

## 완결과제 최종보고서

일반과제(○), 보안과제( )

(과제번호 : PJ010081)

사과의 전표면 스캔 및 영상분석법을 이용한 내외부 결함 판정 기술 연구

(Research of internal and external defect discrimination technology of apple using whole surface scan and image analysis)

국립농업과학원

연구수행기간

2014.02. ~ 2016.12.

농촌진흥청

## 제 출 문

농촌진흥청장 귀하

본 보고서를 “사과의 전표면 스캔 및 영상분석법을 이용한 내외부 결함 판정 기술 연구”  
(개발기간 : 2014. 02 ~ 2016. 12) 과제의 최종보고서로 제출합니다.

제1세부연구과제 : 사과의 전표면 스캔 및 영상분석법을 이용한 내외부 결함 판정  
기술 연구

2017. 2. 28.

제1세부연구기관명 : 국립농업과학원

제1세부연구책임자 : 임 층 국

참여 연구원 : 김기영, 도충연

주관연구책임자 : 임 층 국

주관연구기관장 : 국립농업과학원



「농촌진흥청 농업과학기술 연구개발사업 운영규정」 제51조에 따라 보고서  
열람에 동의합니다.

## 제 출 문

농촌진흥청장 귀하

본 보고서를 “사과의 전표면 스캔 및 영상분석법을 이용한 내외부 결합 판정 기술 연구”  
(개발기간 : 2014. 02. ~ 2016. 12.) 과제의 최종보고서로 제출합니다.

제1세부연구과제 : 사과의 전표면 스캔 및 영상분석법을 이용한 내외부 결합 판정  
기술 연구

2017. 2. 28.

제1세부연구기관명 : 국립농업과학원

제1세부연구책임자 : 임 종 국

참여 연구원 : 김 기 영, 모 창연

주관연구책임자 : 임 종 국 ☐

주관연구기관장 : 국립농업과학원

직인

「농촌진흥청 농업과학기술 연구개발사업 운영규정」 제51조에 따라 보고서  
열람에 동의합니다.

## 보고서 요약서

과제번호	PJ010081		연구기간	2014. 02.~2016. 12.
연구사업명	단위사업명	기관고유		
	세부사업명	농업기초기반연구		
	내역사업명	농업공학연구		
연구과제명	주관과제명	사과의 전표면 스캔 및 영상분석법을 이용한 내외부 결합 판정 기술 연구		
	세부 과제명	(1세부) 사과의 전표면 스캔 및 영상분석법을 이용한 내외부 결합 판정 기술		
연구책임자	구분	연구기관		소속
	1세부	사과의 전표면 스캔 및 영상분석법을 이용한 내외부 결합 판정 기술 연구		국립농업과학원 임종국
총 연구기간 참여 연구원 수	총: 3명 내부: 3명	총 연구개발비	정부: 300,000천원 민간: 천원 계: 300,000천원	
위탁연구기관명 및 연구책임자		참여기업명		
국제공동연구	상대국명:	상대국 연구기관명:		
<제1세부> - 정지 상태에서의 사과 내외부 결합 검출용 알고리즘 개발 · 판별률(比영상) : 열파, 병해, 쥐색불량, 상처(100%), 명 (93.3%) - 사과 내·외부 결합별(병해, 상처, 충해, 명 등) 분광특성 구명 및 최적 파장대역 선발 : 576, 682, 806, 905, 920 nm - 이송중 사과의 결합 검출 판별 시스템 개발 · 구성 : 롤러 회전부, 영상 측정부, 전송부, 컵식 선별부, 배출부, 제어부 등 · 검출 파장 연산 : 단일 파장(806, 905, 920 nm), 차(差) 연산 : 905-682 nm · [처리량] 7,200개/시간, [검출 항목] 찍힘, 명, 병해, 충해, 부패 등 [판별률] 91%(정상 : 94, 결함 : 87)				보고서 면수 : 130

## 〈 국 문 요 약 문 〉

연구의 목적 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 관행 사과 육안 선별 시 전체 표면에 대한 검사 기술 부재로 불량과 발생</li> <li>○ 영상 분석 기술을 적용한 사과의 3차원 내·외부 품질 측정 기술 개발 필요</li> </ul>					
연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 정지 상태에서의 사과 내외부 결함 검출용 알고리즘 개발           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 판별률(比영상) : 열과, 병해, 착색불량, 상처(100%), 명(93.3%)</li> </ul> </li> <li>○ 사과 내·외부 결함별(병해, 상처, 충해, 명 등) 분광특성 구명 및 최적 파장대역 선발 : 576, 682, 806, 905, 920 nm</li> <li>○ 이송중 사과의 결함 검출 판별 시스템 개발           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 구성 : 롤러 회전부, 영상 측정부, 전송부, 컵식 선별부, 배출부, 제어부 등</li> <li>- 검출 파장 연산 : 단일 파장(806, 905, 920 nm), 차(差) 연산 : 905-682 nm</li> <li>- [처리량] 7,200개/시간, [검출 항목] 찍힘, 명, 병해, 충해, 부패 등 [판별률] 91%(정상 : 94, 결함 : 87)</li> </ul> </li> </ul>					
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 사과 전체 표면 결함 선별작업 인력 비율 50% 절감           <ul style="list-style-type: none"> <li>- (관행) 육안 외부(내부 불가능) 선별 10명 → (개선) 내외부 검출 + 5명</li> <li>- 투입인건비 절감 : 연간 70억 원(사과 APC 82개소)</li> </ul> </li> <li>○ 사과 전체 표면 결함에 대한 검출이 어려웠던 사과의 비파괴 기술을 확보하고 검출 가능한 요소도 확대 가능함</li> </ul>					
중심어 (5개 이내)	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%;">사과</td> <td style="width: 20%;">초분광</td> <td style="width: 20%;">영상 분석</td> <td style="width: 20%;">결함</td> <td style="width: 20%;">검출</td> </tr> </table>	사과	초분광	영상 분석	결함	검출
사과	초분광	영상 분석	결함	검출		

## 〈 Summary 〉

Purpose& Contents	<p>Surface inspection of apple is done through human eye, which is inconsistent, inefficient and subjective. Also, bruises in apples are difficult to see. This research reports the development and testing of hyperspectral imaging systems for sorting apples for surface defects such as scab, color, scar, bruises, etc. The purpose of this study was to develop an on-line sorting system for detecting internal and external defects of an apple using visible and near-infrared(VNIR) hyperspectral imaging technology and rotation roller. This sorting system consists of input part, rotation roller, image measurement part with VNIR hyperspectral camera, 600 W(100W X 6 ea) tungsten-halogen lamp and line light, transfer part, cup-type sorter, output part, and system control unit.</p>				
Results	<p>An detection algorithm for processing binary images from a line scan hyperspectral camera of VNIR reflectance(400~1000 nm) from surface defects of an apple was developed. Spectral information of internal and external defects of abnormal apples were investigated using VNIR hyperspectral reflectance and imaging. The optimal wavebands for discriminating these defects and normal apples were determined using one-way analysis of variance. Subtraction imaging algorithm (905 nm - 682 nm) for detecting surface defects and single image (805, 905, 920 nm) for detecting scab, bruise and scar were developed. The performance results of this sorting system showed that classification accuracies for normal apples and abnormal apples were 94% and 87%, respectively.</p>				
Expected Contribution	<p>The existing manual inspection of internal and external defects of apples can be replaced by developed this sorting systems. It is concluded that VNIR hyperspectral camera system and the detection algorithm could be used for on-line apple sorting system for discrimination of surface defects with assistance of manual inspection.</p>				
Keywords	apple	hyperspectral	image analysis	defect	detection

## 〈 목 차 〉

제 1 장 연구개발과제의개요 .....	1
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	3
제 3 장 연구수행 내용 및 결과 .....	6
제 4 장 목표달성을 및 관련분야에의 기여도 .....	118
제 5 장 연구결과의 활용계획 등 .....	119
제 6 장 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보 .....	119
제 7 장 연구개발성과의 보안등급 .....	119
제 8 장 국가과학기술지식정보서비스에 등록한 연구시설 · 장비현황 ..	119
제 9 장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적 ..	119
제 10장 연구개발과제의 대표적 연구실적 .....	120
제 11장 기타사항 .....	121
제 12장 참고문헌 .....	122

# 제 1 장 연구 개발 과제의 개요

## 제1절 연구 개발 목적

본 연구에서는 사과의 전체 표면 결함 분광 특성 구명하고 사과의 결함 검출을 위한 적정 파장 대역 선별하고자 하였다. 이송중 회전 사과의 내외부 결함을 검출하기 위해 시작기를 제작하였으며 제작된 시작기를 이용하여 사과 전체 표면 결함 판정 시스템 성능시험 및 현장 적용시험을 실시하고자 하였다.

## 제2절 연구 개발의 필요성

사과(Malus domestica)는 당, 식이섬유, 비타민 C, 미네랄, 폐놀성 물질 등이 풍부하여 영양학적 가치뿐만 아니라 암과 심장병 예방, 체중과 콜레스테롤 감소, 신경과 뇌세포 보호 등과 같은 기능성을 가지는 대표적인 과실이다. 사과 1인당 소비량은 최근 점차 증가하여 ‘10년에는 9.3 kg이었으며, 품종 개선 등으로 품질이 향상됨에 따라 가격도 상승하고 있는 추세이다. 농산물 검사기준에서 사과의 검사기준은 결점과(병충해, 상해, 외관불량) 혼입율에 대해서는 경결점과 비율은 10~30%, 중결점과 비율은 0~10%로 정하고 있다(농림축산식품부, 2015). 특히 소비자가 사과 선택시 중요시하는 외형적 선정기준으로는 색, 모양, 품종, 껍질의 이상 유무, 크기, 단단함, 냄새, 안전성 순으로 조사되고 있다(2008, 한국식품저장유통학회). 사과의 결함이 있는 결점과에 대한 선별 작업시 작업자가 육안으로 판별하여 제거하고 있어 노동력 과다, 인력난, 신뢰도 등의 어려운 점이 많아 자동화 요구도가 높다.



그림 1. 육안에 의한 사과 외관 선별(좌), 사과의 결점과 유형(우)

이때 작업자가 미처 발견하지 못한 결함이 있는 경우 유통 중 다른 청과물의 품질에도 영향을 미치기 때문에 이를 사전에 배제할 수 있는 기술 개발이 필요하다. 기존에는 기계시각을 이용하여 청과물의 단면에 대한 결함을 검출한 사례는 있지만 측면 또는

뒷면에 존재하는 결함의 검출은 어려워 이를 개선할 수 있는 전체 표면에 대한 결함 검출기술의 개발이 요구되고 있다.

### 제3절 연구 개발 범위

국내에서는 과일의 결함 검출을 위해 기존에는 칼라 영상 카메라나 CCD 영상 처리 기술과 같은 기계 시각 기술이 주로 이용되었지만, 최근에는 분광학적인 정보뿐만 아니라 영상정보도 동시에 획득 가능한 장점을 가지고 있는 초분광 및 형광 영상 처리 기술에 대한 연구가 활발해지고 있다. 최근 초분광 영상처리 기술의 개발 및 관련 센싱 기술의 발전으로 시료의 모든 부위의 개별 스펙트럼과 영상을 신속하게 측정할 수 있는 기술이 개발되었고, 그 적용 범위가 점차 확대되어 가고 있다.

