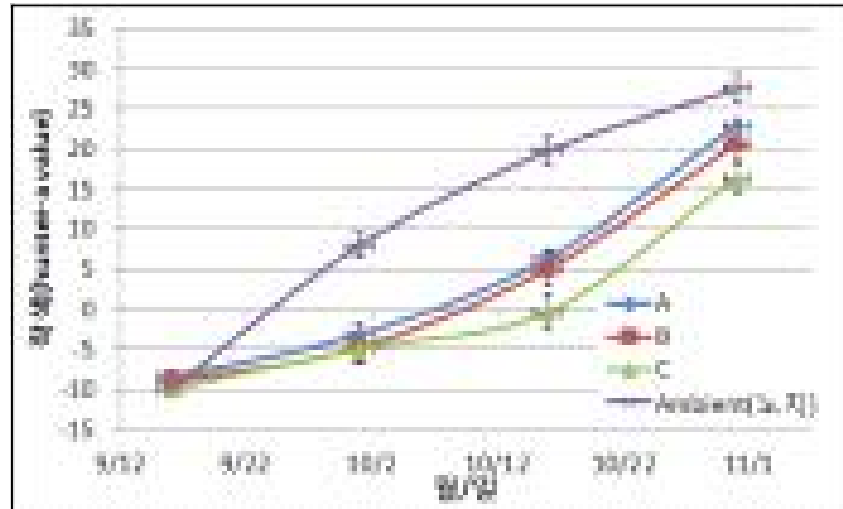


그림 3-10. 성숙기 온도차이에 따른 온주밀감 착색 변화
(위, 2014년; 중간, 2015년; 아래, 2016년)

표 3-9. 성숙기 온도상승처리가 온주밀감의 클로로필 및 전카로티노이드함량에 미치는 영향

처리 월/일	처리 전			처리 후		
	클로로필a ($\mu\text{g/g}$)	클로로필b ($\mu\text{g/g}$)	전카로티 노이드 ($\mu\text{g/g}$)	클로로필a ($\mu\text{g/g}$)	클로로필b ($\mu\text{g/g}$)	전카로티 노이드 ($\mu\text{g/g}$)
Ambient(노지)	224.2 a	103.1 a	53.9 a	58.7 d	29.2 d	150.2 a
A	223.0 a	104.5 a	52.5 a	81.1 c	35.9 c	118.1 b
B	226.6 a	104.4 a	53.8 a	123.9 b	49.4 b	76.3 c
C	231.7 a	104.2 a	53.5 a	169.1 a	63.7 a	60.6 d

※ 조사시기는 부지화는 2014년은 12월 상순, 2015년과 2016년은 1월 하순, 온주밀감은 10월 하순에 조사하였음.



사진 3-8. 성숙기 온도차이에 따른 온주밀감 과경부(왼쪽)와 과정부(오른쪽)의 온도별 착색상태(2014. 10. 16. 온도구배하우스).

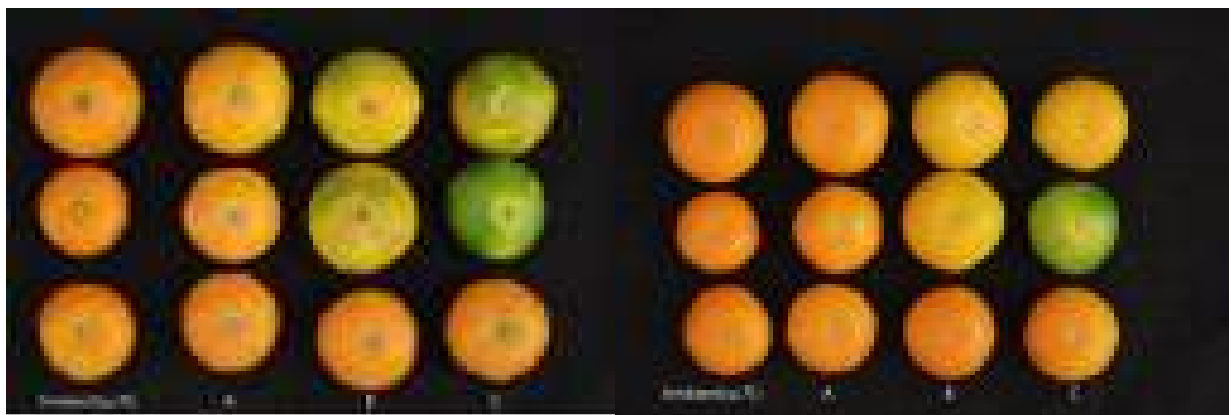


사진 3-9. 성숙기 온도차이에 따른 온주밀감 과경부(왼쪽)와 과정부(오른쪽)의 온도별 착색상태(2016. 11. 16. 온도구배하우스).

표 3-10. 성숙기 온도 차이에 따른 부지화 가용성고형물 및 산 함량

처리구	가용성고형물 함량(° Bx)		산 함량(%)	
	2015년	2016년	2015년	2016년
Ambient(노지)	15.0	13.0	1.5	1.7
A	16.1	15.4	1.4	2.4
B	16.1	15.2	2.0	1.5
C	16.0	14.6	2.1	1.7

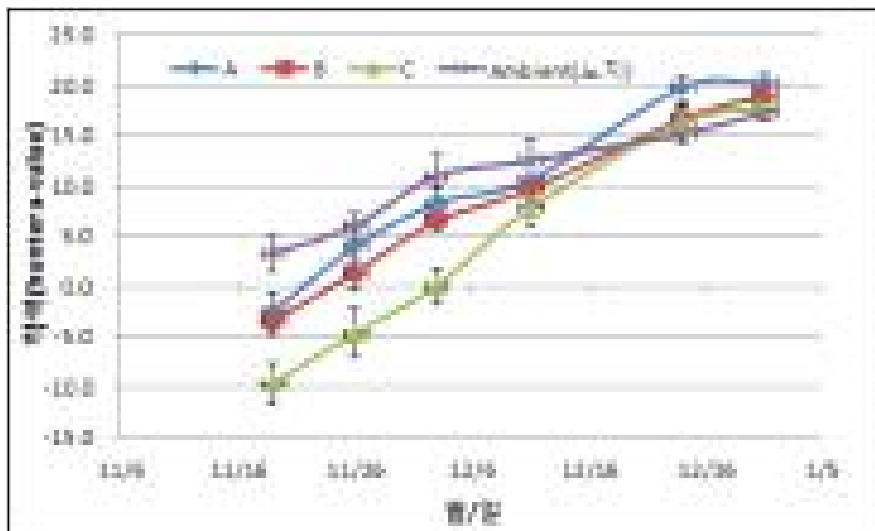


그림 3-11. 성숙기 온도차이에 따른 부지화 착색 변화(2015년)

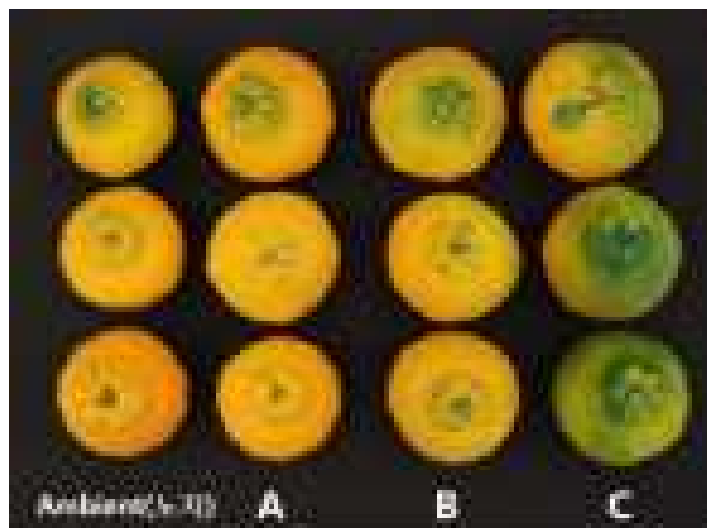


사진 3-10. 성숙기 온도차이에 따른 부지화 온도별 착색상태(2016. 12. 01. 온도구배하우스)

(나) 감귤의 착색 및 품질 반응 분석(Walk in Growth Chamber)

성숙기에 감귤의 착색이 시작되는 일평균 온도를 20℃로 하고 이보다 3℃, 낮은구, 이보다 3℃, 6℃ 높은 구를 설정하여 시험하였을 때 온주밀감과 부지화의 가용성 고형물 함량은 20℃보다 온도가 높을 때 현저하게 감소됨을 보였는데(표 3-11, 표 3-13) 이는 온도구배하우스 내 시험 결과(표 3-8)과 비슷한 결과를 보였다. 산 함량은 온도 처리후 온도가 높을수록 낮아지는 경향을 보였지만 뚜렷한 유의차는 나타나지 않았다. 착색 hunter a값은 처리전과 처리후를 비교하였을 때 일평균온도가 20℃이하일 때는 착색이 순조롭게 진행되었지만 20℃보다 3℃, 6℃가 높아졌을 때 과실의 과정부부터 과경부 모두 착색의 진행이 매우 늦음을 알 수 있었다. 일반적으로 동남아지역에서 감귤의 착색이 나쁜 이유가 온도가 높은 것이 원인이라고 했을 때 본 시험에서도 거의 일치하는 결과를 보였다. Mukai 등(1992)은 온주밀감 과실품질에 미치는 가을철 온도의 영향을 조사하기 위하여 20-25℃, 15-20℃처리를 한 결과 15-20℃처리에서 과실비대가 잘 되고 당 함량도 높았다고 하였는데 이는 온도가 과실의 당·산 함량에 영향을 미치고 있음을 보여준다. 더욱이 극조생온주밀감인 경우 일평균온도가 20℃이상이 될 경우 착색이 진행되지 않아 수확에 많은 어려움을 가질 것으로 예측되었다. Nii 등(1970)은 온주밀감 과즙중의 당 함량은 20℃ 전후에서 증가되었고 산 함량은 비대기에는 25℃, 성숙기에는 20 ~ 25℃에서 잘 감소하였지만 15, 30℃에서는 쉽게 감소하지 않았다고 하였으며, Utsunomiya 등(1982)은 과즙중의 유기산 함량은 과실 온도가 높을수록 낮았고 당 함량은 23℃에서 가장 높았으며 착색은 온도가 낮을수록 빨랐다고 한 보고와 비슷한 결과를 나타내었다. 노지에서 극조생온주밀감의 착색이 거의 끝나는 10월 중순이 되도 사진 3-11과 사진 3-12에서 보는 바와 같이 온도가 높은 M+3℃구와 M+6℃구는 거의 착색의 진행이 이루어지지 않고 있다. 이는 감귤재배지 예측지도를 구성할 때 매우 유용한 자료로 이용될 것으로 생각되며 감귤 착색기의 변화가 감귤 재배적지의 변화에 많은 영향을 끼칠 것으로 판단되었다. 부지화도 거의 같은 형태로 온도처리했을 때 온도가 높은 M+3℃구와 M+6℃는 착색의 진행이 거의 이루어지지 않았다. 부지화인 경우 향후 보다 정확한 착색연구를 수행할 필요성이 있다고 생각되었다. 일반적으로 부지화의 착색은 10월 이후가 되며 이때 일평균온도는 20℃보다 훨씬 낮아 부지화의 적정 착색온도는 온주밀감보다 더 낮아질 것으로 판단된다.

표 3-11. 온도처리별 온주밀감의 가용성고형물 함량, 산 함량, 착색 변화

처리온도 (℃)	가용성고형물 함량 (°Bx)		산함량 (%)		착색 a값 (hunter a)	
	처리전	처리후	처리전	처리후	처리전	처리후
M-3℃	7.5 b	12.7 a	2.0 a	1.2 a	-11.6 a	30.7 a
M(평균 20℃)	6.9 b	12.1 a	2.8 a	1.2 a	-10.7 a	25.6 a
M+3℃	7.3 b	10.4 a	3.1 a	1.1 a	-11.2 a	-10.8 b
M+6℃	9.0 a	10.7 a	2.5 a	0.9 a	-12.1 a	-9.4 b



사진 3-11. 성숙기 온도차이에 따른 온주밀감 온도별 착색상태(2014. 10. 16. 챔버)



사진 3-12. 성숙기 온도차이에 따른 온주밀감 온도별 착색상태(2014. 10. 16. 챔버시험)

표 3-12. 성숙기 온도상승처리가 온주밀감의 클로로필 및 전카로티노이드함량에 미치는 영향

처리 \ 월/일	처리전			처리후		
	클로리필a ($\mu\text{g/g}$)	클로로필b ($\mu\text{g/g}$)	전카로티 노이드 ($\mu\text{g/g}$)	클로리필a ($\mu\text{g/g}$)	클로로필b ($\mu\text{g/g}$)	전카로티 노이드 ($\mu\text{g/g}$)
M-3°C	240.4 a	108.1 a	50.5 a	58.7 c	25.4 c	153.6 a
M(평균 20°C)	244.0 a	104.2 a	52.6 a	58.7 c	28.0 c	153.7 a
M+3°C	237.9 a	103.7 a	50.0 a	120.8 b	50.7 b	58.6 b
M+6°C	244.3 a	108.5 a	51.1 a	245.7 a	106.2 a	48.3 b

표 3-13. 온도처리별 부지화의 가용성고형물함량, 산함량, 착색 변화

처리온도 (℃)	가용성고형물함량 (°Bx)		산함량 (%)		착색 a값 (hunter a)	
	처리전	처리후	처리전	처리후	처리전	처리후
M-3℃	8.1 a	14.8 a	5.2 a	2.0 a	-7.8 a	18.8 a
M(평균 20℃)	7.5 a	13.9 a	5.1 a	2.1 a	-7.8 a	13.8 b
M+3℃	7.0 a	11.6 b	4.6 a	2.0 a	-8.0 a	-9.4 c
M+6℃	7.4 a	11.5 b	4.9 a	1.6 a	-8.3 a	-7.6 c



사진 3-13. 성숙기 온도차이에 따른 부지화 온도별 착색상태(2015. 2. 1. 챔버)

2. RCP 기후변화 시나리오에 따른 생물계절(착색기) 변동예측 지도 제작

감귤 착색기 변동 예측 지도는 기후변화시나리오(2100년까지 예측)를 바탕으로 재배적지의 기준을 적용시켜 과거 30년 평균, 2010년대부터 2090년대까지 10년 단위로 재배지를 예측한 과수재배적지(총 19圖), 시군구 단위로 재배적지, 가능지, 저위생산지 면적 자료를 제공하기 위해 제작된 과수재배적지 지도를 바탕으로 작성되었다. 착색기 변동예측지도는 기후변화시나리오 RCP 4.5, 8.5를 적용하여 시·공간적으로 2020에서 2100년(10년단위)까지 1km해상도, 전국단위로 작성하였다. 변화예측 적용 기상요소로는 일평균기온을 적용하였고 대상품종은 조생온주밀감을 이용하였다. 온주밀감 착색은 가을철 온도의 영향을 많이 받는데 일평균온도가 20℃가 될 때부터 과피의 착색이 시작된다. 이를 바탕으로 일평균 온도가 20℃가 되는 시기를 분석한 결과 현재는 대부분 9월 28일부터 10월 8일 사이였으며, 온도가 높은 해안 지역은 10월 8일 이후가 해당되었다. 기후변화에 의해 향후 온도가 점점 높아진다고 하는데, 2040년에는 일평균 온도가 20℃가 되는 시기가 대부분 10월 8일 이후가 되는 것으로 나타나 온주밀감 착색기는 점점 지연되는 것으로 나타났다. 온주밀감 착색기는 재배적지 변동지도에 맞춰서 분석하면 2070년에는 강원도 동해안 지역에서 온주밀감을 재배할 경우 과피의 착색은 9월에 된다고 볼 수 있다. 결론적으로 온주밀감은 제주지역에서 재배면적이 줄어들고 동시에 과피의 착색이 점점

늦어지고, 오히려 내륙으로 온주밀감 재배가 확대되어 착색도 빨라질 것으로 예측되었다. 온도가 상승하는 지역은 과피의 착색을 촉진시키거나 고온에서도 착색이 잘 되는 품종 개발이 절실하다고 판단된다.

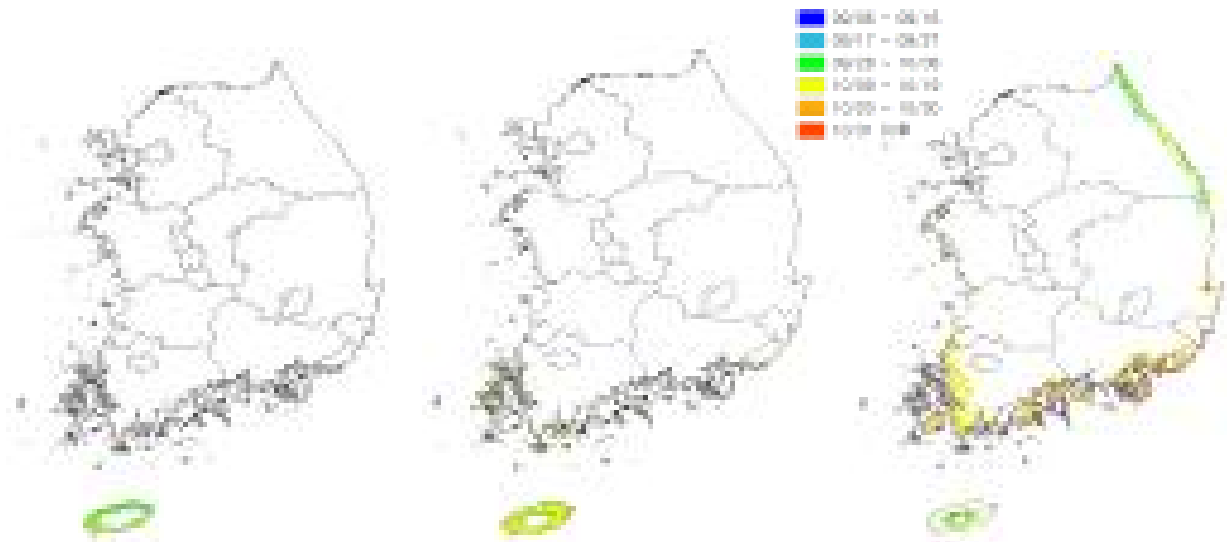


그림 3-12. 온주밀감 착색기 변동 예측 지도(왼쪽부터 현재, RCP 8.5 2040년, 2070년; 전국)

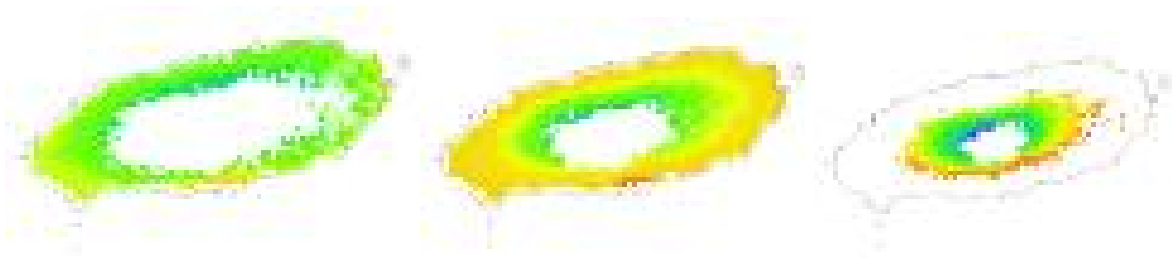


그림 3-13. 온주밀감 착색기 변동 예측 지도(왼쪽부터 현재, RCP 8.5 2040년, 2070년; 제주)

제4절 기후변화 시나리오를 적용한 인삼 생산영향평가

1. 연구 수행 내용

가. 온도에 따른 인삼 생육 분석

본 시험은 온도처리별 인삼의 생육특성을 분석하기 위해, 인삼 연생별 생육기 고온처리에 따른 생육특성, 재식시기별 생육기 고온처리에 따른 생육특성 및 생육단계별 고온에 의한 인삼의 생육특성을 분석하기 위해 수행되었으며, 시험재료는 2014과 2015년 인삼특작부 시험포장에서 육성된 연풍 품종의 묘삼을 3월에 채굴하여 무게 0.8~1.0 g, 길이 13~15 cm의 묘삼만을 이용하였다.

① 시험방법

본 시험에 사용된 포장은 제주도 온난화대응농업연구소 해발200m 시험포장과 음성 인삼특작부 시험포장 내 온도구배하우스에 2014년 3월 하순과 2015년 3월 하순경 묘삼을 연차별로 이식하였다. 온도구배하우스는 폭 2.6m × 너비 2.6m (측고 1.3 m) × 길이 30m로 내부에 온풍기 덕트 양쪽으로 두둑 너비 65cm × 높이 30cm × 길이 28m 규격의 두둑을 2개 만들어 15cm×20cm 간격으로 묘삼을 이식하였으며 (재식밀도 5주 × 8열 / 90cm × 180cm), 하우스 외부에 투광률 85% 흑색 차광망을 설치하였다. 수분관리, 병해충 방제 등 기타 재배관리는 인삼 GAP 표준재배지침에 준하여 관리하였다(RDA, 2012). 온도처리의 경우 낮에는 일사에 의한 온도 상승을 환풍기로 온도구배를 조성하고, 밤에는 온풍기를 통해 내부와 외부 온도 편차를 6℃로 구배를 두었다.

② 기상환경 조사

외부 온도는 하우스 외부 북서쪽 측면 두둑 위 30 cm 높이에, 내부 온도는 하우스 입구, 중앙, 후미부에서 두둑높이로부터 약 30 cm 높이에 설치한 온도센서(1400-101, LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA)를 이용하여 측정하였다. 시험기간동안 외부온도에 비해 입구, 중앙부, 후미부에서 온도가 각각 2℃, 4℃, 6℃ 더 높게 유지되도록 복합환경제어시스템 (TGC-System, Soldan Crop., Seoul, Korea)을 이용하여 제어하였다. 온도 데이터는 데이터로거(CR1000, Campbell Scientific Inc., Logan, USA)에 연결하여 1시간 단위로 기록하였다.

③ 토양 화학성 분석

토양화학성 분석은 농촌진흥청 농업과학기술원 토양 및 식물체 분석법(NIAST, 2000)에 준하여, pH, EC, NO₃-N, 유기물, 유효인산, 치환성양이온 K, Ca, Mg, Na 등을 분석하였다. 토양 pH와 EC는 초자전극법을 이용하여 측정하였고, NO₃-N 분석은 풍건토양 10 g을 100 ml 삼각플라스크에 넣고 2 M KCl 50 ml를 가하여 30분간 진탕한 후 NO₃-N 여과지로 여과한 후 원소자동분석기 (Auto Analyzer, Bran Luebbe, Norderstedt, Germany)로 자동비색 정량하였으며, 유기물 분석은 Tyurin법으로 측정하였다. 유효인산함량은 Lancaster법으로 측정하였고, 치환성 양이온 (K, Ca, Mg, Na)은 토양 5 g에 1 N-NH₄OAc (pH 7.0) 완충용액 50 ml를 넣고 30분간 진탕한 후 침출, 여과하여 유도결합플라즈마 발광광도계(ICP OES, GBC Scientific, Braeside, Australia)로 측정하였다. 제주와 음성의 온도구배하우스 내부 토양 이화학성 분석 결과는 표2와 같다. 인삼 예정지 관리기준에 제주 토양은 Na와 유기물함량이, 음성은 pH가 다소 높은 반면, 유기물함량이 다소 부족하였으나, 그 외 다른 이화학성분은 기준치에 적합하였다.

표 2. 인삼 재배예정지 토양 이화학성 분석 결과

시료명	pH	EC (dS/m)	NO ₃ (mg/kg)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	K (cmol ⁺ /kg)	Mg (cmol ⁺ /kg)	Na (cmol ⁺ /kg)	Ca (cmol ⁺ /kg)	OM (g/kg)
제주1	5.60	0.68	38.49	206.03	0.99	2.49	0.32	4.58	32.53
제주2	4.91	0.51	34.97	136.65	0.64	1.38	0.23	2.72	32.08
제주3	5.74	0.42	20.25	276.40	1.04	2.62	0.21	5.61	35.08
평균	5.41	0.54	31.23	206.36	0.89	2.17	0.25	4.30	33.23
음성1	7.19	0.11	19.53	158.60	0.15	1.36	0.06	4.59	5.88
음성2	6.99	0.10	20.98	191.33	0.16	1.30	0.05	4.21	5.92
음성3	7.02	0.08	20.94	128.38	0.10	1.35	0.05	4.60	3.22
평균	7.07	0.09	20.48	159.44	0.14	1.34	0.05	4.47	5.01
채배기준	5.0~6.5	1.00이하	100이하	100~400	0.3~1.0	1.0~4.0	0.05~0.20	3.0~6.5	10~30

④ 인삼 생육특성 조사

인삼의 생육특성은 지상부와 지하부로 나누어 처리별 10개체씩 2반복 조사하였다. 지상부 생육 조사는 경장, 경직경, 엽병장, 엽장, 엽폭, 엽수 등을 조사하였고, 지하부 생육조사는 근장, 근직경, 근중 등을 조사하였다. 병 및 생리장해는 뿌리에 발생하는 적변, 은피 및 뿌리썩음병을 대상으로 발생 정도를 조사하였다.

⑤ 인삼 Ginsenoside 성분 분석

10종의 진세노사이드 함량 분석을 위해 수확한 인삼을 세척한 후 동결건조하고, 300 mesh 이하로 곱게 분쇄하여 사용하였다. 진세노사이드 표준품은 Re, Rg1, Rf, Rb1, Rg2, Rh1, Rc, Rb2, Rb3, Rd (Chroma Dex, Santa Anna, CA, USA)를 사용하였다. 진세노사이드 분석을 위해 인삼 분말시료 0.2 g과 70% MeOH 2 ml를 넣고 잘 혼합한 후 50℃에서 30분 동안 초음파 추출한 뒤 4℃, 13000 rpm에서 15분 동안 원심분리 하여 얻은 상등액을 2 ml tube에 취한 다음 1 ml를 Sep-Pak C18 cartridge를 이용하여 정제한 후 추출액을 0.45 µm membrane filter로 여과하여 분석시료로 사용하였다(Kim 등, 2008). 진세노사이드 함량은 Agilent 1100 series HPLC system (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA)을 이용하여 측정하였고 이동상의 유속은 0.5~0.8 ml/min., 칼럼온도는 50℃, UV 검출기의 파장은 203 nm였다. 분석을 위한 Column은 Halo RP-amide column (4.6×150 mm, 2.7 µm, Wilmington, DE, USA)을 사용하였다.

⑥ 통계분석

온도처리별로 인삼 생육특성 및 진세노사이드 함량의 차이를 분석하기 위해 Duncan's Multiple Range Test (DMRT)로 분석하였으며, SAS v9.2 (SAS Institute inc., Cary, NC, USA)를 이용하여 계산하였다.

나. CO₂농도별 인삼 생육특성 분석

본 시험재료는 2014년 인삼특작부 시험포장에서 육성된 연풍 품종의 묘삼을 3월에 채굴하여 무게 0.8~1.0 g, 길이 13~15 cm의 묘삼만을 이용하였다.

① 시험방법

본 시험은 전주 국립원예특작과학원 과수과 생리생태연구동 옥내정밀환경조절챔버(EGC GR96, 원예원)에서 수행하였다. 폭 55cm × 너비35cm × 높이 30cm 플라스틱포트에 상토를 채워

넣고, 5주 × 4열로 포트당 20주씩 4월 하순경 인삼 묘삼을 이식하였다. 해가림을 위해 투광률 85% 흑색 2중직 차광망을 이용하여 차광을 하였다. 수분관리, 병해충 방제 등 기타 재배관리는 인삼 GAP 표준재배지침에 준하여 관리하였다(RDA, 2012). CO₂처리의 경우 챔버별로 400ppm, 600ppm, 800ppm, 1000ppm 으로 조절하여 처리하였다.

② 인삼 생육특성 조사

인삼의 생육특성은 지상부와 지하부로 나누어 처리별 10개체씩 2반복 조사하였다. 지상부 생육 조사는 경장, 경직경, 엽병장, 엽장, 엽폭, 엽수 등을 조사하였고, 지하부 생육조사는 근장, 근직경, 근중 등을 조사하였다. 병 및 생리장해는 뿌리에 발생하는 적변, 은피 및 뿌리썩음병을 대상으로 발생 정도를 조사하였다.

③ 인삼 엽단면 분석

인삼 잎 조직 절편을 2×2×2mm 크기로 채취하여 2.5% glutaraldehyde에 넣은 즉시 조직에 포함되어 있는 기포를 제거하였다. 모든 과정은 4℃에서 진행되었으며 1차 고정 90분간 처리 후 0.1M phosphate buffer(pH 7.2)로 15분 간격으로 4~5회 세척하였다. 2차 고정으로는 1% osmium tetroxide로 4℃에서 90분간 처리한 후, 0.1M phosphate buffer(pH 7.2)로 20분 간격으로 4~5회 세척한 후 마지막 phosphate buffer에서 하룻밤을 경과하였다. 탈수는 40% ethanol, 60% ethanol, 80% ethanol, 90% ethanol, 95% ethanol로 각각 5분씩 그리고 100% ethanol로 5분, 15분, 30분간 탈수하였다. 탈수 후에는 epon의 조직내 침투를 더 용이하게 하기 위해 ethanol과 propylene oxide를 1:1로 섞은 용액에 sample을 15분간 경과시킨 후 순수 propylene oxide에 15, 15, 30분간 침지하였다. 최종적으로 epon에 매몰(embedding)하기 위하여 propylene oxide와 epon을 2:1, 1:1로 섞은 용액에 각각 3시간동안 처리한 후 순수 epon에서 하룻밤을 경과하였다. 다음날 새로운 epon으로 바꾸어 15분간 처리한 후 epon+D.M.P 30(epon의 1.5% 첨가)을 시료 절편과 함께 silicon mold에 넣어서 60℃에 4일간 열중합시켜 epon block을 만들었다. 처리구마다 10~15개의 epon block을 만들고, 이 중 임의로 3개의 epon block을 선택하여 초미세 절편기(Ultracut R, Leica Co)를 이용하여 1,500nm의 두께로 시료를 절단하여 slide glass 위에 증류수를 떨어뜨려 치상하고, 60℃에서 5시간 이상 건조시킨 후 염색하였다. 염색 과정은 제작된 조직 절편은 0.5% periodic acid(H₅IO₆) 용액에 30분간 담근 후 증류수로 10분간 2~3번 세척, Schiff's reagent에 15분간 처리, 1% sodium bisulfite 용액에 5분간 처리, 흐르는 물로 30분간 세척하는 순서로 실시하였다. 염색이 끝난 시료를 영구보존하기 위하여 60℃ 열판에서 5시간 이상 건조 후 hystomount를 떨어뜨리고 cover glass로 덮고 다시 건조 후 cover glass 주위에 붙어있는 hystomount를 깨끗이 제거하고 광학현미경(Axioskop 2, Carl Zeiss Co.,Germany)으로 100배로 검경, 촬영하였다.

④ 인삼 기공 SEM 분석

조직 절편을 가로 세로 4x4 크기로 채취하여 2.5% glutaraldehyde에 넣은 후 모든 과정은 4℃에서 진행되었으며 1차 고정 90분간 처리 후 0.1M phosphate buffer(pH 7.2)로 15분 간격으로 4~5회 세척하였다. 2차고정으로는 1% Osmium tetroxide로 4℃에서 90분간 처리, 0.1M phosphate buffer(pH 7.2)로 20분 간격으로 4~5회 세척한 후 마지막 상기 phosphate buffer에서 하룻밤을 경과하였다. 이어서 탈수는 ethanol series(40%, 60%, 80%, 90%, 95% ethanol)로 각각 20분씩 그리고 100% ethanol로 45분간 2회 탈수하였다. 탈수 후에는 iso-amylacetate로 40분간 2회 치환하여 CPD(Critical Point Dryer)로 건조시켜 시료대에 고정, Ion-Sputter(K-450, Emitech

Ltd, England)로 gold coating하여 SEM(SU-3500, Hitachi, Japan)으로 검경하였다.

⑤ 인삼 Ginsenoside 성분 분석

10종의 진세노사이드 함량 분석을 위해 수확한 인삼을 세척한 후 동결건조하고, 300 mesh 이하로 곱게 분쇄하여 사용하였다. 진세노사이드 표준품은 Re, Rg1, Rf, Rb1, Rg2, Rh1, Rc, Rb2, Rb3, Rd (Chroma Dex, Santa Anna, CA, USA)를 사용하였다. 진세노사이드 분석을 위해 인삼 분말시료 0.2 g과 70% MeOH 2 mL를 넣고 잘 혼합한 후 50℃에서 30분 동안 초음파 추출한 뒤 4℃, 13000 rpm에서 15분 동안 원심분리 하여 얻은 상등액을 2 mL tube에 취한 다음 1 mL를 Sep-Pak C18 cartridge를 이용하여 정제한 후 추출액을 0.45 µm membrane filter로 여과하여 분석시료로 사용하였다 (Kim 등, 2008). 진세노사이드 함량은 Agilent 1100 series HPLC system (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA)을 이용하여 측정하였고 이동상의 유속은 0.5~0.8 mL/min., 칼럼온도는 50℃, UV 검출기의 파장은 203 nm였다. 분석을 위한 Column은 Halo RP-amide column (4.6×150 mm, 2.7 µm, Wilmington, DE, USA)을 사용하였다.

⑥ 통계분석

CO₂처리별로 인삼 생육특성 및 진세노사이드 함량의 차이를 분석하기 위해 Duncan's Multiple Range Test (DMRT)로 분석하였으며, SAS v9.2 (SAS Institute inc., Cary, NC, USA)를 이용하여 계산하였다.

2. 연구결과

가. 생육기 고온에 의한 인삼의 연생별 생육 특성

인삼의 생육기 고온 처리를 위한 온난화대응농업연구소 및 인삼특작부의 온도구배하우스 내부 상·하부 월평균 온도변화는 그림 1과 같다. 상부 온도는 지상 2.4 m에 설치된 온도센서로 측정되었고, 하부는 지상 15 cm에 설치된 온도 센서로 측정되었다. 비교적 인삼의 지상부 생육부위와 비슷한 하부 센서에서 온도 편차가 비교적 일정하게 유지되는 것을 확인하였다. 6월 평균 기온은 음성이 높았고, 7월~8월 평균 기온은 두 지역이 비슷하였으나, 9월 평균 기온은 음성이 제주보다 2℃가량 낮은 경향이였다.

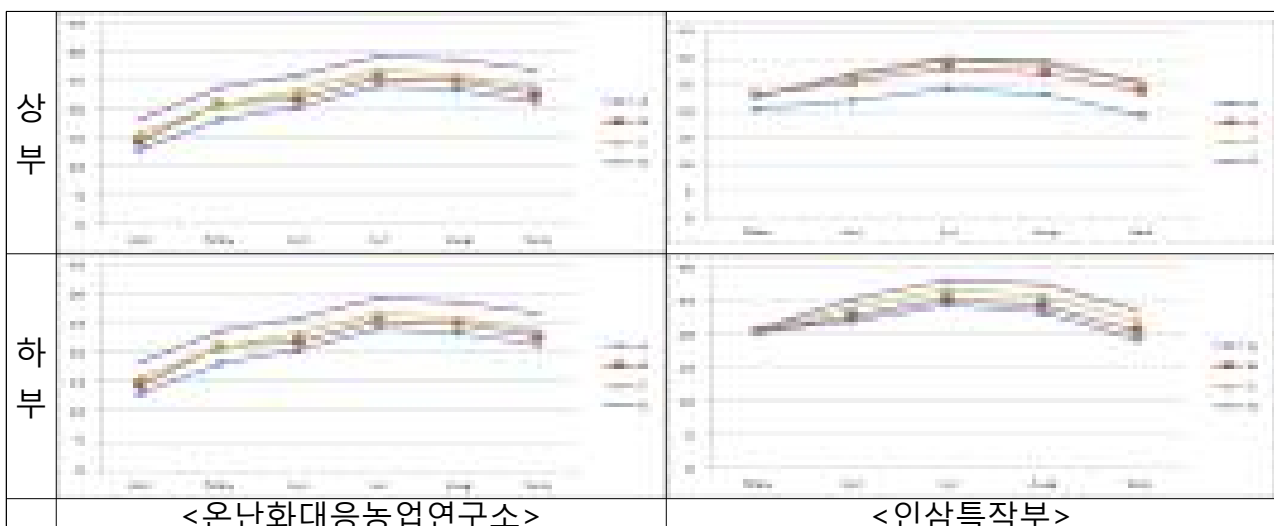


그림 1. 온도구배하우스 내부 온도변화

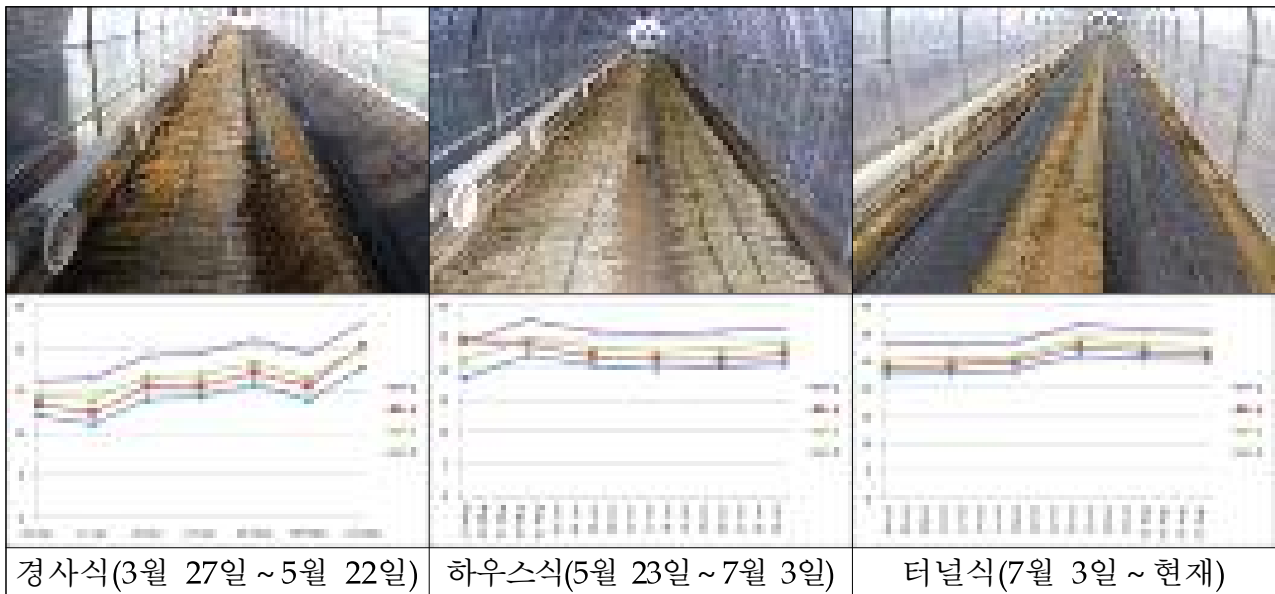


그림 2. 인삼 온도구배하우스 차광 방법별 온도 변화

온난화대응농업연구소 온도구배하우스의 경우 월평균기온으로는 온도구배가 이뤄지는 경향이었으나, 5월경 온도 역전현상은 해가림 유형 변경동안 이뤄진 것으로 생각된다(그림 2). 하우스 상부에 설치된 센서값을 보면 5월 22-23일 측정값은 해가림 유형을 바꾸는 관계로 오차가 다소 있었으나, 해가림 방법에 따른 주간 평균온도의 차이는 거의 일정하게 유지되었다. 음성은 온도구배하우스 외부 온도센서를 별도로 사용하고 있어 전체 하우스를 차광하는 하우스식 차광을 하였으나, 온난화대응농업연구소 온도구배하우스의 경우 경사식은 하우스 방향이 정남에서 정북으로 지어져 있어서 고르게 차광할 수 없는 단점이 있었고, 하우스식은 6개동 하우스 외부 온도를 1개의 센서로 공유하고 있어 월평균 온도 편차가 좁혀지고 있음이 확인되어 생육기 고온처리가 고르지 못하였으나, 터널식을 설치한 7월부터는 다시 온도 구배가 거의 정상적으로 유지되어, 온난화대응농업연구소 온도구배하우스는 터널식 해가림을 이용하여 시험하였다.

인삼의 생육기 고온 처리에 의한 2년생 지상부 생육특성은 표 3과 같다. 3월 27일 이식후 5월 22일과 6월 27일 두 번의 생육조사 결과 경직경만 A 및 B 처리구에서는 증가하였고 C 및 D 처리구에서는 감소하였으나, 경장, 엽장, 엽폭 및 엽병장은 온도가 증가할수록 증가하는 경향이였다. 8월 28일 실시한 생육조사 결과 경장은 C 처리구까지 증가하다가 D 처리구에서 감소하였고, 경직경은 C 처리구까지는 유의성 없었으나, D 처리구에서 감소하였다. 6월 27일 조사결과에 비해 경장과 경직경이 감소한 것은 생육이 줄어든 것이 아니라 경장이 짧은 개체가 후기까지 생육한 것으로 생각된다.

10월 8일에 실시한 인삼의 생육기 고온 처리에 의한 2년생 지하부 생육특성 및 병·생리장애 발생양상은 표 4와 같다. 근장은 C 처리구에서 가장 길었고, 근직경은 A처리구에서 가장 굵었으나, 근중을 보면 생육기 온도처리가 높아질수록 작아지는 경향이었는데, 이것은 생육기 온도가 높을수록 뿌리가 가늘고 짧게 자랐으며, 잔뿌리의 발달도 불량하였다 (그림 3). 병해 및 생리장애 발생양상의 경우 온도처리 전 구간에서 특별한 지하부 병이나 생리장애가 나타나지는 않았다. 인삼특작부 온도구배하우스 내 2년생 인삼의 경우 8월 1일부터 정상 가동되어 생육기 고온이 처리되지 않아 지상부 및 지하부 생육조사를 실시하지 못했다.

표 3. 생육기 고온처리에 따른 인삼 2년생 지상부 생육특성

구분		경장 (cm)	경직경 (mm)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽병장 (cm)
5월 22일 (이식 후 56일)	A	2.4b	1.56a	3.1b	1.8a	2.6b
	B	2.9ab	1.49a	3.8a	2.1a	3.6a
	C	3.0ab	1.54a	3.9a	2.1a	4.1a
	D	3.4a	1.45a	3.6ab	1.9a	3.6a
	평균	3.0	1.50	3.7	2.0	3.7
6월 27일 (이식 후 92일)	A	2.4b	1.57a	3.4a	1.9b	3.3b
	B	3.4ab	1.51a	4.1a	2.3a	3.9ab
	C	3.3ab	1.50a	3.8a	2.1ab	4.4a
	D	3.8a	1.31a	3.6a	2.0ab	3.7ab
	평균	3.4	1.45	3.8	2.1	3.9
8월 28일 (이식 후 155일)	A	1.8b	1.41a	3.6a	2.1a	3.6a
	B	2.3ab	1.38a	4.2a	2.3a	4.4a
	C	3.1a	1.41a	4.3a	2.4a	4.4a
	D	2.6ab	1.25a	4.2a	2.2a	4.3a
	평균	2.6	1.36	4.2	2.3	4.3

* Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)

표 4. 인삼 2년생 지하부 생육 및 생리장해·병해 발생양상

구분	근장 (cm)	근직경 (mm)	근중 (g)	수량 (g/3.3m ²)	병 및 생리장해 발생 [†]			
					뿌리 썩음병	적변	은피	기타
A	10.5bc	6.02a	1.46a	102.2	0	0	0	0
B	13.7ab	5.14ab	1.13a	79.1	0	0	0	0
C	15.6a	5.45ab	1.22a	85.4	0	0	0	0
D	9.5c	4.74b	0.68a	47.6	0	0	0	0
평균	12.3	5.34	1.12	78.4	-	-	-	-

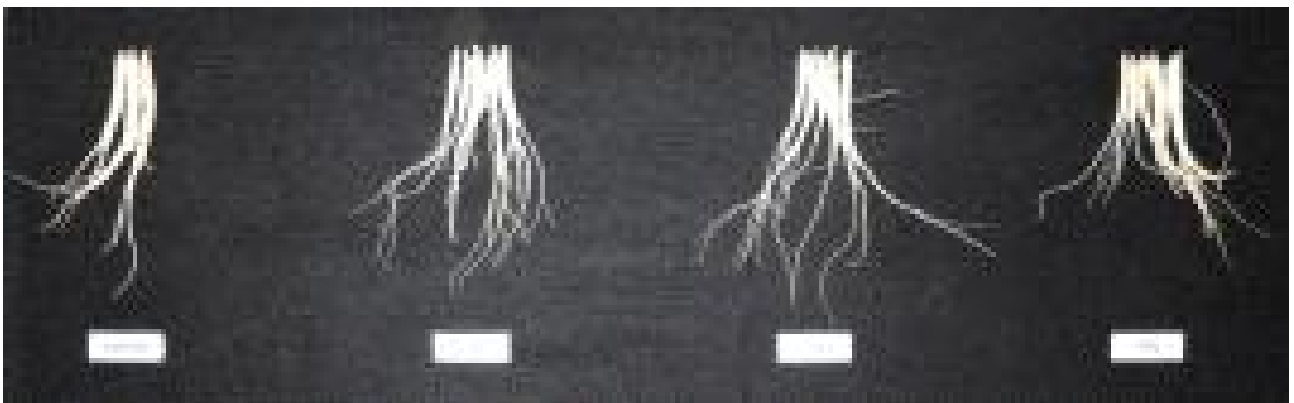
* Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)[†]0: 무발병, 1: 1% 미만, 3: 1~10%, 5: 10.1~30%, 7: 30.1~50%, 9: 50.1% 이상그림 3. 생육기 고온처리에 따른 공시 품종 지하부 생육특성
사포닌 함량 및 PD/PT 비율 역시 C 처리구에서 가장 높았다.

표 5. 인삼 2년생 온도처리별 사포닌(ginsenosides) 함량 차이

Treatm ent	Panaxadiol (PD)					Panaxatriol (PT)					Total	PD/PT
	Rb ₁	Rb ₂	Rb ₃	Rc	Rd	Re	Rf	Rg ₁	Rg ₂	Rh ₁		
A ¹	0.176d	0.060d	0.012d	0.094d	0.032c	0.101a	0.055b	0.492c	0.035d	0.002c	1.059c	0.547d
B	0.223c	0.070b	0.017b	0.121b	0.045a	0.094b	0.051c	0.512c	0.042b	0.002a	1.177b	0.677b
C	0.296a	0.090a	0.020a	0.146a	0.044b	0.097ab	0.061a	0.607a	0.048a	0.003a	1.412a	0.731a
D	0.237b	0.069c	0.016c	0.115c	0.030d	0.079c	0.047d	0.561b	0.040c	0.002b	1.195b	0.643c
Average	0.233	0.072	0.016	0.119	0.038	0.093	0.054	0.543	0.041	0.002	1.211	0.650

* Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)

표 6. 생육기 고온처리에 따른 제주 인삼 3년생 지상부 생육특성

구분		경장 (cm)	경직경 (mm)	엽병장 (cm)	소 엽병장 (cm)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	경수 (개)	엽병수 (개)	엽수 (개)	탁엽수 (개)
5월 29일	A	10.1ab	2.13a	4.4ab	1.0a	7.5a	3.5ab	1.0a	3.0a	14.3a	0.7a
	B	11.5a	2.51a	5.1a	1.1a	8.0a	3.8a	1.0a	2.9a	14.6a	0.9a
	C	11.6a	2.28a	4.6ab	0.9a	7.2a	3.4ab	1.0a	2.9a	14.8a	0.5a
	D	6.8b	2.05a	3.6b	0.6b	5.8b	2.8b	1.0a	3.0a	14.6a	0.4a
	평균	10.8	2.34	4.7	1.0	7.4	3.5	1.0	2.9	14.6	0.7
6월 25일	A	11.6a	2.59a	5.0a	1.2a	8.6a	4.0a	1.0a	3.0a	14.7a	0.0a
	B	11.6a	2.60a	5.0a	1.0a	8.1a	3.9a	1.0a	2.9a	14.3a	0.0a
	C	11.9a	2.38a	4.9a	1.1a	7.8a	3.7a	1.0a	2.9a	14.6a	0.1a
	D	6.8a	2.14a	4.1a	0.8a	6.1b	3.2a	1.0a	3.0a	14.5a	0.3a
	평균	11.2	2.46	4.9	1.0	7.8	3.7	1.0	2.9	14.5	0.1
7월 23일	A	11.3a	2.52a	5.1a	1.0a	8.7a	4.0a	1.0a	3.0a	15.0a	0.0a
	B	11.9a	2.58a	5.2a	1.2a	8.2a	3.9a	1.0a	3.0a	14.7a	0.0a
	C	11.4a	2.43a	4.9a	1.1a	7.6ab	3.6ab	1.0a	3.0a	14.9a	0.0a
	D	6.7b	2.25a	4.1a	0.8a	6.1b	3.0b	1.0a	3.0a	14.8a	0.2a
	평균	10.9	2.47	4.9	1.1	7.7	3.7	1.0	3.0	14.8	0.0

* Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)

생육기 고온에 의한 2년생 인삼의 ginsenoside의 함량은 표 5와 같다. ginsenoside 함량의 경우 전체적으로 C 처리구로 갈수록 증가하다가 D 처리구에서 다시 감소하는 경향이고, 총

제주 인삼의 생육기 고온 처리에 의한 3년생 지상부 생육특성은 표 6과 같다. 5월 29일, 6월 25일 및 7월 23일 등 28일 간격으로 세 번의 생육조사 결과 경장, 엽장 및 엽폭은 C처리구까지 유의한 차이를 보이지 않다가, D 처리구에서 짧아지는 경향이었으나, 경직경, 엽병장, 소엽병장, 경수, 엽병수 및 탁엽수는 생육기 온도 처리에 의한 생육의 차이를 보이지 않았다.

한편 음성 인삼의 생육기 고온 처리에 의한 3년생 지상부 생육특성은 표 7과 같다. 5월 25일, 6월 22일, 7월 20일 및 8월 17일 등 28일 간격으로 네 번의 생육조사 결과 경장, 경직경, 엽장은 B 처리구까지 유의한 차이를 보이지 않다가, C 처리구부터 작아지는 경향이었고, 엽폭은 C 처리구까지 유의한 차이를 보이지 않다가, D 처리구에서 작아졌다. 소엽병장, 경수, 엽병수 및 탁엽수는 생육기 온도 처리에 의한 생육의 차이를 보이지 않았다.

표 7. 생육기 고온처리에 따른 음성 인삼 3년생 지상부 생육특성

구분		경장 (cm)	경직경 (mm)	엽병장 (cm)	소엽병장 (cm)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	경수 (개)	엽병수 (개)	엽수 (개)	탁엽수 (개)
5월 25일	A	16.9ab	3.50a	5.8a	1.4a	9.2a	3.6ab	1.0a	3.3a	18.0a	1.3a
	B	17.9a	3.00ab	5.7a	1.2a	9.1a	4.0a	1.2a	3.5a	20.8a	3.5a
	C	13.9bc	2.63b	5.2a	1.0a	7.2b	3.4ab	1.0a	3.0a	17.6a	2.5a
	D	11.5c	2.37b	4.8a	0.9a	6.8b	3.0b	1.1a	3.4a	19.9a	3.0a
	평균	13.9	2.66	5.1	1.0	7.5	3.4	1.1	3.3	19.1	2.8
6월 22일	A	17.6a	3.50a	5.8a	1.4a	9.4a	3.8a	1.0a	3.3a	18.0a	3.0a
	B	17.8a	2.90a	5.7a	1.3a	9.0a	3.9a	1.2a	3.5a	20.8a	3.7a
	C	14.4ab	2.82a	5.2a	1.0b	7.4b	3.4a	1.0a	3.1a	18.3a	3.3a
	D	13.0b	2.44a	5.0a	0.8b	7.3b	3.1a	1.2a	3.8a	21.9a	4.1a
	평균	15.0	2.79	5.3	1.0	7.9	3.4	1.1	3.4	19.8	3.6
7월 20일	A	16.9a	3.64a	5.9a	1.8a	9.1a	7.6a	1.0a	3.3a	18.0a	2.0a
	B	17.8a	3.09ab	5.8a	1.2b	9.0a	3.9b	1.2a	3.5a	20.8a	4.2a
	C	14.2ab	2.82bc	5.3ab	1.0b	7.3b	3.3b	1.0a	3.1a	17.9a	3.0a
	D	11.6b	2.33c	4.7b	0.9b	6.8b	2.9b	1.1a	3.3a	18.3a	2.7a
	평균	14.1	2.77	5.2	1.1	7.6	3.7	1.1	3.2	18.6	3.0
8월 17일	A	17.5a	3.83a	7.5a	1.0a	9.7a	3.8a	1.0a	3.5a	18.5a	2.0a
	B	18.3a	3.23ab	7.4a	1.4a	8.8a	3.8a	1.2a	3.5a	21.2a	3.7a
	C	13.9a	2.72ab	5.4a	0.7a	7.2ab	3.3a	1.0a	3.2a	19.0a	3.2a
	D	11.0a	1.77b	3.5a	0.5a	4.8b	2.1b	2.0a	6.0a	38.0a	9.0a
	평균	16.1	3.03	6.4	1.0	8.1	3.5	1.1	3.6	21.2	3.8

* Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)

인삼의 표현형이 나타나는 4년생에서 생육기 고온 처리에 의한 음성과 제주의 지상부 생육 특성은 표 8과 같다. 온도가 증가할수록 비교적 생육이 감소하는 경향이였다. 음성에서는 경장과 경직경, 엽병장, 엽병수, 소엽병장, 엽장, 엽폭 및 엽록소함량(SPAD)이 B 처리구까지는 유의한 차이를 보이지 않다가 온도가 증가할수록 감소한 반면, 경수, 열매수 및 결실률에는 온도에 의한 차이를 보이지 않았다. 엽수와 탁엽수는 A 처리구에 비해 B 처리구에서 가장 많은 것으로 나타난 반면 꽃수와 열매수는 처리온도가 증가할수록 감소하는 경향이였으나 유의한 차이를 보이지 않았다. 엽병각은 C 처리구까지는 유의한 차이를 보이지 않다가 D 처리구에서 감소하였다. 한편 제주 4년생의 지상부 생육은 전체적으로 음성에 비해 떨어지는 경향이였으며, 경장, 엽병장, 엽장, 엽폭, 엽록소함량(SPAD) 등은 C 처리구까지 유의한 차이는 없었으나, 감소하는 경향이였고, D 처리구에서 급감하였다. 그러나 경직경, 경수, 엽병수, 소엽병

장, 엽수, 탁엽수, 엽병각 등은 온도처리에 따른 생육의 차이를 보이지 않았으며, 꽃수는 B와 C 처리구에서 일부 개체에서 개화하였으나, A와 D 처리구에서는 개화되지 못하였다. 또한 전체 처리구에서 결실이 되지 못해 열매수와 결실률은 0이었다. 음성에서 온도가 낮은 A 처리구에서 꽃수, 열매수가 비교적 많은 반면 결실률이 떨어지는 것과 제주에서 A 처리구에서 개화가 되지 못한 것은 하우스 입구쪽 바람에 의한 영향으로 생각되며, 제주에서 D 처리구에서 개화 결실이 이뤄지지 못한 것은 고온에 의한 개화장애 및 결실장애로 생각된다.

4년생 인삼의 생육기 고온 처리에 의한 음성과 제주의 지하부 생육특성 및 병해·생리장애 발생양상은 표 9, 그림 4와 같다. 생육기 온도 처리가 높을수록 근장과 근경 및 근중은 감소하였는데, 제주 D 처리구는 모두 고사하였다. 인삼의 광합성작용은 광조건보다 고온조건이 아주 큰 영향을 미쳐 온도가 높을수록 광합성능력이 저하되고(Bae 등, 1985), 온도가 높아질수록 열장애로 인한 기질공급의 저해로 성장효율이 저하되며, 이로 인해 근중이 감소한다고 하였다(Park 등, 1988). 본 시험의 결과 역시 생육 온도 상승이 광합성 저해와 열장애로 인한 기질공급 저해를 유발하여 온도가 증가할수록 근장과 근경 및 근중이 감소하는 것으로 판단된다. 그러나 동체장, 지근수, 측근수, 세근수 및 수근수는 유의한 차이를 보이지 않거나 온도와 의 뚜렷한 상관관계를 보이지 않아 지근, 측근, 세근 및 수근 형성에 온도는 크게 관여하지 않는 것으로 생각되었다.

표 8. 생육기 온도처리별 4년생 인삼의 지상부 생육특성

구분	경장	경직경	경수	엽병장	엽병수	소 엽병장	엽장	엽폭	엽수	탁엽수	꽃수	열매수	결실률	엽병각	SPAD
음성A	19.1a	4.81a	1.0a	5.8a	3.6ab	2.0a	9.9a	3.6ab	19.2b	1.2b	52.5a	1.5a	2.1a	56.0a	28.5a
음성B	18.4a	3.67ab	1.2a	5.1ab	4.8a	1.8a	8.8a	4.1a	27.7a	3.8a	23.2b	0.8a	5.6a	48.2ab	28.8a
음성C	11.6b	2.91b	1.1a	4.1bc	3.5b	1.1b	6.2b	3.0b	18.8b	2.0ab	17.0b	1.0a	5.9a	49.0ab	23.1b
음성D	10.1b	2.78b	1.1a	3.7c	3.3b	0.9b	5.7b	2.8b	18.5b	2.7ab	15.3b	0.3a	1.6a	42.2b	22.3b
평균	13.2	3.21	1.1	4.4	3.7	1.3	6.9	3.2	20.4	2.5	24.3	0.8	3.9	45.3	24.5
제주A	10.2a	1.88a	1.0a	5.2a	2.7a	0.9a	6.4a	3.4a	12.7a	0.7a	-	-	-	42.0a	27.9a
제주B	9.2ab	2.29a	1.0a	4.2ab	2.8a	0.9a	5.5ab	2.7ab	14.7a	1.2a	11.0a	0.0a	0.0a	37.3a	26.9a
제주C	7.6ab	1.91a	1.0a	4.0ab	2.3a	0.7a	4.9ab	2.7ab	11.7a	0.3a	4.0a	0.0a	0.0a	37.0a	27.0a
제주D	6.3b	1.74a	1.0a	3.1b	3.0a	0.6a	4.0b	2.0b	15.5a	0.8a	-	-	-	45.5a	20.1b
평균	8.0	1.96	1.0	4.0	2.6	0.7	5.1	2.7	13.0	0.6	8.7	0.0	0.0	38.8	26.1

* Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)

표 9. 생육기 온도처리별 4년생 인삼 지하부 생육특성

구분	근장	동체장	근경	근중	지근수	측근수	세근수	수근수	생리장해 병해 정도(1~9)†		
									적변	은피	뿌리썩음
음성A	18.3a	5.1a	16.4a	15.2a	2.0ab	2.3a	17.8a	0.0a	3	0	0
음성B	15.5a	5.6a	11.5b	5.3b	2.0ab	1.9a	3.8b	0.2a	3	0	1
음성C	14.2a	6.1a	9.8b	3.9b	1.8b	1.3a	2.5b	0.0a	3	1	1
음성D	12.1a	5.4a	9.5b	3.3b	2.2a	2.0a	3.4b	0.2a	3	1	3
평균	15.1	5.5	11.7	6.5	2.0	1.9	5.8	0.1			
제주A	13.3a	3.9a	11.4a	5.6a	2.1a	2.3a	4.7a	0.1a	1	0	1
제주B	11.5a	4.1a	9.2b	3.6ab	2.0a	2.7a	2.1a	0.1a	0	0	3
제주C	11.6a	4.1a	7.5b	2.0b	1.7b	1.2a	2.5a	0.0a	1	1	5
제주D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
평균	12.1	4.0	9.4	3.8	1.9	2.2	3.3	0.1			

* Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)

†0: 무발병, 1: 1% 미만, 3: 1~10%, 5: 10.1~30%, 7: 30.1~50%, 9: 50.1% 이상



그림 4. 생육기 온도처리별 4년생 인삼의 지하부 생육

표 10. 생육기 온도처리별 4년생 인삼 ginsenoside 성분특성

처리	Panaxadiol (PD)					Panaxatriol (PT)					Total PD/PT	
	Rb ₁	Rb ₂	Rb ₃	Rc	Rd	Re	Rf	Rg ₁	Rg ₂	Rh ₁		
음 성 A	0.6578b	0.1543a	0.0220a	0.1974a	0.0428a	0.4409a	0.1291a	0.2817a	0.0579b	0.0066a	1.9905a	1.1726b
음 성 B	0.6019d	0.1204b	0.0193c	0.1603b	0.0331b	0.3790b	0.1007b	0.2363b	0.0555c	0.0053b	1.7119b	1.2061b
음 성 C	0.6256c	0.1015c	0.0179d	0.1195d	0.0169d	0.3600b	0.0732c	0.1815c	0.0504d	0.0053b	1.5518c	1.3160a
음 성 D	0.7118a	0.1186b	0.0199b	0.1430c	0.0212c	0.4400a	0.0756c	0.1690c	0.0615a	0.0052b	1.7658b	1.3511a
Average	0.6493	0.1237	0.0198	0.1551	0.0285	0.4050	0.0946	0.2171	0.0563	0.0056	1.7550	1.2615
제 주 A	0.4243b	0.1095b	0.0185b	0.1287b	0.0206b	0.3193a	0.0511b	0.1120a	0.0499a	0.0030a	1.2368ab	1.3108c
제 주 B	0.4431b	0.1147b	0.0188b	0.1329b	0.0224a	0.2832b	0.0467b	0.0990b	0.0482a	0.0029a	1.2118b	1.5246b
제 주 C	0.4720a	0.1207a	0.0204a	0.1621a	0.0198b	0.2745b	0.0688a	0.0979b	0.0477a	0.0028a	1.2867a	1.6175a
제 주 D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Average	0.4465	0.1150	0.0192	0.1412	0.0209	0.4050	0.2171	0.0946	0.0486	0.0029	1.2451	1.4843

* Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)

인삼의 생육기 온도처리별 진세노사이드 함량은 표 10과 같다. 총 진세노사이드 함량은 생육기 고온에 의한 2년생 인삼의 ginsenoside의 함량(표 5)과 달리 음성에서는 C 처리구로 갈수록 감소하다가 D 처리구에서 다시 증가하는 경향이였다. 반면 제주에서는 C 처리구에서 가장 높고, A 처리구, B 처리구 순으로 높았다. 그러나 음성과 제주 모두 생육기 온도가 증가할수록 PD/PT 비율이 증가하는 경향이였다. PD/PT 비율은 비교적 온도에 따른 상관성이 보였으나, 총 ginsenoside 함량의 차이는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다.

나. 생육기 고온에 의한 재식시기별 인삼의 생육 특성

재식시기를 각각 3월 29일, 4월 12일 및 4월 26일 등으로 14일 간격으로 달리하여 생육기 고온처리를 통한 인삼의 지상부 생육 특성은 표 11, 표 12 및 표 13과 같다. 재식시기와 상관없이 경장, 엽병장, 엽장 및 엽폭이 생육기 온도가 높은 처리구일수록 생육이 왕성한 반면, 경직경은 온도가 높은 처리구일수록 가늘어지는 경향이였다. 반면 소엽병장, 경수, 엽병수, 엽수 및 탁엽수는 온도 처리와 상관없이 유의한 차이를 보이지 않았다.

3월 29일 이식 처리구의 지상부 생육특성을 살펴보면 (표 11), 경장과 엽병장은 이식 후 56일 까지 유의한 차이를 보이다가, 이식 후 84일 경부터 차이가 없었다. 엽장은 이식 후 84일까지 유의한 차이를 보이다가 이식 112일 경부터 유의한 차이를 보이지 않았다. 엽폭은 28일 까지 유의한 차이를 보였으나, 56일 경부터 차이를 보이지 않았다. 반면 경직경은 온도가 증가할수록 감소하는 경향이었는데, 이식 후 112일까지 차이를 보이다가 이식 후 140일 경부터 생육의 차이를 보이지 않았다.

표 11. 음성 3월 29일 이식 처리구 온도처리별 지상부 생육특성

구분		경장 (cm)	경직경 (mm)	엽병장 (cm)	소 엽병장 (cm)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	경수 (개)	엽병수 (개)	엽수 (개)	탁엽수 (개)
4월 26일 (이식 후 28일)	A	8.0b	2.06a	1.6c	0.4a	3.3c	1.6c	1.0a	2.4a	11.6a	0.1a
	B	9.3a	1.97ab	1.8b	0.4a	4.1b	1.8b	1.0a	2.6a	12.5a	0.2a
	C	9.7a	1.91ab	2.0ab	0.4a	4.3b	1.9b	1.0a	2.5a	12.3a	0.4a
	D	9.2a	1.83b	2.2a	0.5a	4.9a	2.3a	1.0a	2.6a	12.5a	0.2a
	평균	9.2	1.93	1.9	0.4	4.2	1.9	1.0	2.5	12.3	0.2
5월 24일 (이식 후 56일)	A	9.5b	2.22a	3.9b	0.8a	7.0b	3.5a	1.0a	2.4a	12.0a	0.3a
	B	11.0a	2.09ab	4.3a	1.0a	7.6a	3.6a	1.0a	2.4a	12.1a	0.3a
	C	12.0a	2.06ab	4.3a	0.9a	7.8a	3.7a	1.0a	2.6a	12.8a	0.4a
	D	11.3a	2.00b	4.2a	0.8a	7.6a	3.7a	1.0a	2.5a	12.4a	0.1a
	평균	11.1	2.07	4.2	0.9	7.6	3.6	1.0	2.5	12.4	0.3
6월 21일 (이식 후 84일)	A	11.1a	2.44a	4.4a	1.0a	7.3b	3.5a	1.0a	2.8a	14.3a	1.1a
	B	11.1a	2.30ab	4.5a	0.9a	8.2a	3.9a	1.0a	2.5a	12.5a	0.7a
	C	11.7a	2.23bc	4.5a	0.9a	7.8ab	3.6a	1.0a	2.4a	11.8a	0.7a
	D	10.6a	2.08c	4.5a	0.9a	7.6ab	3.7a	1.0a	2.5a	12.5a	0.3a
	평균	11.2	2.24	4.5	0.9	7.8	3.7	1.0	2.5	12.5	0.6
7월 19일 (이식 후 112일)	A	11.3a	2.38a	4.3a	0.9a	7.3a	3.7a	1.0a	2.8a	14.0a	0.6a
	B	10.5a	2.14b	4.6a	0.9a	7.9a	3.8a	1.0a	2.4a	12.0a	0.3a
	C	10.7a	2.15b	4.5a	1.0a	7.9a	3.9a	1.0a	2.6a	12.8a	0.5a
	D	10.9a	2.07b	4.3a	0.9a	7.6a	3.6a	1.0a	2.6a	12.6a	0.4a
	평균	10.8	2.16	4.5	0.9	7.7	3.7	1.0	2.5	12.7	0.4
8월 16일 (이식 후 140일)	A	10.2b	2.13a	4.3b	0.8a	7.8a	3.8a	1.0a	2.6a	12.7a	0.7a
	B	10.9ab	1.97a	4.8a	0.9a	8.1a	3.9a	1.0a	2.4a	11.8a	0.4a
	C	11.6a	2.11a	4.7a	0.8a	8.0a	3.9a	1.0a	2.6a	12.8a	0.6a
	D	12.0a	1.96a	4.6a	0.8a	7.9a	3.8a	1.0a	2.7a	13.4a	0.6a
	평균	11.3	2.03	4.6	0.8	8.0	3.9	1.0	2.5	12.6	0.5

* Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)

표 12. 음성 4월 12일 이식 처리구 온도처리별 지상부 생육특성

구분		경장 (cm)	경직경 (mm)	엽병장 (cm)	소 엽병장 (cm)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	경수 (개)	엽병수 (개)	엽수 (개)	타엽수 (개)
5월 10일 (이식 후 28일)	A	7.9a	2.04a	1.6c	0.7a	3.7b	2.3a	1.0a	2.2b	10.6b	0.0a
	B	8.3a	1.96ab	1.7bc	0.7a	4.3a	2.1a	1.0a	2.4ab	11.9ab	0.2a
	C	8.8a	1.89bc	1.8b	0.6a	4.3a	2.0a	1.0a	2.7a	13.3a	0.4a
	D	8.9a	1.80c	2.1a	0.6a	4.7a	2.1a	1.0a	2.7a	13.4a	0.3a
	평균	8.6	1.90	1.8	0.6	4.3	2.1	1.0	2.5	12.5	0.2
6월 7일 (이식 후 56일)	A	9.7a	2.37a	3.1b	0.9a	6.9a	3.7a	1.0a	2.2c	11.4b	0.9a
	B	10.0a	2.24ab	3.5a	0.7a	7.2a	3.3a	1.0a	2.4bc	12.0b	0.4a
	C	10.3a	2.16b	3.4a	0.9a	7.1a	3.4a	1.0a	2.7ab	13.5ab	0.8a
	D	11.2a	2.07b	3.3ab	0.8a	7.2a	3.4a	1.0a	3.0a	15.2a	0.9a
	평균	10.4	2.19	3.4	0.8	7.1	3.4	1.0	2.6	13.2	0.7
7월 5일 (이식 후 84일)	A	9.9a	2.35a	3.7a	0.8a	6.9a	3.3a	1.0a	2.2a	10.7a	0.5a
	B	10.2a	2.12b	3.5a	0.7a	7.4a	3.5a	1.0a	2.4a	12.0a	0.5a
	C	10.3a	2.12b	3.7a	0.8a	7.4a	3.6a	1.0a	2.4a	11.7a	0.3a
	D	10.1a	2.06b	3.4a	0.8a	7.2a	3.5a	1.0a	2.6a	12.9a	0.5a
	평균	10.1	2.14	3.5	0.8	7.3	3.5	1.0	2.4	12.0	0.4
8월 2일 (이식 후 112일)	A	9.8a	2.11a	3.7a	0.8a	6.9a	3.3a	1.0a	2.2b	10.8c	0.2a
	B	10.3a	2.01a	3.4ab	0.8a	7.1a	3.5a	1.0a	2.5ab	12.4bc	0.3a
	C	10.2a	2.10a	3.7a	0.8a	7.3a	3.4a	1.0a	2.6a	12.9ab	0.2a
	D	10.3a	2.05a	3.2b	0.7a	6.9a	3.3a	1.0a	2.8a	14.2a	0.6a
	평균	10.2	2.06	3.5	0.8	7.1	3.4	1.0	2.6	12.8	0.3
8월 16일 (이식 후 126일)	A	9.3a	2.12a	3.6a	0.8a	7.5a	3.8a	1.0a	2.2b	10.9b	0.4a
	B	10.2a	2.01a	3.6a	0.7a	7.6a	3.6a	1.0a	2.5b	12.1b	0.3a
	C	10.3a	2.04a	3.5a	0.8a	7.0a	3.4a	1.0a	2.9a	14.5a	0.6a
	D	9.9a	1.99a	3.4a	0.8a	7.2a	3.5a	1.0a	2.9a	14.3a	0.7a
	평균	10.0	2.03	3.5	0.8	7.3	3.5	1.0	2.7	13.2	0.5

* Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)

4월 12일 이식 처리구의 지상부 생육특성을 살펴보면 (표 12), 3월 29일 이식 처리구 (표 11)와 마찬가지로 경장과 엽병장은 이식 후 56일 까지 차이를 보이다가, 이식 후 84일 경부터 차이가 없었다. 다만 경장의 경우 차이는 있었으나, 통계적으로 유의성은 없었다. 엽장은 이식 후 28일까지 유의한 차이를 보이다가 이식 56일 경부터 유의한 차이를 보이지 않았다. 엽폭은 이식 후 28일부터 유의한 차이를 보이지 않았다. 반면 경직경은 온도가 증가할수록 감소하는 경향이었는데, 이식 후 84일까지 차이를 보이다가 이식 후 112일 경부터 생육의 차이를 보이지 않았다.

4월 26일 이식 처리구의 지상부 생육특성을 살펴보면 (표 13), 3월 29일 이식 처리구 (표 11)와 마찬가지로 경장과 엽병장은 이식 후 84일 까지 차이를 보이다가, 이식 후 112일 경부터 차이가 없었다. 엽장은 조사를 한 이식 후 112일까지 유의한 차이를 보였으며, 엽폭은 이식 후 112일부터 유의한 차이를 보이지 않았다. 반면 경직경은 온도가 증가할수록 감소하는 경향이었는데, 이식 후 56일까지 차이를 보이다가 이식 후 84일 경부터 생육의 차이를 보이지 않았다.

표 13. 음성 4월 26일 이식 처리구 온도처리별 지상부 생육특성

구분		경장 (cm)	경직경 (mm)	엽병장 (cm)	소 엽병장 (cm)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	경수 (개)	엽병수 (개)	엽수 (개)	たく엽수 (개)
5월 24일 (이식 후 28일)	A	7.4b	2.18a	2.3b	0.6b	5.1c	2.4c	1.0a	2.5a	12.4a	0.6a
	B	8.5b	1.92b	2.3b	0.8ab	5.3c	2.5bc	1.0a	2.7a	13.0a	0.5a
	C	10.2a	1.91b	2.9a	0.8ab	6.2b	2.8b	1.0a	2.6a	12.9a	0.5a
	D	10.0a	1.86b	3.0a	0.9a	6.8a	3.1a	1.0a	2.6a	13.1a	0.6a
	평균	9.2	1.94	2.6	0.8	6.0	2.7	1.0	2.6	12.9	0.5
6월 21일 (이식 후 56일)	A	8.5b	2.22a	3.2a	0.9a	6.7b	3.3b	1.0a	2.7a	13.9a	1.2a
	B	9.7a	2.11ab	3.4a	0.8a	6.6b	3.2b	1.0a	2.6a	13.0a	0.4a
	C	10.0a	2.06b	3.5a	0.9a	6.8b	3.1b	1.0a	2.7a	13.4a	0.7a
	D	10.1a	1.99b	3.6a	0.9a	7.7a	3.7a	1.0a	2.6a	13.0a	0.6a
	평균	9.7	2.08	3.5	0.9	7.0	3.3	1.0	2.6	13.2	0.6
7월 19일 (이식 후 84일)	A	8.7b	2.24a	3.3c	0.8a	6.8b	3.5ab	1.0a	2.7a	13.7a	1.0a
	B	9.5ab	2.10a	3.5bc	0.9a	6.8b	3.4ab	1.0a	2.6a	12.9a	0.5a
	C	10.0a	2.09a	3.6ab	1.0a	6.9b	3.3b	1.0a	2.6a	12.9a	0.4a
	D	10.3a	2.02a	3.9a	0.9a	7.5a	3.7a	1.0a	2.8a	13.7a	0.4a
	평균	9.7	2.09	3.6	0.9	7.0	3.5	1.0	2.6	13.2	0.5
8월 16일 (이식 후 112일)	A	8.8a	2.21a	3.4a	0.8a	6.9b	3.5a	1.0a	2.6a	13.1a	0.4a
	B	9.7a	2.10ab	3.6a	0.8a	6.8b	3.3a	1.0a	2.8a	13.8a	0.9a
	C	10.2a	2.11ab	3.8a	0.7a	6.9b	3.2a	1.0a	2.8a	14.0a	0.7a
	D	10.0a	1.97b	3.8a	0.8a	7.4a	3.4a	1.0a	2.6a	12.7a	0.7a
	평균	9.8	2.08	3.7	0.8	7.0	3.3	1.0	2.7	13.4	0.7

* Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)

한편 재식시기가 늦어질수록 경장, 경직경, 엽병장, 소엽병장, 엽장, 엽폭의 생육이 저조하였다. 이것은 영양생육 시기가 재식시기가 빠를수록 길어짐에 따라 생육에 유리하기 때문인 것으로 생각된다. 반면 경수, 엽병수, 엽수 및 탁엽수는 뚜렷한 상관성이 보이지 않았는데, 이것은 재식시기, 온도에 따른 효과가 없는 것으로 생각된다.

재식시기를 14일 간격으로 달리하여 생육기 고온처리를 통한 인삼의 지하부 생육 특성은 표 14와 같다. 재식시기가 가장 늦은 4월 26일 이식 처리구를 기준으로 A, B, C, D 처리구에서 각각 수량이 245.7, 210.7, 168.0, 158.2g으로 온도가 증가할수록 수량은 각각 14.2, 31.6, 35.6% 감소하였다. 4월 12일 이식 처리구의 경우 4월 26일 이식구에 비해 각각 19.7, 18.3, 14.6, 33.2% 씩 수량 증가하였으며, 3월 29일 이식 처리구에서는 각각 51.3, 57.1, 42.9, 35.4% 씩 수량이 증가하였다. 한편 생리장해·병해 발생양상을 보면, 온도가 높은 처리구일수록 발생률이 높아지는 경향이나, 재식시기에 따른 뚜렷한 경향은 보이지 않았다. 재식시기를 앞당길수록 전 온도처리구간에서 수량이 증가하였으며, 기후변화로 인해 지금보다 기온이 상승하더라도 이식 시기를 앞당긴다면 수량 확보에 효율적일 것으로 생각된다(그림 5).

표 14. 재식시기에 따른 온도처리별 인삼의 지하부 생육특성 분석

구분		근장 (cm)	근직경 (mm)	근중 (g)	수량 (g/3.3m ²)	생리장애 병해 정도(1~9) [‡]		
						적변	은피	뿌리썩음
음성 3월 29일 이식	A	18.4a	10.65a	5.31a	371.7	0	0	1
	B	17.4a	10.16a	4.73a	331.1	1	1	0
	C	16.6ab	8.64b	3.43b	240.1	3	1	0
	D	14.8b	8.31b	3.06b	214.2	3	0	3
	평균	16.4	9.14	3.85	269.5			
음성 4월 12일 이식	A	15.7a	9.92a	4.20a	294.0	0	0	0
	B	16.8a	9.14ab	3.56ab	249.2	1	1	0
	C	15.9a	7.99c	2.75b	192.5	3	1	3
	D	16.3a	8.18bc	3.01b	210.7	5	0	5
	평균	16.3	8.55	3.19	223.3			
음성 4월 26일 이식	A	14.7a	9.86a	3.51a	245.7	0	0	1
	B	14.3a	8.79ab	3.01ab	210.7	1	3	3
	C	12.1a	8.38ab	2.40ab	168.0	0	3	3
	D	12.1a	7.78b	2.26b	158.2	3	3	5
	평균	13.0	8.43	2.62	183.4			

* Mean with same letters are not significantly different in DMRT (p < 0.05)

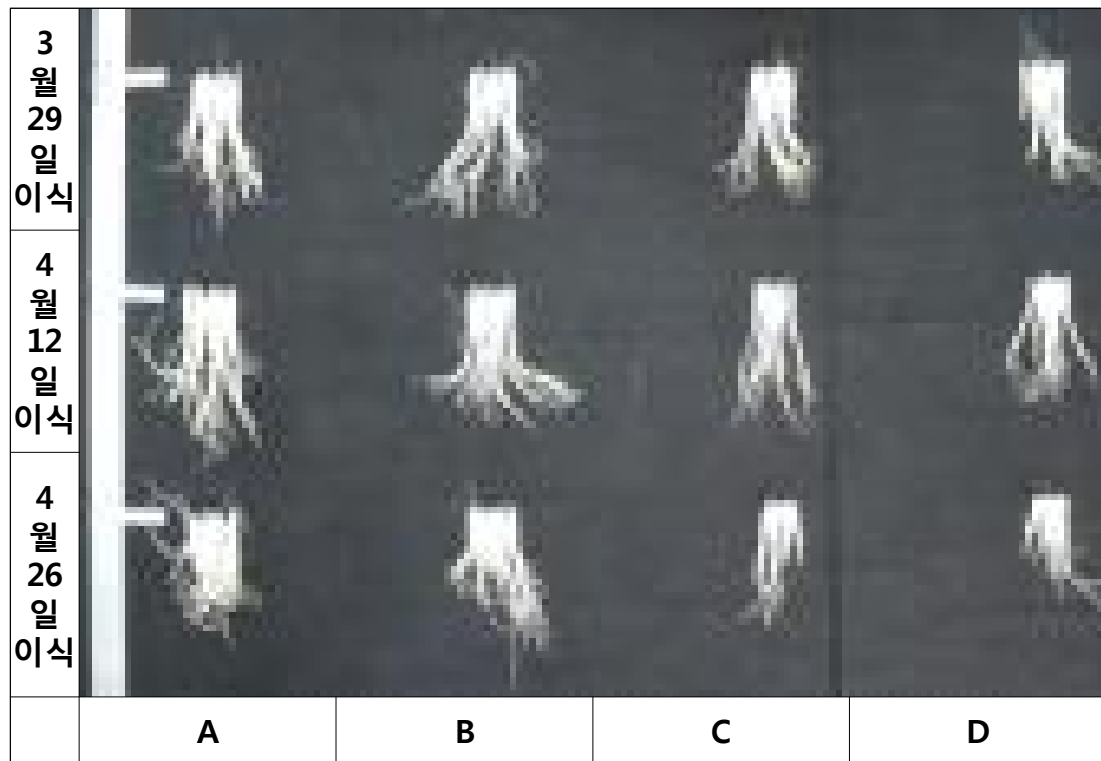
[‡]0: 무발병, 1: 1% 미만, 3: 1~10%, 5: 10.1~30%, 7: 30.1~50%, 9: 50.1% 이상

그림 5. 온도구배하우스 내 온도처리별 인삼의 지하부 생육

재식시기를 14일 간격으로 달리하여 생육기 고온처리를 통한 인삼의 ginsenoside 성분특성 분석 결과는 표 15와 같다. 생육기 온도 처리에 따른 ginsenoside 함량 결과(표 12)와 마찬가지로 재식시기와 상관없이 PD/PT 비율은 증가하는 경향이었으나, 반대로 총 ginsenoside 함량의 경우 생육기 온도 처리에 따른 ginsenoside 함량과 달리 처리 온도가 높아질수록 함량이 증가하는 경향이였다. 그러나 재식시기별로 살펴보면 총 ginsenoside 함량은 4월 12일 이식 처리구에서 가장 높고, 3월 29일, 4월 26일 순으로 높았다. 그러나 PD/PT 비율은 4월 12일 이식 처리구에서 가장 높았으나, 4월 26일, 3월 29일 순으로 높았다.

표 15. 재식시기별 온도 처리에 따른 인삼 ginsenoside 성분특성

Treatment		Panaxadiol (PD)					Panaxatriol (PT)					Total	PD/PT
		Rb ₁	Rb ₂	Rb ₃	Rc	Rd	Re	Rf	Rg ₁	Rg ₂	Rh ₁		
3월 29일 이식	A	0.163c	0.067b	0.011b	0.121b	0.042b	0.169b	0.071b	0.153a	0.038b	0.004b	0.840b	0.912c
	B	0.248bc	0.099ab	0.017ab	0.178ab	0.059ab	0.233ab	0.107ab	0.206a	0.055ab	0.005ab	1.207ab	0.995bc
	C	0.308ab	0.121a	0.020a	0.210a	0.072a	0.257ab	0.126a	0.215a	0.077a	0.005a	1.411a	1.076ab
	D	0.365a	0.135a	0.023a	0.226a	0.064ab	0.258a	0.128a	0.218a	0.070a	0.005a	1.491a	1.195a
	Avr.	0.271	0.106	0.018	0.184	0.059	0.229	0.108	0.198	0.060	0.005	1.237	1.044
4월 12일 이식	A	0.395bc	0.119b	0.018b	0.174bc	0.065a	0.261a	0.078b	0.135ab	0.052a	0.004a	1.302b	1.454c
	B	0.353c	0.108b	0.017c	0.160c	0.056bc	0.236a	0.071c	0.122b	0.047a	0.004b	1.174b	1.452c
	C	0.411b	0.120b	0.019b	0.181b	0.053c	0.280a	0.067c	0.101c	0.050a	0.004c	1.286b	1.564b
	D	0.505a	0.161a	0.023a	0.226a	0.061ab	0.280a	0.092a	0.146a	0.048a	0.004a	1.547a	1.715a
	Avr.	0.416	0.127	0.019	0.185	0.059	0.264	0.077	0.126	0.049	0.004	1.327	1.546
4월 26일 이식	A	0.134c	0.074b	0.013b	0.142b	0.045c	0.148b	0.053b	0.099b	0.044b	0.003b	0.753b	1.170b
	B	0.195b	0.109a	0.018a	0.204a	0.059b	0.214ab	0.077ab	0.131ab	0.052b	0.004ab	1.064a	1.235ab
	C	0.267a	0.120a	0.021a	0.217a	0.058b	0.209ab	0.086a	0.147a	0.069a	0.004ab	1.197a	1.325ab
	D	0.279a	0.124a	0.021a	0.230a	0.071a	0.235a	0.096a	0.147a	0.064a	0.004a	1.272a	1.332a
	Avr.	0.219	0.107	0.018	0.198	0.058	0.202	0.078	0.131	0.057	0.004	1.072	1.266

* Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)

다. 생육 단계별 고온에 의한 인삼의 생육 특성

월동기 고온에 의해 인삼의 휴면 타파 여부 및 출아 특성 시험에서 처리된 음성과 제주 온도구배하우스 내부 처리구별 온도는 표 16과 같다. 2015년 월평균 온도를 살펴보면 음성이 제주에 비해 12월은 약 9 ℃, 1월은 약 7 ℃, 2월은 약 5 ℃정도 낮았다. 2016년의 경우 음성이 제주에 비해 12월은 약 8 ℃, 1월은 약 7 ℃, 2월은 약 6 ℃정도 낮았다.

월동기 고온에 의해 인삼의 휴면 타파 여부 및 출아특성은 그림 6과 같다. 음성의 경우 전 처리구에서 거의 대부분의 인삼 뇌두의 휴면이 타파되고 출아가 진행되고 있었으나, 제주는 전체 처리구에서 출아가 진행되고 있었으나, 온도가 높은 처리구일수록 휴면 타파가 이뤄지지 않아 결주율이 높았다. 음성의 월동기 기온은 인삼의 휴면타파 및 출아에 미치는 영향이 없을 것으로 생각되었다.

표 16. 음성 및 제주 온도구배하우스 내부 온도

연도	구분	12월	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월
2015	음성A	-4.78	-2.58	-0.40	4.62	11.78	18.11	22.31	24.74	25.05	19.06
	음성B	-2.29	-0.33	1.76	6.61	13.75	20.07	24.41	27.15	27.54	21.46
	음성C	-0.68	1.40	3.50	8.50	15.69	22.34	26.89	29.10	29.61	23.61
	음성D	1.55	3.50	5.55	10.45	17.91	23.93	28.53	31.18	31.54	25.62
	제주A	4.44	4.48	4.36	8.01	13.45	17.94	20.71	24.42	24.81	20.83
	제주B	5.26	5.70	5.69	9.59	14.84	19.63	22.64	25.89	26.26	22.19
	제주C	6.74	6.91	6.81	10.68	15.99	20.44	23.47	27.30	27.59	23.41
	제주D	9.54	9.64	9.52	13.37	18.95	23.46	26.15	29.96	30.31	26.23
2016	음성A	0.46	-3.88	-1.08	4.82	13.30	18.10	23.02	25.35	26.64	20.79
	음성B	2.78	-1.52	0.99	6.82	15.34	20.07	25.06	27.58	29.12	23.27
	음성C	4.53	0.14	2.65	8.88	17.37	22.21	27.47	29.63	31.63	25.25
	음성D	6.86	2.32	4.75	10.91	19.36	24.10	29.37	31.56	33.09	27.18
	제주A	7.45	3.58	4.93	8.18	14.23	17.63	21.06	25.99	26.25	21.81
	제주B	8.33	4.55	5.87	9.33	15.40	18.89	22.53	27.80	28.08	23.66
	제주C	9.62	5.94	7.27	10.86	16.91	20.23	23.86	29.20	29.59	25.11
	제주D	12.43	8.58	10.08	13.76	19.87	23.16	26.22	31.39	31.69	26.85

< 음성 '15. 3. 29>

< 제주 '15. 4. 2 >

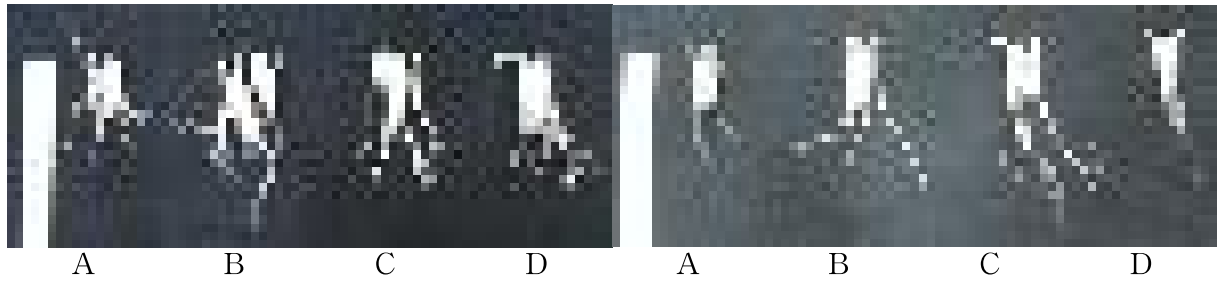


그림 6. 인삼 3년생 지하부 휴면타파 및 출아특성(2015년)

표 17. 제주 3년생 인삼의 휴면타파 개체 및 휴면 개체 지하부 생육 비교

구분	휴면타파 개체				휴면 개체			
	근장	동체장	근경	근중	근장	동체장	근경	근중
A	16.2a	7.6ab	13.11a	7.80a	15.4ab	7.5a	11.49a	4.89a
B	15.9a	6.4b	10.2b	4.63b	15.8a	8.2a	10.01b	3.50b
C	15.6a	8.2ab	9.85b	4.53b	12.7b	7.8a	9.18b	3.37b
D	10.4b	10.1a	9.12b	3.34b	9.6c	9.6a	7.55c	2.16c
평균	14.9	7.7	10.83	5.38	13.7	7.9	9.73	3.60

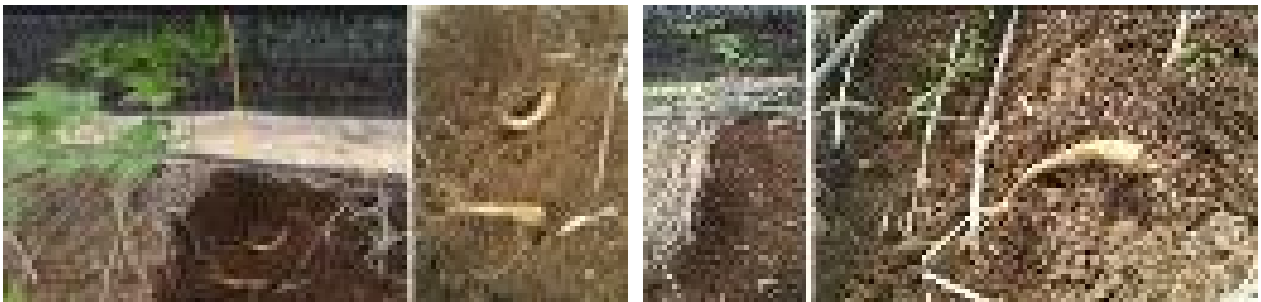
* Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)

그림 7. 제주A(좌) 제주B(우)의 정상 출아 개체 및 휴면 개체

2016년 9월에 실시한 제주 3년생 인삼의 휴면타파 개체 및 휴면 개체의 지하부 생육특성 비교는 표 19와 같다. 온도가 높은 처리구일수록 근장, 근경, 근중이 감소하는 경향이였다. 특히 휴면이 타파되지 못한 개체에서는 근중이 휴면 타파된 개체에 비하여 전 처리구에서 낮았다(표 17, 그림 7).

음성과 제주 온도구매하우스에서 관측한 월동기 및 발아·출아기 기온조건과 생육특성을 비교해보면, 월동기 조건의 경우 음성A, 음성B 및 음성C 처리구에서는 휴면타파에 적합한 온도 조건이었으나, 음성 D, 제주 A, 제주 B, 제주 C 및 제주 D 처리구에서는 휴면타파에 다소 부적합하였다. 또한 발아·출아기 기온조건은 음성 A 및 제주 A 처리구에서만 적합한 온도 조건이었으나, 그 외에는 다소 온도가 높았다(표 18).

음성과 제주의 온도 처리별 인삼의 출아율은 그림 8과 같다. 추세식은 $y = -1.9286x^2 + 4.0214x + 96.957$ 이고, 결정계수(R^2)는 0.9837 이었다. 출아율 90% 이상을 월동기 최적 온도조건, 70% 이상을 적합조건, 그 이하를 저위생산지라고 가정하면, 음성 A, 음성 B 및 음성 C 처리구를 최적 온도조건, 음성 D 및 제주 A 처리구를 적합 온도조건, 그 이외를 저위생산지 조건으로 설정할 수 있을 것으로 생각된다.

표 18. 저온감응기 및 출아기 기온조건 분석

구 분	음성A	음성B	음성C	음성D	제주A	제주B	제주C	제주D
월동기(12~2월) 평균온도(℃)	-1.50	0.75	2.44	4.64	5.32	6.25	7.61	10.36
월동기(12~2월) 5℃ 이하일수	86	80	66	47	47	34	17	5
발아·출아기(4월) 평균온도(℃)	13.30	15.34	17.37	19.36	14.23	15.40	16.91	19.87
3년생 출아율(%)	99.1	95.5	93.5	80.8	76.6	44.1	29.2	8.2



그림 8. 온도 처리별 제주 3년생 인삼 출아율

표 19. 전엽·개화기 및 결실기 기온조건 분석

구 분	음성A	음성B	음성C	음성D
전엽·개화기(5월) 평균온도(℃)	18.1	20.07	22.21	24.10
결실기(6~7월) 평균온도(℃)	24.19	26.32	28.55	30.47



그림 9. 온도 처리별 3년생 전엽·개화 및 결실

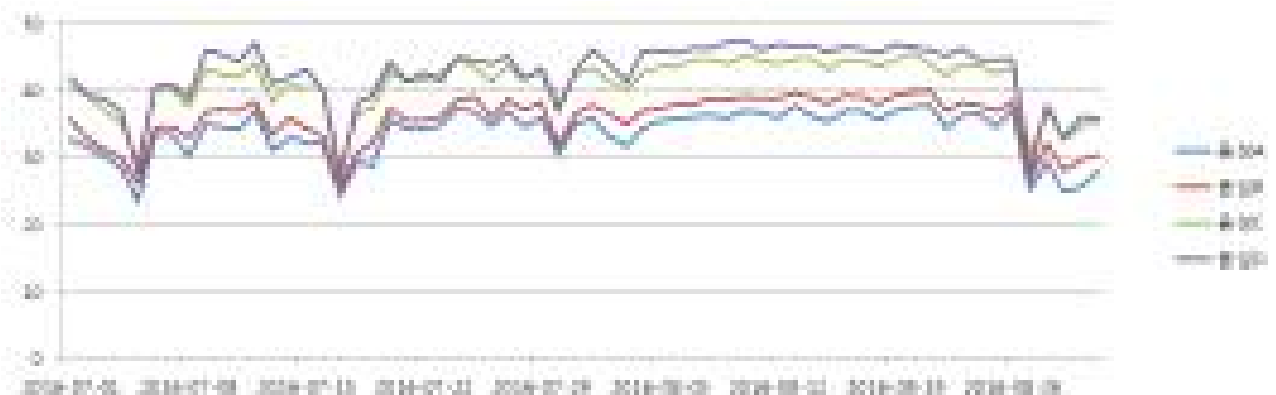


그림 10. 7~8월 음성 온도구배하우스 일 최고온도 변화(°C)

음성 온도구배하우스에서 관측한 생육단계별 기온조건과 생육특성을 비교해보면, 전엽·개화기에 포함되는 5월 평균온도의 경우 A 및 B 처리구에서는 생육에 적합한 온도 조건이었으나, C와 D 처리구에서는 생육에 다소 부적합하였다. 결실기에 해당하는 6~7월 평균온도의 경우 A 처리구에서만 생육에 적합한 온도 조건이었고, 그 외 B, C, D 처리구에서는 다소 생육에 부적합한 온도 조건이었다(표 19). 그 결과 전엽·개화의 경우 D 처리구가 A 처리구에 비해 전엽 및 개화가 10여 일 정도 빨랐으나(그림 9), 엽장 및 엽폭이 A와 B 처리구에 비해 C와 D 처리구에서 현저히 생육이 부진하였고(표 8), 결실의 경우 D 처리구가 A 처리구에 비해 약 7여 일 정도 빨랐으나(그림 9), 결실률의 경우 유의한 차이 없이 A 처리구에서 다소 높게 나타났다(표 8).

고온으로 인한 생리장애를 유발하는 7~8월의 온도구배하우스 일 최고온도 변화는 그림 10과 같다. 인삼 생육 호적조건에서 고온기 온도는 8월 일 최고온도 30°C 이상 일 수가 7일 이상 지속될 때 혹은 일 최고온도가 35°C 이상일 때 발생한다고 알려져 있는데(RDA, 2012), 본 시



그림 11. 시기별 음성 온도구배하우스 내부 인삼 지상부 고온장해

표 20. 7~8월 고온기 기온조건 분석

구 분		음성A	음성B	음성D	음성C
7월	30℃ 이상일수	26	29	29	29
	35℃ 이상일수	7	17	29	29
	38℃ 이상일수	0	5	23	27
8월	30℃ 이상일수	26	28	31	30
	35℃ 이상일수	21	25	28	29
	38℃ 이상일수	0	15	26	26

험에서는 7월초에 이미 35℃ 이상 일 수가 7일 이상 지속된 C 및 D 처리구에서 엽소현상이 나타나기 시작하여, 7월 19일 경에는 A 처리구에서는 엽소현상이 나타나기 시작했으나, B 처리구에서는 상당히 진행되었으며, C 및 D 처리구에서는 엽소현상으로 인해 잎이 고사하였다. 7월 22일 경에는 A 처리구까지 엽소현상이 나타났으며, 8월 1일에는 A 처리구를 비롯하여, 전 처리구에서 잎이 고사하였다(그림 11).

인삼 생육 호적조건상 엽소현상에 의한 생리장해를 유발하는 고온기 온도는 8월 일 최고온도를 기준으로 하나, 2016년은 기온이 예년에 비해 높아 7월부터 최고온도 기준 30℃ 이상일수가 A 처리구(대조구)에서 26일이 발생함에 따라 고온기 인삼 호적조건을 7월 및 8월 최고온도 일수를 기준으로 재설정해야 할 것으로 생각된다(표 20).

나. CO₂처리별 인삼 생육특성 분석

CO₂ 농도 처리별 인삼의 지상부 생육특성은 표 21과 같다. CO₂ 농도가 증가할수록 경장, 엽병장에서 유의한 차이를 보였으나, 그 외 지상부 형질에 있어서는 유의한 차이를 보이지 않았다(그림 12).

표 21. CO₂농도별(400, 600, 800, 1000ppm) 인삼의 지상부 생육특성

CO ₂ (ppm)	경장 (cm)	경직경 (mm)	경수 (EA)	엽병장 (cm)	엽병수 (EA)	소 엽병장 (cm)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (EA)	탁엽수 (EA)	SPAD
400	5.3b	1.93a	1.0a	3.9b	1.8a	0.7a	5.8a	3.2a	9.3a	0.3a	30.9a
600	5.9b	1.89a	1.0a	4.7a	2.1a	0.8a	5.9a	3.1a	10.8a	0.5a	31.0a
800	6.3ab	1.86a	1.0a	4.2ab	2.0a	0.8a	5.8a	3.0a	10.3a	0.3a	28.2a
1000	7.0a	1.89a	1.0a	4.2ab	2.0a	0.7a	5.9a	3.1a	10.0a	0.2a	29.0a
평균	6.1	1.89	1.0	4.2	2.0	0.7	5.9	3.1	10.1	0.3	29.8

* Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)



그림 12. 이산화탄소 처리농도별 2년생 인삼의 지상부 생육

CO₂ 농도 처리별 인삼의 지하부 생육특성에서도 대조구 (CO₂ 농도 400ppm)에 비해 근경, 근중에서 유의한 차이를 보였으나, 600 ppm 이상의 생육에서는 유의한 차이를 보이지 않았다(표 22, 그림 13).

표 22. CO₂농도별(400, 600, 800, 1000ppm) 인삼의 지하부 생육특성

CO ₂ (ppm)	근장 (cm)	근경 (mm)	근중 (g/pant)	생리장애 및 병해		
				적변	은피	뿌리썩음병
400	14.8a	4.53b	0.95b	-	-	-
600	17.2a	5.81a	1.36a	-	-	-
800	14.9a	5.57a	1.33a	-	-	-
1000	15.0a	5.67a	1.37a	-	-	-
평균	15.5	5.4	1.3			

* Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)

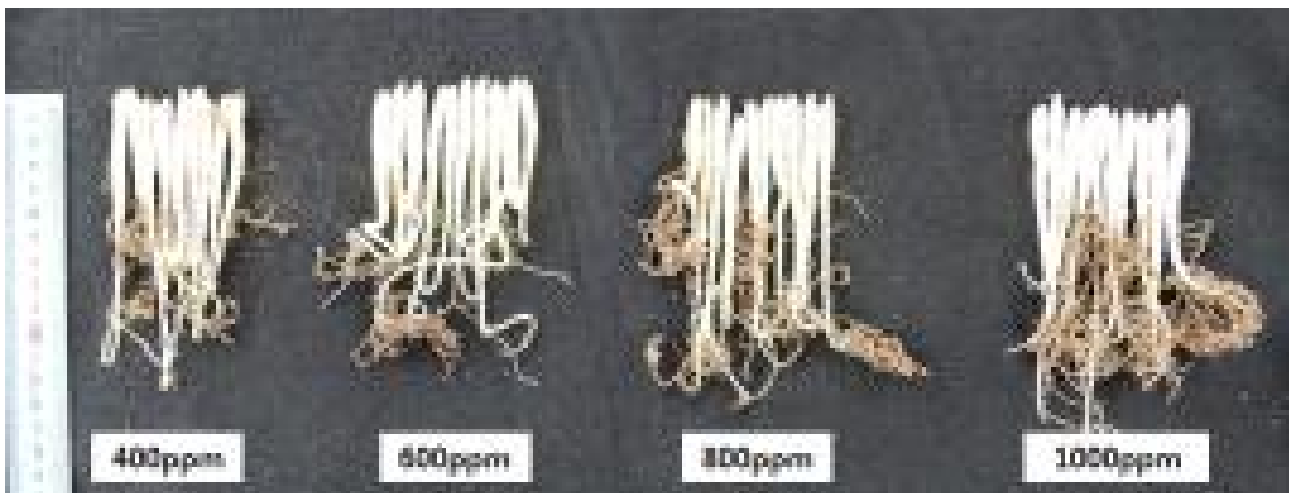


그림 13 이산화탄소 처리농도별 2년생 인삼의 지하부 생육

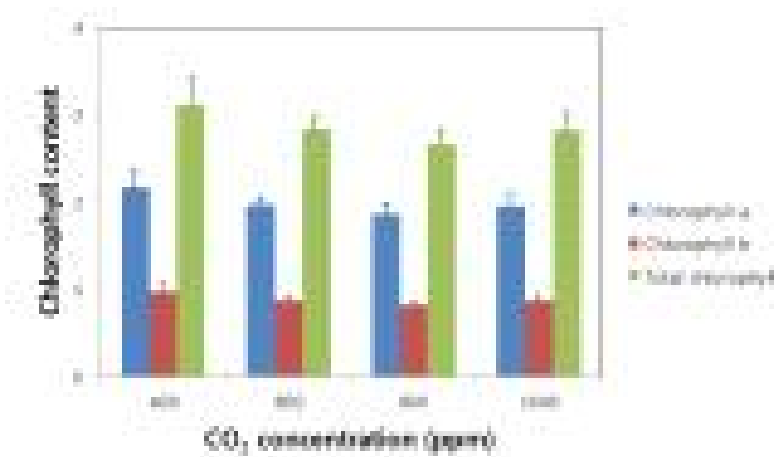


그림 14. 이산화탄소 처리농도별 엽록소 함량 변화

CO₂ 농도 처리별 인삼의 잎의 엽록소 함량 역시 대조구(CO₂ 농도 400ppm)에 비해 chlorophyll a, chlorophyll b 및 총 엽록소 함량 모두 CO₂ 농도 800ppm까지 낮아지다가 1000ppm에서 다시 증가하는 경향이었으나, 유의한 차이를 보이지는 않았다(그림 14).

CO₂ 농도 처리별 인삼의 잎의 단면 특성은 대조구에 비해 CO₂ 농도가 높아질수록 잎 단면

과 왁스층이 다소 두꺼워지고, 탄수화물 집적이 증가하는 경향이었고(그림 15), 잎 표면 기공의 경우 이산화탄소 처리별 기공밀도 분포에는 차이가 없었다(그림 16). 그러나 이산화탄소 농도가 높아질수록 기공의 공변세포 외벽이 두꺼워지는 경향이었으나, 이것은 추후 별도의 시험이 필요할 것으로 생각된다(그림 17).



그림 15. 이산화탄소 처리농도별 엽단면 관찰

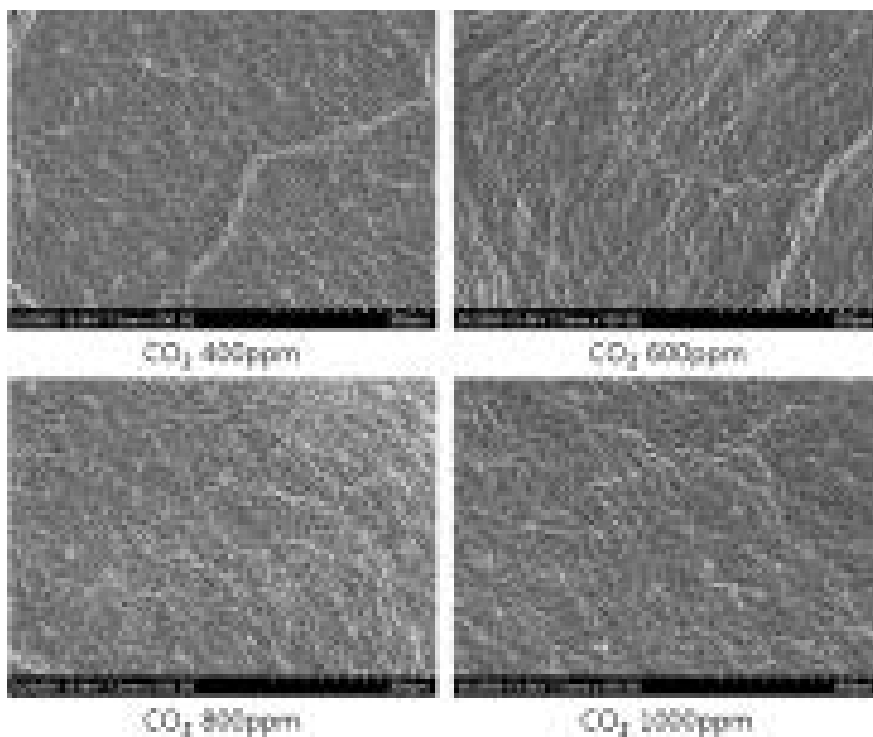


그림 16. 이산화탄소 처리농도별 기공밀도 조사

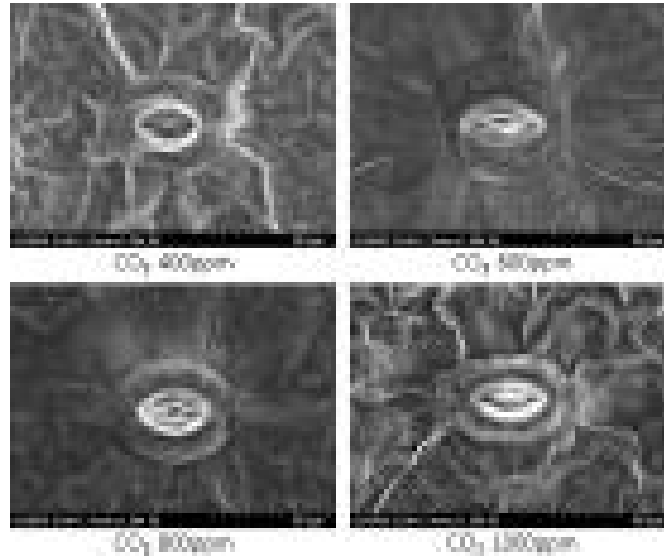


그림 17. 이산화탄소 처리농도별 기공 형태 분석

CO₂ 농도 처리별 인삼의 뿌리(표 23)와 잎의 ginsenoside 성분특성(표 24)을 살펴보면 뿌리의 성분특성의 경우 이산화탄소 농도가 증가할수록 PD/PT, 총 ginsenoside 함량 등이 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 그러나 잎의 성분특성은 대조구에 비해 총 ginsenoside가 CO₂ 600ppm 처리구에서는 증가하였으나, 800ppm부터 감소하였다. PD/PT의 경우 이산화탄소 농도가 증가할수록 감소하는 경향이였다.

표 23. CO₂농도별(400, 600, 800, 1000ppm) 인삼 뿌리의 ginsenoside 성분특성

CO ₂ (ppm)	Panaxadiol (PD)					Panaxatriol (PT)					Total	PD/PT
	Rb1	Rb2	Rb3	Rc	Rd	Re	Rf	Rg1	Rg2	Rh1		
400	0.300a	0.093a	0.014a	0.106a	0.076a	0.291a	0.069a	0.119b	0.062a	0.002a	1.132a	1.090a
600	0.220c	0.078c	0.012c	0.092b	0.077a	0.278ab	0.065b	0.120b	0.058b	0.002a	1.003b	0.918b
800	0.250b	0.084b	0.013b	0.095b	0.078a	0.246bc	0.066b	0.142a	0.051c	0.002a	1.028b	1.026a
1000	0.252b	0.084b	0.013b	0.095b	0.080a	0.240c	0.067ab	0.142a	0.051c	0.002a	1.025b	1.043a
Average	0.256	0.085	0.013	0.097	0.078	0.264	0.067	0.131	0.055	0.002	1.047	1.019

* Mean with same letters are not significantly different in DMRT (p < 0.05)

표 24. CO₂농도별(400, 600, 800, 1000ppm) 인삼 잎의 ginsenoside 성분특성

CO ₂ (ppm)	Panaxadiol (PD)					Panaxatriol (PT)					Total	PD/PT
	Rb1	Rb2	Rb3	Rc	Rd	Re	Rf	Rg1	Rg2	Rh1		
400	0.288c	0.833b	0.104b	0.768b	2.926a	2.952b	0.005b	0.666c	0.107c	0.015c	8.665b	1.313a
600	0.426a	1.029a	0.132a	0.974a	2.605b	3.272a	0.005b	0.751a	0.156a	0.018a	9.369a	1.229b
800	0.289c	0.753c	0.089d	0.687d	2.132c	2.713c	0.006b	0.722b	0.127b	0.016bc	7.534d	1.102c
1000	0.347b	0.770c	0.092c	0.716c	2.107c	2.974b	0.022a	0.759a	0.154a	0.017ab	7.958c	1.027d
Average	0.337	0.846	0.104	0.786	2.443	2.978	0.009	0.725	0.136	0.017	8.381	1.168

* Mean with same letters are not significantly different in DMRT (p < 0.05)

제5절. 기후변화 시나리오를 적용한 약용작물(천궁, 당귀) 생산영향 평가

1. 해발고도별 기온차이에 따른 천궁 생산 및 품질영향 평가

본 연구는 기후조건에 따른 천궁 생육특성을 구명하여 기후변화에 따른 문제점을 예측하고 관련 대응기술 개발을 위한 기초자료를 확보하기 위하여 수행하였다. 이를 위해 2014년부터 2015년까지 2년간 제주도 한라산에 동일한 토성으로 조성된 4개의 포장을 활용 하였다. 각 포장은 해발 200m, 370m, 500m, 700m에 위치하여 고도별로 나타나는 일정한 기온차이를 활용하여 봄부터 가을까지 천궁의 생육 및 품질에 어떠한 영향을 미치는지 실험하였다.

가. 1차년도 실험방법 및 연구결과

(1) 1차년도 실험방법

(가) 시험재료 및 재배방법

1차년도인 2014년 실험방법 및 결과는 다음과 같다. 시험재료인 천궁(*Cnidium officinale* Makino)은 주산지인 영양에서 구입하였으며, 균일한 종근을 골라 3월 26일 해발고도별로 시험구당 정방형으로 9주씩 3반복으로 식재 하였다. 재배에 사용된 시험구는 1x1m 정도로 크기가 작고 해마다 다른 작목을 시험 재배하여 토양화학적 특성이 다를 수 있다. 이에 따라 정식전 토양조사를 실시하여 토양 화학성이 처리구별로 비슷한지 확인하였다. 그러나 토양 화학성을 시험구마다 정밀하게 일치시켜 교정하는 것은 어려우므로 별도의 조치를 하지는 않았으며 참고자료로만 활용 하였다. 질소, 인산, 칼리비료의 시비량은 성분량으로 각각 12-10-15kg/10a으로 하였으며 이중 인산과 칼리는 전량 기비로, 질소는 기비와 추비로 각각 50:50(=25:25)으로 하여 3회 분시 하였다. 2014년 시험에서는 비닐멀칭에 따른 토양 및 표면 온도 상승 문제를 고려하여 피복을 하지 않았다. 기타 물관리, 제초, 병해충 방제 등 재배 방법은 농촌진흥청 표준재배법에 준하였다.

(나) 조사내용 및 방법

본 시험의 재배환경 설정 조건이 적절한지 그리고 기온조건이 천궁생육에 미치는 영향정도를 비교하거나 보완 분석하기 위하여 주산지와 부적지 등 참고지역과 한라산 고도별 시험포장의 평균온도 및 일최고 기온 30℃ 이상의 빈도수 등을 조사 하였다. 한라산 고도별 시험포장의 온도 데이터는 국립원예특작과학원 온난화대응농업연구소에서 설치 운영하고 있는 기후측정시스템을 이용하였고, 그 외 지역의 온도는 기상청 AWS(Automated Weather Station)자료를 활용하였다. 5월중에는 입모율을 조사하여 해발고도별 초기생육을 비교하였고, 7월과 10월에 각각 초장, 엽장, 경수 등을 조사하였으며, 지하부 수량은 10월말 수확후에 조사하였다.

(2) 1차년도 연구결과

(가) 기후 및 토양환경 특성

주산지를 비롯한 각 지역 및 시험지인 해발고도 포장의 2014년 월평균 기온은 그림 1과 같았다. 한라산 해발고도 200m 포장의 7~8월 월평균 기온은 이전 주산지인 울릉도(22.2~24.0℃) 및 현재 주산지인 봉화(21.4~22.9℃)와 유사한 22.2~22.5℃ 수준이었으며 가장 높은 고지인 해발 700m포장은 19.2~19.9℃로 주산지보다 약 2~3℃ 정도 낮았다.

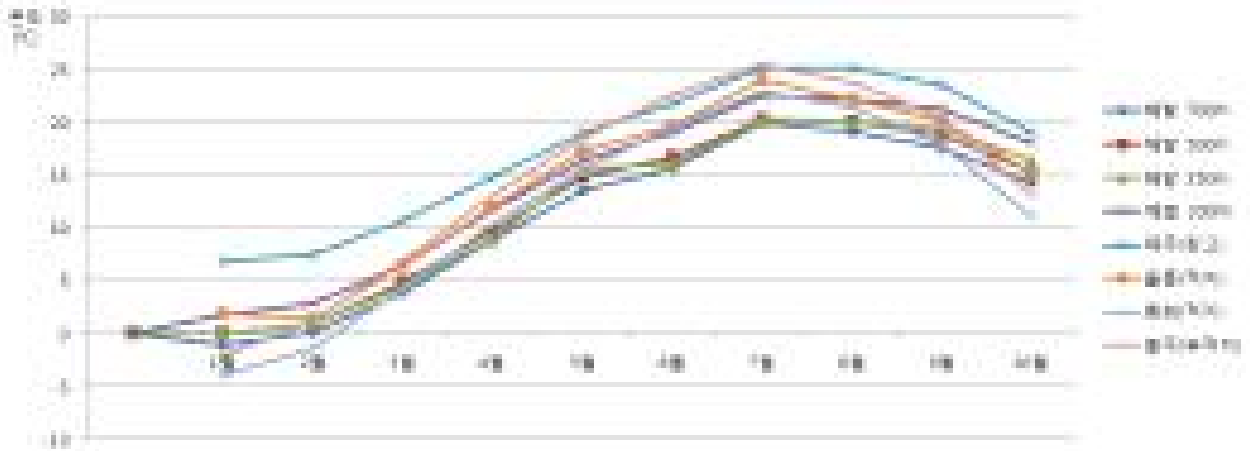


그림 1. 지역 및 해발고도별 월평균 기온 비교(2014년) (출처 : 기상청)

7~8월경 일최고기온 평균도 표 1과 같이 현재 주산지인 봉화의 온도 26.3~28.8℃보다 시험지인 해발고도(200, 370, 500, 700m)의 온도가 23.0~27.8℃로 낮거나 비슷한 수준이었다. 따라서 기온만을 기준으로 할 경우 시험지인 해발고도포장은 재배환경이 적합한 것으로 평가된다. 그러나 이러한 평가방식이 작물의 적합한 재배지를 예측하는데 항상 잘 들어맞는 것은 아니다. 우선 기후는 해마다 조금씩 달라질 수 있는데, 천궁과 같이 생리적 내성범위가 작은 협온성 작물은 작은 온도 차이에서도 생육에 큰 영향을 받아 해에 따라 적합한 재배지가 바뀔 수도 있다. 가령 2014년 제주의 여름철 7~8월 평균기온은 27.4~27.8℃로 지난 2011년~2013년 제주의 7~8월 평균 기온 28.7~32.4℃에 못 미치는 낮은 수치로 과거기후와는 다소 차이가 있다. 따라서 과거 몇 년 전에는 부적합 했던 환경에서 현재에는 적합한 환경으로 바뀔 수도 있다. 두 번째로, 작물에 따라 적합한 생육기온을 평가하는 기준이 조금씩 다를 수 있다는 점이다. 그림 1에서 2014년 제주 지역의 7~8월 평균기온은 25.1℃로 부적지인 충주와 비슷하였으나 표 1의 동월의 일최고기온은 27.4~27.8℃로 주산지인 봉화와 비슷하였다. 이와 같은 사실은 동일한 평균기온이라고 하더라도 지역이나 연도에 따라 식물에 영향을 줄 수 있는 극단적인 온도의 빈도수는 다를 수 있으므로 일부 기후에 민감한 작물에 있어서는 평균기온만으로 기후적합성을 평가하기에 부족함을 말해준다. 이에 따라 작물의 특성에 맞는 적절한 평가지표를 개발할 필요가 있다.

표 1. 지역 및 해발고도별 일최고기온 평균비교(2014년) (단위 : °C)

지역	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월
해발 700m	4.1	4.5	9.0	14.7	19.8	21.3	24.4	23.0	23.0	19.4
해발 500m	6.3	6.0	11.0	16.1	21.9	22.1	25.6	24.5	24.7	21.3
고 370m	4.4	4.9	9.7	14.8	22.4	21.0	24.9	24.0	23.9	21.0
도 200m	6.5	7	11.9	17.3	23.0	24.29	27.8	26.3	26.0	23.3
제주*	10.0	10.0	13.9	17.8	22.8	24.4	27.8	27.4	26.2	22.1
울릉**	4.8	3.6	10.0	16.1	21.1	23.0	27.0	24.6	23.9	18.7
봉화***	3.6	5.6	11.4	18.3	24.2	25.6	28.8	26.3	24.8	19.1
충주****	3.8	7.2	13.3	20.4	26.0	28.5	30.7	28.3	26.8	20.7

* *참고지역, ** 주산지(과거), *** 주산지(현재), **** 부적지

천궁은 30℃ 이상에서 고온에 의한 생육피해(최 등, 2009)를 입는다는 점을 감안하여 표 2, 3과 같이 각 지역 및 해발고도별 일최고기온 30℃ 이상의 빈도수를 비교하였다. 시험지인 해발 200m 포장의 30℃ 이상 빈도수는 16회로 2014년 봉화지역의 빈도수인 17회와 비슷하였다. 또한 제주지역의 연도별 일최고기온 30℃ 이상 빈도수는 표 3과 같이 최근 3년간 35~54회였으나 2014년 7회로 크게 떨어져 천궁을 재배하기에는 이전 연도보다 크게 유리한 기온조건이었다.

2014년 해발고도별 토양 화학성은 표 4와 같았으며 해발 500m 포장의 시험구를 제외한 해발 200, 370, 700m 포장의 시험구 화학성은 대체로 비슷하였으므로 천궁 재배시험을 수행하기에 양호하였다. 해발 500m포장의 시험구는 이전년도에 재배해오던 작물이 다른 해발고도 시험구와 달라 토양 내 칼슘, 인산, 마그네슘 등이 크게 낮은 것으로 확인되었으며 시비 후에도 질소, 인산, 칼륨은 보충되었으나 마그네슘, 나트륨, 칼슘 부족은 해소되지 않았을 것으로 추정된다.(표 4) 정확한 원인은 알 수 없으나 해발 500m 포장의 3개 시험구 모두에서 천궁 생육이 초기부터 매우 불량하여 중기이후 부터는 생육조사에서 배제하였다.

표 2. 2014년 지역 및 해발고도별 일최고기온 30℃ 이상 일수 비교

지역		5월	6월	7월	8월	9월	10월	계
한라 산 고도	700m							0
	500m			2	1	1		4
	370m							0
	200m	2		8	5	1		16
제주*				5	2			7
울릉**			1	2	2			5
봉화***		3	1	12	1			17
충주****		5	7	20	7	4		43

* *참고지역, ** 주산지(과거), *** 주산지(현재), **** 부적지

표 3. 제주지역 과년도 일최고기온 30℃ 이상 일수 비교 (출처 : 기상청)

연도	5월	6월	7월	8월	9월	10월	계
2011		5	19	11			35
2012		1	13	18	1		33
2013		1	26	27			54
2014			5	2			7

표 4. 2014년 해발고도별 시험구 토양 화학성 분석

(조사일 : 4.1)

해발 고도	pH	EC	NO ₃ (mg/kg)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	K (cmol ⁺ /kg)	Mg (cmol ⁺ /kg)	Na (cmol ⁺ /kg)	Ca (cmol ⁺ /kg)	OM (g/kg)
200m	6.34	0.34	5.61	184.96	0.83	2.11	0.15	7.51	43.58
370m	6.31	0.61	4.57	168.82	0.55	2.75	0.45	7.59	41.94
500m	5.01	0.12	5.56	91.39	0.50	0.43	0.07	0.91	38.19
700m	6.31	0.36	9.33	218.99	1.59	2.23	0.16	7.37	54.52

(나) 해발고도별 기온차에 따른 일천궁 생육특성

5월 21에 조사한 고도별 일천궁 입모율은 표 5와 같이 약 85%~100%로 나타났으며, 해발 700m 포장의 시험구가 다소 우수하였으나 반복 처리된 시험구 마다 다소 차이가 있어 고도별 일관성은 없었다. 생육중기(7.11일)까지의 생육특성은 표 6과 같았으며 해발 700m 시험구의 일천궁 초장은 평균 28.3cm, 370m 시험구는 28.7cm, 200m 시험구는 16.9cm로 해발 200m 시험구의 생육이 다소 낮았으나 370m 이상에서는 해발고도에 따른 생육차이는 크지 않았다. 7월경 해발 200m 시험구의 경우 고사율이 33.3%에 이를 정도로 심하였고 370m 시험구에서도 약 7.4% 정도의 고사율을 보였으며 해발 700m 시험구에서는 3.7%로 낮게 나타나 생육이 가장 양호 하였다. 시기별로는 7월부터 잎마름, 생육부진, 고사 등 고온에 의한 피해현상이 두드러지게 나타났다.

생육후기(10.1)의 일천궁 생육특성은 표 7과 같이 해발 700m 포장의 초장은 20.51cm, 해발 370m 14.52cm, 해발 200m 6.19cm로 고도별 뚜렷한 차이가 있었으며 엽장 및 경수에서도 큰 차이를 보였다. 한편 해발 200m고지의 고사율은 77.8%에 달했고 해발 370m고지의 고사율도 37.1%에 이르렀다. 해발 700m고지의 경우 고사율이 11.2%로 낮아 가장 높은 생존율을 보여 해발고도가 높을수록 생육도 좋고 및 생존율도 높았다.

표 5. 2014년 한라산 해발 고도별 일천궁 입모율

(5.21 조사)

해발고도	200m	370m	500m	700m
입모율(%)	85	92	88	100

표 6. 해발고도별 중기 생육특성 조사

(7.11 조사)

해발고도	초장(Cm)	엽장(Cm)	경수(개/주)	고사율(%)
200m	16.96±8.94	4.48±1.8	32.88±25.7	33.3
370m	28.77±8.41	6.34±1.41	37.88±17.51	7.4
700m	28.33±7.34	5.17±1.34	38.5±14.58	3.7

표 7. 해발고도별 후기 생육특성 조사

(10.1 조사)

해발고도	초장(Cm)	엽장(Cm)	경수(개/주)	고사율(%)
200m	6.19±2.57	2.09±1.39	6.10±6.46	77.8
370m	14.52±12.16	4.09±3.12	9.19±8.96	37.1
700m	20.51±8.97	6.10±1.76	19.98±15.22	11.2

표 8. 2014년 해발고도별 일천궁 수량특성 비교

(수확후, 10.23 조사)

해발고도	생근중(g)	노두수(개)
200m	18.50±24.75	5.75±5.30
370m	50.89±50.51	7.22±4.67
700m	66.29±8.06	8.89±0.77

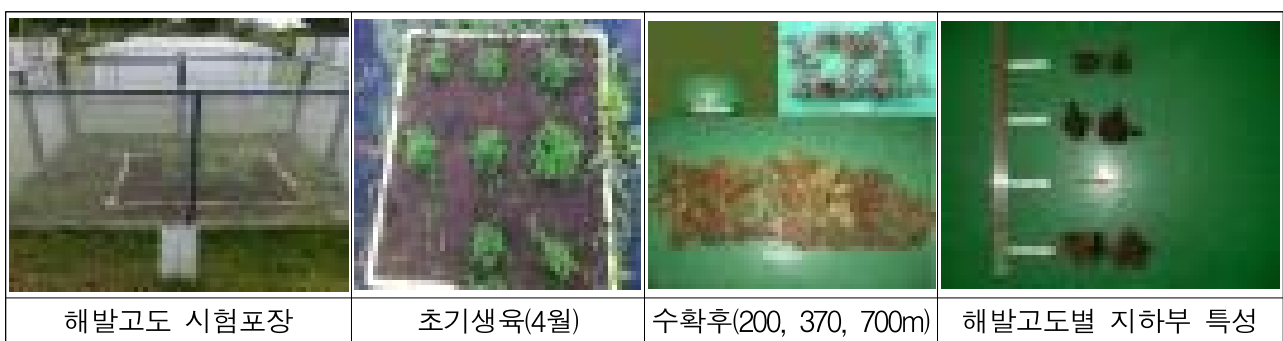


그림 2. 2014년 해발고도별 기온변화에 따른 일천궁 생육특성

10월 23일 수확후 지하부 조사에서도 표 8에서 보는바와 같이 평균 생근중은 해발고도에 따라 각각 66.29g(700m), 50.89g(370m), 18.5g(200m)로 나타났고 노두수에 있어서도 고도별로 차이를 보였다. 그러나 생육이 제일 좋은 700m 고지의 평균 생근중(66.29g)도 정상생육에는 미치지 못한 것으로 파악된다.

시기별로 일천궁의 초장을 비교해 보면 해발고도별 포장 모두에서 초기(5월)와 중기(7월)까지

의 초장이 비슷하였고 중기(7월)부터 후기(10월)까지의 생육은 전반적으로 감소하여, 생육 초기부터 고온에 의한 영향이 나타나기 시작하여 중·후반기에 피해가 집중된 것으로 보인다. 본 시험결과, 기후조건과 생육조사 결과가 예상과 다른 부분이 있어 몇 가지 검토가 필요하다. 첫째는 2014년 한라산 해발고도별 여름철 평균 기온이 주산지인 봉화지역의 기온과 비슷하거나 더 낮은 조건이었는데도 불구하고 해발고도별 기온차이에 따라 뚜렷한 생육차이를 보였다는 점이다. 이와 같은 결과는 주산지의 여름철 기온이 일천궁의 최적 생육적온이 아닐 수도 있다는 것을 말해준다. 두 번째로 전체 시험구의 수량이 주산지 농가의 평균 생산수준에 크게 미치지 못했다는 점이다. 내륙지방과 달리 제주도의 강한 풍속과 집중강우, 잡초발생, 멀칭 유무 등 다양한 요인이 수량감소의 원인이었을 것으로 생각된다. 이러한 요인들은 식물체를 약화시켜 낮은 수준의 고온스트레스에서도 영향을 크게 받아, 기온이 다소 안전하다고 판단되는 지역에서도 온도대별 생육차이를 크게 가져 왔을 것으로 추정되나 정확한 원인구명을 위해서는 반복적인 시험 및 환경요인이 통제된 보다 정밀한 시험연구가 필요할 것이다.

나. 2차년도 실험방법 및 연구결과

(1) 2차년도 실험방법

(가) 시험재료 및 재배방법

2014년에 이어 제주도 한라산에 조성된 동일한 포장(해발 200m, 370m, 500m, 700m)을 이용하여 수행하였다. 그러나 2014년 시험과 달리 두둑(3.5x0.8m)을 조성하였고 검은색 필름으로 멀칭을 하여 농가의 관행재배와 비슷한 방식으로 재배하였다. 시험구의 두둑의 면적은 3.5x0.8m로 각각의 해발고도별로 3반복으로 조성하였다. 시험재료인 천궁(*Cnidium officinale* Makino)은 주산지인 영양에서 구입하였으며 균일한 종근을 골라 살균제로 분의소독한 후 각 시험구에 30cm 간격으로 1열로 재식하였다. 정식날짜는 전년도 보다 다소 늦은 4월 21일이었으며 10월 20일까지 재배하며 고도 및 시기별로 기온차이에 따른 생육조사를 하였다. 시비량은 전년과 동일하게 성분량으로 각각 12-10-15kg/10a으로 하였으며 이중 인산과 칼리는 전량 기비로, 질소는 기비와 추비로 각각 50:50(=25:25)으로 하여 3회 분시 하였다. 관수, 제초, 병해충 관리 등 일반적인 재배관리는 전년과 동일하게 하였다.

(나) 조사내용 및 방법

본시험의 토양조건의 적절성을 확인하기 위하여 정식전인 3월 19일 토양조사를 실시하여 처리구별 화학성이 일치하는지 확인 하였으며, 전년과 마찬가지로 주산지와 부적지, 한라산 고도별 시험포장의 평균온도, 일최고기온 30℃ 이상의 빈도수 등을 비교조사 하였다. 시험기간 동안의 기온 데이터는 온난화대응농업연구소에서 설치 운영하는 기후측정시스템을 이용하였으며 그 외 지역의 온도는 기상청 자료를 활용하였다.

해발고도별 기후조건에 따른 생산영향을 평가하기 위하여 시기별로 천궁의 초장, 경수, 지하부 수량 등을 조사하였다. 또한 최종 수확후에는 이용부위인 뿌리부분의 품질평가를 위해 유효성분인 ligustilide의 함량을 조사하였다. 고도별로 채취한 천궁의 지상부를 제거한 후 물로 가볍게 수세하고 하루정도 그늘에 말린 후 동결 건조하여 분쇄하였다. 분쇄한 시료는 처리구별로 골고루 혼합하여 특정 부위 및 개체가 편재되지 않도록 하였으며 MeOH 20mL에 5g씩 시료를 측량하여 넣고 1시간동안 초음파 추출한후 0.2μl syringe filter로 여과하였

다. 잔류물은 동일한 방법으로 다시 추출 및 여과한 후 이전 추출물과 합쳐서 50ml로 맞춘 후 1ml씩 취하여 분석 하였다. 분석조건은 표 9와 같다.

표 9. 천궁 유효성분(Ligustilide) 정량분석을 위한 조건

System	Dionex UHPLC3000/LTQ				
Column	Phenomenex, Kinetex 2.6um F5 100A(100*2.1mm)				
Mobile phase	A: 0.1% Formic acid/ DW				
	B: 0.1% Formic acid/ Acetonitrile				
Gradient	Time(min)	0-9	9-11	11-12	12-15
	%B	40-100	100	100-40	40
Flow rate	0.3 mL/min				
Injection	5 µL				
Column Temp.	40℃				
Detection	Ligustilide : parent MS 191.1 - fragment MS 173.1				

(2) 2차년도 연구결과

(가) 기후 및 토양환경 특성

전년대비 제주지역의 여름(7월~8월) 동안 월평균 기온은 약 +0.5℃~+1.3℃ 상승하였고, 시험이 행해진 포장(해발 200, 370, 500, 700m)의 월평균 기온은 +3~+4.5℃까지 큰 폭으로 상승하였다.(표 10) 해발고도별 7월~8월 평균 일최고기온의 경우 +2.4℃에서 최대 +6.1℃까지 급격히 상승하였다. 해발 370m 포장의 8월 평균 일최고기온은 30.1℃, 해발 200m 포장의 경우 7월과 8월에 각각 30.2℃, 31.2℃를 기록하여 부적지인 충주지역의 8월 평균 일최고기온인 30.8℃와 유사한 수준 이었다.(표 11)

표 10. 2015년 주요지역 및 한라산 해발고도별 월평균 기온 (단위 : ℃)

지역		4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	전년대비 7~8월 상승폭
해 발 고 도	700m	12.9	16.3	19.2	22.9	22.8	18.9	14.8	+3~3.6
	500m	13.3	17.4	20.0	23.5	23.9	19.7	15.8	+3.2~3.9
	370m	16.9	15.7	20.5	24.3	24.6	20.6	16.5	+4.1~4.5
	200m	14.7	19.0	21.9	25.5	26.2	22.2	18.4	+3~4
제주*		15.1	18.8	22.0	25.6	26.4	23.2	19.2	+0.5~1.3
봉화**		9.7	16.1	19.5	22.2	22.2	17.0	10.9	+0.7~0.8
충주***		12.5	18.5	23.0	25.0	25.3	19.9	13.4	-0.5~1.5

* *참고지역, **주산지, ***부적지

2015년 제주지역의 일최고 30℃ 이상의 빈도수도 표 12과 같이 전년도 7회에서 24회로 증가하여 2013년 이전의 기온에 가깝게 회복하는 경향이 있었고, 시험지인 해발 700m, 500m, 370m, 200m 포장도 20회~45회로 전년도 0회~16회에 비해 큰 폭으로 증가하였다.(표 13) 이러한 기온변화는 전년도에 비해 천궁 생육에 더 큰 타격을 주었는데, 천궁과 같은 기후에 민감한 작물의 경우 지역별 기후조건 뿐만 아니라 해마다 변화하는 기온에 의해서도 큰 영향을 받을 수 있어 이러한 조건들도 반영한다면 안전하게 재배할 수 있는 적지 면적은 더 줄어들 수 있다.

표 11. 2015년 주요지역 및 한라산 해발고도별 평균 일최고기온 (단위 : ℃)

지역		4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	전년대비 7~8월 상승폭
해 발 고 도	700m	18.4	22.1	23.8	27.6	28.1	23.7	20.5	+3.2~5.1
	500m	19.2	23.6	24.9	28.6	29.0	25.0	22.3	+3~4.5
	370m	-	23.6	25.1	28.9	30.1	24.8	21.9	+4~6.1
	200m	20.2	24.7	26.7	30.2	31.2	26.9	24.0	+2.4~4.9
제주*		19.2	22.7	25.3	28.8	29.3	25.9	22.6	+1~1.9
봉화**		16.8	24.5	26.6	27.3	28.9	24.4	19.6	-1.5~2.6
충주***		19.0	26.0	29.4	29.7	30.8	27.0	21.0	-1~2.5

* *참고지역, ** 주산지, *** 부적지

표 12. 제주지역 과년도 일최고기온 30℃ 이상 빈도일수

연도	5월	6월	7월	8월	9월	10월	계
2011		5	19	11			35
2012		1	13	18	1		33
2013		1	26	27			54
2014			5	2			7
2015		1	10	13			24

표 13. 2015년 주요지역 및 한라산 해발고도별 일최고기온 30℃ 이상 빈도일수

지역		4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	계	2014년 총일수	전년대비 증가일수
해 발 고 도	700m				9	11			20	0	+20
	500m			1	12	11			24	4	+20
	370m			1	10	13			24	0	+24
	200m		1	3	18	20	3		45	16	+29
제주*				1	10	13			24	7	+17
봉화**			2	1	7	9			19	5	+2
충주***			4	17	14	19	2		56	17	+13

* *참고지역, ** 주산지, *** 부적지

2015년도 정식전 해발고도별 토양 화학성은 표 14과 같았으며 해발 200m 포장에서 P_2O_5 , Ca, Mg 등이 다른 고도 포장에 비해 높게 나타났으나 과잉으로 인해 문제될 수준은 아니어서 시비 과정에서 별도의 교정은 하지 않았다.

표 14. 한라산 해발고도 포장 정식전 토양 화학성 분석 (조사일 : 3.19)

해발 고도	pH	EC	NO_3 (mg/kg)	P_2O_5 (mg/kg)	K (cmol ⁺ /kg)	Mg (cmol ⁺ /kg)	Na (cmol ⁺ /kg)	Ca (cmol ⁺ /kg)	OM (g/kg)
200m	4.92	0.26	2.25	119.58	0.91	1.57	0.15	3.01	38.04
370m	4.82	0.19	2.69	45.93	0.71	0.81	0.11	1.76	35.45
500m	4.63	0.14	4.99	74.07	0.50	0.73	0.10	1.64	34.97
700m	4.73	0.21	5.51	78.44	0.65	0.75	0.09	1.42	43.06

(나) 해발고도별 기온차에 따른 일천궁 생육 및 성분 비교

초기에는 해발고도별 생육차이가 크지 않았으나 7월경 조사에서는 해발 200m에서 초장이 7.8cm이었으며, 370m는 11.9cm, 500m는 11.6cm, 700m는 19.6cm로 고도별로 큰 차이를 보여 해발고도가 낮을수록 고온에 의한 생육장해가 심하였다.(표 15) 시기별 생육을 보면 해발 200m의 경우 7월보다 9월의 초장이 더 큰 것으로 나타났으나 실제로는 고사율이 90% 이상으로 살아 있는 일부 개체에 의해 나타난 수치이며 10월의 경우 100% 고사하여 생육조사 자체가 불가능 하였다. 해발 370m의 경우 7월에 평균초장이 11.9cm로 가장 컸으며 중기 이후로는 고온에 의해 먼저 나온 줄기가 고사하여 10월경 평균 초장은 6.2cm로 크게 줄었으며, 해발 500m의 경우도 유사하였다. 해발 700m의 경우도 초장이 7월경 19.6cm로 후기까지 동일한 크기로 유지되어 여름철 이후로 지상부의 성장은 거의 없었다. 천궁은 고온 등 생육환경이 악화되어 지상부가 고사할 경우 지하부 근경에 축적된 양분을 이용해 1년에 2~3차례 정도 새롭게 싹이 돌아 나오는데, 줄어든 초장은 먼저 나온 줄기가 고사한 후 새롭게 돌아나 성장한 줄기를 측정한 결과이다. 천궁의 정상 초장이 약 30~60cm임을 감안하면 전년도와 달리 해발 700m에서도 극심한 생육부진을 겪은 것으로 생각된다.

표 15. 한라산 해발고도 및 시기별 일천궁 초장 변화 (단위 : cm)

해발고도	7월	9월	10월
200m	7.89±3.80 ^c	13.17±1.31 ^b	-
370m	11.96±4.12 ^b	11.15±6.07 ^b	6.25±5.76 ^b
500m	11.68±6.29 ^b	10.38±5.52 ^b	9.14±4.73 ^b
700m	19.66±7.55 ^a	20.71±7.62 ^a	20.72±8.24 ^a

*Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)

경수(줄기수)의 경우 해발 700m의 경우 7월 평균 약 63개에서 9월에 약 71개로 다소 증가하였으나 해발 200m, 370m, 500m의 경우 고온에 의한 지상부 고사로 인하여 9월 조사에서 경수가 급격히 감소하였다.(표 16) 정상적인 재배 천궁의 생육 중·후기 경수가 약 70~110개 정도임을 감안하면, 2015년도 시험한 모든 시험구의 천궁이 정상개체에 비해 경수가 크게 부족하였다. 따라서 2015년 해발고도 포장 4곳 전체가 천궁 생육에 부적합한 기후조건인 것으로 판단된다.

해발고도별 일천궁 고사율은 표 17과 같이 해발 200m 시험구의 경우 7월경에 43.7%에 육박했고 해발 700m 시험구도 12.5%로 고온으로부터 안전하지 못했다. 해발 200m 시험구의 경우 9월경 조사에서 93.7%, 10월에는 100% 고사하였으며 기온이 가장 낮은 해발 700m 시험구의 경우도 21.8%의 고사율을 보여 2014년에 비해 생육이 크게 부진하였다.

표 16. 한라산 해발고도 및 시기별 일천궁 경수(줄기수) 변화 (단위 : 개/주)

해발고도	7월	9월	10월
200m	36.33±22.31 ^b	22.67±2.05 ^b	-
370m	35.21±14.94 ^b	19.77±9.54 ^b	5.25±2.77 ^b
500m	29.52±14.71 ^b	18.56±11.35 ^b	6.86±4.39 ^b
700m	63.90±30.79 ^a	71.07±41.53 ^a	26.08±13.32 ^a

*Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)



그림 3. 한라산 해발고도별 기온차이에 따른 일천궁 생육 비교 (10월)

표 17. 한라산 해발고도별 일천궁 고사율 조사 (단위 : %)

해발고도	중기(7.8)	후기(9.14)	말기(10.20)
200m	43.7	93.7	100
370m	27.2	60.6	87.8
500m	24.2	51.5	78.7
700m	12.5	12.5	21.8

본 실험에서 전년도보다 생육이 부진하고 고사율이 높은 이유는 전년대비 높은 기온상승 때문으로 추정된다. 시험포장 중에서 온도가 가장 높은 구간인 해발 200m 포장의 2014년 7~8월 평균 기온은 주산지인 봉화(21.4~22.9℃)와 유사한 22.2~22.5℃ 수준이었으나 2015년의 경우 25.6~26.4℃로 크게 올랐으며, 온도가 가장 낮은 구간인 해발 700m포장은 2014년의 경우 주산지(봉화)보다 약 2~3℃ 낮았으나 2015년에는 전년 7~8월 대비 3~3.6℃ 상승하여 2015년 주산지(봉화)보다도 0.6~0.7℃나 높게 형성되어, 해발고도 포장 전구간이 주산지 온도를 초과하였다. 이에 따라 고온에 의한 생육 타격이 컸을 것으로 보인다.

천궁의 경우 30℃ 이상의 기온이 지속될 경우 극심한 생육부진을 겪게 되는데, 일최고기온 30℃ 이상의 빈도 일수는 시험지 및 참고지역(제주, 봉화, 충주) 전체에서 크게 증가하였다.(표 13) 2014년 해발고도 포장의 경우 370m 이상의 포장에서는 30℃ 이상 일수가 4일에 불과했으나 2015년에는 20일 이상으로 크게 증가하였다. 또한 2014년에는 두둑에 피복을 하지 않았으나 2015년에는 흑색비닐로 피복하여 표면온도가 상승한 것도 고사율을 높인 원인중 하나로 생각된다.

일천궁 지하부 1주당 수량은 표 18과 같이 해발 370m 포장의 경우 7g, 500m 포장의 경우 3.5g에 불과해 해발 200m~500m 구간의 수량비교는 무의미 하였으며, 해발 700m 포장의 경우도 1주당 평균 건근중은 38.64g로 관행 재배 천궁 1주당 중량의 약 20% 수준에 불과해 천궁을 재배하기에는 부적합한 기후조건인 것으로 확인되었다.

표 18. 한라산 해발고도별 일천궁 지하부 수량조사

해발고도	평균 노두수(개/주)	건근중(g/주)
200m	-	-
370m	8.0	7.00
500m	4.1	3.57
700m	17.8	38.64



그림 4. 고온피해로 인한 생육부진 및 해발고도별 수확후 생육차이 (10월)

표 19. 한라산 해발고도별 일천궁 유효성분 차이

단위(mg/g)

해발고도	ligustilide 함량
200m	-
370m	1.75±0.13 ^a
500m	1.97±0.31 ^a
700m	1.45±0.18 ^b

*Mean with same letters are not significantly different in DMRT ($p < 0.05$)

해발고도별 일천궁 유효성분(ligustilide)은 200m 시험구의 경우 전체 고사로 인하여 분석이 불가능 하였고, 해발 370m 시험구의 경우 1.75(mg/g), 해발 500m 시험구의 경우 1.97(mg/g), 해발 700m 시험구의 경우는 1.45(mg/g)를 보여 해발 500m 시험구에서 가장 함량이 높은 것을 확인할 수 있었다.(표 19)

본 실험결과 해발고도별 기온차이에 따른 뚜렷한 생육차이를 확인 하였으며, 2015년 기후조건을 기준으로 볼 때 해발 500m까지는 천궁 재배가 불가능 한 것으로 보이며 해발 700m의 경우도 관수시설, 해가림 등 고온조건을 완화할 수 있는 특별한 대책이 없이는 안전한 재배가 불가능 할 것으로 판단된다.

2. 고온조건에서 멀칭, 관수방법 등에 따른 일천궁 생산영향 평가

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 보고한 기후변화시나리오에 따르면 21세기말(2070~2099년)에 온실가스 배출이 현재 수준으로 유지될 경우(RCP 8.5) 전지구 평균 4.8℃가 상승할 것으로 예측하고 있으며, 온실가스 감축정책 수립시(RCP 4.5)의 경우 2.8℃가 상승할 것으로 보고 있다. 작물을 재배하는 포장 환경은 멀칭이나 수분관리 등의 재배방법에 따라 이 이상의 온도변화가 있을 수 있다. 가령 흑색비닐 멀칭의 표면 온도는 여름철 맑은날 정오에 측정할 경우 멀칭을 하지 않은 두둑의 표면에 비해 최소 1~2℃에서 최대 10℃ 이상 높게 측정되는 경우도 있다. 또한 작물의 생리적 특성이나 초장의 크기, 뿌리의 길이 등에 따라서도 온도의 영향이 다를 수 있다. 천궁의 경우 천근성으로 토양표면으로부터 약 10cm 이내에 근권을 형성한다. 다른 작물에 비해 키도 작은 편이라 표면온도의 영향을 크게 받을 수 있어 멀칭 비닐의 색에 의해서도 문제가 될 수 있다. 이러한 작물의 생리적 특성이나 재배방식은 기후변화에 따른 생산영향을 평가하거나 예측하는데 있어서 중요한 검토 대상이 될 수 있다. 왜냐하면 토양피복의 유무, 피복방법, 수분관리 등 어떤 재배조건으로 실험을 하느냐에 따라 생산 영향 예측은 달라질 것이고, 현재 또는 미래기후조건에서 재배가능면적이 줄어들거나 늘어날 수 있기 때문이다. 이에 따라 본 시험에서는 고온조건에서 멀칭이나 관수 방법이 일천궁 생산에 미치는 영향을 조사하였다.

가. 실험방법 및 연구결과

(1) 실험방법

작물이 기후의 영향을 받을 때 이러한 영향을 가중시키거나 경감시키는 주요 재배적인 요인은 멀칭과 관수이다. 관수의 경우 농가에서 상황에 따라 선택적으로 활용하는 경우가 많지만,

멸칭의 경우 대다수 작물에 관행적으로 적용하고 있어 기후변화에 따른 작물 영향 예측시 이에 대한 고려가 필요가 있다. 특히 비닐멸칭은 두둑의 표면온도를 높여 고온피해를 가중시키는 문제점이 있으므로 이를 포함해야할지 말아야 할지에 따라 예측결과는 크게 달라질 수 있다. 본 시험에서는 이러한 영향들을 확인하기 위하여 고온조건에서 피복 및 관수가 작물에 어떤 영향을 미치는지 확인해 보았다. 이를 위해 2014년 충북 음성에 위치한 국립원예특작과학원 인삼특작부 시험포장에서 시험연구를 수행하였다. 음성지역은 주산지인 봉화에 비해 여름철(7~8월) 평균기온이 약 2.1℃ 정도 높아 재배지로는 부적합하나 고온 환경에 처했을 때를 가정하여 작물생육 영향을 시험하기 위하여 선택하였다.

(가) 재료 및 방법

① 시험 1 : 피복재료 및 관수에 따른 일천궁 생육 영향평가

멸칭비닐에 따른 영향을 확인하기 위하여 대조구는 무피복 처리하고 투명비닐, 검정비닐, 흑백유공비닐을 두둑에 피복한 후 다시 관수처리구와 무관수 처리구로 구분하였다. 처리된 피복비닐들은 색이나 투명도에 따라 태양열을 흡수하거나 복사열을 방출하는 양이 달라 식물에 미치는 영향이 다르다. 이중 흑백유공비닐은 속은 검은색이지만 겉면은 흰색으로 된 비닐로 태양열 흡수정도가 낮아 검정비닐에 비해 표면으로 방출하는 복사온도를 낮춘 비닐이다. 관수처리구는 한발기에 주 2~3회 정도 30분간 분수호스로 수분을 공급 하였다. 각 처리구는 모두 3반복 처리 하였으며 수량계를 설치하여 처리구마다 일정한 양이 관수될 수 있도록 조치하였다. 시험재료인 천궁(*Cnidium officinale* Makino)은 주산지인 영양에서 구입하였으며, 균일한 종근을 골라 분의소독한 후 각 시험구(5x0.7m)에 줄 간격 및 포기사이를 30cm로 하여 2열로 식재하였다. 질소, 인산, 칼리비료의 시비량은 성분량으로 12-10-15kg/10a로 하였으며 이중 인산과 칼리는 전량 기비로, 질소는 기비와 추비로 각각 50:50(=25:25)으로 하여 3회 분시 하였다. 그 외 관리 농촌진흥청 표준재배법에 준하였다.

② 시험 2 : 피복 제거 및 관수에 따른 일천궁 생육 영향평가

피복제거 시험은 대조구를 무피복 처리하고 투명비닐, 검정비닐, 흑백유공비닐을 각각의 두둑에 피복하고 다시 관수와 무관수로 구분하여 3반복 처리하였다. 멸칭비닐 제거는 6월 20일, 7월 20일, 8월 20일에 걸쳐 3차례 실시하였다. 관수처리 및 시험재료, 시비방법, 일반적인 재배관리 등은 시험1과 동일하게 실시하였다.

(나) 조사방법

시험1에서는 각 멸칭 및 무멸칭 처리구별로 맑은날 오후 2~3시경 하루를 정해 대기온도, 표면온도, 토양온도를 측정하였다. 대기온도는 토양으로부터 1.5m 높이에 온습도로그를 설치하여 조사하였고, 표면온도는 간이 온도계를 이용하여 처리구당 3지점 이상을 측정하여 평균을 냈으며, 토양온도 역시 간이 토양온도계를 이용하여 토양 깊이 10cm 부근을 처리구당 3점 이상 측정하여 평균치를 사용하였다. 또한 각각의 처리구별 일천궁의 출현율, 고사율 등을 조사하였으며, 최종 수확 후에는 일천궁 지하부의 노두수와 근경중을 조사하였다. 시험2에서는 각 처리구별 그리고 피복비닐 제거 시기별로 초장, 엽장, 경수, 고사율 등을 조사하였으며, 최종 수확 후에는 노두수와 근경중을 비교 조사하였다.

(2) 연구결과

(가) 기후 조건

본 시험이 수행된 음성지역과 가장 가까운 기상대(충주)의 30년(1981~2010년) 평년기온은 11.2℃로 주산지인 봉화지역과는 약 1.3℃ 가량 차이가 나며, 고온의 영향을 가장 크게 받는 7~8월의 충주지역의 기온은 24.7~24.9℃로 주산지인 봉화지역과는 약 2.1℃ 가량 차이가 났다. (표 20) 2014년의 경우도 7~8월 평균 일최고기온은 충주지역이 약 2℃가량 높은 것으로 나타났다.(표 21)

표 20. 지역별 30년(1981~2010년) 평균기온

(출처 : 기상청, ℃)

구분	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	연평균
울릉 [*]	11.1	15.5	18.8	22.3	23.6	19.8	15.3	12.4
봉화 ^{**}	9.9	15.2	19.4	22.6	22.8	17.8	10.9	9.9
충주 ^{***}	11.7	17.1	21.7	24.7	24.9	19.3	12.4	11.2

* 주산지(과거), ** 주산지(현재), *** 시험지에서 최단거리 기상대(음성 시험지와 약 18km)

표 21. 2014년 지역별 일최고기온 평균

(출처 : 기상청, ℃)

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	평균
울릉 [*]	4.8	3.6	10.0	16.1	21.1	23.0	27.0	24.6	23.9	18.7	17.2
봉화 ^{**}	3.6	5.6	11.4	18.3	24.2	25.6	28.8	26.3	24.8	19.1	18.7
충주 ^{***}	3.8	7.2	13.3	20.4	26.0	28.5	30.7	28.3	26.8	20.7	20.5

* 주산지(과거), ** 주산지(현재), *** 시험지에서 최단거리 기상대(음성 시험지와 약 18km)

(나) 멀칭 및 관수에 따른 일천공 생육 영향평가(시험 1)

멀칭 방법에 따른 일천공의 입모율은 그림5와 같이 4.18일 정식한지 35일후 조사한 결과 무멀칭 38.6%, 투명비닐멀칭 92.2%, 검정비닐멀칭 92.9%, 흑백유공비닐멀칭 100%로 무멀칭에 비해 멀칭처리구가 대체로 우수하였다. 그러나 무멀칭을 비롯한 나머지 처리구에서도 시간이 지난후 100% 출현하여 시기적인 차이만 있었다. 멀칭 처리구에서 출현이 빠른 이유는 두둑의 수분유지와 보온효과 때문인 것으로 추정된다. 윤 등(2012)¹⁾은 비닐멀칭은 온도가 낮은 시기에 지온 상승에 의한 작물 수량증진 효과가 있다고 하였다. 7월 2일까지 멀칭방법에 따른 고사율을 비교해본 결과 무멀칭 26.4%, 투명비닐멀칭 65%, 검정비닐멀칭 62.9%, 흑백유공멀칭 21.1%로 무멀칭과 흑백유공멀칭의 고사율이 낮았다. 조사가 진행된 7월의 충주지역 일최고 기온 평균은 30.7℃를 기록하여 일천공의 생육한계 온도를 넘어선 것으로 판단된다.(표 21)

1) 비닐멀칭 색상이 토양온도 변화와 가을배추 수량에 미치는 영향(2012), 윤홍배 등

* 조사시기 : 출현율(5.23), 고사율(7.2)

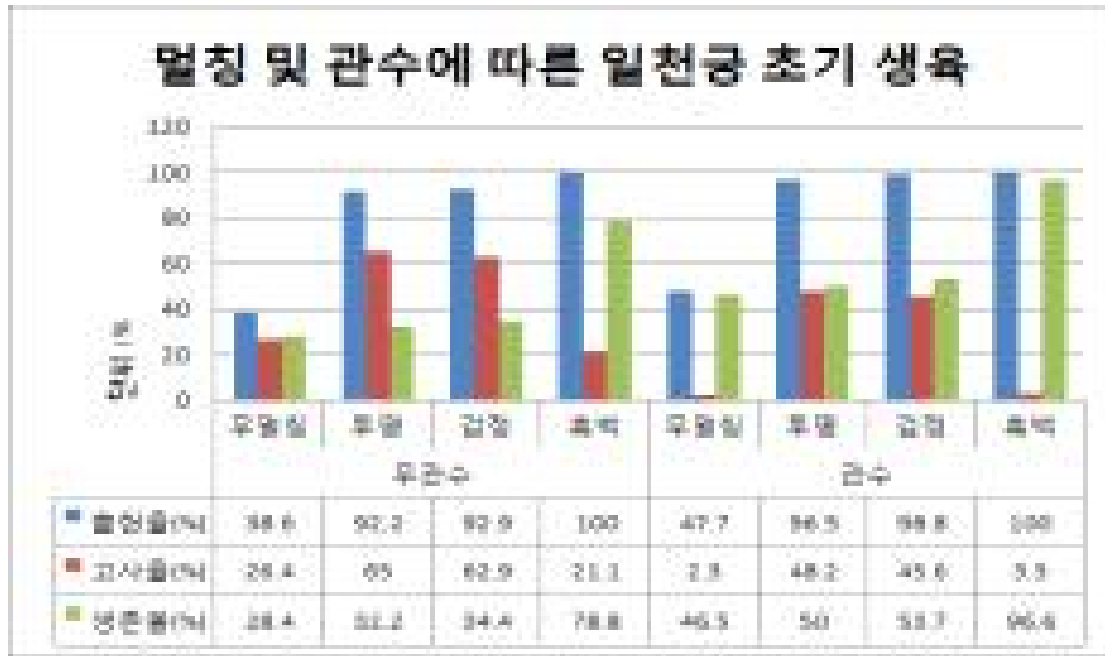


그림 5. 멸칭방법 및 관수에 따른 일천공 초기생육특성

멸칭에 따른 최종 평균생존율은 표 22와 같이 무멸칭시 30.6%, 투명비닐 및 흑색비닐멸칭 약 9%대로 나타났으나 흑백유공멸칭의 경우 72% 수준으로 매우 높아 멸칭 표면의 온도경감에 따른 효과를 본 것으로 생각된다. 흑백유공멸칭 두둑보다 무멸칭 두둑의 표면온도가 낮은 데도 불구하고 무멸칭 처리구의 생존율이 더 떨어지는 이유는 무멸칭에 비해 멸칭(투명, 흑색, 흑백유공) 처리구가 초기 입모율이 빠르고 및 생육이 왕성하여 고온에 견디는 힘도 상대적으로 강했기 때문으로 추정된다. 관수처리구의 경우 다른 처리구보다 약 6~18.4%가량 생존율이 상승하였으며 특히 무멸칭 처리구의 생육이 무관수에 비해 더 컸다. 평균수량은 고사율이 많아 균일하지 않은 생존개체수를 대상으로 하여 비교가 어려우나 표면 및 토양온도가 비교적 낮은 흑백멸칭 처리구에서 가장 높게 나왔다.

표 22. 멸칭방법 및 관수에 따른 일천공 지하부 수량 및 최종생존율 (조사일 : 10.28)

구분	무관수			관수		
	평균수량(g)	노두(수)	생존율	평균수량(g)	노두(수)	생존율
무멸칭	12.87±12.90	8.00±4.99	30.6%	68.10±54.24	10.43±5.78	45.4%
투명멸칭	13.88±18.02	6.00±3.24	8.8%	10.73±5.97	7.75±3.67	27.2%
흑색멸칭	34.10±21.96	8.00±5.52	9.0%	7.44±3.09	5.20±1.94	20.9%
흑백유공멸칭	36.32±12.92	10.12±4.16	72%	106.36±50.55	17.28±8.27	78%

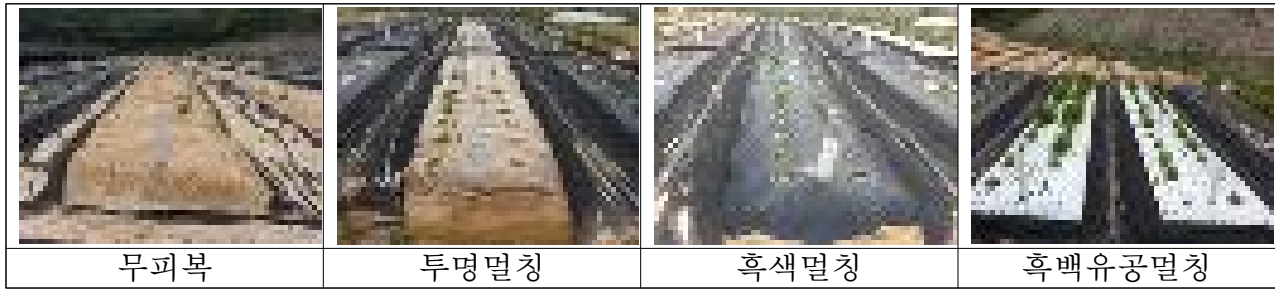


그림 6. 멀칭방법에 따른 초기 생육특성(정식후 35일 후)



그림 7. 멀칭 및 관수에 따른 후기 일천궁 생육특성(10월)

현재 농가에서 일천궁 재배를 위하여 가장 많이 쓰이는 피복재는 흑색비닐이다. 비닐멀칭 처리는 봄철 입모율을 높이고 출현을 빠르게 하는 장점은 있으나 여름철 고온기에 피복 표면온도를 높이는 단점이 있다. 본 시험은 자연적인 기후조건 이외에 재배적인 방식의 차이에 의해서 발생하는 포장의 온도변화가 작물 생육에 얼마나 많은 영향을 미치는지 확인하기 위하여 수행되었다. 한낮의 경우 대기온도에 비해 두둑의 표면과 토양온도는 더 높게 올라가며 천궁과 같이 천근성이면서 키가 작은 작물의 경우 멀칭에 따른 온도상승의 영향을 크게 받을 수 있다. 또한 멀칭 재료의 색상에 따라서도 영향을 받을 수 있다. 윤 등(2012)은 멀칭비닐의 색상에 따라 태양복사에너지의 흡수율이 달라 지온상승 효과가 차이가 난다고 하였다. 맑은 가을날 오후에 멀칭 방법별로 표면온도를 측정해 본 결과 무멀칭 두둑이 평균 약 31.8℃, 투명비닐이 약 37.7℃, 검정비닐 42.2℃, 흑백유공비닐 33.7℃를 기록하여, 무피복 두둑의 표면온도가 가장 낮았고 위쪽 표면이 흰색으로 된 흑백유공비닐이 그 다음으로 낮았다.(표 23) 농가에서 일천궁 재배에 가장 많이 사용하는 검정비닐의 경우 표면온도가 가장 높게 나타났다. 토양온도에서는 표면온도보다는 처리구간 차이가 크지는 않았으나 측정된 깊이(10cm)를 고려하면 표면과 가까울수록 차이가 더 컸을 것으로 추정된다. 이와 같은 결과는 피복방법에 따라 표면 및 토양온도가 낮은 처리구의 경우 일천궁 생육조사에서도 높은 생존율을 보여 상호연관성이 큼을 뒷받침해준다.

표 23. 멀칭 방법에 따른 일천궁 포장 토양 및 표면온도

(10월 14:30 전후)

구분	대기온도	무피복	투명비닐	검정비닐	흑백유공비닐
표면온도*	29.0	31.89±2.53	37.78±1.06	42.22±6.29	33.75±1.31
토양온도**	28.8	35.00±1.19	39.70±4.24	39.47±2.82	34.23±3.25

* *간이 측정기로 표면온도 측정, **간이 측정기로 표면으로부터 10cm 깊이 측정

(다) 피복 제거 및 관수에 따른 일천궁 생육 영향평가(시험 2)

비닐피복에 따라 두둑의 표면온도가 상승하므로 표 24와 같이 비닐을 시기별로 제거하면서 생육조사를 하였다. 관수처리를 한 경우에는 대체로 피복제거를 빨리할수록 효과가 좋았다. 6.20일 제거한 경우 초장은 20.9cm이었고, 제거를 하지 않을 경우 4.4cm로 가장 낮았다. 그러나 무관수의 경우 표 25와 같이 재배포장의 기온이 너무 높아 대부분 일찍 고사하였으므로 처리구간 차이를 확인할 수 없었다.

표 24. 흑색비닐피복 제거 및 관수에 따른 일천궁 생육특성

(조사일 : 10.6)

구분		무멀칭	흑색멀칭			
			제거(6.20)	제거(7.20)	제거(8.20)	제거안함
무 관 수	초장(cm)	10.53±3.22	9.26±2.67	5.53±2.09	7.85±2.35	7.73±3.94
	엽장(cm)	3.59±0.64	3.66±1.00	2.57±1.07	3.25±0.55	2.85±1.47
	경수	42.00±20.68	16.40±12.11	12.67±3.86	5.50±1.50	21.00±15.64
관 수	초장(cm)	12.97±10.60	20.90±5.93	13.74±7.20	10.14±4.89	4.40±2.02
	엽장(cm)	4.40±3.04	6.84±1.35	6.06±2.40	3.74±1.57	2.00±0.84
	경수	29.71±27.05	31.00±13.61	21.80±18.84	17.60±10.67	28.60±28.60

표 25. 흑색비닐피복제거 및 관수에 따른 수확전 일천궁 최종 생존율

(10.28)

구분		무멀칭	흑색멀칭			
			제거(6.20)	제거(7.20)	제거(8.20)	제거안함
생 존 율 (%)	무관수	30.6	22.2	7.6	5.4	9.0
	관수	45.4	54.4	31.5	14.7	20.9

표 26. 흑색비닐피복 제거 및 관수에 따른 일천궁 지하부 수확량 (10월 수확후)

구분		무멀칭	흑색멀칭 제거시기별 수량(g) 및 노두수(개)			
			제거(6.20)	제거(7.20)	제거(8.20)	제거안함
무 관 수	평균수량	12.87±12.90	18.14±18.24	8.29±4.77	19.20±15.51	34.10±21.96
	노두	8.00±4.99	10.14±2.17	5.80±2.32	10.33±1.70	8.00±5.52
관 수	평균수량	68.10±54.24	44.78±16.50	14.17±4.27	12.14±5.23	7.44±3.09
	노두	10.43±5.78	9.75±2.22	10.14±3.60	8.25±5.26	5.20±1.94

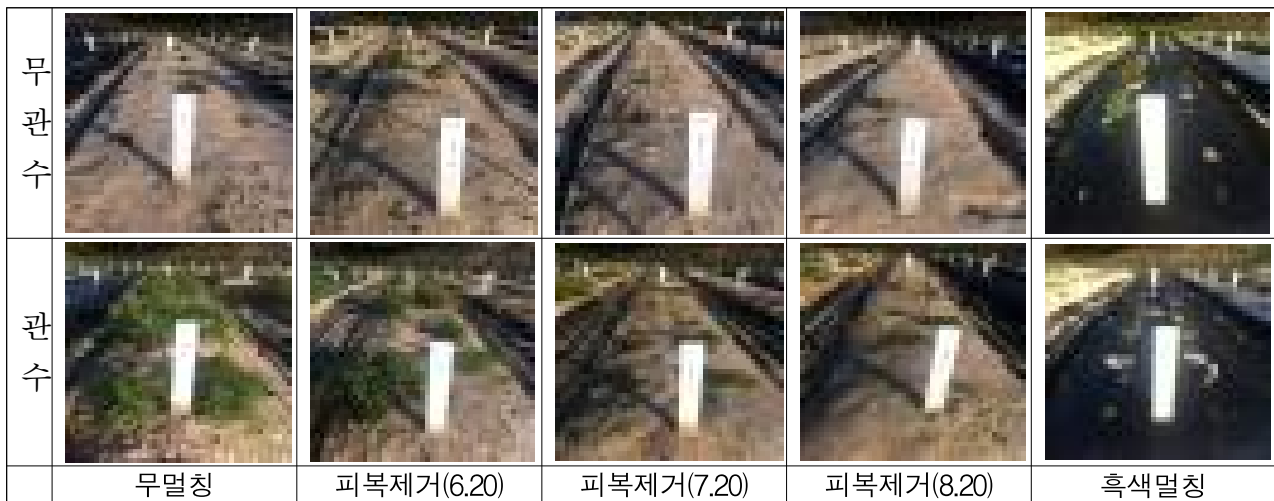


그림 5. 흑색비닐피복제거 및 관수에 따른 일천궁 생육영향 비교(10월)

지하부 수량의 경우도 관수를 했을 때에는 무피복 처리구가 가장 높게 수량이 나왔고, 비닐 제거시기가 빠를수록 수량이 높게 나와 온도 경감 효과가 나타났다. 그러나 무멀칭의 경우는 고사로 인해 처리구간 비교는 큰 의미가 없었다.(표 26)

본 실험은 비닐피복에 따른 고온의 영향을 확인하기 위한 것으로, 만일 고온회피를 목적으로 피복 비닐을 제거할 경우 잡초문제가 발생할 수 있으므로 실제 재배현장에서 활용하기에는 제약이 따른다. 흑색비닐 멀칭은 현재 일천궁을 비롯한 국내 대부분의 약용작물에 일반적인 재배 방식으로 자리 잡고 있다. 그러나 이러한 방식은 피복표면을 중심으로 열이 많이 발생하여 천궁과 같은 작물에는 고온피해를 증가시키는 경향이 있다. 작물마다의 생리적 특성과 특정한 재배방식에 따라 재배적지 면적이 증감할 수 있으므로 기후변화에 따른 생산 영향 평가시 이러한 문제점도 고려할 필요가 있다.

3. 온도구배터널을 이용한 천궁, 당귀 생산 및 품질영향 평가

본 연구는 2015년부터 2016년까지 2년에 걸쳐 강원도 평창에 있는 국립원예특작과학원 진부시험지에 소재한 온도구배터널에서 당귀와 천궁의 생산 및 품질 영향평가 시험을 수행하였다. 제주도 해발고도 포장에서 수행한 천궁 실험(2014~2015년)은 고도별로 균일한 기온편차를 얻기 어려운 단점이 있었으며, 강우, 풍속 등에 있어서 국지적인 편차가 심하여 천궁 생육과 기온과의 정밀한 영향관계를 확인하는데 한계가 있었다. 온도구배터널은 이러한 단점을 보완할 수 있다. 비닐하우스 내에서 진행되기 때문에 기온이외에 일사량, 수분공급 등 모든 환경요인을 통일시킬 수 있다. 또한 천궁의 경우 주산지인 영양보다 평창지역이 온도가 낮고 내륙에 위치해 제주시험보다 적합한 기후환경에서 천궁, 당귀의 생산 및 품질 영향 평가를 수행할 수 있었다.

가. 2차년도(2015년) 실험방법 및 결과

(1) 2차년도(2015년) 당귀 실험방법

(가) 재료 및 방법

① 재배환경 조건

본 시험은 국립원예특작과학원 인삼특작부의 평창군 진부 시험지에 있는 온도구배터널(temperature gradient tunnel system, Soldan Crop., Seoul, Korea)에서 수행하였다. 온도구배터널은 온도를 제외한 다른 환경인자(광량, 대기 CO₂ 농도 등)를 자연상태와 유사하게 유지할 수 있도록 고안한 반폐쇄형 장치이다. 터널의 폭과 높이는 약 3m이며 길이는 27m로 일반 비닐하우스보다 약간 작은 크기이다. 터널 내 온도구배 장치는 터널이 설치된 강원도 평창군 진부면 기온을 기본으로 하여 입구에 가까운 쪽 온도는 +0℃로 하고 입구에서 안쪽으로 갈수록 온도가 서서히 올라가도록 고안되었다. 본 장치를 이용하여 입구부터 +0℃~+5℃까지 온도구배를 두었으며 주야간으로 가동하였다. 터널내 3개 구간에 약 50cm 높이에 설치된 온습도로그(1400-101, LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA)를 이용하여 생육기간인 4월 중순부터 10월말까지 1시간 간격으로 기록 하였다.

② 재배 및 조사방법

당귀 모종은 평창지역에서 키운 1년생 묘를 사용하였으며, 2014년 4월 중순에 온도구배터널에 정식하여 당해 연도 11월 초까지 재배하였다. 두둑은 검정색 비닐로 멀칭 하였으며 평창지역 관행재배 방식에 따라 정식 전 시비는 하지 않았다. 관수는 점적호스를 이용하여 오후 6시경부터 매일 20분간 공급하였다. 당귀의 생육조사는 6월, 9월, 11월 각각 세 차례 수행하였으며 초장, 소엽수 등을 조사하였다. 지하부 수량은 11월 수확후 조사하였다. 생육조사 및 샘플링은 온도구배에 따라 A(+0℃~+2℃), B(+2℃~+4℃), C(+4℃~+5℃)의 3구간으로 나누어 진행하였다.

③ 성분분석 방법

온도구배에 따른 당귀의 품질은 약리성분에 해당하는 지표성분 Decursin의 함량을 비교하였다. 당귀는 11월에 구간별로 수확한 후 지상부와 지하부를 전처리하여 사용하였다. 수확한 당귀는 흙을 제거하기 위하여 물로 가볍게 수세한 후 하루정도 양건하고 솔 등을 이

용하여 남은 이물질을 제거하였다. 그 다음은 지상부와 지하부를 분리한 후 적당히 세절한 후 50℃의 오븐에서 6시간 건조한 후 분쇄하였다. 분쇄한 시료는 잘 섞은 후 5g을 측량하여 MeOH 20mL를 넣고 상온에서 1시간 초음파 추출한 후 syringe filter(0.2 µl pore size)로 여과하고 여과 후 잔류물에 다시 MeOH 30mL를 넣고 상온에서 1시간 초음파 추출한 후 다시 여과하였다. 1차, 2차 추출액을 합쳐서 전체 볼륨을 50mL로 맞춘 후 섞은 후 1mL를 취하여 표 27의 조건으로 LPLC를 이용하여 정량분석 하였다. Decursin의 표준품은 (주)코아사이언스 회사에서 구입하였으며 기계는 ThermoFinnigan LCQ Deca XP plus ion trap mass spectrometer을 사용하였다.

표 27. 당귀 유효성분(Decursin) 정량분석을 위한 HPLC 조건

HPLC system	Thermo Finnigan surveyor system				
Column	U-VDSpher Pur C18-E 1.8µm , 50 x 2.0mm Cat.-No. N0520E181UVC (VDS optilab)				
Mobile phase	A: 0.1% Formic acid/ H ₂ O, B: 0.1% Formic acid/ Acetonitrile				
Gradient	Time(min)	0-10	10-12	12-12.5	12.5-15
	%B	30-100	100	100-30	30
Flow rate	0.2 mL/min				
Injection	2 µL				
Column Temp.	40℃				
Detection	parent MS 329.3 - fragment MS 229.1				

(2) 연구결과

(가) 온도구배터널 내의 계절 및 구간별 기온특성

시험기간 중의 온도는 강원도 평창기온을 기본으로 하여 약 +0~+5℃까지 구배를 두어 설정하였으며, 봄철 정식시기부터 가을철 수확기까지의 기온분포는 표 28와 같다. A구간은 평창의 기온보다 +0~2℃가량 상승한 구간으로 6월~8월까지 월평균 21.1~24.4℃를 기록하였고 B구간(평창기온+2℃~4℃)은 24.0~27.1℃, C구간(평창기온+4℃~5℃)은 24.9~28.5℃를 기록했다.

표 28. 온도구배하우스 구간별 월평균 기온

(단위 : ℃)

구간	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월
A	10.56±3.9	18.01±2.6	21.12±2.0	23.67±3.0	24.41±2.4	18.73±2.0	13.11±3.1
B	13.57±3.7	20.82±2.6	24.01±1.9	26.43±2.9	27.05±2.4	21.67±1.9	16.00±3.1
C	15.36±3.8	22.00±2.5	24.97±1.9	27.56±2.9	28.49±2.3	22.69±1.9	16.98±3.0

* 4월 기온은 8일부터 30일까지의 평균임

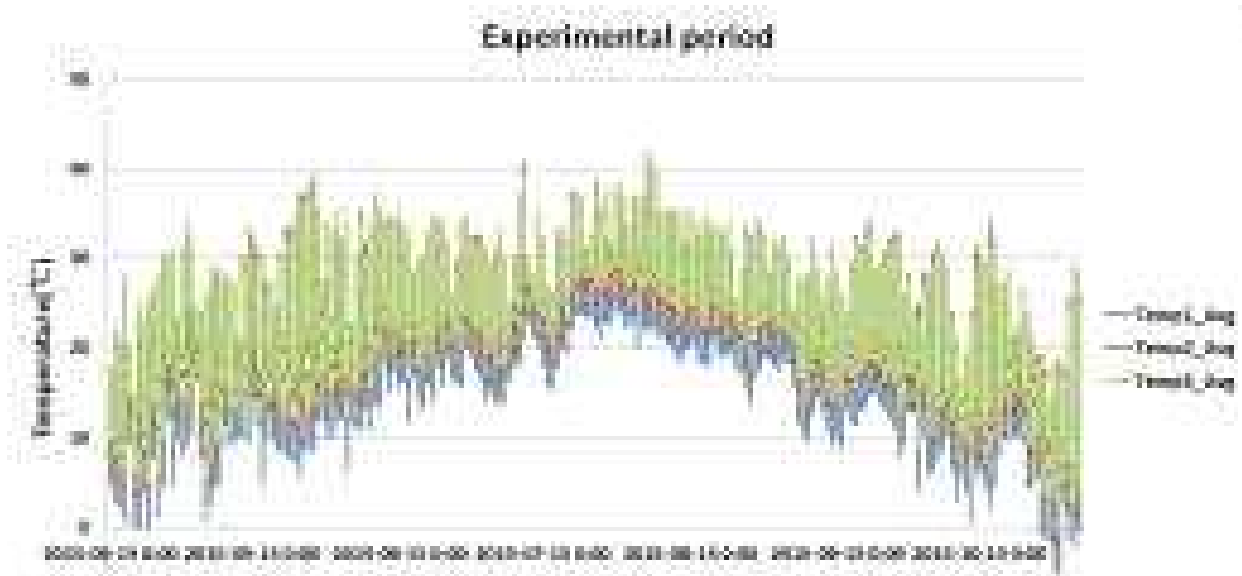


그림 6. 시험기간 중 온도구배터널 내 기온변화 (평균)

* A(+0℃~2℃), B(+2℃~4℃), C(+4℃~5℃)

(나) 온도구배에 따른 당귀의 생육 및 품질 평가

평균 온도구배터널의 구간별 당귀의 초기 생육은 큰 차이가 없었으나 표 29에서 보는 바와 같이 온도가 높아지는 6월경 조사에서는 A구간(+0~2℃)의 초장은 36.06cm로 가장 컸고 B구간(+2~4℃)의 초장은 27.68cm로 중간이었으며 C구간(4~5℃)의 경우 19.48cm로 생육이 부진하였다. 소엽수는 A구간 12.4개, B구간 10.8개, C구간 9.1개로 큰 차이를 보이지는 않았다. 9월 조사에서는 A구간의 초장이 61.72cm, B구간 37.40cm, C구간 23.38cm로 구간별 생육차이가 뚜렷하게 나타났으며 C구간에서는 고온에 의해 고사하는 개체수가 있었다. 소엽수의 경우도 A구간 26.4개에서 B구간 14.9개, C구간 10.9개로 6월보다 뚜렷한 차이를 보였다. 10월 조사에서는 A, B구간 평균초장이 9월에 비해 다소 줄어드는 경향이 있었다.