농산물의 성분과 품질, 안전성을 현장에서 신속하고 정확하게 판정하고 평가하기 위해서는 이러한 첨단의 초분광 영상기술에 대한 연구 및 개발이 요구된다. 사과의 내외부 결함과 안전성에 대한 연구는 미국과 같은 농업 선진국에서도 지속적으로 연구되고 있으며, 관련 시스템에 대한 개발도 진행되고 있기에 우리나라도 관련 기술에 대한 기초 및 실용화 기술 개발을 확대할 필요가 있다. 따라서 사과의 내외부 결함과 안전성은 일정 부분이 아닌 전체 표면을 대상으로 하여 품질이 확보할 필요가 있기 때문에 전체 표면 영상을 획득하고 결함을 검출할 수 있는 기계적 장치 개발과 영상 분석 기술을 연구 개발 범위로 하고자 한다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제1절 국내 연구 현황

사과의 결점을 검출할 수 있는 컴퓨터 시각장치 개발을 위한 기초 연구로서 기계적 손상, 부패, 반점, 벌레구멍, 극힘의 사과 결점을 검출을 진행하였으며 판별 정확도는 I (명도) 화면과 NIR(Near-infrared) 화면에서 각각 76%, 77%이었다(1997, 한국농업기계학회). 컬러 기계 시각장치와 신경회로망(Neural network) 색 측정 모델을 이용하여 후지사과의 색 측정 가능성에 관한 연구를 수행하였으며, 조명 조건과 곡면이 형성된 사과 표면에서의 색 측정에 대한 오차를 감소시키기 위한 분석이 필요한 것으로 제시하였다(1998, 한국농업기계학회).

기계시각을 이용하여 후지사과의 형상 선별의 알고리즘을 개발하였고, 개발된 알고리즘의 성능 평가를 선별기에 적용하여 시험한 결과, 정지 및 이송상태에서 95% 이상의 선별율을 나타내었으며(1999, 한국농업기계학회) 과실의 등급결정에 중요한 인자인 착색도의 비파괴적인 측정을 위하여 1100~2500 nm 파장대역의 근적외선 분광기를 이용하여 측정하였으며, 색차계에 의한 a-value와 추출법에 의한 anthocyanin 함량과의 예측 오차는 4.94였으며 중상관계수는 0.761으로 낮게 나타났다(2000, 한국식품저장유통학회).

사과의 내외부 검사를 실시간 온라인 시스템을 개발하여 시험한 결과, 병 반점의 검출 정확도는 87%, 타상과 자상에 대한 평균 정확도는 55%, 내부 부패, 밀병과 같은 내부 이상의 정확도는 85%였으며, 개선된 조명장치를 이용하여 정확도 향상시킬 수 있음을 언급하였다(2005, 농업공학연구소). 또한 저장 중에 나타나는 내부 갈변과를 신속하게 검출하기 위해 가시광선 및 근적외선 투과 분광법을 이용하였고, 판별 정확도를 높이기 위해 사과의 상하, 뒷면 등 여러 부분을 측정해야한다고 제시하였다(2006, 한국농업기계학회).

가시광 및 근적외선(Visible and near-infrared ; VNIR) 초분광 반사광 영상 획득 시스템을 이용하여 후지 사과의 명 검출 기술 개발에 관한 연구를 수행하였으며 육안으로 구분하기 어려운 명이 효과적으로 검출될 수 있음을 보여주었다(2011, 한국농업기계학회).

## 제2절 국외 연구 현황

사과의 색상 등급 판정을 위하여 기계 시각 장치로부터 획득한 RGB영상을 HSI 모델로 변환하였으며, 두 가지 등급의 사과(녹색과 노란색)로 분류하는 작업에 대해서 90% 이상의 정확도를 가지는 것으로 보고하였다. 사과의 RGB 칼라 영상에서 평균 Hue 값 을 계산하여 적갈색의 결함과와 정상과를 검출하는 연구를 수행하였는데 전체적인 평균값을 가지고 판정 하여 부분적이고 미세한 결함에 대해서는 우수한 성능을 보이지 못한 것으로 나타났다(1995, Tao et al.)

광원의 차이와 센서의 광특성 차이점을 고려한 인공신경망을 이용하여 사과의 색상판정에 대한 연구를 수행하였으며, 사과 표면의 특정 부분과 전체 부분의 색 판정의 결과는 95% 이상으로 보고하였으며(1997, Nalcano) 사과와 같은 원형의 과일인 오렌지의 결함의 검출을 위해 한 대의 칼라카메라와 750 nm의 파장 영상을 획득할 수 있는 카메라를 동시에 구현하였으며, Bayesian 판정 모델을 이용하여 결함은 94% 판정하였다 (2002, Aleixos et al.).

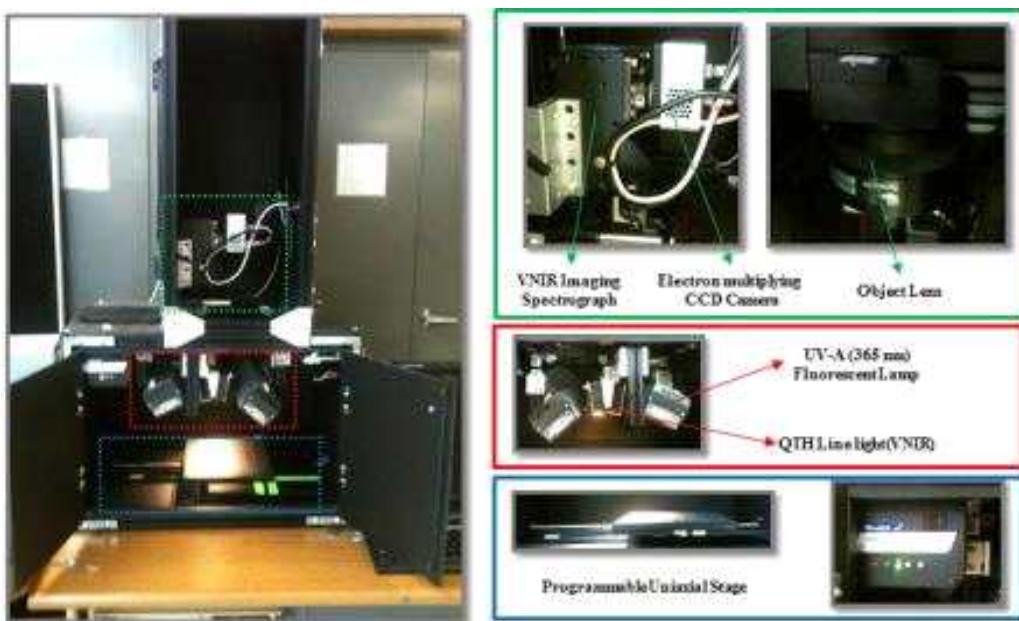


그림 3. 가시광/근적외선 및 형광 초분광 영상 시스템

3-CCD 영상시스템을 이용하여 Golden Delicious 사과의 결함을 실시간으로 검출하는 연구를 수행하였으며(2004, Leemans and Destain) 특히 형광과 초분광 반사광을 동시에 획득할 수 있는 라인스캔장치를 개발하고 여러 파장대역의 영상을 이용하여 사과의 품질과 안전성을 동시에 측정하기 위한 시험을 수행하였다(2004, USDA/ARS). 다분광 영상을 이용한 Jonagold 사과의 표면 결함을 검출하는 알고리즘 개발에 관한 연구를 수행하였음(2006, D. Unay)



그림 4. 근적외선 초분광 반사 영상 시스템

감귤의 외관 선별을 위해 칼라 영상과 형광 영상을 동시에 획득할 수 있는 시스템을 개발하고 백색광과 365 nm UV LED를 활용하여 색상 판정 외에 형광영상에서는 썩은 부위를 판정할 수 있음을 보고하였다(2008, Kodo et al.). 또한 자외선 형광 등을 이용한 작물의 병해 진단이나 저장장해 검사, 식중독균의 신속 검출 등에 대한 연구 결과가 보고되고 있으며, 현재 실용화를 위한 장치 개발 연구가 수행되고 있으며(2012, USDA-ARS) 라인 스캔 방식의 고속 초분광 영상 획득 장치가 보급 중에 있으며 가시 및 근적외선 영상 및 UV-A의 형광 반응에 의한 사과의 표면 오염(가축의 분뇨)을 검출하기 위한 연구를 2007년부터 지속적으로 진행하고 있다(USDA/ARS).



그림 5. 자외선 형광을 이용한 과수 병해 및 저장 장해 검사

### 제 3 장 연구 수행 내용 및 결과

#### 제1절 사과의 전체 표면 결함 분광 특성 구명

##### 1. 사과 표면 내·외부 결함 판별을 위한 실험 개요

###### 가. 초분광 영상 시스템(Hyperspectral imaging system)

###### (1) 분광 분석법(Spectroscopy)

분광분석법은 사물에 빛을 조사하여 흡수되거나 반사되는 정도를 관찰하면 그 사물에 대한 성분이나 결함 정보 등을 획득할 수 있지만 통합되어 측정되는 데이터로 인해 특정 위치에 대한 분광 정보를 얻기에는 한계가 있다.

###### (2) 영상 시스템(Imaging system)

디지털, CCD(Charge coupled device) 또는 NIR(Near-infrared) 카메라를 이용하는 영상 시스템은 사물에 대한 결함 발생 위치 정보를 획득할 수 있지만 해당 지점의 성분이나 결함에 대한 정량화 및 수치화가 어려운 단점을 가지고 있다.

###### (3) 초분광 영상시스템

이런 기술에 비해 초분광 영상 시스템은 분광분석법과 영상처리 기술을 접목한 최신의 분광 영상 기술로서 측정 대상에 대한 공간(Spatial) 정보와 분광(Spectral) 정보를 동시에 획득하여 내부 정보(품질) 및 결함 정도를 측정할 수 있으며 본 연구에서는 이러한 초분광 영상 기술을 접목하여 사과의 내외부 결함을 검출하고자 하였다.

###### 나. VNIR 초분광 형광 및 반사 영상 획득 시스템(파장대역 : 403~998 nm)

사과 결함 검출을 위한 초분광 영상 시스템은 각각 2가지 시스템을 사용하였으며 먼저 파장대역이 403~998 nm인 가시광선 및 근적외선(Visible and near-infrared; VNIR) 초분광 영상 시스템을 사용하였다. VNIR 초분광 영상 시스템은 형광(Fluorescence) 램프를 적용하여 형광 스펙트럼 및 영상을 획득하여 결함 검출 실험을 진행하였다. 그림 5는 본 연구에서 사용된 VNIR 초분광 영상시스템으로서 EMCCD(Electron multiplying charge-coupled device) 카메라, 영상 분광기(Imaging spectrograph), 할로겐 램프(Halogen lamp), C 마운트 렌즈(C-mount object lens), 슬릿(Slit) 및 시료 이송대 등으로 구성되어 있다.

###### 다. SWIR 초분광 반사 영상 획득 시스템(파장대역 : 987 ~ 1701 nm)

(1) VNIR 초분광 영상 시스템은 가시광 대역과 근적외선 대역에서 시료에 대한 분광 및 영상 특성을 측정하기 때문에 가시광 파장대역에서 색상 정보에 대한 다양한 정보를 획득할 수 있는 장점이 있는 반면에 내부적인 성분과 관련된 근적외선 파장대역의 분광 특성에 대해서는 부족하였다.