표 29. 평균 온도구배터널 구간별 당귀의 초장 및 엽수

		6월	9월	11월
A구간	초장(cm)	36.06±6.5	61.72±7.9	50.01±6.1
	소엽수(개/주)	12.39±3.0	26.44±8.9	18.75±4.5
B구간	초장(cm)	27.68±2.5	37.40±5.8	28.88±9.2
	소엽수(개/주)	10.76±1.4	14.94±5.3	14.08±4.9
C구간	초장(cm)	19.48±8.2	23.38±12.0	28.33±2.7
	소엽수(개/주)	9.08±2.4	10.92±5.5	11.67±2.4

* A구간(+0℃~2℃), B구간(+2℃~4℃), C구간(+4℃~5℃)

평창기온 대비 +0℃ ~+5℃,



평창기온 대비 +5℃ ~+0℃



그림 7. 온도구배에 따른 당귀 생육비교

A구간



B구간



C구간



구간별 생육비교

그림 8. 온도구배 구간별 당귀 생육 비교
C(T3)

* A(T1), B(T2),

표 30. 온도구배 구간별 당귀 지하부 수량 특성

(단위 : kg/주)

구간	생근중(g)	뿌리길이(cm)
A	476.00±159.8	30.40±7.6
B	72.64±45.9	15.04±4.3
C	26.00±7.7	8.13±0.9

* A(+0℃ ~2℃), B(+2℃ ~4℃), C(+4℃ ~5℃)

수확후 당귀의 이용부위인 지하부의 생근중 평균은 표 30과 같이 A구간 476.00g, B구간 72.64g, C구간 26.00g으로 구간별 편차가 매우 큰 것으로 확인 되었다. 이러한 수치는 2015년 평창군 진부면(약 해발 500m)의 기온을 기준으로 연평균 기온이 약 3±1℃ 상승시 84.7%, 약 4±1℃ 상승시 94.5%의 수량이 감소할 수 있는 것으로 평가할 수 있다.

당귀의 구간별 고사율은 그림 9에서 보는 바와 같이 11월경 수확 무렵 확인한 결과 A구간은 0% 였으며, B구간은 19%, C 구간은 71.4%에 이르는 것으로 확인 되었다. 한편 A구간은 생육이 가장 왕성하였고 고사도 전혀 없었으나 A구간(+0~2℃) 내에서도 온도가 낮은 하우스 입구 쪽이 생육이 더 좋은 것으로 보아 당귀의 기온에 따른 재배적지는 평창군 진부지역의 온도보다도 더 낮은 곳일 것으로 판단된다. 따라서 최적기후조건을 구명하기 위해서는 향후 온도



그림 9. 평창 온도구배터널 구간별 당귀 고사율 (11월)

를 더 낮추어 실험해야 할 것으로 보인다. 한편 A~C 전 구간에 당귀의 추대는 전혀 없었으므로 기온상승과 추대는 관련이 없는 것으로 판단된다.

온도 구배에 따른 당귀의 Decursin 함량은 표 31에서 보는 바와 같이 지상부의 경우 A구간에서 $1.39\mu\text{g/ml}$ 이었으나 B구간에서는 $1.63\mu\text{g/ml}$ 로 나타났으며 C구간의 경우 $1.05\mu\text{g/ml}$ 로 확인되었다. 이용부위인 지하부 뿌리의 경우 A구간에서 $1.71\mu\text{g/ml}$ 이었으나 B구간에서는 $1.35\mu\text{g/ml}$ 로 나타났으며 C구간의 경우 $1.45\mu\text{g/ml}$ 로 온도구배에 따른 일관성 있는 변화는 없었다. 그러나 지상부와 지하부의 합계수치를 보면 A구간 $31.0\mu\text{g/ml}$, B구간 $29.8\mu\text{g/ml}$, C구간 $25.0\mu\text{g/ml}$ 로 고온 구간으로 갈수록 줄어드는 것을 볼 수 있다. 따라서 당귀의 이차대사산물은 고온에서 감소하는 것으로 볼 수 있으며, 뿌리부분의 함량도 기온이 낮은 A구간에서 가장 우수한 것으로 보인다. M.Kleinwachter(2015)²⁾ 등의 연구에 따르면 상당수 약용작물의 이차대사산물은 건조스트레스에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그리고 고온기후조건에서 노지 상태로 재배하는 경우에는 한발피해를 동반하는 경우가 일반적이다. 그러나 본 실험에서는 점적관수를 이용하여 각 구간별로 동일한 양을 관수 하였고 비닐피복을 하여 증발산을 억제 하였으므로 건조스트레스보다는 고온에 의한 영향을 많이 받았을 것으로 보인다. 본 실험에서는 온도 상승에 따른 이차대사산물의 영향은 식물체 전체적으로는 감소하는 것으로 판단되나 수확부위인 뿌리부분의 Decursin이 온도에 어떤 영향을 받으며 어떻게 이동 및 축적되는 지에 관해서는 분명하지 않으므로 향후 보완연구가 필요할 것으로 보인다.

표 31. 온도구배하우스 구간별 당귀의 Decursin 함량 비교 ($\mu\text{g/mg}$)

	A구간	B구간	C구간
지상부	13.9 ± 1.0	16.3 ± 1.8	10.5 ± 1.4
지하부	17.1 ± 0.9	13.5 ± 0.6	14.5 ± 0.8
합계	31.0	29.8	25.0

* A구간(+0℃~2℃), B구간(+2℃~4℃), C구간(+4℃~5℃)

2) M.Kleinwachter, Dirk Selmar, New insights explain that drought stress enhances the quality of spice and medicinal plant : potential applications. Agron. Sustain Dev.(2015) 35:121-131

나. 온도구배에 따른 천공의 생육 및 품질 평가(2016년)

(1) 3차년도(2016년) 천공 실험방법

(가) 재료 및 방법

① 재배환경 조건

2016년도에는 일천공을 대상으로 실험을 진행하였다. 시험 장소는 전년과 동일한 평창군 진부면에 설치된 온도구배터널을 이용하였다. 그러나 생육기 전체 기간 동안 온도구배 처리를 하였던 전년도와 달리 2016년 천공 시험에서는 전체 재배기간(4.19~10.18) 중에서 온도구배 처리 기간을 중기이후(8.6~10.18)로 제한하고 나머지 재배 기간은 팬 가동을 중단한 채 터널의 좌측 비닐을 걷어 온도구배가 일어나지 않도록 하고 하우스 상단 비닐에 의해 비가림만 한 채로 정상재배 하였다. 8월6일~10월18일까지의 구배 온도는 입구부분 대기온도+0℃부터 종결부분 대기온도+6℃로 조정하였다. 온도 구배는 주야간 및 흐린날에도 일정하게 유지되도록 하였다. 본 시험에서 일부기간 동안만 온도구배 처리를 한 이유는 2015년과 달리 2016년에는 이상고온현상이 지속되어 정식후 초기부터 잎 끝이 타는 등 고온에 의한 생육장해가 심하여 온도를 처음부터 6℃ 정도 올릴 경우 시험자체가 어려울 것으로 판단되어 4월부터 8월초까지는 온도구배 없이 정상재배 하였다. 이에 따라 본 시험에서는 고온기간인 8월~10월까지만 처리구별로 온도처리를 하고 이에 따른 고온피해 영향을 확인하였다. 처리온도 측정은 전년과 마찬가지로 터널내 각 구간(A, B, C)의 중앙에 1개씩 설치된 온도센서를 사용하여 1시간 간격으로 측정하였다.

② 시험재료 및 재배법

천공 종근은 주산지인 영양지역에서 공급받았으며, 균일한 종근을 선별한 후 분의소독하고 포기사이 30cm 간격으로 1렬로 정식하였다. 두둑은 검정색 비닐로 피복하였다. 질소, 인산, 칼리비료의 시비량은 성분량으로 각각 12-10-15kg/10a으로 하였으며 이중 인산과 칼리는 전량 기비로, 질소는 기비와 추비로 각각 50:50(=25:25)으로 하여 3회 분시 하였다. 관수는 점적호수를 피복비닐 아래 설치하였으며, 천공을 심은 줄과 약 15cm 정도 거리를 두고 나란히 설치하여 천공에 직접 수분이 닿지 않도록 하였다. 관수시간은 일중 20분 정도씩 3회 공급하여 온도처리구간별로 수분부족에 의한 영향이 없도록 처리하였다.

③ 조사내용 및 방법

생육조사는 7월, 8월, 10월경 3차례에 걸쳐 처리구별로 초장, 경수(줄기수), 고사율 등을 조사하였다. 고사율 조사에서는 지상부의 경우 식물체 전체가 노랗게 탈색되어 건전 줄기가 남아있지 않은 경우를 고사 개체로 간주하였고, 지하부의 경우 뿌리부분이 완전히 소실된 경우를 고사 개체로 간주하였다. 조사기준을 위와 같이 정한 이유는 천공은 고온으로 인해 지상부가 고사하여도 지하부에 양분이 남아있을 경우 연간 수차례 정도 재출현이 가능하기 때문이다. 따라서 지상부가 완전히 고사하여도 지하부에 건전한 부분이 남아있을 경우 고사 개체수에서 제외 하였으므로 지상부와 지하부의 고사율에 있어서 약간의 차이가 발생할 수 있다. 지상부의 고사율 조사는 생육중에 진행하였고, 지하부의 고사율 조사는 수확후에 진행하였다. 조사 및 샘플링은 온도구배에 따라 A(+0℃ ~+2℃), B(+2℃ ~+4℃), C(+4℃ ~+6℃)의 3구간으로 나누어 진행하였다.

④ 성분분석 방법

수확 후에는 천궁의 이용부위인 뿌리를 대상으로 유효성분인 ligustilide와 Butylden-phthalide를 정량분석 하였다. 전처리는 온도처리구간(A, B, C)별로 샘플링 한 천궁 뿌리 시료를 동결건조한 후 잘게 분쇄하여 균일하게 섞은 후 1g을 취하여 Hexane 용액 40ml을 넣고 60분간 초음파 추출하여 0.2um 필터를 이용하여 여과하여 실험하였다. 분석에 사용된 두 성분의 표준품은 (주)코아사이언스에서 구입하였으며 분석조건은 표 32와 같다.

표 32. 천궁 유효성분(Ligustilide, Butyldenphthalide) 정량분석을 위한 조건

System	Dionex UHPLC3000/LTQ				
Column	Phenomenex, Kinetex 2.6um F5 100A(100*2.1mm)				
Mobile phase	A: 0.1% Formic acid/ DW				
	B: 0.1% Formic acid/ Acetonitrile				
Gradient	Time(min)	0-9	9-11	11-12	12-15
	%B	40-100	100	100-40	40
Flow rate	0.3 mL/min				
Injection	5 µL				
Column Temp.	40℃				
Detection	Ligustilide : parent MS 191.1 - fragment MS 173.1				
	Butyldenephthalide : parent MS 189.0 - fragment MS 171.0				

(2) 연구결과

(가) 온도구배터널안의 처리기간 내 구간별 기온특성

온도구배터널 내 온도처리기간(8.6~10.18)의 구간별 온도는 A구간 기준 24.3℃로 전년(2015년) 23.6℃ 대비 0.7℃ 상승하였으나, 같은 기간 1개월 동안 일평균 기온이 25℃ 이상인 일수가 2015년에는 7일에 불과 했으나 2016년에는 20일에 달하였다.(표 33) 즉 2015년 일평균 기온 그래프(그림 10 좌측)는 비교적 완만한 반면 2016년의 그래프(그림 10 우측)는 등락폭이 더 크므로 25℃ 이상의 고온이 주는 충격 횟수는 평균기온 상승에 따른 예측치를 상회하여 실제 식물체에 미치는 충격은 더 컸을 것으로 판단된다.



그림 10. 시험기간 중 온도구배하우스 내 기온변화 연간 비교 (2015년, 2016년)

표 33. 2015년과 2016년 여름철 기온비교(A구간 기준, 8.6~9.5)

	일평균 기온(℃)	일평균 25℃ 이상일수
2015년	23.6	7
2016년	24.3	20

(나) 온도구배에 따른 천공의 생육 및 품질 평가

6~7월경 전 생육구간에서 부분적으로 뿌리응애가 발생하여 생육이 좋지 않았으며, 전년대비 일평균 기온 25℃ 이상의 고온지속일수도 급격히 증가하여 7월경 지상부 고사율은 표 35와 같이 A구간 21.4%, B구간 42.9%, C구간 39.2%에 달하여 정상적인 실험 수행은 어려웠다. 4월부터 7월까지 정상재배 기간 중 A~C구간의 평균초장은 16.4cm~18.6cm로 비슷하였으며, 8월초 온도구배 처리후 8월 중순경의 평균초장은 A구간 20.4cm, B구간 22.8cm, C구간 23.8cm로 고온구간에서 생육속도가 일시적으로 빨랐으나 8월 말경 급격히 지상부가 고사하기 시작하였다. 10월경 A구간의 평균초장은 18.4cm 였고, B구간은 15.5cm, C구간은 지상부가 모두 고사하여 측정이 불가능 하였으며, 경수(줄기수)도 A구간 35.6개, B구간 18.0개로 온도가 높을수록 줄어들었다. 10월경 지상부의 고사율은 A구간 75%, B구간 92.8%, C구간 100%로 였으며, 지하부의 경우 A구간 35.7%, B구간 57.1%, C구간 78.5%로 온도가 높은 구간일수록 더 높은 고사율을 보였다.



그림 11. 정상재배(7월)와 온도구배 재배(8월)에 따른 천공 생육차이

표 34. 기온차이에 따른 일천공 생존율 및 지상부 생육특성

구간	정상 재배		온도구배 재배			
	7월		8월		10월	
	초장 (cm)	경수 (개/주)	초장 (cm)	경수 (개/주)	초장 (cm)	경수 (개/주)
A	18.0	67.1	20.4	71.5	18.4	35.6
B	16.4	95.0	22.8	84.8	15.5	18.0
C	18.6	96.1	23.8	93.5	모두 고사	모두 고사

* 정상재배(4.16~8.5) : A, B, C 구간 동일온도 재배

** 온도구배(8.5~10.18) : A(평창기온+0~2℃), B(평창기온+2~4℃), C(평창기온+4~6℃)

표 35. 처리구별 일천궁 지상부 및 지하부 고사율(%) (평균 온도구배하우스)

구간	정상 재배		온도구배 재배			
	7월		8월		10월	
	지상부	지하부	지상부	지하부	지상부	지하부
A	21.4	-	28.6	-	75	35.7
B	42.9	-	50.0	-	92.8	57.1
C	39.2	-	39.3	-	100	78.5

* 정상재배(4.16~8.5) : A, B, C 구간 동일온도 재배

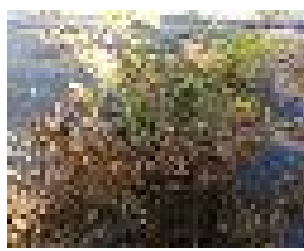
** 온도구배(8.5~10.18) : A(평균기온+0~2℃), B(평균기온+2~4℃), C(평균기온+4~6℃)

*** 지상부는 모두 노랗게 탈색된 경우, 지하부는 뿌리부분이 완전 소실된 경우를 고사로 간주함

수확기의 생육상태는 그림 12와 같이 A, B, C 온도 처리구별로 지상부와 지하부 모두 뚜렷한 차이가 났다. A구간에서 B구간 및 C구간으로 갈수록 고온에 의한 생육부진이 더 심하였지만, 온도가 가장 낮았던 A구간도 상당한 피해를 입었다. 수확후 지하부 1주당 평균 노두수는 표 36과 같이, A구간 16.7개, B구간 14.1개, C구간 5.2개 였으며, 생근중은 A구간 33.7g, B구간 16.0g, C구간 2.5g으로 나타나 고온구간일수록 수량감소가 심하였다.



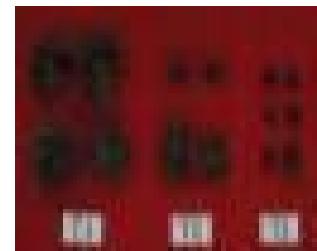
A구간



B구간



C구간



지하부 비교

*A(T1), B(T2), C(T3)

그림 12. 온도구배(+0℃~+6℃)에 따른 당귀 수확기 생육차이

표 36. 기온차이에 따른 일천궁 지하부 생육특성 (10월 수확후, 평균 온도구배하우스)

구간	노두수 (개/주)	근경장 (cm)	근경폭 (cm)	생근경중 (g/주)
A	16.7	49.5	31.1	33.7
B	14.1	37.2	21.6	16.0
C	5.2	19.5	18.4	2.5

* 정상재배(4.16~8.5) : A, B, C 구간 동일온도 재배

** 온도구배(8.5~10.18) : A(평균기온+0~2℃), B(평균기온+2~4℃), C(평균기온+4~6℃)

시험결과, 온도 차이에 따른 생육차이는 인정되나 병해충 및 이상고온 등으로 인하여 전 구간 생육이 부진하였으므로 정상적인 생산영향 평가에는 한계가 있었다. 이번 시험결과, 평창군 진부면(해발 약 500m)의 일천궁 재배 기후 적합성을 확인하지는 못하였다. 온도구배터널의 온도는 전구간(A, B, C)이 설치된 지역(진부)의 온도보다 높다. 가령 가장 온도가 낮게 설정된 A구간의 경우도 평창기온 +0~2℃ 이므로 평균 1℃ 이상은 높다. 따라서 본 시험결과 A구간에서도 고온피해가 확인되었으므로, 평창지역 기온의 재배적합성을 확인하거나 적정 기후조건을 구명하기 위해서는 해당지역보다 더 서늘한 지역에서 추가적인 시험재배가 필요할 것이다.

유효성분 함량은 지하부만 정량분석 하였다. 지상부의 경우 B, C 구간의 고사율이 높아 적정 시료확보가 어려웠다. 분석결과, ligustilide와 butylidenphthalide 모두 B구간에서 높게 나왔다. 그러나 지상부와 지하부의 성분은 서로 상보성을 갖는 경우가 있어 온도에 따른 영향을 분명히 확인하기 위해서는 지상부 시료확보가 가능한 온도에서 추가적인 실험이 필요할 것으로 보인다.

표 37. 기온차이에 따른 일천궁 지하부 유효성분 함량 차이 (10월 수확후)

성분명	유효성분 함량(%)		
	A	B	C
Ligustilide	0.368	0.519	0.308
Buthylidenphthalide	0.003	0.058	0.048

* 정상재배(4.16~8.5) : A, B, C 구간 동일온도 재배

** 온도구배(8.5~10.18) : A(평창기온+0~2℃), B(평창기온+2~+4℃), C(평창기온+4~+6℃)

4. 정밀환경조절시설을 이용한 당귀의 생산 및 품질영향 평가

2015년 온도구배터널에서 수행한 당귀실험은 불규칙한 자연기온에 기반 한 실험으로 기후조건에 따른 작물 생산을 모의하는 데에는 장점이 있다. 그러나 당귀의 최적 생육기온을 확인하는 데에는 규칙성 있는 온도처리가 좀 더 명확한 결과를 얻을 수 있다. 이를 위해 광과 온도를 특정구간에 고정시켜 실험할 수 있는 정밀환경조절시설(walk in chamber)을 활용하여 당귀의 생산 및 품질에 최적인 온도조건과 일정한 온도가 올라갈 때마다 당귀의 생육에 미치는 영향을 조사하였다.

가. 재료 및 방법

(1) 실험재료 및 재배방법

본 연구는 2016년 3월 28일부터 6월 30일까지 약 3개월간 제주도의 국립원예특작과학원 온난화농업연구소에 설치된 정밀환경조절챔버(Walk-in-chamber)에서 수행 하였다. 실험에 사용된 참당귀(*Angelica gigas* N.) 모종은 주산지인 강원도 평창의 농가에서 공급받은 1년생 묘를 사용하였다. 이 중에서 생장이 균일한 모종을 선발하고 살균제로 뿌리부위를 분의 소독한 후 8개의 사각포트(0.8x1m)에 3월 28일 정식하였다. 재식거리는 포기사이 25cm, 줄사이 15cm로 엇갈린 상태로 포트당 4열로 총 18주씩 심었으며, 조사를 위해 일부 개체를 솎아낼 것을 감안하여 다

소 밀식하였다. 포트에 사용된 토양은 제주도 지역의 식양토를 사용 하였으며 별도의 시비는 하지 않았다. 관수방식은 점적호스를 이용하여 하루 1회씩 모든 처리구에 동일한 양을 관수하였고, 제초는 수시로 하였으며, 응에 발생에 대응해 관련 살비제를 주기적으로 살포하였다.

(2) 처리온도 설정

온도처리 방법은 다음과 같다. 먼저 챔버(4x5m) 내의 사각포트(0.8x1m)에 당귀묘를 정식한 후 일평균 기온을 15℃로 설정하고 3월 28일부터 4월 27일까지 약 1개월간 재배하였다. 4월 27일 경 15℃에 적응된 당귀를 다시 일평균 기온 15, 20, 25, 30℃로 설정된 4기의 챔버로 1기당 2개의 포트씩 할당하여 각각 이동시켰다. 이후 4월 27일부터 6월 30일까지 약 2개월간 재배하며 각각의 처리온도별로 자란 당귀의 생육 및 광합성 특성, 지표성분 함량 등을 비교 조사하였다. 온도 처리구별 주야간 온도차는 $\pm 3^{\circ}\text{C}$, 즉 평균 15℃의 경우 주간(12시간) 18℃, 야간(12시간) 12℃로 설정하였다. 본 실험은 봄의 동일한 기온에서 적응한 당귀가 5~6월경 각기 다른 온도에 처했을 때 상황을 가정하여 실험하였다. 온도설정은 참당귀의 주산지인 강원도 평창 진부면의 기상청 AWS(Automated Weather Station)에서 측정된 과거 9년치(2007년~2015년) 월 평균 온도자료를 참고하였다. 진부의 과거(9년 평균) 5월 월평균 기온은 14.7℃ 이었으며, 6월 월평균 기온은 18.8℃ 이었다.

(3) 챔버내 광량설정

실험에 사용된 정밀환경조절 챔버의 인공광원은 메탈할라이드 램프를 사용하였으며 광량은 당귀 잎 상단 높이를 기준으로 $600 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 설정하였다. 당귀의 초장에 맞추어 상하 이동이 가능한 광센서를 설치하고, 당귀의 성장에 맞추어 광센서를 이동시키며 광량이 자동으로 $600 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 조정될 수 있도록 하였다. 자연상태에서는 태양의 광량이 식물체의 높이와 관련 없이 일정하지만 챔버내의 인공광원은 식물체의 높이에 따라 광량이 크게 달라지기 때문에 이를 고려하여 식물체가 성장하더라도 자연상태의 광처럼 동일한 광량을 받을 수 있도록 광세기를 조절하였다. 또한 당귀의 광합성 포화광량은 최소한 $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이상으로 추정되나 자연상태에서 흐린날이나 구름이동 등에 따른 광량 감소를 감안하여 $600 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 정하였다.

(4) 광합성 측정

광합성 측정은 LI-6400 휴대용 광합성 측정기(LI-COR Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 처리구별 및 챔버의 설정온도는 처리온도(15, 20, 25, 30℃)의 주간온도(18, 23, 28, 33℃)에 맞추었고, CO_2 값은 400ppm, flow 값은 500으로 설정하였고, 상대습도는 약 $50 \pm 10\%$ 로 유지하였다. light curve 측정을 위한 광합성 측정기의 잎 챔버 내 인공광량은 0, 0, 25, 50, 100, 200, 400, 700, 1000, 1300, $1600 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 설정하여 각 광량에 따른 광합성 속도를 측정하였다. 측정엽은 주로 당귀 상층부의 성엽을 대상으로 하였다.

(5) 일반성분 및 무기질 분석

일반성분은 AOA법(1990)에 준하여 분석하였다. 총질소는 Kjeldahl 분해법으로 단백질 추출장치(2300 Kjeltac Analyzer Unit, Foss Tecator AB, Hoganas, Sweden)를 이용하였다. 무기질 함량분

석은 식품공전(Ministry of Food and Drug Safety 2012b)에 따라 수행하였다. 당귀 시료에 질산과 과산화수소를 가한후, 마이크로웨이브 분해장치(Multiwave Eco, Anton Paar, les Ulis, France)로 시료를 분해한후 50ml이 되게 정용하여 무기질 분석 시료로 사용하였다. Na, NH₄, K, Mg, Ca, Cl, SO₄, NO₃, PO₄ 등 무기성분은 유도결합플라즈마발광분석기(ICP-OES, Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, JY 138 Ultrac, Jobin Yuon, France)로 분석하였다.

(6) 유효성분 분석

6.30일 온도처리 구간(일평균 15, 20, 25, 30도)별로 뿌리부분을 채취하여 당귀의 지표성분인 Decursin 및 Decursinol angelate와 Nodakenin을 정량분석 하였으며 전처리 과정은 다음과 같다. 샘플링 한 당귀 뿌리 시료를 가볍게 수세하여 흙 등의 이물질을 제거한 후 음지에서 1일정도 물기를 말렸다. 그리고 약 1주일정도 동결건조처리한 후 잘게 분쇄하여 균일하게 섞은 후 EtOH용액 50ml을 넣고 60분간 초음파 추출하여 0.2um 필터에 여과하여 실험하였다. 분석에 사용된 표준품은 (주)코아사이언스에서 구입하였고 분석조건은 표 38과 같았다.

표 38. 당귀의 지표성분 정량분석을 위한 조건

System	Dionex UHPLC3000/DAD system					
Column	Phenomenex, Kinetex 2.6um F5 100A(100*2.1mm)					
Mobile phase	A: 0.1% Formic acid/ DW					
	B: 0.1% Formic acid/ Acetonitrile					
Gradient	Time(min)	0-2	2-13	13-15	15-15.5	15.5-20
	%B	5	5-100	100	100-5	5
Flow rate	0.3 mL/min					
Injection	5 µL					
Column Temp.	40℃					
Detection	UV_340nm (Decursin & Decursinol angelate, nodakenin)					

나. 연구결과

(1) 온도처리에 따른 당귀의 생육 특성

각각의 처리구별로 15, 20, 25, 30℃ 온도처리후 당귀의 생육은 그림 13에서 보는 바와 같았다. 15~20℃ 구간은 뚜렷한 차이가 없었으나 25℃와 30℃ 처리구에서는 초기부터 생육부진이 뚜렷하였고 30℃ 처리구의 경우 6주차에서 거의 고사하여 토양표면이 드러났다.

온도처리에 따른 당귀의 생육 특성은 표 39와 같다. 처리전 15℃에서 약 1개월간 재배한 당귀의 초장은 평균 22.5~24.6cm 이었으며, 주당 소엽수는 8.7~11.7개였다. 처리후 2~4주까지의 당귀 생육은 평균온도 20℃ 구간에서 41.5cm, 56.7cm로 다른 온도구간의 당귀에 비해 가장 왕성하였다. 그러나 6주째부터는 15℃ 처리구의 당귀가 20℃ 처리구 당귀보다 약 6cm정도 더 커서 역전되었다. 소엽수는 고사가 발생하여 다소 줄어든 30℃ 처리구를 제외하고는 6주후 대부분 전개하여 큰 차이를 보이지 않았다.



그림 13. 기온차이에 따른 당귀 생육특성 (3~6주차)

표 39. 일평균 온도 차이에 따른 당귀 생육특성 조사

평균 온도 (°C)	처리전		평균 온도 (°C)	처리후					
				2주후		4주후		6주후	
	초장 (Cm)	소엽수 (개/주)		초장 (Cm)	소엽수 (개/주)	초장 (Cm)	소엽수 (개/주)	초장 (Cm)	소엽수 (개/주)
15	24.6	11.7	15	35.1	12.4	54.1	11.4	70.0	11.6
15	23.9	9.7	20	41.5	11.0	56.7	10.6	63.7	12.0
15	22.3	8.7	25	34.3	9.6	46.9	9.9	50.6	11.4
15	22.5	12.0	30	32.9	8.3	35.4	10.6	32.8	10.2

* 평균온도의 주야간 차이는 $\pm 3^{\circ}\text{C}$. 예) 일평균 $15^{\circ}\text{C} = 18^{\circ}\text{C}(\text{주간}) + 12^{\circ}\text{C}(\text{야간})/2$

광합성은 그림 14에서 보는 바와 같이 4주차 15°C 구간에서 가장 높았으나 6주, 8주차 측정에서 20°C 구간이 더 높게 나타났다. 25°C 구간은 광합성도 낮고 호흡량은 높게 나타났다. 처음 처리 직후의 광합성 속도는 온도가 비교적 높은 평균 25°C 구간의 광합성 속도가 가장 컸으나 이후 25°C 이상의 고온구간에서 광합성은 저조하였다. 평균 30°C 구간은 실험기간 내내 광합성 속도가 전 광도($0 \sim 1600 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)에 걸쳐 5미만으로 매우 낮았으며 시간이 지날수록 지속적으로 더 낮아졌다. 본 실험에서 조사한 광도는 하루 12시간씩 약 $600 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이었는데, 평균 $30^{\circ}\text{C}(\text{주간 } 33^{\circ}\text{C})$ 처리구 당귀의 경우 $400 \sim 500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 광도에서 광포화점이

형성되었고

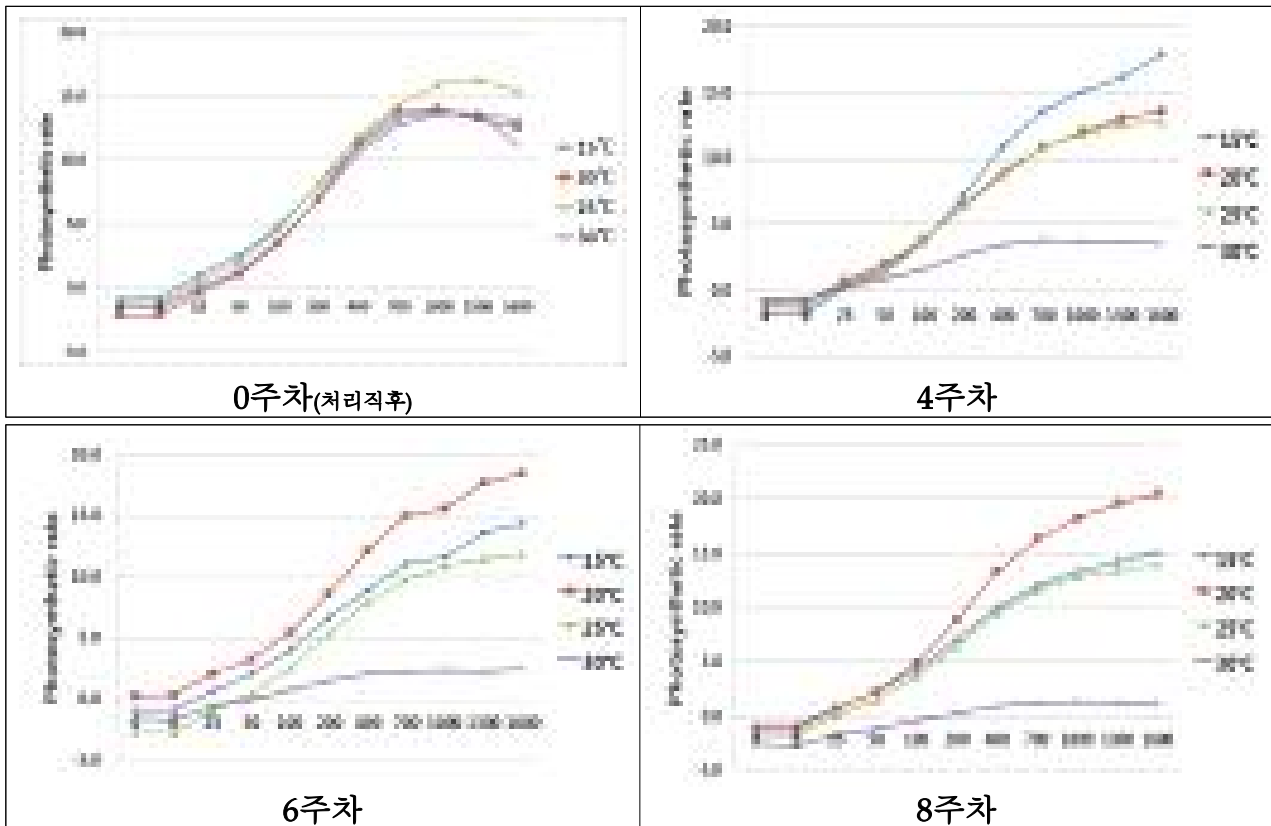


그림 14. 기온차이에 따른 당귀 광합성량 조사

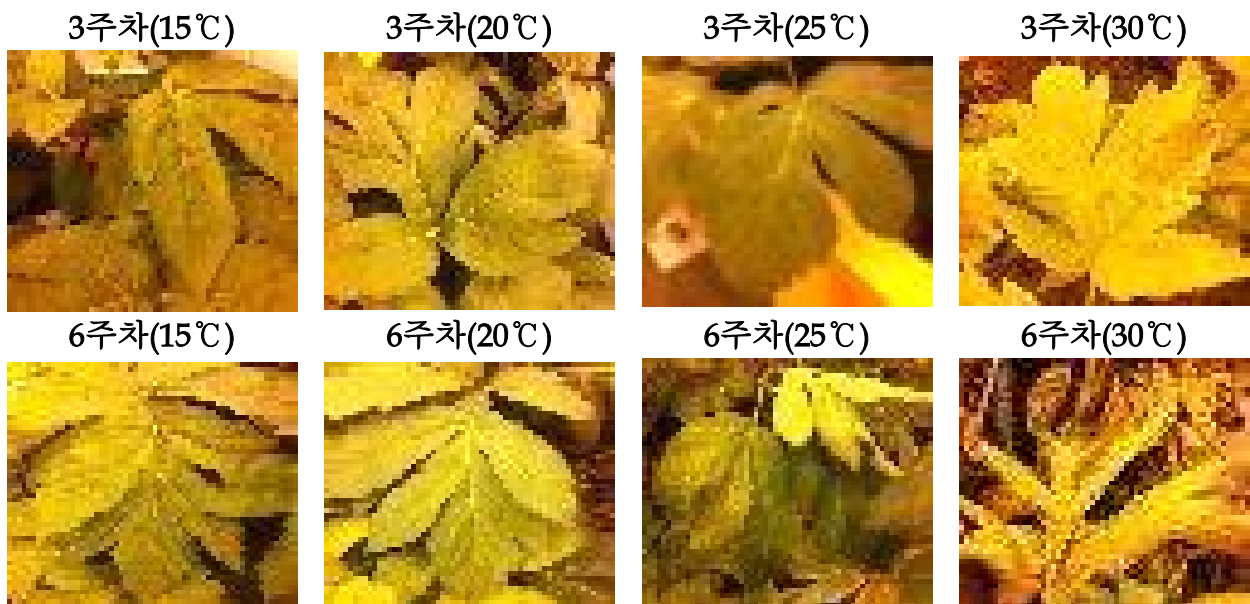


그림 15. 평균기온 차이에 따른 당귀엽 특성 (3~6주차)

그 외 처리구에서는 최소한 $1300 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 또는 $1600 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 광도 이상인 것으로 나타나 산간 고랭지 작물이긴 하나 높은 광 조건에서 오히려 잘 자라는 식물로 판단된다.

본 실험결과, 광합성만 놓고 볼 때 당귀의 최적 생육조건이 평균 15℃ 구간인지 아니면 평균 20℃ 구간인지 명확히 해석 되지 않으나 평균 20℃ 이상의 구간에서부터는 광합성 외에도 다른 문제점들이 발생하여 생육을 저해하는 것으로 추정된다. 가령, 당귀의 수세는 15~20℃ 구간이 가장 왕성하였으나 평균 15℃ 처리구 당귀가 평균 20℃ 처리구 당귀에 비해 엽색이 진하고 줄기 등이 단단한 느낌이 있었고, 병해충 발병도 전혀 없었다. 20℃ 구간의 당귀 잎도 그림 15에서 보는 바와 같이 15℃ 구간의 당귀 잎과 마찬가지로 외형상의 손상은 거의 없었다. 그러나 20℃ 구간에서는 시간이 지날수록 약간의 기형엽이 발생하였다. 25℃ 처리구 당귀의 경우 3주차에 잎에 손상이 일어나 부분적으로 점모양의 탈색이 생기거나 잎 가장자리가 탈색되기 시작하였다. 6주차에는 엽병에 힘이 없어 잎이 뒤집히거나 하는 등 뚜렷한 생육장해가 나타났다. 30℃ 처리구 당귀의 경우 3주차에도 잎이 말리고 타들어가는 증상에 뚜렷이 나타나고 6주차의 경우 상당수의 잎이 고사하였다.

고온에 의한 생육장해 현상은 대체로 일평균 기온 25℃ 이상 처리구에서 몇 가지 공통적인 유형으로 나타났는데, 그림 16에서 보는 바와 같이 기형엽 발생, 줄기강도 약화, 도복, 탈색, 뿌리썩음 등이었다. 온도가 높아질수록 그리고 시간이 지날수록 더 심하였다.

온도차이에 따른 당귀의 또 다른 차이점은 줄기발달이 다르다는 점이다. 저온 구간일수록 줄기에 비늘모양의 날개가 발달하였는데, 평균 15℃ 구간에서는 대부분의 줄기에서 뚜렷한 날개발달이 있었다. 평균 20℃ 구간에서는 날개가 발달한 줄기가 일부 있었으나 평균 25℃~30℃ 구간



그림 16. 25℃ 이상 고온조건에서 나타나는 당귀 고온장해

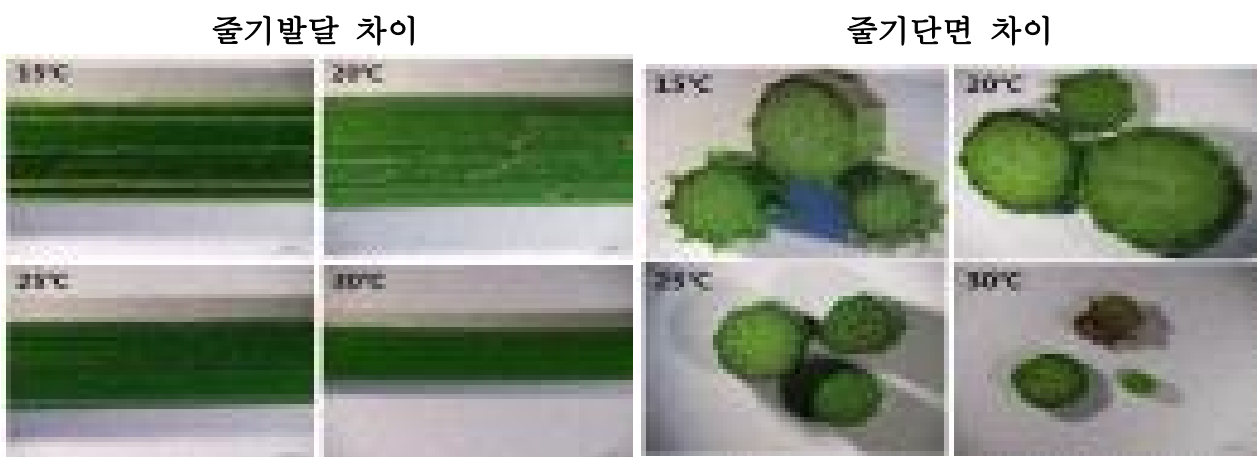


그림 17. 온도구간별 10주차 줄기발달 차이(저온구간에서 날개 발달)

온도별 생육차이(8주차)



뿌리단면 차이(10주차)

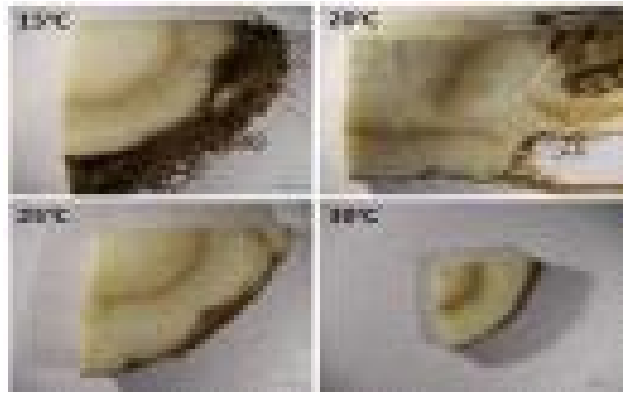


그림 18. 온도구간별 지상부 및 지하부 생육차이

에서는 날개 발달이 거의 없었다. 특히 평균 30°C 구간에서 처리전 15°C에 있었을 때의 날개 발달 부분이 그대로 시들어 말라붙은 흔적이 일부 줄기에서 발견되었으므로, 온도가 올라가게 되면 이미 발달해 있거나 발달중인 날개가 다시 퇴화하는 것으로 생각된다. 저온환경에서 발달한 줄기의 날개가 당귀 생육에 어떤 역할을 하는지에 관해서는 좀 더 연구가 필요할 것으로 보인다.(그림 17)

당귀의 뿌리 형태는 그림 18과 같이 저온환경에서는 잔뿌리가 잘 발달하였고, 25°C 이상의 고온환경에서는 잔뿌리의 발달도 약간 덜한 편이다. 현재까지의 실험결과들을 종합적으로 고려해 볼 때 당귀의 최적 생육 온도조건은 평균기온 20°C 보다는 평균 15°C가 조금 더 적합한 것으로 생각되나 좀 더 정확한 판단을 위해서는 15°C 이하의 더 낮은 온도구간을 포함하여 추가적인 실험과 연구가 필요할 것으로 생각된다.

(2) 온도처리에 따른 당귀의 품질 특성

(가) 무기성분과 총질소 함량

무기성분 분석결과는 그림 19와 같이 평균 30°C 구간 당귀의 K함량은 지상부와 지하부 모두에서 크게 부족한 것으로 나타났다. 박 등(2006)³⁾은 식물체에서 K이 광합성, 탄수화물 및 단백질 형성, 세포 내의 수분공급 등의 기능에 관여하며, 부족하면 생장점이 말라죽고, 줄기가 연약

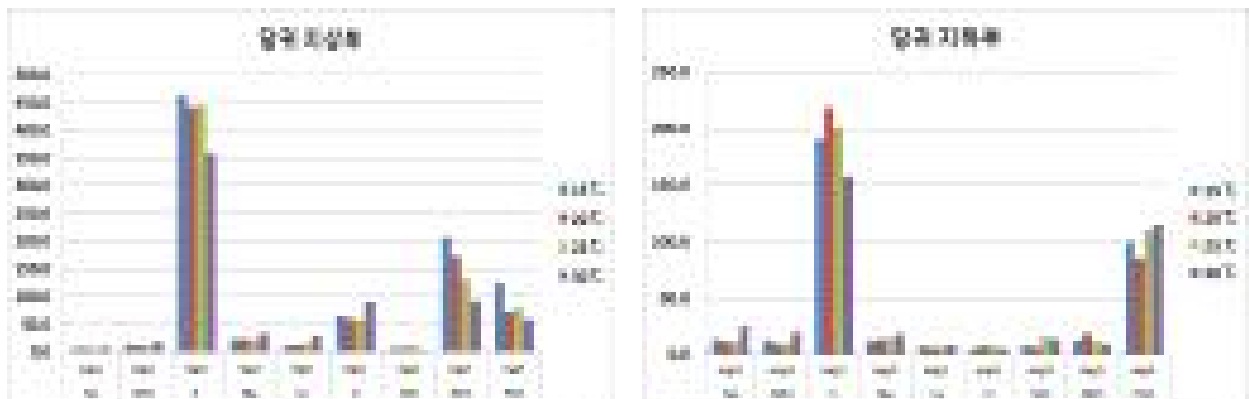


그림 19. 온도차이에 따른 당귀 지상부 및 지하부 무기성분 비교

3) 삼고재배학 원론, 박순직 등, 2006, 향문사

해지며, 잎의 끝이나 들레가 황화한다고 하였다. 본 실험결과도 평균 30℃ 구간의 당귀에서 나타난 생육장애와 유사한 점들이 있었다. 당귀 지상부에서 K, NO₃, PO₄ 등은 대체로 평균 온도가 높을수록 낮게 나타났으며, 지하부의 경우 평균 30℃ 구간에서 PO₄가 오히려 높게 나타났다. 평균 30℃ 구간의 당귀에서 높게 나타난 성분들은 Na, NH₄, Mg, Ca 등이었으며, Cl의 경우 지상부에서는 높게 나타났으나 지하부에서는 낮았다.

당귀의 총질소 함량은 그림 20과 같았으며, 지상부의 경우 평균 15~25℃ 구간은 2.9~3.0%로 비슷하였고 30℃에서는 2.6%로 낮게 나타났다. 지상부와는 반대로 지하부의 경우 평균 20℃ 구간부터는 온도가 높아질수록 높게 나타났다. Arnold J. Blom 등(2013)⁴은 질소는 식물에서 가장 많이 필요로 하는 무기원소로 아미노산, 단백질, 핵산을 포함하는 많은 세포성분을 구성하며, 질소 결핍은 식물 생장을 빠르게 저해한다고 하였다. 특히 대부분의 식물들은 기부에 가까운 오래된 잎부터 황화현상을 나타낸다고 하여 본 실험결과 고온구간에서 나타난 당귀 지상부의 특징과 유사하였다. 한편 본 실험 당귀 뿌리부분 총질소 함량(1.8~2.8%)에 질소계수(6.25)를 곱한 조단백질 함량은 11.3~17.5%로, 황 등(1997)⁵이 조사한 한약재 당귀의 단백질 함량 16.1%와 비교해 다소 낮거나 유사하였다. 저온구간의 뿌리에서 조단백질 함량이 낮았지만 지상부의 경우 반대로 높게 나타나 저온구간의 생리 활동이 활발했을 것으로 추정된다.

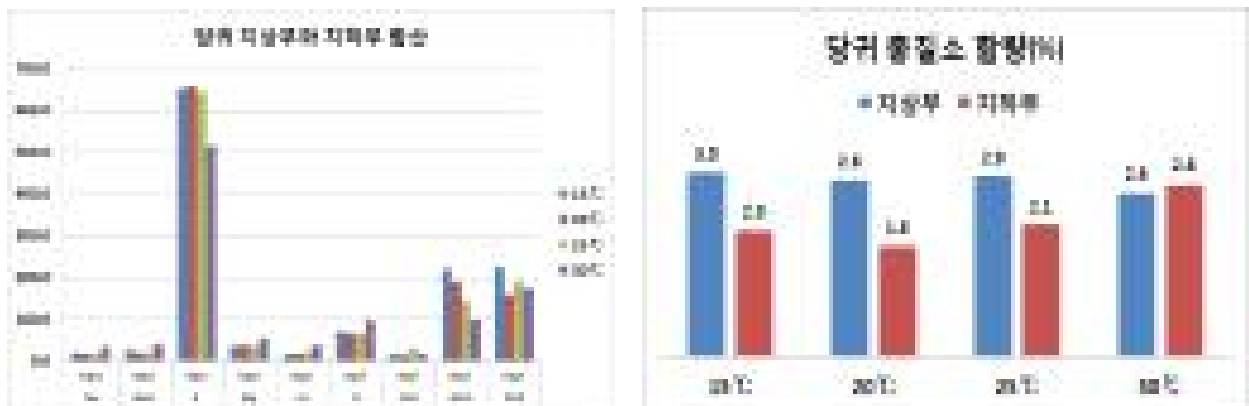


그림 20. 온도차이에 따른 당귀 무기성분(지상+지하부) 및 총질소 함량

(나) 지표성분 함량

당귀의 지표성분 함량은 표 40과 같이 지상부의 decursin 및 decursinolangelate 함량은 저온일수록 증가하였고 nodakenin 함량은 처리온도가 올라갈수록 증가하였으나 평균 25℃ 처리구에서 최고치를 보이고 평균 30℃ 처리구에서는 급격히 감소하였다. 지하부의 decursin 및 decursinolangelate의 함량은 온도가 올라갈수록 증가하였으나 평균 30℃ 처리구에서 급격히 감소하였으며, 반대로 지하부의 nodakenin 함량은 온도가 올라갈수록 감소하였다. 지상부와 지하부 그리고 온도에 따른 decursin 및 decursinolangelate 함량과 nodakenin 함량은 서로 반대로 축적되는 경향이 있다. 동일한 성분의 경우 지상부 함량이 높으면 지하부 함량이 낮고, 지하부 함량이 높으면 지상부 함량이 낮아 서로 상보적인 관계를 형성하였다. 그러나 평균 30℃ 처리구에서는 모든 부위에서 성분의 종류에 관계없이 함량이 크게 떨어져 이러한 관계가

4) 식물생리학 5판, 라이프사이언스, Lincoln Taiz 등, 전방욱 등 옮김, 2013, P109.

5) 약초중의 일반성분 및 무기질 함량조사, 황진봉, 양미옥, 신현경, 한국식품과학회지, 29(4), 1997, 671-679

형성되지 않았다. 지상부와 지하부를 합산한 decursin 및 decursinolangelate 함량은 온도가 올라갈수록 완만하게 높아지는 경향이 있었으며 평균 25℃ 처리구에서 최고치를 나타내고 평균 30℃ 처리구에서 급격히 감소하였으며 nodakenin 함량의 지상부 및 지하부 합산 수치는 온도에 따른 차이가 거의 없었으나 평균 30℃ 처리구에서 급격히 감소하였다. 지상부와 지하부의 유효성분 함량은 각각 처리온도의 영향을 크게 받았으나 식물체 전체 합산 함량은 지상부와 지하부간의 상보성을 가지므로 온도에 따른 변화가 거의 없거나 25℃ 처리구까지 온도가 올라갈수록 완만한 상승세를 보였다. 단 30℃ 처리구에서는 부위에 관계없이 모든 성분 함량이 급격히 감소하였는데, 이는 극심한 고온스트레스로 인하여 식물체의 이차대사산물 합성능력이 크게 떨어진 것이 원인으로 추정된다.

당귀의 이용부위인 뿌리(지하부)의 경우 지표성분의 대부분을 차지하는 decursin 및 decursinolangelate 함량이 25℃ 처리구까지는 온도가 올라갈수록 소폭 증가하는 경향이 있어 약리성분 축적에 있어서는 다소 고온조건이 유리한 것으로 평가된다. 이것은 식물체 전체의 약리성분 생산량이나 뿌리부분의 약리성분 집적도가 고온조건에서 유리함을 뜻하기는 하나 재배온도에 따른 건물중의 증가속도 차이를 고려해 본다면 오히려 저온구간에서 더 활발하게 동화산물과 약리성분이 합성되는 것으로 생각해 볼 수 있다. 따라서 약리성분의 축적속도가 저온구간에서의 빠른 건물중 증가속도를 따라가지 못하여 상대적으로 저온구간에서 단위 중량당 약리성분 함량이 낮게 나타나는 것으로 생각된다. 종합적으로 볼 때 저온구간에서 자란 당귀도 대한약전의 지표성분(decursin 및 decursinolangelate, nodakenin) 합산 충족치인 6%를 충분히 넘어서므로, 지표성분함량 증진을 위해 고온조건에 재배하기 보다는 생산량 및 외관 상품성 향상을 목표로 저온조건에서 재배하는 것이 더 바람직 할 것으로 판단된다.

표 40. 온도차이에 따른 당귀의 지표성분 차이

부위	함량	일평균 온도에 따른 당귀 지표성분 함량(%)			
		15℃	20℃	25℃	30℃
지상부	nodakenin	0.082	0.088	0.108	0.002
	decursin & decursinolangelate	4.51	4.10	3.89	3.34
지하부	nodakenin	0.302	0.292	0.281	0.003
	decursin & decursinolangelate	7.38	8.22	9.38	3.54
전체	nodakenin	0.384	0.380	0.389	0.005
	decursin & decursinolangelate	11.89	12.32	13.27	6.88

5. 요약 및 결론

본 연구는 기후변화 시나리오에 따른 천궁, 당귀의 생산영향 평가를 목적으로 수행되었으며, 기후영향을 평가하기 위하여 4종류의 시험을 진행하였다. 첫 번째는 제주도 해발고도의 기온차를 이용하여 천궁의 생산 및 품질 영향평가를 2년간 진행하였다. 1년차 시험에서는 제주도 해발고도(200~700m)의 기후조건은 주산지인 봉화 등에 비해 낮거나 비슷하였으나 생육 상태는 오히려 부진하였으며 고도가 낮아 기온이 높은 곳일수록 고온에 의한 생육불량이 심

하였다. 2년차에서는 제주지역의 기온이 예년기온을 회복하여 크게 올라 대부분 고사하였고 시험지 전체의 온도도 생육에 부적합하였다. 2년간의 시험결과, 천궁은 생리적 내성범위가 매우 작은 협온성 작물로 현재 주산지의 기후조건도 천궁 생육에는 안정성이 떨어진다는 점, 그리고 해에 따른 기온변화에도 적합한 재배지가 바뀔 수 있다는 점이 확인되었다.

두 번째로 멀칭이나 관수에 의한 천궁, 생산영향 평가를 수행하였다. 멀칭의 유무, 비닐색상, 물관리 수준 등은 천궁과 같은 기후 민감 작물에 미치는 영향이 크므로 기후변화에 따른 생산영향을 평가하거나 예측하는데 있어서 중요한 변수가 될 수 있다. 시험결과 관행적으로 사용하는 검정색 비닐 멀칭은 특히 고온기에 복사열을 많이 방출하여 천궁과 같이 초장이 작고 뿌리가 천근성이 작물에 치명적일 수 있음이 밝혀졌다. 관수는 이러한 문제점을 부분적으로 완화하는데 도움이 된다. 따라서 재배적인 방법을 어떻게 적용하느냐에 따라 미래 기후변화시 예상되는 재배 가능면적도 증가하거나 감소할 수 있다.

세 번째로 온도구배터널을 이용한 천궁, 당귀 생산 및 품질 영향평가를 수행하였다. 평창 기온을 기준으로 약 $+0^{\circ}\text{C} \sim +5, 6^{\circ}\text{C}$ 상승시켜 가면서 당귀와 천궁 생산 영향을 조사하였다. 조사결과 당귀의 경우 2015년 평창군 진부면(해발 약 500m)의 기온을 기준으로 연평균 기온이 약 $3 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 상승시 84.7%, 약 $4 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 상승시 94.5%의 수량이 감소할 수 있는 것으로 평가되었다. 천궁의 경우 고사율이 너무 높아 정상적인 평가가 어려웠다.

네 번째로 정밀환경조절시설(walk in chamber)를 이용하여 광조건 $600 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 일평균 온도를 15, 20, 25, 30°C 로 설정하고 당귀의 최적 생육 온도조건과 일정한 온도가 올라갈 때마다 생육에 미치는 영향을 조사하였다. 시험결과, 일평균 15°C 구간이 광합성, 생육발달 등에 적정하였으며 병해충이나 생육장해도 전혀 없었다. 일평균 20°C 의 경우 15°C 구간보다 초기에는 생육발달이 빨랐으나 중·장기적으로 역전되었다. 일평균 25°C 이상에서 기형립 발생, 줄기도복, 잎의 탈색, 뿌리 썩음 등의 현상이 있었으며 30°C 이상에서는 생육이 거의 불가능 하였다. 지표성분은 평균온도가 높을수록 우수하였으나 전구간이 대한약전의 목표치 6%를 상회하여 지표성분을 더 높이기 위하여 고온 환경에서 재배하기 보다는 저온환경에서 생산성 향상을 목표로 재배하는 것이 더 유리할 것으로 판단된다. 본 연구에서 천궁, 당귀의 예상적온을 다소 높게 잡아 실험조건에 반영한 점, 온도구배터널이 평창지역에 한정되어 온도를 더 낮출 수 없었던 점, 기계들을 이용한 정밀연구 수행으로 인해 실험 개체수와 처리수가 많지 못했던 점들이 한계로 생각되며, 보다 정밀한 천궁, 당귀의 기후영향 평가 및 예측을 위해서는 향후 더 낮은 온도조건에서 반복적인 실험을 통한 보완작업이 필요할 것이다.

제6절. 전자기후도를 활용한 RCP시나리오 적용 주요 과수작물, 인삼, 약용작물 재배의 미래 잠재적 재배적지 시·공간 분석

1. 이론적 접근 방법

작물을 생산하는데 있어서 재배기술, 품종, 토양환경, 기후환경, 지리적 특징, 지자체별 농업 정책 등 다양한 요소들이 영향을 준다. 특히, 기후는 작물의 재배지를 선정하는데 매우 중요하다. 본 연구에서는 과거 주요 주산지의 기후적 특징과 작목 전문가의 의견을 바탕으로 작물별 재배적지, 재배가능지, 저위생산지를 구분할 수 있는 기준을 마련하였다. 이런 기준을 바탕으로 농업용 고해상도 월별 기후 전자지도도를 활용하여 작물별 미래 재배지 변동 지도를 제작하였다. 생육기 평균기온, 발아기 평균기온, 착색기 평균기온, 연평균기온, 극최저기온 등의 요소별로 GIS 분석 방법을 통해 추출하고, GIS 지도의 중첩 분석을 통해 최종 재배지 변동 지도를 제작하였다.



그림 216. 연구 대상 작물의 재배지 전자지도 제작 과정

2. 연구수행 내용

가. 대상 작물의 재배지 판단 기준

본 연구의 대상 작물인 사과, 배, 복숭아, 포도, 단감, 감귤, 인삼, 당귀, 천궁의 재배지 판단 기준은 국립원예특작과학원 과수과, 사과시험장, 배시험장, 인삼특작부, 약용작물과, 온난화대응농업연구소 등 대상 작물 전문가와 협의를 통하여 재배적지 기준이 작성되었다. 작물의 재배지 변동을 구명하기 위한 기후조건은 농촌진흥청에서 활용되고 있는 표준 재배 참고문헌을 참고하였다.

표 2 대상 작목별 우리나라 전문가

대상 작물	소 속	이 름
사과	농촌진흥청 국립원예특작과학원 과수과	한점화
	농촌진흥청 국립원예특작과학원 사과시험장	권현중
	농촌진흥청 국립원예특작과학원 과수과	한현희
배	농촌진흥청 국립원예특작과학원 배시험장	김성중
	농촌진흥청 국립원예특작과학원 배시험장	임순희
	농촌진흥청 국립원예특작과학원 과수과	한현희
복숭아	농촌진흥청 국립원예특작과학원 과수과	윤석규
	농촌진흥청 국립원예특작과학원 과수과	전지혜
	농촌진흥청 국립원예특작과학원 과수과	한현희
포도	농촌진흥청 국립원예특작과학원 과수과	고상욱
	농촌진흥청 국립원예특작과학원 온난화대응농업 연구소	손인창
	농촌진흥청 국립원예특작과학원 배시험장	조광식
감(단감)	농촌진흥청 국립원예특작과학원 배시험장	마경복
	농촌진흥청 국립원예특작과학원 온난화대응농업 연구소	손인창
감귤 (조생온주밀감, 한라봉 부지화)	농촌진흥청 국립원예특작과학원 감귤시험장	문영일
	농촌진흥청 국립원예특작과학원 감귤시험장	강석범
	농촌진흥청 국립원예특작과학원 인삼과	이성우
인삼	농촌진흥청 국립원예특작과학원 인삼과	감장욱
	농촌진흥청 국립원예특작과학원 약용작물과	김용일



그림 217. 작목별 재배지 판단 기준설정을 위한 1차 전문가 협의회 사진(2014년 07년 24일)



국립원예특작과학원 온난화대응농업연구센터



주신 주신치 캠프
(결과)

제목 : 과수·인삼·약용작물 재배지 예측지도 검토 협의회 개최

* 국립원예특작과학원 국립연구과제인 『기후변화 시나리오를 적용한 주요 과수, 인삼, 약용작물의 생산일할량과 일 생물학적 반응연구』의 수행을 도출된 『과수 및 인삼의 이례 재배지 전통 예측 평가(안)』에 대한 전문가 검토 협의회를 이튿날 열어 개최합니다.

— 이 과 —

▷ 대상 작목 : 사과, 배, 감귤, 복숭아, 토도, 귤, 인삼, 약용작물

▷ 일 시 : 2014. 10. 13(월) 14:00~17:00

▷ 장 소 : 국립원예특작과학원 3층 소회의실

그림 218. 1차 협의회 내용을 바탕으로 보완된 재배지 전자지도 최종 검토를 위한 2차 협의회(2014년 10월 13일)

표 3. 재배지 전자지도 작성을 위한 연구 대상 작물의 재배지 판단 조건

작물	기후요소	적지	가능지	저위생산지
사과	생육기 평균기온	14.5 ~ 18.5	13.5 ~ 14.5, 18.5 ~ 19.5	< 13.5, 19.5 <
	연평균기온	7.5 ~ 11.5	6.5 ~ 7.5, 11.5 ~ 12.5	< 6.5, 12.5 <
	성숙기 평균기온	10.0 ~ 20.0	-	< 10, 20.0 <
	극최저기온	-30	-32	-35
배	생육기 평균기온	18.5 ~ 21.5	17.0 ~ 18.5, 21.5 ~ 23.0	< 17.0, 23.0 <
	연평균기온	11.5 ~ 15.5	10.0 ~ 11.5, 15.5 ~ 17.0	< 10.0, 17.0 <
	탈아기 평균기온	10.5 ~ 13.5	8.5 ~ 10.5, 13.5 ~ 15.5	< 8.5, 15.5 <
	극최저기온	-25<	-30.0~ -25.0	<-30
복숭아	생육기 평균기온	18.0 ~ 23.0	16.0 ~ 18.0	< 16.0, 23.0 <
	연평균기온	11.5 ~ 15.5	10.5 ~ 11.5, 15.5 ~ 16.5	< 10.5, 16.5 <
	극최저기온	-20<	-23 ~ -25	< -25
포도	연평균기온	11.0 ~ 15.0	9.0 ~ 11.0, 15.0 ~ 17.0	< 9.0, 17.0 <
	생육기 평균기온 (4~10월)	18.0 ~ 22.0	16.0 ~ 18.0, 22.0 ~ 24.0	< 16.0, 24.0 <
	성숙기 평균기온 (8월)	< 26.0	-	30.0 <
	극최저기온	-	-18.0~-25.0	< -25.0
조생온주 밀감	연평균기온	15.0 ~ 18.0	14.0 ~ 20.0	-
	극최저기온	-7.0이상	-9.0 ~ -7.0	-

한라봉부 지화	연평균기온	16.5이상	15.0 이상	-
	극최저기온	-6.0이상	-8.0 ~ -6.0	-
단감	연평균기온	13.0 이상	12.0 ~ 12.9	12.0 이하
	생육기 평균기온	20.0 ~ 25.0	18.0 ~ 20.0	18.0 이하
	9월 평균기온	22.0 이상	20.0 ~ 22.0	20 이하
	10월 평균기온	15.0 이상	13.0 ~ 15.0	13.0 이하
	온량지수	105 이상	100 ~ 105	100 이하
	극최저기온	-14.0이상	-15 ~ -14	-15.0 이하
인삼	연평균기온	-	0.9 ~ 13.8	< 0.9, 13.8 <
	발아/출아 평균기온(4월)	7.0 ~ 15.0	-	< 0.5
	전엽/개화기 평균기온(5월)	10.0 ~20.0	-	< 5.0
	결실기평균기온 (6 ~ 7월)	21.0 ~ 25.0	5.0 ~ 21.0	< 5.0
	고온피해 평균기온(8월)	-	-	28.0 <
당귀	연평균기온	6.0 ~ 10.0	10.0 ~ 13.0	-
	생육기 평균기온 (4 ~ 10월)	13.5 ~ 16.5	-	-
	7 ~ 8월 평균기온	19.0 ~ 23.0	13.4 ~ 19.0, 23.0 ~ 25.0	-
천궁	연평균기온	9.0 ~ 10.0	8.1 ~ 9.0, 10.0 ~ 14.0	8.1 미만, 14.0 이상
	생육기 평균기온 (4~10월)	15.0 ~ 17.0	14.0 ~ 15.0, 17.0 ~ 20.0	14.0 미만 20.0 이상
	7 ~ 8월 최고기온	-	-	30.0 이상

당귀와 천궁은 재배에 관련된 기초 연구 자료가 미비하고 국외에서도 연구된 사례가 많
이 않기 때문에 우리나라 주요 채집지와 주산지 지점의 과거 10년 동안의 기후를 분석하
였다. 기후요소는 연평균기온, 생육기 평균기온, 여름철(7~8월) 평균기온을 추출하였다. 추
출된 자료를 국내 작물 전문가와 협의를 통해 재배지 판단 조건을 설정하였다.

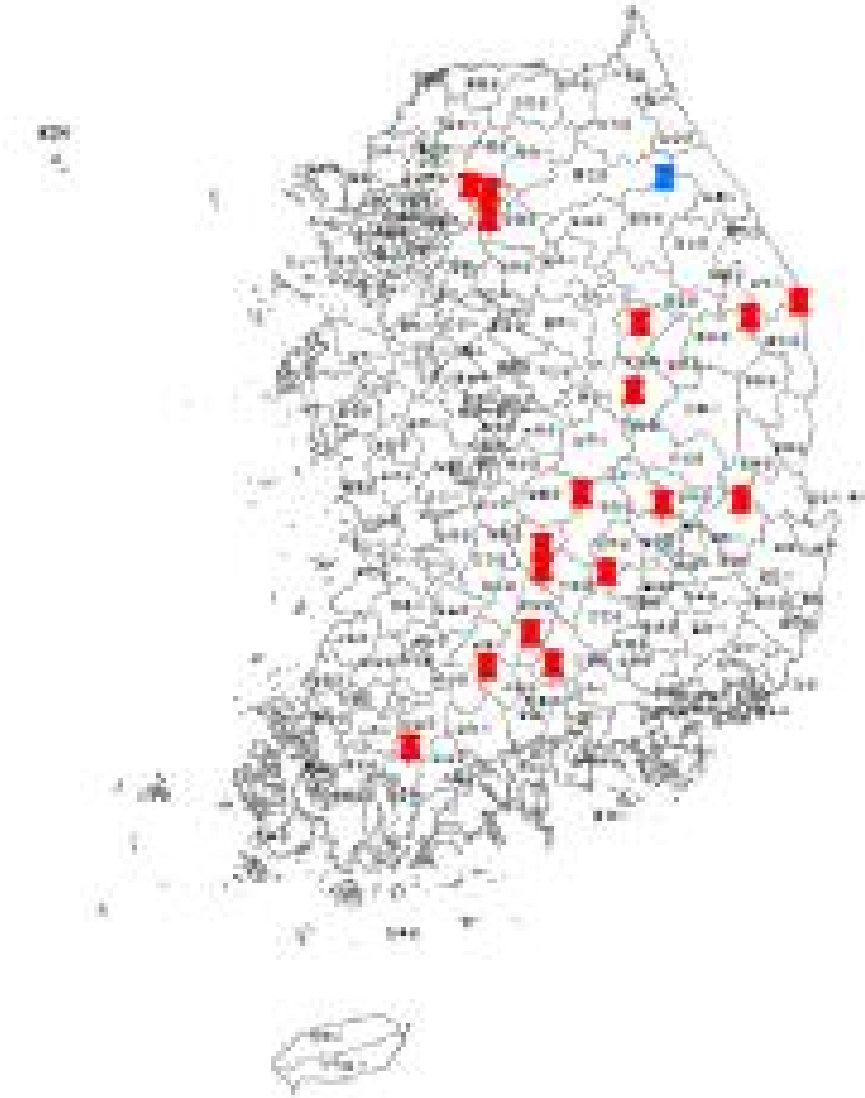


그림 219. 당귀 재배 주산지(파란색) 및 채집지(붉은색) 기후자료 분석 지점(자료출처 : 국가생물종지식정보시스템)

참당귀는 저위생산지 조건에 대한 정보가 부족하기 때문에 적지와 가능지 기준 이외의 지역을 저위생산지로 구분하였다. 조건 설정은 주산지와 채집지의 평년기후자료를 바탕으로 주산지의 기후는 적지, 채집지의 기후는 가능지로 기준을 설정하였다.

표 4. 참당귀의 주산지 및 채집지의 기후분석을 통한 재배지 판단 기준 설정

참당귀 주산지			
주소	연평균기온	4~10월 평균기온	7~8월 평균기온
강원 평창군 진부면 탑동리	6.5	13.7	19.5
충북 제천시 송악면 시곡리 1209	8.9	16.4	22.4
경북 울진군 서면 광희리	9.5	15.9	21.1
참당귀 채집지			
경북 문경시 산북면 흑송리	11.4	18.4	24.3
경북 칠곡군 가산면 송학리	11.1	18.1	24.0
경북 영천시 자양면 용화리	10.6	17.4	23.4
경북 김천시 대항면 북전리	11.9	18.8	24.5
경북 봉화군 석포면 승부리	8.9	15.7	21.3
경북 울진군 북면 덕천리	12.4	18.1	13.4
경남 산청군 삼장면 대하리	11.3	17.9	24.0
경남 거창군 북상면 창선리	10.1	16.8	22.6
경남 함양군 마천면 구양리	10.9	17.4	22.9
경남 합천군 야로면 나대리	11.4	18.1	23.8
전남 구례군 광의면 구만리	10.9	17.8	24.3
전남 화순군 청풍면 차리	12.5	19.0	24.8
전북 무주군 설천면 삼공리	9.6	16.3	21.5
경기도 가평군 설악면 이천리	10.2	17.8	23.7
경기도 남양주시 수동면 송천리	10.8	18.4	24.3
경기도 양평군 옥천면 아신리	11.2	18.8	24.8
충북 단양군 단양읍 고수리	10.0	17.4	23.4
최고값	12.5	19.0	24.8
최저값	8.9	15.7	13.4

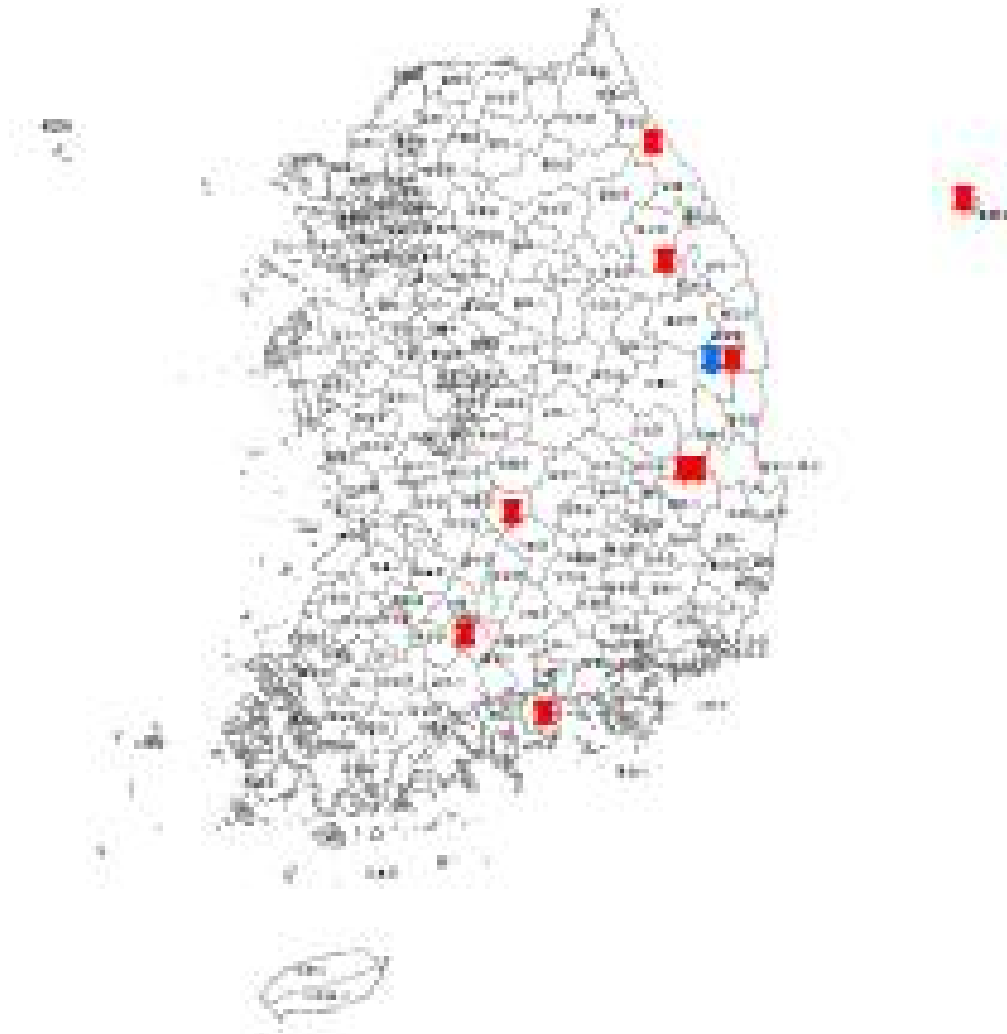


그림 220. 천궁 채배 주산지(파란색) 및 채집지(붉은색) 기후자료 분석 지점(자료 출처 : 국가생물지식정보시스템)

표 5. 일천궁의 주산지 및 채집지의 기후분석을 통한 재배지 판단 기준 설정

일천궁 주산지			
주소	연평균기온	4~10월 평균기온	8월 평균기온
경북 영양 영양읍 황용리(최적지)	9	15.7	21.6
일천궁 채집지			
경북 영천시 화북면 오동리	10.4	17.2	23.7
경북 울릉군 서면 태하리	14	19.5	25.4
경북 영양군 일원면 가곡리	9.8	16.5	22.6
경북 영양군 영양읍 기산리	8.6	14.9	20.7
경북 영천시 자양면 용화리	10.3	17.1	23
경남 남해군 이동면 난음리	13.7	19.8	25.7
전북 무주군 설천면 삼공리	9.8	16.5	21.8
전남 구례군 구례읍 봉북리	12.6	19.5	25.7
전남 구례군 구례읍 봉북리	8.1	15.3	20.8
강원도 강릉시 연곡면 퇴곡리	11.1	17.7	23.3
강원도 정선군 사북읍 사북리	7.6	14.5	20.3
최고값	14	19.8	25.7
최저값	7.6	14.5	20.3

- 1) 기준 설정은 주산지 & 채집지의 평년기후자료와 문헌자료를 바탕으로 설정하였음
- 2) 7~8월 최고기온 : 일천궁은 30℃ 이상의 온도에서 하고 현상이 발생함
- 3) 주산지인 영양 일대가 포함되도록 적지조건을 설정하였음

나. 대상 작물별 재배지 전자지도 작성

대상 작목인 사과, 배, 복숭아, 포도, 감귤(조생온주밀감 & 한라봉부지화), 단감, 인삼, 당귀, 천궁의 평년(1981 ~ 2010), RCP 8.5(2020s ~ 2090s), RCP 4.5(2020s ~ 2090s) 재배지 예측지도를 30m급 고해상도 전자지도로 제작하였다. 평년의 기후 자료는 국가농림기상센터에서 제공하는 전자기후도 월별 평균/최고/최저기온을 30m 해상도로 나타낸 격자형 자료를 수집하여 이용하였다. 미래 기후시나리오는 국립원예특작과학원 온난화대응농업연구소에서 제공하는 30m 해상도의 RCP 8.5 & 4.5 농업용 미래 상세 전자기후도 격자형 자료를 이용하였다. 고해상도 농업용 미래 전자기후도 원본자료는 <http://www.agdcm.kr> 웹 서비스를 통하여 다운로드 받을 수 있다.

적지, 가능지 그리고 저위생산지로 분류된 재배지 중 적지와 가능지는 설정된 기후 조건별 GIS 레이어를 작성한 후 중첩 분석을 하였다. 중첩된 레이어에서 모든 기후 조건을 만족하는 격자만 추출하였다. 저위생산지는 중첩된 레이어에서 1개 이상의 기후 조건을 만족하는 격자를 추출하였다.

다. 대상 작물별 재배지 면적변동 분석

2010년 기준 우리나라 농경지 총 면적 중 3단계로 구분된 적지, 가능지 그리고 저위생산지가 차지하는 면적 비율의 변동을 분석하였다. 농경지 면적은 환경부(2010)에서 제공받은 토지피복도 Polygon 자료에서 농업지역(논, 밭, 하우스재배지, 과수원 기타재배지)만 추출하였다. 추출된 농경지 Polygon 자료를 Raster 파일 형태로 변환 한 후 농경지 수치지도와 재배적지 전자지도를 중첩하여 농경지에 해당되는 부분만 추출하였다. 그리고 우리나라 행정구역 도 단위 Polygon 자료를 활용하여 행정구역별 면적 통계자료를 계산하였다.

3. 연구수행 결과

가. 대상 작물별 재배지 전자지도 제작

사과, 배, 포도, 복숭아, 감, 감귤(이상 과수), 인삼, 당귀, 천궁(이상 약용작물)을 대상으로 평년, RCP 4.5와 8.5 기후변화시나리오를 이용하여 30m 격자를 가지는 고해상도 재배지 변동 지도를 제작하였다. GIS 지도의 범례 색상은 재배적지-파란색, 재배가능지-연두색, 저위생산지-흰색으로 구분하였다.

(1) 사과

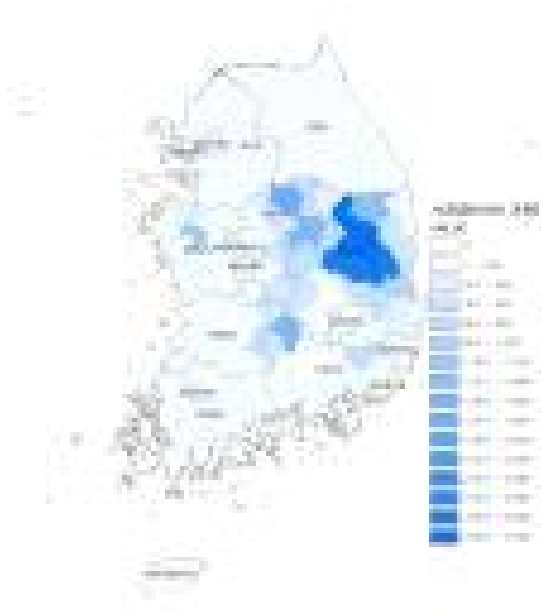


그림 221 . 사과 주산지 면적(2010년 기준)



그림 222 . 평년(1981-2010) 사과 재배지 변동 지도(사과)

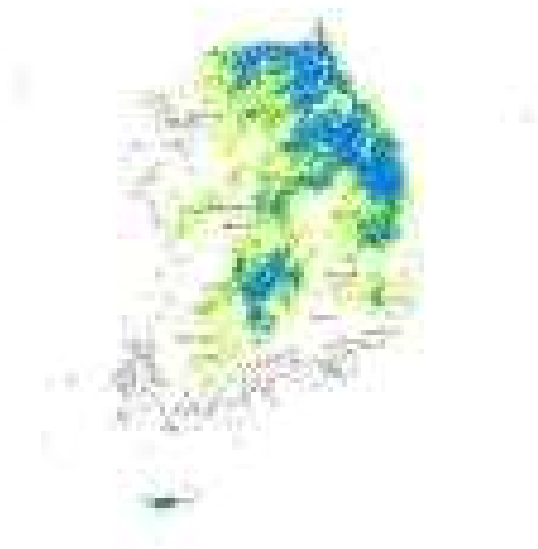


그림 223 . RCP 4.5 2020년대(사과)

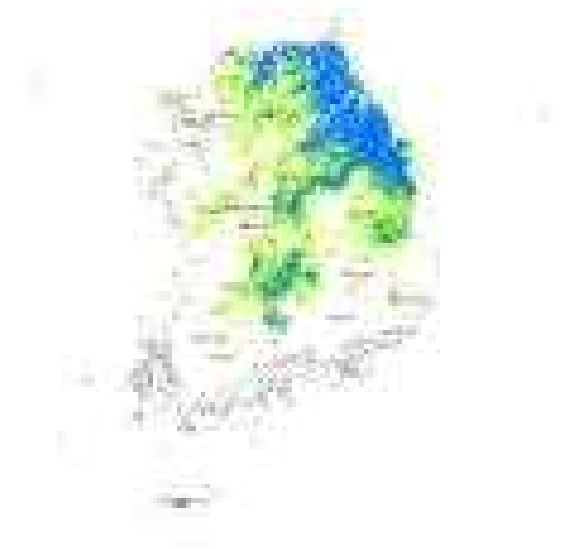


그림 224 . RCP 8.5 2020년대(사과)



그림 225 . RCP 4.5 2030년대(사과)

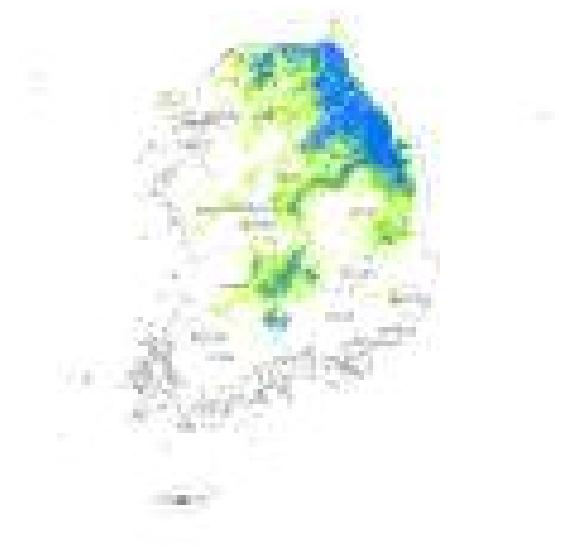


그림 226 . RCP 8.5 2030년대(사과)

c

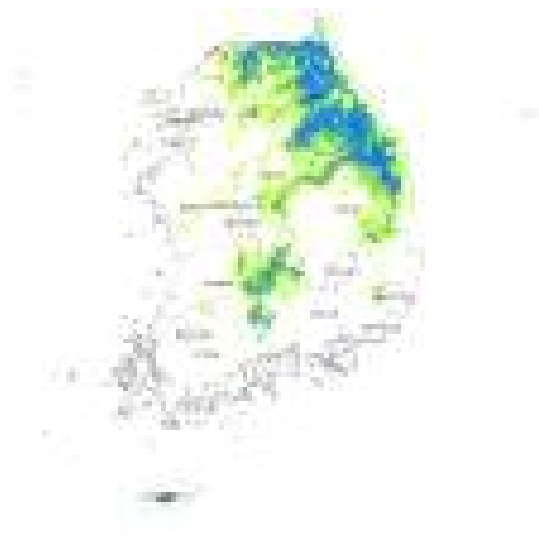


그림 227 . RCP 4.5 2040년대(사과)

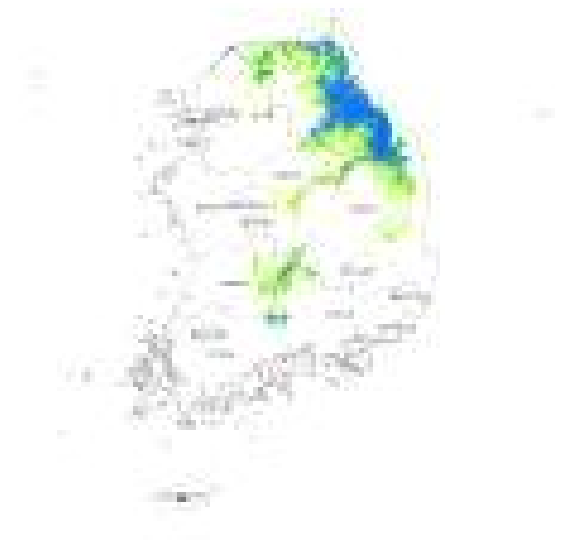


그림 228 . RCP 8.5 2040년대(사과)

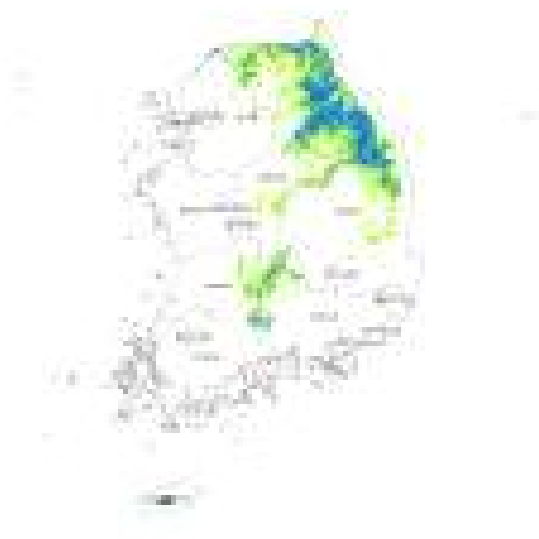


그림 229 . RCP 4.5 2050년대(사과)



그림 230 . RCP 8.5 2050년대(사과)



그림 231 . RCP 4.5 2060년대(사과)



그림 232 . RCP 8.5 2060년대(사과)



그림 233 . RCP 4.5 2070년대(사과)



그림 234 . RCP 8.5 2070년대(사과)



그림 235 . RCP 4.5 2080년대(사과)



그림 236 . RCP 8.5 2080년대(사과)

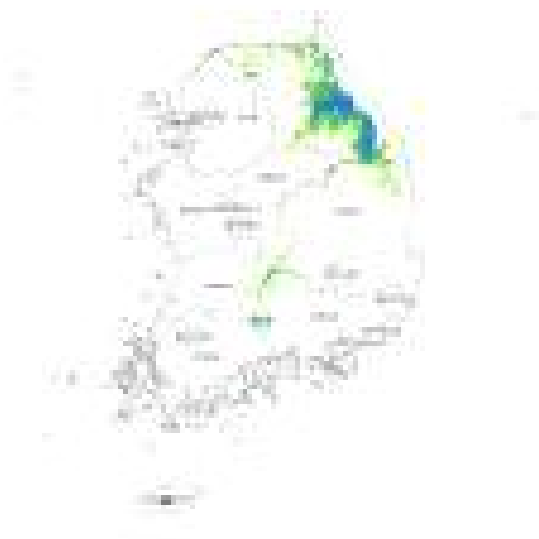


그림 237 . RCP 4.5 2090년대(사과)



그림 238 . RCP 8.5 2090년대(사과)

(2) 배



그림 239 . 배 주산지 면적(2010년 기준)

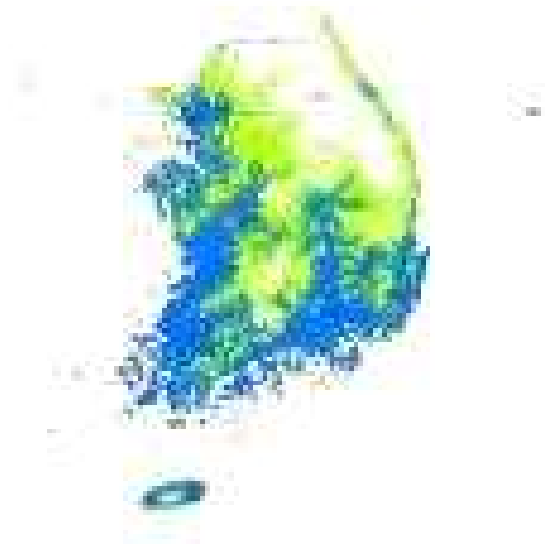


그림 240 . 평년(1981-2010) 배 재배지 변동 지도



그림 241 . RCP 4.5 2020년대(배)



그림 242 . RCP 8.5 2020년대(배)



그림 243 . RCP 4.5 2030년대(배)

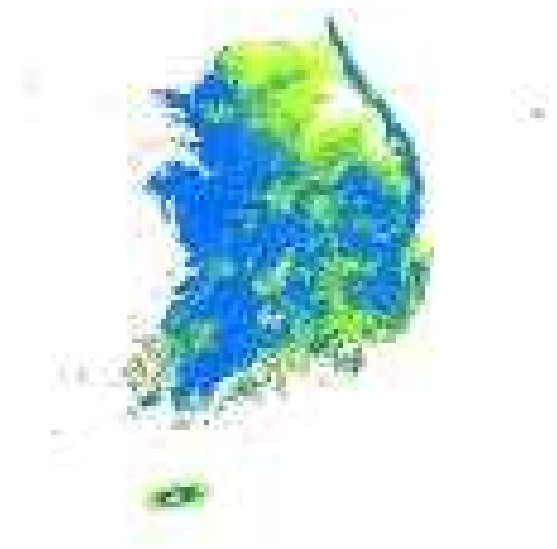


그림 244 . RCP 8.5 2030년대(배)



그림 245 . RCP 4.5 2040년대(배)



그림 246 . RCP 8.5 2040년대(배)

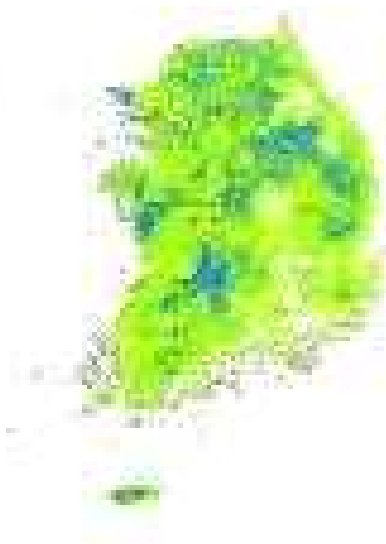


그림 247 . RCP 4.5 2050년대(배)

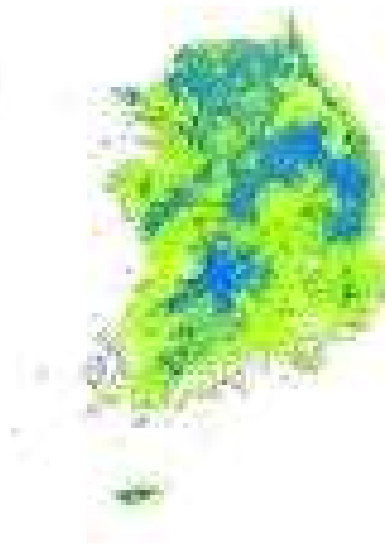


그림 248 . RCP 8.5 2050년대(배)

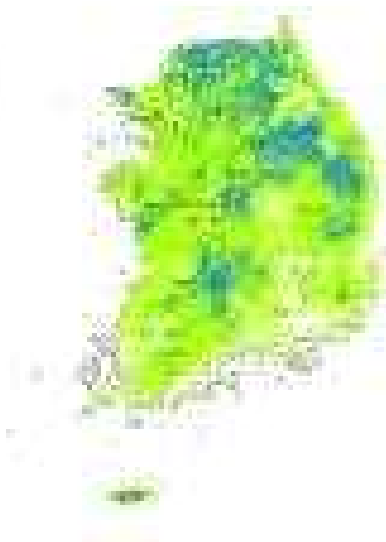


그림 249 . RCP 4.5 2060년대(배)

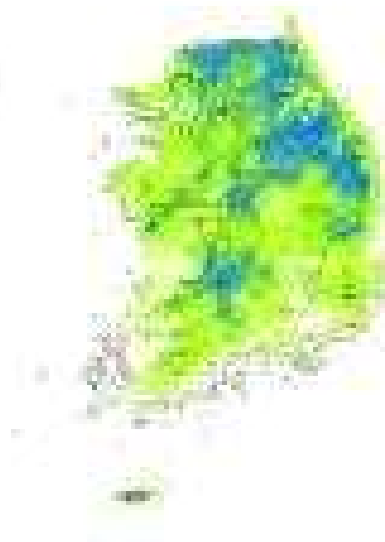


그림 250 . RCP 8.5 2060년대(배)



그림 251 . RCP 4.5 2070년대(배)

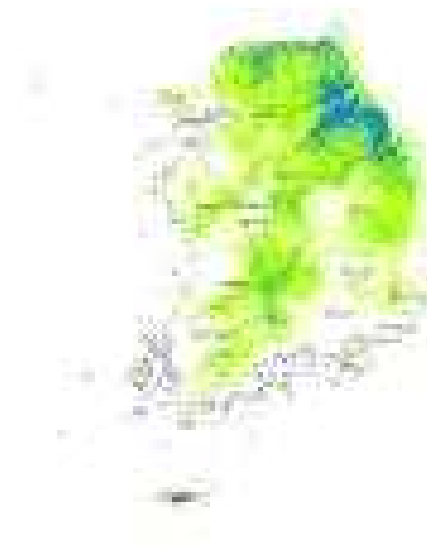


그림 252 . RCP 8.5 2070년대(배)

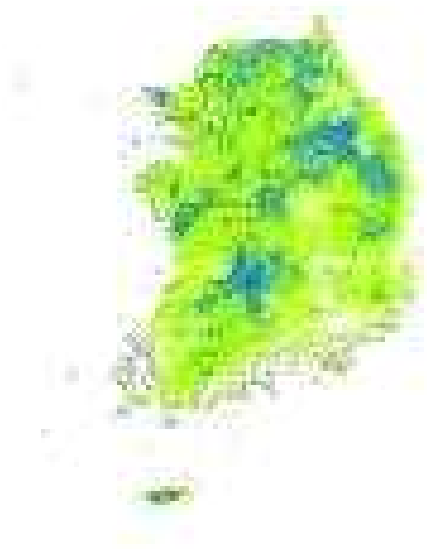


그림 253 . RCP 4.5 2080년대(배)

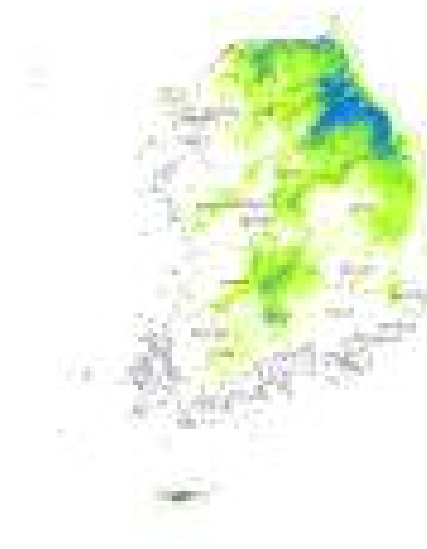


그림 254 . RCP 8.5 2080년대(배)

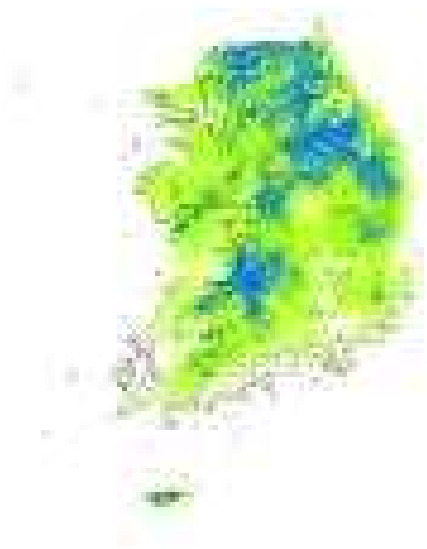


그림 255 . RCP 4.5 2090년대(배)

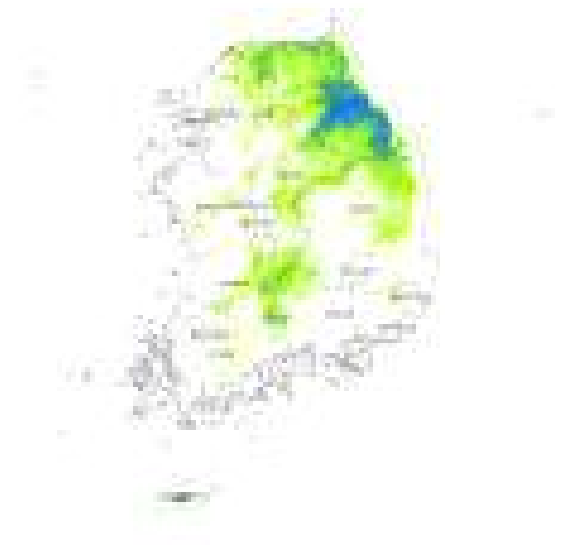


그림 256 . RCP 4.5 2090년대(배)

(3) 포도



그림 257 . 포도 주산지 면적(2010년 기준)

그림 258 . 평년(1981-2010) 포도 재배지
변동 지도

그림 259 . RCP 4.5 2020년대(포도)

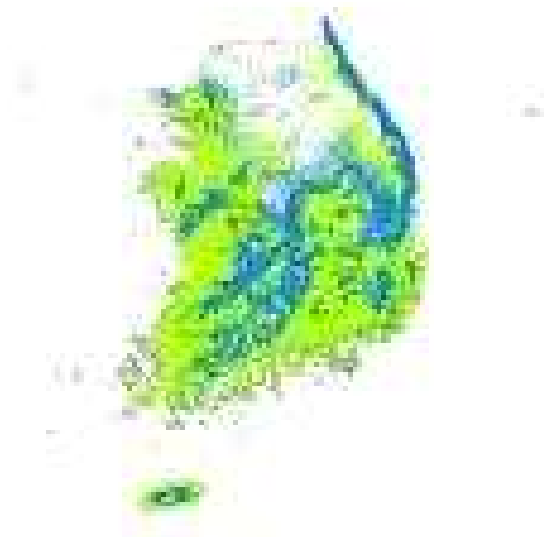


그림 260 . RCP 8.5 2020년대(포도)

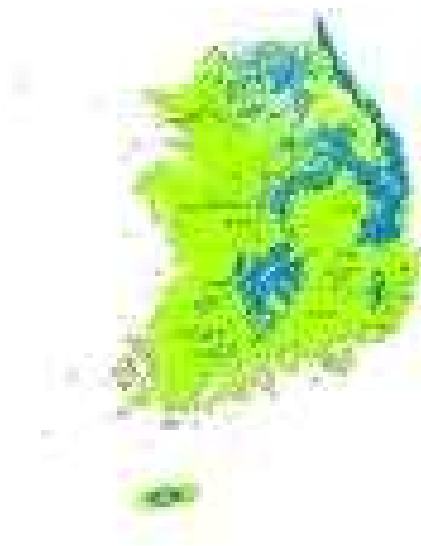


그림 261 . RCP 4.5 2030년대(포도)

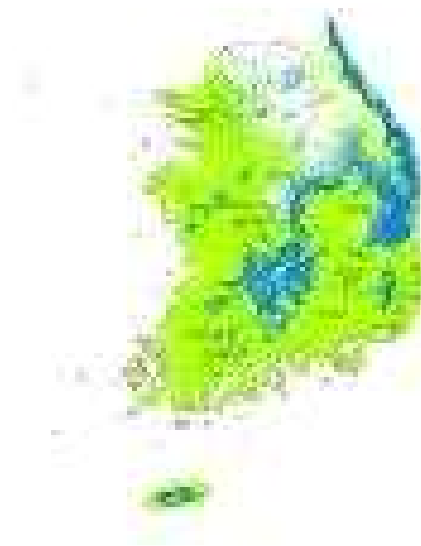


그림 262 . RCP 8.5 2030년대(포도)



그림 263 . RCP 4.5 2040년대(포도)

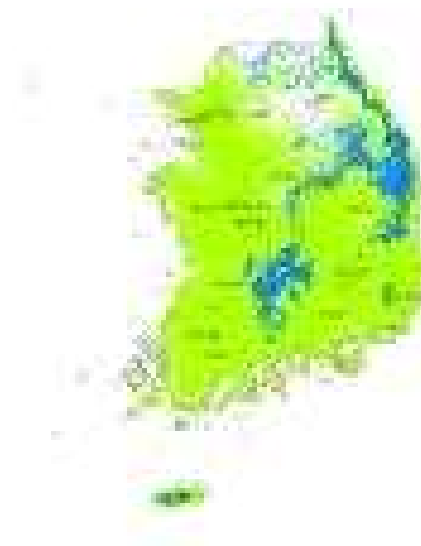


그림 264 . RCP 8.5 2040년대(포도)



그림 265 . RCP 4.5 2050년대(포도)



그림 266 . RCP 8.5 2050년대(포도)



그림 267 . RCP 4.5 2060년대(포도)



그림 268 . RCP 8.5 2060년대(포도)

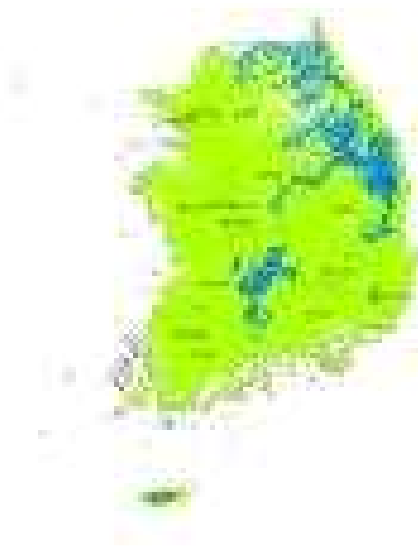


그림 269 . RCP 4.5 2070년대(포도)

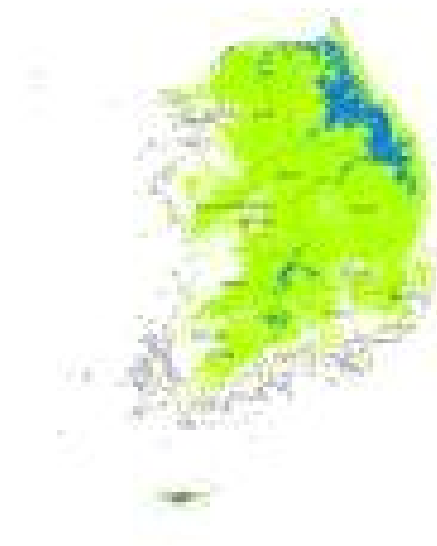


그림 270 . RCP 8.5 2070년대(포도)

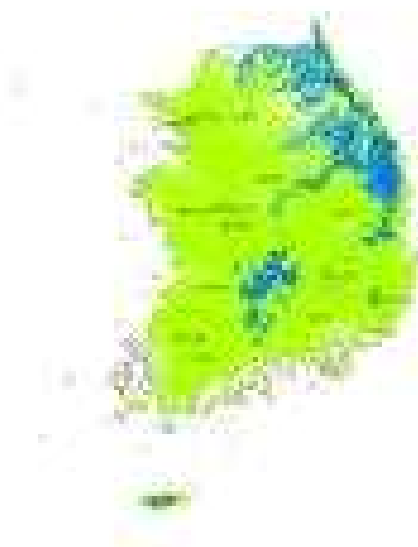


그림 271 . RCP 4.5 2080년대(포도)

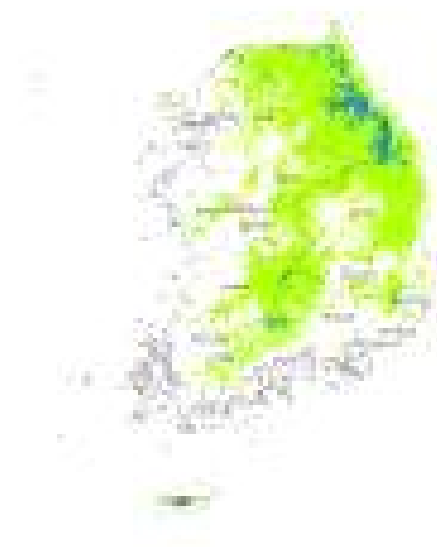


그림 272 . RCP 8.5 2080년대(포도)



그림 273 . RCP 4.5 2090년대(포도)



그림 274 . RCP 8.5 2090년대(포도)

(4) 복숭아



그림 275 . 복숭아 주산지 면적(2010년 기준)

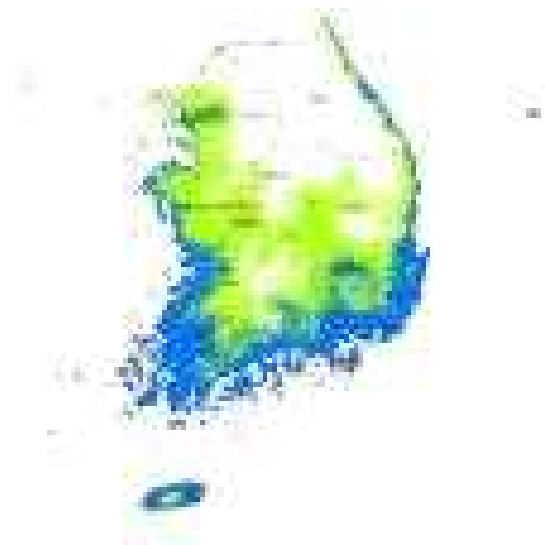


그림 276 . 평년(1981-2010) 복숭아 재배지 변동 지도



그림 277 . RCP 4.5 2020년대(복숭아)



그림 278 . RCP 8.5 2020년대(복숭아)



그림 279 . RCP 4.5 2030년대(복숭아)



그림 280 . RCP 8.5 2030년대(복숭아)



그림 281 . RCP 4.5 2040년대(복숭아)



그림 282 . RCP 8.5 2040년대(복숭아)



그림 283 . RCP 4.5 2050년대(복숭아)



그림 284 . RCP 8.5 2050년대(복숭아)

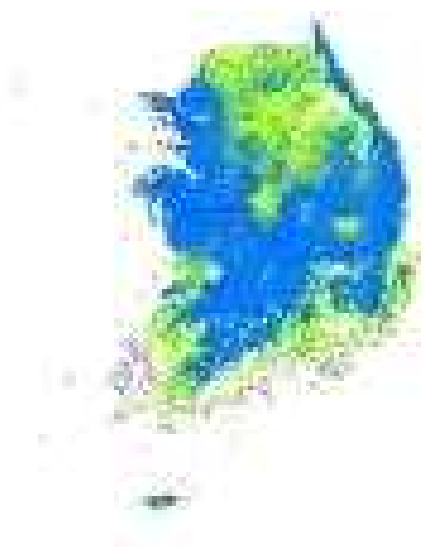


그림 285 . RCP 4.5 2060년대(복숭아)



그림 286 . RCP 8.5 2060년대(복숭아)



그림 287 . RCP 4.5 2070년대(복숭아)

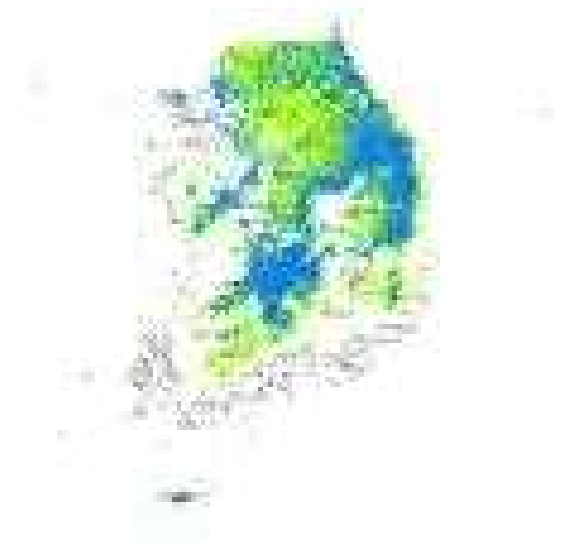


그림 288 . RCP 8.5 2070년대(복숭아)



그림 289 . RCP 4.5 2080년대(복숭아)

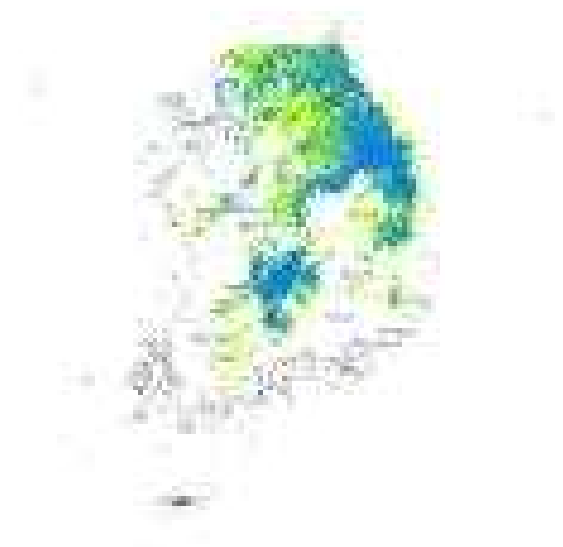


그림 290 . RCP 8.5 2080년대(복숭아)



그림 291 . RCP 4.5 2090년대(복숭아)



그림 292 . RCP 8.5 2090년대(복숭아)

(5) 단감

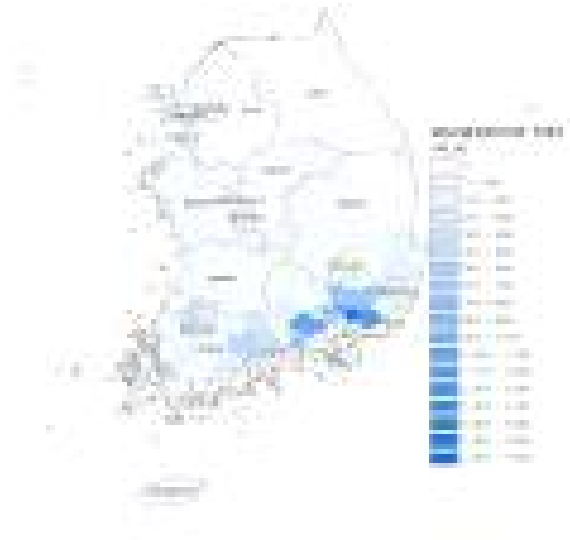


그림 293 . 단감 주산지 면적(2010년 기준)

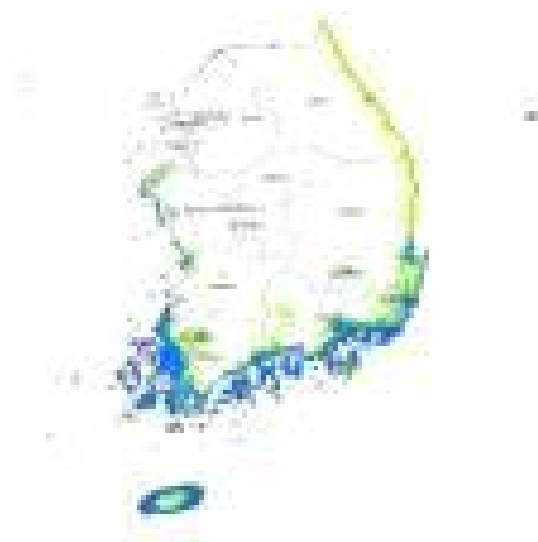
그림 294 . 평년(1981-2010) 단감 재배지
변동 지도

그림 295 . RCP 4.5 2020년대(단감)



그림 296 . RCP 8.5 2020년대(단감)

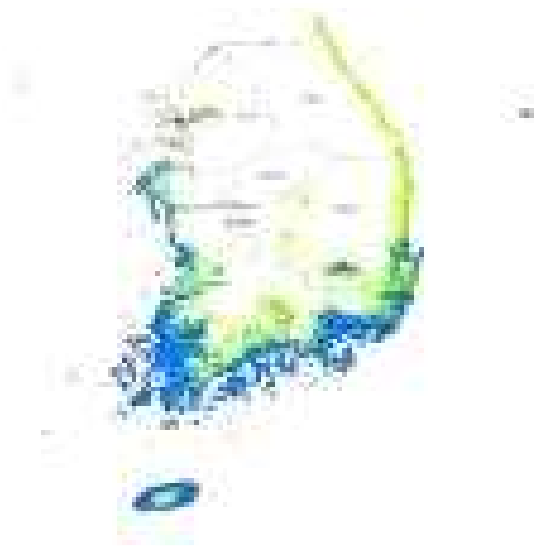


그림 297 . RCP 4.5 2030년대(단감)

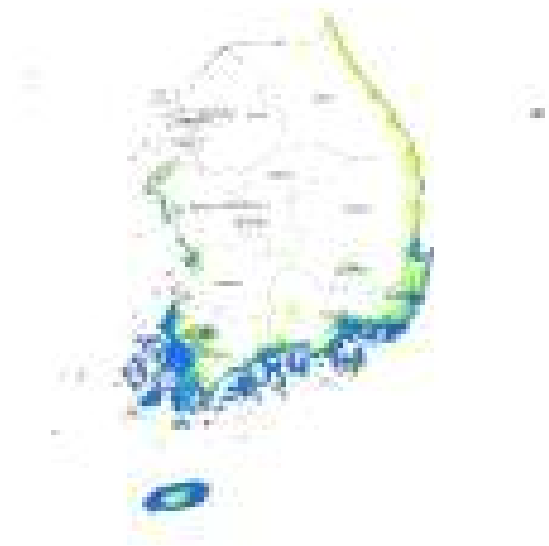


그림 298 . RCP 8.5 2030년대(단감)



그림 299 . RCP 4.5 2040년대(단감)



그림 300 . RCP 8.5 2040년대(단감)

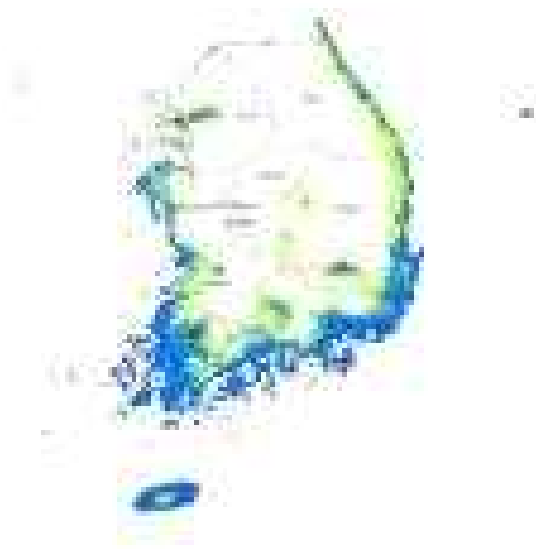


그림 301 . RCP 4.5 2050년대(단감)



그림 302 . RCP 8.5 2050년대(단감)

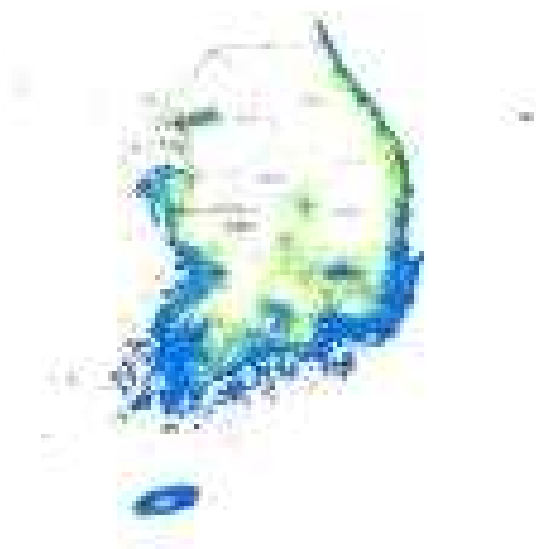


그림 303 . RCP 4.5 2060년대(단감)



그림 304 . RCP 8.5 2060년대(단감)



그림 305 . RCP 4.5 2070년대(단감)



그림 306 . RCP 8.5 2070년대(단감)



그림 307 . RCP 4.5 2080년대(단감)



그림 308 . RCP 8.5 2080년대(단감)



그림 309 . RCP 4.5 2090년대(단감)



그림 310 . RCP 8.5 2090년대(단감)

(6) 조생온주밀감



그림 311 . 감귤 주산지 면적(2010년 기준)



그림 312 . 평년(1981-2010) 조생온주밀감 재배지 변동 지도



그림 313 . RCP 4.5 2020년대(조생온주밀감)



그림 314 . RCP 8.5 2020년대(조생온주밀감)



그림 315 . RCP 4.5 2030년대(조생온주밀감)



그림 316 . RCP 8.5 2030년대(조생온주밀감)



그림 317 . RCP 4.5 2040년대(조생온주밀감)



그림 318 . RCP 8.5 2040년대(조생온주밀감)



그림 319 . RCP 4.5 2050년대(조생온주밀감)



그림 320 . RCP 8.5 2050년대(조생온주밀감)



그림 321 . RCP 4.5 2060년대(조생온주밀감)



그림 322 . RCP 8.5 2060년대(조생온주밀감)



그림 323 . RCP 4.5 2070년대(조생온주밀감)



그림 324 . RCP 8.5 2070년대(조생온주밀감)



그림 325 . RCP 4.5 2080년대(조생온주밀감)



그림 326 . RCP 8.5 2080년대(조생온주밀감)



그림 327 . RCP 4.5 2090년대(조생온주밀감)



그림 328 . RCP 8.5 2090년대(조생온주밀감)

(7) 한라봉부지화



그림 329 . 감골 주산시 면적(2010년 기준)



그림 330 . 평년(1981-2010) 한라봉부지화 재배지 변동 지도



그림 331 . RCP 4.5 2020년대(한라봉부지화)



그림 332 . RCP 8.5 2020년대(한라봉부지화)



그림 333 . RCP 4.5 2030년대(한라봉부지화)



그림 334 . RCP 8.5 2030년대(한라봉부지화)



그림 335 . RCP 4.5 2040년대(한라봉부지화)



그림 336 . RCP 8.5 2040년대(한라봉부지화)



그림 337 . RCP 4.5 2050년대(한라봉부지화)



그림 338 . RCP 4.5 2050년대(한라봉부지화)



그림 339 . RCP 4.5 2060년대(한라봉부지화)



그림 340 . RCP 8.5 2060년대(한라봉부지화)



그림 341 . RCP 4.5 2070년대(한라봉부지화)



그림 342 . RCP 8.5 2070년대(한라봉부지화)



그림 343 . RCP 4.5 2080년대(한라봉부지화)



그림 344 . RCP 8.5 2080년대(한라봉부지화)



그림 345 . RCP 4.5 2090년대(한라봉부지화)

그림 346 . RCP 8.5 2090년대(한라봉부지화)

(8) 인삼

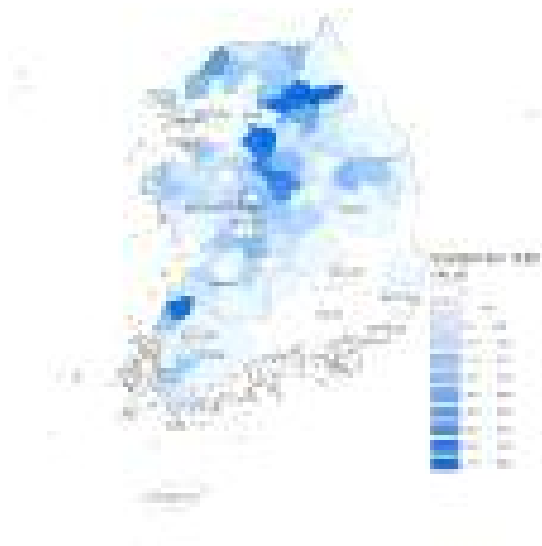


그림 347 . 인삼 주산지 면적(2013년도 기준)



그림 348 . 평년(1981-2010) 인삼 재배지 변동 지도

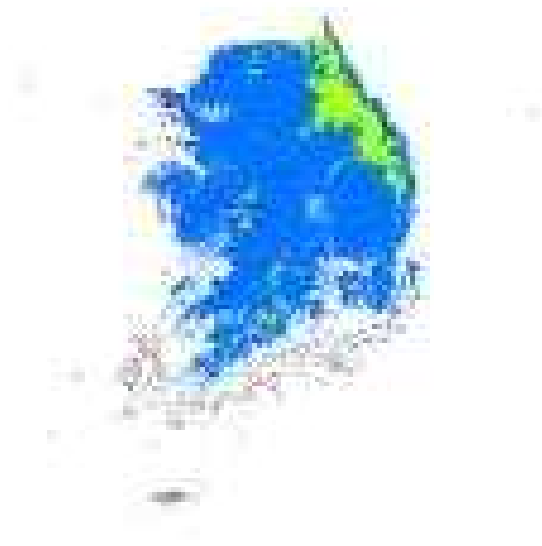


그림 349 . RCP 4.5 2020년대(인삼)



그림 350 . RCP 8.5 2020년대(인삼)

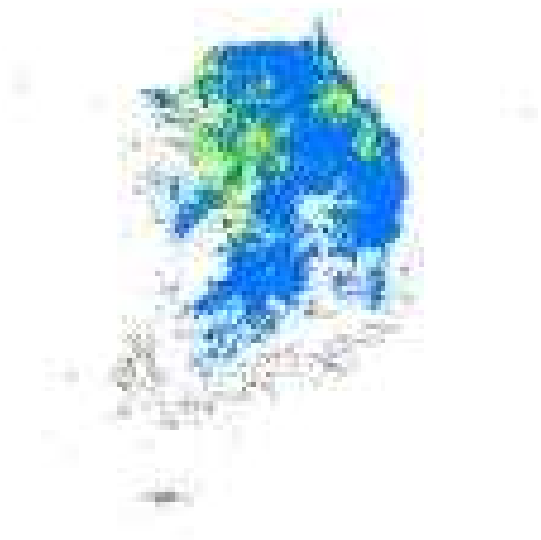


그림 351 . RCP 4.5 2030년대(인삼)



그림 352 . RCP 8.5 2030년대(인삼)

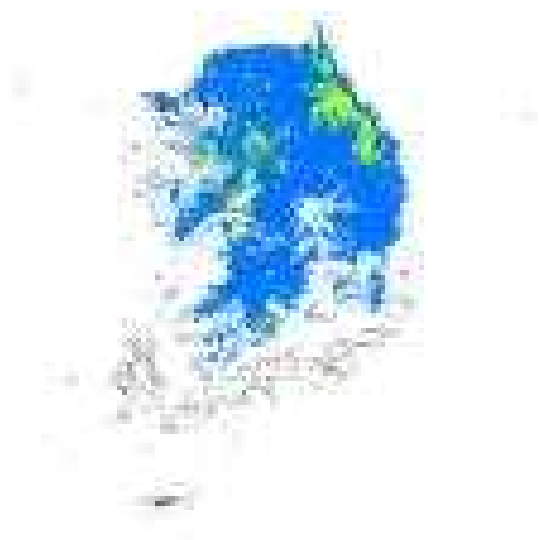


그림 353 . RCP 4.5 2040년대(인삼)

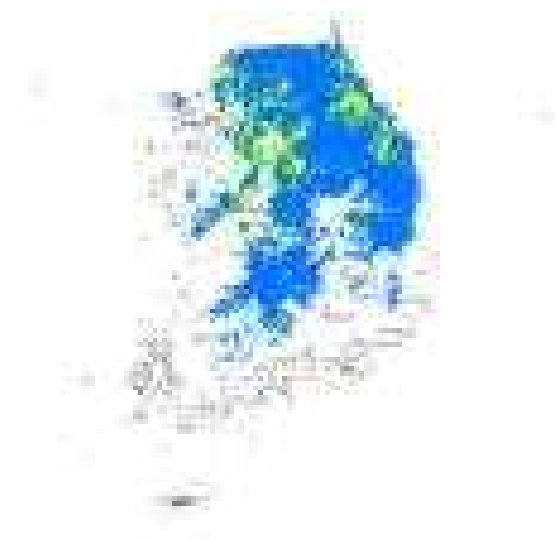


그림 354 . RCP 8.5 2040년대(인삼)



그림 355 . RCP 4.5 2050년대(인삼)

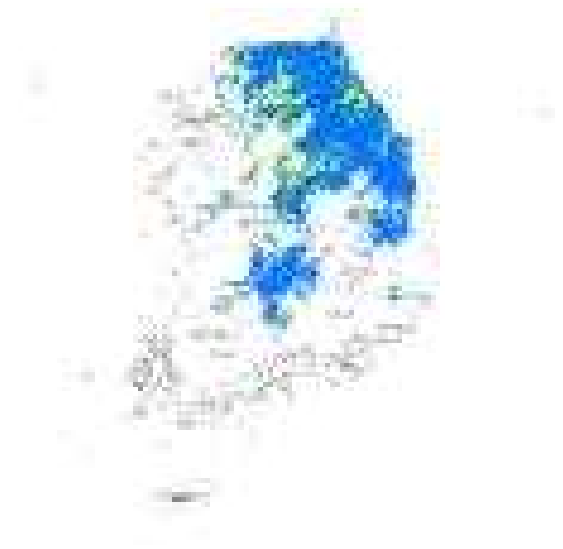


그림 356 . RCP 8.5 2050년대(인삼)



그림 357 . RCP 4.5 2060년대(인삼)



그림 358 . RCP 8.5 2060년대(인삼)

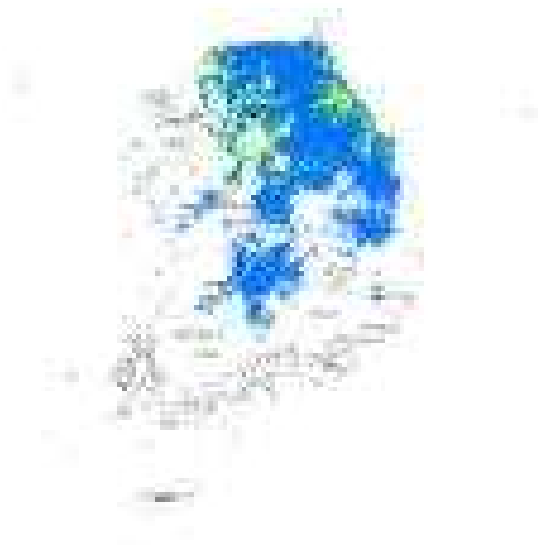


그림 359 . RCP 4.5 2070년대(인삼)

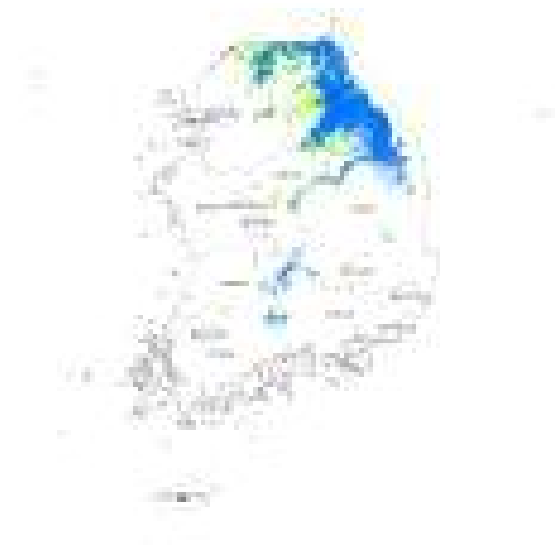


그림 360 . RCP 8.5 2070년대(인삼)



그림 361 . RCP 4.5 2080년대(인삼)



그림 362 . RCP 8.5 2080년대(인삼)

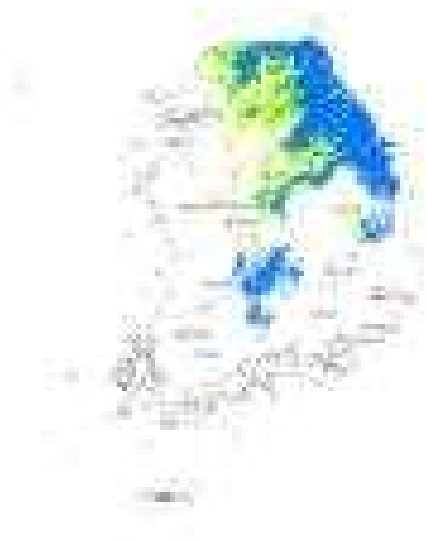


그림 363 . RCP 4.5 2090년대(인삼)



그림 364 . RCP 8.5 2090년대(인삼)

(9) 당귀

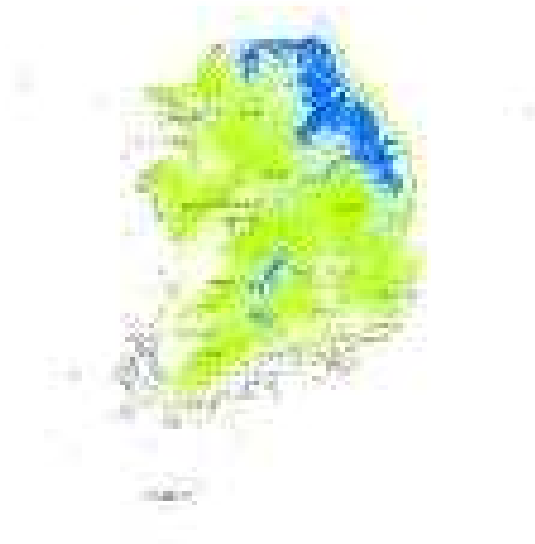


그림 365 . 평년(1981-2010) 당귀 재배지 변동 지도

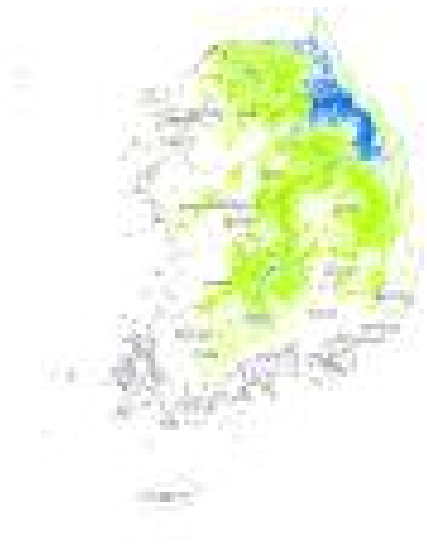


그림 366 . RCP 4.5 2020년대(당귀)

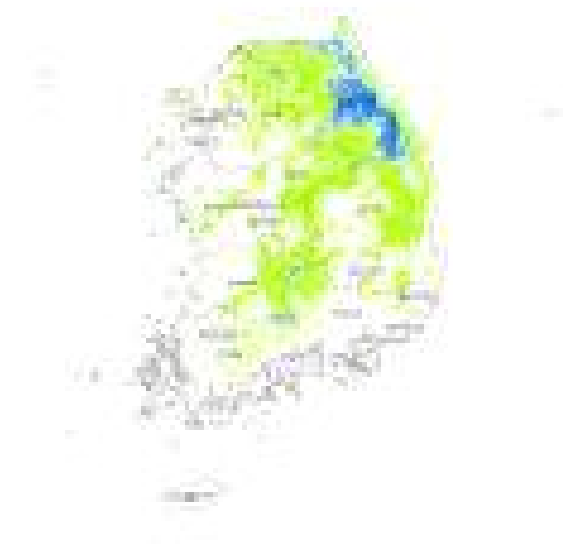


그림 367 . RCP 8.5 2020년대(당귀)

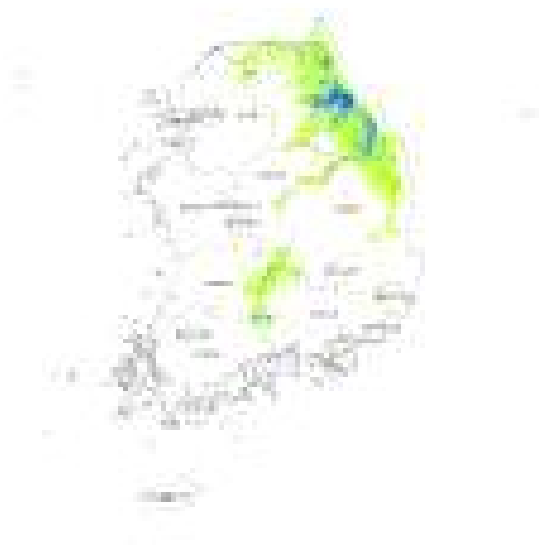


그림 368 . RCP 4.5 2030년대(당귀)



그림 369 . RCP 8.5 2030년대(당귀)



그림 370 . RCP 4.5 2040년대(당귀)

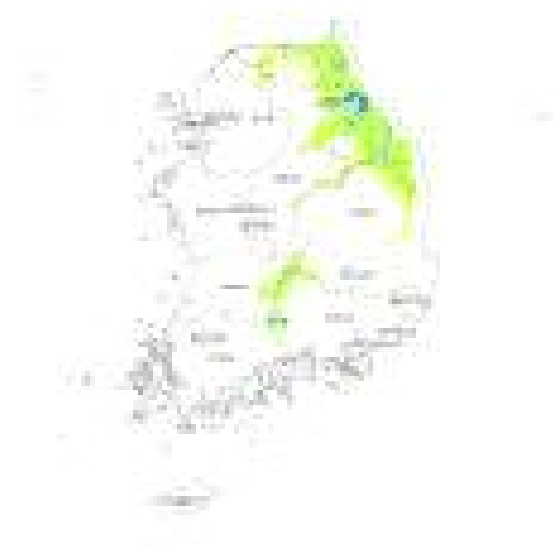


그림 371 . RCP 8.5 2040년대(당귀)

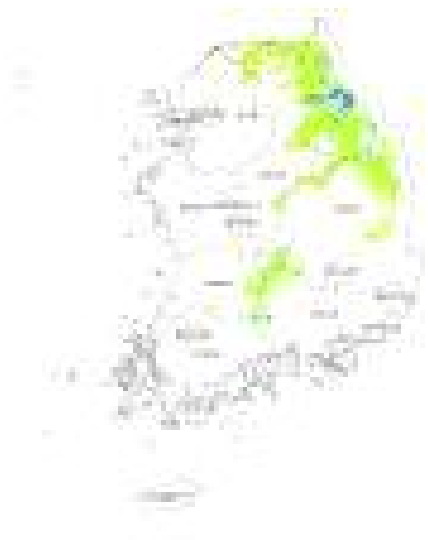


그림 372 . RCP 4.5 2050년대(당귀)



그림 373 . RCP 8.5 2050년대(당귀)



그림 374 . RCP 4.5 2060년대(당귀)



그림 375 . RCP 8.5 2060년대(당귀)



그림 376 . RCP 4.5 2070년대(당귀)



그림 377 . RCP 8.5 2070년대(당귀)



그림 378 . RCP 4.5 2080년대(당귀)



그림 379 . RCP 8.5 2080년대(당귀)



그림 380 . RCP 4.5 2090년대(당귀)



그림 381 . RCP 8.5 2090년대(당귀)

(10) 천궁



그림 382 . 2013년 기준 주산지 면적(천궁)



그림 383 . 평년(1981-2010) 천궁 재배지 변동 지도



그림 384 . RCP 4.5 2020년대(천궁)

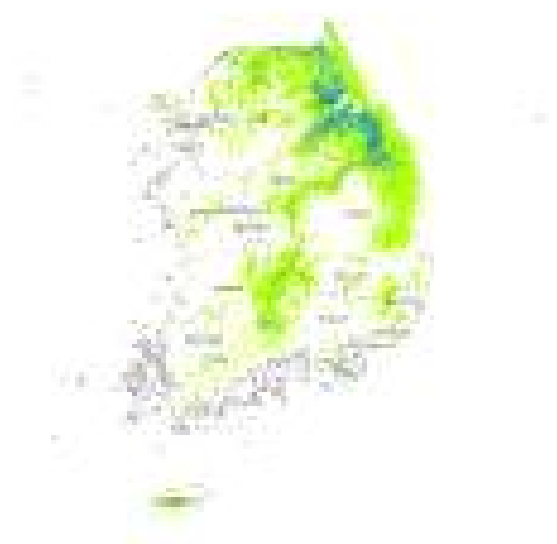


그림 385 . RCP 8.5 2020년대(천궁)

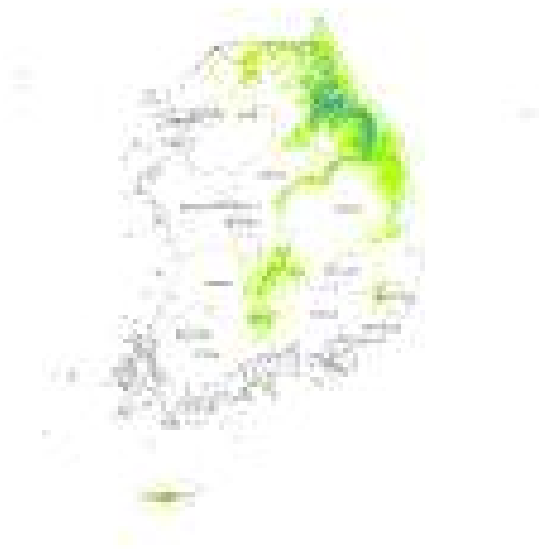


그림 386 . RCP 4.5 2030년대(천궁)



그림 387 . RCP 8.5 2030년대(천궁)

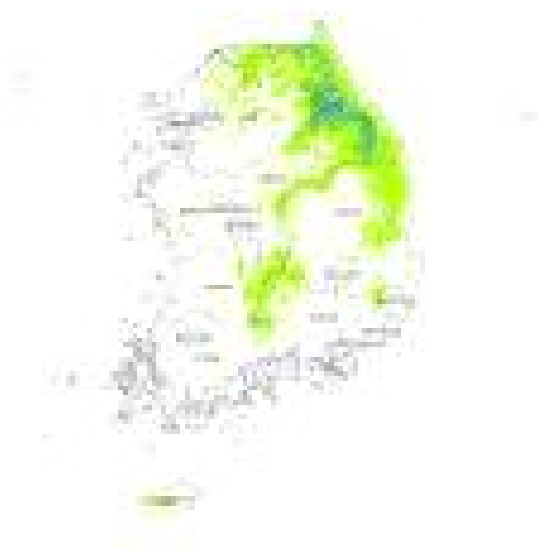


그림 388 . RCP 4.5 2040년대(천궁)



그림 389 . RCP 8.5 2040년대(천궁)



그림 390 . RCP 4.5 2050년대(천궁)



그림 391 . RCP 8.5 2050년대(천궁)



그림 392 . RCP 4.5 2060년대(천궁)



그림 393 . RCP 8.5 2060년대(천궁)



그림 394 . RCP 4.5 2070년대(천궁)



그림 395 . RCP 8.5 2070년대(천궁)



그림 396 . RCP 4.5 2080년대(천궁)



그림 397 . RCP 8.5 2080년대(천궁)



그림 398 . RCP 4.5 2090년대(천공)



그림 399 . RCP 8.5 2090년대(천공)

나. 대상 작물별 재배지 변동 분석

(1) 사과

농업용 미래 상세 전자기후도를 이용하여 사과의 재배적지를 구분하는 기준에 따라 적지, 가능지, 저위생산지를 나타내는 30m 고해상도 재배적지 전자지도를 작성하였다. 사과 재배가 가능 지역은 RCP 4.5 와 RCP 8.5 시나리오에서 동일하게 감소하였으며, RCP 8.5 시나리오에서 더 빠르게 적지와 가능지가 감소하였다(그림 19).

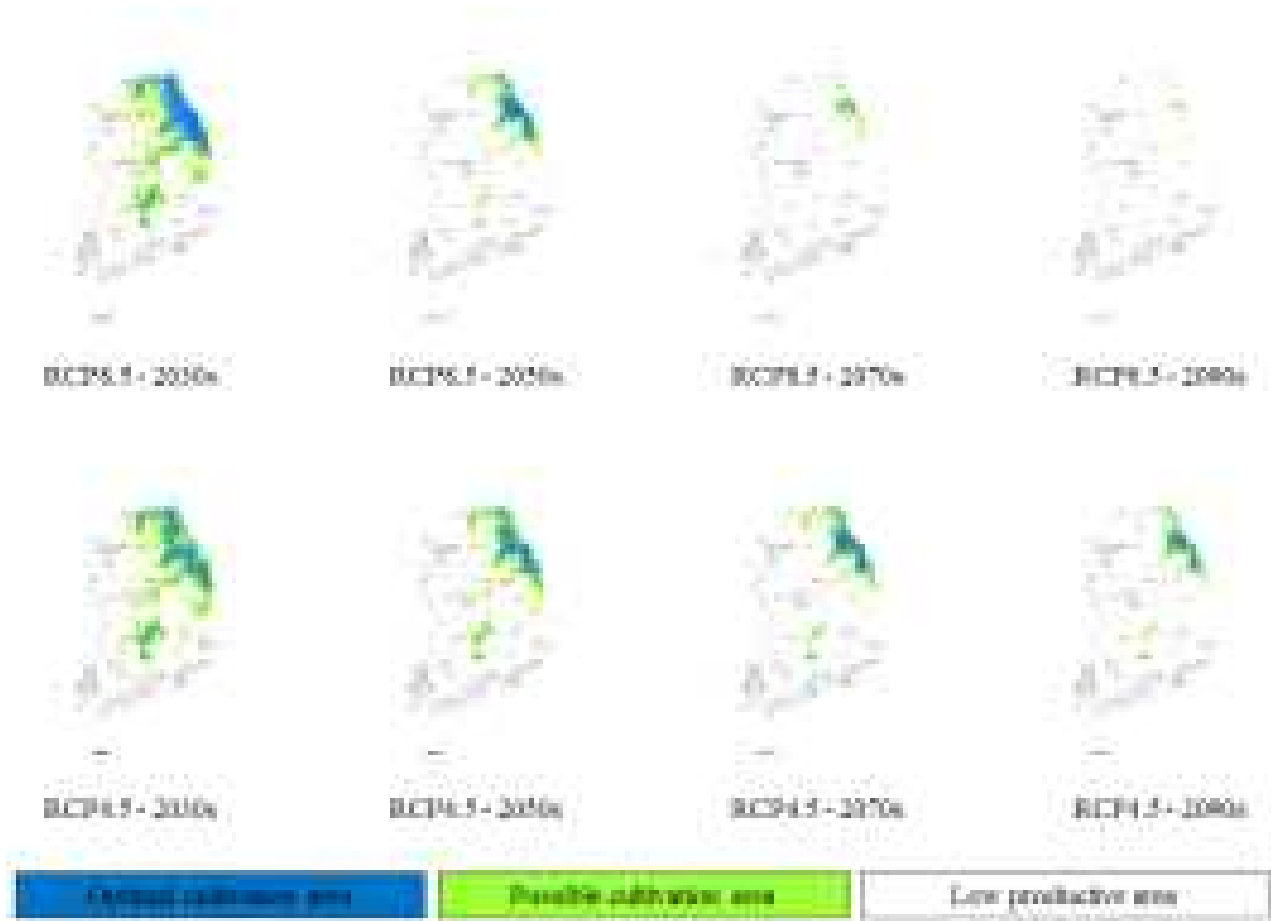


그림 400. 고해상도(30m) 농업용 상세 전자기후도를 이용한 사과의 미래 재배지 전자 지도

1981 ~ 2010년 평년 기후자료에 의한 사과 재배적지는 우리나라 전체 농경지 면적 중 적지 23.2%, 가능지 34.4%, 저위생산지 42.4%로 나타났다. 2100년 사과 재배적지는 RCP 4.5 시나리오에서 적지와 가능지는 각각 22.4%, 33.1%가 감소하였고, 저위생산지는 55.6% 증가하였다. 그리고 RCP 8.5 시나리오에서는 적지와 가능지가 0%, 0.2%로 고품질의 사과 재배가 가능한 지역이 거의 없는 것으로 예측되었다.

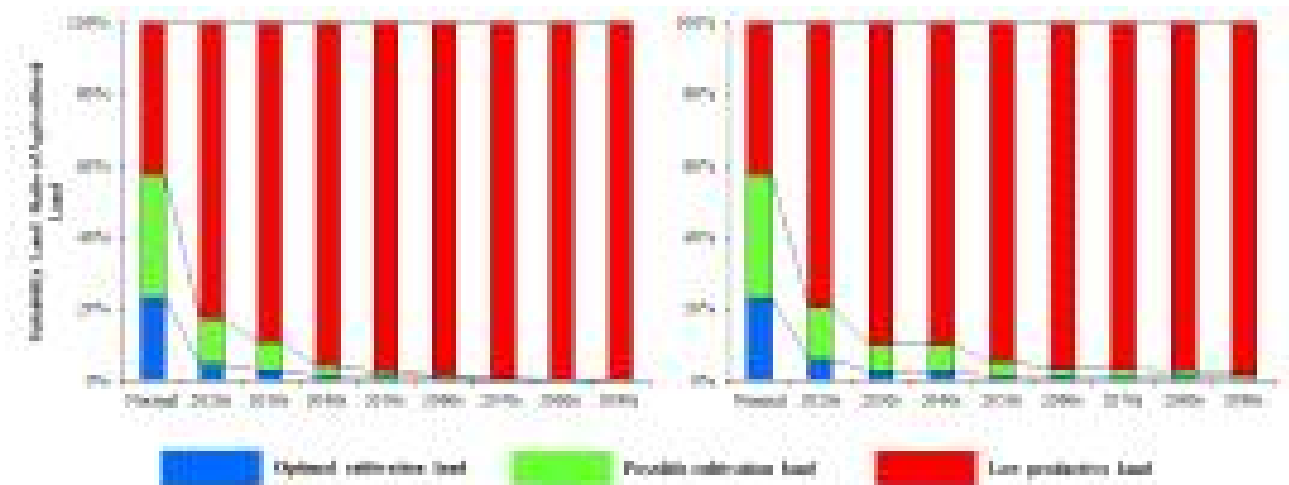


그림 401. 우리나라 농경지 총 면적(환경부, 2010) 중 RCP 시나리오에 따른 사과의 2020년부터 2100년까지 10년 단위의 재배적지구분별 면적 변동 그래프

우리나라 농경지 면적 중 사과 적지의 비율은 평년 23.3%였고, 경상북도 지역이 6.4%로 비중이 가장 높았다(표 17). 2010년도 통계청 시·군별 사과 재배면적 통계자료 중 가장 많이 재배되고 있는 지역이 영주시, 안동시, 의성군 순으로 조사되었다. RCP 8.5와 4.5 시나리오에 따르면 2020년대 이후 적지 면적이 급격하게 감소하였다.

표 6. RCP 8.5 & 4.5 기후변화 시나리오에 따른 우리나라 총 농경지 면적 중 행정구역 도 단위 사과 재배적지 면적 비율(%)

Administrative district	Normal	2020s	2030s	2040s	2050s	2060s	2070s	2080s	2090s
Metropolitan City	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sejong-si	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeonggi-do	3.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gangwon-do	3.4	1.9	1.6	1.2	1.0	0.6	0.2	0.1	0.0
Chungcheongbuk-do	3.5	0.6	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
RCP 8.5 Chungcheongnam-do	2.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollabuk-do	2.2	0.6	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollanam-do	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangbuk-do	6.4	1.1	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangnam-do	1.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeju-si	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Area Ratio	23.3	4.5	2.9	1.4	1.1	0.6	0.2	0.1	0.0
Metropolitan City	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sejong-si	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeonggi-do	3.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gangwon-do	3.4	2.0	1.5	1.6	1.2	1.1	1.0	1.0	0.7
Chungcheongbuk-do	3.5	0.7	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
RCP 4.5 Chungcheongnam-do	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollabuk-do	2.2	0.9	0.4	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollanam-do	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangbuk-do	6.4	1.6	0.5	0.5	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0
Gyeongsangnam-do	1.2	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeju-si	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Area Ratio	23.3	5.9	2.8	2.7	1.5	1.2	1.1	1.0	0.8

Metropolitan City = Total optimal area of Seoul, Incheon, Daejeon, Gwangju, Ulsan and Busan

(2) 배

농업용 상세 전자기후도를 이용하여 배의 30m 고해상도 미래 재배적지 전자지도를 작성하였다. RCP 4.5 시나리오에 따른 재배적지 면적의 변동은 적지에서 점차적으로 감소하고 가능지가 증가하였다. 그리고 현재 적지가 점차적으로 북쪽으로 이동하였다(그림. 21). RCP 8.5 시나리오에 따른 면적 변동은 2070 ~ 2100년 사이에 저위생산지가 급격하게 증가하였다.

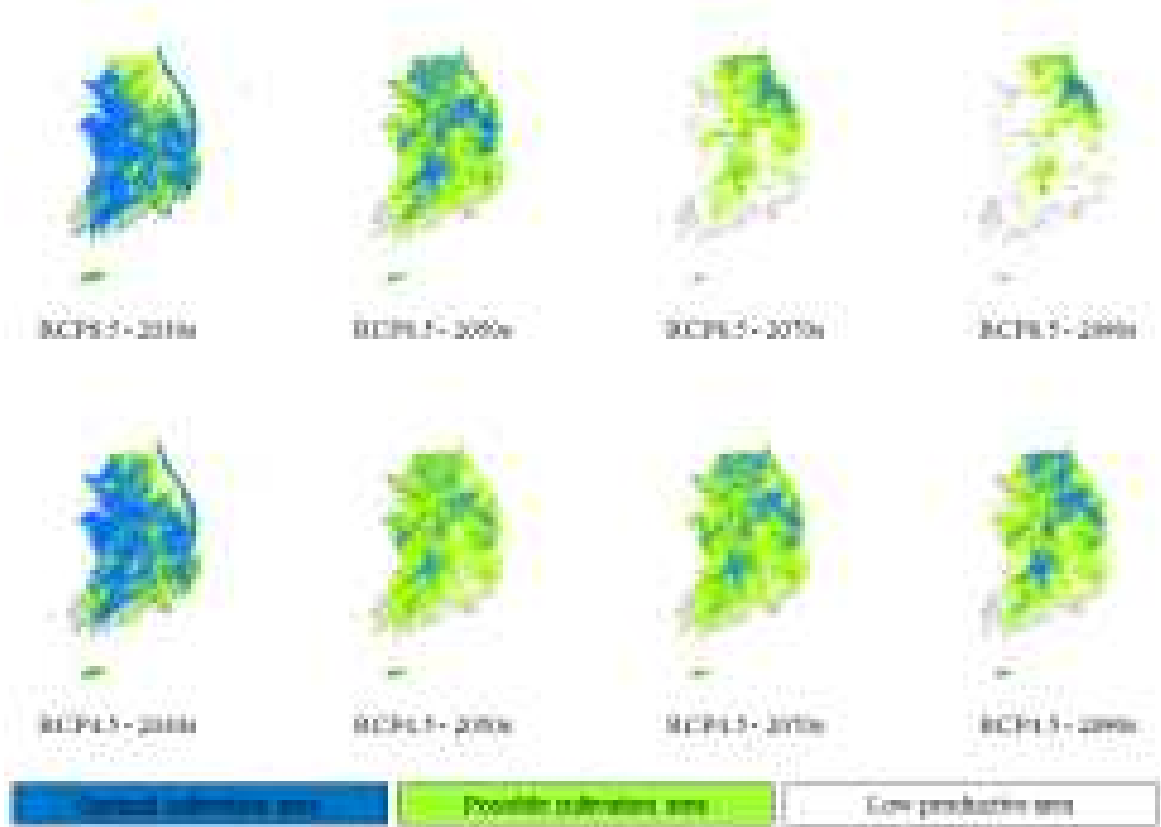


그림 402. 고해상도(30m) 농업용 상세 전자기후도를 이용한 배의 미래 재배지 전자 지도

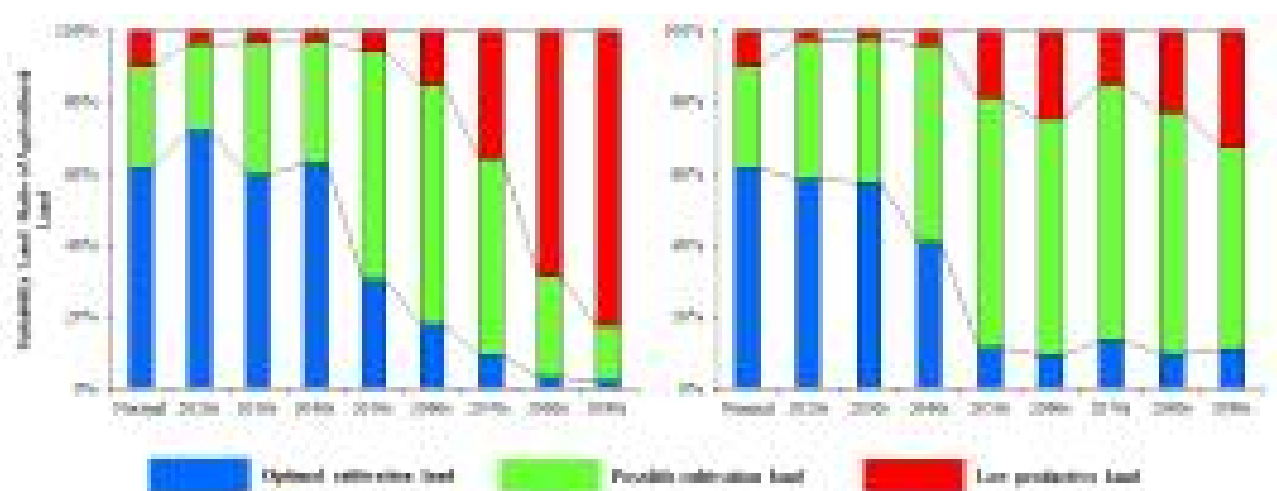


그림 403. 우리나라 농경지 총 면적(환경부, 2010) 중 RCP 시나리오에 따른 배의 2020년부터 2100년까지 10년 단위의 재배적지구분별 면적률

배의 적지 면적은 평년이 전체 농경지 면적 중 61.7%였으며, 전라남도 지역이 15.1%로 면적이 가장 높았다. 제주특별자치도는 전체 면적의 60% 이상이 적지에 포함된다. 이는 본 연구에서 재배적지를 구분하기 위한 기후요소로 바람을 고려하지 못했기 때문인 것으로 생각된다. RCP 4.5 시나리오에 따르면 적지 면적은 2040년까지 서서히 감소하다가 그 이후 급격하게 감소하는 경향을 보였다. RCP 8.5 시나리오에서는 2040년까지 평년 수준의 적지 면적이 유지되었으며, 그 이후 급격하게 감소하여 2100년에는 적지가 1.7%로 예측되었다. 그리고 RCP 4.5 와 8.5 시나리오 모두 배의 주 재배적지가 전라남도에서 충청남도로 변할 것으로 예측되었다(표 18).

표 7. RCP 8.5 & 4.5 기후변화 시나리오에 따른 우리나라 총 농경지 면적 중 행정구역 도 단위 배 재배적지 면적 비율(%)

Administrative district	Normal	2020s	2030s	2040s	2050s	2060s	2070s	2080s	2090s
RCP 8.5									
Metropolitan City	2.9	2.1	2.2	1.1	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0
Sejong-si	0.4	0.5	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeonggi-do	3.9	7.4	8.6	5.3	2.4	0.9	0.2	0.0	0.0
Gangwon-do	0.4	1.1	1.4	1.2	2.1	2.3	1.7	1.7	1.4
Chungcheongbuk-do	1.9	4.6	4.8	3.9	2.7	1.7	0.4	0.2	0.0
Chungcheongnam-do	9.4	12.7	12.6	6.1	2.2	0.7	0.0	0.0	0.0
Jeollabuk-do	9.0	9.8	9.2	3.6	2.5	1.3	0.5	0.3	0.2
Jeollanam-do	15.1	9.5	9.1	2.2	1.0	0.2	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangbuk-do	8.8	8.6	10.1	5.1	3.5	1.8	0.4	0.2	0.1
Gyeongsangnam-do	7.9	3.3	4.2	1.7	1.1	0.4	0.1	0.1	0.0
Jeju-si	2.1	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Area Ratio	61.7	60.0	63.0	30.5	17.9	9.4	3.2	2.4	1.7
RCP 4.5									
Metropolitan City	2.9	2.0	1.9	1.4	0.5	0.3	0.3	0.4	0.1
Sejong-si	0.4	0.5	0.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeonggi-do	3.9	9.0	9.1	7.2	1.2	1.2	1.6	1.0	1.1
Gangwon-do	0.4	1.6	3.0	2.0	1.3	1.9	1.9	1.3	2.6
Chungcheongbuk-do	1.9	4.8	5.8	4.2	1.4	1.4	1.7	1.3	1.9
Chungcheongnam-do	9.4	12.5	11.8	9.8	2.5	1.3	2.0	1.8	0.8
Jeollabuk-do	9.0	8.4	7.5	5.2	2.1	1.3	2.0	1.8	1.9
Jeollanam-do	15.1	7.9	5.5	2.6	0.6	0.2	0.6	0.5	0.4
Gyeongsangbuk-do	8.8	8.6	9.4	6.4	1.4	1.5	2.4	1.4	1.7
Gyeongsangnam-do	7.9	3.3	3.2	2.0	0.3	0.4	0.6	0.4	0.5
Jeju-si	2.1	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Area Ratio	61.7	58.8	57.8	41.1	11.4	9.6	13.3	10.0	11.0

Metropolitan City = Total optimal area of Seoul, Incheon, Daejeon, Gwangju, Ulsan and Busan

(3) 복숭아

RCP 4.5 시나리오에서 복숭아의 미래 재배적지의 변동은 평년과 비교하여 적지 0.2% 증가, 가능지 7.6% 감소, 저위생산지 7.4% 증가하였다. RCP 8.5 시나리오에 따른 재배적지 면적률의 변화는 적지 36.7% 감소, 가능지 26.6% 감소, 저위생산지는 63.3%가 증가하였다(그림 23, 24).

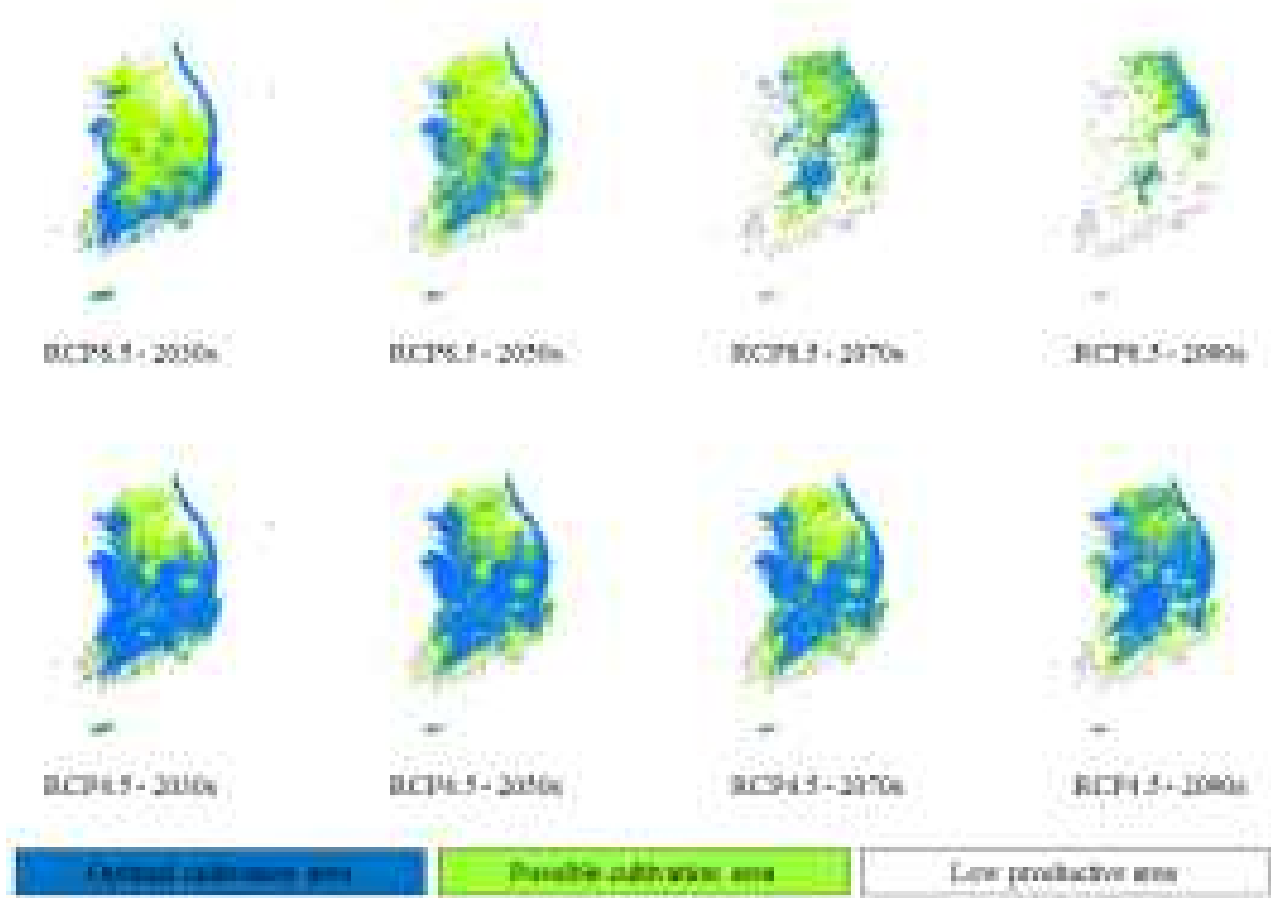


그림 404. 고해상도(30m) 농업용 상세 전자기후도를 이용한 복숭아의 미래 재배적지 예측 지도

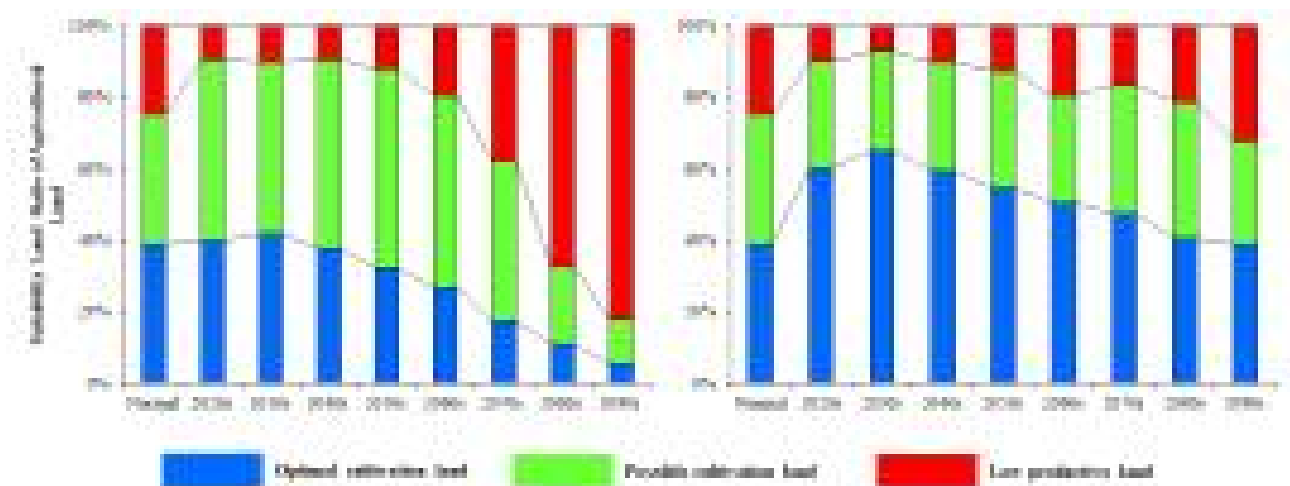


그림 405. 우리나라 농경지 총 면적(환경부, 2010) 중 RCP 시나리오에 따른 복숭아의 2020년부터 2100년까지 10년 단위의 재배적지구분별 면적률

복숭아의 적지 면적률은 우리나라 전체 농경지 중 39.2%로 나타났으며, 전라남도 지역이 14.4%로 가장 높았다. 하지만 RCP 4.5 시나리오에 따르면 전라남도 지역은 점차적으로 적지 면적이 감소하고 경기도, 충청남도, 경상북도 지역은 적지 면적이 증가하였다. 전체적으로는 적지 면적이 2040년까지 1.5배 가까이 증가하였으며, 그 이후 점차적으로 2100년에는 평년 수준으로 감소하였다. RCP 8.5 시나리오에서는 2040년까지는 평년 수준으로 적지 면적이 유지되었으며, 그 이후 급격하게 감소하여 2100년에는 우리나라 전체 농경지 중 2.4%만이 적지로 예측되었다(표 19).

표 8. RCP 8.5 & 4.5 기후변화 시나리오에 따른 우리나라 총 농경지 면적 중 행정구역 도 단위 복숭아 재배적지 면적 비율(%)

Administrative district	Normal	2020s	2030s	2040s	2050s	2060s	2070s	2080s	2090s
Metropolitan City	2.3	2.3	2.2	1.5	1.2	0.9	0.3	0.1	0.0
Sejong-si	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0
Gyeonggi-do	0.2	0.3	0.5	1.0	1.4	2.1	1.3	0.2	0.0
Gangwon-do	0.8	1.2	1.2	1.2	0.8	0.4	1.2	1.4	0.9
Chungcheongbuk-do	0.0	0.2	0.1	0.3	0.9	1.2	1.3	0.6	0.1
RCP 8.5 Chungcheongnam-do	3.4	5.7	5.9	7.3	7.8	4.4	1.1	0.2	0.0
Jeollabuk-do	6.4	7.4	7.2	7.1	4.6	2.4	1.7	1.1	0.6
Jeollanam-do	14.4	13.2	10.7	5.1	2.5	0.9	0.2	0.0	0.0
Gyeongsangbuk-do	3.1	5.2	4.8	5.7	5.7	3.7	3.0	1.5	0.6
Gyeongsangnam-do	6.3	6.1	5.1	3.2	2.0	1.2	0.9	0.5	0.2
Jeju-si	2.3	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Area Ratio	39.2	42.0	38.0	32.4	27.2	17.5	11.1	5.5	2.5
Metropolitan City	2.3	3.4	3.2	2.8	2.1	1.8	1.9	1.7	1.4
Sejong-si	0.0	0.3	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.4
Gyeonggi-do	0.2	2.5	4.9	4.5	6.8	7.7	5.6	4.7	6.9
Gangwon-do	0.8	1.2	1.5	1.3	1.4	1.7	1.0	0.9	2.1
Chungcheongbuk-do	0.0	1.4	3.1	2.5	3.6	4.3	2.9	2.6	4.5
RCP 4.5 Chungcheongnam-do	3.4	10.3	11.9	11.8	12.0	11.4	11.2	10.2	7.2
Jeollabuk-do	6.4	9.8	10.9	10.5	8.7	6.4	7.3	5.3	4.1
Jeollanam-do	14.4	13.2	9.0	7.7	3.9	2.4	3.2	2.5	1.5
Gyeongsangbuk-do	3.1	10.1	13.6	12.0	11.9	11.2	10.6	9.6	8.8
Gyeongsangnam-do	6.3	7.8	6.8	6.1	3.9	2.9	3.2	2.8	2.4
Jeju-si	2.3	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Area Ratio	39.2	60.3	65.4	59.7	55.0	50.4	47.5	40.8	39.3

Metropolitan City = Total optimal area of Seoul, Incheon, Daejeon, Gwangju, Ulsan and Busan

(4) 포도

농업용 상세 전자기후도를 이용하여 포도의 30m 고해상도 미래 재배적지 전자지도를 작성하였다. 포도의 재배 적지는 평년 대비 RCP 8.5와 4.5 시나리오 모두 크게 감소하였다. 2090년대는 RCP 8.5에서 전체 농경지 중 0.2%, RCP 4.5는 2.9%가 포도 재배 적지로 예측되었다.

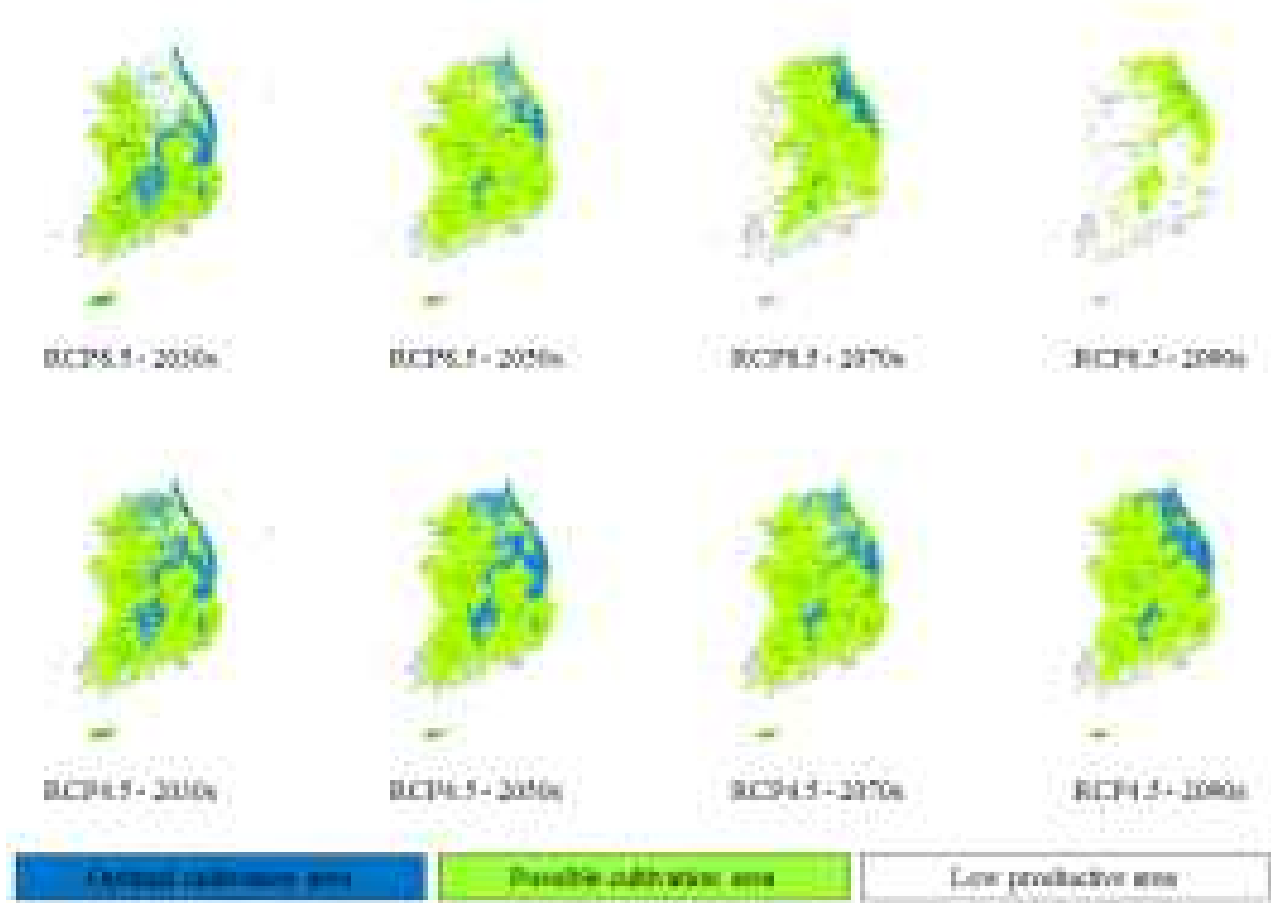


그림 406. 고해상도(30m) 농업용 상세 전자기후도를 이용한 포도의 미래 재배지 전자 지도

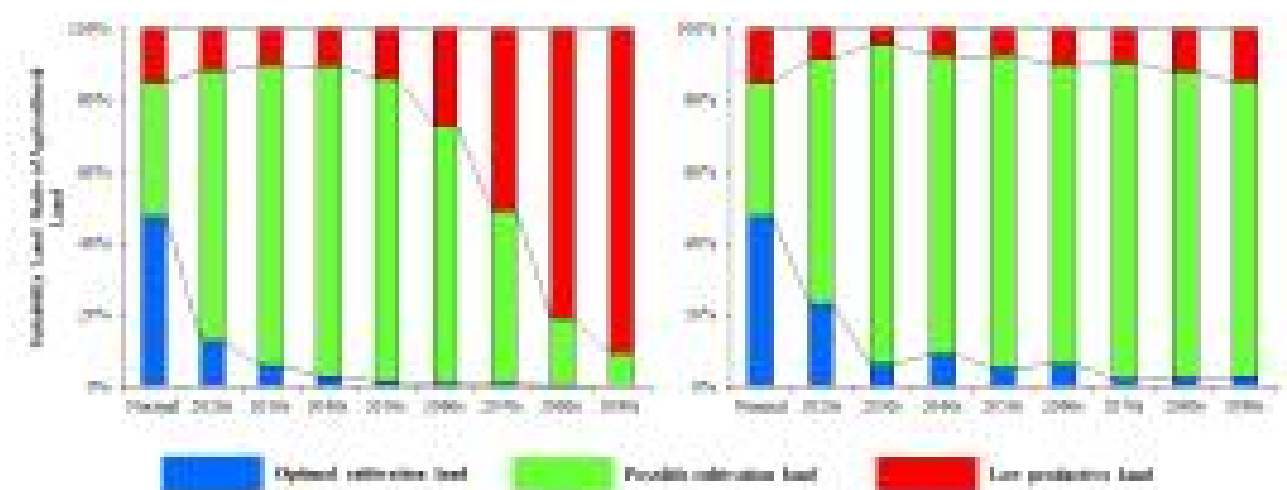


그림 407. 우리나라 농경지 총 면적(환경부, 2010) 중 RCP 시나리오에 따른 포도의 2020년부터 2100년까지 10년 단위의 재배지 구분별 면적 변동 그래프(좌: RCP8.5, 우: RCP4.5)

포도는 우리나라 전체 농경지 면적 중 평년 기후에 따른 재배 적지는 47.7%의 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 지역적으로는 충청남도가 전체 농경지 면적 중 10%의 적지를 보였으며, 경상북도 7.8%, 전라북도 7% 순서로 적지 면적 비율이 높았다. RCP 8.5와 4.5 시나리오에서 모두 포도의 재배적지가 크게 감소하는 것으로 예측되었으며, RCP 8.5 2090년대에 우리나라 전체 농경지 면적 중 강원도 일부 지역 0.2%만 기후학적인 재배적지로 예측되었다(표 20).

표 9. RCP 8.5 & 4.5 기후변화 시나리오에 따른 우리나라 총 농경지 면적 중 행정구역 도 단위 포도 재배적지 면적 비율(%)

Administrative district	Normal	2020s	2030s	2040s	2050s	2060s	2070s	2080s	2090s
RCP 8.5									
Metropolitan City	2.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sejong-si	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeonggi-do	6.1	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gangwon-do	0.4	1.3	0.7	0.5	0.7	0.7	1.0	0.4	0.2
Chungcheongbuk-do	2.8	1.3	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Chungcheongnam-do	10.0	1.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollabuk-do	7.0	1.7	1.2	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0
Jeollanam-do	6.6	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangbuk-do	7.8	4.1	2.6	1.0	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0
Gyeongsangnam-do	3.7	1.3	0.9	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
Jeju-si	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Area Ratio	47.7	12.9	6.0	2.8	1.6	1.0	1.1	0.4	0.2
RCP 4.5									
Metropolitan City	2.4	0.7	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sejong-si	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeonggi-do	6.1	0.7	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
Gangwon-do	0.4	1.9	1.4	1.8	1.5	2.2	0.9	1.0	1.5
Chungcheongbuk-do	2.8	2.4	0.5	1.0	0.4	0.6	0.1	0.1	0.1
Chungcheongnam-do	10.0	1.3	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollabuk-do	7.0	2.1	1.0	1.3	0.8	0.8	0.5	0.5	0.4
Jeollanam-do	6.6	1.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangbuk-do	7.8	9.7	2.2	3.6	2.0	1.9	0.7	0.8	0.7
Gyeongsangnam-do	3.7	2.8	0.8	1.2	0.6	0.5	0.2	0.4	0.3
Jeju-si	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Area Ratio	47.7	23.0	6.3	9.2	5.4	6.1	2.5	2.7	2.9

Metropolitan City = Total optimal area of Seoul, Incheon, Daejeon, Gwangju, Ulsan and Busan

(5) 감귤(조생온주밀감 & 한라봉부지화)

RCP 8.5 시나리오에 따른 조생온주밀감의 미래 재배지는 제주도에서 2040년대까지 전체 농경지 면적 중 80%까지 증가하였으나, 이후 급격하게 감소하여 2090년대에는 1.1%로 예측되었다. RCP 4.5에서는 2030년대에 제주도 대부분의 농경지에서 조생온주밀감 재배 최적지로 예측되었다(그림 27, 28).