(2) 따라서 본 연구에서는 사과 결함 검출을 위한 최적 파장 검출을 위해 근적외선 (Short wave infrared; SWIR) 파장대역에서 적용되는 초분광 영상 시스템도 이용하

였으며 획득되는 SWIR 파장대역은 987~1701 nm 이었다.

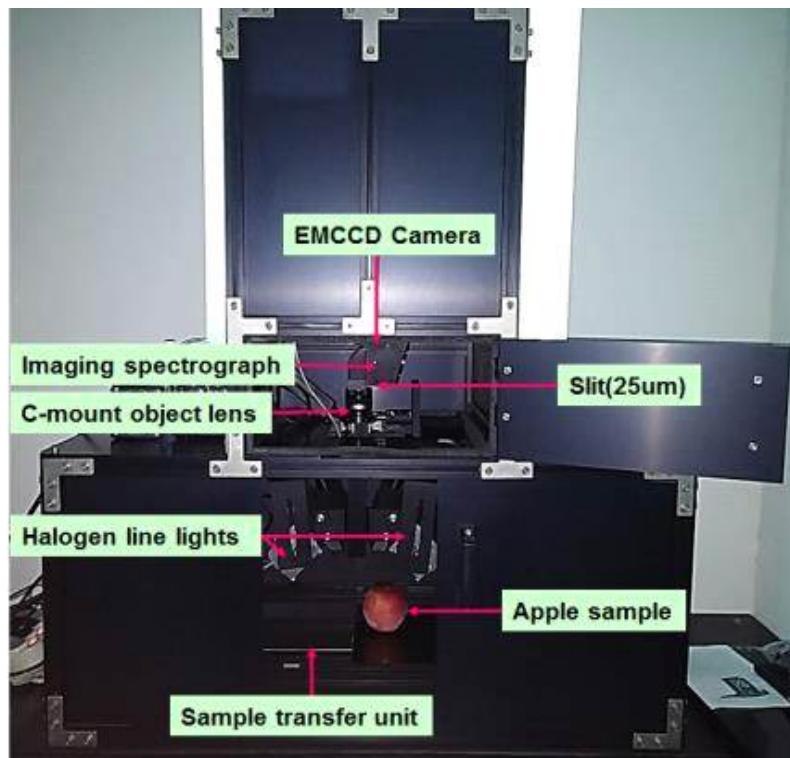


그림 6. 가시광선 및 근적외선 초분광 영상 시스템

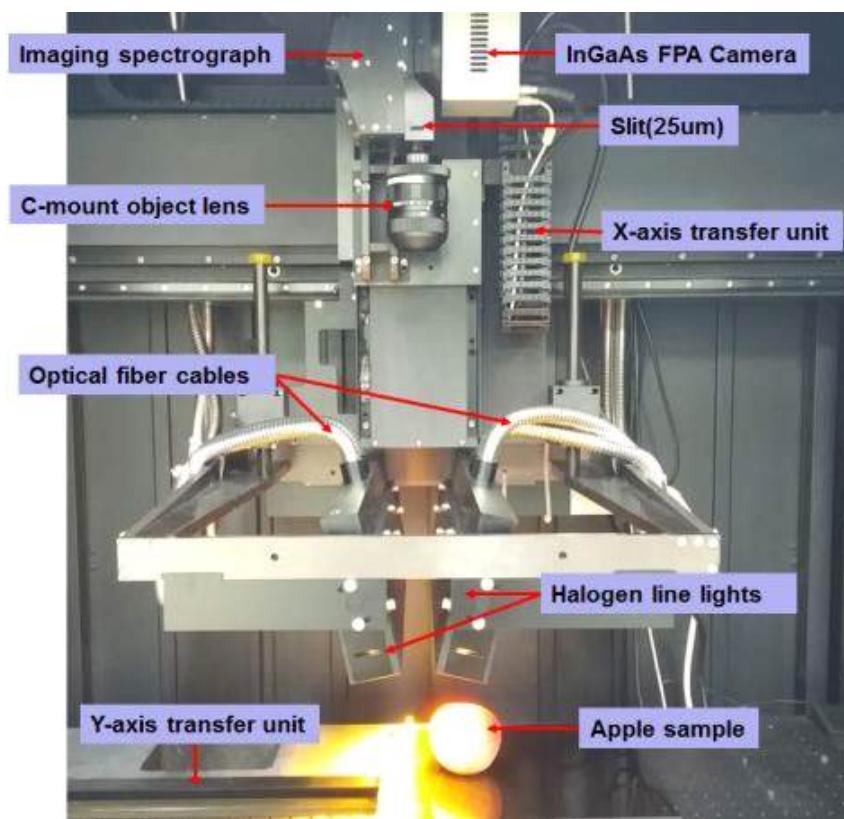


그림 6. SWIR 초분광 영상 시스템

(3) 그림 6은 SWIR 초분광 영상 시스템으로서 InGaAs FPA 카메라, 영상 분광기, C 마운트렌즈, 텅스텐-할로겐 램프, 시료 이송대, 수직축(X-axis) 및 수평축(Y-axis) 시료 이동대 등으로 구성되었다.

#### 라. 정상 및 결함 사과 시료를 이용한 초분광 분광 및 영상 측정

실험에 사용된 시료는 사과 농산물산지유통센터에서 선별된 정상 사과와 결함으로 분류된 사과를 사용하였으며 사과의 내·외부 결함의 종류로는 열파(Cracking), 병해(Scab), 찍힘(자상, 상처과; Cuts), 착색불량(잎가림, 동녹, 미착색 ; Coloring disorder), 멍(타상 ; Bruise) 등을 사용하였다. 시료의 개수는 정상 사과를 비롯하여 각 시료별로 15개씩 선별하였으며 총 90개의 사과 시료를 사용하였다.

## 2. 사과 표면 내·외부 결함 판정을 위한 요인 구명 실험

#### 가. 정상 사과의 일반 영상

그림 7은 정상으로 분류된 사과(품종 : 부사)로서 외관상 특별한 결함이 없는 시료의 일반 영상을 나열한 것이다. 총 15개의 시료를 준비하였으며 색상은 시료별로 차이가 있었지만 열파, 찍힘, 멍이나 착색불량이 심하게 발생된 사과는 없었다.

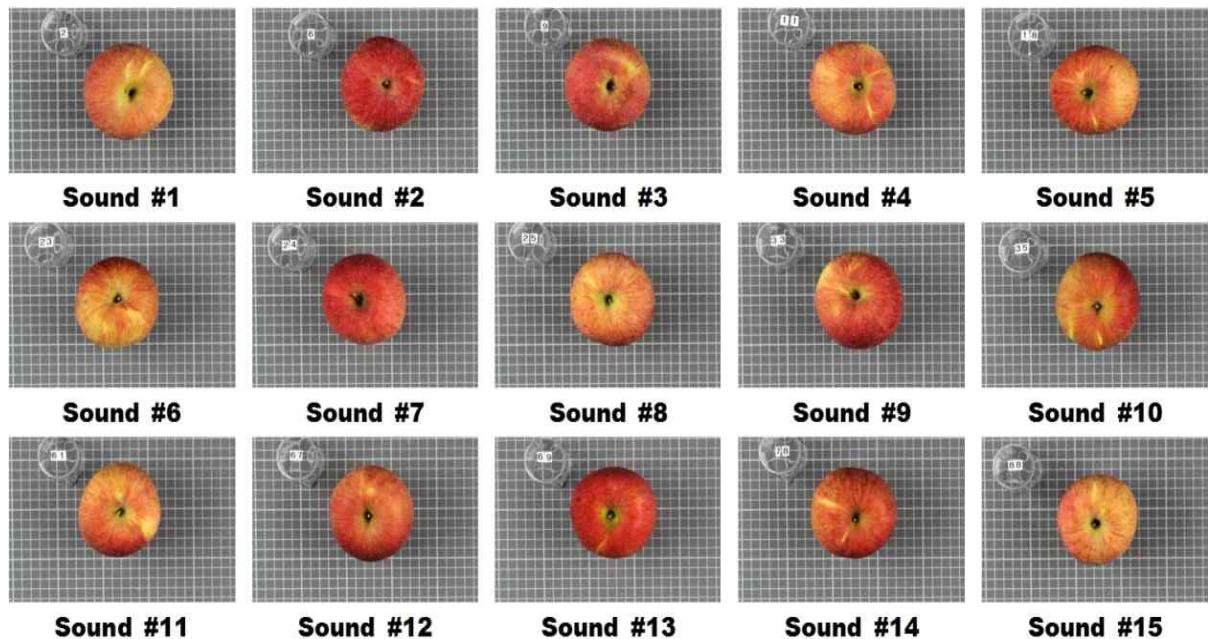


그림 7. 내·외부 결함이 발견되지 않은 정상 사과 15개

#### 나. 열파(cracking)가 발생된 결함 사과의 일반 영상

(1) 열파가 발생하는 요인은 명확하게 밝혀지지 않았지만 성숙기에 강수량과 관련되어 기인된 것으로 추측할 수 있으며 주력 품종인 부사 사과는 꼭지부분에서 열파(과경

부 열과)가 발생되고 있으며 그림 8은 열과로 분류된 15개의 결함 사과의 일반 영상을 나열한 것이다.

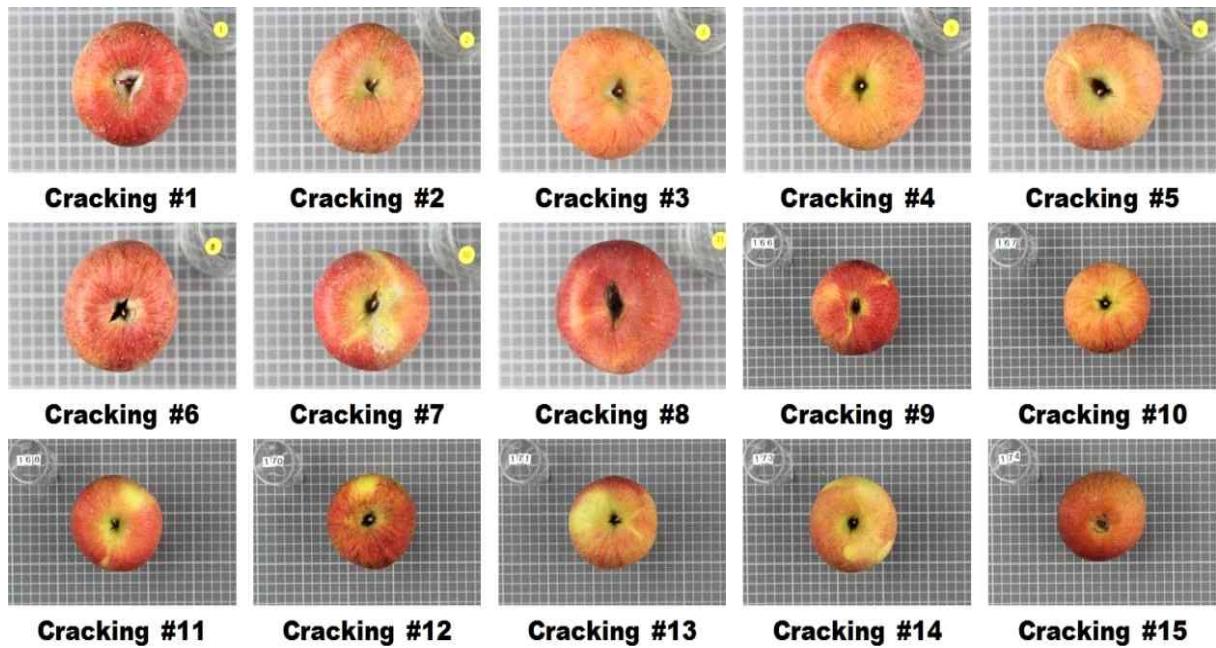


그림 8. 열과 결함으로 분류된 사과 15개



그림 9. 부사 사과의 꼭지부 열과 부위를 확대한 영상

(2) 그림 9에서와 같이 열과는 꽃받침에서 발생한 15번 시료를 제외하고는 모두 꼭지부근에서 발생했으며 그림 5에서와 같이 꼭지를 주변으로 과피가 1개 또는 2개로 갈라지는 형태였으며 열과가 심하지 않은 부위는 꼭지나 움푹 패인 꼭지 주변의 형상으로 육안으로는 구분하기가 어려웠다.