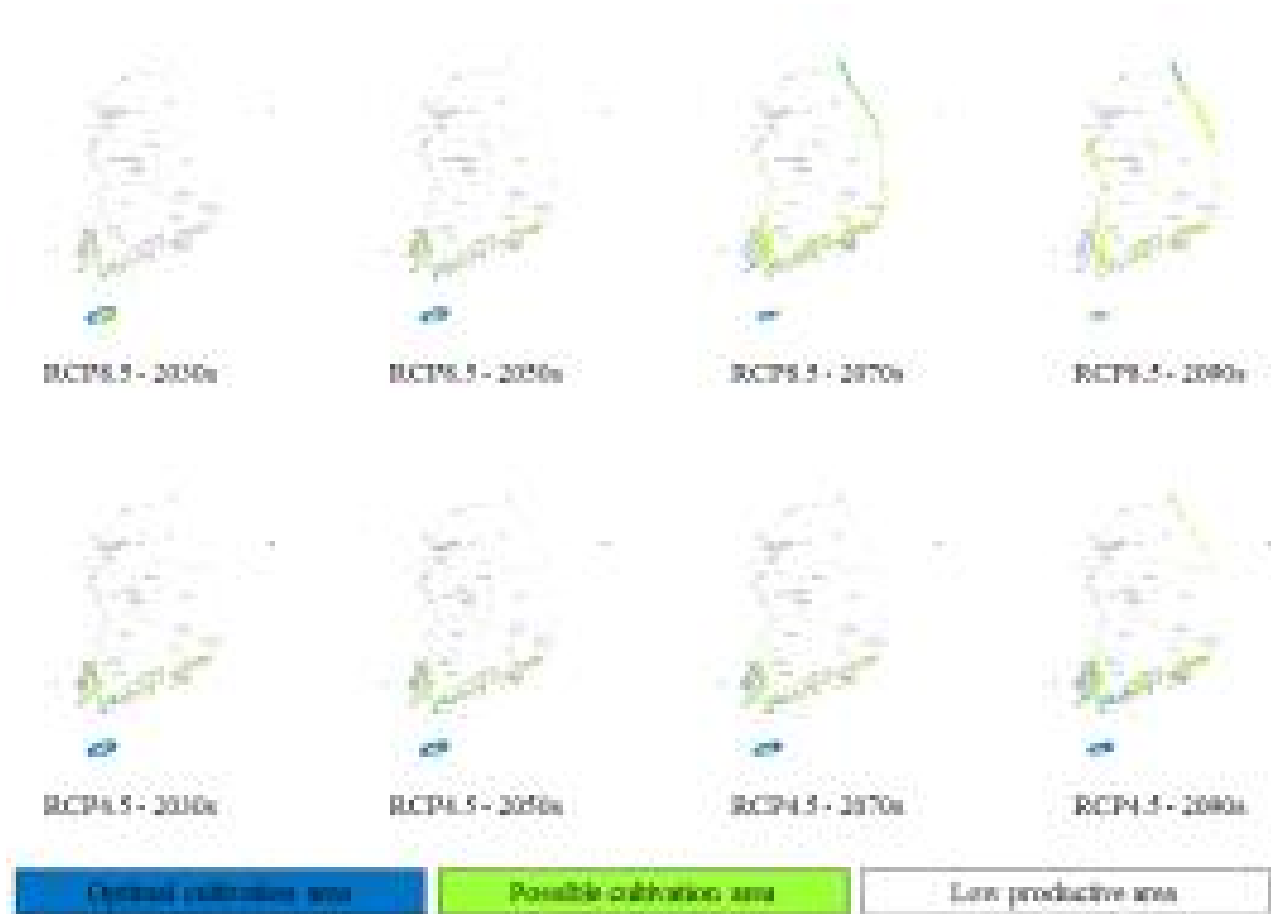


그림 408. 고해상도(30m) 농업용 상세 전자기후도를 이용한 조생온주밀감의 미래 재배지 전자 지도

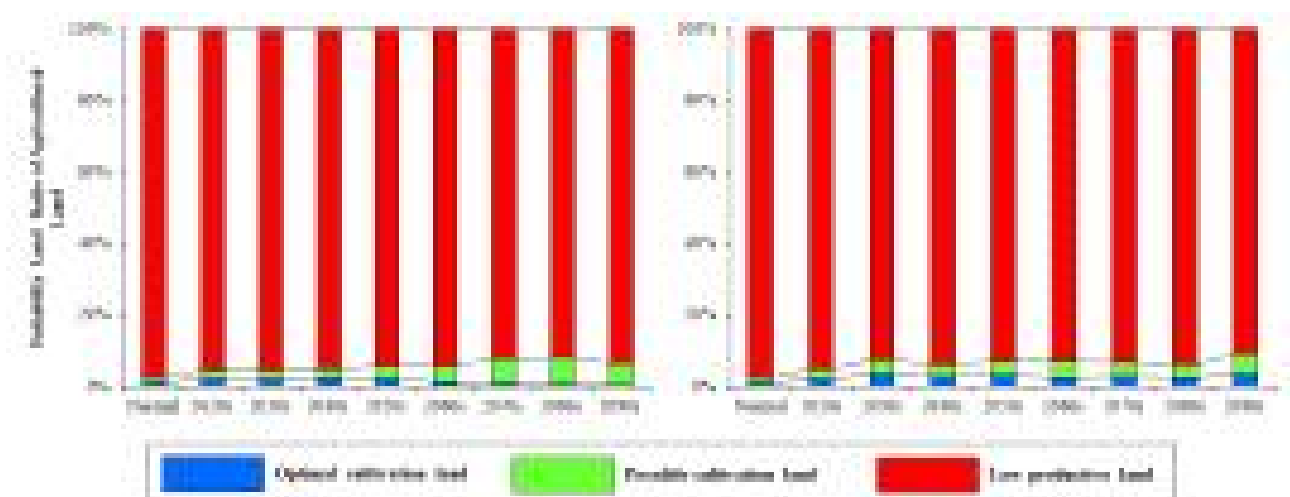


그림 409. 우리나라 농경지 총 면적(환경부, 2010) 중 RCP 시나리오에 따른 조생온주밀감의 2020년부터 2100년까지 10년 단위의 재배지 구분별 면적 변동 그래프(좌: RCP8.5, 우: RCP4.5)

조생온주밀감의 평년 기후에 따른 재배적지는 우리나라 전체 농경지 면적 중 제주도 1% 지역에서 품질 좋은 감귤 생산이 가능한 것으로 나타났다. RCP8.5 시나리오와 같이 지속적으로 온도의 상승이 있을 경우 2040년대까지는 적지 면적이 증가하지만, 이후 점차 감소하여 2090년대에는 강원도 해안선 일부, 제주도 일부 지역 0.3% 만이 적지로 예측되었다. RCP4.5 시나리오에서는 2090년대에 3.5%로 평년에 비해 3.5배의 적지 면적이 늘어나는 것으로 예측되었다(표 21).

표 10. RCP 8.5 & 4.5 기후변화 시나리오에 따른 우리나라 총 농경지 면적 중 행정구역 도 단위 조생온주밀감 재배적지 면적 비율(%)

Administrative district	Normal	2020s	2030s	2040s	2050s	2060s	2070s	2080s	2090s
Metropolitan City	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sejong-si	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeonggi-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gangwon-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.2
Chungcheongbuk-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
RCP 8.5 Chungcheongnam-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollabuk-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollanam-do	0.0	0.1	0.1	0.2	0.5	0.6	0.2	0.0	0.0
Gyeongsangbuk-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangnam-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
Jeju-si	1.0	2.1	2.2	2.4	1.8	0.7	0.2	0.1	0.0
Total Area Ratio	1.0	2.2	2.3	2.6	2.3	1.4	0.9	0.7	0.3
Metropolitan City	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sejong-si	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeonggi-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gangwon-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Chungcheongbuk-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
RCP 4.5 Chungcheongnam-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollabuk-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollanam-do	0.0	0.1	0.9	0.5	0.8	1.2	1.0	0.8	1.9
Gyeongsangbuk-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangnam-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2
Jeju-si	1.0	2.2	2.9	2.6	2.5	1.4	2.0	1.6	1.3
Total Area Ratio	1.0	2.3	3.8	3.1	3.4	2.7	3.0	2.5	3.5

Metropolitan City = Total optimal area of Seoul, Incheon, Daejeon, Gwangju, Ulsan and Busan

한라봉부지화에 대한 미래 재배지 예측지도에 의하면 RCP 8.5와 4.5 두 시나리오에서 모두 재배 적지가 점차적으로 증가하였다. 제주도는 한라산 일부 지역을 제외하고는 대부분의 지역이 기후학적으로 재배 최적지로 예측되었으며, RCP 8.5 시나리오에서는 2090년대에 강원도 해안가 일부 지역에서 한라봉부지화 재배가 가능할 것으로 예측되었다(그림 29. 30).

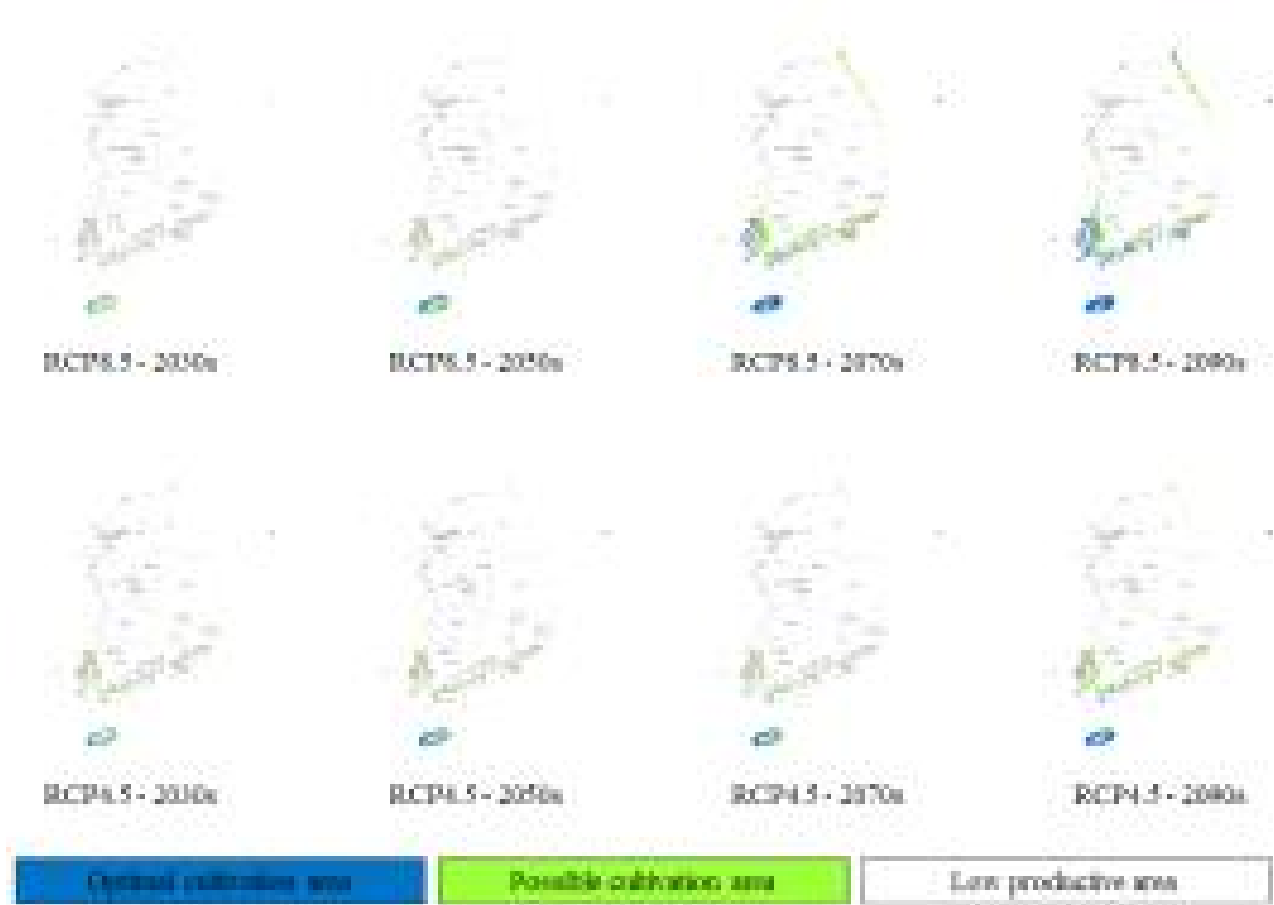


그림 410. 고해상도(30m) 농업용 상세 전자기후도를 이용한 한라봉부지화의 미래 재배지 전자 지도

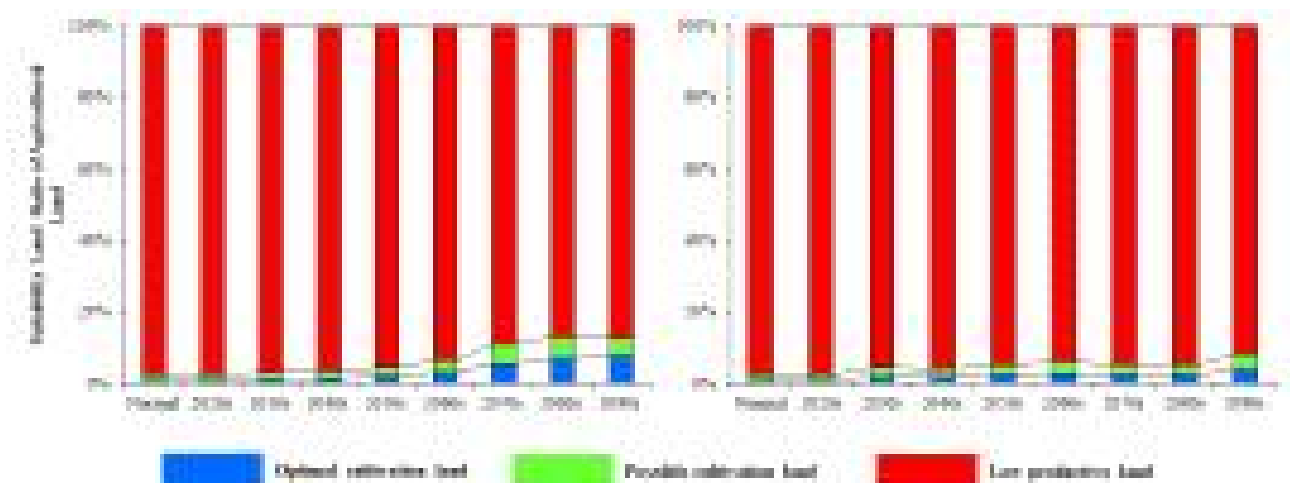


그림 411. 우리나라 농경지 총 면적(환경부, 2010) 중 RCP 시나리오에 따른 한라봉부지화의 2020년부터 2100년까지 10년 단위의 재배지 구분별 면적 변동 그래프(좌: RCP8.5, 우: RCP4.5)

표 11. RCP 8.5 & 4.5 기후변화 시나리오에 따른 우리나라 총 농경지 면적 중 행정구역 도 단위 한라봉부지화 재배적지 면적 비율(%)

Administrative district	Normal	2020s	2030s	2040s	2050s	2060s	2070s	2080s	2090s
RCP 8.5									
Metropolitan City	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
Sejong-si	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeonggi-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gangwon-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.4
Chungcheongbuk-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Chungcheongnam-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollabuk-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollanam-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5	2.3	3.5	4.2
Gyeongsangbuk-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangnam-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.3
Jeju-si	0.8	0.7	1.2	1.7	2.3	2.7	3.0	3.0	3.0
Total Area Ratio	0.8	0.7	1.2	1.7	2.5	3.3	5.7	7.1	8.0
RCP 4.5									
Metropolitan City	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sejong-si	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeonggi-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gangwon-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Chungcheongbuk-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Chungcheongnam-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollabuk-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollanam-do	0.0	0.0	0.2	0.1	0.2	0.4	0.2	0.2	1.1
Gyeongsangbuk-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangnam-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Jeju-si	0.8	0.8	1.8	1.9	2.4	2.6	2.5	2.4	2.9
Total Area Ratio	0.8	0.8	2.0	2.0	2.6	3.0	2.7	2.6	4.1

Metropolitan City = Total optimal area of Seoul, Incheon, Daejeon, Gwangju, Ulsan and Busan

(6) 단감

농업용 미래 상세 전자기후도와 전문가의 단감 재배지 구분 기후 조건 자료를 바탕으로 30m 기반의 고해상도 재배지 예측 전자지도를 제작하였다. 단감은 현재 남해안을 따라 기후학적인 재배 적지가 분포하고 있으나, RCP 8.5 와 4.5 시나리오에 따라 기후 변화가 진행이 된다면 점차 재배 적지가 북상하여 증가될 것으로 예측된다(그림 31, 32).

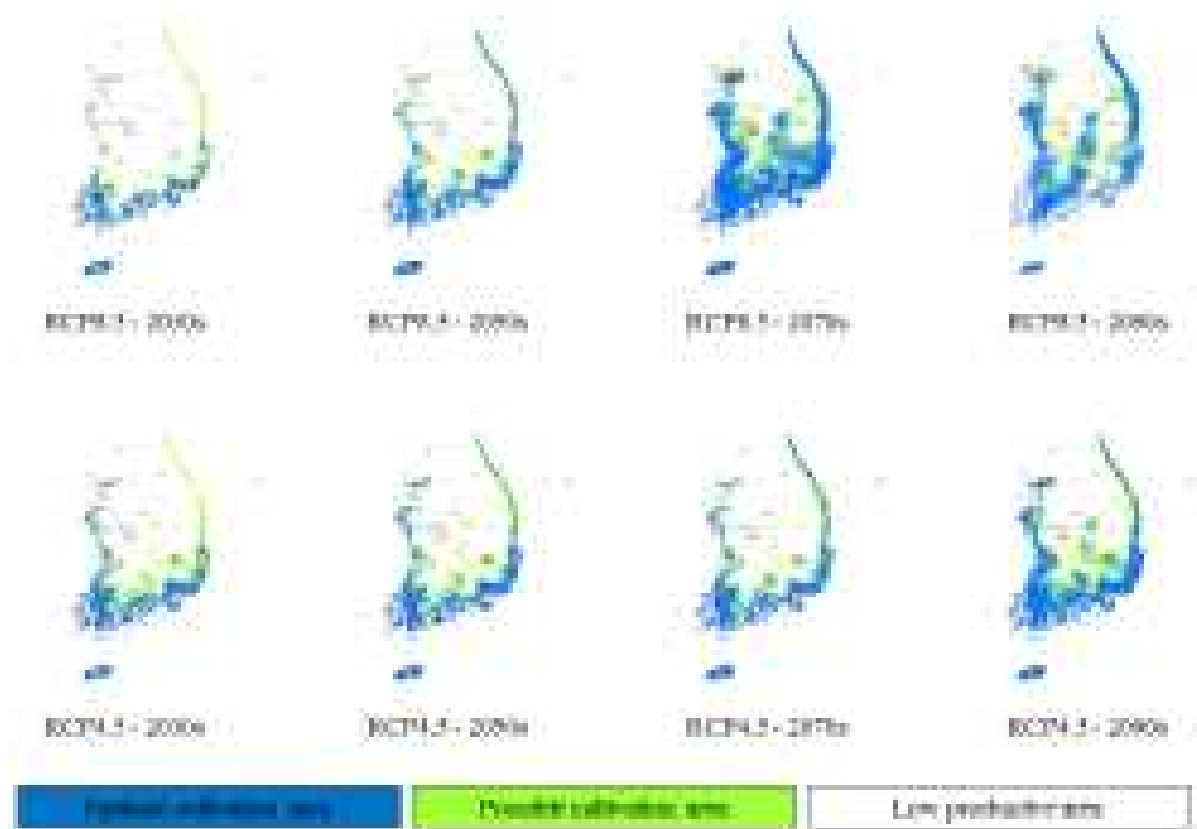


그림 412. 고해상도(30m) 농업용 상세 전자기후도를 이용한 단감의 미래 재배지 전자 지도

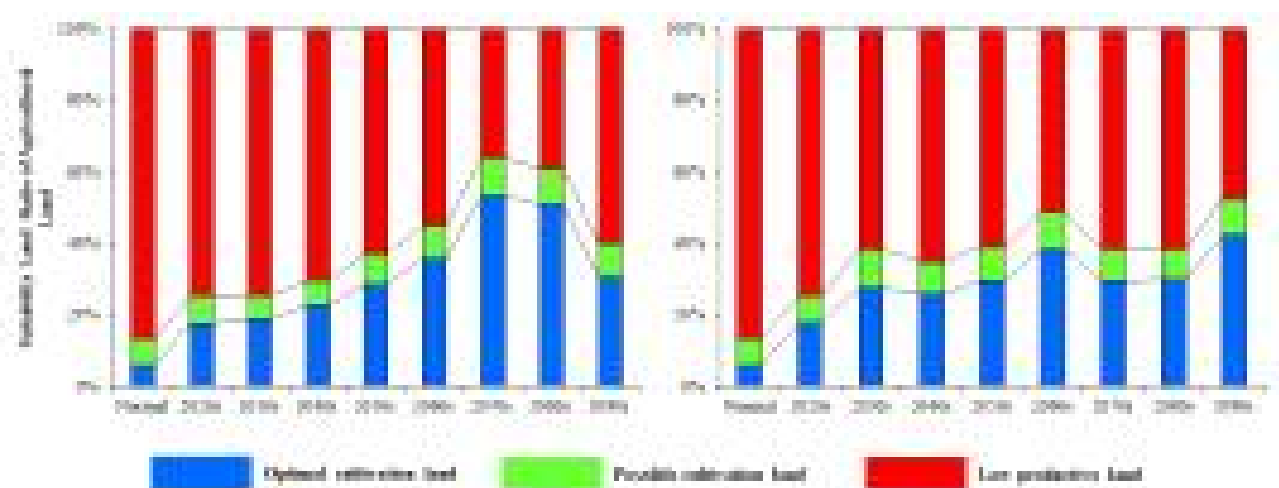


그림 413. 우리나라 농경지 총 면적(환경부, 2010) 중 RCP 시나리오에 따른 단감의 2020년부터 2100년까지 10년 단위의 재배지 구분별 면적 변동 그래프(좌: RCP8.5, 우: RCP4.5)

평년 기후에 따르면 우리나라 전체 농경지 면적 중 6% 면적이 기후학적인 재배 적지로

나타났으며, 전라남도가 2.9% 재배 적지 면적 비율이 가장 높았다. RCP 8.5 시나리오에 따르면 2090년대에는 전체 농경지의 30% 정도가 단감의 재배적지로 예측되었으며, 평년에 비해 5배 적지 면적이 증가할 것으로 예측되었다. RCP 4.5 시나리오에서는 전체 농경지 중 42.3%가 재배 적지로 예측되었다(표 23).

표 12. RCP 8.5 & 4.5 기후변화 시나리오에 따른 우리나라 총 농경지 면적 중 행정구역 단위 단감 재배적지 면적 비율(%)

Administrative district	Normal	2020s	2030s	2040s	2050s	2060s	2070s	2080s	2090s
RCP 8.5									
Metropolitan City	0.2	0.8	0.8	1.2	1.6	1.9	3.1	2.6	1.6
Sejong-si	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0
Gyeonggi-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	1.0	1.5	1.3
Gangwon-do	0.0	0.1	0.1	1.0	1.1	1.2	1.3	1.3	1.3
Chungcheongbuk-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.3
Chungcheongnam-do	0.0	0.5	0.7	1.1	1.9	4.0	7.5	8.4	6.2
Jeollabuk-do	0.0	0.6	0.7	1.0	2.4	5.1	8.3	8.3	5.2
Jeollanam-do	2.9	9.7	10.2	11.2	12.5	13.5	14.6	12.6	7.8
Gyeongsangbuk-do	0.0	0.7	0.8	1.3	1.9	2.4	7.1	7.4	3.9
Gyeongsangnam-do	0.9	2.5	2.6	3.1	4.2	4.5	7.1	5.8	2.1
Jeju-si	2.0	2.9	3.0	3.0	3.0	3.0	2.9	2.1	1.1
Total Area Ratio	6.0	17.7	18.8	22.9	28.6	35.8	53.3	50.7	30.7
RCP 4.5									
Metropolitan City	0.2	0.8	1.5	1.4	1.6	2.1	1.6	1.7	2.3
Sejong-si	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeonggi-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.4
Gangwon-do	0.0	0.1	0.0	0.4	0.9	1.1	1.1	1.2	1.1
Chungcheongbuk-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1
Chungcheongnam-do	0.0	0.7	2.3	1.7	2.8	4.1	2.6	2.4	4.8
Jeollabuk-do	0.0	0.6	2.6	2.3	2.4	5.7	2.8	2.8	6.5
Jeollanam-do	2.9	9.5	12.6	11.9	12.5	13.6	12.7	12.7	14.5
Gyeongsangbuk-do	0.0	0.7	1.3	1.5	2.1	3.3	1.9	1.9	3.8
Gyeongsangnam-do	0.9	2.7	4.1	3.7	4.0	5.3	3.9	4.1	5.7
Jeju-si	2.0	2.9	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Total Area Ratio	6.0	18.0	27.5	25.9	29.5	38.4	29.8	29.9	42.3

Metropolitan City = Total optimal area of Seoul, Incheon, Daejeon, Gwangju, Ulsan and Busan

(7) 인삼

인삼은 평년(1981-2010) 기후에 의하면 우리나라 전체 농경지 면적 중 약 80%가 적지로 나타났다. 미래 기후변화 시나리오에 따르면 RCP 8.5와 4.5 두 시나리오에서 인삼의 재배 적지 및 가능지의 면적이 점차적으로 감소할 것으로 예측되었다. 2090년대에는 RCP 8.5에서 1.1%, RCP4.5에서 5.9%의 농경지 면적만이 기후학적으로 인삼이 재배될 수 있는 최적지로 예측되었다(그림 33, 34, 표 27).

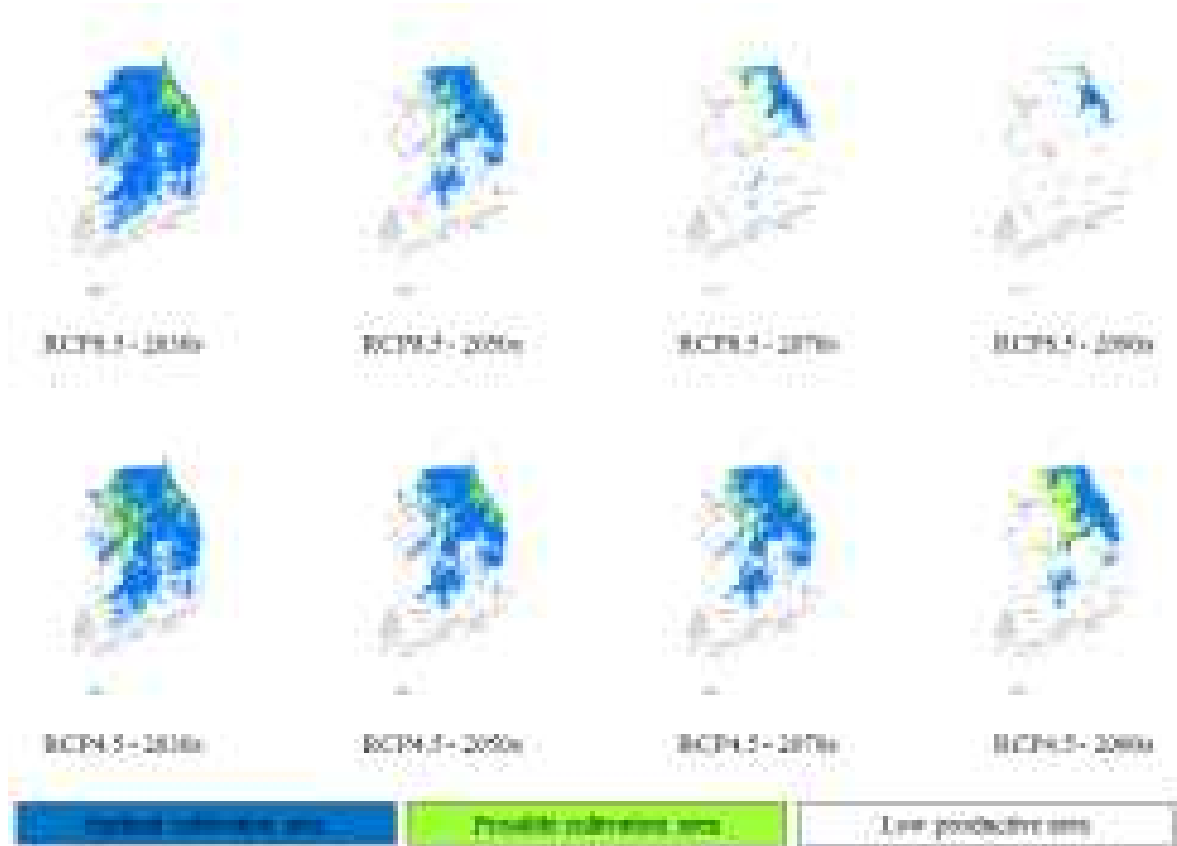


그림 414. 고해상도(30m) 농업용 상세 전자기후도를 이용한 인삼의 미래 재배지 전자 지도

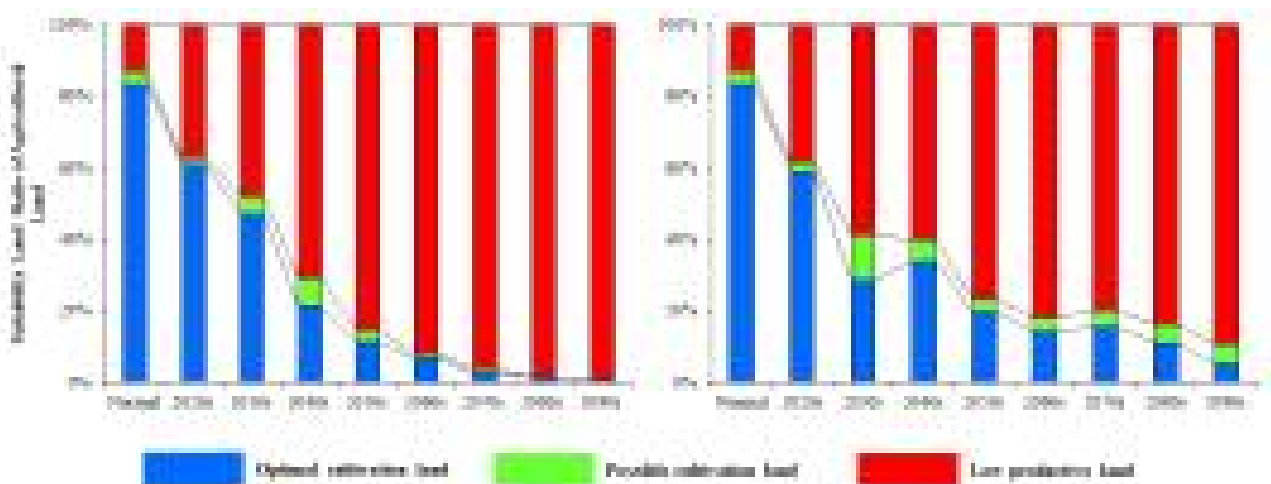


그림 415. 우리나라 농경지 총 면적(환경부, 2010) 중 RCP 시나리오에 따른 인삼의 2020년부터 2100년까지 10년 단위의 재배지 구분별 면적 변동 그래프(좌: RCP8.5, 우: RCP4.5)

표 13. RCP 8.5 & 4.5 기후변화 시나리오에 따른 우리나라 총 농경지 면적 중 행정구역 도 단위 인삼 재배적지 면적 비율(%)

Administrative district	Normal	2020s	2030s	2040s	2050s	2060s	2070s	2080s	2090s
RCP 8.5									
Metropolitan City	3.4	1.8	1.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sejong-si	0.6	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeonggi-do	11.0	11.0	8.8	2.2	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0
Gangwon-do	3.8	4.8	5.0	4.3	3.5	3.0	1.9	1.5	1.0
Chungcheongbuk-do	6.7	6.9	5.7	3.1	1.5	0.9	0.1	0.0	0.0
Chungcheongnam-do	13.0	12.0	7.7	1.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0
Jeollabuk-do	11.0	6.4	4.3	2.4	1.4	0.8	0.2	0.0	0.0
Jeollanam-do	11.6	2.3	1.4	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangbuk-do	14.7	12.1	10.2	5.8	3.2	1.5	0.3	0.1	0.0
Gyeongsangnam-do	7.7	2.9	2.4	1.3	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0
Jeju-si	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Area Ratio	83.6	60.9	47.1	21.5	11.3	6.8	2.5	1.7	1.1
RCP 4.5									
Metropolitan City	3.4	1.8	0.9	1.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0
Sejong-si	0.6	0.5	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeonggi-do	11.0	10.6	3.3	6.3	2.9	1.9	1.4	0.7	0.1
Gangwon-do	3.8	5.1	4.5	4.9	4.4	4.2	4.0	3.6	2.4
Chungcheongbuk-do	6.7	6.6	3.7	4.6	3.5	2.5	2.7	1.5	0.4
Chungcheongnam-do	13.0	10.8	3.3	4.1	1.5	0.7	0.8	0.3	0.0
Jeollabuk-do	11.0	5.8	3.0	2.8	1.9	1.4	1.7	1.3	0.8
Jeollanam-do	11.6	2.2	0.8	0.6	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0
Gyeongsangbuk-do	14.7	12.4	7.4	7.8	4.5	3.0	3.9	2.9	1.2
Gyeongsangnam-do	7.7	3.0	1.9	1.6	0.9	0.6	0.8	0.6	0.4
Jeju-si	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Area Ratio	83.6	58.8	28.7	33.9	20.0	14.5	15.5	11.1	5.4

Metropolitan City = Total optimal area of Seoul, Incheon, Daejeon, Gwangju, Ulsan and Busan

(8) 당귀

당귀는 평년(1981-2010년) 기후에 의하면 우리나라 전체 농경지 면적 중 3.2% 면적이 재배 적지로 나타났다. 미래 기후시나리오에 따르면 RCP 8.5와 4.5 두 시나리오에서 모두 2090년대 우리나라에서 당귀의 재배 적지는 거의 없어질 것으로 예측되었다(그림 35).

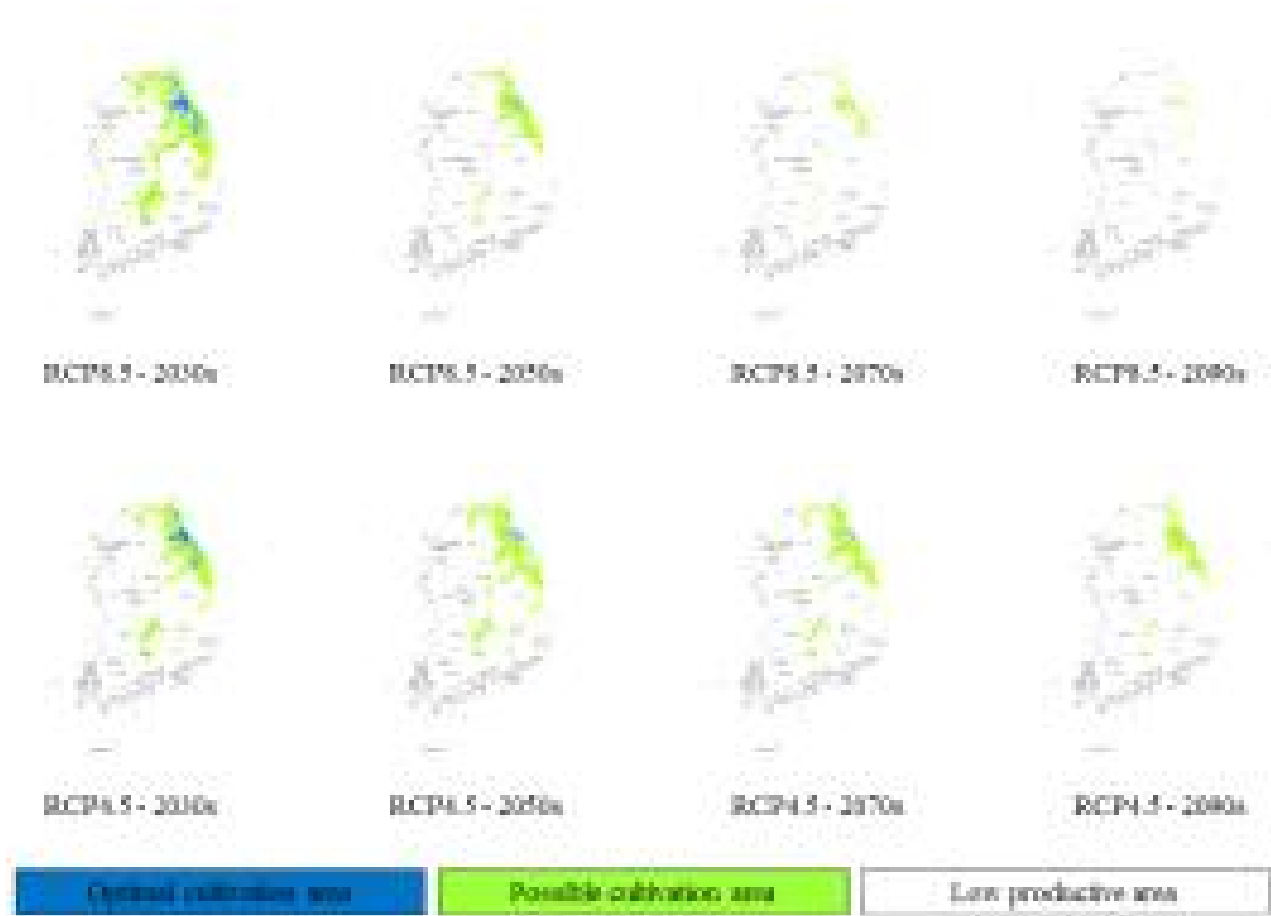


그림 416. 고해상도(30m) 농업용 상세 전자기후도를 이용한 당귀의 미래 재배지 전자 지도

RCP 8.5 시나리오에서는 2060년대부터는 우리나라에서 당귀의 재배가 거의 불가능할 것으로 예측되었고, RCP 4.5에서는 일부의 면적만이 재배 가능한 것으로 예측되었다.

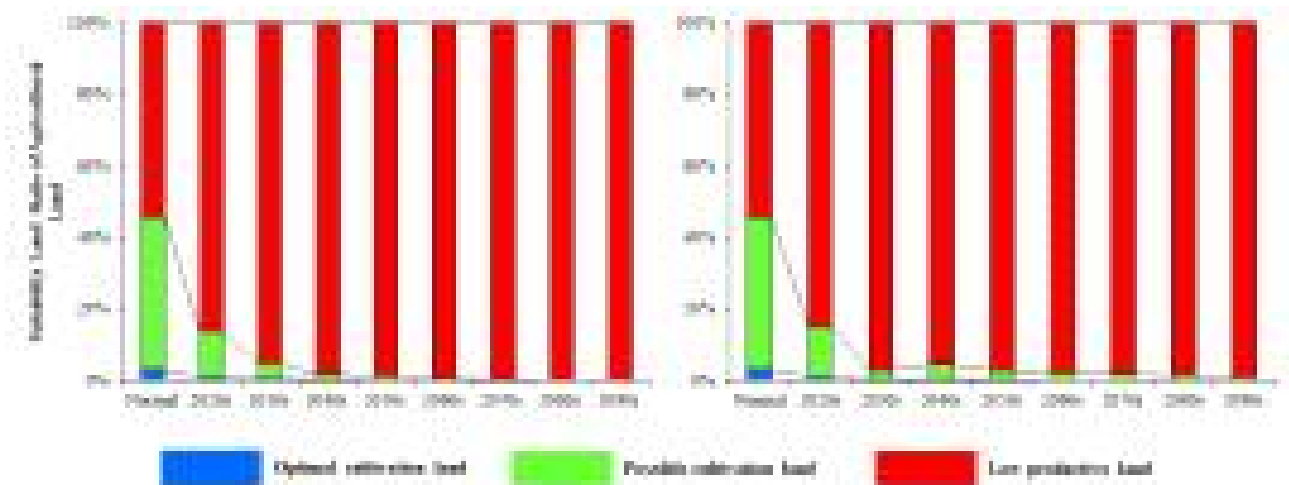


그림 417. 우리나라 농경지 총 면적(환경부, 2010) 중 RCP 시나리오에 따른 당귀의 2020년부터 2100년까지 10년 단위의 재배지 구분별 면적 변동 그래프(좌: RCP8.5, 우: RCP4.5)

당귀는 평년 기후자료에 따르면 전체 농경지 면적 중 3.2%가 기후학적인 적지로 나타났다. 그 중 강원도가 2.1%로 가장 높게 나타났다. 하지만 RCP 8.5와 4.5 시나리오에서 모두 미래 2090년대에는 우리나라에서 당귀의 재배 적지가 거의 사라지는 것으로 예측되었다(표 25).

표 14. RCP 8.5 & 4.5 기후변화 시나리오에 따른 우리나라 총 농경지 면적 중 행정구역 도 단위 당귀 재배적지 면적 비율(%)

Administrative district	Normal	2020s	2030s	2040s	2050s	2060s	2070s	2080s	2090s
Metropolitan City	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sejong-si	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeonggi-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gangwon-do	2.1	0.9	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Chungcheongbuk-do	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
RCP 8.5 Chungcheongnam-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollabuk-do	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollanam-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangbuk-do	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangnam-do	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeju-si	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Area Ratio	3.2	0.9	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Metropolitan City	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sejong-si	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeonggi-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gangwon-do	2.1	0.9	0.5	0.5	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
Chungcheongbuk-do	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
RCP 4.5 Chungcheongnam-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollabuk-do	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollanam-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangbuk-do	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangnam-do	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeju-si	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Area Ratio	3.2	0.9	0.5	0.5	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1

Metropolitan City = Total optimal area of Seoul, Incheon, Daejeon, Gwangju, Ulsan and Busan

(9) 천궁

농업용 상세 전자기후도와 천궁의 재배지를 구분할 수 있는 기후 조건을 활용하여 30m 고해상도 재배지 전자지도를 작성하였다. 천궁의 2090년대 재배 적지는 RCP8.5 시나리오에서는 없었으며, RCP4.5 시나리오에서는 강원도 산간지역 일부만 기후학적인 재배 적지로 예측되었다(그림 37, 38).

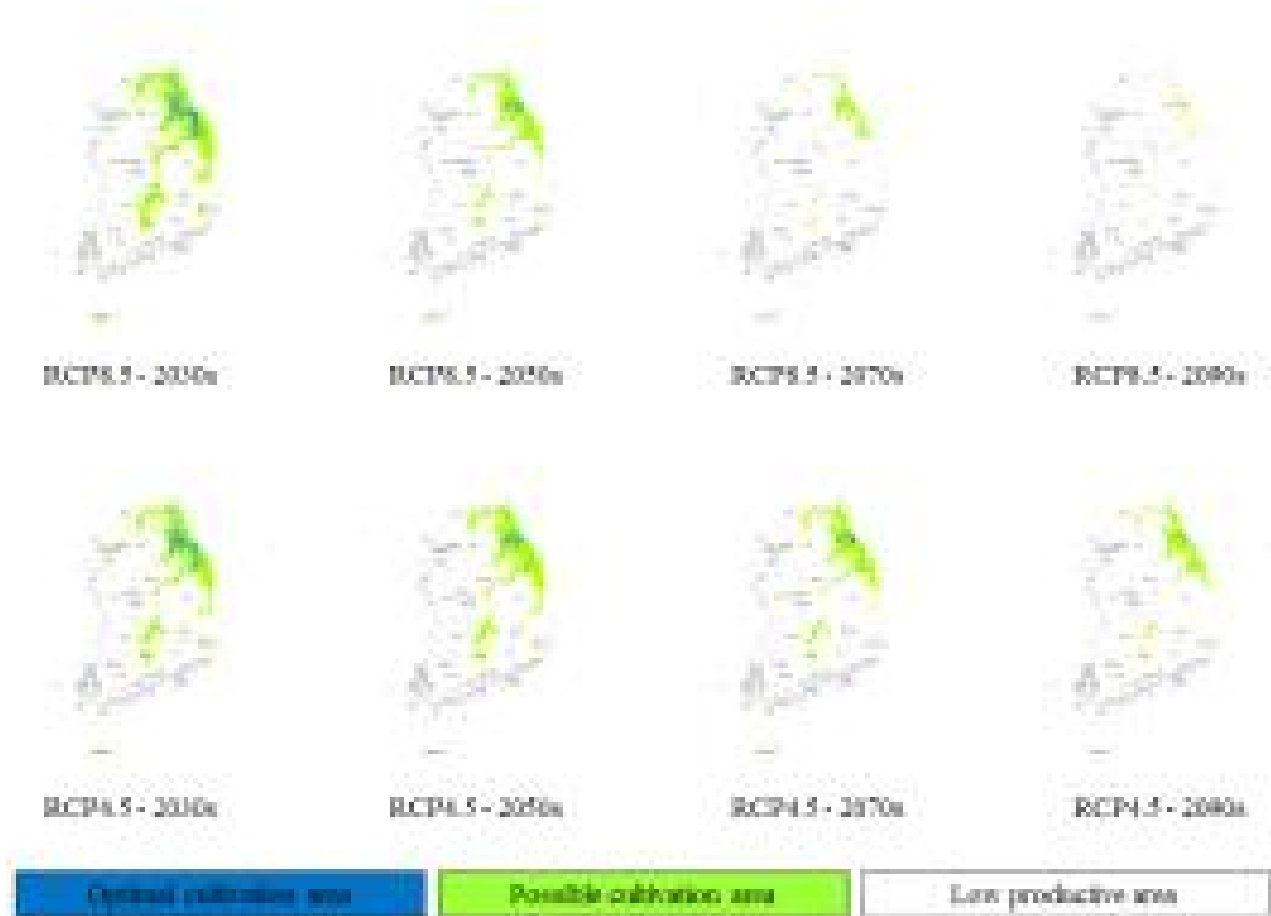


그림 418. 고해상도(30m) 농업용 상세 전자기후도를 이용한 천궁의 미래 재배지 전자 지도

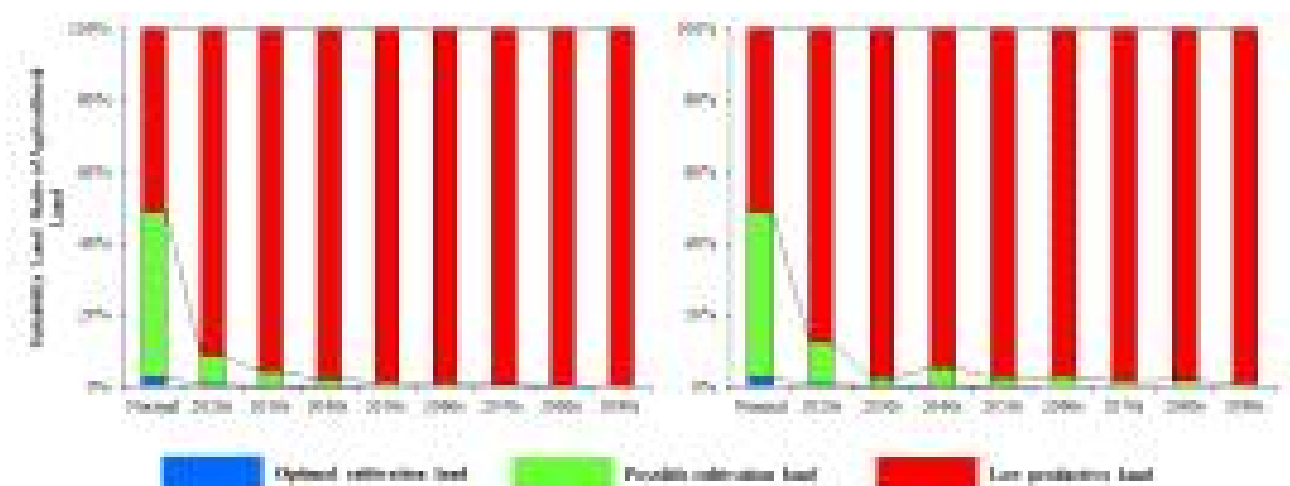


그림 419. 우리나라 농경지 총 면적(환경부, 2010) 중 RCP 시나리오에 따른 천궁의 2020년부터 2100년까지 10년 단위의 재배지 구분별 면적 변동 그래프(좌: RCP8.5, 우: RCP4.5)

평년 기후자료에 따른 천궁의 재배 적지 면적은 전체 우리나라 농경지 중 2.6%로 나타났다(표 26).

표 15. RCP 8.5 & 4.5 기후변화 시나리오에 따른 우리나라 총 농경지 면적 중 행정구역 도 단위 천궁 재배적지 면적 비율(%)

Administrative district	Normal	2020s	2030s	2040s	2050s	2060s	2070s	2080s	2090s
Metropolitan City	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sejong-si	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeonggi-do	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gangwon-do	0.7	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
Chungcheongbuk-do	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Chungcheongnam-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollabuk-do	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollanam-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangbuk-do	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangnam-do	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeju-si	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Area Ratio	2.6	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
Metropolitan City	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sejong-si	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeonggi-do	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gangwon-do	0.7	0.7	0.4	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1
Chungcheongbuk-do	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Chungcheongnam-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollabuk-do	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeollanam-do	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangbuk-do	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gyeongsangnam-do	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jeju-si	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Area Ratio	2.6	0.7	0.4	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1

Metropolitan City = Total optimal area of Seoul, Incheon, Daejeon, Gwangju, Ulsan and Busan

3. E-book 제작 및 자료발간(발간등록번호 : 11-1390804-000500-01, ISBN : 978-89-480-2889-8 93520)

본 연구 대상 작물인 사과, 배, 복숭아, 포도, 감귤(조생온주밀감 & 한라봉부지화), 단감, 인삼, 당귀, 천궁에 대한 평년 30년(1981-2010) 기후자료, RCP 8.5 & 4.5 기반으로 개발된 농업용 미래 상세 전자기후도를 활용하여 제작된 재배지 전자지도 및 시·군·구 행정구역 단위의 재배지 구분별 면적자료를 포함하는 E-book을 제작하였다. 하나의 작목별 총 467페이지이며, 전체 4,679페이지이다.



그림 420. 미래 기후시나리오를 활용한 주요 과수 및 약용작물의 시군구 재배지 전자지도 E-book 제작



그림 421. 시군구 재배지 전자지도 E-book 화면



제7절. 미래 기상요인(RCP 적용)에 따른 주요 과수작물의 유전자 발현양상 구명

1. 재료 및 방법

가. 시험재료(대상과종)

수체의 특성 변화 조사를 위하여 후지사과, 거봉포도나무, 감귤은 온주밀감(*C. unshiu*)인 하례조생과 만숙종 만다린 잡종인 부지화(*C. reticulata*) 나무 잎을 공시하였다. 과실의 특성 구명을 위하여 후지와 홍로사과, 거봉과 캠벨얼리 포도, 온주밀감과 부지화 과실을 고온처리에 사용하였다.

나. 처리 내용

○ 수체온도처리

RCP 시나리오에 따른 구현된 온도조건을 생육기에 수체에 처리하였다. 온도처리는 온도 구배하우스를 활용하였으며, 상온유지 포트를 생육상에 단기간처리도 병행하였다. 광환경은 $800 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, 이산화탄소 농도는 450ppm으로 고정하여 처리하였다.

○ 과실 온도 처리

시험포장에 재식 된 각각의 과실을 성목에서 수확하고 가용성 고형물 함량과 색도를 측정한 후(표1-3, 그림1), 성숙단계를 3단계로 구분하여 실험에 사용하였다(Fig. 1). 가용성 고형물 함량은 과육의 손상 없이 껍질을 벗기고 착즙하여 거즈로 거른 후 굴절당도계(Digital Refractometer PAL-1, Atago, Japan)로 측정하였고, 과피의 색도는 색차계(Chroma Meter CR-300, Minolta, Japan)를 이용하여 하례조생과 부지화 과실을 적도 부위 4군데로 나누어 Hunter L, a 및 b 값을 각각 측정하였다. 온도처리를 위한 생장상의 온도 조건은 $25 \pm 1^\circ\text{C}$, $30 \pm 1^\circ\text{C}$, $35 \pm 1^\circ\text{C}$, 상대습도 $60 \pm 10\%$, 광조건은 16시간/8시간(광/암)이 유지되도록 하였으며, 처리 0, 6, 12, 24, 48시간 후에 각각 과실을 채취하였다. 채취한 과실은 바로 8-16조각으로 자르고 고루 섞어 초저온 냉동고에 보관하고, 유전자 발현을 분석하기 위한 RNA 추출에 사용하였으며, 각 처리는 3반복으로 실시하였다.

○ RNA 분리 및 real-time PCR 분석

각 처리별로 채취한 과실 조각(1-2g)은 막자 사발에서 액체질소를 충분히 유지하면서 완전히 마쇄하였고 50mL 코닝 튜브에 넣어 다음 단계로 진행하였다. RNA 분리는 Chang 등(1993)의 소나무 RNA 추출 방법에서 1, 2차 추출 단계의 원심분리 조건을 3,200rpm, 30분으로 바꾸고, 2-mercaptoethanol의 넣는 양을 수정하여 사용하였다. 분리한 RNA(500ng)는 GoScript™ Reverse Transcription System(Promega, USA)을 이용하여 1st cDNA를 합성하고 PCR 반응을 위한 주형으로 사용하였다. Quantitative real-time PCR 반응은 SYBR Premix Ex Taq™(TaKaRa BioInc., Japan)제조사의 방법대로 20 μL 반응액을 조제하고, C1000™ Thermal Cycler(CFX96™ Real-Time System, BioRad, USA)를 이용하였으며, 사용한 7개의 primer set은 Table 1에 나타내었다. 반응 조건은 95°C 에서 30초 후, 95°C 에서 5초, 60°C 에서 30초 반응을 40회 반복하였다.

발현 분석은 증폭량에 따른 형광 강도를 각 cycle 마다 측정하였고, 각각의 유전자는 특이적

인 프라이머를 사용하였으며, 각각의 primer에 의한 발현값은 각각의 actin 유전자의 발현값에 비례하여 상대적으로 계산하였다.

○ 전사체분석

RNA로부터 cDNA library를 제작하여(TruSeq SBS v5 protocol), Illumina HiSeq 2000 (Illumina, San Diego, CA)을 이용하여 1억2천만개 이상의 전사절편을 생산하였다. 전사체 염기서열정보는 농촌진흥청 국립농업생명자원정보센터에 등록하였다. 정확하고 효율적인 전사체 분석을 위해 SolexaQA package를 이용하여 품질을 유지하였다. 다른 발현양상을 나타내는 유전자군(DEGs)을 선별하기 위하여 선별, 군집화, 및 기능분석을 실시하였다. 발현된 유전자군은 포도와 애기풀장대의 유전체 정보를 활용하여 기능분석을 수행하고 KEGG 프로그램을 활용하여 유전자의 대사과정을 분석하였다.

기후변화에 따른 발현의 변화를 나타내는 유전자군의 대사경로를 구명하기 위하여 전사체 분석을 통해 선별된 유전자 군의 대사경로 및 위치를 파악하고 Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes(KEGG)에서의 유전자와 생리학적 변화와 관련된 대사를 비교 분석하였다.

표 1. 사과속기별 과실당도 및 착색도

숙기	홍로				후지			
	당도	색도(L)	색도(a)	색도(b)	당도	색도(L)	색도(a)	색도(b)
1단계	12.0	70.7	-10.8	39.1	12.6	69.0	-7.4	31.1
2단계	12.7	63.0	20.4	25.6	13.8	64.7	1.1	28.4
3단계	13.8	50.0	35.2	20.3	15.7	55.7	19.6	23.0

표 2. 포도의 숙기별 과실당도 및 착색도

숙기	캠벨얼리				거봉			
	당도	색도(L)	색도(a)	색도(b)	당도	색도(L)	색도(a)	색도(b)
1단계	10.8	38.0	0.0	8.4	9.0	44.5	-6.4	10.6
2단계	11.2	30.5	6.2	0.3	10.6	34.4	7.4	-0.8
3단계	13.4	30.2	4.2	-0.3	13.4	31.1	5.5	-3.0
4단계	15.0	28.9	0.5	-0.7	15.1	31.1	1.0	-4.1

표 3. 감귤의 숙기별 과실당도 및 착색도

숙기	하례조생				한라봉			
	당도	색도(L)	색도(a)	색도(b)	당도	색도(L)	색도(a)	색도(b)
1 단계	6.4	59.5	-17.3	45.9	9.3	64.5	-6.5	58.6
2 단계	6.9	69.0	9.6	64.2	-	-	-	-
3 단계	9.1	70.2	25.8	68.0	13.6	74.2	19.8	77.1

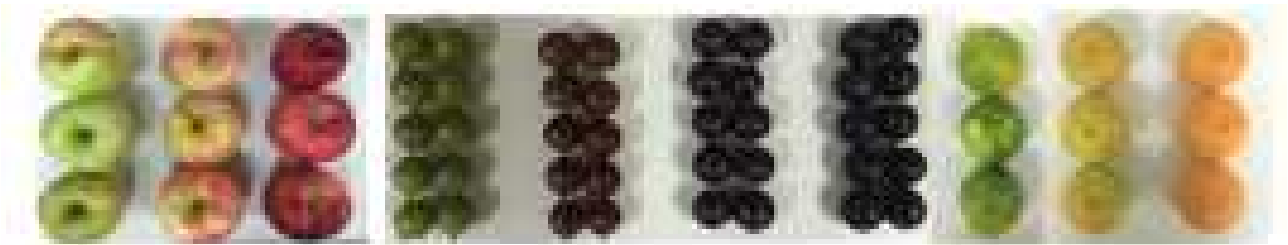


그림 1. 온도처리용 숙기별 사과(홍로, 왼쪽), 포도(캠벨얼리, 가운데)와 감귤(하례조생, 오른쪽) 과실

2. 연구결과

1. 고온처리에 따른 기지유전자의 유전자 발현비교

○ 사과나무(후지) 잎의 광합성 및 탄수화물 대사관련 유전자발현 비교

고온에 노출된 사과나무 잎에서는 한낮의 고온과 이른 아침의 저온에서도 대사와 관련한 유전자의 발현 감소와 유도는 나타나지 않았다(그림 2).

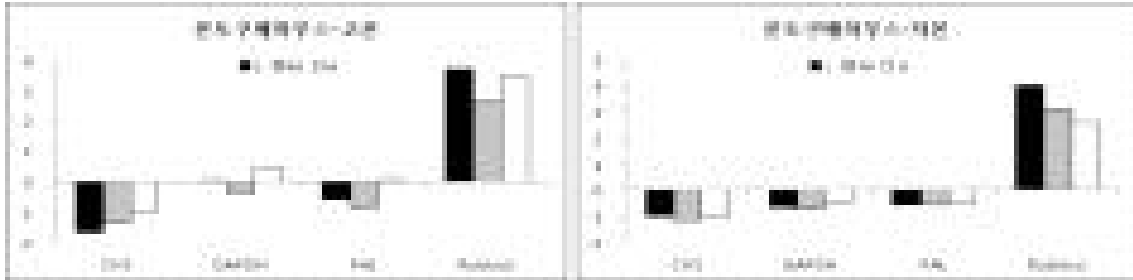


그림 2. 온도구배하우스 내에서의 온도차에 따른 사과나무 잎의 유전자발현 비교.

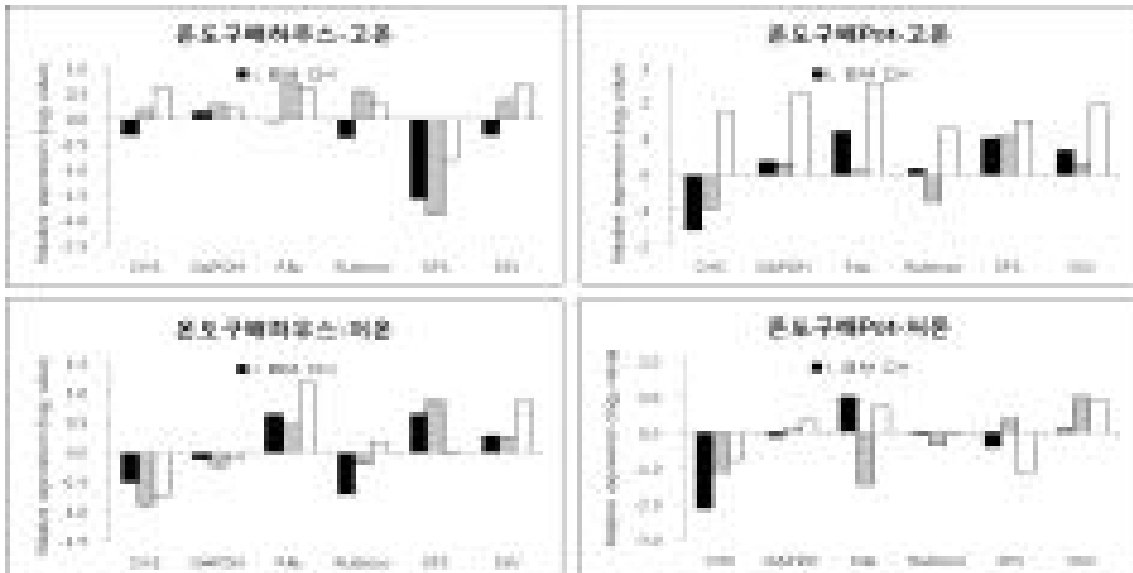


그림 3. 온도구배하우스 내에서의 온도차에 따른 포도나무 잎의 유전자발현 비교. 고온: 오후2시(L: 29.5, M:33.3, H:35.5℃), 저온: 오전 7시(L:22, M:25, H 27℃).

○ 온도차에 따른 포도나무 잎의 광합성 및 탄수화물 대사 관련 유전자발현 비교

포도나무 잎에서는 한낮의 고온에서도 대사와 관련한 유전자의 발현 감소는 나타나지 않았으며, 꽃트상태의 식물체에서는 오히려 고온에서 유전자의 발현이 유도되었다. 이른 아침의 저온에서는 광합성 관련 유전자의 발현이 감소하였는데 이는 온도보다는 빛의 영향인 것으로 여겨지며 SPS는 고온에 의해 현저히 발현이 억제되었다(그림 3).

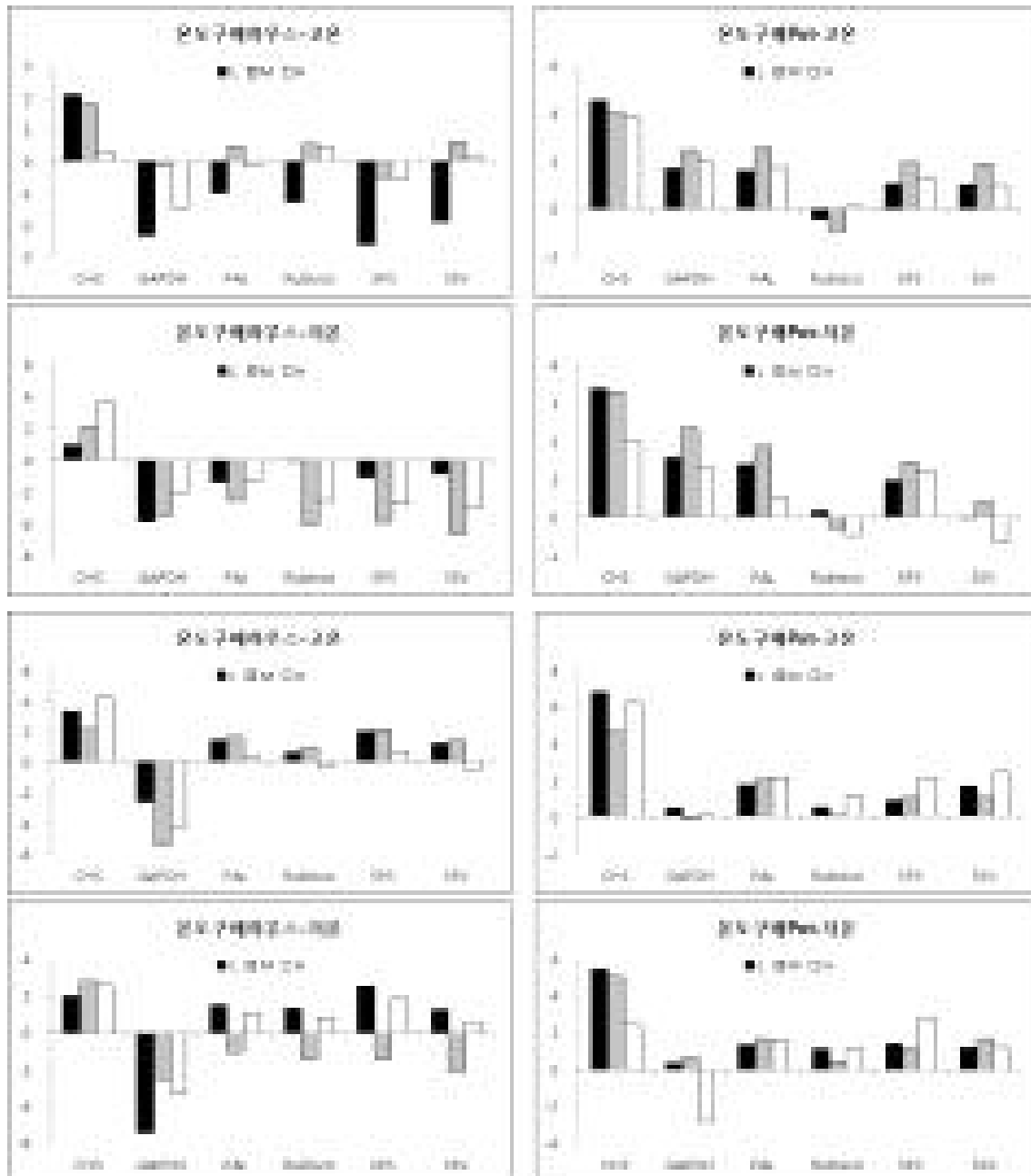


그림 4. 온도구배하우스 내에서의 온도차에 따른 감귤나무(상:하레조생, 하:한라봉). 잎의 유전자발현 비교. 고온: 오후2시(L: 32, M:34.3, H:35.5℃), 저온: 오전 7시(L23, M:25, H 27℃).

○ 온도차에 따른 감귤나무 잎의 광합성 및 탄수화물 대사 관련 유전자발현 비교

하레조생 감귤나무 잎에서는 한낮의 고온에서는 대사와 관련한 CHS 유전자의 유전자 발현이 현저하게 감소하였으며, 한라봉에서는 PAL, RUBISCO, SPS, SSV의 발현이 현저하게 감소하였으며, 이른 아침의 저온에서는 유전자 발현량의 감소는 찾아보기 어려웠다(그림 4).



그림 5. 사과(홍로) 과실의 숙기별 온도에 따른 유전자 반응 비교

○ 사과(홍로) 과실의 성숙단계별 유전자 변화

사과(홍로) 과실을 성숙단계별로 온도를 달리하여 24시간이 경과한 후 다양한 유전자의 발현을 검정하였다(그림 5). 변색기 초기인 1단계에서는 CHS를 비롯한 과실의 성숙 및 기능성 성분, 착색 등과 관련된 유전자의 발현이 낮았다. 착색이 활발하게 진행되는 시기에서는 30℃에서 MDH, PAL과 같이 기능성 및 착색관련 유전자의 발현이 현저하게 높았으며 35℃의 고온에서는 그 발현이 현저하게 감소하였다.

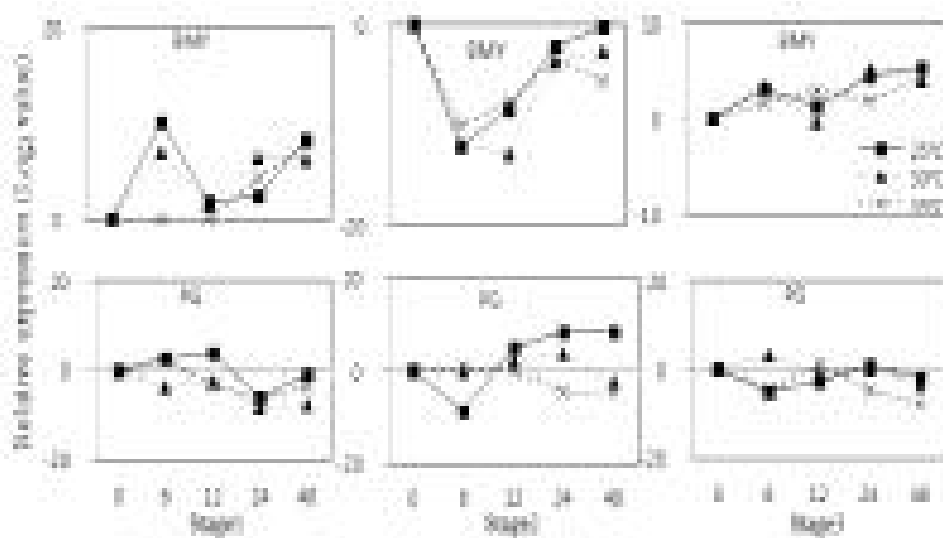


그림 6. 착색기의 생육기에서의 온도별 사과(후지) 과실의 당대사 유전자발현. BMY: beta-amylase, PG: polygalacturonase.

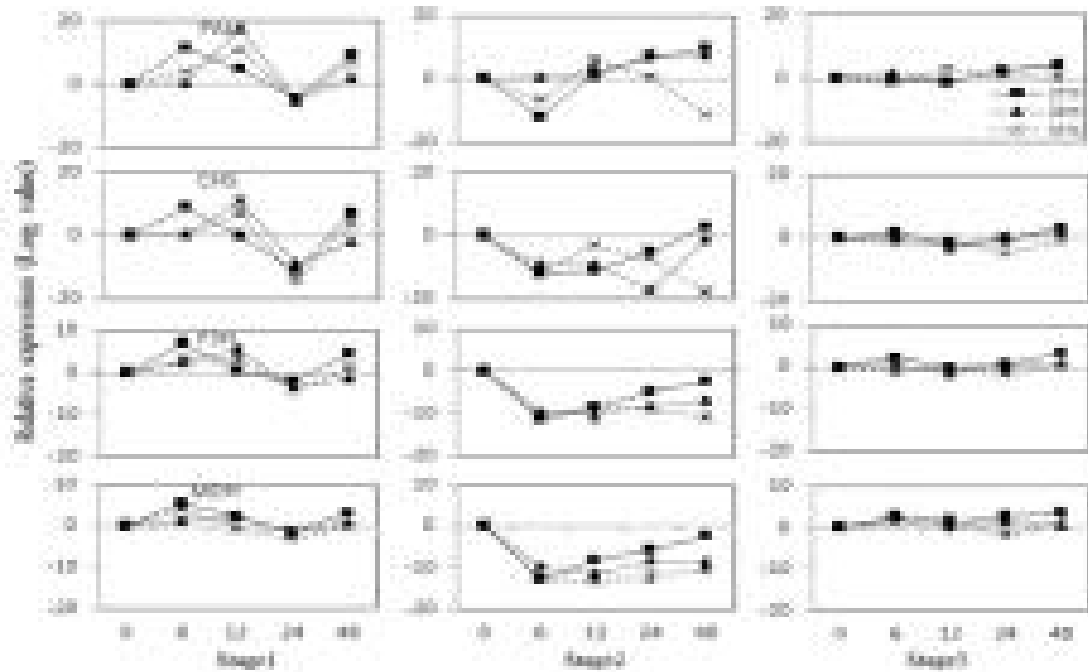


그림 7. 착색기의 생육기에서의 온도별 사과(후지) 과실의 착색 유전자발현. PAL: phenylalanine ammonia lyase, CHS: chalconesynthase(CHS), F3H: flavone 3-hydrogenase (F3H), MDH: malate dehydrogenase.

○ 사과(후지) 과실의 성숙단계별 유전자 변화

‘후지’ 사과 과실의 성숙단계별로 온도를 달리하여 24시간이 경과한 후 다양한 유전자의 발현을 검정하였다(그림 6). 성숙기에는 당대사와 관련된 amyalse와 polygalacturonase 유전자의 발현이 증가하였으며, amyalse보다는 polygalacturonase의 유전자가 고온에서 발현이 억제되었다.

PAL 및 CHS를 비롯한 과실의 성숙 및 기능성 성분, 착색 등과 관련한 유전자의 발현이 성숙기 3단계에서 높았으며 착색이 활발하게 진행되는 시기에서는 25℃에 비해 30~35℃에서 MDH, PAL과 같이 기능성 및 착색관련 유전자의 발현이 감소하였다(그림 7).

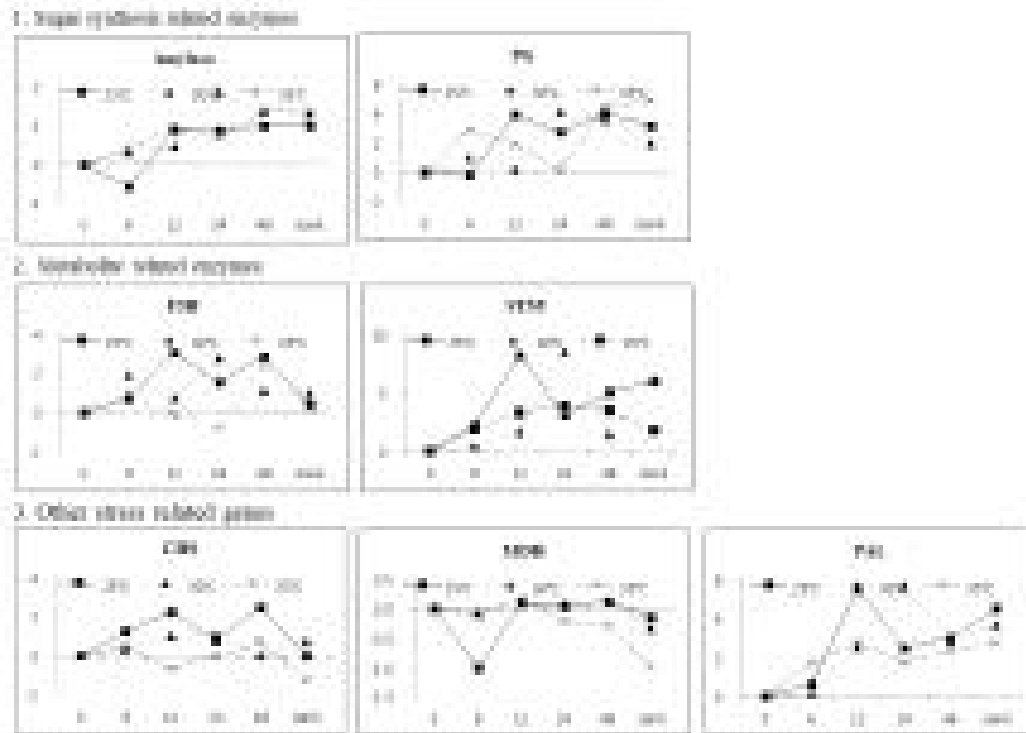


그림 8. 착색초기의 온도별 포도(캠벨얼리)과실의 유전자발현

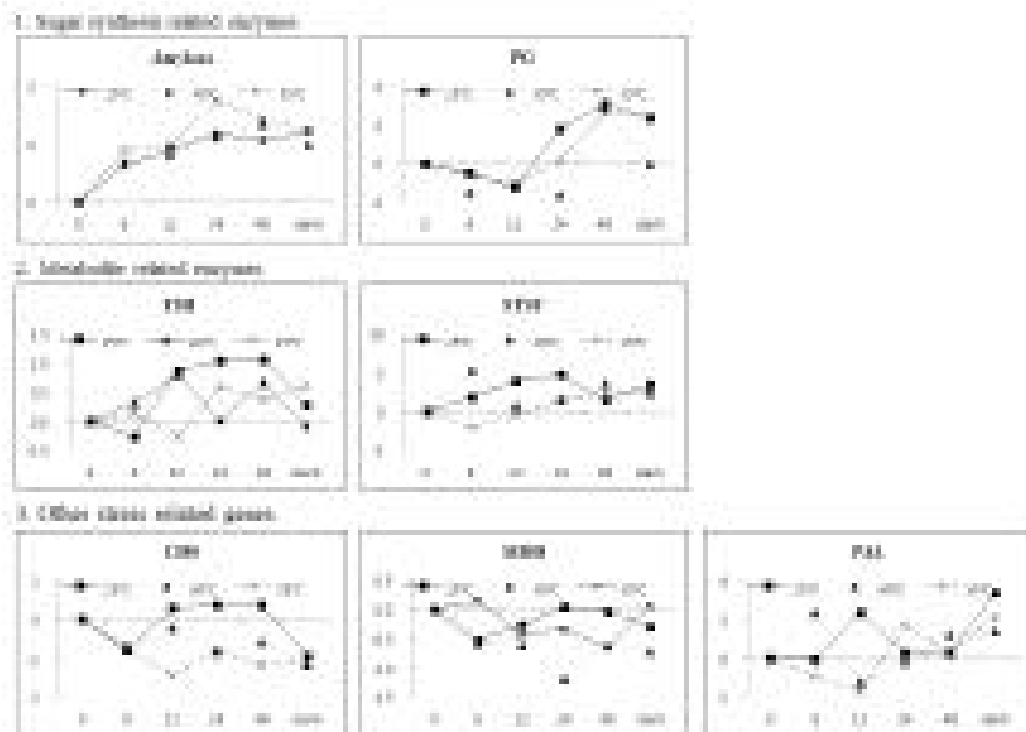


그림 9. 착색후반기의 온도별 포도(캠벨얼리) 과실의 유전자발현

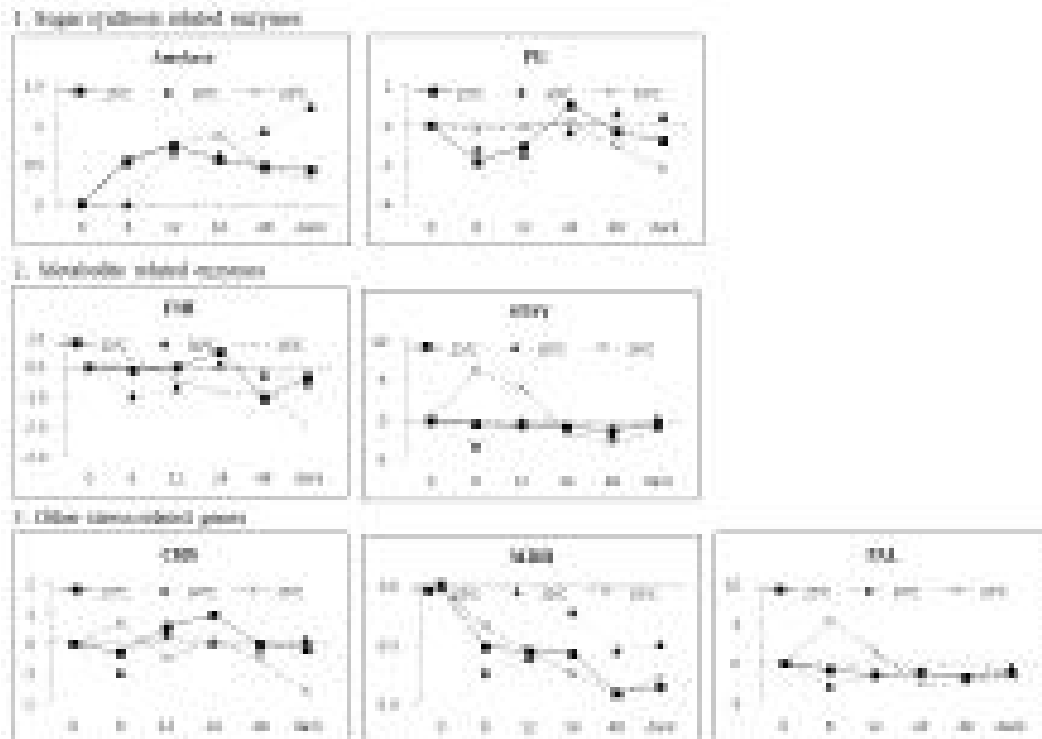


그림 10. 착색초반기의 온도별 포도(거봉) 과실의 유전자발현

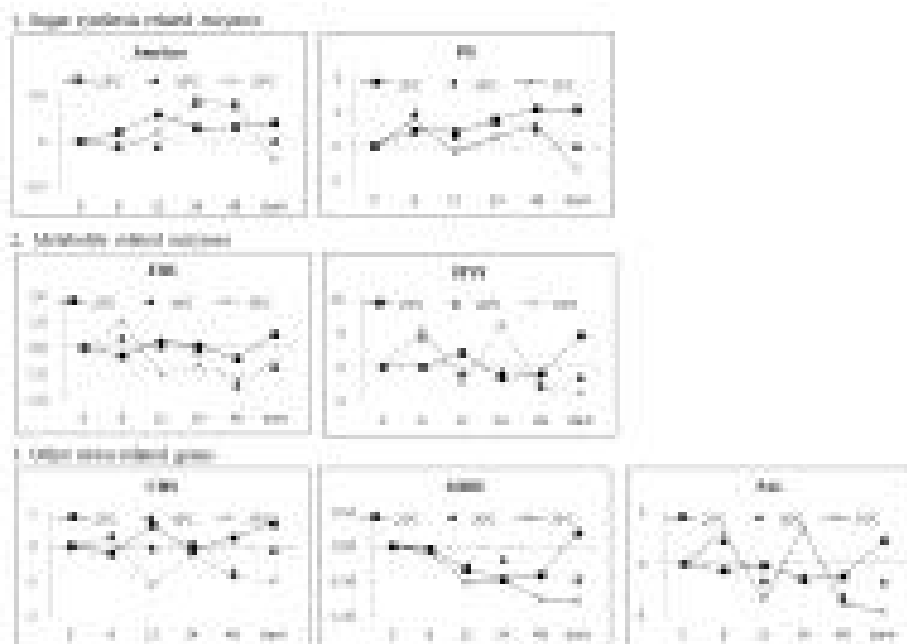


그림 11. 착색후반기의 온도별 포도(거봉) 과실의 유전자발현

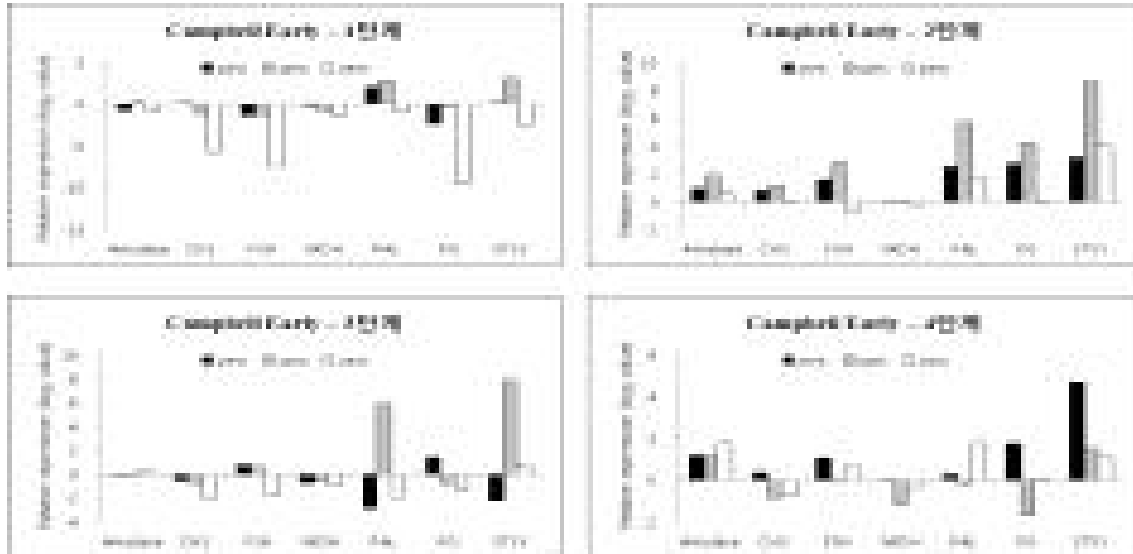


그림 12. 포도(캠벨얼리) 과실의 숙기별 온도에 따른 유전자 반응 비교

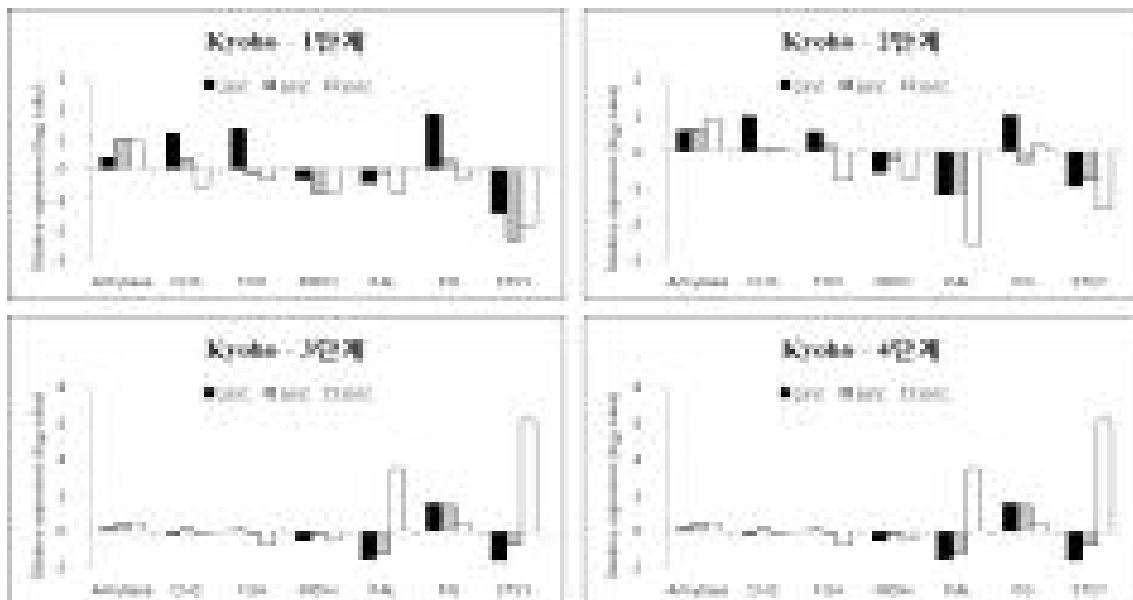


그림 13. 포도(거봉) 과실의 숙기별 온도에 따른 유전자 반응 비교

○ 포도 과실의 성숙단계별 유전자 변화

포도(캠벨얼리) 과실의 성숙단계별로 온도를 달리하여 24시간이 경과한 후 다양한 유전자의 발현을 검정하였다. 변색기 초기인 1단계에서는 amylase를 비롯한 과실의 성숙 및 기능성 성분, 착색 등과 관련한 유전자의 발현이 낮았으며, 또한 CHS, F3H, PG 등의 유전자는 온도 간의 큰 차이를 보이며 특히 35°C의 고온에서 발현이 크게 억제되었다(그림 8).

착색이 활발하게 진행되는 시기에서는 30°C에서 기능성 및 착색관련 유전자의 발현이 현저하게 높았으며 35°C의 고온에서는 그 발현이 현저하게 감소하였다(그림 9). 캠벨얼리와는 달리 거봉에서는 숙기의 과실은 stilbene 합성효소의 발현이 오히려 35°C의 고온에서 발현이 유도되었으며, 향후 포도의 전사체(transcriptome)분석을 위해서는 처리온도별로 24시간이 경과한 시료에서 발현되는 유전자를 분석하기에 용이할 것으로 여겨진다(그림 10, 11).