#### 다. 병해(scab)가 발생된 결함 사과

(1) 사과의 병해와 충해는 종류와 증상도 다양해지고 있으며 이중 대표적인 병해로는 고두병(Bitter bit), 붉은별무늬병(적성병, Cedar apple rust), 검은별무늬병(흑성병, Scab), 갈색무늬병(Marssonina blotch), 탄저병(Bitter rot), 열매점무늬병 등이 있으며 충해로는 사과옹애, 짐박이옹애, 사과흑진딧물 등이 있다.

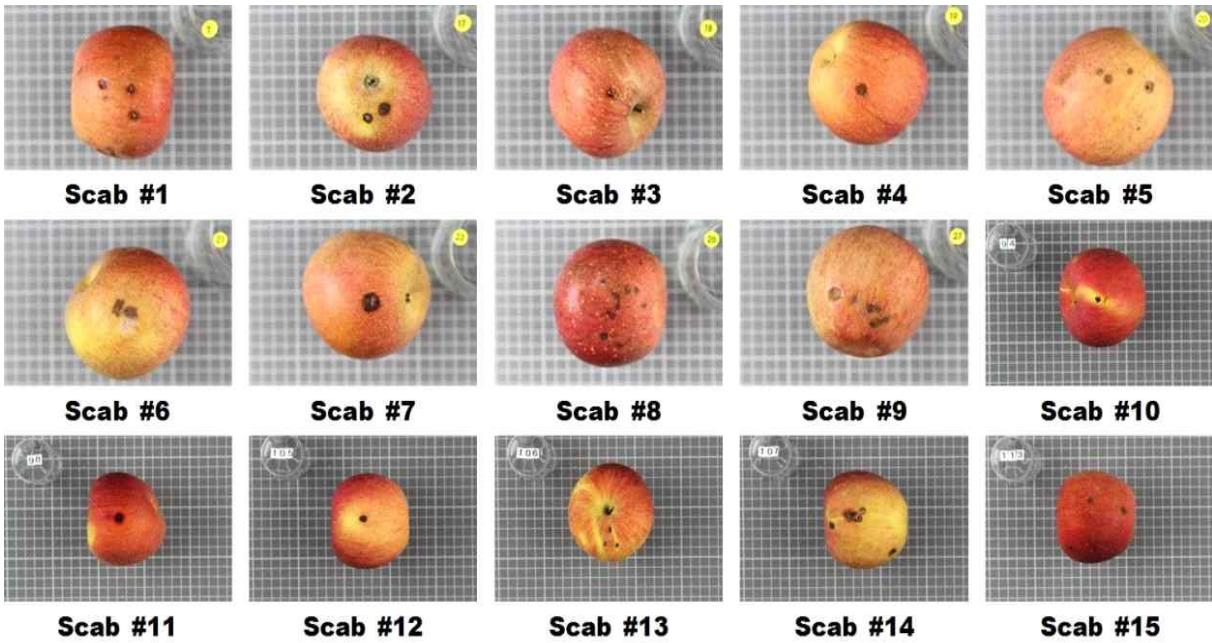


그림 10. 병해 결함으로 분류된 사과 15개



그림 11. 사과의 병해 부위를 확대한 영상

(2) 본 연구에서는 그림 10에서와 같이 반점성 장애(Scab)가 발생된 결함사과를 병해로 분류하였으며 그림 11의 영상에서와 같이 병해의 형상 및 크기가 다양했으며 발생한 부위도 상하면 및 측면을 비롯해서 다양하게 분포하고 있었다.

#### 라. 착색불량(coloring disorder)이 있는 결함 사과

- (1) 사과 과피의 착색정도는 품질을 결정하는 중요한 외관상 요인 중의 하나로서 간주되고 있으며 사과의 착색은 안토시아닌(anthocyanin)계 화합물의 합성능력에 따라 좌우된다.
- (2) 사과의 착색은 봉지재배, 웃자람 가지 제거 및 유인, 일파기와 과실 돌리기, 반사필름 피복, 수확전 시비 및 수분 관리 등으로 증진시킬 수 있으며 이러한 요건을 충족시키지 못한 경우에 착색 불량이 발생된다.

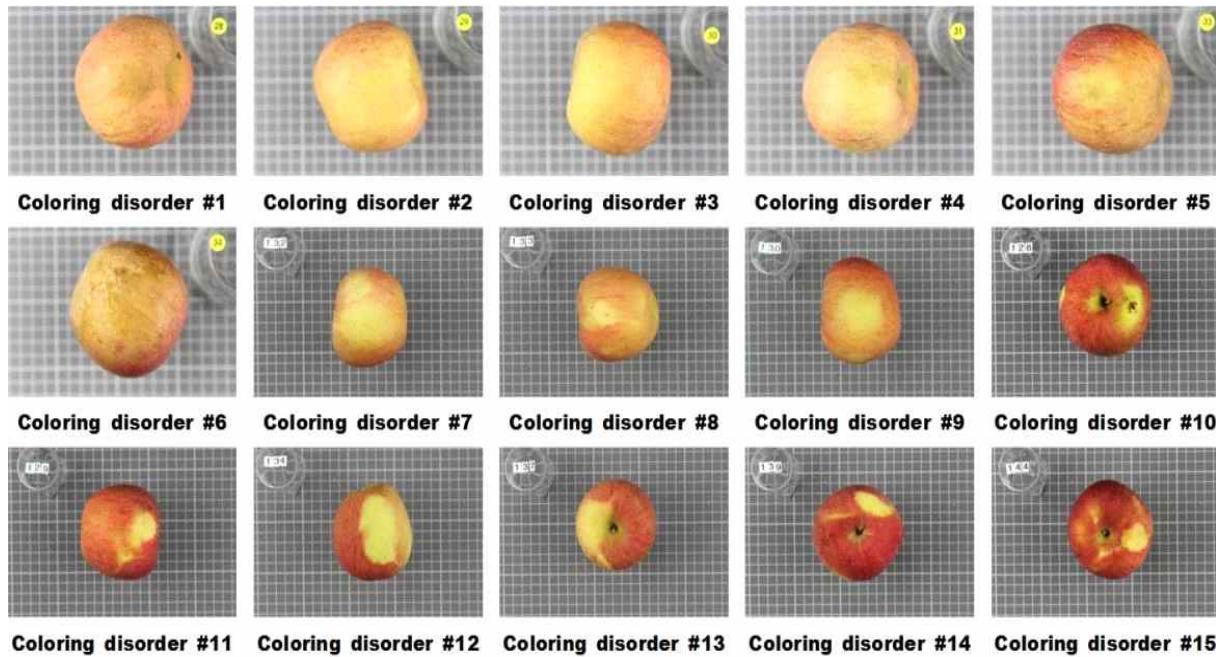


그림 12. 착색 불량으로 분류된 사과 15개

(3) 그림 13은 착색 불량으로 분류된 15개 사과 시료의 일반 영상으로서 1~8번까지의 시료는 전체적으로 붉은 색상이 부족한 미착색(동녹)의 착색 불량 시료이며 9~15번 까지의 시료는 한 부분이 붉은 색상으로 착색이 불완전하게 이루어진 잎가림 등의 현상으로 발생된 부분 미착색 시료로 볼 수 있다.



그림 13. 착색 불량 부위를 확대한 영상

(4) 본 연구에서는 미착색이 발생된 1~8번 시료를 검출하기 위한 정상 시료 기준으로 그림 3의 시료를 사용하였으며 9~10번의 부분 미착색 시료는 자체 시료의 붉은 색상 부분을 정상 부분으로 기준으로 하였다.

(5) 색상 검출에 대한 연구는 기존 칼라 영상 카메라를 이용해서 상당부분 상용화가 이루어져 있기에 초분광 영상 기술의 적용도 검토하였다.

#### 마. 상해(cuts)가 있는 결함 사과

(1) 사과의 자상(상처, 찍힘)은 외부의 물리적 요인에 의해서 발생되며 상처가 있는 과

괴된 조직 부위로 병원균이 침투하여 감염되며 부패가 쉽게 발생될 수 있어 상품성을 저하시키게 된다.

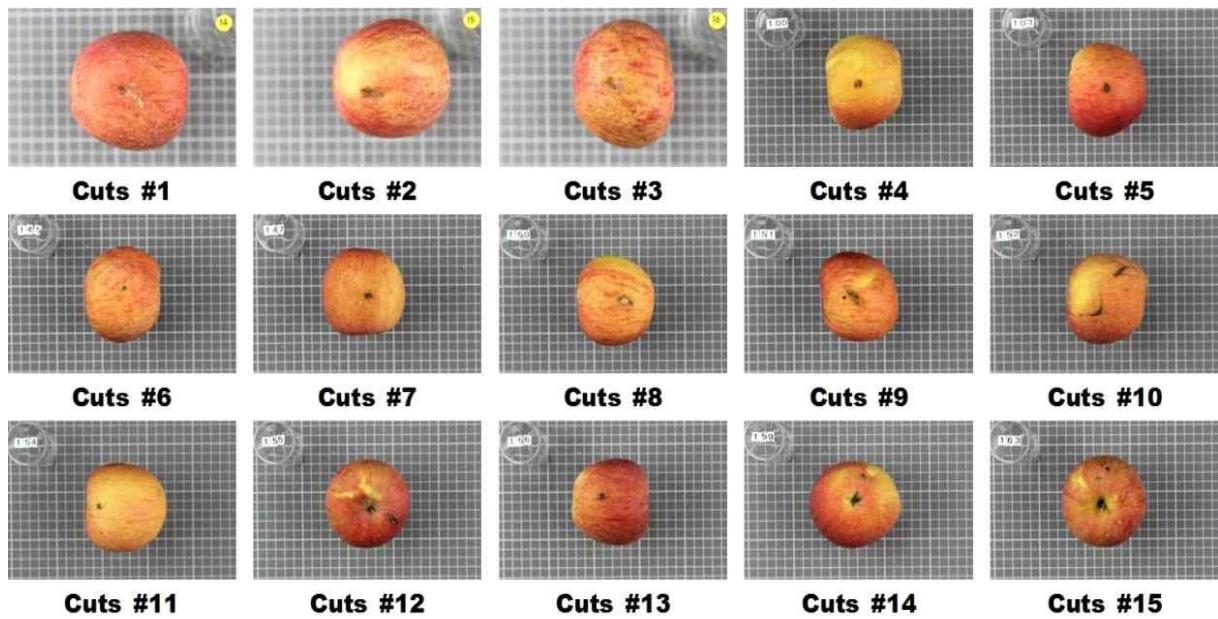


그림 14. 상처가 발생된 결합 사과 15개



그림 15. 상처가 발생된 부위를 확대한 영상

(2) 상처가 발견된 결합 사과는 그림 14에서와 같이 대부분 조직이 괴사되면서 갈색 또는 검은색으로 색상의 변이가 일어나거나 그림 15에서와 같이 껍질이 벗겨져 나가면서 과육이 건조되는 양상이 나타나기도 한다.

#### 바. 명(bruise)이 발생된 결합 사과

- (1) 명(타상)이 발생된 사과는 발생 초기에는 육안으로 판별하기가 어렵고 선별 되지 않고 장기간 저장되거나 시중에 유통되면 변색이 발생하면서 상품성을 저하시키게 된다.
- (2) 그림 16는 명이 발생되어 분류된 15개의 결합 사과의 일반 영상을 나열한 것으로서 육안으로 판별이 어려우며 명의 발생시기가 다름에 따라 보이는 영상도 다양하게 관찰되었으며 그림 17은 명이 발생된 결합 부위를 확대한 영상이다.

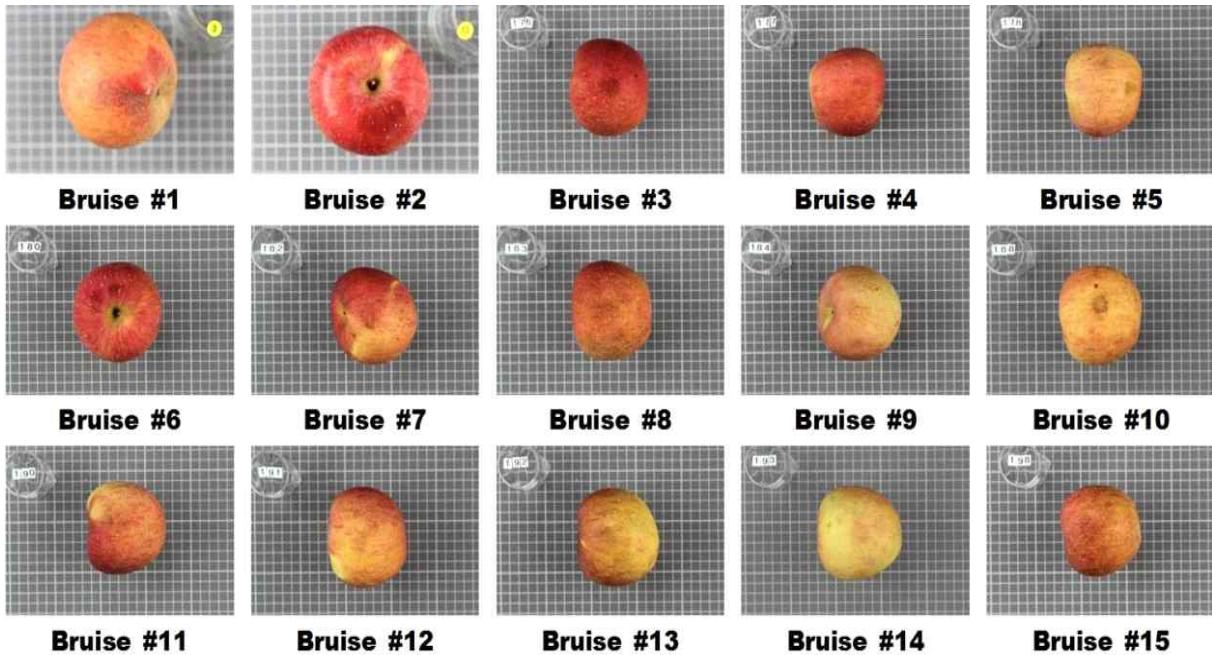


그림 16. 명이 발생된 결함 사과 15개



그림 17. 명이 발생된 결함 부위를 확대한 영상

### 3. 정상 사과와 결함 사과의 결함별 초분광 반사 스펙트럼 획득

초분광 영상 시스템을 이용하여 획득한 결함 사과의 초분광 반사 영상 및 스펙트럼에서 각 결함별로 정상 부위와 결함 부위의 반사 스펙트럼을 관찰하였으며 정상 및 결함 부위에 대한 특정 파장 대역에서의 반사도 세기(intensity) 또는 기울기(slope)에 대한 차이를 비교하여 결함 부위 판정 가능성을 검토하고자 하였다. 열과, 병해, 촉색불량, 상해, 명이 발생된 결함사과 15개에서 획득한 403~998 nm 파장대역의 VNIR 반사 스펙트럼 및 주요 파장대역에서의 초분광 영상을 관찰하였다.

#### 가. 정상 부위 및 결함 부위의 VNIR 초분광 반사 스펙트럼 및 영상

##### (1) 열과 결함에 대한 VNIR 반사 스펙트럼

(가) 그림 18은 열과가 발생된 15개의 사과 시료 중에서 정상 부위(sound), 열과 부위(cracking), 꼭지(stalk) 부위에 대한 관심영역(region of interest; ROI)의 반사 스펙트럼과 스펙트럼이 획득된 사과 부위에 대한 위치를 표시한 것이다.

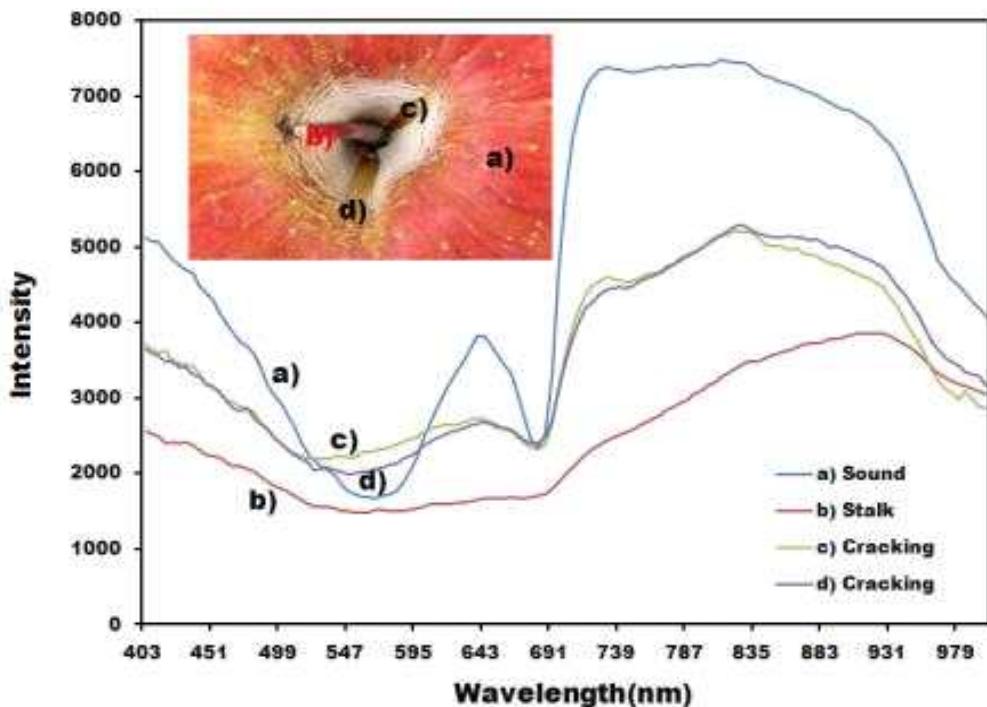


그림 18. 열과 및 정상 부위의 VNIR 초분광 반사 스펙트럼 비교(1번 시료)

열과가 발견된 1번 시료에 대한 VNIR 반사 스펙트럼은 꼭지 주변으로 2개의 열과가 발생되었으며 정상 부위(a)의 스펙트럼은 565 nm 대역에서 반사도가 가장 낮았으며 730~820 nm 대역에서 반사도가 가장 높은 것으로 관찰되었다. 또한 2 개의 열과 부위(c, d)에 대한 반사 스펙트럼에서는 유사한 반사도를 보여주고 있으며 꼭지 부위(d)는 다른 부위와 비교해서 반사도가 낮게 측정되어 빛의 흡수가 많이 일어난 것을 알 수 있었음. 추후 열과 판정에 있어서 기존에 있는 꼭지 부분과의 구분을 위해서 열과와 꼭지에 대한 구명이 명확히 이루어져야 할 것으로 판단되었다.

(나) 그림 19는 열과가 발생된 2번 시료에 대한 반사 스펙트럼으로서 1번 시료와 유사하게 파장 대역별로 반사도의 증감이 발생하였으며 다만 정상부위의 반사 스펙트럼이 높게 측정된 것으로 나타났으며 이는 색상 정보에 영향을 받는 가시광선 파장대역에서는 사과 시료별로 색상 차이가 조사되는 광의 반사 및 흡수 정도의 차이에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

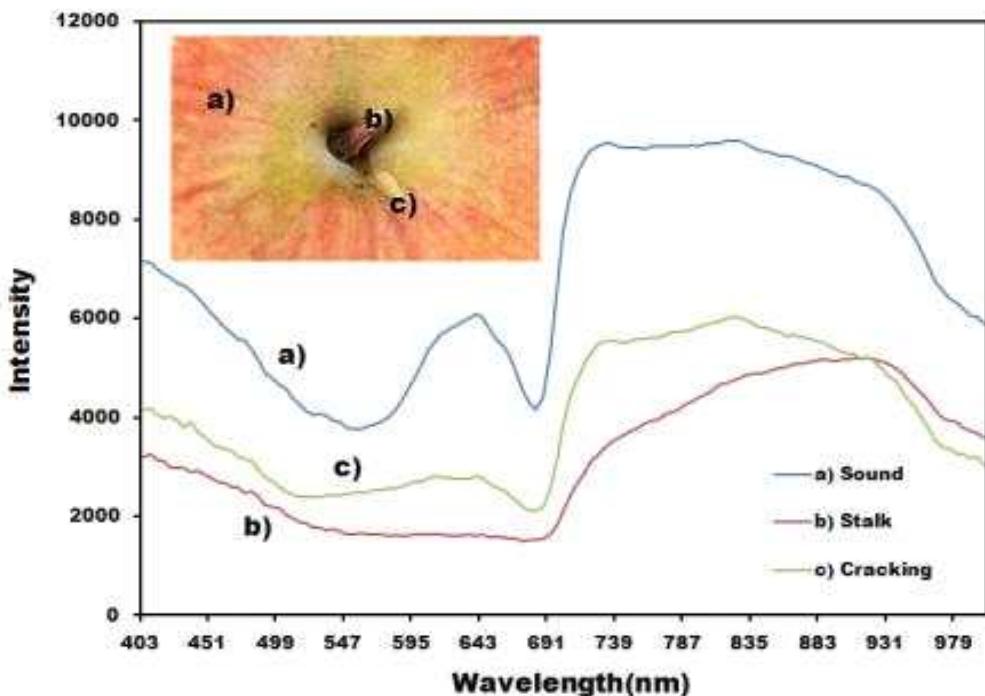


그림 19. 열과 및 정상 부위의 VNIR 초분광 반사 스펙트럼 비교(2번 시료)

(다) 그림 20은 꽃받침(Calyx) 부위에 열과가 발생된 결함 사과의 VNIR 반사 스펙트럼으로서 꽃받침 부위의 반사 스펙트럼이 열과 부위의 반사 스펙트럼보다 반사도의 세기가 전체적으로 낮게 측정되었으며 열과 부위의 반사 스펙트럼은 690 nm 파장대역 이후로 반사도의 기울기 값이 증가하다가 935 nm 파장대역 이후로 감소되는 양상을 나타내었다.