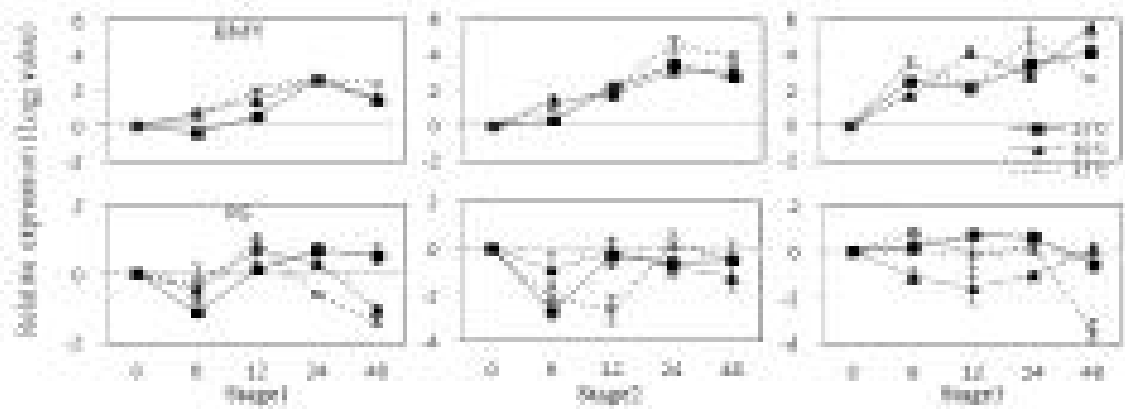


그림 14. 감귤(“하례조생”) 과실의 발육단계별 당대사관련 유전자발현

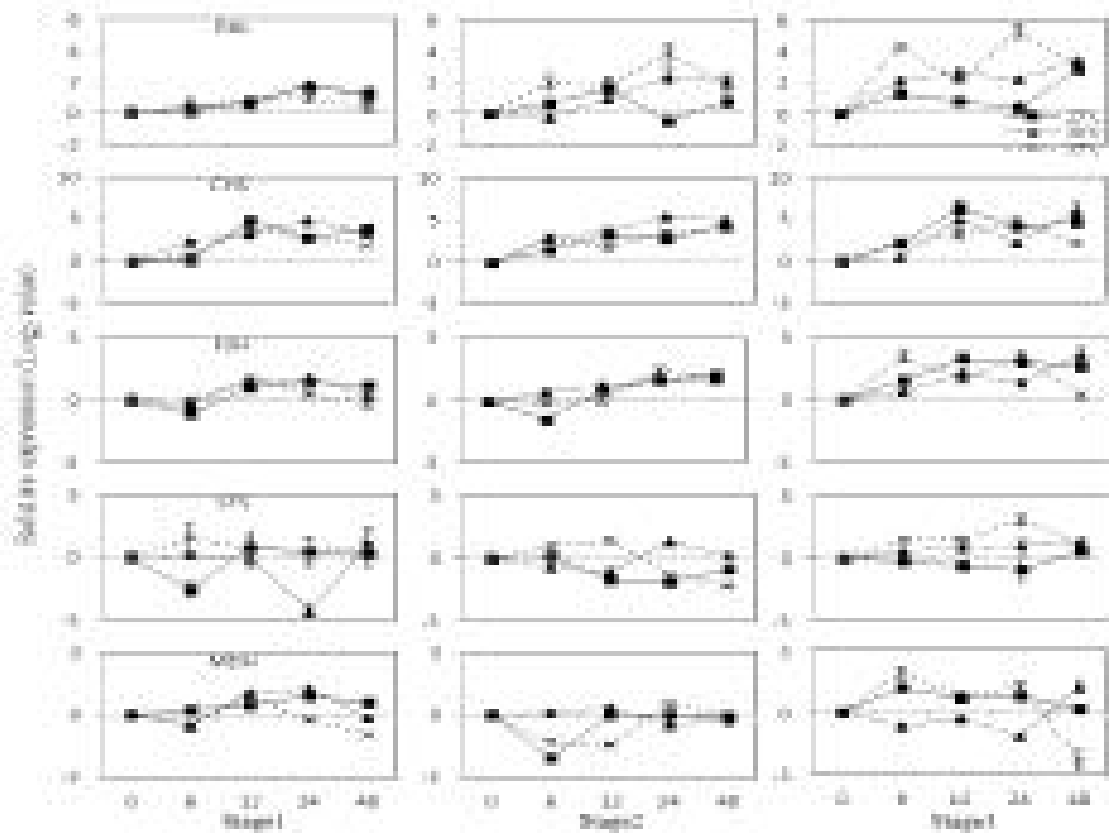


그림 15. 감귤(“하례조생”) 과실의 발육단계별 과피착색 관련 유전자발현

○ 감귤 과실의 성숙단계별 유전자 변화

‘하례조생’ 감귤 과실의 성숙단계별로 온도를 달리하여 24시간이 경과한 후 다양한 유전자의 발현을 검정하였다(그림 14). 성숙기에 당대사에 관련된 beta-amylase는 고온에서도 발현이 유도되었으나, polygalacturonase 유전자의 발현은 고온에서 억제되었다. 과실의 성숙 및 기능성 성분, 착색 등과 관련한 유전자의 발현이 높았으며, 고온에서는 PAL, STS의 유전자발현이 유도되었고(그림 15), MDH, F3H와 같이 기능성 및 착색관련 유전자의 발현이 고온에서 감소하였다.

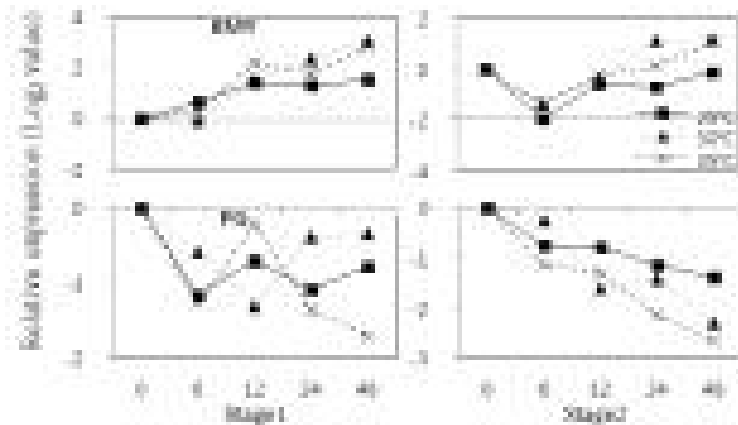


그림 16. 감귤(‘한라봉’) 과실의 발육단계별 당대사관련 유전자발현

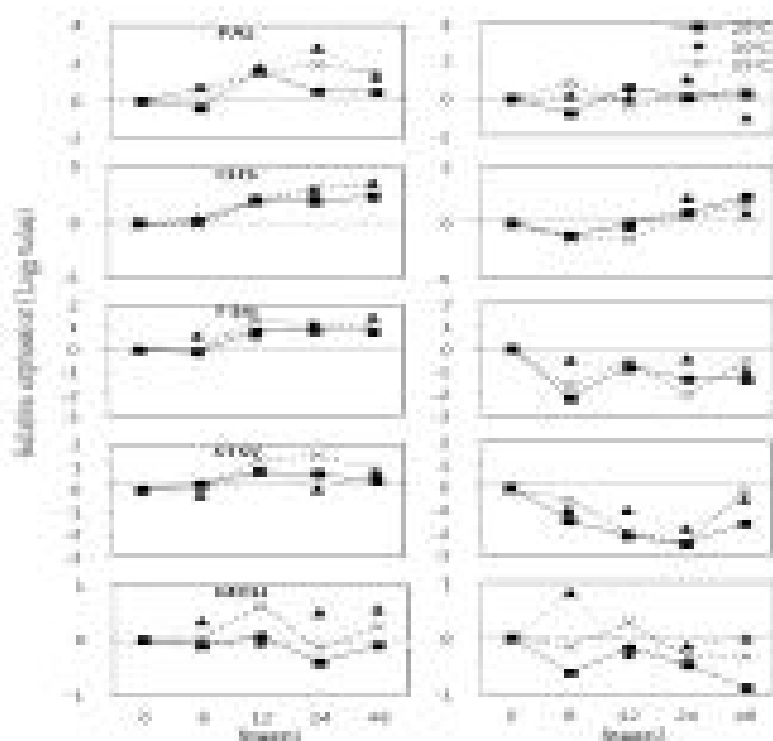


그림 17. 감귤(‘한라봉’) 과실의 발육단계별 과피착색관련 유전자발현

‘한라봉’ 감귤 과실의 성숙단계별로 온도를 달리하여 24시간이 경과한 후 다양한 유전자의 발현을 검정하였다(그림 16, 17). 성숙기에 당대사에 관련된 beta-amylase는 30-35℃의 고온에서

발현이 유도되었으나, polygalacturonase 유전자의 발현은 고온(35℃)에서 억제되었다. 또한 CHS, F3H, PG 등의 착색관련 유전자는 생육기간에는 처리기간에 따라 발현이 유도되었으나 온도 간의 큰 차이를 나타내지 않았다. 따라서, 향후 포도의 전사체(transcriptome)분석 등의 다양한 유전자에 대한 연구가 필요할 것이다.

2. 사과, 감귤, 포도의 전사체 분석

○ 전사체 분석에 따른 통계

사과의 과실과 잎의 시료에서 RNA를 분리하여 전사체 분석을 수행하였으며 이용된 transcripts는 총 2억 개 이상이며 전체길이는 16,980Mb, reads의 평균길이는 89.2bp이며 평균 84.1%의 data가 분석에 활용되었다(표 4).

표 4. 사과과실 및 사과나무 잎 시료 분석 통계치

시료	No. of reads	Total length(bp)	Av. length (bp)	Trimed/raw(%)
과실 25℃-3반복	42,838,192	3,523,947,291	88.1	82.3
과실 30℃-3반복	36,445,834	3,062,804,050	89.1	84.1
과실 35℃-3반복	40,575,608	3,389,132,411	88.6	83.2
잎 구배1-3반복	37,115,590	3,160,287,087	88.9	85.3
잎 구배3-3반복	44,989,062	3,844,154,382	90.2	85.7
총계 (15ea)	201,964,286	16,980,325,221	89.2	84.1

감귤의 과실과 감귤나무 잎의 시료에서 RNA를 분리하여 전사체 분석을 수행하였으며 이용된 transcripts는 총 1억7천만개 이상이며 전체길이는 15,981Mb, reads의 평균길이는 89.8bp이며 평균 82.5%의 data가 분석에 활용되었다(표 5).

표 5. 감귤 과실 및 감귤나무 잎 시료 분석 통계치

시료	No. of reads	Total length(bp)	Av. length(bp)	Trimed /raw(%)
과실 25°C-3반복	39,287,728	3,500,347,172	89.1	81.3
과실 30°C-3반복	37,856,932	3,373,965,241	89.1	81.3
과실 35°C-3반복	32,613,518	2,905,472,319	89.1	81.5
잎 구매1-3반복	33,512,630	3,034,540,802	90.5	83.9
잎 구매3-3반복	34,797,682	3,166,823,276	91.1	84.4
총계 (15ea)	178,068,490	15,981,148,810	89.8	82.5

표 6. 포도 과실 및 포도나무 잎 시료 분석 통계치

시료	No. of reads	Total length(bp)	Av. length(bp)	Trimed/raw (%)
과실25°C-3반복	40,604,010	3,680,078,063	90.6	84.5
과실30°C-3반복	37,389,854	3,276,665,934	87.7	78.9
과실35°C-3반복	40,033,574	3,532,041,627	88.3	79.8
잎 구매1-3반복	30,401,888	2,749,992,545	90.4	83.7
잎 구매3-3반복	28,455,194	2,582,944,176	90.8	84.2
총계 (15ea)	176,884,520	15,821,722,345	89.6	82.2

포도의 과실과 포도나무 잎의 시료에서 RNA를 분리하여 전사체 분석을 수행하였으며 이용된 transcripts는 총 1억7천만개 이상이며 전체길이는 15,821Mb, reads의 평균길이는 89.6bp이고 평균 82.2%의 data가 분석에 활용되었다.

○ RNA sequencing에 의한 온도변화 관련 특이유전자 발굴

사과에서는 6만여개의 유전자가 검출되고 51,000여개의 유전자, 감귤에서는 2만여 개의 유전자가 검출되고 21,000여개의 유전자, 포도에서는 2만6천여개의 유전자가 검출되고 21,000여개가 각각의 표준 유전체에 annotation되었다(표 7).

표 7. 온도처리에 의한 과실의 발현 유전자 분석

종	표준유전자의 구분	Annotation 된 유전자 수
사과	전체 transcripts	63,514
	Annotation 정보를 포함한 transcripts	51,135
감귤	전체 transcripts	24,533
	Annotation 정보를 포함한 transcripts	21,627
포도	전체 transcripts	26,346
	Annotation 정보를 포함한 transcripts	21,533

4. 온도에 대응하여 발현하는 사과 특이 유전자군(DEG) 발굴

가. RNA sequencing에 의한 온도변화관련 사과 transcriptome 분석

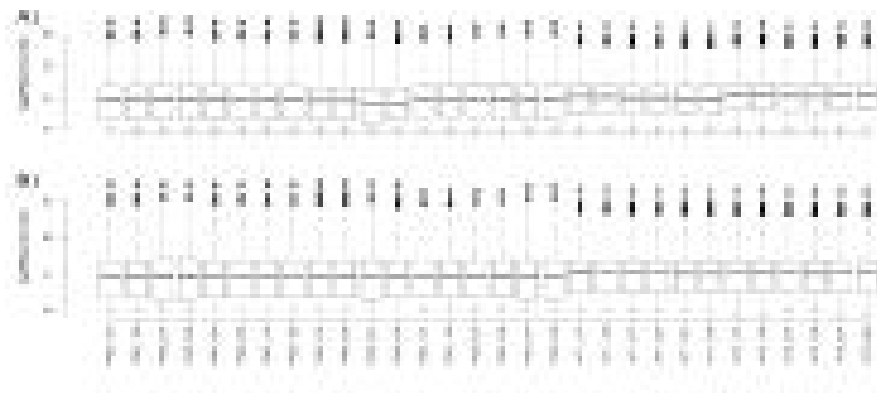


그림 18. 사과 Normalization 전과 후 유전자 발현값에 대한 boxplot. A) Raw data에서의 평균 발현값에 대한 boxplot. B) Normalized data에서의 평균 발현값에 대한 boxplot

○ 사과 Transcripts의 발현량을 분석하기 위한 자료의 nomalization

데이터를 nomalization하여 처리간에 나타나는 error값을 최소화하여 발현량을 비교하고 정확한 DEG를 효율적으로 선별하고자 하였다(그림 18).

그림 18에서와 같이 발현되는 유전자 중에서 발현되는 read수가 많고 온도변화에 따라 반응의 차이가 2배 이상이 되는 특이유전자를 발굴하였다. 그림에서 붉은색의 점은 1000개 이상의 transcripts가 2배 이상 발현이 유도되는 유전자군이며, 푸른색은 발현이 억제되는 유전자군을 표시하고 있다(그림 19).

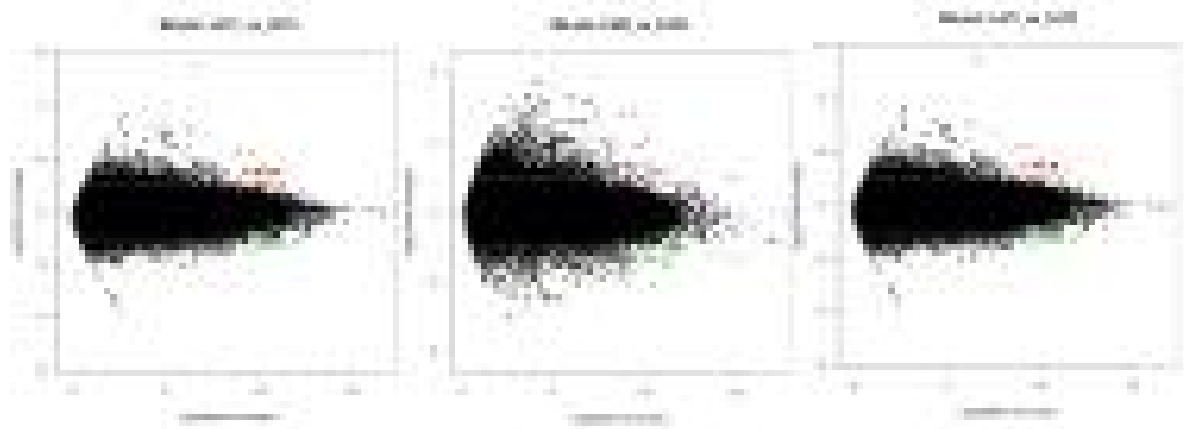


그림 19. 각 DEGs 비교 조합의 유전자 발현량을 이용하여 도식화한 그림 (MA plot). X축 (log2FoldChange): 샘플별 read counts (log2 value), Y축 : DESeq로 보정된 fold change, 발현차이비교)

표 8. 온도처리에 의한 사과 전사체의 DEG와 Annotation된 유전자수

비교대상 (control vs treatment)	Regulation pattern	2-Fold change		1.5-Fold change	
		No. of DEGs	No. of annotated DEGs	No. of DEGs	No. of annotated DEGs
과실 25°C:30°C	Up	0	0	0	0
	Down	0	0	1	1
과실 25°C:35°C	Up	15	13	137	133
	Down	23	21	287	268
잎 T1:T3	Up	21	21	213	202
	Down	20	20	231	225

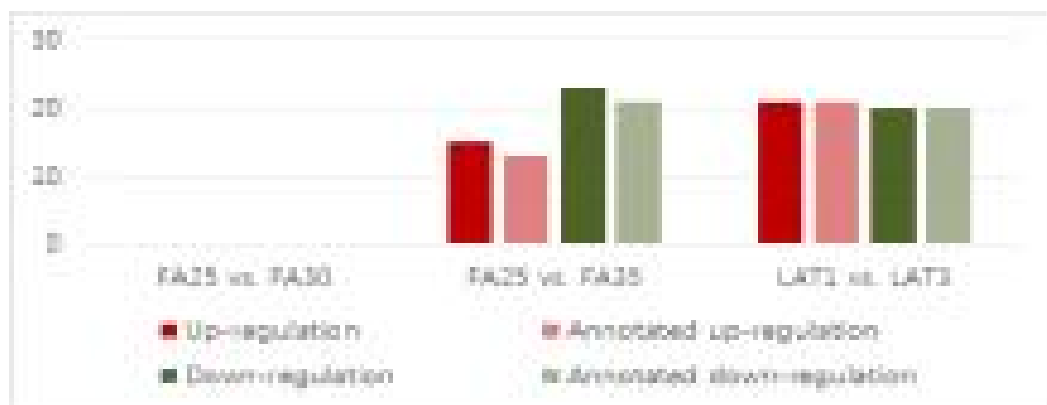


그림 20. 사과 DEGs 비교 대상간 유의하게 선발된 유전자(DEG)의 수. FA:사과과실, LA:사과 나무잎

○ 고온에 의한 사과 과실의 발현 유도 유전자군

과실에서의 온도에 따른 발현량의 차이를 비교한 결과, 2배 이상의 차이를 보이는 유전자를 대상으로 조사한 경우에는 30℃처리에서는 25℃에 비해 차이를 나타내는 유전자가 검출되지 않았다(표 8).

35℃에서는 15개의 유전자가 발현이 특이적으로 유도되었고, 그중에서 13개의 유전자가 표준 유전체 유전자에 annotation되었다. 또한 선발강도를 완화하여 1.5배 이상의 발현차이를 보이는 유전자를 대상으로 하였을 경우에 137개의 유전자가 발현되고 그 중에서 133개의 유전자가 annotation되었다.

○ 고온에 의한 사과 과실의 발현 억제 유전자군

사과과실에서는 2배 이상의 차이를 보이는 유전자는 30℃처리에서는 25℃에 비해 1개의 유전자가 검출되었다. 35℃에서는 23개의 유전자가 발현이 특이적으로 억제되었고, 그중에서 21개의 유전자가 표준유전체 유전자에 annotation되었다. 또한 1.5배 이상의 발현차이를 보이는 유전자를 대상으로 하였을 경우에 287개의 유전자가 발현되고 그중에서 268개의 유전자가 annotation되었다.

○ 고온에 의한 사과나무 잎의 발현 차이 유전자군

사과나무 잎에서는 저온에 비해 고온에서 2배 이상의 차이를 보이며 발현이 유도되는 21개의 유전자가 검출되고, 20개의 유전자가 발현이 억제되었으며 모두가 표준유전체에 annotation되었다. 또한 1.5배 이상의 발현차이를 보이는 유전자를 대상으로 하였을 경우에는 213개의 유전자가 발현이 유도되고 그중에서 202개의 유전자가 annotation되었다. 또한 231개의 유전자는 발현이 억제되었으며 225개의 유전자가 annotation되었다(그림 20).

나. 사과의 온도 특이적 유전자 기능분석

표 9. 비교 조합 간 DEGs의 GO 결과 (사과 과실 25℃ vs 35℃)

Category	GO ID	GO Term	Up regulation	Down regulation
BP	GO:0044237	cellular metabolic process	1	4
CC	GO:0071944	cell periphery	3	3

○ DEG의 기능에 따른 clustering

고온 처리에 따라 발현차이를 보이는 DEG를 기능별로 clustering한 결과 세포의 대사과정에 관여하는 유전자가 5개로 나타났으며, 1개는 발현이 증가하였으나 4개 유전자는 감소하였다. 또한 6개의 유전자는 세포구성에 관여하는 것으로, 3개는 발현이 증가하고 다른 3개는 발현이 감소하였다(표 9).

다. 선발된 DEG의 발현양상에 따른 clustering

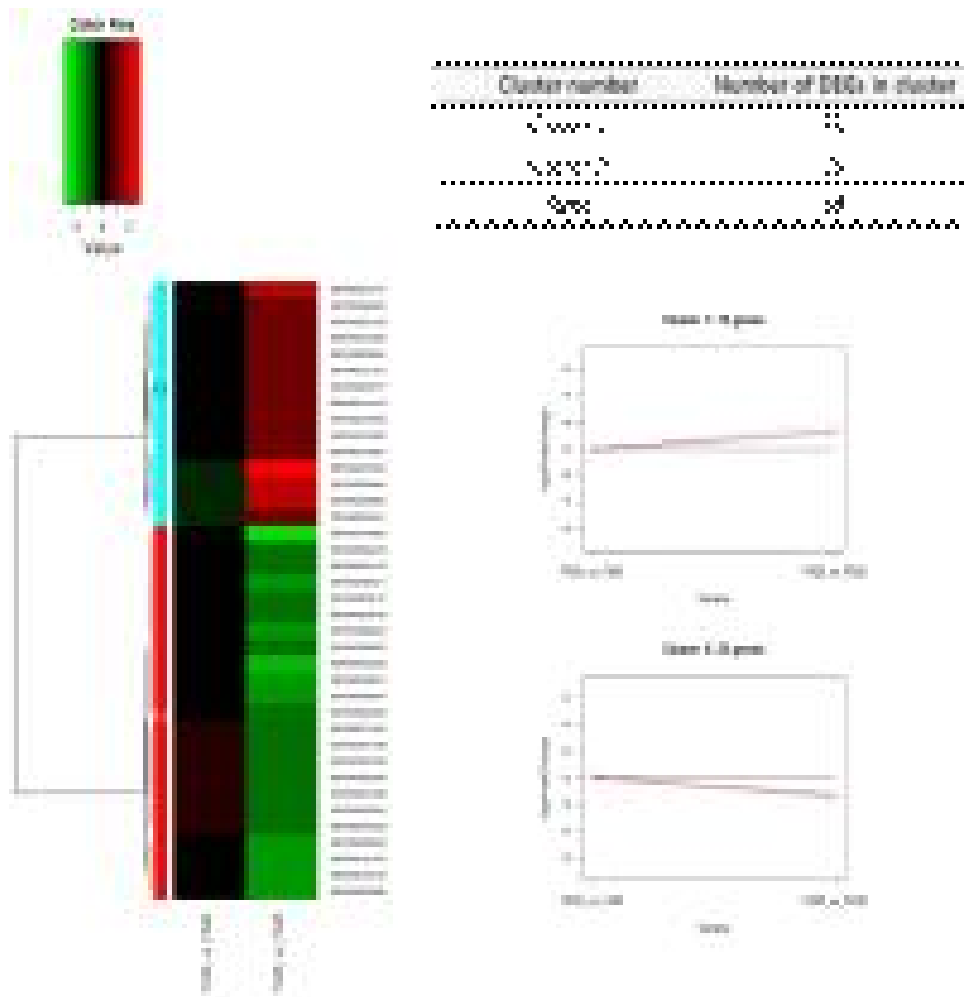


그림 21. 사과 과실 데이터 Clustering 분석 결과의 Heatmap & Line plot.

a) Heatmap은 왼쪽부터 과실25℃-30℃, 과실25℃-35℃ 비교조합 데이터 표현

b) Line plot은 Heatmap에 표현된 cluster를 패턴으로 표현

○ 발현에 2배 이상 차이를 보이는 유전자군의 발현양상 비교

총 38개의 DEG를 대상으로 발현양상을 비교한 결과 발현이 유도되는 양상과 억제되는 양상이 각각 하나의 패턴을 보였으며, 따라서 두 개의 그룹으로 clustering되었다(그림 21).

라. 온도변화에 따른 사과 유전자의 발현 분석

○ 고온에 의해 사과 잎에서 발현이 변화하는 유전자군 선발

GDSL-like Lipase/Acylhydrolase superfamily protein, cell wall protein precursor, MLP-like protein 423, heat shock protein 18.2, HSP20-like chaperones superfamily protein, phytoosulfoakin receptor 1, Protein phosphatase 2C family protein, microsomal glutathione s-transferase 등의 유전자가 발현이 유도되었다(표 10).

3-Ketoacyl-CoA synthase 19, Cysteine proteinases superfamily protein, Plant invertase/pectin methylesterase inhibitor superfamily, heat shock protein 70, ferretin 1, nitrate transporter 1.7, heat shock protein 81-2 등의 유전자의 발현이 감소하였다.

표 10. 온도구배하우스 고온에서 사과 잎에서 발현이 유도 또는 억제되는 유전자 군

	No.	Gene	log2 Fold change
Induced	U1	GDSL-like Lipase/Acylhydrolase superfamily protein	2.35
	U2	cell wall protein precursor, putative	1.77
	U3	MLP-like protein 423	1.58
	U4	heat shock protein 18.2	1.56
	U5	HSP20-like chaperones superfamily protein	1.56
	U6	phytosulfokin receptor 1	1.38
	U7	Protein phosphatase 2C family protein	1.31
	U8	microsomal glutathione s-transferase, putative	1.19
	U9	N-terminal nucleophile aminohydrolases superfamily protein	1.10
	U10	peroxidase 2	1.09
Inhibited	D1	3-ketoacyl-CoA synthase 19	-1.57
	D2	Cysteine proteinases superfamily protein	-1.50
	D3	Plant invertase/pectin methylesterase inhibitor superfamily	-1.31
	D4	heat shock protein 70	-1.26
	D5	ferretin 1	-1.19
	D6	nitrate transporter 1.7	-1.17
	D7	heat shock protein 81-2	-1.16
	D8	heat shock cognate protein 70-1	-1.16
	D9	Potassium transporter family protein	-1.13
	D10	Heat shock protein 81.4	-1.12

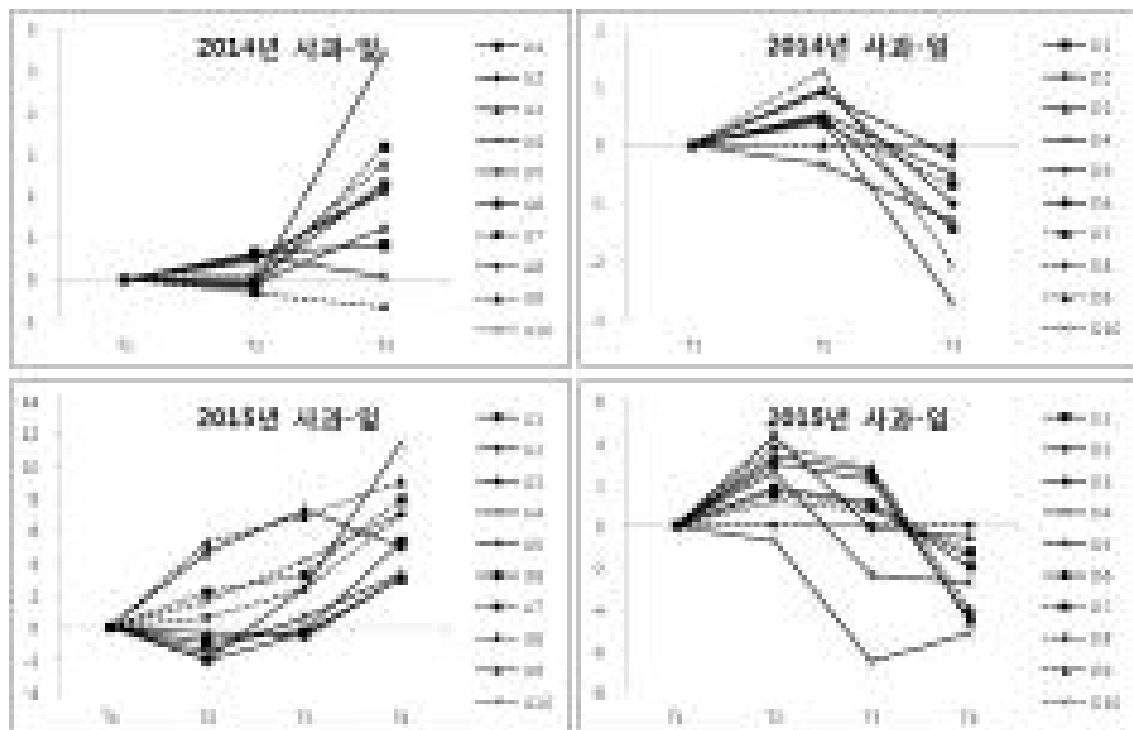


그림 22. Real-time PCR에 의한 사과나무 잎에서의 특이발현 유전자의 발현분석

○ 고온에 의한 사과나무 잎에서 유전자 발현 변화 분석

전사체분석의 결과와 같은 양상으로 사과 잎에서 크게 발현이 유도되거나 억제되었으며 온도가 높을수록 그 양상은 유사하게 나타났다. 또한 2014년도에 채취한 잎과 2015년에 채취한 시료에서도 동일한 발현 양상을 나타내었다(그림 22).

○ 고온에 의해 사과 과실에서 발현이 변화하는 유전자군 선발

Raffinose synthase family protein, Subtilase family protein, cytochrome P450, Sucrose-phosphate synthase family protein, nitrate transporter2.5, ATP binding cassette subfamily B19 등의 유전자가 발현이 유도되었다(표 11).

Metallothionein 2A, Uncharacterised protein family, plasma membrane intrinsic protein 2;5, dehydrin xero 1, Dehydrin family protein, expansin A8 등의 유전자의 발현이 감소하였다(표 11).

표 11. 생장상내 고온처리에 의해 사과 과실에서 발현이 유도 또는 억제되는 유전자군

	Name	Gene	log2 Fold change
Induced	U1	Raffinose synthase family protein	2.85
	U2	Subtilase family protein	2.06
	U3	cytochrome P450, family 714, subfamily A, polypeptide 1	1.99
	U4	Sucrose-phosphate synthase family protein	1.94
	U5	nitrate transporter2.5	1.36
	U6	ATP binding cassette subfamily B19	1.34
	U7	subtilisin-like serine protease 2	1.33
	U8	adenine phosphoribosyl transferase 1	1.32
	U9	white-brown complex homolog protein 11	1.30
	U10	sulfate transporter 3;1	1.29
Inhibited	D1	metallothionein 2A	-2.12
	D2	Uncharacterised protein family (UPF0497)	-1.82
	D3	plasma membrane intrinsic protein 2;5	-1.81
	D4	dehydrin xero 1	-1.67
	D5	Late embryogenesis abundant protein (LEA) family protein	-1.56
	D6	kinesin 1	-1.53
	D7	Dehydrin family protein	-1.52
	D8	expansin A8	-1.48
	D9	xyloglucan endotransglucosylase/hydrolase 8	-1.46
	D10	DNA glycosylase superfamily protein	-1.41

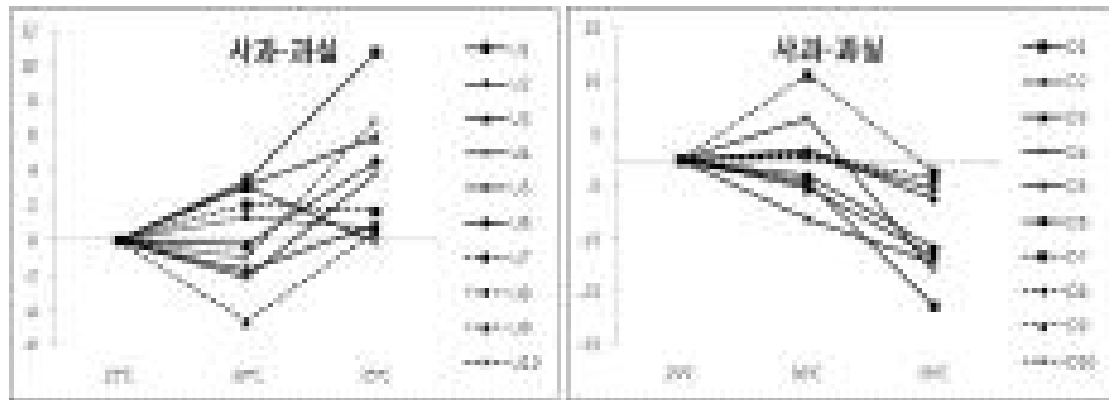


그림 23. Real-time PCR에 의한 사과나무 과실에서 특이발현 유전자의 발현분석

○ 고온에 의한 사과 과실에서 유전자 발현 변화 분석

전사체분석의 결과와 같은 양상으로 사과 과실에서 크게 발현이 유도되거나 억제되었으며 온도가 높을수록 그 양상은 유사하게 나타났다(그림 23).

5. RNA sequencing에 의한 온도변화관련 감귤 transcriptome 분석

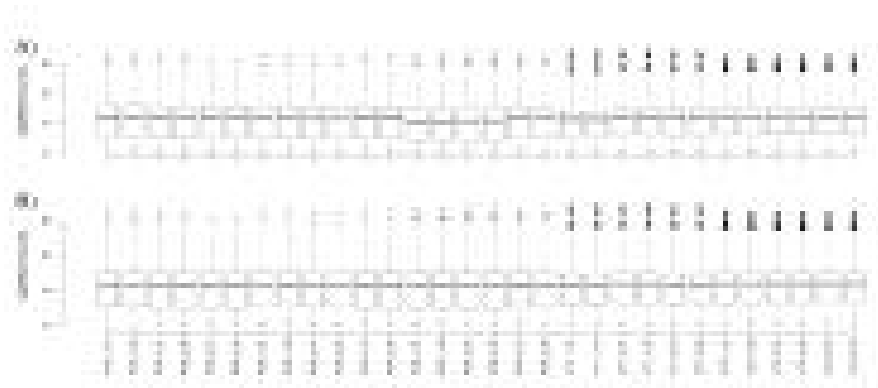


그림 24. 감귤 Normalization 전과 후 유전자 발현값에 대한 boxplot. A) Raw data에서의 평균 발현값에 대한 boxplot. B) Normalized data에서의 평균 발현값에 대한 boxplot.

○ 감귤 Transcripts의 발현량을 분석하기 위한 자료의 normalization

데이터를 normalization하여 처리간에 나타나는 error값을 최소화하여 발현량을 비교하고 정확한 DEG를 효율적으로 선별하고자 함.

가. 온도에 대응하여 발현하는 감귤 특이 유전자군(DEG) 발굴

그림 8에서와 같이 발현되는 유전자 중에서 발현되는 read수가 많고 온도변화에 따라 반응의 차이가 2배 이상이 되는 특이유전자를 발굴하였다. 그림에서 붉은색의 점은 1000개 이상의 transcripts가 2배 이상 발현이 유도되는 유전자군이며, 푸른색은 발현이 억제되는 유전자군을 표시하고 있다(그림 25).

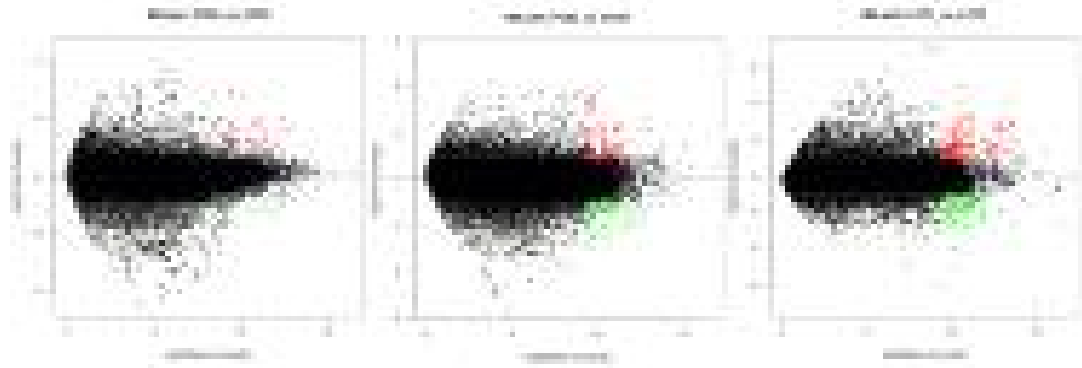


그림 25. 각 DEGs 비교 조합의 유전자 발현량을 이용하여 도식화한 그림 (MA plot). X축 (log2FoldChange): 샘플별 read counts (log2 value), Y축 : DESeq로 보정된 fold change, 발현차이비교)

표 12. 온도처리에 의한 감귤 전사체의 DEG와 Annotation된 유전자수

비교대상 (control vs treatment)	Regulation pattern	2-Fold change		1.5-Fold change	
		No. of DEGs	No. of annotated DEGs	No. of DEGs	No. of annotated DEGs
과실 25°C:30°C	Up	27	27	138	137
	Down	11	11	106	103
과실 25°C:35°C	Up	72	71	357	339
	Down	67	66	545	541
잎 T1:T3	Up	112	100	421	397
	Down	98	90	393	296

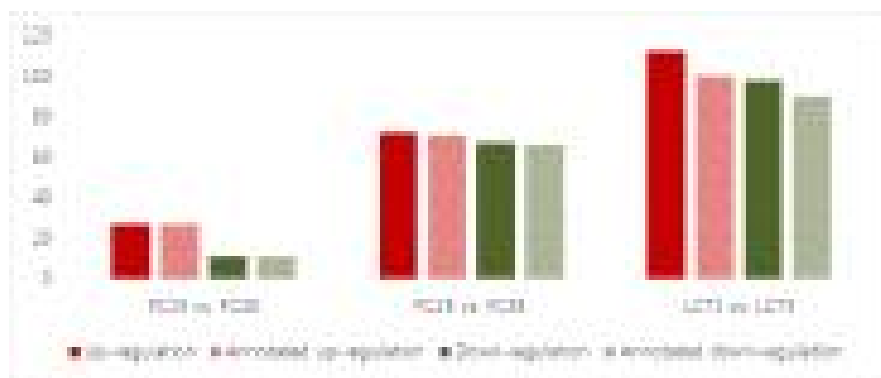


그림 25. 감귤 DEGs 비교 대상간 유의하게 선발된 유전자. FA:감귤과실, LA:감귤나무잎

○ 고온에 의한 감귤 과실의 발현 유도 유전자군

감귤 과실에서의 온도에 따른 발현량의 차이를 비교한 결과, 2배 이상의 차이를 보이는 유전자는 30°C처리에서는 25°C에 비해 27개의 유전자가 검출되었고 모두가 표준유전체에 annotation되었다. 또한 선발강도를 완화하여 1.5배 이상의 발현차이를 보이는 유전자를 대상으로 하였을 경우에 138개의 유전자가 발현되고 그중에서 137개의 유전자가 annotation되었다.

35°C에서는 72개의 유전자가 발현이 특이적으로 유도되었고, 그중에서 71개의 유전자가 표준

유전체 유전자에 annotation되었다. 또한 1.5배 이상의 발현차이를 보이는 유전자를 대상으로 하였을 경우에 357개의 유전자가 발현되고 그중에서 339개의 유전자가 annotation되었다.

○ 고온에 의한 감귤 과실의 발현 억제 유전자군

과실에서는 2배 이상의 차이를 보이는 유전자는 30℃ 처리에서는 25℃에 비해 11개의 유전자가 검출되었고 모두가 표준유전체에 annotation되었다. 또한 선발강도를 완화하여 1.5배 이상의 발현차이를 보이는 유전자를 대상으로 하였을 경우에 106개의 유전자가 발현되고 그중에서 103개의 유전자가 annotation되었다. 35℃에서는 67개의 유전자가 발현이 특이적으로 유도되었고, 그중에서 66개의 유전자가 표준유전체 유전자에 annotation되었다. 또한 1.5배 이상의 발현차이를 보이는 유전자를 대상으로 하였을 경우에 545개의 유전자가 발현되고 그중에서 541개의 유전자가 annotation되었다.

○ 고온에 의한 감귤나무 잎의 발현 차이 유전자군

감귤나무 잎에서는 저온에 비해 고온에서 2배 이상의 차이를 보이며 발현이 유도되는 112개의 유전자가 검출되고 그중에서 100개의 유전자가 표준유전체에 annotation되었다. 또한 98개의 유전자가 발현이 억제되었으며 90개의 유전자가 annotation되었다.

1.5배 이상의 발현차이를 보이는 유전자를 대상으로 하였을 경우에 421개의 유전자가 발현이 유도되고 그중에서 397개의 유전자가 annotation되었다. 또한 393개의 유전자는 발현이 억제되었으며 296개의 유전자가 annotation되었다(그림 25).

나. 감귤의 온도 특이적 유전자 기능분석

○ DEG의 기능에 따른 clustering

발현차이를 보이는 DEG를 기능별로 clustering 한 결과 세포의 대사과정에 관여하는 유전자군은 7개로 나타났으며, 15개의 유전자에서 발현이 증가하였으며 53개의 유전자에서 발현이 감소하였다(표 13).

또한 1개의 유전자군은 세포구성에 관여하는 것으로, 7개는 발현이 증가하고 다른 11개는 발현이 감소하였다. 5개의 유전자군이 기능에 관여하였고, 14개의 유전자에서 발현이 증가하였으며 45개의 유전자에서 발현이 감소하였다.

표 13. 비교 조합 간 DEGs의 GO 결과 (감귤 과실 25℃ vs 35℃)

Category	GO ID	GO Term	up regulation	down regulation
BP	GO:0044238	primary metabolic process	2	7
BP	GO:0016043	cellular component organization	0	6
BP	GO:0009058	biosynthetic process	2	7
BP	GO:0006807	nitrogen compound metabolic process	5	8
BP	GO:0044237	cellular metabolic process	5	8
BP	GO:0051707	response to other organism	1	6
BP	GO:0007275	multicellular organismal development	0	11
CC	GO:0071944	cell periphery	7	11
MF	GO:0016787	hydrolase activity	3	14
MF	GO:0022857	transmembrane transporter activity	0	7
MF	GO:0016491	oxidoreductase activity	4	5
MF	GO:0016740	transferase activity	3	11
MF	GO:0043167	ion binding	4	8

다. 선발된 감귤 DEG의 발현양상에 따른 clustering

○ 발현에 2배 이상 차이를 보이는 유전자군의 발현양상 비교

총 153개의 DEG는 발현이 유도되는 양상과 억제되는 양상이 각각 하나의 패턴을 보였으며, 따라서 두 개의 그룹으로 clustering되었다(그림 26).

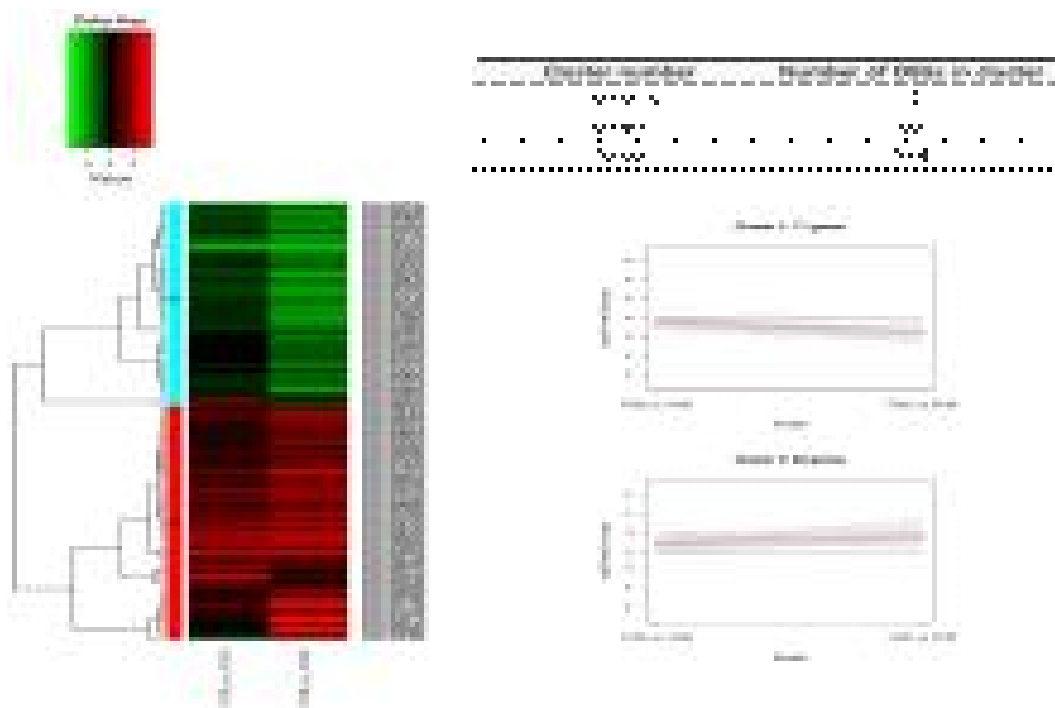


그림 26. 감귤 과실 데이터 Clustering 분석 결과의 Heatmap & Line plot.

마. 온도변화에 따른 감귤 유전자의 발현 분석

○ 고온에 의해 감귤 잎에서 발현이 변화하는 유전자군 선발

Kunitz family trypsin and protease inhibitor protein, HSP20-like chaperones superfamily protein, heat shock protein 21, PYR1-like 11, Heavy metaltransport/detoxification superfamily protein, strictosidine synthase-like 2, multidrug resistance-associated protein 6, NOL1/NOP2/sun family protein, heat shock protein 90.1 등의 유전자가 발현이 유도되었다 (표 14). Bifunctional inhibitor/lipid-transfer protein superfamily protein, Pectate lyase family protein, expansin A8, GDLS-like Lipase/Acylhydrolase superfamily protein, Protein of unknown function (DUF833), HXXXD-type acyl-transferase family protein, Gibberellin-regulated family protein, Pectin lyase-like superfamily protein, expansin A5 등의 유전의 발현이 감소하였다.

표 14. 온도구배하우스 고온에서 감귤 잎에서 발현이 유도 또는 억제되는 유전자군

No.	Gene	log2 Fold change
Induced		
U1	Kunitz family trypsin and protease inhibitor protein	7.06
U2	HSP20-like chaperones superfamily protein	4.90
U3	heat shock protein 21	4.48
U4	PYR1-like 11	3.97
U5	Heavy metaltransport/detoxification superfamily protein	3.89
U6	strictosidine synthase-like 2	3.59
U7	multidrug resistance-associated protein 6	3.58
U8	NOL1/NOP2/sun family protein	3.41
U9	heat shock protein 90.1	3.24
U10	Glucose-1-phosphate adenylyltransferase family protein	3.20
Inhibited		
D1	Bifunctional inhibitor/lipid-transfer protein superfamily	-6.03
D2	Pectate lyase family protein	-4.94
D3	expansin A8	-4.24
D4	GDLS-like Lipase/Acylhydrolase superfamily protein	-4.01
D5	Protein of unknown function (DUF833)	-3.88
D6	HXXXD-type acyl-transferase family protein	-3.31
D7	Gibberellin-regulated family protein	-3.14
D8	Pectin lyase-like superfamily protein	-3.11
D9	cytochrome P450, family 77, subfamily A, polypeptide 4	-2.99
D10	expansin A5	-2.84

○ 고온에 의한 감귤나무 잎에서 유전자 발현 변화 분석

전사체분석의 결과와 같은 양상으로 감귤나무 잎에서 크게 발현이 유도되거나 억제되었으며 온도가 높을수록 그 양상은 유사하게 나타났다. 또한 2014년도에 채취한 잎과 2015년에 채취한 시료에서도 동일한 발현 양상을 나타내었다(그림 27).

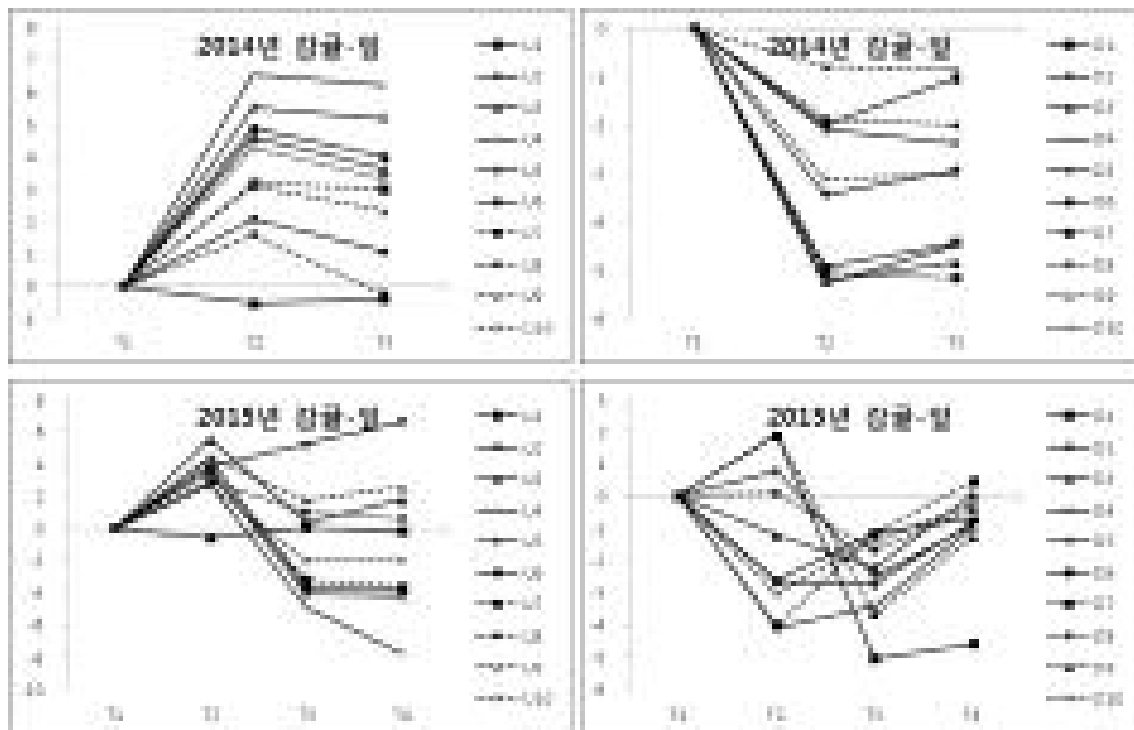


그림 27. Real-time PCR에 의한 감귤나무 잎에서의 특이발현 유전자의 발현분석

표 15. 생장상 고온처리에 의해 감귤 과실에서 발현이 유도 또는 억제되는 유전자 군

	No.	Gene	log2 Fold change
Induced	U1	Kunitz family trypsin and protease inhibitor protein	3.55
	U2	osmotin 34	3.42
	U3	Serine protease inhibitor, potato inhibitor I-type family protein	3.28
	U4	HSP20-like chaperones superfamily protein	3.24
	U5	Heavy metal transport/detoxification superfamily protein	2.91
	U6	lipid transfer protein 1	2.90
	U7	heat shock protein 21	2.57
	U8	thioredoxin H-type 1	2.40
	U9	Wound-responsive family protein	2.39
	U10	MLP-like protein 423	2.35
Inhibited	D1	expansin A4	-3.94
	D2	calreticulin 3	-3.02
	D3	elicitor-activated gene 3-2	-2.83
	D4	cytochrome P450, family 71, subfamily B, polypeptide 35	-2.63
	D5	expansin A1	-2.62
	D6	Pectate lyase family protein	-2.59
	D7	P-loop containing nucleoside triphosphate hydrolases	-2.58
	D8	polyol/monosaccharide transporter 5	-2.57
	D9	heat shock cognate protein 70-1	-2.47
	D10	Homeodomain-like superfamily protein	-2.39

○ 고온에 의해 감귤 과실에서 발현이 변화하는 유전자군 선발

Kunitz family trypsin and protease inhibitor protein, osmotin 34, Serine protease inhibitor, potato inhibitor I-type family protein, HSP20-like chaperones superfamily protein, Heavy metal transport/detoxification superfamily protein, lipid transfer protein 1, heat shock protein 21, thioredoxin H-type 1 등의 유전자가 발현이 유도되었다(표 15). Expansin A4, calreticulin 3, elicitor-activated gene 3-2, cytochrome P450, family 71, subfamily B, polypeptide 35, expansin A1, Pectate lyase family protein, P-loop containing nucleoside triphosphate hydrolases, polyol/monosaccharide transporter 5, heat shock cognate protein 70-1 등의 유전자가 발현이 억제되었다.

○ 고온에 의한 감귤 과실에서 유전자 발현 변화 분석

전사체분석의 결과와 같은 양상으로 감귤 과실에서 크게 발현이 유도되거나 억제되었으며 온도가 높을수록 그 양상은 유사하게 나타났다(그림 28).

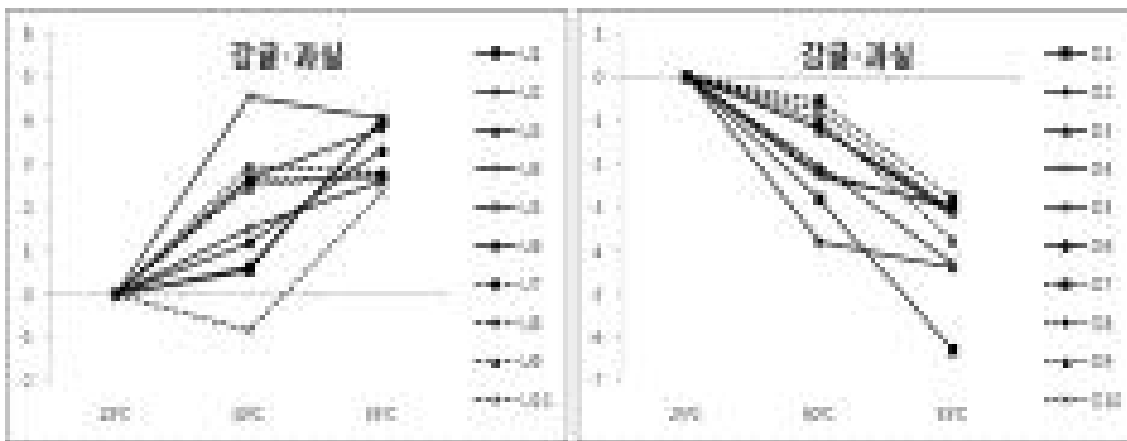


그림 28. Real-time PCR에 의한 감귤나무 과실에서의 특이발현 조절 유전자의 발현분석

6. RNA sequencing에 의한 온도변화관련 포도 transcriptome 분석

○ 포도 Transcripts의 발현량을 분석하기 위한 자료의 nomalization

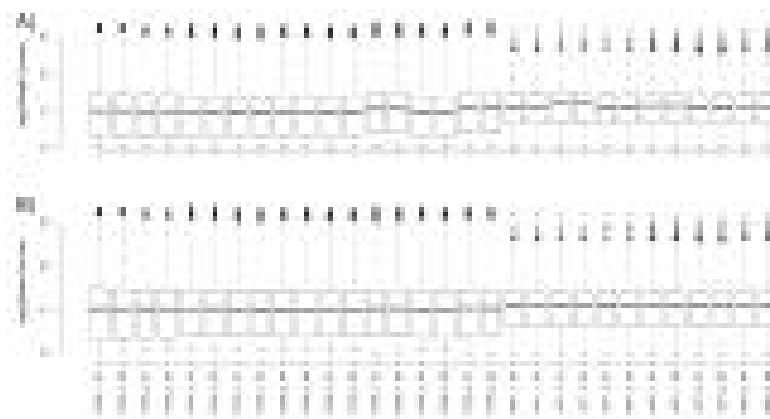


그림 29. 포도 Normalization 전과 후 유전자 발현값에 대한 boxplot. A) Raw data에서의 평균 발현값에 대한 boxplot. B) Normalized data에서의 평균 발현값에 대한 boxplot

데이터를 normalization하여 처리간에 나타나는 error값을 최소화하여 발현량을 비교하고 정확한 DEG를 효율적으로 선별하고자 하였다.

가. 온도에 대응하여 발현하는 포도 특이 유전자군(DEG) 발굴

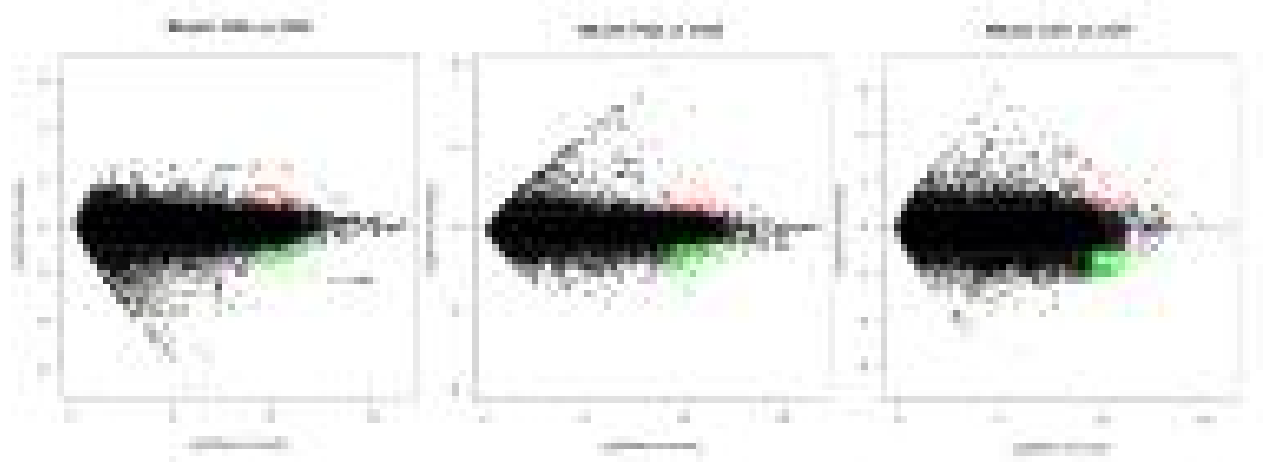


그림 30. 각 DEGs 비교 조합의 유전자 발현량을 이용하여 도식화한 그림 (MA plot). X축 (log2FoldChange): 샘플별 read counts (log2 value). Y축 : DESeq로 보정된 fold change, 발현차이비교.

발현되는 유전자 중에서 발현되는 read수가 많고 온도변화에 따라 반응의 차이가 2배 이상이 되는 특이유전자를 발굴하였다. 그림에서 붉은색의 점은 1000개 이상의 transcripts가 2배 이상 발현이 유도되는 유전자군이며, 푸른색은 발현이 억제되는 유전자군을 표시하고 있다(그림 30).

표 16. 온도처리에 의한 포도 전사체의 DEG와 Annotation된 유전자수

비교대상 (control vs treatment)	Regulation pattern	2-Fold change		1.5-Fold change	
		No. of DEGs	No. of annotated DEGs	No. of DEGs	No. of annotated DEGs
과실 25°C:30°C	Up	34	34	149	146
	Down	43	39	265	250
과실 25°C:35°C	Up	46	45	270	255
	Down	104	98	448	434
잎 T1:T3	Up	32	30	252	243
	Down	95	92	391	378

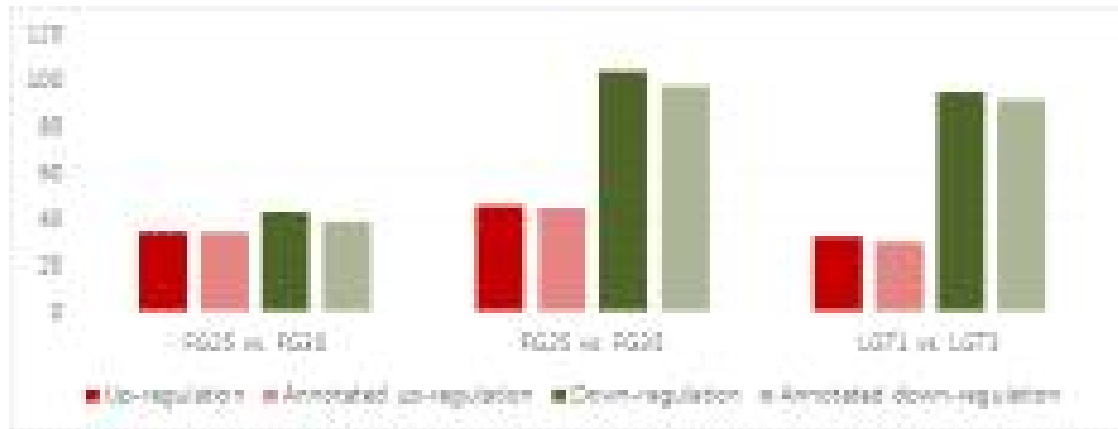


그림 31. 포도 DEGs 비교 대상간 유의하게 선발된 유전자(DEG)의 수

○ 고온에 의한 포도 과실의 발현 유도 유전자군

포도 과실에서의 온도에 따른 발현량의 차이를 비교한 결과, 2배 이상의 차이를 보이는 유전자는 30℃처리에서는 25℃에 비해 34개의 유전자가 검출되었고 모두가 표준유전체에 annotation되었다. 또한 선발강도를 완화하여 1.5배 이상의 발현차이를 보이는 유전자를 대상으로 하였을 경우에 149개의 유전자가 발현되고 그중에서 146개의 유전자가 annotation되었다. 35℃에서는 46개의 유전자가 발현이 특이적으로 유도되었고, 그중에서 45개의 유전자가 표준유전체 유전자에 annotation되었다. 또한 1.5배 이상의 발현차이를 보이는 유전자를 대상으로 하였을 경우에 270개의 유전자가 발현되고 그중에서 255개의 유전자가 annotation되었다.

○ 고온에 의한 포도 과실의 발현 억제 유전자군

과실에서는 2배 이상의 차이를 보이는 유전자는 30℃처리에서는 25℃에 비해 43개의 유전자가 검출되었고 그중에서 39개의 유전자가 표준유전체에 annotation되었다. 또한 선발강도를 완화하여 1.5배 이상의 발현차이를 보이는 유전자를 대상으로 하였을 경우에 265개의 유전자가 발현되고 그중에서 250개의 유전자가 annotation되었다. 35℃에서는 104개의 유전자가 발현이 특이적으로 유도되었고, 그중에서 98개의 유전자가 표준유전체 유전자에 annotation되었다. 또한 1.5배 이상의 발현차이를 보이는 유전자를 대상으로 하였을 경우에 448개의 유전자가 발현되고 그중에서 434개의 유전자가 annotation되었다.

○ 고온에 의한 포도나무 잎의 발현 차이 유전자군

포도나무 잎에서는 저온에 비해 고온에서 2배 이상의 차이를 보이며 발현이 유도되는 32개의 유전자가 검출되고 그중에서 30개의 유전자가 표준유전체에 annotation되었다. 또한 95개의 유전자가 발현이 억제되었으며 92개의 유전자가 annotation되었다. 또한 1.5배 이상의 발현차이를 보이는 유전자를 대상으로 하였을 경우에 252개의 유전자가 발현이 유도되고 그중에서 243개의 유전자가 annotation되었다. 또한 391개의 유전자는 발현이 억제되었으며 378개의 유전자가 annotation되었다(그림 31).

나. 포도의 온도 특이적 유전자 기능분석

○ DEG의 기능에 따른 clustering

발현차이를 보이는 DEG를 기능별로 clustering 한 결과 세포의 대사과정에 관여하는 유전자군은 6개로 나타났으며, 29개의 유전자에서 발현이 증가하고 48개의 유전자에서 발현이 감소하였다. 또한 1개의 유전자군은 세포구성에 관여하는 것으로, 5개는 발현이 증가하고 다른 6개는 발현이 감소하였다. 5개의 유전자군이 기능에 관여하였고, 30개의 유전자에서 발현이 증가하였으며 52개의 유전자에서 발현이 감소하였다.

표 17. 비교 조합 간 DEGs의 GO 결과 (포도과실 25℃ vs 포도과실 35℃)

Category	GO ID	GO Term	up regulation	down regulation
BP	GO:0044238	primary metabolic process	3	4
BP	GO:0044237	cellular metabolic process	6	9
BP	GO:0009058	biosynthetic process	6	18
BP	GO:0006807	nitrogen compound metabolic process	7	9
BP	GO:0016043	cellular component organization	3	7
BP	GO:0007275	multicellular organismal development	4	1
CC	GO:0071944	cell periphery	5	6
MF	GO:0016787	hydrolase activity	12	6
MF	GO:0016829	lyase activity	0	6
MF	GO:0016491	oxidoreductase activity	4	17
MF	GO:0016740	transferase activity	8	10
MF	GO:0043167	ion binding	6	13

다. 선발된 포도 DEG의 발현양상에 따른 clustering

○ 2배 이상 발현되는 유전자군의 발현양상 비교

총 178개의 DEG를 대상으로 발현양상을 비교한 결과 발현이 유도되는 양상과 억제되는 양상이 각각 세개의 패턴을 보였으며, 따라서 여섯 개의 그룹으로 clustering되었다(그림 32).

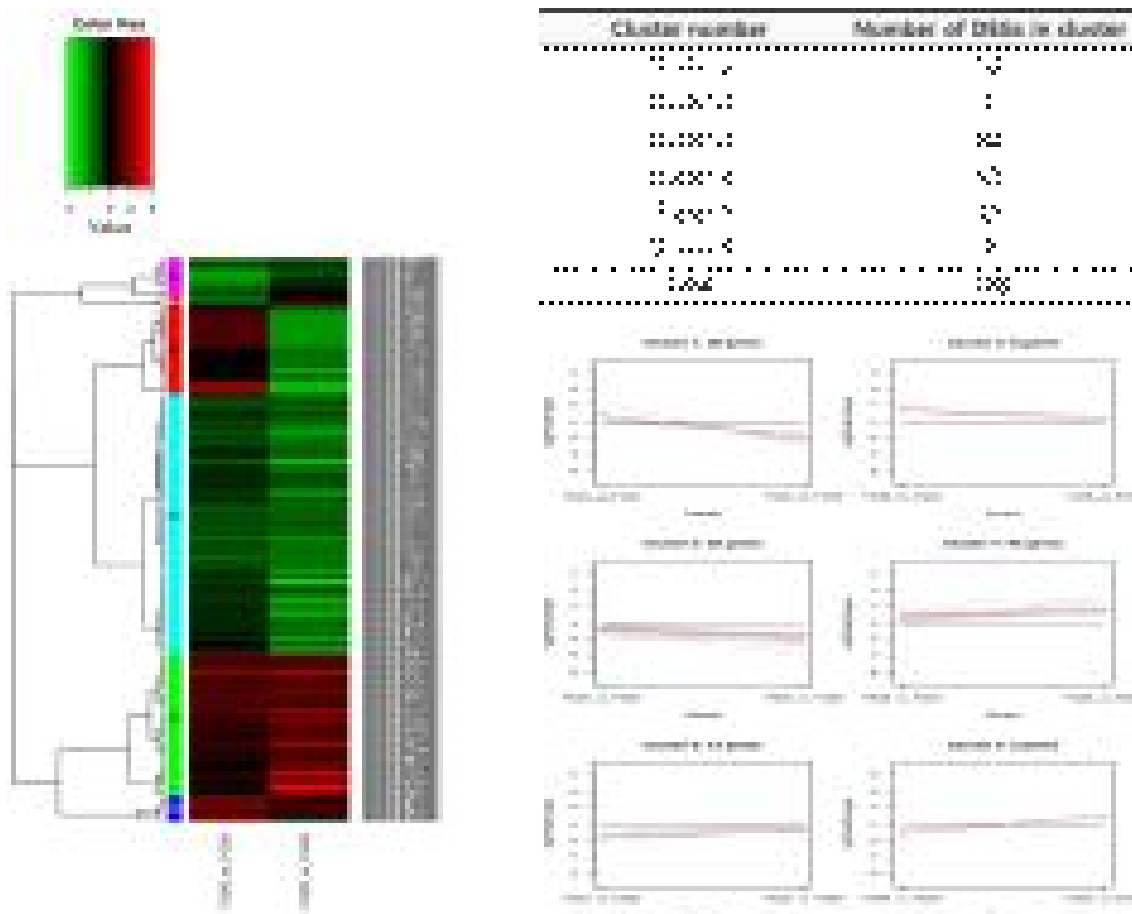


그림 32. 포도 과실 데이터 Clustering 분석 결과의 Heatmap & Line plot.

- a) Heatmap은 왼쪽부터 과실25℃-30℃, 과실25℃-35℃ 비교조합 데이터 표현
b) Line plot은 Heatmap에 표현된 cluster를 패턴으로 표현

라. 온도변화에 따른 포도 유전자의 발현 분석

- 고온에 의해 포도나무 잎에서 발현이 변화하는 유전자군 선발

BCL-2-associated athanogene 6, heat shock protein 21, HAD superfamily, subfamily IIIB acidphosphatase , 17.6 kDa class II heat shock protein, highly ABA-induced PP2C gene 3, heat shock protein 90.1, OBP3-responsive gene 1, DNAJ heat shock N-terminal domain-containing protein, Protein phosphatase 2C family protein, Bifunctional inhibitor 등의 유전자가 발현이 유도되었다(표 18).

APS reductase 3, Ribosomal protein S7e family protein, Ribosomal protein L2 family, tonoplast intrinsic protein 1;3, ferritin 2, Ribosomal protein L6 family, pathogenesis-related gene 1, Ribosomal protein L7Ae/L30e/S12e/Gadd45 family protein, Ribosomal protein S4, Ribosomal L5P family protein 등의 유전자가 발현이 억제되었다.

표 18. 온도구배하우스 고온에서 포도 잎에서 발현이 유도 또는 억제되는 유전자군

	Name	Gene	log2 Fold change
Induced	U1	BCL-2-associated athanogene 6	6.82
	U2	heat shock protein 21	3.85
	U3	HADsuperfamily,subfamilyIIIBacidphosphatase	3.50
	U4	17.6 kDa class II heat shock protein	3.34
	U5	highly ABA-induced PP2C gene 3	3.13
	U6	heat shock protein 90.1	2.87
	U7	OBP3-responsive gene 1	2.85
	U8	DNAJ heat shock N-terminal domain-containing protein	2.74
	U9	Protein phosphatase 2C family protein	2.66
	U10	Bifunctional inhibitor	2.56
Inhibited	D1	APS reductase 3	-2.29
	D2	Ribosomal protein S7e family protein	-2.28
	D3	Ribosomal protein L2 family	-2.24
	D4	tonoplast intrinsic protein 1;3	-2.23
	D5	ferritin 2	-2.29
	D6	Ribosomal protein L6 family	-2.13
	D7	pathogenesis-related gene 1	-2.11
	D8	Ribosomal protein L7Ae/L30e/S12e/Gadd45 family protein	-2.08
	D9	Ribosomal protein S4	-2.07
	D10	Ribosomal L5P family protein	-2.07

○ 고온에 의한 포도나무 잎에서 유전자 발현 변화 분석

전사체분석의 결과와 같은 양상으로 포도나무 잎에서 크게 발현이 유도되거나 억제되었으며 온도가 높을수록 그 양상은 유사하게 나타났다. 또한 2014년도에 채취한 잎과 2015년에 채취한 시료에서도 동일한 발현 양상을 나타내었다(그림 33).

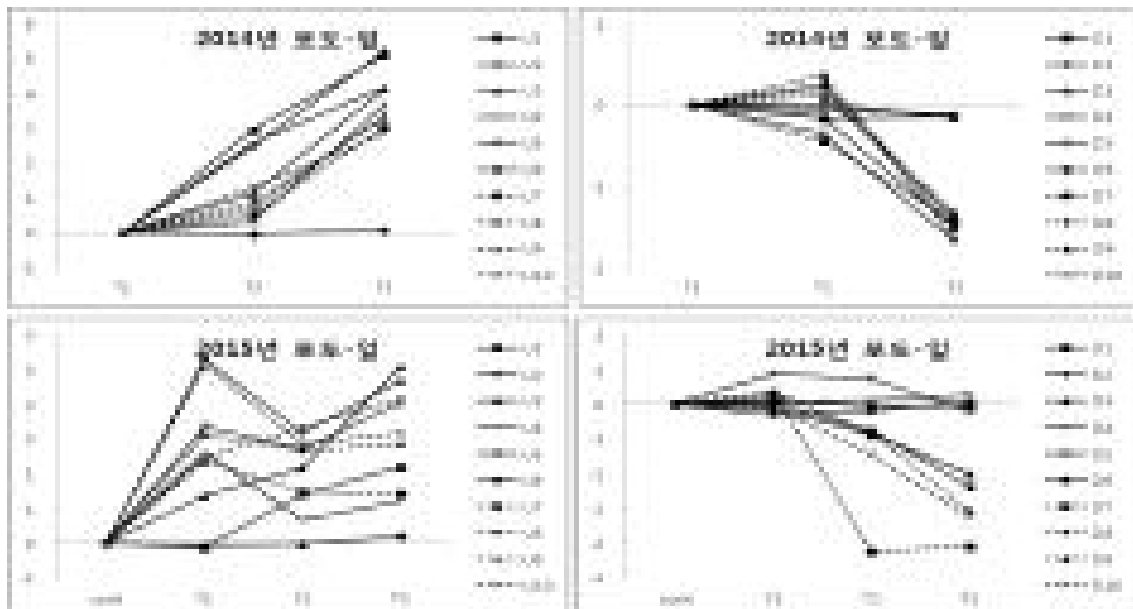


그림 33. Real-time PCR에 의한 포도나무 잎에서의 특이발현 유전자의 발현분석

○ 고온에 의해 포도 과실에서 발현이 변화하는 유전자군 선발

Isocitrate lyase, Cysteine proteinases superfamily protein, cupin family protein, glycosyl hydrolase 9B15, beta-xylosidase 2, aspartic proteinase A1, UDP-Glycosyltransferase superfamily protein, dicer-like 2, tubulin beta 8, BCL-2-associated athanogene 6 등의 유전자가 발현이 유도되었다(표 19).

Flavanone 3-hydroxylase, PHE ammonia lyase 1, Chlorophyll A-B binding family protein, polygalacturonase inhibiting protein 1, phenylalanine ammonia-lyase 2, Chalcone and stilbene synthase family protein, myo-inositol-1-phosphate synthase 2, cytochrome B5 isoform D, nodulin MtN21 /EamA-like transporter family protein, caffeoyl-CoA 3-O-methyltransferase 등의 유전자가 발현이 억제되었다.

○ 고온에 의한 포도 과실에서 유전자 발현 변화 분석

전사체분석의 결과와 같은 양상으로 포도 과실에서 크게 발현이 유도되거나 억제되었으며 온도가 높을수록 그 양상은 유사하게 나타났다(그림 34).

표 19. 생장상내 고온에 의해 포도 과실에서 발현이 유도 또는 억제되는 유전자군

	N0.	Gene	log2 Fold change
Induced	U1	isocitrate lyase	9.62
	U2	Cysteine proteinases superfamily protein	6.77
	U3	cupin family protein	5.22
	U4	glycosyl hydrolase 9B15	5.07
	U5	beta-xylosidase 2	3.49
	U6	aspartic proteinase A1	3.45
	U7	UDP-Glycosyltransferase superfamily protein	3.04
	U8	dicer-like 2	2.96
	U9	tubulin beta 8	2.70
	U10	BCL-2-associated athanogene 6	2.49
Inhibited	D1	flavanone 3-hydroxylase	-4.03
	D2	PHE ammonia lyase 1	-3.71
	D3	Chlorophyll A-B binding family protein	-3.29
	D4	polygalacturonase inhibiting protein 1	-3.14
	D5	phenylalanine ammonia-lyase 2	-2.85
	D6	Chalcone and stilbene synthase family protein	-2.84
	D7	myo-inositol-1-phosphate synthase 2	-2.82
	D8	cytochrome B5 isoform D	-2.76
	D9	nodulin MtN21 /EamA-like transporter family protein	-2.63
	D10	caffeoyl-CoA 3-O-methyltransferase	-2.61

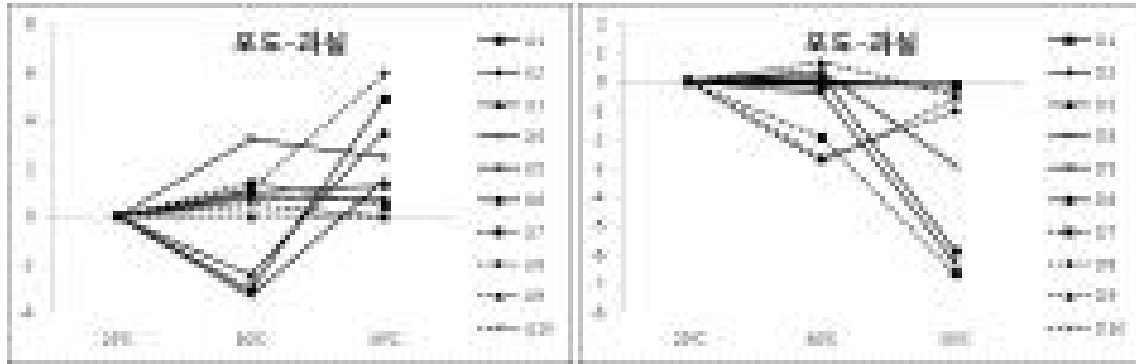


그림 34. Real-time PCR에 의한 포도 과실에서 특이발현 조절 유전자의 발현분석

6. 고온 특이적인 유전자군 발굴 및 대사경로 추적

가. 포도, 사과, 감귤의 전사체 분석에서 선발된 고온 특이적인 DEG의 발현분석

- 사과 포도 감귤나무 잎에서 공통으로 발현이 유도되는 유전자 선발
 - Heat shock protein 유전자가 세 과종에서 공통적으로 발현이 유도되었으며, protein phosphatase 2C family protein, bifunctional inhibitor, HSP-20 like chaperones superfamily protein 등의 유전자가 공통적으로 발현이 유도되었다.
- 사과 포도 감귤나무 잎에서 공통으로 발현이 억제되는 유전자 선발
 - Ferretin, Plant invertase/pectin methylesterase inhibitor superfamily protein 등의 유전자가 공통적으로 발현이 억제되었다.

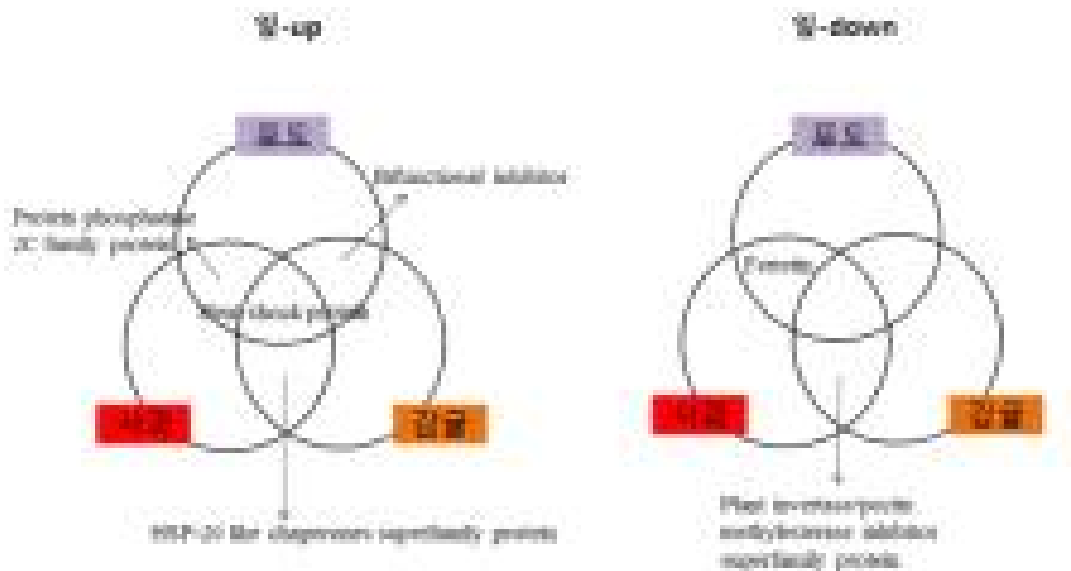


그림 35. 사과, 포도, 감귤의 잎에서 공통으로 발현이 유도 또는 억제되는 유전자

- 사과 포도 감귤 과실에서 공통으로 발현이 유도되는 유전자 선발
 - UDP-Glycosyltransferase superfamily protein, Heavy metal transport/detoxification superfamily protein 등의 유전자가 공통적으로 발현이 유도되었다.
- 사과 포도 감귤 과실에서 공통으로 발현이 억제되는 유전자 선발

Expansin, UDP-Glycosyltransferase superfamily protein 등의 유전자가 공통적으로 발현이 억제되었다.

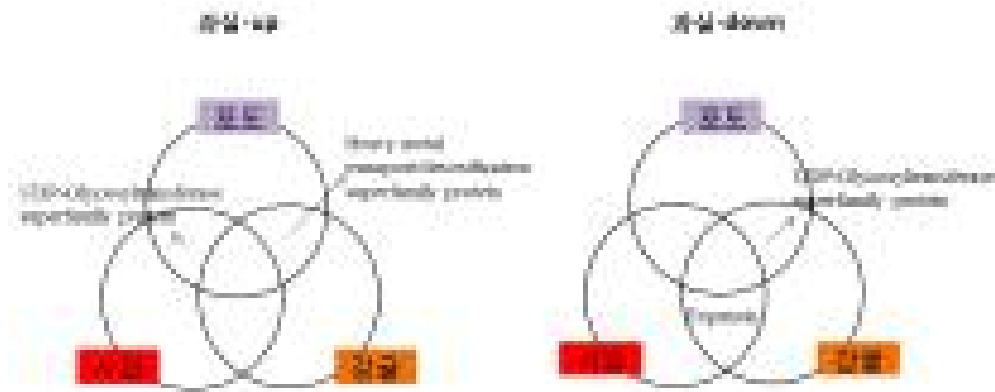


그림 36. 사과, 포도, 감귤의 과실에서 공통으로 발현이 유도 또는 억제되는 유전자

○ 고온에 의한 과실의 대사경로에 따른 유전자 발현 변화 분석

Metabolic pathway, biosynthesis of secondary metabolites, biosynthesis of antibiotics, microbial metabolism in diverse environments, carbon metabolism, methane metabolism, flavonoid biosynthesis pathway 등의 대사경로에서 고온에 특이적으로 반응하는 유전자군이 발현되었다.

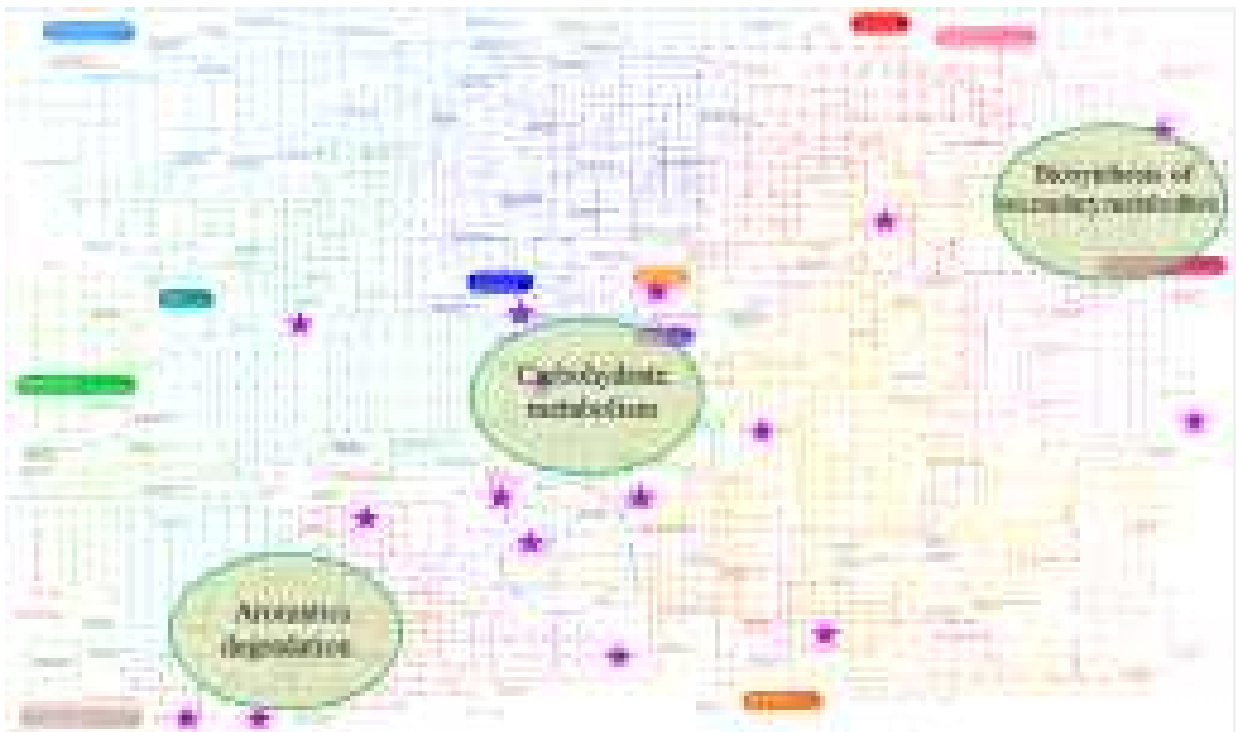


그림 37. 고온에 특이적으로 반응하는 유전자군 및 대사경로 추적

○ 고온에 의해 flavonoid biosynthesis pathway에서 포도 과실의 유전자 선발

Chalcone isomerase, naringenin 3-dioxygenase, dihydroflavonol reductase, leucoanthocyanidin dioxygenase, flavonol synthase, shikimate O-hydroxycinnamoyltransferase, anthocyanidin reductase 등의 유전자 발현이 증가하거나 감소한다.