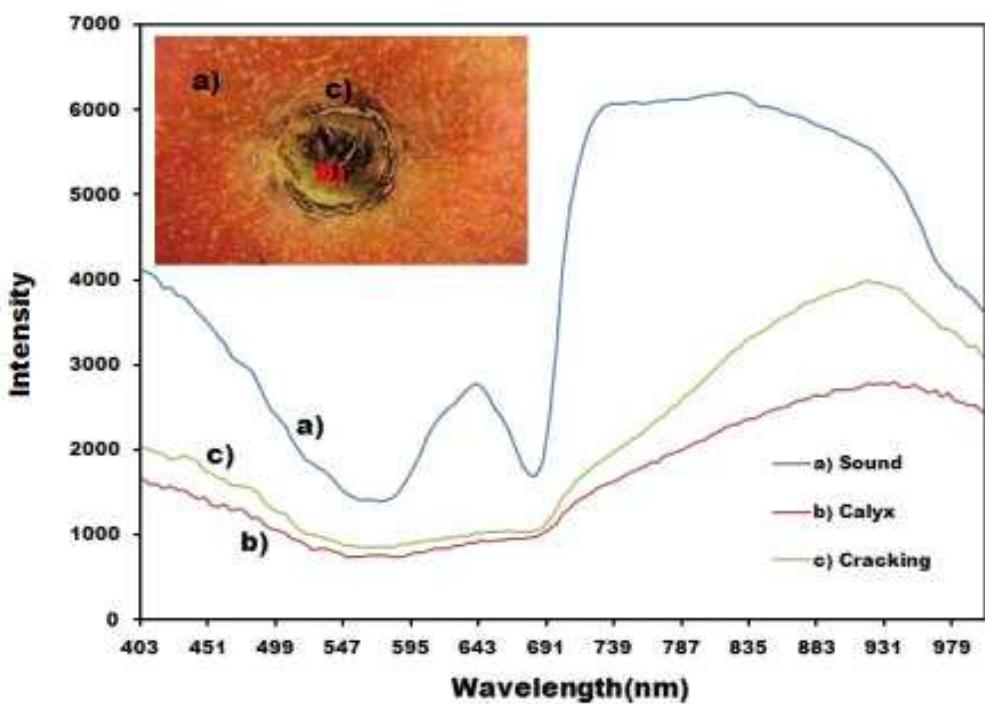


그림 20. 열과 및 정상 부위의 VNIR 초분광 반사 스펙트럼 비교(15번 시료)

## (2) 병해 결함에 대한 VNIR 반사 스펙트럼

(가) 그림 21은 반점성 병해가 발생된 15개의 사과 시료 중에서 5번째 시료에 대한 병해 발생 부위(b, c, d)와 정상 부위(a)의 VNIR 초분광 반사 스펙트럼을 비교한 것으로서 열과 결함의 정상 및 결함 부위의 반사 스펙트럼과 유사한 반사도를 보여주었다.

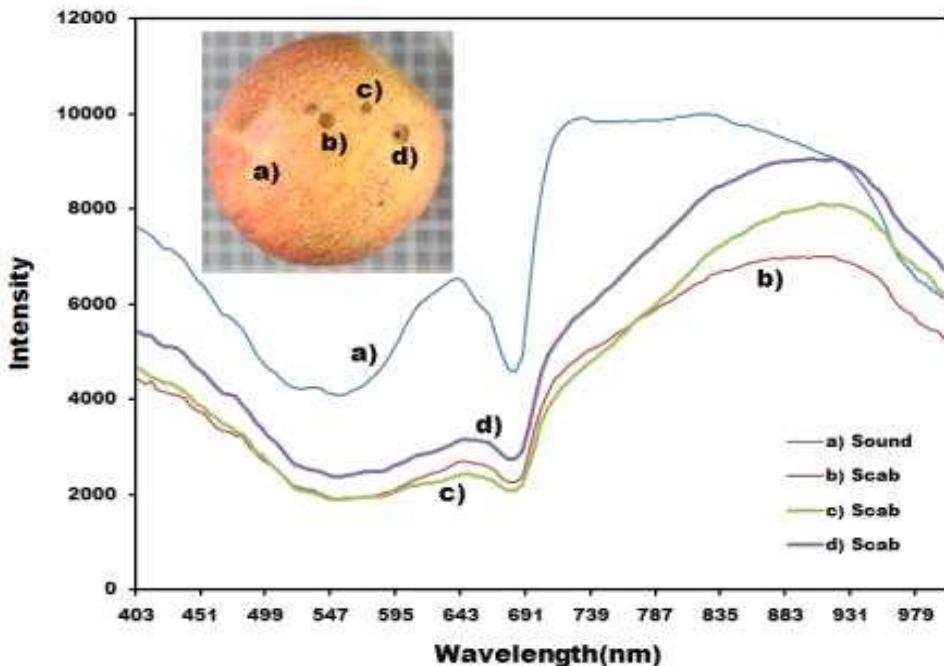


그림 21. 병해 및 정상 부위의 VNIR 초분광 반사 스펙트럼 비교(5번 시료)

(나) 병해 결함 부위의 VNIR 반사 스펙트럼은 643 nm 및 910 nm 파장 대역에서 상승 피크가 나타났으며 691 nm 파장대역에서는 하향 피크가 관찰되었으며 전체적으로 정상 부위의 스펙트럼과 비교할 때 반사도의 세기가 낮게 측정되었다.

## (3) 착색 불량 결함에 대한 VNIR 반사 스펙트럼

(가) 그림 22는 착색 불량으로 분류된 15개의 시료 중에서 부분 미착색이 발견된 12번째 시료에 대한 VNIR 반사 스펙트럼으로서 부분 미착색 부위에 대한 VNIR 반사 스펙트럼은 500 nm 및 690 nm 파장 대역에서 하향 피크를 나타냈었다.

(나) 색상 정보를 포함하고 있는 가시광선 파장 대역에서 미착색 부위의 황록색(Yellow-green)은 VNIR 반사 스펙트럼에서 550~580 nm 파장대역에 해당되며 붉은 색상의 정상 부위의 반사 스펙트럼과는 기울기 및 피크 성향이 다르게 반응하는 것을 관찰할 수 있었으며 그림 23의 13번 시료에서도 유사한 반사 스펙트럼 양상이 관찰되었다.

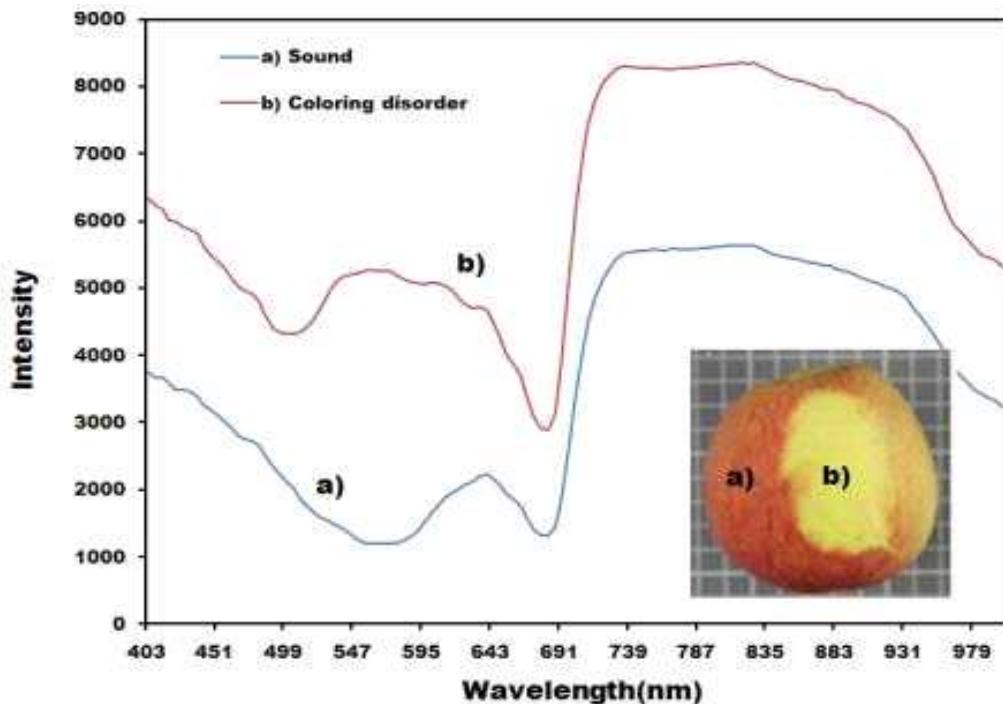


그림 22. 착색이상 및 정상 부위의 VNIR 초분광 반사 스펙트럼 비교(12번 시료)

#### (4) 상처 결함이 발생한 사과시료의 VNIR 반사 스펙트럼

- (가) 그림 24은 사과 표면위에 상처가 발생된 2번 시료에서 상처 부위와 정상 부위의 VNIR 반사 스펙트럼을 비교한 것으로서 643 nm 파장 대역에서 반사도가 증가하는 정상 부위와는 다르게 상처 부위의 반사도는 403~547 nm 파장 대역까지 감소하다가 691 nm 파장대역에서 증가하는 양상을 보여주고 있다.
- (나) 정상 부위의 반사 스펙트럼은 전체 파장 대역에서 상처 부위의 반사 스펙트럼보다 반사도의 세기가 높았으며 955 nm 파장 대역에서는 두 부위가 서로 교차하면서 반사도의 세기가 변경됨을 관찰할 수 있었다.

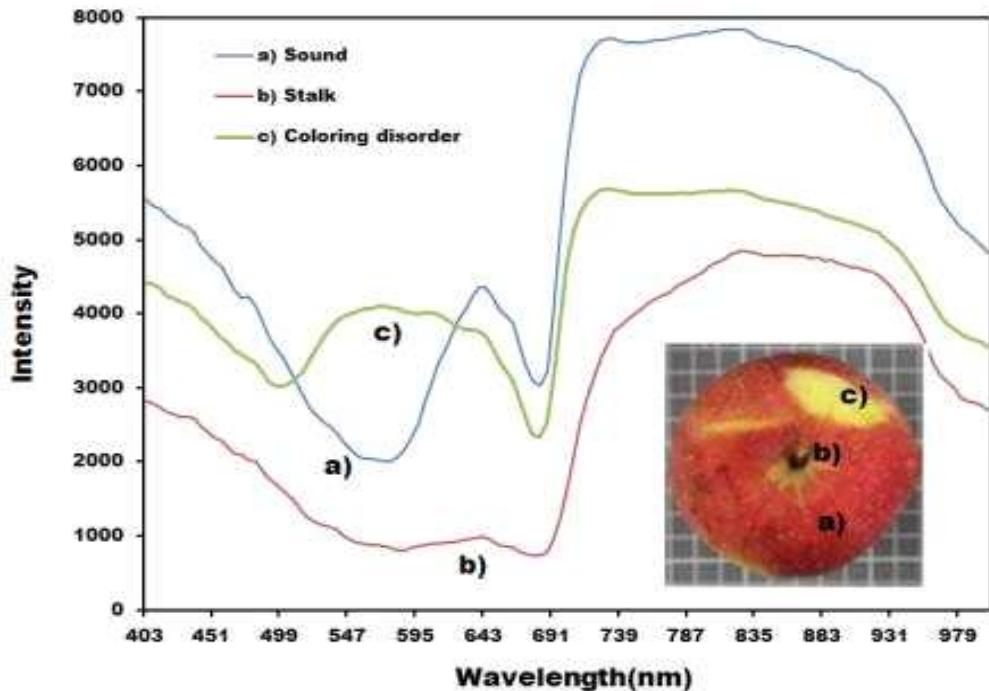


그림 23. 착색이상 및 정상 부위의 VNIR 초분광 반사 스펙트럼 비교(13번 시료)

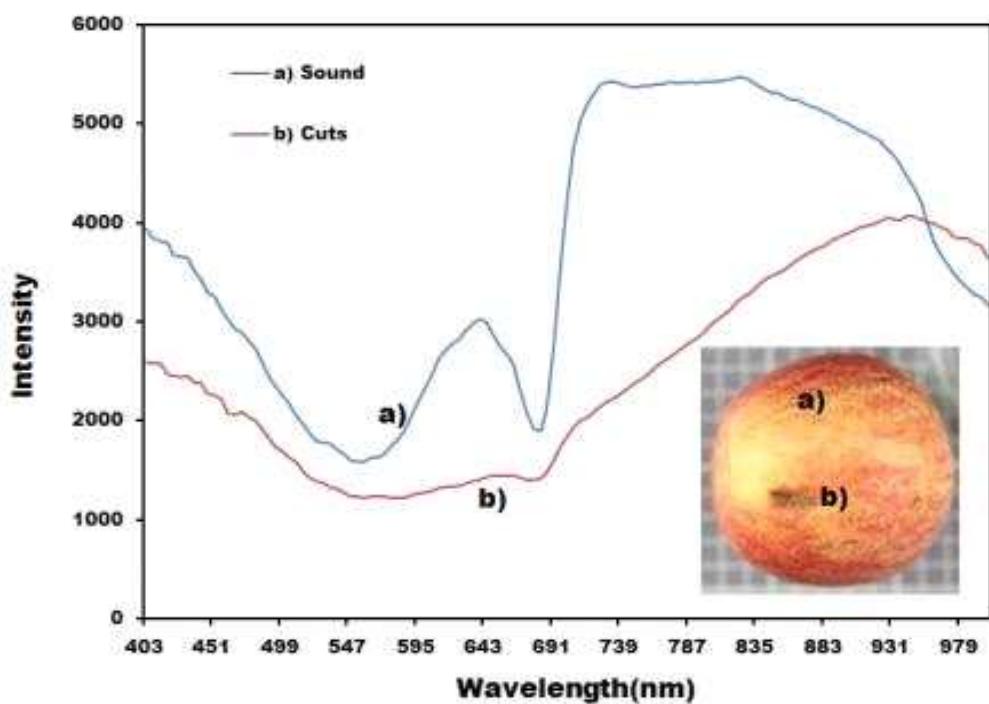


그림 24. 상처 및 정상 부위의 VNIR 초분광 반사 스펙트럼 비교(2번 시료)

##### (5) 명 결합에 대한 VNIR 반사 스펙트럼

(가) 그림 25은 명이 발생된 결합 사과 15개 중에서 4번째 시료에 대한 명 부위와 정상 부위의 VNIR 반사 스펙트럼을 비교한 것으로서 명 부위의 반사 스펙트럼이 정상 부위의 반사 스펙트럼보다 전체 파장에 걸쳐 반사도가 높게 측정되었다.

(나) 정상 부위의 스펙트럼이 740 nm 파장 대역이후로 반사도의 세기가 감소하는 양상을 보이는 반면에 명이 발생된 부위에서의 반사 스펙트럼은 740 nm이후로 증가하다가 830 nm 파장대역에서 다시 감소하는 경향을 보여주었다.

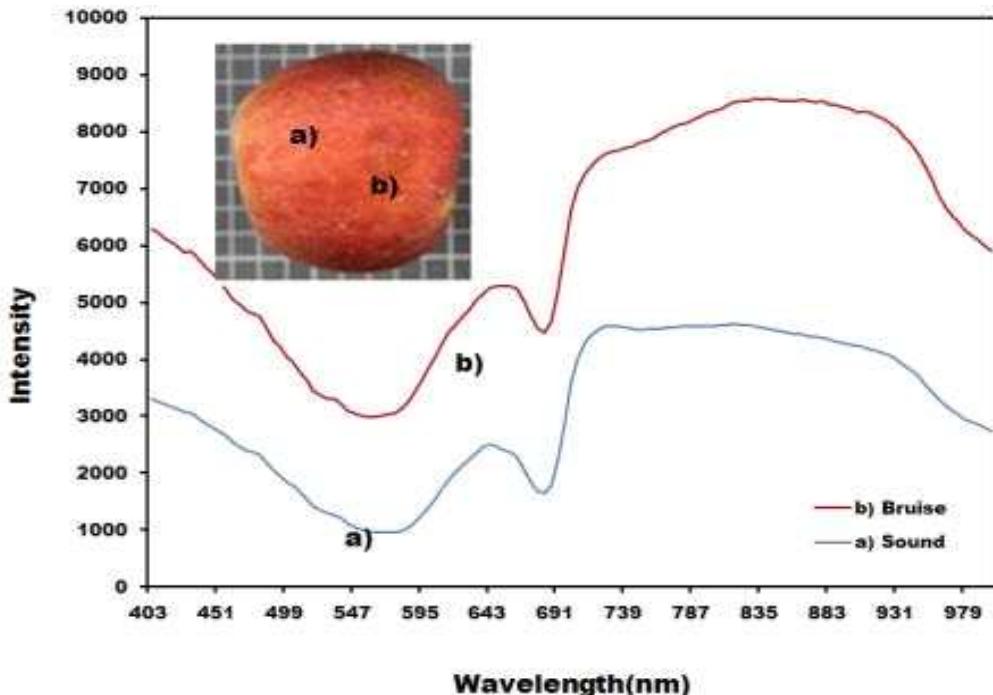


그림 25. 명 및 정상 부위의 VNIR 초분광 반사 스펙트럼 비교(4번 시료)

#### 나. 정상 부위 및 결함 부위의 SWIR 초분광 반사 스펙트럼 및 영상

열과, 병해, 착색불량, 상해, 명이 있는 결함사과 15개에서 획득한 987~1701 nm 파장대역의 SWIR 반사 스펙트럼 및 주요 파장대역에서의 초분광 영상에 대한 분광 특성을 구명하고자 하였다.

##### (1) 열과 결함에 대한 SWIR 반사 스펙트럼

(가) 그림 26는 열과가 발생된 15개 시료 중에서 4번 시료의 정상부위(a), 꼭지 부위(b), 열과 부위(c, d)에 대한 SWIR 반사 스펙트럼을 서로 비교한 것으로서 각기 다른 부위에 대한 반사 스펙트럼은 유사한 패턴이었다.

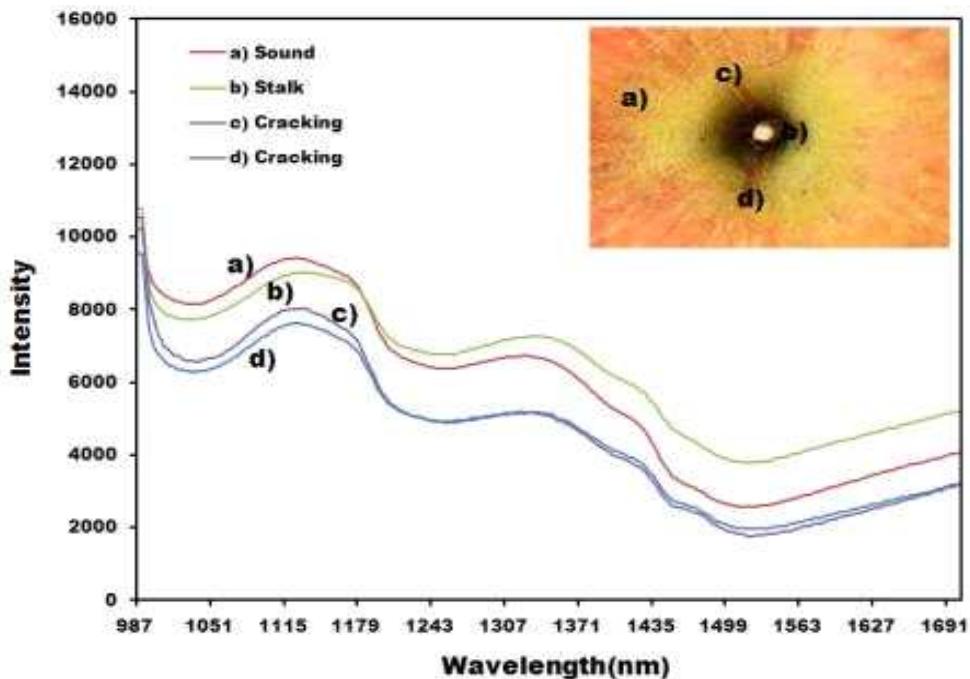


그림 26. 열과 및 정상 부위의 SWIR 초분광 반사 스펙트럼 비교(4번 시료)

(나) 색상 정보를 포함하고 있는 VNIR 파장대역에서의 반사 스펙트럼과 달리 흡수 되거나 반사되는 시료의 내부 품질 정보를 포함하는 SWIR 반사 스펙트럼의 반사도 세기는 그림 26에서와 같이 3종류의 부위에 대해서 유사한 패턴을 보여주고 있으며 단순히 반사 스펙트럼의 특정 파장대역의 피크로 결함을 유추하기에는 한계가 있는 것으로 판단되었다.