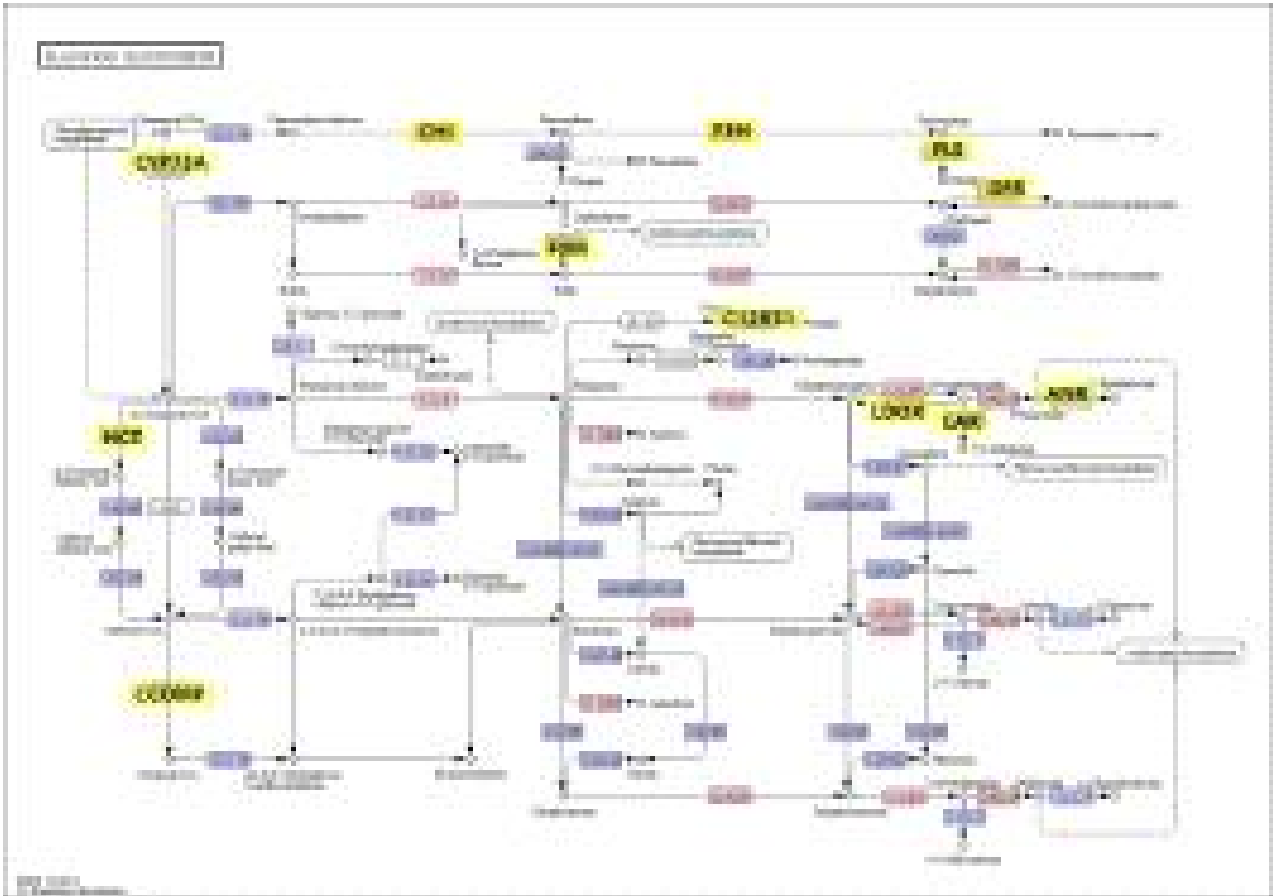
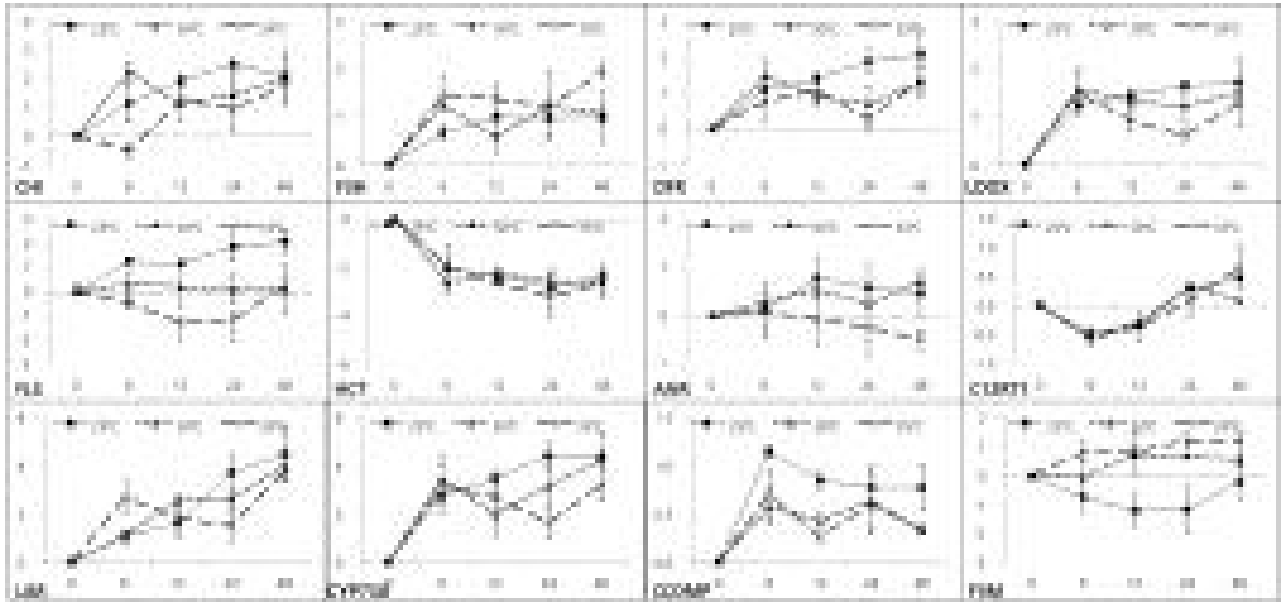


그림 38. flavonoid biosynthesis pathway에 관여하는 유전자

○ ‘캠벨얼리’와 ‘거봉’ 포도 과실의 착색초반기에 온도를 달리하여 다양한 flavonoid biosynthesis 관련 유전자의 발현을 검정

캠벨얼리에서 대부분 유전자의 발현은 유도되었으며, 25-30℃보다 고온(35℃)에서 상대적으로 유전자의 발현이 억제되었으며, shikimate O-hydroxycinnamoyltransferase(HCT) 유전자의 발현은 모든 고온에서 억제되었다.

거봉에서는 trans-cinnamate 4-monooxygenase(CYP73A)와 caffeoyl-CoA O-methyltransferase(CCOMP) 등의 유전자는 고온 처리기간에 따라 발현이 유도되었으나, 대부분의 유전자는 캠벨얼리와 반대로 발현이 억제되었다.



‘후지’ 사과의 가용성 고형물 함량은 생육기 온도가 30℃ 일 때 보다 저온조건인 20℃ 및 25℃ 일수록 증가하는 경향을 보이는 것으로 보고되어 있다(Yoon 등, 2010). 과실비대기(6-8월)의 기온이 30℃ 이상일 때 신초와 과실의 생장속도 및 광합성속도가 감소하고, 35℃ 이상일 때는 호흡에 의한 에너지 소비가 많아져 광합성속도가 급감한다(Lakso, 1994). 자당, 과당, 포도당 등의 당류 중에서 자당은 사과의 유과기 세포 생장에 가장 큰 영향을 끼치며, 솔비톨은 과당 축적의 주요 기질이며 당 축적 대사에서 중요한 역할을 한다(Beruter, 1985). 이와 같이 생육기에 고온을 받게 되면 당함량의 감소뿐 아니라 광합성이 감소하여 생장억제 등 악영향을 끼칠 수 있다. PG는 큰 유전자군으로 식물조직이나 발달단계에 넓은 범위로 발현되며 사과 과실의 성숙과 연관되어 있으며(Atkinson 등, 2002), 특이온도 의존적으로 에틸렌반응 유전자를 조절하며 세포벽 효소의 작용에 의해 조절된다(Costa 등, 2002). 본 연구에서는 당 합성관련 유전자인 BMY와 PG 유전자의 발현이 변색이 시작되는 1단계보다 변색이 완료된 3단계에서 월등히 높았는데, 이는 과실의 성숙이 진행됨에 따라 고온에 의해 당대사와 관련한 유전자의 발현도 증가한 것으로 여겨진다.

사과 품종의 과실 발육 단계별 당과 전분농도 및 조성에 대한 분석결과에 따르면, 중생종인 ‘홍로’ 과실에서는 생육기간 동안 당 농도는 꾸준히 증가하며 성숙기 이후에 급속한 증가양상을 나타낸 반면에 전분 농도는 급격히 증가하였다가 급격히 감소하는 양상을 보였다(Song 등, 2003). 성숙기의 총 전분 농도가 낮은 것은 대부분이 가용성 당으로 변환되었기 때문이다. 다양한 사과 품종에서 안토시아닌 합성을 위한 최적의 온도는 20-25℃이며, 이보다 낮거나 높으면 합성이 억제된다(Curry, 1997). 사과의 착색에 직접적으로 관여하는 안토시아닌 합성이 고온에 의해 억제되는 것으로 알려져 있으며(Reay, 1999), 배와 사과에서 착색이 불량한 것은 고온에 의한 안토시아닌의 억제로 인한 것으로 보고되었다(Steyn 등, 2004).

사과 과실에서 안토시아닌 생합성 유전자의 발현은 과실의 붉은색의 착색 정도에 관련된 안토시아닌 축적에 비례적이며, 유전자의 발현 수준은 안토시아닌 농도에 상응한다(Honda 등, 2002). MdCHS, MdF3H, dihydroflavonol 4-reductase(pDFR), anthocyanin synthase(MdANS), UDP galactose:flavonoid glucose transferase(pUFGluT) 5개 유전자를 대상으로 발현 수준을 분석하여 고온보다는 저온에서 특히 MdCHS, MdANS, pUFGluT 유전자의 발현이 높았다고 보고하였다(Ubi 등, 2006). 안토시아닌 함량과 PAL활성 측정 결과에 따라 15-20℃의 온도에서 착색에 효과적이라고 보고되었다(Noro 등, 1991; Lee, 1999). Lister 등(1996)에 의하면, ‘Splendour’ 사과 과실에서는 PAL, chalcone isomerase(CHI), UDP galactose:flavonoid 3-O-galactosyltransferase(UFGalT) 유전자의 활성이 과실 성숙 중에 안토시아닌 축적과 관련이 있다고 밝혀졌다. 그러나, ‘Delicious’와 ‘Ralls’ 사과 과실의 생육 기간 동안 빛에 노출된다면 CHS 활성은 안토시아닌 생합성의 조절에 크게 영향을 끼치지 않는다는 것을 증명하였으며(Ju 등, 1995a, 1995b), PAL 활성은 ‘Delicious’ 과피에서 안토시아닌 축적과 관련이 없으며 플라보노이드 농도는 과실 발달 단계 전체에서 높게 유지되었다. 본 연구에서는 과피 착색과 관련 있는 PAL, CHS, F3H, MDH 유전자의 발현을 확인하였으며, 서로 다른 온도처리구에서 변색 시작단계에서는 감소하다가 증가하는 경향을 보였으며 변색 중간단계에서는 점차 증가하는 경향을 보였다. 변색단계별로 보았을 때 25℃ 처리구가 다른 처리구보다 발현 정도가 더 높은 것을 확인할 수 있었고, 30℃ 이상의 고온에서는 발현이 억제되었으며, 변색기 초기단계보다 성숙이 진행될수록 발현이 현저하게 억제되었다.

‘후지’ 사과의 생육기 온도가 20℃ 정도일 때 광합성률이 증가하여 착색을 증진시킬 뿐만 아니

라 과중 및 당함량을 높여 과실품질을 향상시키는데 효과적이라고 한다(Yoon 등, 2010). 그러나 과실의 착색에는 온도뿐만 아니라 광의 영향도 크게 작용하며, 수관위치에 따른 광환경에 따라 수관상단-외부 과실의 착색이 30% 정도 진행이 되었을 때 수관하단-내부 과실의 경우 착색이 전혀 진행되지 않음을 알 수 있다(Song 등, 2014). 이와 같이 양호한 광조건에서 착색이 촉진되었으며, ‘Delicious’ 사과에서도 광투과율이 감소한 경우에는 과실 크기 및 품질, 생산성이 현저히 저하되었다(Barritt 등, 1991). 본 연구에서는 기후 변화에 따른 온도상승에 따른 유전자의 발현에 관한 연구를 수행하였으나, 기후 변화에 따른 고온과 더불어 변화할 수 있는 광조건을 달리하여 처리한다면 과실의 변색단계별 기후 변화에 따른 반응 기작을 더 깊이 이해할 수 있을 것으로 여겨진다.

Beta-amylase나 beta-mannosidase 등은 전분 분해 과정에 있어서 중요한 효소들이다(Mishra and Dubey, 2013). 황룡병에 감염된 mandarin의 전사체 분석 연구 논문(Xu 등, 2015) 결과를 보면, 차등 발현된 유전자들 중에서 발현이 억제된 대부분의 유전자들은 전분 대사 과정과 관련된 분해 효소 기능을 가지는 유전자들이며, 당대사와 관련된 4개의 beta-amylase, alcohol acyl transferase, glycosyl transferase family 8 유전자 등이 포함되었고, 발현이 유도되는 유전자들에는 ADP-glucose pyrophosphorylase, α -amylase, β -glucosidase, starch synthase 등 9종의 유전자가 포함되었다. Monroe 등(2014)은 애기장대를 연구한 논문에서 온도나 수소이온농도 등의 다양한 스트레스 조건에 따라 BAM1과 BAM3 유전자가 서로 다른 발현 양상을 나타낸다고 하였는데, BAM1은 고온(35-45°C)에서, BAM3는 저온(10°C)에서 발현이 강하게 유도된다고 하였다. 본 연구의 결과에서 ‘하례조생’과 ‘부지화’의 BMY 유전자는 애기장대의 BAM1 유전자와 비슷하게 30-35°C 처리구에서 발현이 유도되는 경향을 나타내었다.

고온에 의한 세포벽의 변성은 에틸렌에 의해 조절되는 펙틴 분해효소에 의해 이루어지며(Lurie 등, 1996), PG의 mRNA 축적과 전사, 효소 활성화 등은 에틸렌 의존적이라고 알려져 있다(Brummell and Harpster, 2001). 감귤류의 과실의 경우, 펙틴 중합체의 변성에 중요 효소인 exopolygalacturonase의 활성화는 매우 낮은 편이나(Riov, 1974), 펙틴 가용화에 있어서 이러한 효소들의 역할은 고온에 의한 것인지 또는 저온에 의한 것인지 확실하게 설명되어 있지 않다(Holland 등, 2012). 이러한 보고와 유사하게 본 연구에서도 PG 유전자의 발현은 두 품종 모두에서 전체적으로 감소되는 경향이었고, 시간이 경과할수록 25-30°C에서 보다 35°C의 고온에서 크게 감소하였다. 이러한 PG 유전자의 발현은 사과 과실(Kim 등, 2015a)과 포도 과실(Kim 등, 2015b)에서도 비슷한 경향을 나타내었다.

MDH 유전자는 세포에서 다양한 분자 형태로 존재하며, 미토콘드리아 MDH와 세포질 MDH로 식물에서 확인할 수 있다(Shannon, 1968; Yang and Scandalios, 1974; Yudina, 2012). 감귤류의 MDH 유전자에 대한 연구는 저온이나 dehydration에 의해 발현이 조절되고(Hara 등, 1999; Porat 등, 2002), 저온에 민감한 mandarin 외피에서 dehydrin을 encode하는 *Crcor15*가 과피에서 2°C 나 12°C에서는 발현이 유지되었는데 37°C에서는 저하되었다고 보고 되어 있다(Sanchez-Ballesta 등, 2004). 본 연구에서 MDH 유전자는 1단계에서는 ‘하례조생’과 ‘부지화’에서 증가하는 경향이었으나, 성숙이 진행되면서 2, 3단계에서 두 품종에서 서로 다른 반응을 나타내었다.

플라보노이드 생합성 과정은 phenylpropanoid 합성경로를 통해 일어나며, 여기에는 PAL, CHS, CHI, F3H, dihydroflavonol 4-reductase(DFR) 등 다양한 효소들이 관여하고 있다(Bogs 등, 2006; Boss 등, 1996; Ford 등, 1998). 플라보노이드 생합성과 관련된 유전자들의 발현은 사과의 착색에서 안토시아닌의 축적에 영향을 끼치며, 과실의 안토시아닌 함량과도 일치하는 발현

양상을 나타낸다(Honda 등, 2002). 감귤류에서 PAL의 활성 유도는 저온에 의한 증상 발달(Sanchez-Ballesta 등, 2000b), 감마선에 의한 과피 손상(Riov 등, 1968), 기계적 손상 후 발생하는 치유 과정(Ismail and Brown, 1979) 등과 함께 일어난다고 보고되어 있다. Sanchez-Ballesta 등(2000a)은 고온 전처리(37° C)에 의해 감귤류의 PAL 유전자 발현과 효소 활성은 4시간 만에 가장 활발하고, 그 후 서서히 감소하는 경향을 보였으며, 이들은 저온 저장에서 내성을 나타냈다고 보고하였다. 사과 과실에서는 안토시아닌 함량과 PAL 활성은 15-20° C 정도에서 효과적으로 유도된다(Lee, 1999; Noro 등, 1991). 과실 착색과 관련하여 CHS 유전자의 발현은 다양한 과실에서 보고(Cotroneo 등, 2006; Wang 등, 2010)되어 있는데, 빛과 UV-B 조사(Feng 등, 2010; Ubi 등, 2006), 저온(Crifó 등, 2011; Lo Piero 등, 2005) 등에 의해서 발현이 유도되며, 과수에 따라 다르게 조절되는 것으로 여겨진다(Xie 등, 2011). Crifó 등(2011)은 blood orange에서 저온 스트레스는 유전자의 발현을 통해 안토시아닌 생합성을 증가시키며, 이와 관련된 PAL과 CHS 등 유전자의 발현이 증가되었다고 보고하였다. 사과나 포도 과실에 관한 연구에서는 30-35° C의 고온이 안토시아닌 함량을 감소시키고 안토시아닌 생합성 관련 유전자들의 발현도 저하되었다는 보고도 있다(Azuma 등, 2012; Lin-Wang 등, 2011). F3H 유전자는 저온에 의해 발현이 증가한다고 보고(Ban 등, 2007)되어 있는데, Ubi 등(2006)은 사과 과피에서 UV-B와 온도에 따라 *MdF3H*와 *pDFR* 유전자는 모든 처리구에서 발현 되었고, *MdCHS*, *MdANS*, *pUFGluT* 등의 유전자는 고온(27° C)과 UV-B 처리 유무에 따라 약하게 발현되었다고 하였다. 본 실험에서 ‘하례조생’에서는 PAL 유전자는 35° C(2, 3단계)에서, ‘부지화’에서는 30° C(2단계)에서 발현이 크게 유도되는 경향을 보였다. 또 CHS 유전자의 경우에는 3개의 온도 조건에서 유전자의 발현이 유도 되는 경향이었으나 성숙 2단계의 ‘부지화’에서는 CHS 유전자의 발현이 감소하였다가 증가하는 경향을 보였다. ‘하례조생’의 경우, 특히 CHS와 F3H 유전자는 3단계의 25° C 처리구에서 발현이 크게 증가하는 경향이였다. STS 유전자 또한 과실 착색과 관련이 있으며, CHS 유전자와 같은 기질을 이용하는 경쟁 관계에 있다(Park 등, 2010; Richter 등, 2006). Kim 등(2015b)은 성숙 단계의 ‘거봉’ 포도에서 STS 유전자의 발현은 35° C에서 강하게 유도되었다고 보고 하였는데, 본 연구에서도 3단계의 ‘하례조생’은 35° C에서 발현이 크게 유도되었으나 ‘부지화’는 3단계의 모든 온도에서 감소하는 경향을 나타냈다.

‘하례조생’과 ‘부지화’의 온도처리에 의한 유전자 발현 양상을 비교해 볼 때, 유전자의 발현양은 ‘하례조생’에서 더 크게 나타났으며, 1, 2단계에서 유전자의 발현 양상은 대체적으로 비슷한 경향이었는데, ‘부지화’ 과실에서 3단계의 유전자 발현은 ‘하례조생’과는 다르게 감소하는 경향을 나타내었다. 만숙종인 ‘부지화’는 온주밀감에 비해 온도에 더 민감하며 내한성이 약하고 고온 적응성이 좋은 특성(Moon, 2006; Moon and Kim, 2001)과 재배 환경 조건에 따라 수채 생육이나 과실의 품질이 크게 차이가 나는(Han and Kang, 2011; Moon 등, 2008) 등의 생육 특성을 가진다. 본 연구의 온주밀감과 ‘부지화’에서 나타나는 유전자들의 다른 발현 양상은 아마도 위에 언급한 ‘부지화’와 온주밀감의 생육특성의 차이, 즉 수채 생장이나 과실 성숙, 성숙 단계에 따른 성분이나 효소 활성 변화 등과도 관련이 있을 것으로 생각된다.

기후변화 시나리오에 따르면, 21세기말 우리나라 평균온도는 약 6.0° C 정도 상승할 것이라고 하며(NIMS, 2011), 이러한 기후변화로 인한 온도 상승과 이에 따른 과실의 수량 및 품질 등에 미치는 영향은 전세계적으로 여러 과수에서 부정적인 문제로 작용할

것이다(Easterling 등, 2007; Sugiura and Yokozawa, 2004; Sugiura 등, 2012). 본 연구에서는 ‘하례조생’과 ‘부지화’ 과실을 성숙 단계별로 구분하고 고온 스트레스에 노출시켜 여러 유전자들의 발현양상을 분석하였다. 이러한 연구 결과는 고온 스트레스와 관련된 다양한 생리현상을 전사체 분석을 통한 유전자 발현 수준에서 구명하고, 전사체 기반의 유용 유전자들을 대량 발굴하여 분자생물학적 연구에 도입함으로써 기후변화에 대응할 수 있는 재배법을 확립하고 고온에 내성인 신품종을 육성하는 데 중요한 자료로 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

국내에서도 지구 온난화 및 도시화에 의해 과실 생육기 동안 기온이 높아져 ‘후지’ 사과 재배에서는 착색불량이 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다(Park 등, 2009; Sagong 등, 2013). 과피의 착색과 당 축적 기작에 관여하는 여러 환경요소 중에서 온도에 따른 과실의 성숙차이에 대한 연구가 성숙단계의 과실에서 주로 연구되고 있다(Azuma 등, 2012; Bergqvist 등, 2001). 사과 과실의 성숙에는 많은 요소들이 관여하고 있으므로, 전사체 분석을 통한 다양한 반응을 체계적으로 분석하면 고온에 의한 생화학적 변화에 관한 유용한 정보를 얻을 수 있을 것이다. 또한 장기간 온도처리에 따른 당 대사 및 착색관련유전자의 발현변화와 온도처리 전후의 당도 및 색차계 값의 추이를 분석해본다면 더 정확한 기초자료도 이용될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 분자 수준에서 사과 과실의 성숙단계에 따라 고온스트레스에 의해 변화하는 유전자를 비교 분석하여 고온에 대한 사과과실의 반응 기작을 이해하는데 필요한 유용한 정보를 얻을 수 있었다. 또한 이 연구를 통하여 향후 고온에 대응하는 과실의 변화를 전사체 분석과 같은 분자생물학 수준에서의 연구를 수행하는 데에 있어서 사과 과실의 가장 적합한 성숙단계를 선정할 수 있는 중요한 정보를 제공하게 될 것이다.

온도는 과실 생산에 매우 중요한 요인으로 작용하며(Wahid 등, 2007; White 등, 2006; Zhang 등 2005b), 줄기신장 억제, 조숙, 당함량 저하 등이 발생한다(Ebrahim 등, 1998; Zhang 등 2005a).

본 연구에서는 전사체 분석을 통하여 고온에 특이적으로 반응하는 유전자를 분리하였으며 isocitrate lyase, cystein proteinases protein, cupin family protein 유전자는 발현이 유도되고 flavanone 3-hydroxylase, PHE ammonia lyase 1, chlorophyll A-B binding protein 유전자는 억제되었다. Isocitrate lyase (ICL),은 식물체에서 고온에서 반응이 유도되고 (Honer zu Bentrup 등, 1999), 2-cysteine peroxiredoxin (2-Cys Prx) 유전자는 배추에서 고온과 관련하여 여러 가지 반응을 유도하는 것으로 알려져 있다(Kim 등, 2009).

다양한 식물체에서 온도에 반응하는 유전자를 대량으로 발굴하였으며(Leyva 등, 1995; Mori 등 2007; Rabbani 등 2003; Rivero 등, 2001), 그 발현이 확인되었다(Karim 등, 1997; 1999; Lim 등, 2006; Liu 등, 2012; Schoffl 등, 1999). 본 연구에서는 고온처리에 대해 발현이 유도되는 270 개의 유전자와 억제되는 480 개의 유전자를 대량으로 발굴하였으며 real-time PCR 분석을 통해 발현을 확인하였다. 많은 유전자가 이전의 온도관련 연구에서 발견된 유전자와 일치하였으며 (Azuma 등 2012; Czemmell 등 2009; Kim 등, 2015). 외부 스트레스에 반응하는 유전자 군과도 매우 유사하였다 (Downey 등, 2004; Leyva 등, 1995; Matus 등, 2009). 고온에 노출된 과실로부터 NGS 기법을 도입하여 고온에 특이적으로 반응하는 유전자를 대량으로 발굴하였다. 이러한 결과는 과피의 착색과 고온에 관한 관계를 설명하고 특이적인 유전자의 착색과 관련한 기능을 분석하는 데에 매우 중요한 정보를 제공할 것이다. 또한, 고온과는 무관하게 착색이 양호한 우수 품종을 개발하는 프로그램에 중요한 재료로 활용될 것이다.

제8절. 미래 기상요인(RCP 적용)에 따른 인삼, 약용작물의 유전자 발현양상 구명

1. 인삼, 약용작물의 온도관련 기작연구를 위한 처리조건 구명, 초기생육 관찰, 시료채취

가. 인삼 처리조건 및 시료 채취

(1) 온도구배 하우스

인삼, 약용작물(천궁, 당귀)의 온도관련 기작연구를 위한 적정 처리조건을 구명하기 위하여 Walk in growth chamber, 해발고도 200m에 위치한 제주도 온난화대응농업연구센터의 온도구배하우스, 제주도 700m 고지의 해발고도 포장 등 3개소에 시험재료를 배치하고 초기생육을 관찰하였다.

제주 온난화대응농업연구센터 200m 해발고도포장의 온도구배하우스내(그림 1a)에 재식하여 고온반응을 관찰한 인삼(품종: 연풍) 시료의 경우 6월 중순 이후 내부기온이 42℃ 이상 증가하였으며, 동시에 점적관수와 폭 2.8m의 협소한 내부에 설치된 비가림 시설 등으로 전반적으로 열해 등 고온장애와 동시에 정상적인 공기의 대류가 일어나기에는 어려움이 있다고 판단되었다. 온도구배하우스 외부에 배치한 대조구(그림 1b)의 경우에는 설치한 해가림 시설이 강풍으로 인하여 훼손되는 문제가 발생하여 초기 온도반응을 전사체 수준에서 관찰하기에는 외부 환경의 변이가 다양하여 적절치 않다고 판단되었다.

온도구배하우스의 경우 정상적인 현지의 환경조건으로부터 온도의 상승조건만을 제공할 수 있다는 단점을 극복하기 위하여 제주 한라산지역 700m 해발고도포장에 인삼을 재식한 중대형 포트 전체를 아래 그림과 같이 무저포트식으로 매립하고 해가림시설을 설치하여 저온조건을 조성하였다.



(a)

(b)

그림 1. 온도구배 하우스 내부 처리구(a)와 외부 대조구(b)의 모습. 사진촬영일은 2014년 5월 8일.



그림 2. 제주 700m 해발고도 포장에 설치된 무저 포트에 재식한 인삼. 사진촬영일은 2014년 6월 28일.

700m 해발고도 포장 내 배치한 인삼(그림 2)의 경우 200m 온도구배하우스내의 생육조건과 비교하여 최고 8℃ 수준의 온도차이가 있었으며 6월 하순의 인삼의 생육은 양호하였으나 병충해가 심하여 방제가 필요하였다. 해발고도포장의 경우 저온환경의 조성은 가능하였으나 무처리 대조구로서 온도구배하우스내의 시료와 비교함에 있어 환경적 변이를 최소화하기에는 물리적인 어려움이 있어 전사체 비교실험에 적절한 시료를 획득하기에는 부적합하였다.

(2) Walk in growth chamber(WGC)

Walk in growth chamber(WGC)는 강원도 평창지역의 기상조건을 평상시로 하여 주야간 온도조건으로 생육환경이 조성되었으며 포트실험으로 인삼의 초기, 단기간의 온도반응을 관찰하기에는 적합한 환경이었다. 본 실험에서는 평상시 기온조건과 +4℃ 고온조건, 평상시기온에서 대기 중 CO₂ 농도 400ppm(그림 3a, 3b) 과 600ppm(그림 3c, 3d) 조건에서 인삼을 한달 간 생육시킨 후 시료 채취하였다.

WGC내 인삼은 각각 4포트, 포트당 3주 재식하였으나, 처리기간이 매우 짧아 대기중 CO₂의 농도가 인삼의 생육에 결과적으로 어떠한 영향을 미쳤는지 결론을 내리기에는 부족하였으나 외형적으로는 600ppm에서 자란 인삼의 생육이 전반적으로 매우 불량하여 장기적으로 관찰할 필요성이 있다고 판단된다.

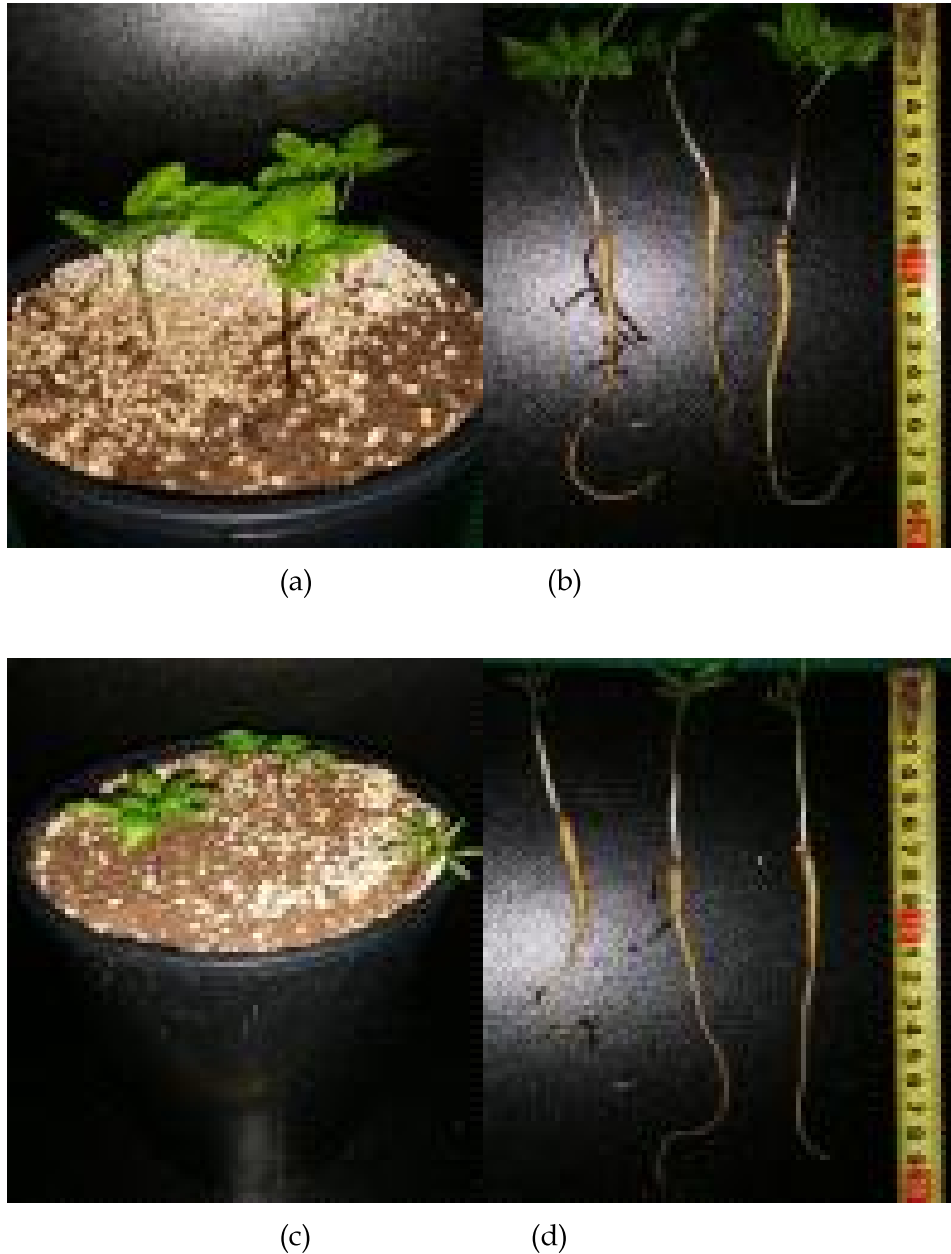


그림 3. Walk-in Growth Chamber (WGC) 내 인삼의 생육. (a)강원도 평창지역 평상시 기상조건, CO₂ 400ppm, 사진촬영일 2014년 6월 19일, (b)(a)시료의 지하부, (c)강원도 평창지역 평상시 기상조건, CO₂ 600ppm, 사진촬영일 2014년 6월 19일 (d) (c)시료의 지하부.

2. 고온, CO₂ 환경에 반응하는 유전자집단 발굴을 위한 적정 처리조건

가. 전사체 수준에서 인삼, 약초의 고온, CO₂ 환경에 반응하는 유전자 집단 발굴

세계적으로 인삼, 천궁, 당귀의 게놈 염기서열 시퀀싱과 assembly 는 완전히 이루어진 상태가 아니며 따라서 이들 작물에 대한 전사체 연구 수행시 reference로 사용할 수 있는 염기서열 DB가 존재하는 상황은 아니다. 따라서, 인삼, 약용작물(천궁, 당귀) 의 유전체 연구수준과 전사체 연구는 이러한 genome sequencing 부재로 인한 결과 해석의 한계성에 존재한다. 이러한 상

황에서의 전사체 연구는 각 처리별 서로다르게 발현되는 유전자집단의 분석과 비교유전체기법을 이용한 annotation, GO (gene ontology) term 분석을 통한 clustering 된 유전자들의 기능성 분석, 전사조절단백질(transcription factor)의 유전자 발굴 및 이들 전사조절 단백질들이 작용, 전사에 영향을 줄 수 있는 target 유전자집단의 발굴, RNA processing, miRNA, lncRNA (long non-coding RNA), methylation site 들의 발굴을 통하여 인삼, 천궁, 당귀의 고온반응기작 및 이들의 영향이 개화와 광합성, 광합성산물의 축적에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구가 가능하다고 판단된다.

나. 시료의 채취

전사체 연구는 핵심은 적절한 환경조건에서 적절한 처리를 한 시료의 채취에 있다. 인삼과 같은 다년생 식물은 종자의 선택단계에서는 종자를 땀힌 모본의 식물체가 최대한 환경의 스트레스를 받지 않은 상태에서 생육된 것을 선택하여 종자를 채취하여 전사체 비교 실험의 재료로 사용하여야 전세대의 환경스트레스에 의한 게놈상의 methylation 정도가 genomic imprinting에 의하여 시험세대로 전이되는 것을 최소화 시킬 수 있다.

시험대상이 되는 식물체는 개갑, 발아 단계에서 최대한 인위적인 요소를 배제하여 생육의 단계를 거치는 것이 좋으며 온도(고온, 저온, 일교차), 수분(한발, 과습, 대기 및 토양환경), 광 (광량, 광질, 야간조파 등) 스트레스를 최대한 받지 않는 상태에서 생육이 진행되어 오던 시료를 대상으로 얻고자 하는 결과의 해석에 적합한 처리를 하여야 한다.

다. 전사체 비교 실험 설계

전사체 비교 실험의 설계 과정에서 온도의 경우 일정한 시간을 두고 점진적 고온의 처리를 가하고 점진적으로 시간을 두고 정상온도로 복귀시키는 실험의 설계는 인삼의 게놈내 methylation에 의한 epigenetics의 경과를 관찰하기에 적합하며, RCP시나리오에 따른 기후변화 실험의 내용에 적합하나 단기간의 고온 스트레스에 반응하여 신속한 반응을 보이는 유전자집단을 발굴하기에는 적합하지 않다. 반면, 단기간 고온에 반응하는 유전자집단을 발굴하기 위한 실험은 24시간 이내에 4℃ 이상의 고온조건을 조성하는 feed forward 형태의 자극을 가하고 반응을 관찰하는 시험의 설계가 요구된다. 또한, 대기중 CO₂ 농도에 대한 반응을 관찰하는 실험의 경우에는 처리 초기 시료 채취 후 전형적인 시계열분석이 필요하며 장기적인 생리관찰을 통해 목표유전자를 접근해 나가는 전략이 필요하다.

라. 식물 고온 관련 유전자 염기서열 발굴 및 유사성 검증

쌍자엽 모델식물체인 *Arabidopsis thaliana* 의 고온과 개화에 관여한다고 알려진 PIF4 유전자 (at2gPIF4) 의 coding region과 promoter 염기서열 (NCBI, Pubmed Accesssion NM_129862)을 query로 하여 Phytozome (<http://phytozome.org/>)에서 Blast를 실행하여 유사한 sequences를 찾고 각 Results간의 상관 관계를 분석하였다. PIF4 유전자 또는 유사염기서열유전자들의 벼, 옥수수, 수수 등 단자엽 초본류간의 평균 근연관계를 보면 벼-옥수수는 58.57%, 옥수수-수수는 64.07%, 벼-수수는 61.09% 쌍자엽 콩과식물(콩, 강낭콩 *Phaseolus vulgaris*, *Medicago truncatula*) 간의 평균 근연관계를 보면 강낭콩-콩은 67.99%, *Medicago truncatula*-강낭콩은 평균 60.17%,

Medicago truncatula 종은 평균 64.39%의 유사성이 관찰되었다.

쌍자엽 식물의 경우 PIF4 유전자가 고온조건에 반응하여 생육(도장과 만화)과 개화에 영향을 줄 수 있는 가능성이 높다고 판단하여 식물체에 보고된 PIF4 유전자들을 발굴하였으나 *Arabidopsis* 의 PIF4 유전자와 고도의 유사성을 보이는 유전자는 다른 식물체에서는 거의 발견되지 않았으며, BLAST의 결과들은 대부분 PIF4 유전자의 conserve 한 염기서열인 DNA binding motif 영역을 가진 유전자들로서 이들이 실제 PIF4 의 기능을 하는 것인지는 밝혀야 할 내용이다.

본 연구에서는 이와 같이 다양한 PIF4 유전자들의 conserve 한 염기서열을 발굴하여 이들과 유사한 염기서열을 가진 유전자들과 이들 유전자의 고온반응성을 관찰하여 인삼, 천궁, 당귀의 고온반응기구에 관여하는 유전자 집단을 발굴하였다.

마. 전사체 염기서열 분석을 위한 처리 및 시료 채취

인삼은 2015년 5월 14일 평창 국립원예특작과학원, 제주도 온난화대응농업연구센터 온도구배 하우스에, 동년 5월 19일 제주도 온난화대응농업연구센터 walk-in growth chamber 에 2년 삼을 이식 시험구를 배치하였다. 7월15일, 8월 11일, 9월 1일 지상부를 시료로 현장에서 채취하여 즉시 액화질소에 넣어 보관하였으며 냉동시료를 현장(제주도 온난화대응농업연구센터)에서 즉시 분석하거나, 액화질소에 보관한 상태에서 운반하여 -80℃ 초저온 냉동고에 즉시 보관 후 분석하였다. 인삼은 총 5회의 RNA 추출이 시행되었으나 다량의 2차대사산물 및 당성분으로 인하여 현재 시판중인 RNA 추출 키트(Qiagen, Takara 사 제품)로는 인삼의 잎으로부터 sequencing 에 적합한 추출시료의 질적 요건을 맞추어 RNA를 추출하는데 10여회 이상 반복하여 실패하는 등 많은 어려움이 있었으나, guanidinium thiocyanate를 기반으로 하는 Trizol 방법을 부분 수정하여 sequencing 에 적합한 RNA를 성공적으로 추출하였다.

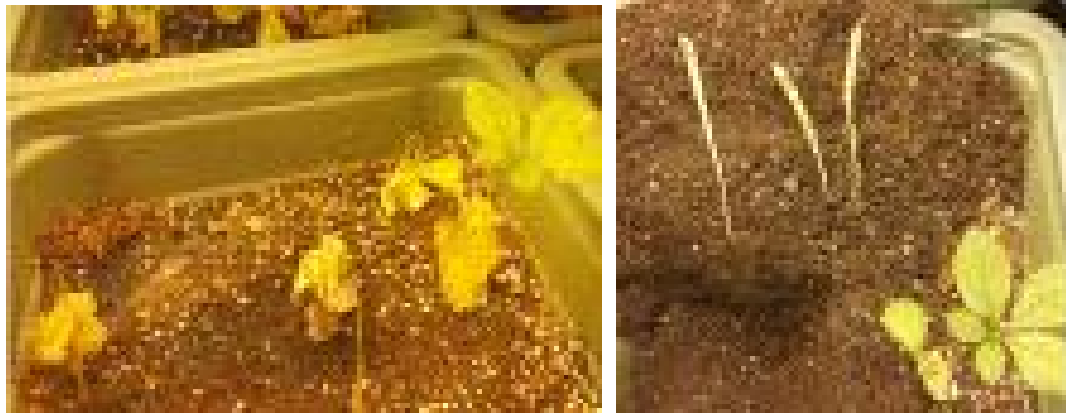
전사체 분석에 사용된 시료는 9월 1일 음성 온도구배하우스내에서 채취한 2년 및 3년생 인삼의 잎이며, 온도구배 하우스 입구 상온시 대조구와 중간지점 상온 +3~4℃ 처리구에서 채취한 2개의 시료이다.



(a)

(b)

그림 4. 충청북도 음성 국립원예특작과학원에 설치된 온도구배하우스에서 생육중인 2년생 인삼(a) 과 3년생 인삼(b). 사진촬영일은 2015년 9월 1일.



(a)

(b)

그림 5. Walk-in Growth Chamber (WGC) 내 인삼 생육도중 발생한 생육장해 (a)조기낙엽이 관찰된 지상부, (b)(a)시료의 지하부. 사진 촬영일은 2015년 7월 15일

Walk-in growth chamber 내 가상의 기상조건을 이용한 인삼의 재배는 이식 후 약 2개월 후 상온조건과 상온+4℃ 처리구 모두에서 조기낙엽이 발생되었으며, 지하부의 경우 정상적인 생육이 이루어진 것으로 판단할 수 없는 상황이 관찰되어, walk-in chamber 내 가상의 기상조건을 이용한 고온 실험의 경우 인삼은 토양, 광, 수분조건 등의 세밀한 조절이 필요한 것으로 보인다.

3. 천궁, 당귀 시험구 배치 및 시료 채취

천궁과 당귀는 2015년 8월 11일 평창소재 국립원예특작과학원 포장의 온도구배하우스에서 하우스의 입구(상온), 중간지점(상온 +3℃), 말단지점(상온 +6℃)에서 잎을 채취하여 현장에서 즉시 액화질소에 보관한 후 이동하여 RNA 추출하였다.

천궁과 당귀에서 추출한 RNA가 sequencing 적합성 QC 결과는 아래 표와 같다. 당귀에서 2개를 제외한 시료들이 Agilent (미국)사에서 개발한 RIN 소프트웨어의 기준으로 hold 판정을 받았으나 식물체의 경우 sequencing에 큰 영향을 미치지 않는다는 것이 분석사 (Macrogen 대한민국)의 판단이었다.

천궁(*Cnidium officinale*), 당귀(*Angelica gigas*)의 경우 다른 주요 작물들이 genome 염기서열, 전사체분석 및 EST 분석 결과 등이 공개된 database에 보고되고 있는 것과 달리 이러한 정보들이 존재하지 않는 상황이다. 천궁, 당귀의 잎에서 RNA 추출은 성공적으로 이루어졌으며, 전사체 염기서열을 분석하였다.



그림 6. 강원도 평창의 온도구배하우스에서 생육중인 천궁(a)과 당귀(b). 사진촬영일 2015년 8월 11일

4. 인삼 전사체분석을 위한 비교유전체 DB 구축

가. 비교 유전체기법을 이용한 인삼 전사체와 유사한 다른 식물의 전사체 발굴 및 annotation

인삼의 genome sequencing 은 현재 보고 되어있지 않으며, 인삼 유전체의 상당한 부분이 반복적 염기서열로 구성되어 (Choi et al., 2015 Plant Journal 77, 906-916) assembly 가 용이하지 않다. 전사체 분석시 선행적으로 이루어져야 하는 유전체와의 비교 (mapping) 은 현 상황으로는 불가하며, 이러한 기술적 제한요소는 인삼 전사체에서 발굴하는 유전자들의 epigenetics 측면에서의 methylation에 의한 유전자 발현조절기작 및 발현조절에 대한 이해를 어렵게 하고 있다. 또한, 다른 작물에 비해 작은 EST database (17114) 와 microarray data set의 부재 등으로 target gene (TG) - transcription factor (TF) 의 연관관계를 추적해 볼 수 있는 상황은 아니다.

이러한 기술적 제한 요소를 극복하고 전사체의 정보를 객관화시키기 위하여 비교유전체의 기법을 이용하여 다양한 다른 식물의 유전체와 기보고 된 인삼의 EST 정보를 비교하여 인삼 EST 비교유전체 data base를 자체 제작하였다 (<http://epigenomics.snu.ac.kr/ginseng/>).

EST ID	Plant	Repeat/Contig	Date Rec'd	Gene Description	E-value
20000000	Arabidopsis thaliana	AT1G02000.1	1/14/2000	EST identical to C. glutinosa sequence	1e-22
20000000	Arabidopsis thaliana	AT1G02000.1	1/14/2000	EST identical to C. glutinosa sequence	1e-22
20000000	Arabidopsis thaliana	AT1G02000.1	1/14/2000	EST identical to C. glutinosa sequence	1e-22
20000000	Arabidopsis thaliana	AT1G02000.1	1/14/2000	identical to C. glutinosa sequence	1e-22
20000000	Arabidopsis thaliana	AT1G02000.1	1/14/2000	identical to C. glutinosa sequence	1e-22
20000000	Arabidopsis thaliana	AT1G02000.1	1/14/2000	identical to C. glutinosa sequence	1e-22
20000000	Arabidopsis thaliana	AT1G02000.1	1/14/2000	identical to C. glutinosa sequence	1e-22
20000000	Arabidopsis thaliana	AT1G02000.1	1/14/2000	identical to C. glutinosa sequence	1e-22
20000000	Arabidopsis thaliana	AT1G02000.1	1/14/2000	identical to C. glutinosa sequence	1e-22
20000000	Arabidopsis thaliana	AT1G02000.1	1/14/2000	identical to C. glutinosa sequence	1e-22

그림 7. 인삼 전사체분석을 위한 인삼 EST 비교유전체 database 초기화면

EST ID	Plant	Repeat/Contig	Date Rec'd	Gene Description	E-value
DV555608.1	Arabidopsis thaliana	AT1G02000.1	1/14/2000	EST identical to C. glutinosa sequence	1e-22

그림 8. 위 인삼 EST 비교유전체 DB 상의 상단에 기재된 EST ID DV555608.1 에 대한 염기서열 정보.

산(야생)딸기(*Fragaria vesca*), 카사바(*Manihot esculenta*), *Medicago truncatula*, 노랑원숭이꽃 (*Mimulus guttatus*), 벼 (*Oryza sativa*), Arabidopsis 등 6개의 식물 유전체와 인삼의 EST 염기서열을 비교하였다.

나. 인삼 전사체 Data Base의 구축 및 활용

현재 이 인삼 EST 비교유전체 database 는 서울대학교 생명공학공동연구원 생물정보연구소 서버에서 운영되고 있으며 작물의 EST accession ID에 의해 검색이 가능하고, 검색된 EST ID는 아래와 같이 Genbank에 연계 (hyperlink) 되어 각 EST의 염기서열확인이 가능한 상태로서 활용도가 높으며, 현재 분석중인 인삼 전사체 염기서열 정보 분석에 매우 유용할 것으로 보인다.

표 1. 인삼 EST 17114개의 6개 식물의 유전체와 비교 결과.

Genomes	Genes	Genes with EST hit	Gene percentage with EST hit
<i>Arabidopsis thaliana</i>	27416	3095	11.3%
<i>Fragaria vesca</i>	32831	3246	9.9%
<i>Manihot esculenta</i>	33033	6342	19.2%
<i>Mimulus guttatus</i>	28140	8167	29.0%
<i>Medicago truncatula</i>	50894	5739	11.3%
<i>Oryza sativa</i>	39049	1746	4.5%

인삼의 EST 17114개를 6개 식물의 유전체와 비교한 결과는 위 표에 제시되었다. 이 6개 식물의 유전체 정보는 Phytozome (<http://phytozome.jgi.doe.gov/pz/portal.html>) 에서 다운받았다. 이중 *Mimulus guttatus* 는 genome sequencing 의 결과 보고된 28140개의 유전자 가운데 8167개의 인삼 EST 염기서열이 검색되어 가장 많은 인삼의 유전자와 비교적 유사한 염기서열을 갖는 유전자들이 많은 것으로 검색되었다.

또한, 화분과 작물인 벼의 유전체 염기서열에서도 발견된 인삼의 EST는 1746개로서 이들은 진화의 과정에서 상위에 해당하는 유전자로서 DNA 자기복제, RNA 전사 및 번역 등 central dogma 와 ubiquitin pathway, Rubisco 등 식물체의 공통된 대사에 관여하는 유전자들로 밝혀졌다.

5. 인삼 잎 전사체의 유전자발현 네트워크 구축을 위한 기반 연구

가. 유전자 발현조절 네트워크의 작성 기반

인삼의 경우 수집 가능 micorarray analysis data 들이 매우 한정적이며 유전체, 전사체 정보가 big data 수준의 타작물 (예: 벼의 microarray data set 은 약 1900개 가 보고) 전사체분석 정보와 비교하였을 때 인삼 잎에서의 유전자발현 네트워크를 작성하는 것은 불가능하다. 그러나, 위 비교유전체 database set 중의 하나인 *Medicago truncatula*, 콩 등의 전사체정보를 이용하면 가상의 인삼 잎의 유전자발현 네트워크의 작성이 가능하다. 이를 위하여 현재 유전자 발현 네트워크를 작성하는 프로토콜을 개발하였고 벼의 한발, 콩의 고온 조건하에서의 유전자 발현 네트워크를 작성 유전자간의 발현 조절 기작 연구에 활용하고 있다.

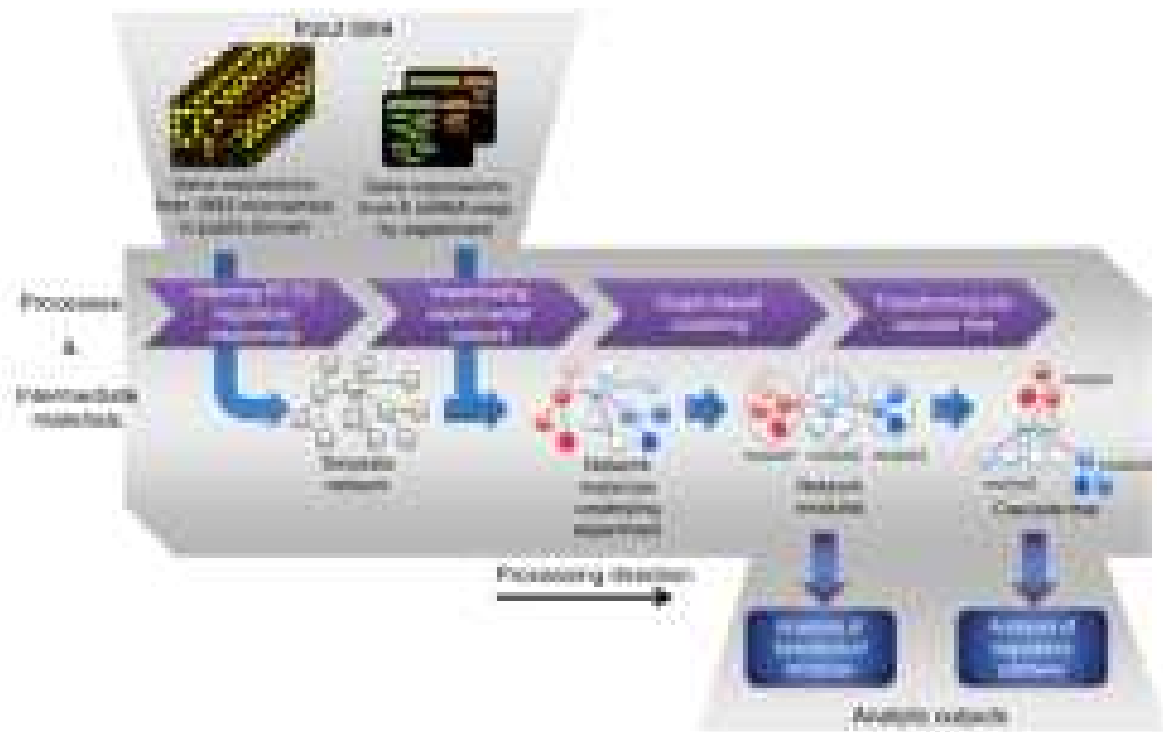


그림 9. 유전자 발현 네트워크 작성 프로토콜

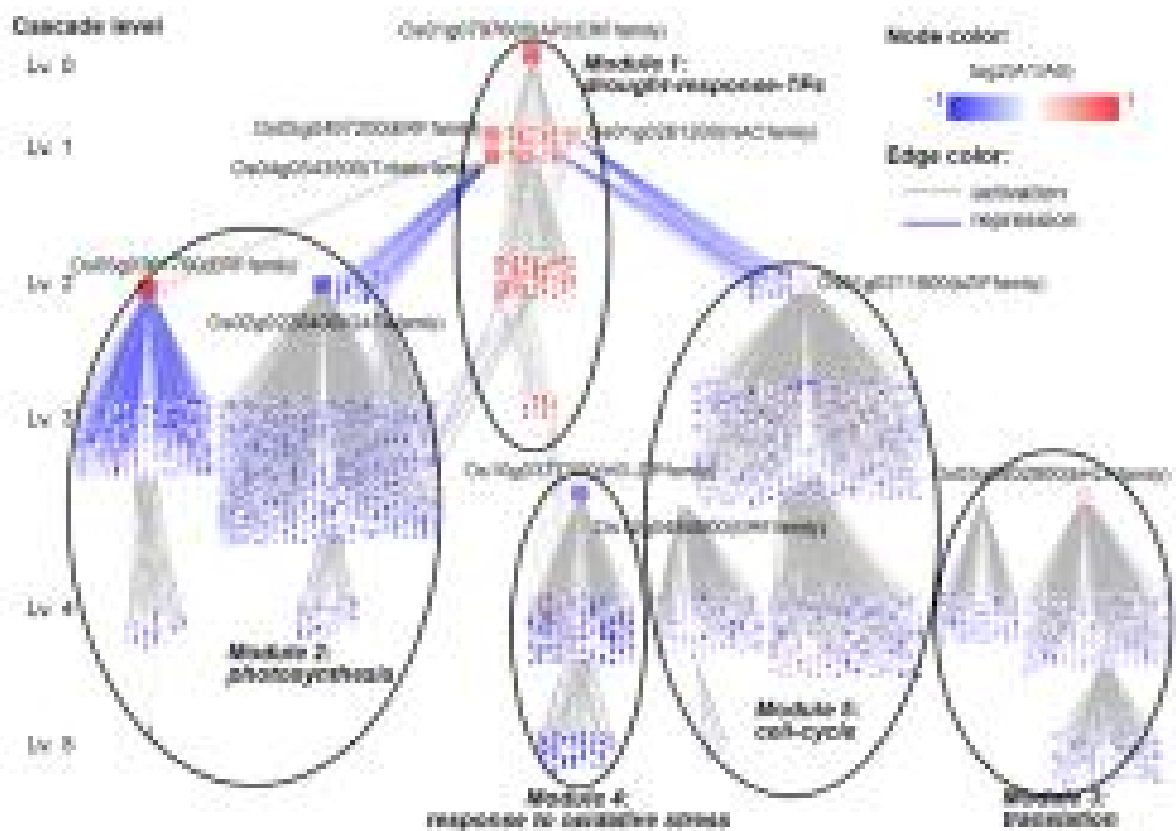


그림 10. 벼의 한발(단기근권단수) 관련 유전자 발현 계단

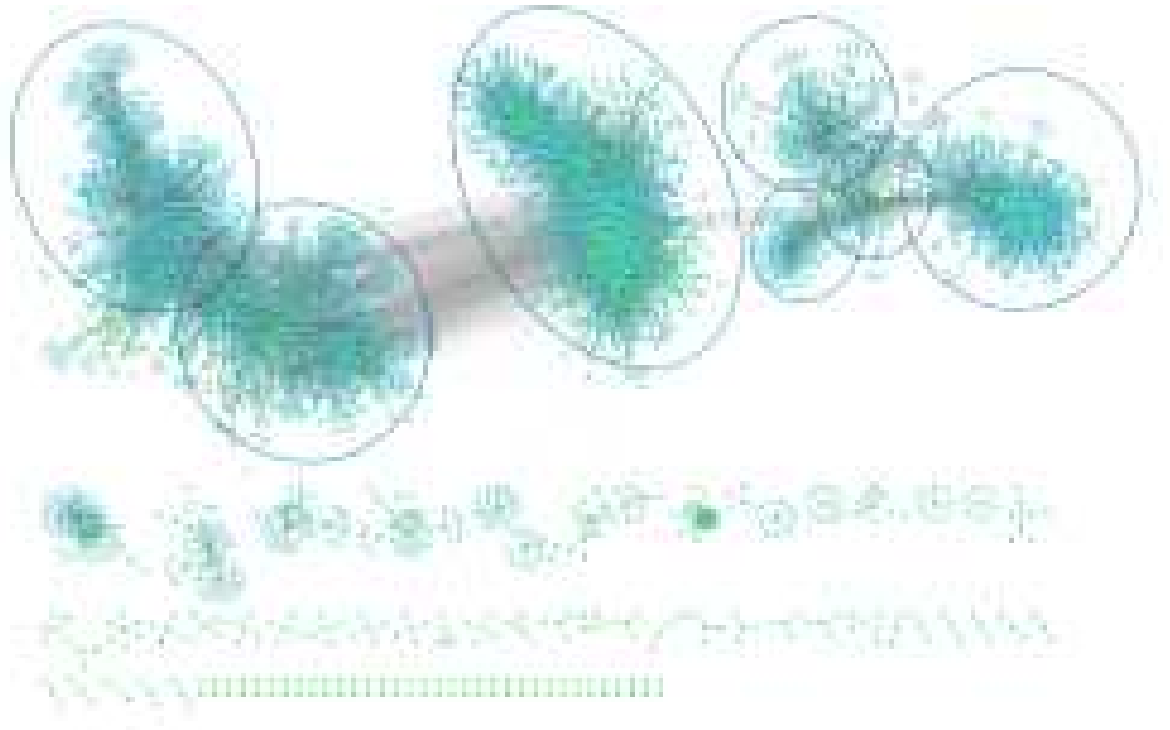


그림 11. 콩의 고온 관련 유전자 네트워크

특히 콩의 고온관련 유전자 네트워크상의 유전자들과 고도의 유사성 (e^{-30} 이상)을 보이는 RNA sequencing 으로부터 찾아낸 인삼의 유전자 들을 비교하여 이 콩 고온 네트워크(그림 11)에 인삼의 유전자들을 대입시켜 mapping 하는 과정중이다.

6. 인삼 전사체의 복합적 해석 기반 구축을 위한 transcript contigs 제작

가. 인삼 전사체 contig 작성의 필요성

인삼은 유전체 sequencing이 완성되어있지 않고 현존하는 전사체 DB도 주로 뿌리에서 제작되어 온도 감응기구인 지상부 엽부위의 전사체 연구에는 부적합하다. 또한, RNA sequencing 결과 얻어진 염기서열은 읽어낼 수 있는 유효길이 300nt 정도로 매우 짧다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 transcript contig를 제작하였다. Transcript contig를 제작하기 위해서 public DB에서 65개의 RNA sequencing 결과를 종합하였는데 여기에는 *Panax ginseng* 만이 아닌 아종의 인삼도 섞여 있는 것으로 주로 중국과 우리나라에서 보고된 것이다. 제작 결과 164,258개의 contig 가 작성되었으며 이 중 약 22,000개 가량이 다른 작물의 유전체에서 유전자로 등록된 것으로 밝혀졌다. 이 contig를 감자의 유전체 정보와 비교하였을 때 76,612 개의 contig 가 17,190개의 단백질 유전자에 해당되는 것으로 밝혀졌다. Contig중 가장 짧은 것이 200bp 이고 가장 긴 것은 12800nt 도 있었다. 이 contig는 가상의 염기서열로 실제 실험한 연풍의 염기서열과 차이가 있을 수도 있으나 인삼의 경우 전체 유전체 정보가 존재하지 않은 상황에서 RNA sequencing 한 인삼 유전자의 annotation에 매우 유용하게 사용되었다.

충북 음성의 온도구배하우스 입구에 위치한 시료와 입구로부터 18m 내부 온도구배하우스의

중간지점에서 채취한 인삼의 잎에서 각각 mRNA (33,000,000 read) 와 microRNA (45,000,000

Contigs assembled using Trinity (normalization, trimming)

Sample	Contigs	Min length	Max length	Avg. length
1 RNA-seq	154359	300	12800	807.9



Number of BLAST Hits

Species	Exp. hits
Fraxus_ Strawberry	15385
Brassica_ Cabbage	12768
Malus_ Apple	12649
Agrostis_ Maize Flower	10442
Brassica_ Tomato	15339
Brassica_ Potato	18034

BLASTX Gene coverage

BLASTX	BLASTX Gene coverage	BLASTX Gene coverage
Brassica_ Tomato	0.544045859	1.531489077
Brassica_ Apple	0.45811177	1.574895809
Agrostis_ Maize Flower	0.438491421	1.023486174
Fraxus_ Strawberry	0.40884915	1.124483811
Brassica_ Potato	0.381270241	1.176810734
Brassica_ Cabbage	0.38731011	1.20286173

그림 12. 인삼 전사체 contig 제작 결과.

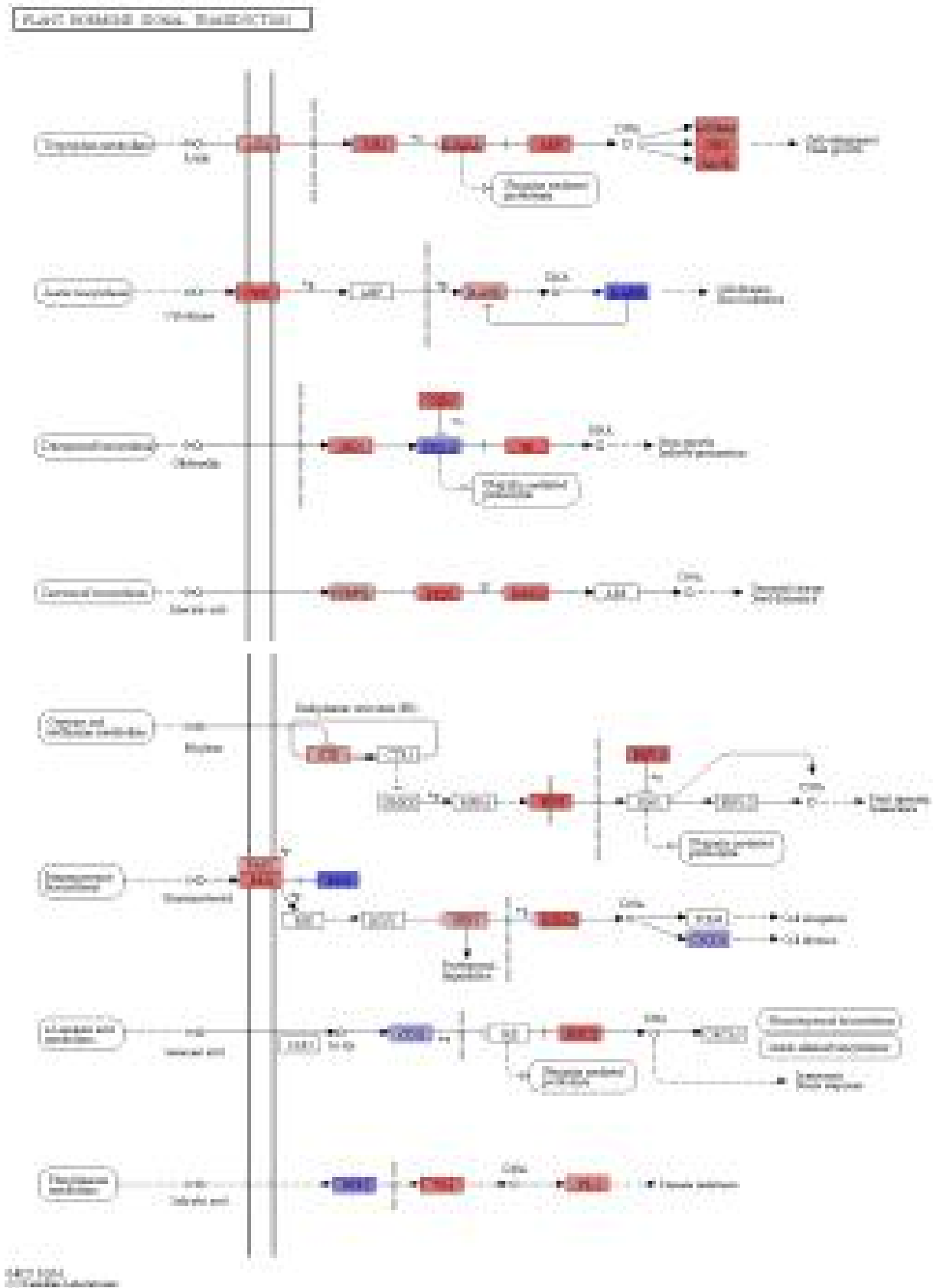
read) 의 염기서열을 확보 하여 분석하였으며 인삼 microRNA의 경우에는 이중 약 11% 정도가 인삼 특이적 microRNA로 판별되었다.

나. 주위 고온조건에 따라 다르게 발현되는 (DEG: differentially expressed genes)인삼 유전자 분석
주위 고온조건에 따라 다르게 발현하는 1261개의 유전자를 발굴하였고 아래 그림과 같이 database로 제작 운영하고 있다.

다. 고온조건에 따른 대사경로의 변화추적

KEGG (<http://www.kegg.jp/>) database에서 운영하는 대사경로 131개 중 77개 대사경로에서 한 개이상의 DEG가 관찰되었다. 식물체내 유의미한 대사경로는 약 30여개로 관찰된다. 아래 두 개의 대사경로는 주위 고온에 의해 영향을 받는 대사경로의 예이다. 호르몬 대사의 경우 auxin, abscisic acid 대사는 주위 고온에 의하여 확연히 이 경로에 관여하는 유전자들의 과발현이 관찰되었다. 반면 광합성의 전자전달계를 구성하는 단백질의 유전자 발현은 확연히 억제되는 것이 관찰된다. 이러한 대사경로 분석을 통하여 주위 고온조건에서 생육된 인삼의 경우 광합성 기구를 형성하는 단백질의 유전자 발현은 지속적으로 억제된 상태에서 광합성이 수행되고 있다는 것이 추정가능하다.

a)



b)

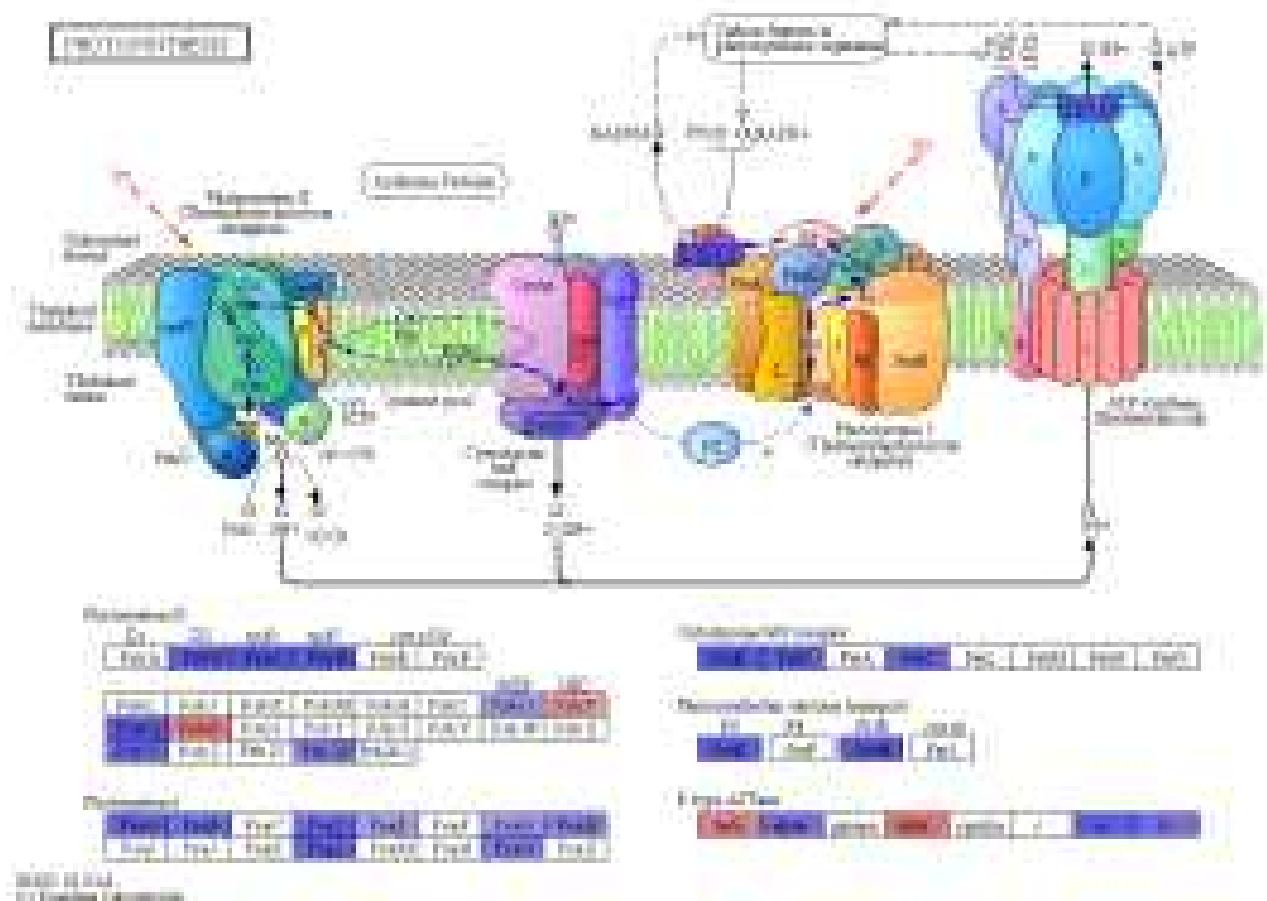


그림 14. 주위 고온이 대사경로에 미치는 영향. a) 호르몬 대사, b) 광합성기구

주위 고온조건에서 다르게 발현하는 유전자들의 대사 경로상 mapping을 통한 대사해석과 동시에 두 개의 다른 온도조건에서 채취한 인삼잎의 전사체를 구성하는 유전자들 간의 기능성 비교를 위해 GO(gene ontology) term 을 분석하였다.

라. 새로운 micro RNA 집단 발굴

인삼의 micro RNA 는 21개의 nucleotide로 구성된 작은 RNA 와 24개로 구성된 작은 RNA 가 큰 집단을 이루고 있었다. 대조구로 사용된 인삼의 잎에서 보다 고온조건에서 생육하고 있었던 인삼잎에서 24개의 nucleotide로 구성된 것이 더 많이 관찰되었다. 이는 고온조건에서 micro RNA의 생성과정이 불완전하게 수행된 것으로 추정된다. 그러나 전체적인 micro RNA의 발현은 인삼의 경우 크게 저해받았던 것으로 관찰되었다. 이중 29개의 micro RNA는 기존에 보고되지 않은 새로운 micro RNA로서 miRBase (<http://mirbase.org/>) 에 등록하였다.

GO_term	P-value	Number_ of_genes	GO_ID
cellular process	0.000111418	1282	GO:0009987
organic substance metabolic process	0.001473539	1090	GO:0071704
primary metabolic process	0.001537933	1034	GO:0044238
cellular metabolic process	0.000444549	947	GO:0044237
single-organism process	0.015363314	866	GO:0044699
cellular macromolecule metabolic process	0.01162216	699	GO:0044260
single-organism cellular process	0.000305636	573	GO:0044763
nitrogen compound metabolic process	0.023545558	523	GO:0006807
biosynthetic process	0.031853885	456	GO:0009058
organic substance biosynthetic process	0.01785209	440	GO:1901576
cellular biosynthetic process	0.046394167	424	GO:0044249
cellular protein metabolic process	0.020730408	401	GO:0044267
organic cyclic compound metabolic process	0.047498313	398	GO:1901360
phosphate-containing compound metabolic process	0.00214124	332	GO:0006796
phosphorus metabolic process	0.003106939	332	GO:0006793
macromolecule modification	0.015424494	306	GO:0043412
cellular protein modification process	0.011153043	294	GO:0006464
protein modification process	0.011153043	294	GO:0036211
phosphorylation	0.004036868	259	GO:0016310
organonitrogen compound metabolic process	0.031379317	219	GO:1901564
protein phosphorylation	0.028963864	215	GO:0006468
regulation of gene expression	0.013777523	196	GO:0010468
regulation of nitrogen compound metabolic process	0.020679696	193	GO:0051171
regulation of biosynthetic process	0.01335601	192	GO:0009889
regulation of macromolecule biosynthetic process	0.01335601	192	GO:0010556
regulation of cellular biosynthetic process	0.01335601	192	GO:0031326
regulation of cellular macromolecule biosynthetic process	0.013117963	191	GO:2000112
regulation of RNA metabolic process	0.013701931	189	GO:0051252
regulation of nucleobase-containing compound metabolic process	0.026035146	189	GO:0019219
regulation of nucleic acid-templated transcription	0.015155926	188	GO:1903506
regulation of RNA biosynthetic process	0.015155926	188	GO:2001141
regulation of transcription, DNA-templated	0.014890196	187	GO:0006355
small molecule metabolic process	0.024504576	164	GO:0044281
transmembrane transport	0.027047294	163	GO:0055085
peptidyl-amino acid modification	0.016815579	139	GO:0018193
carbohydrate metabolic process	0.001736904	135	GO:0005975
peptidyl-tyrosine phosphorylation	0.003113968	130	GO:0018108
peptidyl-tyrosine modification	0.003113968	130	GO:0018212
catabolic process	0.011041531	66	GO:0009056

그림 15. 인삼 잎의 유전자들의 GO term 분석

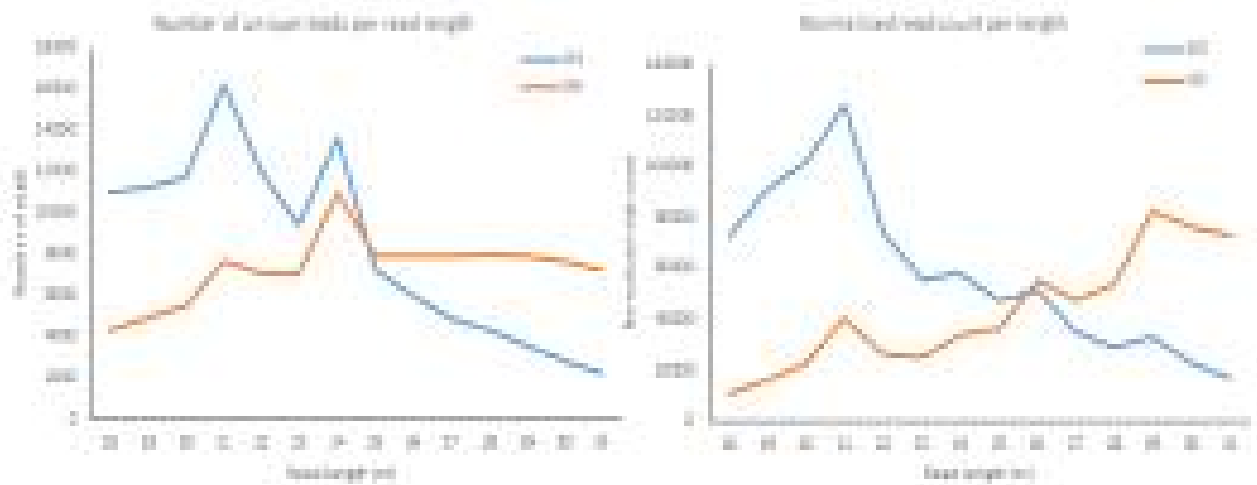


그림 16. 온도 조건에 따른 micro RNA의 크기의 변화

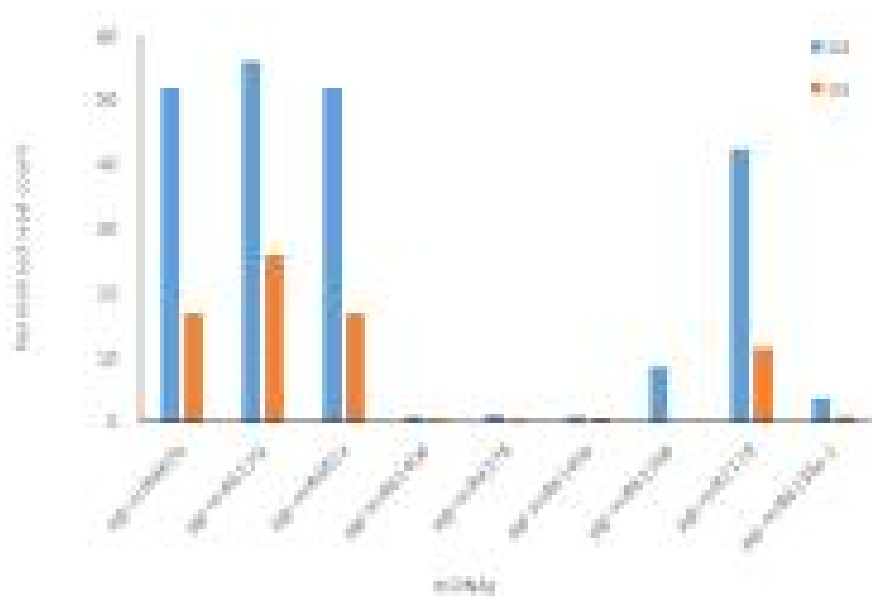


그림 17. 온도 조건에 따른 micro RNA의 발현량의 차이

마. 비교유전체를 이용한 개화관련 전사조절 유전자 집단 발굴

Arabidopsis에서 발굴된 개화와 관련된 유전자와 고도의 유사성을 보이는 56개의 유전자를 인삼잎의 전사체에서 발굴하여 주위고온조건에 따른 발현양상을 추적하였다. 개화호르몬으로 알려진 FT 유전자를 비롯하여 PIF4, TOC1 등 전사조절유전자들도 관찰되었고 일부 유전자들의 발현 양은 아래 그림에 제시되었다. FPF1 유전자는 고온조건에 의해 가장 큰 발현량의 차이를 보였다. FT, PIF4 등의 유전자들은 고온조건에 의해 발현량이 증가되는 것이 관찰되었고 이러한 결과는 콩 등 다른 작물에서도 관찰되는 현상이다. 그러나, cytochrome P450 단백질의 유전자 일부는 고온조건에 의해 발현량이 억제되고 있다는 것이 관찰되었다.



그림 18. 인삼잎에서 발견되는 개화 관련 유전자



그림 19. 인삼의 PIF4 유전자

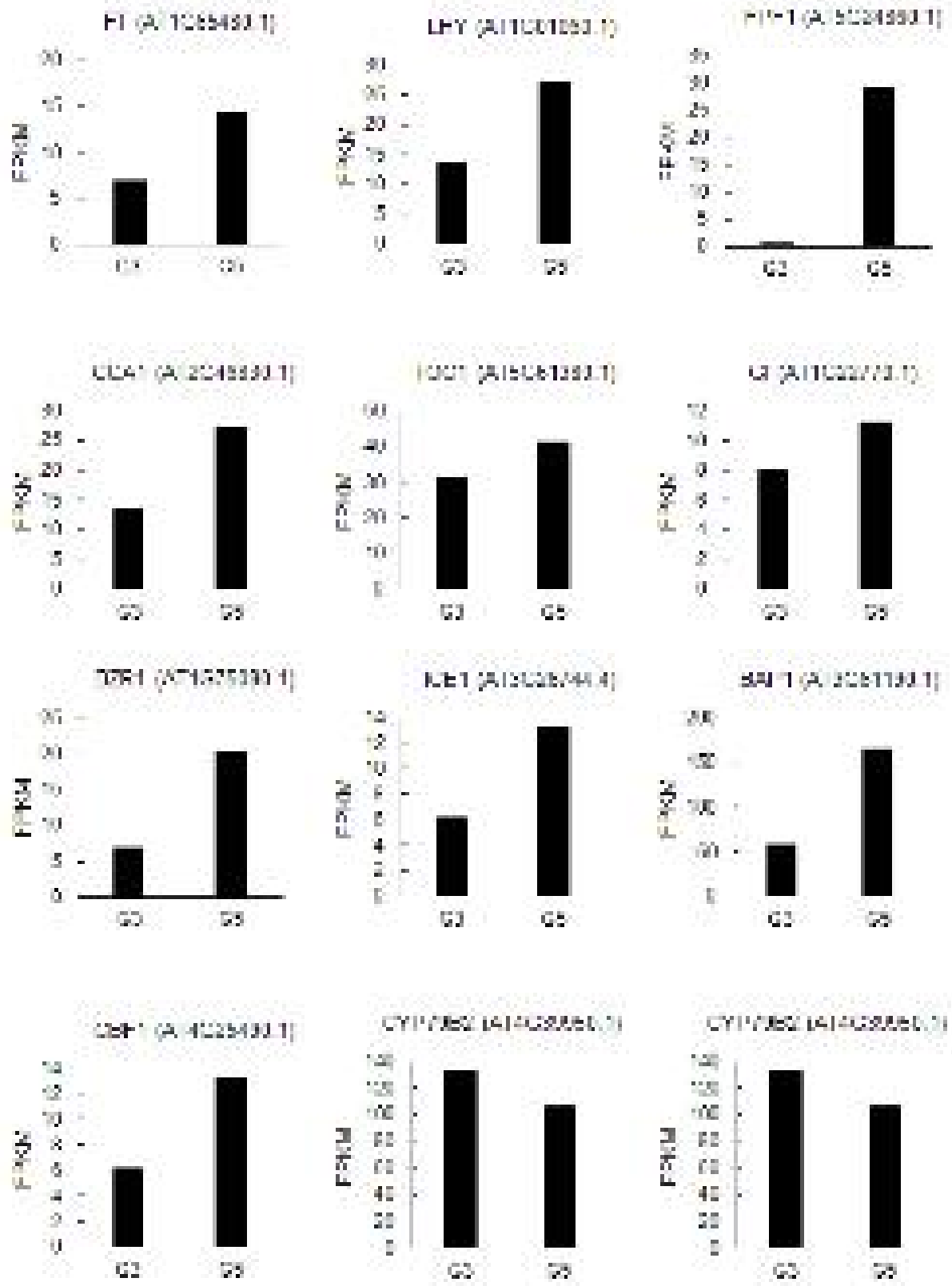


그림 20. 일부 개화관련 유전자들의 발현양 비교

바. 인삼의 전사체 mapping결과 유사성이 비교적 높았던 감자의 전사체 정보를 이용한 network 작성

아래 그림은 비교유전체, 비교전사체 기법을 이용하여 인삼의 전사체가 비교적 많이 mapping 된 감자의 전사체 정보를 이용하여 감자에서 가능한 network을 작성한 후 인삼의 전사체를 대입시켜 작성한 network 이다. 이 network 는 공발현 (co-expression) 상관관계수 (co-relationship) 분석을 통하여 작성한 것으로 3597개의 node (유전자) 가 20912개의 edge (상호관계) 를 가지는 것으로 관찰되었다 (Pearson correlation value >0.9).

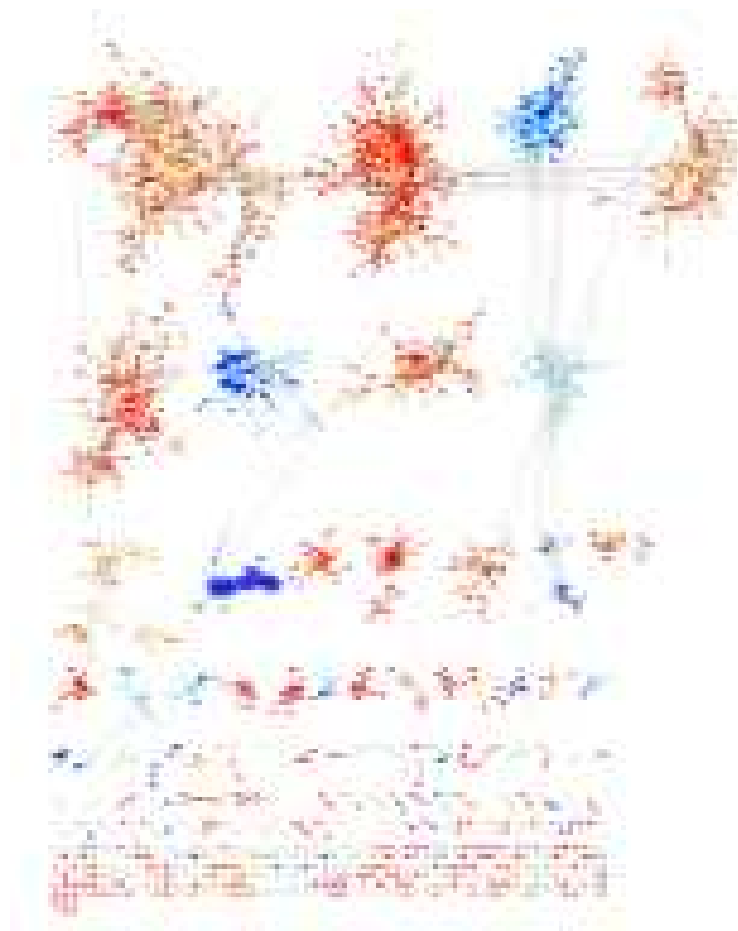


그림 21. 감자의 전사체 정보에 대입하여 관찰한 고온조건하에서 감자에서 유전자 발현 network

사. 인삼 고온, 개화관련 유전자 동정, sequencing, 고온조건에 의한 발현양 측정
인삼 앞에서 실제로 FD, PIF4등의 주요 유전자들의 염기서열을 확인하고 동정하기 위해 RT-PCR을 수행하였으며 증폭산물로부터 target 밴드를 찾아 TA cloning vector에 삽입하여 동정하였고 염기서열 분석을 수행하고 있다.

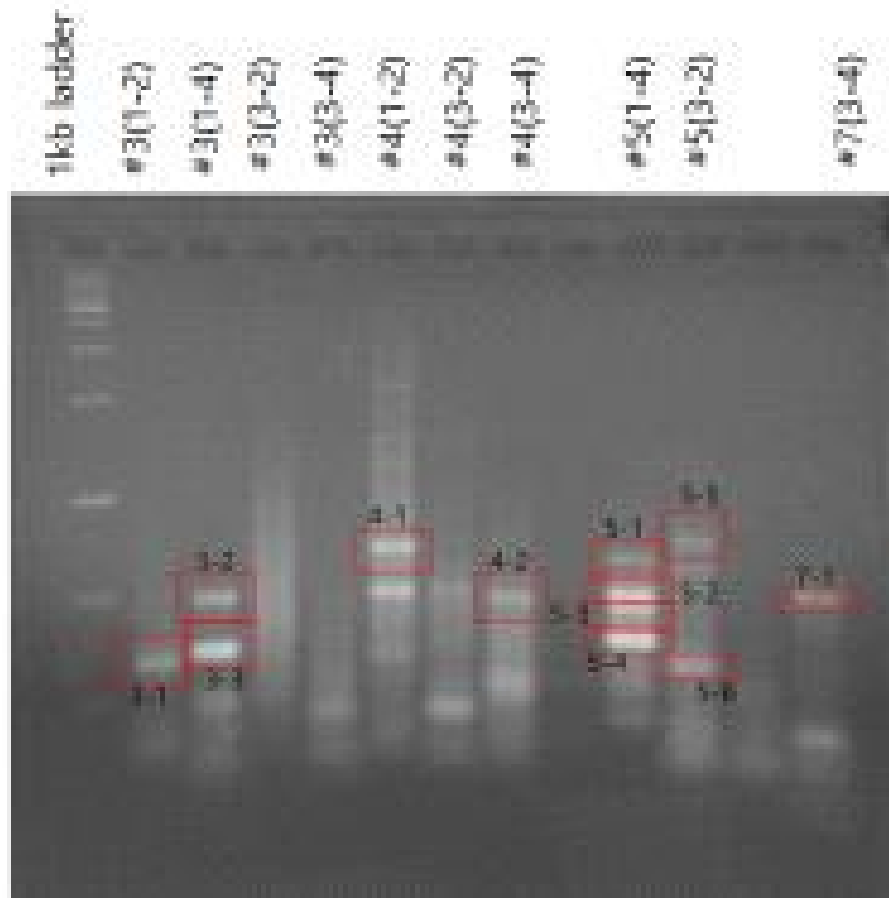


그림 22. 인삼잎의 RNA로부터 증폭한 개화관련 유전자. #3: PIF4, #4: PCK1, #7: ERF72,

7. 고온에 반응하는 인삼 생육상 관찰

가. 인삼 고온장애 한계 온도의 구명

일정기간의 저온조건이 작물의 개화에 미치는 vernalization(춘화)기작은 작물에 따라 목표로 하는 유전자의 종류는 다르나, 저온 기간 동안 methylation에 의하여 조절된다고 보고 된 바 있다. 인삼의 경우도 월동기간동안의 저온조건 (최저, 최저온도, 월별, 기간별 적산온도 등) 이 차년도 출아에 미치는 영향에 대해서는 국제적으로 연구된 바가 많지 않다. 다년생 작물인 인삼의 경우 온도에 의한 생산의 안전성에 대한 기준을 설정함에 있어 출아의 한계온도는 매우 중요한 기준으로 활용 가능하다.

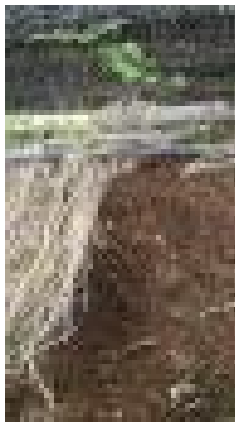
제주 해발고도포장(200m)내 온도구배하우스에서 생육중인 인삼 (3년삼) 포장의 입구로부터 4미터 지점 및 10미터 지점에서 출아하지 않은 위치의 인삼 지하부를 조사하였다. 입구로부터 4미터 지점의 경우 80% 이상의 인삼이 정상적으로 출아하였고 일부는 열매를 맺은 상태였으며 출아하지 않은 뿌리도 상당히 발육된 상태로 관찰되었다. 입구로부터 10미터 지점의 경우 정상 출아하여 엽이 전개된 개체는 50% 미만으로 관찰되며 출아하지 않은 뿌리의 경우 1년생 정도의 발육단계로 관찰되었다. 이러한 결과를 종합분석하면 인삼에 대한 고온의 피해로 출아 억제 현상이 관찰되며, 이는 동절기 이상 고온 또는 고온에 의한 호르몬 대사의 이상으로 판단 된다.



(a)



(b)



(c)



(d)

그림 23. 제주도 해발고도 200m에 위치한 온도구배하우스내 3년생 인삼포에서 관찰된 생육장애. (a), (b)온도구배하우스 입구로부터 4m 지점, (c), (d)온도구배하우스 입구로부터 10m 지점

Appendix 1. 인삼과 전사체 염기서열 수준에서 고도의 유의성을 보인 작물에서 발견된 Arabidopsis PIF4 유전자 및 유사 유전자의 염기서열 정보

<i>Sorghum-zeamays</i>			average score	64.07666667		
SeqA	Name	Length	SeqB	Name	Length	Score
3	GRMZM2G452996_T01	1272	5	Sb08g021000.1	1596	50.63
4	GRMZM5G899865_T01	951	6	Sb01g006190.1	1275	54.15
3	GRMZM2G452996_T01	1272	6	Sb01g006190.1	1275	55.5
4	GRMZM5G899865_T01	951	7	Sb01g013843.1	1608	57.62
3	GRMZM2G452996_T01	1272	7	Sb01g013843.1	1608	57.63
4	GRMZM5G899865_T01	951	5	Sb08g021000.1	1596	60.78
2	GRMZM2G016756_T01	1164	5	Sb08g021000.1	1596	62.63
1	GRMZM2G165042_T01	1689	6	Sb01g006190.1	1275	63.69
1	GRMZM2G165042_T01	1689	5	Sb08g021000.1	1596	63.72
2	GRMZM2G016756_T01	1164	7	Sb01g013843.1	1608	64
1	GRMZM2G165042_T01	1689	7	Sb01g013843.1	1608	87.25
2	GRMZM2G016756_T01	1164	6	Sb01g006190.1	1275	91.32
<i>Sorghum-Osa</i>			average score	61.09888889		
SeqA	Name	Length	SeqB	Name	Length	Score
3	Sb01g013843.1	1608	9	LOC_Os01g10020.1	1440	49.86
2	Sb01g006190.1	1275	6	LOC_Os04g24110.1	1485	49.96
1	Sb08g021000.1	1596	9	LOC_Os01g10020.1	1440	50
2	Sb01g006190.1	1275	9	LOC_Os01g10020.1	1440	53.65
1	Sb08g021000.1	1596	6	LOC_Os04g24110.1	1485	53.67
2	Sb01g006190.1	1275	5	LOC_Os07g07820.1	1026	54.97
3	Sb01g013843.1	1608	6	LOC_Os04g24110.1	1485	55.96
1	Sb08g021000.1	1596	5	LOC_Os07g07820.1	1026	57.99
3	Sb01g013843.1	1608	5	LOC_Os07g07820.1	1026	59.26
2	Sb01g006190.1	1275	8	LOC_Os03g43810.1	1485	61.41
3	Sb01g013843.1	1608	7	LOC_Os03g56950.2	1266	62.16
1	Sb08g021000.1	1596	7	LOC_Os03g56950.2	1266	63.51
1	Sb08g021000.1	1596	8	LOC_Os03g43810.1	1485	63.91
1	Sb08g021000.1	1596	4	LOC_Os12g32400.1	597	67.5
3	Sb01g013843.1	1608	4	LOC_Os12g32400.1	597	68.17
2	Sb01g006190.1	1275	4	LOC_Os12g32400.1	597	68.34
2	Sb01g006190.1	1275	7	LOC_Os03g56950.2	1266	78.52
3	Sb01g013843.1	1608	8	LOC_Os03g43810.1	1485	80.94

<i>zeamays-Osa</i>			average score	58.57125		
SeqA	Name	Length	SeqB	Name	Length	Score
3	GRMZM2G452996_T01	1272	8	LOC_Os03g56950.2	1266	46.92
4	GRMZM5G899865_T01	951	8	LOC_Os03g56950.2	1266	48.9
1	GRMZM2G165042_T01	1689	10	LOC_Os01g10020.1	1440	49.86
4	GRMZM5G899865_T01	951	6	LOC_Os07g07820.1	1026	50.05
3	GRMZM2G452996_T01	1272	9	LOC_Os03g43810.1	1485	51.49
3	GRMZM2G452996_T01	1272	6	LOC_Os07g07820.1	1026	51.75
2	GRMZM2G016756_T01	1164	6	LOC_Os07g07820.1	1026	52.63
3	GRMZM2G452996_T01	1272	7	LOC_Os04g24110.1	1485	53.85
3	GRMZM2G452996_T01	1272	10	LOC_Os01g10020.1	1440	53.85
2	GRMZM2G016756_T01	1164	10	LOC_Os01g10020.1	1440	55.24
4	GRMZM5G899865_T01	951	5	LOC_Os12g32400.1	597	55.44
4	GRMZM5G899865_T01	951	10	LOC_Os01g10020.1	1440	56.05
2	GRMZM2G016756_T01	1164	7	LOC_Os04g24110.1	1485	56.7
1	GRMZM2G165042_T01	1689	6	LOC_Os07g07820.1	1026	58.77
4	GRMZM5G899865_T01	951	9	LOC_Os03g43810.1	1485	59.2
1	GRMZM2G165042_T01	1689	7	LOC_Os04g24110.1	1485	59.93
4	GRMZM5G899865_T01	951	7	LOC_Os04g24110.1	1485	61.62
2	GRMZM2G016756_T01	1164	9	LOC_Os03g43810.1	1485	62.03
3	GRMZM2G452996_T01	1272	5	LOC_Os12g32400.1	597	64.82

2	GRMZM2G016756_T01	1164	5	LOC_Os12g32400.1	597	65.16
1	GRMZM2G165042_T01	1689	8	LOC_Os03g56950.2	1266	65.8
1	GRMZM2G165042_T01	1689	5	LOC_Os12g32400.1	597	66.33
2	GRMZM2G016756_T01	1164	8	LOC_Os03g56950.2	1266	77.23
1	GRMZM2G165042_T01	1689	9	LOC_Os03g43810.1	1485	82.09

*Medicago-
Glycine*

average
score

64.39222222

SeqA	Name	Length	SeqB	Name	Length	Score
3	Medtr5g038910.1	1401	8	Glyma10g04890.2	1476	51.82
3	Medtr5g038910.1	1401	6	Glyma02g45150.1	1689	55.39
3	Medtr5g038910.1	1401	4	Glyma08g41620.1	1578	55.67
3	Medtr5g038910.1	1401	5	Glyma18g14530.1	1686	55.75
2	Medtr5g017040.1	1035	8	Glyma10g04890.2	1476	60.19
2	Medtr5g017040.1	1035	4	Glyma08g41620.1	1578	61.64
1	Medtr1g019240.1	864	8	Glyma10g04890.2	1476	62.04
3	Medtr5g038910.1	1401	7	Glyma10g28290.3	2076	62.17
2	Medtr5g017040.1	1035	6	Glyma02g45150.1	1689	63.38
2	Medtr5g017040.1	1035	5	Glyma18g14530.1	1686	63.96
2	Medtr5g017040.1	1035	7	Glyma10g28290.3	2076	64.35
1	Medtr1g019240.1	864	4	Glyma08g41620.1	1578	65.86
1	Medtr1g019240.1	864	6	Glyma02g45150.1	1689	66.32
1	Medtr1g019240.1	864	5	Glyma18g14530.1	1686	68.29
1	Medtr1g019240.1	864	9	Glyma02g19000.1	387	71.58
1	Medtr1g019240.1	864	7	Glyma10g28290.3	2076	71.99
2	Medtr5g017040.1	1035	9	Glyma02g19000.1	387	76.23
3	Medtr5g038910.1	1401	9	Glyma02g19000.1	387	82.43

Medi-Vulgaris

average
score

60.17333333

SeqA	Name	Length	SeqB	Name	Length	Score
3	Medtr5g038910.1	1401	9	Phvul.008G144300.1	1437	49.82
2	Medtr5g017040.1	1035	7	Phvul.003G257400.1	996	51.1
3	Medtr5g038910.1	1401	5	Phvul.007G156200.1	1554	51.96
3	Medtr5g038910.1	1401	6	Phvul.003G242900.1	1212	53.47
3	Medtr5g038910.1	1401	8	Phvul.008G196800.1	1650	54.18
3	Medtr5g038910.1	1401	4	Phvul.006G028500.1	1653	54.32
2	Medtr5g017040.1	1035	9	Phvul.008G144300.1	1437	54.59
1	Medtr1g019240.1	864	7	Phvul.003G257400.1	996	54.75
1	Medtr1g019240.1	864	9	Phvul.008G144300.1	1437	58.22
3	Medtr5g038910.1	1401	7	Phvul.003G257400.1	996	59.44
2	Medtr5g017040.1	1035	4	Phvul.006G028500.1	1653	61.93
2	Medtr5g017040.1	1035	5	Phvul.007G156200.1	1554	62.03
2	Medtr5g017040.1	1035	10	Phvul.001G023200.1	867	62.05
1	Medtr1g019240.1	864	5	Phvul.007G156200.1	1554	62.15
3	Medtr5g038910.1	1401	10	Phvul.001G023200.1	867	63.21
2	Medtr5g017040.1	1035	8	Phvul.008G196800.1	1650	65.12
1	Medtr1g019240.1	864	4	Phvul.006G028500.1	1653	66.9
1	Medtr1g019240.1	864	6	Phvul.003G242900.1	1212	66.9
1	Medtr1g019240.1	864	8	Phvul.008G196800.1	1650	67.25
1	Medtr1g019240.1	864	10	Phvul.001G023200.1	867	69.56
2	Medtr5g017040.1	1035	6	Phvul.003G242900.1	1212	74.69

Vulgaris-Gmx

average
score

67.99238095

SeqA	Name	Length	SeqB	Name	Length	Score
1	Glyma08g41620.1	1578	12	Phvul.008G144300.1	1437	51.84
2	Glyma18g14530.1	1686	12	Phvul.008G144300.1	1437	54
5	Glyma10g04890.2	1476	12	Phvul.008G144300.1	1437	55.18
3	Glyma02g45150.1	1689	12	Phvul.008G144300.1	1437	55.6
3	Glyma02g45150.1	1689	8	Phvul.007G156200.1	1554	55.98
5	Glyma10g04890.2	1476	10	Phvul.003G257400.1	996	56.73

1	Glyma08g41620.1	1578	8	Phvul.007G156200.1	1554	56.76
5	Glyma10g04890.2	1476	9	Phvul.003G242900.1	1212	57.43
5	Glyma10g04890.2	1476	7	Phvul.006G028500.1	1653	57.79
3	Glyma02g45150.1	1689	9	Phvul.003G242900.1	1212	58.42
5	Glyma10g04890.2	1476	11	Phvul.008G196800.1	1650	58.47
1	Glyma08g41620.1	1578	9	Phvul.003G242900.1	1212	58.75
4	Glyma10g28290.3	2076	8	Phvul.007G156200.1	1554	59.52
2	Glyma18g14530.1	1686	9	Phvul.003G242900.1	1212	60.07
2	Glyma18g14530.1	1686	8	Phvul.007G156200.1	1554	60.17
3	Glyma02g45150.1	1689	10	Phvul.003G257400.1	996	60.54
4	Glyma10g28290.3	2076	11	Phvul.008G196800.1	1650	61.76
2	Glyma18g14530.1	1686	10	Phvul.003G257400.1	996	62.85
4	Glyma10g28290.3	2076	9	Phvul.003G242900.1	1212	62.87
1	Glyma08g41620.1	1578	10	Phvul.003G257400.1	996	63.25
4	Glyma10g28290.3	2076	12	Phvul.008G144300.1	1437	63.33
4	Glyma10g28290.3	2076	7	Phvul.006G028500.1	1653	64.97
5	Glyma10g04890.2	1476	13	Phvul.001G023200.1	867	65.51
1	Glyma08g41620.1	1578	13	Phvul.001G023200.1	867	68.63
4	Glyma10g28290.3	2076	10	Phvul.003G257400.1	996	69.08
2	Glyma18g14530.1	1686	13	Phvul.001G023200.1	867	69.67
3	Glyma02g45150.1	1689	13	Phvul.001G023200.1	867	70.01
6	Glyma02g19000.1	387	10	Phvul.003G257400.1	996	70.54
6	Glyma02g19000.1	387	13	Phvul.001G023200.1	867	71.83
4	Glyma10g28290.3	2076	13	Phvul.001G023200.1	867	71.97
6	Glyma02g19000.1	387	9	Phvul.003G242900.1	1212	76.74
6	Glyma02g19000.1	387	12	Phvul.008G144300.1	1437	77.26
1	Glyma08g41620.1	1578	11	Phvul.008G196800.1	1650	78.2
2	Glyma18g14530.1	1686	11	Phvul.008G196800.1	1650	78.79
3	Glyma02g45150.1	1689	7	Phvul.006G028500.1	1653	80.4
6	Glyma02g19000.1	387	7	Phvul.006G028500.1	1653	82.95
6	Glyma02g19000.1	387	11	Phvul.008G196800.1	1650	83.72
5	Glyma10g04890.2	1476	8	Phvul.007G156200.1	1554	84.69
6	Glyma02g19000.1	387	8	Phvul.007G156200.1	1554	87.08
3	Glyma02g45150.1	1689	11	Phvul.008G196800.1	1650	88.24
1	Glyma08g41620.1	1578	7	Phvul.006G028500.1	1653	91.89
2	Glyma18g14530.1	1686	7	Phvul.006G028500.1	1653	92.2

제 4 장 목표달성도 및 관련분야 기여도

제1절 : 목표대비 달성도

당초 목표	가중치(%)	개발 내용	달성도(%)
1) RCP시나리오 적용 생육온도별 사과, 포도, 감귤, 인삼, 천궁, 당귀의 생육 생리반응 구명	40	1) 온도에 따른 작목별 생물계절, 생산성, 품질 변화 구명 2) 사과, 포도, 인삼의 이산화탄소 농도에 따른 영향평가 수행	100
2) 기후변화 시나리오에 따른 작목별 재배적지 관련 전자지도 작성	40	3) RCP 4.5, 8.5시나리오 적용과거 30년, 2010년대부터 2090년대까지 재배지 변동 지도 제작 및 웹서비스 등 수행	100
3) 기후변화 환경조건에 따른 작물의 유전자 발현 연구 수행	20	4) 온도조건에 따른 각 작물별 유전체 발현 확인 5) 인삼의 전사체 DB구축	100
	100%		100%

제2절 : 정량적 성과(논문게재, 특허출원, 기타)를 기술

성과지표명 \ 연도		당초 목표 (전체)	실적	달성도 (%)	가중치 (%)
논문게재	SCI	6	7	117	10
	비SCI	5	4	80	10
산업재산권	출원	3	3	100	5
	등록				
학술발표	국제	3	7	233	10
	국내	7	22	314	20
기술이전		-	2	-	
정책자료 기관제출		3	8	266	0
영농기술·정보 기관제출		5	8	160	10
생물자원 등록·기탁		2	5	250	5
자료발간		1	2	200	10
홍보성과		10	422	4,223	20
정보전산프로그램 개발		-	1	-	
DB구축 및 활용		-	2	-	
농가기술 지도		-	13	-	
계		45	506	1,124	100

제 5 장 연구 결과의 활용 계획

제1절 연구개발결과 활용방안

1. 과제 성격별 결과 활용방안

가. 주요 과수 및 약용작물의 기후변화 영향평가 연구

미래 환경요인에 대한 사과, 포도, 감귤, 인삼, 천궁, 당귀작물의 기후변화 영향평가 연구방법을 개발 제시함으로써 기후변화 대응 기반확보 및 기후변화 적응대책 수립을 위한 기초자료를 제공하였다. 도출된 결과는 주요 과수 및 약용작물의 기후변화 영향평가를 활용하여 작목기관의 고온회피 재배법 개발 등 기후변화 적응연구를 지원할 수 있다. 또한 각 작물별 환경요인에 따른 생리반응, 생산량 및 품질특성 등을 세밀하게 시험하여 추후 미래 기후변화 대응 생산량 예측프로그램 개발에 필요한 기초연구자료 확보하고 기후변화 대응 연구수행에 필요한 연구세부방법 및 장비활용계획을 구체화하여 후속되는 다른 품종 연구에 활용할 수 있다.

나. 주요 과수 및 약용작물의 재배지 변동 예측 연구

국가 표준 기후변화시나리오 기반으로 작성된 농업용 미래 상세 전자기후도를 활용하여 만들어진 「미래 기후시나리오를 활용한 주요 과수 및 약용작물의 시군구 재배지 예측지도」는 정부 등 정책기관에서 기후변화에 따른 미래의 작물 수량, 생산성 변화, 재배적지 등을 예측해 수급 물량 조절 정책 수립에 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

다. 미래 온난화조건에서의 유전자 발현 구명 연구

본 연구에서 도출된 결과는 기후변화 대응 재배 및 육종분야에 기초자료로 제공될 것이며 생육과 품질관련 영향평가 시스템을 구축할 수 있다. 따라서 이를 이용해 기후변화 대응 내재해성 품종 육성효율을 증진시킬 수 있으며 분자생물학적 정보에 기초한 기후변화 피해 예측 모델 개발에 정보를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 기대성과

기후변화 시 온난화조건에서의 재배법 개발 및 미래에 대응한 새로운 내재해성 품종 및 재배기술연구 개발 등에 주요한 정보를 제공하고, 작물의 재배지 면적 변동성 분석 결과를 바탕으로 국가중앙 및 지방자치단체별로 농산물의 안정적 생산기반 조성 및 지역별 신규 유망작물 발굴로 새로운 농업 소득원을 창출할 수 있을 것으로 전망된다. 이로 인해 과수·약용작물의 안정적 농업생산 기반을 확보할 수 있으며 산업의 활성화 및 발전에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

제2절 추가연구의 필요성

1. 주요 과수 및 약용작물의 생산영향평가

본 연구에서는 영년생 작물인 과수와 약용작물의 영향평가 연구를 수행하였다. 영년생 작물의 특성을 감안했을 때 과수와 약용작물의 기후변화 영향평가 연구는 3년 간 일회성 연구가 아닌 유목기부터 경제수령 이후까지 다년간에 걸쳐 연구를 수행하여야 보다 정확한 결과를 확보할 수 있다. 작물에 따라 조금씩 차이를 보이지만 대략 10년 간 연속적인 연구를 진행한다고 가정했을 때 1~7년까지는 생산성 및 품질 변화에 대한 연구, 8~10년까지는 생산량과 품질의 변화 예측기술 개발 연구가 필요하다고 생각된다.

2. 재배지변동 예측지도 제작

본 연구에 활용된 미래 기후시나리오 자료는 기상청에서 제공하고 있는 RCP 4.5와 8.5 시나리오 기반으로 제작된 농업용 미래 상세 전자기후도(공간해상도 : 30m) 월별 자료를 사용하였다. 대상 작물 중 인삼은 재배적지를 판단하기 위해 고온피해온도(30℃이상의 온도가 7일 이상 지속되었을 경우 저위생산지) 및 휴면타파(저온요구도: 5℃ 이하의 온도가 60일 미만이었을 경우 저위생산지) 조건의 적용이 필요하였지만 현재 30m 기반의 농업용 전자기후도는 월별 자료로만 제작이 되어 있기 때문에 본 연구에서는 적용하지 못하였다. 기후변화 영향평가를 위해 활용되는 많은 모델들은 일 단위의 자료를 요구하기 때문에 일 단위의 농업용 고해상도 미래 기후 시나리오 개발이 필요할 것으로 생각된다.

3. 웹 기반의 정보제공 체계 구현

본 연구에서 제작된 작물별 재배지 전자지도는 30m의 공간해상도로 제작되었다. 결과물을 활용한 인쇄책자 또는 E-book 형태의 자료들은 고해상도의 전자지도를 표현하는데 한계가 있기 때문에 웹-GIS 기반의 정보 제공 체계를 구축할 필요가 있다.

제 6 장 연구 과정에서 수집한 해외 과학 기술 정보

과실의 품질에 영향을 끼치는 여러 가지 특성 중 과피의 붉은색은 농산물 시장 가격을 결정하는 중요한 요소이다. 과실의 과피색을 결정하는 색소는 다양하게 존재하지만 안토시아닌의 양과 조성, 플라보노이드의 종류는 사과 과실의 과피색을 결정하는 주요 요인이다(Honda 등, 2002; Lancaster, 1992). 또한 과피의 색소는 과실의 영양학적 가치와도 연관이 있다(Honda 등, 2002). 사과에서 시아니딘과 UDP당의 축적은 고온에 의해 억제되는 반면에 과피의 색을 변화시키는 안토시아닌의 축적은 고온에서 급격히 억제되는 것으로 보고되어 있다(Ban 등, 2009; Steyn 등, 2005). 지구온난화 및 도시화에 의해 생장기의 평균 기온이 15℃ 이상 높아지면 착색은 불량해지고 과실의 생장 및 성숙이 지연되거나 억제된다(Lee, 1999; Tomana와 Yamada, 1988b; Warrington 등, 1999; Yamada 등, 1988, 1944). 포도 과실의 생장과 성숙에 유리한 기후 조건인 온대지역에서도 과피의 착색불량이 발생하지만, 고온에서 특히 과피의 착색이 억제되거나 지연되는 것으로 보고되었다(Lee 등, 1979). 또한 착색불량의 원인구명을 위하여 사과 과실의 발육단계에 따른 안토시아닌 생합성 유전자의 발현 수준을 연구하였고, 과피 색소 축적에 따른 안토시아닌 농도와 유전자 발현 양상을 확인하였다(Honda 등, 2002; Kondo 등, 2002). 최근 도시화와 산업화로 인한 온도 상승은 사과 과실의 성장 지연, 당함량 감소, 착색과 형태 불량, 과실의 저장수명 단축 등으로 고품질의 사과 생산과 농가 수익에 부정적인 영향을 끼친다(Hulme 등, 1994). 기후 변화와 지구온난화에 의한 지속적인 고온은 과실 생장에 부정적인 영향을 미치고, 생리장해의 한 종류인 밀증상도 생육기의 저온보다는 고온에서 발생률 및 발생 정도가 심한 것으로 보고되어 있다(Park 등, 2009).

과실비대기(6-8월)의 기온이 30℃ 이상일 때 신초와 과실의 생장속도 및 광합성속도가 감소하고, 35℃ 이상일 때는 호흡에 의한 에너지 소비가 많아져 광합성속도가 급감한다(Lakso, 1994). 자당, 과당, 포도당 등의 당류 중에서 자당은 사과의 유과기 세포 생장에 가장 큰 영향을 끼치며, 솔비톨은 과당 축적의 주요 기질이며 당 축적 대사에서 중요한 역할을 한다(Beruter, 1985). 이와 같이 생육기에 고온을 받게 되면 당함량의 감소뿐 아니라 광합성이 감소하여 생장억제 등 악영향을 끼칠 수 있다. PG는 큰 유전자군으로 식물조직이나 발달단계에 넓은 범위로 발현되며 사과 과실의 성숙과 연관되어 있으며(Atkinson 등, 2002), 특이온도 의존적으로 에틸렌 반응 유전자를 조절하며 세포벽효소의 작용에 의해 조절된다(Costa 등, 2002). 본 연구에서는 당 합성관련 유전자인 BMY와 PG 유전자의 발현이 변색이 시작되는 1단계보다 변색이 완료된 3단계에서 월등히 높았는데, 이는 과실의 성숙이 진행됨에 따라 고온에 의해 당대사와 관련한 유전자의 발현도 증가한 것으로 여겨진다.

과실에서 안토시아닌 생합성 유전자의 발현은 과실의 붉은색의 착색 정도에 관련된 안토시아닌 축적에 비례적이며, 유전자의 발현 수준은 안토시아닌 농도에 상응한다(Honda 등, 2002). MdCHS, MdF3H, dihydroflavonol 4-reductase(pDFR), anthocyanin synthase(MdANS), UDP galactose:flavonoid glucose transferase(pUFGluT) 5개 유전자를 대상으로 발현 수준을 분석하여 고온보다는 저온에서 특히 MdCHS, MdANS, pUFGluT 유전자의 발현이 높았다고 보고하였다(Ubi 등, 2006). 안토시아닌 함량과 PAL활성 측정 결과에 따라 15-20℃의 온도에서 착색에 효과적이라고 보고되었다(Noro 등, 1991; Lee, 1999). Lister 등(1996)에 의하면, ‘Splendour’ 사과 과실에서는 PAL, chalcone isomerase(CHI), UDP galactose:flavonoid 3-O-galactosyltransferase(UFGalT) 유전자의 활성이 과실 성숙 중에 안토시아닌 축적과 관련이

있다고 밝혀졌다. 그러나, ‘Delicious’ 와 ‘Ralls’ 사과 과실의 생육 기간 동안 빛에 노출된다면 CHS 활성은 안토시아닌 생합성의 조절에 크게 영향을 끼치지 않는다는 것을 증명하였으며(Ju 등, 1995a, 1995b), PAL 활성은 ‘Delicious’ 과피에서 안토시아닌 축적과 관련이 없으며 플라보노이드 농도는 과실 발달 단계 전체에서 높게 유지되었다.

국내에서도 지구 온난화 및 도시화에 의해 과실 생육기 동안 기온이 높아져 ‘후지’ 사과 재배에서는 착색불량이 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다(Park 등, 2009; Sagong 등, 2013). 과피의 착색과 당 축적 기작에 관여하는 여러 환경요소 중에서 온도에 따른 과실의 성숙차이에 대한 연구가 성숙단계의 과실에서 주로 연구되고 있다(Azuma 등, 2012; Bergqvist 등, 2001). 사과 과실의 성숙에는 많은 요소들이 관여하고 있으므로, 전사체 분석을 통한 다양한 반응을 체계적으로 분석하면 고온에 의한 생화학적 변화에 관한 유용한 정보를 얻을 수 있을 것이다.

제 7 장 연구 개발 결과의 보안 등급

보안 등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의4에 해당하지 않음	

제 8 장 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

- 해당사항 없음

제 9 장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적

본 연구의 특성 상 기후변화 연구시설의 사용이 많아 누전 및 감전에 의한 화재 및 인명사고 발생 등 기술적 위험이 우려되었다. 따라서 연구소 내외 전기·시설 등 전문가의 기술지원과 정기적인 연구원 교육을 통해 인명사고 발생에 대해 대처하였으며, 소화전 배치, CCTV 및 화재경보기 설치로 화재로 인한 시설 유실을 방지하였다. 또한 낙뢰 등 기상재해에 의해 연구시설 및 장비가 오작동할 경우를 대비하여 연구시설 주변 피뢰침과 연구시설 개별 차단기를 설치하였으며, 태풍 대비 고정장치를 설치하여 기상재해에 의한 피해를 최소화하였다.

제 10 장 연구개발과제의 대표적 연구실적

번호	구분 (논문 /특허 /기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	논문게재지/ 특허등록국가	Impact Factor	논문게재일 /특허등록일	사시여부 (단독사사 또는 중복사사)	특기사항 (SCI여부/ 인용횟수등)
1	논문	Analysis of Structure and Expression of Grapevine 2-oxoglutarate Oxygenase Genes in Response to Low Temperature	영남대학교	KoreanJournalof HorticulturalScience&Technology	0.339	2016년 11월	단독사사	SCI
2	논문	Transcriptome Analysis of Grapevine Shoots Exposed to Chilling Temperature for Four Weeks	영남대학교	HorticultureEnvironmentandBiotechnology	0.725	2016년 11월	단독사사	SCI
3	논문	GeneExpressionasRelatedtoRipeningin HighTemperatureduringDifferentColorationStagesofHaryejaeng'and'Shiranuhi'MandarinFruits	영남대학교	KoreanJournalof HorticulturalScience&Technology	0.339	2016년 10월	단독사사	SCI
4	논문	EffectsofElevatedSpringTemperatures ontheGrowthandFruitQualityoftheMandarinHybrid'Shiranuhi'	원예원 감굴연구소	KoreanJournalof HorticulturalScience&Technology	0.339	2015년 08월	단독사사	SCI
5	논문	Comparison of Accumulation of Stilbene Compounds and Stilbene Related Gene Expression in Two Grape Berries Irradiated with Different Light	영남대학교	Horticulture Environment and Biotechnology	0.725	2015년 11월	단독사사	SCI
6	논문	EffectsoftheElevatedTemperatureandCarbonDioxideonVineGrowthandFruitQualityof'CampbellEarly'Grapevines(Vitislabruscana)	원예원 온농원	KoreanJournalof HoriticulturalScience&Technology	0.343	2014년 10월	단독사사	SCI
7	논문	Accumulation of stilbene compounds and induction of related gene expression by hairy vetch and ryegrass extracts in grape berries	영남대학교	Biologia	0.696	2014년 12월	단독사사	SCI
8	논문	고온에 의한 변색단계별 '홍로' 사과와 착색 및 당 축적 관련 유전자 발현 분석	영남대학교	시설원예식물공장	0.596	2016.03.23	단독사사	비SCI
9	논문	영하의 저온에 노출된 'Campbell Early'와 'Muscat Bailey A' 포도나무 신초의 전사체 비교	영남대학교	JournalofPlantBiotechnology	0.174	2016.06.30	단독사사	비SCI
10	논문	Expression of Genes Related to Skin Coloration and Sugar Accumulation in Grape Berries at Ripening Stages under High Temperatures	영남대학교	InternationalProceedingsofChemical,BiologicalandEnvironmentalEngineering	-	2015.08.31	단독사사	비SCI
11	논문	Expression of genes affecting skin coloration and sugar accumulation in apple fruits at ripening stages in high temperatures	영남대학교	WorldJournalofEngineeringandTechnology	-	2015.08.31	단독사사	비SCI
12	특허	고온 스트레스에 반응하는 전사조절 유전자의 기능 및 이용	건국대학교	대한민국		2016.11.16		
13	특허	LED 조사를 이용한 포도 식물체의 스틸벤 화합물 함량을 증가시키는 방법	영남대학교	대한민국		2014.11.06		
14	특허	단기 수분 스트레스에 반응하는 전사 조절단백질 trihelix	건국대학교	대한민국		2014.11.13		
15	정책 제안	기후변화시나리오(RCP) 적용 배의 재배적지 변동 평가	원예원 과수과	대한민국		2016년 11월		
16	정책 제안	기후변화 시나리오에 근거한 온주밀감 발아 및 만개기 예측	원예원 감굴연구소	대한민국		2016년 11월		
17	정책 제안	기후변화 시나리오(RCP) 적용 복숭아의 재배적지 변동 평가	원예원 과수과	대한민국		2015년 11월		

번호	구분 (논문 /특허 /기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	논문게재지/ 특허등록국가	Impact Factor	논문게재일 /특허등록일	사시여부 (단독사사 또는 중복사사)	특기사항 (SCI여부/ 인용횟수 등)
18	정책 제안	기후변화시나리오(RCP) 적용 감귤 (온주밀감)의 재배적지 변동 평가	원예원 감귤연구소	대한민국		2015년 11월		
19	정책 제안	기후변화 시나리오(RCP 8.5) 적용 단감의 재배적지 변동 평가	원예원 약용작물과	대한민국		2015년 11월		
20	정책 제안	기후변화시나리오 적용 천궁의 재배 적지 변동 평가	원예원 약용작물과	대한민국		2015년 11월		
21	정책 제안	기후변화시나리오(RCP) 적용 인삼 의 재배면적 변동 평가	원예원 인삼과	대한민국		2014년 11월		

제 11 장 기타사항

연차	당초계획	변경내용	변경사유(근거문서 포함)
1년차 (2014)	<4세부> 참여연구원 삭제 방경환	삭제	인사이동 운영지원과-52('15. 1. 2)
2년차 (2015)	<1세부> 참여연구원 변경 홍성식	김성중	협약시 반영
	<1세부> 참여연구원 변경 참여연구원 김성중	참여연구원 이한찬	인사이동
	<3세부> 참여연구원 변경 송은영	오순자	협약시 반영
	<3세부> 연구계획 변경 온도차이에 따른 착색 및 품질 반응 분석(WGC 이용)	-온도차이에 따른 감귤의 착 색 및 품질 반응 분석(온도구 배하우스 이용)	협약시 반영
	<5세부> 참여연구원 변경 안태진 한소희 안영첩	서형호, 김옥태 정진태 엄유리 유황 혜	약용작물과-82('15.1.16)
3년차 (2016)	<소과제 공통> 연구계획 변경 이산화탄소 농도 실험 수행	온도 실험만 연장하여 수행	협약시 반영 온난화대응농업연구소-410('15. 3. 19)
	<1세부> 참여연구원 추가 -	참여 연구원 위승환	- 인사이동 - 협약시 반영
	<3세부> 연구계획 변경 재배적지 예측지도 작성	생물계절 예측지도 작성	재배적지 예측지도 완료 협약시 반영
	<3세부> 참여연구원 변경 공동연구자 문경환	공동연구자 이혜진 추가	실질적 공동연구자 추가 협약시 반영
	<5세부> 참여연구원 변경 서형호, 김옥태, 정진태, 엄유리, 유황혜	김진원, 신건수, 안태진, 김 영국	약용작물과-44('16.1.8)

제 12 장 참고문헌

제1절. 국문 참고문헌

- 2014 특용작물생산실적, 2015, 농림축산식품부
- 국립기상연구소. 2011. 기후변화 시나리오 보고서
- 권현중, 한점화. 2012. 기후변화에 따른 과수의 생물계절 양상 구명. 농촌진흥청 보고서.
- 기상청. 2012. 한반도기후변화전망보고서. 기상청. pp 151.
- 김경대 2012. 토양과 기후 데이터베이스를 이용한 토양 기후도 작성과 강원지역의 조사료 재배 적지 기준설정, 강원대학교 박사학위 논문.
- 김득중. 1973. 인삼재배.
- 김성봉 등. 1992. 단감재배신기술.
- 김수옥, 정유란, 김승희, 최인명, 윤진일. 2009. 미래 시나리오 기후조건하에서의 사과 ‘후지’ 품종 재배적지 탐색. 한국농림기상학회지, 11(4):162-173.
- 김용환, 장민원, 홍석영, 김이현. 2012. 기온과 토양요인을 고려한 난지형 마늘 재배적지 분석, Korean J. Soil Sci. Fert. Vol. 45, No. 2, 266-271.
- 김정호 등. 1999. 최신 복숭아 재배.
- 김정호 등. 2010. 과수원예각론.
- 김진희, 이은정, 윤진일, 2013a. 동네예보와 생물계절모형을 이용한 봄꽃개화일 예측. 한국농림기상학회지, 15(1), 40-49.
- 김진희, 천정화, 윤진일, 2013b. 신 기후변화시나리오 저건에서 한반도 봄꽃 개화일 전망. 한국농림기상학회지, 15(1), 50-58.
- 농촌진흥청. 2012. 기후변화 시나리오 시군별 농업용 미래상세기후정보. 농촌진흥청 국립원예특작과학원.
- 농촌진흥청. 2002. 농업과학기술대전 제10권 과수(1).
- 농촌진흥청. 2002. 복숭아 재배 - 표준영농교본.
- 농촌진흥청. 2003. 최신과실생산이론과 기술.
- 농촌진흥청. 2003. 사과재배-표준영농교본.
- 농촌진흥청. 2007. 주요 원예작물 재배력.
- 농촌진흥청. 2009. 원클릭 농업기술.
- 농촌진흥청. 농업용 미래 상세기후도 제공 시스템. [Http://www.agdcm.kr](http://www.agdcm.kr)
- 농촌진흥청. 2014. 미래기후시나리오를 적용한 주요 과수 및 약용작물의 도별 재배지 예측지도 대한민국약전(11개정), 2014, 식품의약품안전처
- 류수현, 권용희, 도경란, 한점화, 한현희, 이한찬. 2015. 야간 고온에 의한 사과 후지 품종의 생리반응 및 과실품질 변화. 시설원예·식물공장학회지, 24(3):1-7.
- 박순직, 채제천, 강병화, 김석현. 2006, 삼고재배학원론, 향문사.
- 사공동훈, 권현중, 박무용, 송양익, 남종철, 강석범, 윤태명. 2011. 사과 주산지의 기온상승에 따른 ‘후지’/M.9 사과나무의 과실품질 변화 예측. Kor.J.Hort.Sci.Technol.29(Suppl. I) 130.(Abstr.).
- 산림청. 국가생물종지식정보시스템. [Http://www.nature.go.kr](http://www.nature.go.kr)
- 서형호. 2005. 기후 변화가 과수 재배에 미치는 영향. 한국농림기상학회 2005년 가을학술발표 논문집.
- 서형호. 2007. 사과 ‘후지’와 배 ‘신고’의 최근 30년간 만개기 변화. 한국원예학회·한국생물

- 환경조절학회 추계임시총회 및 공동학술발표회 자료집, p.72.
- 윤홍배, 이종식, 이예진, 김명숙, 이용복. 2012. 비닐멀칭 색상이 토양온도 변화와 가을배추 수량에 미치는 영향, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(4). 511-514.
- 이한찬. 1999. 사과 ‘후지’ 과실 착색에 관여하는 생리·생태적 요인 및 착색증진. 서울대학교 박사학위논문집.
- 오성도, 강성모, 김대일, 김명수, 김월수, 김태춘, 문두길, 박진면, 신용억, 유영산, 임열재, 장한익, 최동근. 2004. 과수온도생리. 길모금.
- 유인실. 2006. 식품원료 약용식물의 무기질과 잔류농약 분석, 단국대학교 박사학위 논문.
- 윤성탁 and Johnson J. 2004. 이랑방향에 따른 밀 군락의 미기상과 생육 및 수량, *Korean J. Crop Sci.*, 49(3):155~159.
- 이경석, 권용준, 이기영. 2008. 연잎의 일반성분, 비타민, 무기질 함량 분석 및 항산화 효과, *한국식품과학회지*, 37(12). 12, 1622-1626(5P).
- 이용선 등. 2004. 과채류의 작형별 단수함수 추정. 한국농촌경제연구원, p.73.
- 일본 농림수산성. 2006. 평성 15년도 과수생산구조에 관한 조사보고서. 농림수산성
- 임정희. 2010. 약용식물의 재배환경에 관한 고찰, *동방논집* 3권 2호, 159-167.
- 주영희. 1994. 기후변화가 작물생산에 미치는 영향, *국제농업개발학회지*, 6(3): 231~237.
- 최성규, 2009, *한약생산학각론*, 신광출판사
- 한국농업정보연구원. 2010. 인삼재배도감.
- 한해용. 1994. 감귤원예신서.
- 황재문, 태근식. 2000. 멀칭과 터널처리에 따른 미기상 변화와 마늘 생육반응, *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 41(1):27-30.
- 황진봉, 양미옥, 신현경. 1997. 약초중의 일반성분 및 무기질 함량조사, *한국식품과학회지*, 29(4), 671-679.

제2절. 영문 참고문헌

- Ahn SD, Chung CM, Kwon WS (1986) Effects of Temperature and daylength on growth and flowering in ginseng (*P. ginseng* C. A. Meyer). *Korean J. Breed* 18(3): 254-260
- Anders S, Huber W. 2010. Differential expression analysis for sequence count data. *Genome Biol.* 11:R106
- Atkinson RG, Schroder R, Hallett I, Cohen D, MacRae E. 2002. Overexpression of polygalacturonase in transgenic apple trees leads to a range of novel phenotypes involving changes in cell adhesion. *Plant Physiol.* 129:122-133.
- Azuma A, Yakushiji H, Koshita Y, Kobayashi S. 2012. Flavonoid biosynthesis-related genes in grape skin are differentially regulated by temperature and light conditions. *Planta* 236:1067-1080.
- Bae SK, Heu I, Ishii R and Kumura A. (1985). Thermal inhibition to photosynthesis of ginseng and tobacco plants. *Korean Journal of Crop Science.* 30:223-228.
- Ban Y, Honda C, Hatsuyama Y, Igarashi M, Bessho H, Moriguchi T. 2007. Isolation and functional analysis of a MYB transcription factor gene that is a key regulator for the development of red coloration in apple skin. *Plant Cell Physiol.* 48:958-970.
- Ban Y, Kondo S, Ubi B, Honda C, Bessho H, Moriguchi T. 2009. UDP-sugar biosynthetic pathway: contribution to cyaniding 3-galactoside biosynthesis in apple skin. *Planta* 230: 871-881.

- Barritt BH, Rom CR, Guelich K, Drake S, Dilley M. 1991. Light level influences spur quality and canopy development and light interception influence fruit production in apple. *HortScience* 26:993-999.
- Bergqvist J, Dokoozlian N, Ebisuda N. 2001. Sun-light exposure and temperature effects on berry growth and composition of Cabernet Sauvignon and Grenache in the central San Joaquin valley of California. *Am. J. Enol. Vitic.* 52:1-7.
- Beruter J. 1985. Sugar accumulation and changes in the activities of related enzymes during development of the apple fruit. *J. Plant Physiol.* 121:331-341.
- Bieto, J. A., & Talon, M. (1996). *Fisiología y bioquímica vegetal*. Madrid: Interamericana, McGraw-Hill. 581 p.
- Bogs J, Ebadi A, McDavid D, Robinson SP (2006) Identification of the flavonoid hydroxylases from grapevine and their regulation during fruit development. *Plant Physiol* 140:279-291.
- Boss PK, Davies C, Robinson SP. 1996. Analysis of the expression of anthocyanin pathway genes in developing *Vitis vinifera* L. cv Shiraz grape berries and the implications for pathway regulation. *Plant Physiol.* 111:1059-1066 .
- Brummell DA, Harpster MH. 2001. Cell wall metabolism in fruit softening and quality and its manipulation in transgenic plants. *Plant Mol. Biol.* 47:311-340.
- Bustan, A. and E.E. Goldschmidt. 1998. Estimating the cost of flowering in a grapefruit tree. *Plant Cell and Environment* 21:217-224.
- Buttrose, M.S. 1969. Vegetative growth of grapevine varieties under controlled temperature and light intensity. *Vitis* 8: 280-285.
- Buttrose M, Hale C, Kliwer WM. 1971. Effect of temperature on the composition of 'Cabernet Sauvignon' berries. *Am. J. Enol. Vitic.* 22:71-75.
- Calderón-Zavala G., Lakso A.N. and Piccioni R.M. 2004. Temperature effects on fruit and shoot growth in the apple (*Malus Domestica*) early in the season. *Acta Horticulturae*, 646:447-453.
- Cannell, M.G.R., Smith, R.I., 1983. Thermal time, chill days and prediction of budburst in *Picea sitchensis*. *J. Appl. Ecol.* 20, 951-963.
- Castillo-Muñoz N, Fernández-González M, Gómez-Alonso S, García-Romero E, Hermosín-Gutiérrez I. 2009. Red-color related phenolic composition of Garnacha Tintorera (*Vitis vinifera* L.) grapes and red wines. *J. Agric. Food Chem.* 57:7883-7891.
- Cesaraccio, C., Spano, D., Snyder, R.L., Duce, P., 2004. Chilling and forcing model to predict bud-burst of crop and forest species. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126, 1-13.
- Cesaraccio, C., Spano, D., Snyder, R.L., Duce, P., 2005. Corrigendum to “Chilling and forcing model to predict bud-burst of crop and forest species” [*Agricultural and Forest Meteorology*, 126, 1-13]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129, 211.
- Cesaraccio, C., Spano, D., Snyder, R.L., Duce, P., Jones, H.G., 2006. Improvement of chilling and forcing model to predict bud-burst. Paper presented at the 17th Conference on Biometeorology and Aerobiology, San Diego, CA, USA.
- Chang S, Puryear J, Cairney J. 1993. A simple and efficient method for isolating RNA from pine trees. *Plant Mol. Biol.* 11: 113-116.
- Cheon SK, Mok SK, Lee SS, Shin DY (1991) Effects of light intensity and quality on the growth and quality of Korean ginseng (*Panax ginseng* C. A. Meyer) I. Effects of light intensity on the

- growth and yield of ginseng plants. Korean J. ginseng Science 15(1): 21-30
- Cheon SK, Lee TS, Yoon JH, Lee SS (2003) Effect of light transmittance control on the growth status of aerial parts during the growing season of *Panax ginseng*. Korean J. ginseng Science 27(4): 202-206
- Chmielewski F., and Rotzer T. 2001. Response of tree phenology to climate change across Europe. Agricultural and Forest Meteorology, 108:101-112.
- Coombe BG. 1995. Adoption of a system for identifying grapevine growth stages. Aust. J. Grape Wine Res. 1:104-110.
- Costa, F., C.P. Peace, S. Stella, S. Serra, S. Musacchi, M. Bazzani, S. Sansavini, and W.E. Van de Weg. 2002. QTL dynamics for fruit firmness and softening around an ethylene-dependent polygalacturonase gene in apple (*Malus x domestica* Borkh.). J. Exp. Bot. 1-11.
- Cotroneo PS, Russo MP, Ciuni M, Reforgiato RG, Lo Piero AR (2006) Quantitative real time reverse transcriptase-PCR profiling of anthocyanin biosynthetic genes during orange fruit ripening. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 13:537-543
- Cramer GR, Ergül A, Grimplet J, Tillett RL, Tattersall EAR, Bohlman MC, Vincent D, Sonderegger J, Evans J, Osborne C, Quilici D, Schlauch KA, Schooley DA, Cushman JC. 2007. Water and salinity stress in grapevines: early and late changes in transcript and metabolite profiles. Funct. Integr. Genomics 7:111-134.
- Cramer GR, Urano K, Delrot S, Pezzotti M, Shinozaki K. 2011. Effects of abiotic stress on plants: a systems biology perspective. BMC Plant Biol. 11:163.
- Crifò T, Puglisi I, Petrone G, Recupero GR, Lo Piero AR. 2011. Expression analysis in response to low temperature stress in blood oranges: Implication of the flavonoid biosynthetic pathway. Gene 476: 1-9
- Curry EA. 1997. Temperatures for optimal anthocyanin accumulation in apple tissue. J. Hort. Sci. 72:723-729.
- Czemmel S, Stracke R, Weisshaar B, Cordon N, Harris NN, Walker AR, Robinson SP, Bogs J. 2009. The grapevine R2R3-MYB transcription factor *VvMYBFI* regulates flavonol synthesis in developing grape berries. Plant Physiol. 151:1513-1530.
- Davies FS, Tucker DPH. 2006. Fruit quality. In DPH Tucker, JS Rogers, EW Stover, MR Ziegler, eds, Florida Citrus: A Comprehensive Guide. Univ of Florida, Gainesville, FL, pp 269-278
- Dirk Selmar and Maik Kleinwachter. 2013. Influencing the product quality by deliberately applying drought stress during the cultivation of medicinal plants, Industrial Crops and Products 42 558 - 566.
- Downey MO, Harvey JS, Robinson SP. 2004. The effect of bunch shading on berry development and flavonoid accumulation in Shiraz grapes. Aust. J. Grape Wine Res. 10: 55-73.
- Easterling WE, Aggarwal PK, Batima P, Brander KM, Erda L, Howden SM, Kirilenko A, Morton J, Soussana J-F, 등 2007. Food, fibre, and forest products. In ML Parry, OF Canziani, JP Palutikof, PJ van der Linden, CE Hanson, eds, Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 273-313
- Ebrahim MK, Zingsheim O, El-Shourbagy MN, Moore PH, Komor E. 1998. Growth and sugar storage in sugarcane grown at temperatures below and above optimum. J. Plant Physiol. 153:593-602.

- FAOSTAT. 2013. <http://faostat.fao.org>
- Faust, M. 1989. Physiology of temperate zone fruit trees. John Wiley & Sons. Inc., New York. p. 212-215.
- Feng SQ, Wang YL, Yang S, Xu YT, Chen XS. 2010. Anthocyanin biosynthesis in pears is regulated by a R2R3-MYB transcription factor PyMYB10. *Planta* 232:245-255
- Florides GA, Christodoulides P. 2009. Global warming and carbon dioxide through sciences. *Environ. Intl.* 35: 390-401.
- Ford CM, Boss PK, Høj PB. 1998. Cloning and characterization of *Vitis vinifera* UDP-glucose:flavonoid 3-O-glucosyltransferase, a homologue of the enzyme encoded by the maize Bronze-1 locus that may primarily serve to glucosylate anthocyanidins in vivo. *J. Biol. Chem.* 273:9224-9233
- Frank G, Pressman E, Ophir R, Althan L, Shaked R, Freedman M, Shen S, Firon N. 2009. Transcriptional profiling of maturing tomato (*Solanum lycopersicum* L.) microspores reveals the involvement of heat shock proteins, ROS scavengers, hormones, and sugars in the heat stress response. *J. Exp. Bot.* 60:3891-3908.
- Fujisawa M. and Kobayasho K. 2007. Accelerating phenology of apple trees in Japan as influenced by rising air temperature. *J. Agric. Meteorol.* 63:185-191.
- Georgios, A.F. and Paul. C. 2009. Global warming and carbon dioxide through sciences. *Environment International* 35: 390-401
- Goto-Yamamoto N, Mori K, Numata N, Koyama K, Kitayama M. 2010. Effects of temperature and water regimes on flavonoid contents and composition in the skin of red-wine grapes. *J. Int. Sci. Vigne Vin. Special issue Macrowine* 75-80.
- Greer DH, Weston C. 2010. Heat stress affects flowering, berry growth, sugar accumulation and photosynthesis of *Vitis vinifera* cv. Semillon grapevines grown in a controlled environment. *Funct. Plant Biol.* 37: 206-214.
- Guardiola, J.L. 1981. Flower initiation and development in citrus. *Proc. Int. Soc. Citriculture* 242-246.
- Hack, H., Bleiholder, H., Buhr, L., Meier, U., Snock-fricke, U., Weber E., and Witzemberger, A. 1992. Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungssatdien mono-und dikotyler Pflanzen-Erweiterte BBCH-Skala, Allgemein-. *Nachrichtenbl.Deut.Pflanzenschutz* 44:265-270.
- Han SH, Kang JH. 2011. Effect of water states of fruit vesicle and leaf on fruit quality in ‘Trifoliate’ orange and ‘Swingle citrumelo’ rootstock of ‘Shiranuhi’ [(*Citrus unshiu* × *C. sinensis*) × *C. reticulata*] mandarin hybrid, M16 A line in plastic film house cultivation. *J. Bio-Environ. Cont.* 20:204-210.
- Hanninen, H., 1990. Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions. *Acta For. Fenn.* 213, 1-47.
- Hara M, Wakasugi Y, Ikoma Y, Yano M, Ogawa K, Kuboi T. 1999. cDNA sequence and expression of a cold-responsive gene in *Citrus unshiu*. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 63:433-437.
- Holland N, Menezes HC, Lafuentea MT. 2002. Carbohydrates as related to the heat-induced chilling tolerance and respiratory rate of “Fortune” mandarin fruit harvested at different maturity stages. *Postharvest Biol. Technol.* 25:181-191.

- Holland N, Nunes FLS, Medeiros IUD, Lafuentea MT. 2012. High-temperature conditioning induces chilling tolerance in mandarin fruit: a cell wall approach. *J. Sci. Food Agric.* 92:3039-3045.
- Honda C, Kotoda N, Wada M, Kondo S, Kobayashi S, Soejima J, Zhang Z, Tsuda T, Moriguchi T. 2002. Anthocyanin biosynthetic genes are coordinately expressed during red coloration in apple skin. *Plant Physiol. Biochem.* 40:955-962.
- Honer zu Bentrup K, Miczak A, Swenson DL, Russell DG. 1999. Characterization of activity and expression of isocitrate lyase in *Mycobacterium avium* and *Mycobacterium tuberculosis*. *J. Bacteriol.* 181:7161-7167.
- Hrazdina G, Parsons FG, Mattick LR. 1984. Physiological and biochemical events during development and maturation of grape berries. *Am. J. Enol. Vitic.* 35: 220-227.
- Huang W, Li L, Myers JR, Marth GT. 2012. ART: A next-generation sequencing read simulator. *Bioinformatics* 28:593-594.
- Hulme, M., Z.C. Zaho, and T. Jiang. 1994. Recent and future climate change in East Asia. *Intl. J. Climatol.* 14:637-658.
- Huh, I.O. 1973. Studies on contribution degree affecting to the fruit quality of satsuma mandarin. *Jeju Natl. Univ. Edu. Collection of Learned Papers* 3:119-138.
- Huh, I.O. 1975. Studies on the improvement of fruit of satsuma mandarin. *Jeju Natl. Univ. Edu. Collection of Learned Papers* 5:35-43.
- Iglesias DJ, Cercós M, Colmenero-Flores JM, Naranjo MA, Ríos G, Carrera E, Ruiz-Rivero O, Lliso I, Morillon R, 등 2007. Physiology of citrus fruiting. *Braz. J. Plant Physiol.* 19:333-362.
- Inoue, H. 1989. Differentiation and development of flower buds in satsuma mandarins under different temperature conditions. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 58:75-82. (In Japanese).
- Inoue, H. 1990. Effects of exposing satsuma mandarin trees grown under low temperature regimens in winter and early spring on flower bud development and flowering. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 59:215-223. (In Japanese).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate change 2007 (The physical science basis), Summary for policymakers, technical summary and frequently asked questions. WMO & UNEP, p. 142.
- Ismail MA, Brown GE. 1979. Postharvest wound healing in citrus fruit: induction of phenylalanine ammonia-lyase in injured 'Valencia' orange flavedo. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 104:126-129.
- Iwagaki I, Hirose K. 1980. Fruit growth and acid content of satsuma mandarin in relation to flowering time. *J. Japan Soc. Hortic. Sci.* 48:418-425.
- Iwagaki, I. and Y. Kato. 1982. Relationship between early fruit growth and harvest fruit quality in satsuma mandarin. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 51:263-269. (In Japanese).
- Izumi H, Ito T, Yoshida Y. 1990. Changes in fruit quality of satsuma mandarin during storage, after harvest from exterior and interior canopy of trees. *J. Japan Soc. Hortic. Sci.* 58:877-883.
- Jang HI, Seo HH, Park SJ. 2002. Strategy for fruit cultivation research under the changing climate. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 20: 270-275.
- Jones GV, White MA, Cooper OR, Storchmann K. 2005. Climate change and global wine quality. *Climatic Change* 73:319-344.
- Ju Z, Liu C, Yuan Y. 1995a. Activities of chalcone synthase and UDPGal:flavonoid 3-O-glycosyltransferase in relation to anthocyanin synthesis in apple. *Sci. Hortic.* 63:175-185.

- Ju, Z., C. Liu, Y. Yuan, C. Liu, and S. Xin. 1995b. Relationships among phenylalanine ammonia-lyase activity, simple phenol concentrations and anthocyanin accumulation in apple. *Sci. Hortic.* 61:215-226.
- Jung P.S, H.S. Park, S. J. Jung. 1990. Effects of light quality and temperature on anthocyanin development in the fruit skin of *Malus domestica* Borkh. cv. Jonagold. *J. Kor. Soc. Hort.Sci.* 31:51-56
- Karim MA, Fracheboud Y, Stamp P. 1997. Heat tolerance of maize with reference of some physiological characteristics. *Ann. Bangladesh Agri.* 7:27-33.
- Karim MA, Fracheboud Y, Stamp P. 1999. Photosynthetic activity of developing leaves is less affected by heat stress than that of developed leaves. *Physiol. Plant.* 105: 685-693.
- Kataoka I, Kudo Y, Sugiura A, Tomana T. 1984. Effects of temperature, cluster shading and some growth regulators on L-phenylalanine ammonia lyase activity and anthocyanin accumulation in black grapes. *Mem. Coll. Agric., Kyoto Univ.*, 124: 35-44.
- Kenny GJ, Shao J. 1992. An assessment of a latitude-temperature index for predicting climate suitability for grapes in Europe. *J. Hort. Sci.* 67: 239-246.
- Kihara, B. and H. Konaka. 2000. Status and measure of alternate bearing of satsuma mandarin. *Bull. Fruit Exp. Stn.* 34:111-136. (In Japanese).
- Kimball, B.A., K. Kobayashi, and M. Bindi. 2002. Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment. *Adv. in Agron.* 77: 293-36.
- Kim CG, Moon DH. 2012. Climate change countermeasures of Japan agriculture. *World Agric.* 146:1-16.
- Kim GS, Hyun DY, Kim YO, Lee SE, Kim YC, Lee SE, Son YD, Lee MJ, Park CB, Park HK, Cha SW and Song KS (2008) Extraction and preprocessing methods for ginsenosides analysis of *Panax ginseng* C. A. Meyer. *Korean J. Medicinal Crop Sci.* 16:446-454.
- Kim, J.H., Kim, J.C., Ko, K.C., Kim K.R., and Lee J.C. 2006. General pomology. Hyangmoonsha Press, Seoul, p.35-311.
- Kim, P.G. and Lee E.J. 2001. Ecophysiology of photosynthesis 3: photosynthetic responses to elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature. *Kor. J. Agric. For. Meteorol.* 3:238-243.
- Kim SA, Ahn SY, Han HH, Son IC, Yun HK. 2015a. Expression of genes affecting skin coloration and sugar accumulation in grape berries at ripening stages under high temperatures. *Adv. Environ. Res.* 87:25-31.
- Kim SA, Ahn SY, Son IC, Yun HK. 2015b. Expression of genes related to skin coloration and sugar accumulation in grape berries at ripening stages under high temperatures. *Adv Environ. Res.* 87:25-31
- Kim SA, Ahn SY, Yun HK. 2016. Transcriptome analysis of grapevine shoots exposed to chilling temperature for four weeks. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 57:161-172.
- Kim S-B, Oh EU, Park JH, Yun S-H, Oh HW, Kang JH, Koh SW, Oh HJ, Song KJ. 2012. Fruit growth, sugar, and acid characteristic in leafy and leafless fruits of satsuma mandarin. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 30:642-649.

- Kim SH, Choi IM, Cho JG, Han JH, Hwang JH, HH Seo, Yun HK. 2012. Correlation analysis between fruit quality of 'Campbell Early' grapes and climatic factors. Korean J. Agric. Forest Meteorol. 13: 93-100.
- Kim SH, Choi IM, Han JH, Cho JG, Son IC, Do KR. 2010. Effect of climatic condition of 2010 on fruit yield and quality. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 29(S1):127-128.
- Kim SY, Jang HH, Lee JR, Sung NR, Lee HB, Lee DH, Park DJ, Kang CH, Chung WS, Lim CO, Yun DJ, Kim WY, Lee KO, Lee SY. 2009. Oligomerization and chaperone activity of a plant 2-Cys peroxiredoxin in response to oxidative stress. Plant Sci. 177:227-232.
- Kim, S.Y., I.H. Heo, and S.H. Lee. 2010. Impacts of temperature rising on changing of cultivation area of apple in Korea. J. Kor. Assoc. Reg. Geograph.. 16:201-215. (in Korean)
- Kirschbaum, M.U.F. 2000. Forest growth and species distributions in a changing climate. Tree Physiology 20: 309-322.
- Kirschbaum, M.U.F. 2004. Direct and indirect climate change effects on photosynthesis and transpiration. Plant Biology 6: 242-253.
- Kitazono. K., Y. Kawakubo, K. Fujita. 2012. Effects of global warming on cultivation of satsuma mandarin in Kumamoto Prefecture. Research Bulletin Of The Kumamoto Prefectural Agricultural Research Center. No. 19
- Kliewer WM, Torres RE. 1972. Effect of controlled day and night temperatures on grape coloration. Am. J. Enol. Vitic. 23:71-77.
- Kliewer WM. 1968. Effect of temperature on the composition of grapes grown under field and controlled conditions. Proc. Am. Soc. Hort. Sci. 93:797-806.
- Kobayashi, A., N. Nii, and K. Harada, 1967. Effect of temperature on flowering, fruiting and fruit quality of maturing stage of satsuma mandarin. Agr. & Hort. 42:97-98. (In Japanese).
- Kondo S, Hiraoka K, Kobayashi S, Honda C, Terahara N. 2002. Changes in the expression of anthocyanin biosynthetic genes during apple development. J. Am. Soc. Hort. Sci. 127:971-976.
- Korea Meteorological Administration, 2009. Climate change handbook. Korea Meteorological Administration, p. 29-34.
- KOSAT. 2014. <http://kosat.go.kr/potal/korea/kor-nw/2/7/1/index.board>.
- Kriedemann PE. 1986. Photosynthesis in vine leaves as a function of light intensity, temperature, and leaf age. Vitis 7:213-220.
- Lakso AN. 1994. Apple. Handbook of Environmental Physiology of Fruit Crops. 1:3-42.
- Lakso, A.N. and E.J. Seeley. 1978. Environmentally induced responses of apple tree photosynthesis. HortScience 13:646-650.
- Lakso, A.N. and M.C Goffinet. 2003. Fruit growth patterns. p. 91-101. In: Concise encyclopedia of temperate tree fruit. T. Baugher and S. Singha (eds.), Haworth Press, Binghamton, NY.
- Lancaster JE. 1992. Regulation of skin color in apples. Crit. Rev. Plant Sci. 10:487-502.
- Lee HC. 1999. Physiological and ecological factors affecting fruit coloration and color enhancement in *Malus domestica* Borkh. cv. 'Fuji'. Ph D Thesis, Seoul National University, Seoul
- Lee IB, Kang SB, Park JM. 2008. Effect of elevated carbon dioxide concentration and temperature on yield and fruit characteristics of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Korean Soc. J. Environ. Agr. 27: 428-434.

- Lee J, Tomana T. 1981. Physiological study on coloration in grape. III. Effect of fruit temperature on the changes on total sugar, total phenol and abscisic acid in 'Delaaware' and 'Muscat Bailey AA' grape berries. *Hort. Environ. Biotech.* 22: 283-288.
- Lee JC, Tomana T, Naoki U, Ikuo K. 1979. Physiological study on the anthocyanin development in grape - I. Effect of fruit temperature on the anthocyanin development in "Kyoho" grape. *J. Kor. Hort. Sci.* 20: 55-65.
- Lee, S.G., Moon J.H., Jang Y.A., Kim S.Y. and Ko K.D. 2009. Change of photosynthesis and cellular tissue under high CO₂ concentration and high temperature in Radish. *Kor. J. Hor. Sci. Techno.* 27:194-198.
- Lee SH, Kim J, Jeong HC, Koh JS. 2007. Changes in the quality of Hallabong Tangor (*Citrus kiyomi* × ponkan) with growth stage and temperature pretreatment conditions. *Korean J. Food Preserv.* 6:565-570.
- Leyva A, Jarillo JA, Salinas J, Martinez-Zapater JM. 1995. Low temperature induces the accumulation of *Phenylalanine ammonia-lyase* and *chalcone synthase* mRNA of *Arabidopsis thaliana* in a light-dependent manner. *Plant Physiol.* 108:39-46.
- Lim CJ, Yang KA, Hong JK, Choi AS, Yun DJ, Hong JC, Chung WS, Lee SY, Cho MJ, Lim CO. 2006. Gene expression profiles during heat acclimation in *Arabidopsis thaliana* suspension-culture cells. *J. Plant Res.* 119:373-383.
- Linkosalo, T., 2000. Mutual regularity of spring phenology of some boreal tree species: predicting with other species and phenological models. *Can. J. For. Res.* 30, 667-673
- Lin-Wang K, Micheletti D, Palmer J, Volz R, Lozano L, Espley R, Hellens RP, Chagnè D, Rowan DD, 등 2011. High temperature reduces apple fruit colour via modulation of the anthocyanin regulatory complex. *Plant Cell Environ* 34:1176-1190.
- Lister CE, Walker JE, Lancaster JRL. 1996. Developmental changes in enzymes of flavonoid biosynthesis in the skins of red and green apple cultivars. *J. Sci. Food Agric.* 71:313-320.
- Liu GT, Wang JF, Cramer G, Dai ZW, Duan W, Xu HG, Wu BH, Fan FG, Wang LJ, Li SH. 2012. Transcriptomic analysis of grape (*Vitis vinifera* L.) leaves during and after recovery from heat stress. *Plant Biol.* 12:174.
- Lloyd, J., & Farquhar, G. D. (2008). Effects of rising temperatures and [CO₂] on the physiology of tropical forest trees. *Philosophical Transactions of the Royal Society of Biological Sciences*, 363, 1811-1817.
- Lo Piero AR, Consoli A, Puglisi I, Orestano G, Reforgiato RG, Petrone G. 2005. Anthocyaninless cultivars of sweet orange lack to express the UDP-glucose flavonoid 3-O-glucosyl transferase. *J. Plant Biochem. Biotechnol.* 14:1-6.
- Luedeling E, Girvetz E, Semenov MA, Brown P. 2011. Climate change affects winter chill for temperate fruit and nut trees. *PLoS ONE* 6:e20155.
- Lurie S. 1998. Postharvest heat treatments. *Postharvest Biol. Technol.* 14:257-269.
- Lurie S, Handros A, Fallik E, Shapira R. 1996. Reversible inhibition of tomato fruit gene expression at high temperature. *Plant Physiol.* 110:1207-1214.
- Maik Kleinwächter and Dirk Selmar. 2015. New insights explain that drought stress enhances the quality of spice and medicinal plants: potential applications, *Agron. Sustain. Dev.*, 35:121 - 131.
- Matsumoto, R. 2001. 'Shiranuhi', a late-maturing citrus cultivar. *Bull. Natl. Inst. Fruit Tree Sci.*

- 35:115-120. (In Japanese).
- Matsumoto K, Kim B, Oahn V, Seo J, Yoon H, Park M, Hwang Y, Chun J. 2007. Comparison of sugar compositions and quality parameters during berry ripening between grape cultivars. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 25:230-234.
- Matsumoto, K., S. Chikaizumi, I.O. Hoe and J. Watanabe. 1972. Studies on the contribution of environmental and internal factors affecting the edible quality and exterior appearance of satsuma mandarin fruits. I. Estimation of the contribution of some factors influencing the total soluble solids and free acid content of juice. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 41:171-178.
- Mattivi F, Guzzon R, Vrhovsek U, Stefanini M, Velasco R. 2006. Metabolite profiling of grape: Flavonols and anthocyanins. J. Agric. Food Chem. 54:7692-7702.
- Matus JT, Loyola R, Vega A, Pena-Neira A, Bordeu E, Arce-Johnson P, Alcalde JA. 2009. Post-veraison sunlight exposure induces MYB-mediated transcriptional regulation of anthocyanin and flavonol synthesis in berry skins of *Vitis vinifera*. J. Exp. Bot. 60:853-867.
- Mishra P, Dubey RS. 2013. Excess nickel modulates activities of carbohydrate metabolizing enzymes and induces accumulation of sugars by upregulating acid invertase and sucrose synthase in rice seedlings. Biometals 26:97-111.
- Monroe JD, Storm AR, Badley EM, Lehman MD, Platt SM, Saunders LK, Schmitz JM, Torres CE. 2014. β -amylase1 and β -amylase3 are plastidic starch hydrolases in Arabidopsis that seem to be adapted for different thermal, pH, and stress conditions. Plant Physiol. 166:1748-1763 .
- Moon DG, Ko SW, Han SG, Choi YH, Kim YH. 2008. Sugar and acid contents in different portions of ‘Shiranuhi’ mandarin fruit as affected by water stress. J. Korean Soc. Hortic. Sci. 49:216-220
- Moon YE. 2006. Effects of rootstock and temperature on the tree growth and fruit quality of ‘Shiranuhi’ mandarin hybrid in plastic film house. Ph D Thesis, Jeju National University, Jeju
- Moon YE, Kim CM. 2001. Studies on investigation of factor and preventing of fruit splitting in satsuma mandarin in plastic film house. Bull Jeju Agr Exp Sta p. 162-175.
- Moran and P. Dan. 1980. Chlorophyll determination in intact tissues using N, N-dimethylformide. Plant Physiol. 65:478-479.
- Mori K, Goto-Yamamoto N, Kitayama M, Hashizume K. 2007. Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature. J. Exp. Bot. 58:1935-1945.
- Mori K, Goto-Yamamoto N, Kitayama M, Hashizume K. 2007. Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperatures. J. Exp. Bot. 58:1935-1945.
- Mori K, Sugaya S, Gemma H. 2005. Decreased anthocyanin biosynthesis in grape berries grown under elevated night temperature condition. Sci. Hort. 105:319-330.
- Mori K, Sugaya S, Gemma H. 2005. Decreased anthocyanin biosynthesis in grape berries grown under elevated night temperature condition. Sci. Hort. 105:319-330.
- Mukai, H., T. Kitamura, T. Takagi, and T. Suzuki. 1992. Effect of temperature and water stress on quality of satsuma mandarin fruit. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 61(Suppl. 2):54-55. (In Japanese).
- National Institute of Agricultural Sciences and Technology(NIAST). (2000). Methods of soil chemical analysis. National Institute of Agricultural Sciences and Technology. RDA, Suwon, Korea p.108-149.

- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS). 2011. Climate change scenario reports 2011 to cope with Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 5th reports. p.82.
- Nii, N., K. Harada, and K. Kadowaki. 1970. Effects of temperature on the fruit growth and quality of satsuma oranges. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 39:19-27. (In Japanese).
- Noro S, Ichinohe H, Obra N. 1991. Effects of controlled air temperature on development of anthocyanin, sugar and citramalic acid during maturation of the apple cultivar Starking Delicious. Bull. Aomori Apple Exp. Sta. 27:111-123
- Nunan K, Sims I, Bacic A, Robinson S, Fincher G. 1998. Changes in cell wall composition during ripening of grape berries. Plant Physiol. 118:783-792.
- Nunan KJ, Sims IM, Bacic A, Robinson SP, Fincher GB. 1997. Isolation and characterization of cell walls from the mesocarp of mature grape berries (*Vitis vinifera*). Planta 203:93-100.
- Oanh VTK, Matsumoto K, Hwang YS, Chun JP. 2010. Changes of cell wall polysaccharides during berry ripening in grapes (*Vitis* spp.). Hortic. Environ. Biotechnol. 51:513-519.
- Park H (1979) Physiological response of Panax ginseng to temperature I. Old experience, distribution, germination, photosynthesis and respiration. Korean J. ginseng Science 3(2): 156-167
- Park H (1980) Physiological response of Panax Ginseng to Temperature II. Leaf physiology, soil temperature, air temperature, growth of pathogene. Korean J. ginseng Science 4(1): 104-120
- Park H, Yoo KJ and Choi BJ. (1988). Growth efficiency and thermal stress in Panax ginseng grown at various temperatures under dark. Korean Journal of Ginseng Science. 12:1-10.
- Park SJ. 2011. Study on environmental factors on sugar contents and coloration of grapes. Annu. Reports Fruits Res., National Institute Horticultural and Herbal Science. p. 896-901.
- Park SR, Paik JH, Ahn MS, Park JW, Yoon YJ. 2010. Biosynthesis of plant-specific flavones and flavonols in *Streptomyces venezuelae*. J Microbiol Biotechnol. 20:1295-1299.
- Park MY, Song YY, Han HH, Sagong DH. 2009. Influence of air temperature during the growing period on water core occurrence in ‘Hongro’ apple cultivar and the mitigation technique. Korean J. Agr. Forest Meteorol. 11:100-110. (in Korean)
- Porat R, Pavoncello D, Lurie S, McCollum TG. 2002. Identification of a grapefruit cDNA belonging to a unique class of citrus dehydrins and characterization of its expression patterns under temperature stress conditions. Physiol. Plant 115:598-603.
- Porter, J.R., Xie, L., Challinor, A.J., Howden, M., Iqbal M.M., Lobell D.B., and Travasso M.I. 2014. Chapter 7: Food Security and Food Production. In: Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II Contribution to the IPCC 5th Assessment Report. Cambridge University Press, pp.485-533.
- Rabbani MA, Maruyama K, Abe H, Khan A, Katsura K, Ito Y, Yoshiwara K, Seki M, Shinozaki K, Yamaguchi-Shinozaki K. 2003. Monitoring expression profiles of rice genes under cold, drought, and high-salinity stresses and abscisic acid application using cDNA microarray and RNA gel-blot analyses. Plant Physiol. 133:1755-1767.
- Reay, P.F. 1999. The role of low temperatures in the development of the red blush on apple fruit (‘Granny Smith’). Sci. Hortic. 79:113-119.
- Reisch BI, Owens CL, Cousins P. 2012. Grape. In: Badenes ML, Byrne DH, editors. Fruit breeding; Handbook of plant breeding (II). New York, USA: Springer, pp. 225-262.

- Richardson, A.C. and R.H. Blank. 1996. Shoot development in spring affects satsuma mandarin fruit quality. *Proc. Int. Soc. Citriculture* 989-993.
- Richter H, Pezet R, Viret O, Gindro K. 2006. Characterization of 3 new partial stilbene synthase genes out of over 20 expressed in *Vitis vinifera* during the interaction with *Plasmopara viticola*. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 67:248-260
- Riov J. 1974. A research note: polygalacturonase activity in citrus fruit. *J. Food Sci.* 40:201-202
- Riov J, Monselise SP, Kahan RS. 1968. Effect of gamma radiation on phenylalanine ammonia-lyase activity and accumulation of phenolic compounds in citrus fruit peel. *Radiat. Bot.* 8:463-466.
- Rivero RM, Ruiz JM, Garcia PC, Lopez-Lefebvre LR, Sanchez E, Romero L. 2001. Resistance to cold and heat stress: accumulation of phenolic compounds in tomato and watermelon plants. *Plant Sci.* 160:315-321.
- Roubelakis-Angelakis KA, Kliwer WM. 1986. Effects of exogenous factors on phenylalanine ammonia-lyase activity and accumulation of anthocyanins and total phenolics in grape berries. *Am. J. Enol. Vitic.* 37:275-280.
- Rural Development Administration(RDA). (2009). Ginseng cultivation standard farming textbook (Revised Edition). Rural Development Administration. Suwon, Korea. p.31-37.
- Rural Development Administration(RDA). (2012). Good agricultural practice of ginseng (Revised Edition). Rural Development Administration. Suwon, Korea. p.70-147.
- Sagong D, Kweon HJ, Park MY, Song YY, Ryu SH, Kim MJ, Choi KH, Yoon TM. 2013. Impacts of urban high temperature events on physiology of apple trees: a case study of 'Fuji'/M.9 apple trees in daegu, korea. *Korean J. Agr. Forest Meteorol.* 15:130-144.
- Salazar-Parra C, Aguirreolea J, Sa'nchez-Dí'az M, Jose' Irigoyen J, Morales F. 2012. Climate change (elevated CO₂, elevated temperature and moderate drought) triggers the antioxidant enzymes response of grapevine cv. Tempranillo, avoiding oxidative damage. *Physiol. Plant.* 144:99-110.
- Sanchez-Ballesta MT, Lafuente MT, Zacarias L, Granell A. 2000a. Phenylalanine ammonia-lyase in the response of citrus fruits to cold temperature. *Physiol. Plant* .108:382-389.
- Sanchez-Ballesta MT, Lluch Y, Gosalbes MJ, Zacarias L, Granell A, Lafuente MT. 2003. A survey of genes differentially expressed during long-term heat-induced chilling tolerance in citrus fruit. *Planta* 218:65-70.
- Sanchez-Ballesta MT, Rodrigo MJ, Lafuente MT, Granell A, Zacarias A. 2004. Dehydrin from citrus, which confers in vitro dehydration and freezing protection activity, is constitutive and highly expressed in the flavedo of fruit but responsive to cold and water stress in leaves. *J. Agric. Food Chem.* 52:1950-1957.
- Sanchez-Ballesta MT, Zacarias L, Granell A, Lafuente MT. 2000b. Accumulation of pal transcript and pal activity as affected by heat-conditioning and low-temperature storage and its relation to chilling sensitivity in mandarin fruits. *J. Agric. Food Chem.* 48:2726-2731.
- Saure, M.C. 1990. External control of anthocyanin formation in apple. *Sci. Hortic.* 42:181-218.
- Schoffl, F, Prandl, R, Reindl, A. 1999. Molecular responses to heat stress. In: Shinozaki, K., Yamaguchi-Shinozaki, K. (Eds.), *Molecular Responses to Cold, Drought, Heat and Salt Stress in Higher Plants*. R.G. Landes Co., Austin, Texas, pp. 81-98.

- Seo H, Park H. 2003. Fruit quality of 'Tsugaru' apples influenced by meteorological elements. Korean J. Agr. Forest Meteorol. 54:218-225.
- Shannon LM. 1968. Plant isoenzymes. Ann Rev Plant Physiol 19:187-210
- Shim SB, Kwon YH, Hong YP, Park HS. 2007. Comparison of fruit quality and vegetative growth in 'Kyoho' grape by crop load and thinning. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 25:389-393.
- Shin KH, Park HS. 2012. Fruit color improvement by ABA treatment and determination of harvesting time in 'Hongisul' grapes. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 30:256-260.
- Siddique, KHM, Loss, SP, Regan, KL, Jettner, RL, 1999. Adaptation and seed yield of cool season grain legumes in Mediterranean environments of south-western Australia. Aust. J. Agric. Res. 50:375-387.
- Silacci MW, Morrison JC. 1990. Changes in pectin content of Cabernet Sauvignon grape berries during maturation. Am. J. Enol. Vitic. 41:111-115.
- Son IC, Han JH, Kim SH, Oh SI, Moon KH, Choi IM. 2014. Effects of the elevated temperature and carbon dioxide on vine growth and fruit quality of 'Campbell Early' grapevines (*Vitis labruscana*). Korean J. Hortic. Sci. Technol. 32:781-787.
- Song JH, Kang IK, Choi DG. 2014. Light conditions and characteristics of leaves and fruit at different canopy positions in slender-spindle 'Hongro' apple trees. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 32:440-447.
- Song K, Hwang JH, Yun HK. 2003. Changes of soluble sugar and starch concentrations in fruits of apple cultivars differing in maturity. Hort. Environ. Biotechnol. 44:207-210.
- Song KJ, Kim SB, Park JH, Oh EU, Lee K, Kim DW, Kang J-H, Kim J-S, Oh JH, 등 2011. Frequency and growth characteristics of polyploids occurred spontaneously in some mandarin hybrids. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 29:617-622
- Sparvoli F, Martin C, Scienza A, Gavazzi G, Tonelli C. 1994. Cloning and molecular analysis of structural genes involved in flavonoid and stilbene biosynthesis in grape (*Vitis vinifera* L.). Plant Mol. Biol. 24:743-755.
- Spayd S, Tarara J, Mee D, Ferguson J. 2002. Separation of sunlight and temperature effects on the composition of *Vitis vinifera* cv. Merlot berries. Am. J. Enol. Vitic. 53:171-183.
- Steyn WJ, Horlcroft DM, Wand S, Jacobs G. 2004. Anthocyanin degradation in detached pome fruit with reference to preharvest red color loss and pigmentation patterns of blushed and fully red pears. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 129:13-19.
- Steyn WJ, Wand S, Horlcroft DM, Jacobs G. 2005. Red colour development and loss in pears. Acta Hortic. 671:79-85.
- Sugiura S, Sumida H, Yokoyama S, Ono H. 2012. Overview of recent effects of global warming on agricultural production in Japan. Jpn. Agri. Res. Q. 46:7-13
- Sugiura S, Yokozawa M. 2004. Impact of global warming on environment for apple and *Satsuma mandarin* production estimated from change of the annual mean temperature. J. Japan Soc. Sci. 73:72-78.
- Sugiura, T. 1997. Interpretation of climatic ecology response and development model to predict growth and development of pear tree. PhD Diss., Kyoto Univ., Kyoto.
- Sugiura T. 2009. What become of 'Agriculture' and 'Food' by global warming? Gijyutu-hyoronsya, Tokyo, Japan.

- Sun P, Mantri N, Lou H, Hu Y, Sun D, Zhu Y, Dong T, Lu H. 2012. Effects of elevated CO₂ and temperature on yield and fruit quality of strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) at two levels of nitrogen application. PLoS ONE 7:e41000.
- Syvertsen, J.P. and L.G. Albrigo. 1980. Some effect of grapefruit tree canopy position on microclimate, water relations, fruit yield, and juice quality J. Amer. Soc. Hort. Sci. 105:454-459.
- Taiz L, Zeiger E. 1991. Plant physiology. The Benjamin/Cummings Publishing Company. Inc., California. p. 473-489.
- Takagi, T., I. Sawano, T. Suzuki, and S. Okamoto. 1982. Effects of temperature before and after flowering on the development of flower and fruit in *Citrus unshiu* Marc. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 51:257-262. (In Japanese).
- Takagi, N., M. Shimizu, N. Ogino, Y. Maeda, S. Akamatsu, and A. Owada. 1987. Influence of flowering intensity on the vegetative growth and translocation of ¹⁵N and ¹³C-photosynthates during anthesis in Miyauchi iyo (*Citrus iyo hort.* Tanaka). J. Japan. Soc. Hort. Sci. 55:433-444. (In Japanese).
- Tarara J, Lee J, Spayd S, Scagel C. 2008. Berry temperature and solar radiation alter acylation, proportion, and concentration of anthocyanin in Merlot grapes. Am. J. Enol. Vitic. 59: 235-247.
- Tomana, T. 1983. The effect of environmental temperature on fruit maturing. Horticulture, Environment, and Biotechnology 24:276-283.
- Tomana T, Utsunomiya N, Kataoka I. 1979. The effect of environmental temperature on fruit ripening on tree. II. The effect of temperatures around whole vines and clusters on the coloration of 'Kyoho' grapes. J. Jpn. Soc. Hort. Sci. 48: 261-266 (in Japanese, with English summary).
- Tomana T, Yamada H. 1988a. Change in sugar composition during maturation stage of apple fruit grown at different locations. J. Jpn. Soc. Hortic. Sci. 57:178-183.
- Tomana T, Yamada H. 1988b. Relationship between temperature and fruit quality of apple cultivars grown at different locations. J. Jpn. Soc. Hortic. Sci. 56:391-397.
- Ubi BU, Honda C, Bessho H, Kondo S, Wada M, Kobayashi S, Moriguchi T. 2006. Expression analysis of anthocyanin biosynthetic genes in apple skin: effect of UV-B and temperature. Plant Sci. 170:571-578.
- USDA. 2013. Climate change and agriculture in the United States. USDA. pp 186.
- Utsunomiya N, Yamada H, Kataoka I, Tomana T. 1982. The effect of fruit temperatures on the maturation of satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marc.) fruits. J. Jpn. Soc. Hortic. Sci. 51:135-141 (In Japanese).
- Wahid A, Gelani S, Ashraf M, Foolad MR. 2007. Heat tolerance in plants: An overview. Environ. Exp. Bot. 161:199-223.
- Wang, K.L., Micheletti, D., Palmer, J., Volz, R., Lozano, L., Espley, R., Hellens, P., Changne, D., Rowan, D.D., Troggio, M., Iglesias, I., and Allan, A.C. 2011. High temperature reduces apple fruit colour via modulation of the anthocyanin regulatory complex. Plant Cell Environ. 34:1176-1190.
- Wang Y, Li J, Xia RX. 2010. Expression of chalcone synthase and chalcone isomerase genes and accumulation of corresponding flavonoids during fruit maturation of Guoqing No.4 satsuma (*Citrus unshiu* Marcow). Sci. Hortic. 125:110-116.
- Warrington, I.J., Fulton, T.A., Halligan, E.A., and Silva, H.N. 1999. Apple fruit growth and

- maturity are affected by early season temperatures. Journal of the American Society for Horticultural Science, 56:391-397.
- Warrington, I.J., T.A. Fulton, E.A. Halligan, and H.N. de Silva. 1999. Apple fruit growth and maturity are affected by early season temperatures. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 124(5):468-477.
- Webster, A.D. 2005. Sites and soils for temperate tree-fruit production : their selection and amelioration. p. 12-14. In: J. Tromp, A.D. Webster, and S.J. Wertheim. (eds.). Fundamentals of temperate zone tree fruit production. Backhuys publishers, Leiden, Netherlands.
- White MA, Diffenbaugh NS, Jones GV, Pal JS, Giorgi F. 2006. Extreme heat reduces and shifts United States premium wine production in the 21st century. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 103:11217-11222.
- Winkler A, Cook JA, Kliewer WM, Lider LA. 1974. General Viticulture. 710 pp. University of California Press, Berkeley.
- Xie R, Zheng L, He S, Zheng Y, Yi S, Deng L (2011) Anthocyanin biosynthesis in fruit tree crops: Genes and their regulation. Afr. J. Biotechnol. 10:19890-19897.
- Xu J. 2014. Next-generation sequencing: Current Technologies and Applications. Caister Academic Press, Ontario, Canada.
- Xu M, Li Y, Zheng Z, Dai Z, Tao Y, Deng X (2015) Transcriptional analyses of mandarins seriously infected by '*Candidatus Liberibacter asiaticus*'. PLoS ONE 10:e0133652.
- Yamada, H., H. Ohmura, C. Arai, and M. Terui. 1994. Effect of preharvest fruit temperature on ripening, sugar, and watercore occurrence in apples. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 119:1208-1214.
- Yamada, H., K. Hamamoto, A. Sugiura, and T. Tomana. 1988. Effect of controlled fruit temperature on maturation of apple fruits. J. Jpn. Soc. Hortic. Sci. 57:173-177.
- Yamakawa H, Hirose T, Kuroda M, Yamaguchi T. 2007. Comprehensive expression profiling of rice grain filling-related genes under high temperature using DNA microarray. Plant Physiol. 144:258-277.
- Yamane, T., S.T. Jeong, N. Goto-Yamamoto, Y. Koshita, and S. Kobayashi. 2006. Effects of temperature on anthocyanin biosynthesis in grape betty skins. Amer. J. Enol. Viticult. 57: 54-59.
- Yang NS, Scandalios JG. 1974. Purification and biochemical properties of genetically defined malate de-hydrogenase in maize. Arch. Biochem. Biophys. 161:335-353.
- Yoon CG, Son IC, Kim DI. 2010. Effects of temperature during growth stage on tree growth and fruit quality in 'Fuji'/M.9 apples. J. Korean Soc. Int. Agric. 22:143-147.
- Yudina RS. 2012. Malate dehydrogenase in plants: Its genetics, structure, localization and use as a marker. Adv Biosci Biotech 3:370-377.
- Zamski, E. and A.A. Schaffer. 1996. Photoassimilate distribution in plants and crops (Source-sink relationships). Marcel Dekker, Inc. New York. p. 851-881.
- Zekri M. 2011. Factors affecting citrus production and quality. Citrus industry, December, pp 6-9.
- Zhang JH, Huang WD, Liu YP, Pan QH. 2005a. Effects of temperature acclimation pretreatment on the ultrastructure of mesophyll cells in young grape plants (*Vitis vinifera* L. cv. Jingxiu) under cross-temperature stresses. J. Integr. Plant Biol. 47:959-970.
- Zhang Y, Mian MR, Chekhovskiy K, So S, Kupfer D, Lai H, Roe BA. 2005b. Differential gene expression in *Festuca* under heat stress conditions. J. Exp. Bot. 56:897-907.

Zononi S, Ferrarini A, Giacomelli E, Xumerle L, Fasoli M, Malerba G, Bellin D, Pezzotti M, Delledonne M. 2010. Characterization of transcriptional complexity during berry development in *Vitis vinifera* using RNA-Seq. *Plant Physiol.* 152: 1787-1795.

주 의

1. 이 보고서는 농촌진흥청에서 시행한 「(예산사업명) 사업」의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농촌진흥청에서 시행한 「(예산사업명) 사업」의 연구 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.

* 예산사업명은 과제 종료년도에 지원한 세부사업을 기재함