## (2) 병해 결함에 대한 SWIR 반사 스펙트럼

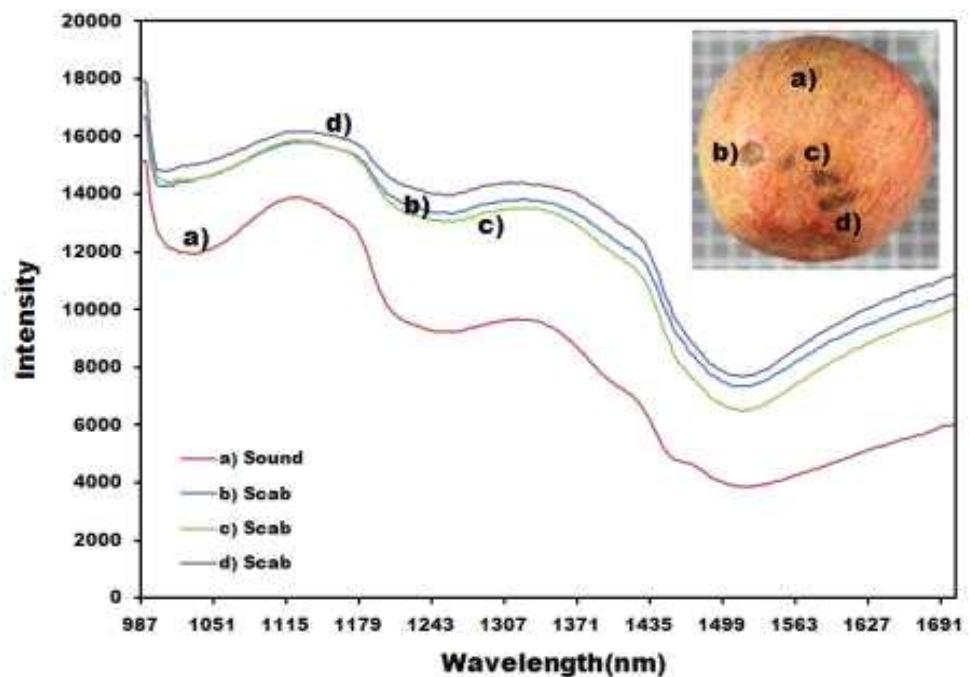


그림 27. 병해 및 정상 부위의 SWIR 초분광 반사 스펙트럼 비교(9번 시료)

그림 27은 반점성 병해가 발생된 15개의 시료 중에서 9번째 시료에 대한 병해 발생 부위(b, c, d)와 정상 부위(a)에 대한 SWIR 반사 스펙트럼을 비교한 것으로서 정상과 병해 발생 부위가 전체 파장대역에서 유사한 반사도의 세기였다.

### (3) 착색 불량 결합에 대한 SWIR 반사 스펙트럼

그림 28는 착색 불량이 발견된 15개의 시료 중에서 부분 미착색으로 분류된 11번째 사과 시료의 미착색 부위(b)와 정상 부위(a)의 반사 스펙트럼을 비교한 것으로서 색상정보를 포함하고 있지 않은 SWIR 파장 대역에서는 결합 및 정상 부위의 반사 스펙트럼이 동일한 패턴이었다.

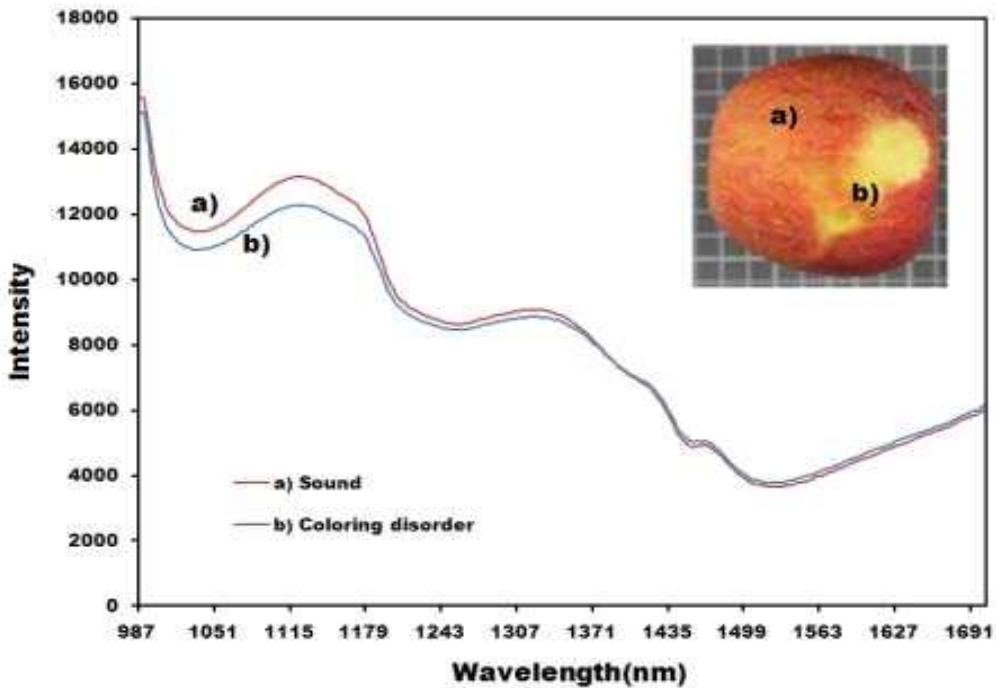


그림 28. 착색이상 및 정상 부위의 SWIR 초분광 반사 스펙트럼 비교(11번 시료)

### (4) 상처 결합에 대한 SWIR 반사 스펙트럼

(가) 그림 29는 상처가 발견된 사과 결합 시료 15개 중에서 5번 시료에 대한 상처 부위(b)와 정상 부위(a)에 대한 SWIR 반사 스펙트럼을 비교한 것으로서 정상 부위의 반사 스펙트럼이 후반부 파장으로 진행할수록 반사도가 감소하는 것과 다르게 상처 부위의 반사 스펙트럼은 1030 nm 파장대역에서 급격히 반사 스펙트럼이 감소한 후 1430 nm까지 큰 변화 없이 진행되는 양상을 보여주고 있었다.

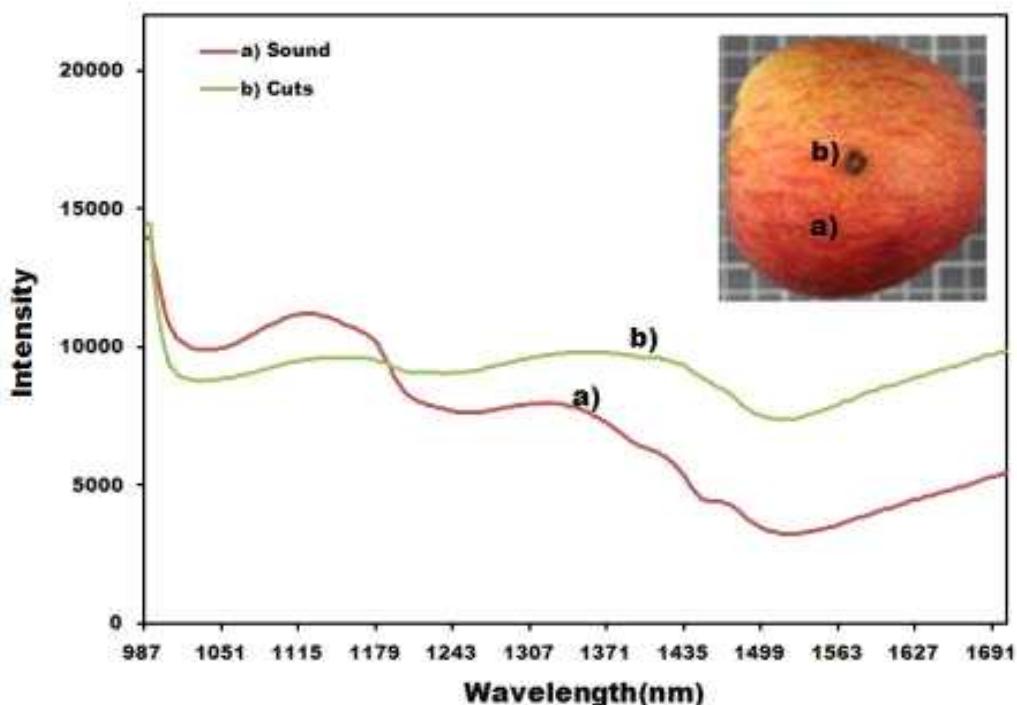


그림 29. 상처 및 정상 부위의 SWIR 초분광 반사 스펙트럼 비교(5번 시료)

(나) 상처 부위 및 결함 부위의 반사 스펙트럼은 1192 nm 대역에서 교차되며 상처 부위의 스펙트럼은 1509 nm 대역에서 반사도의 세기가 최소로 측정되었으며 정사 부위의 반사 스펙트럼 역시 동일한 파장 대역에서 가장 낮은 반사도를 나타내고 있었다.

#### (5) 명 결함에 대한 SWIR 반사 스펙트럼

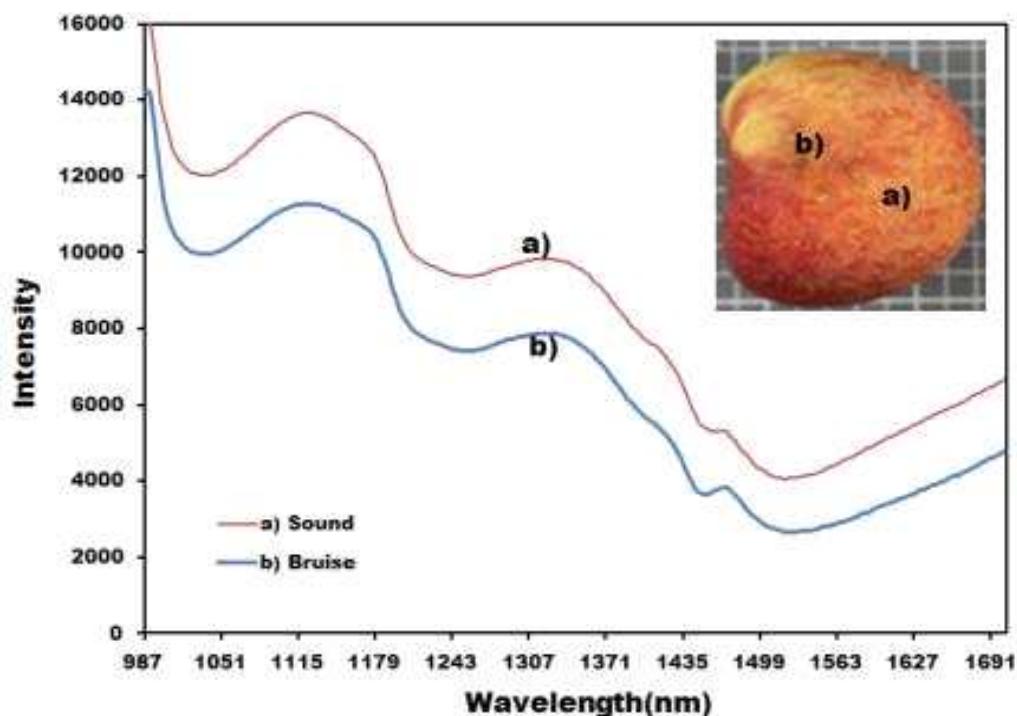


그림 30. 명 및 정상 부위의 SWIR 초분광 반사 스펙트럼 비교(8번 시료)

그림 30은 명(타상)이 발견된 15개 사과 시료 중에서 8번 시료에 대한 명 부위(b)와 정상 부위(a)에 대한 SWIR 반사 스펙트럼을 비교한 것으로서 두 스펙트럼은 서로 유사한 반사도의 세기를 보여주고 있으며 단순히 스펙트럼의 세기로 명에 대한 결함을 유추하기에는 한계가 있었다.

## 제2절 결합 유형별 분광 특성 구명 및 적정 파장 대역 선발

### 가. 결합 부위의 VNIR 초분광 반사 분광 및 초분광 영상 특성

#### (1) VNIR 파장 대역에서의 열과 결합에 대한 분광 및 초분광 영상 특성

(가) 그림 31은 열과 결합(1번 시료)에 대한 VNIR 파장 대역에서의 초분광 영상을 나타낸 것으로서 정상과 열과의 반사 스펙트럼에 대해서 2개의 스펙트럼이 교차되거나 반사도 세기가 차이를 보이는 파장대역에 대한 초분광 영상을 추출하였다.

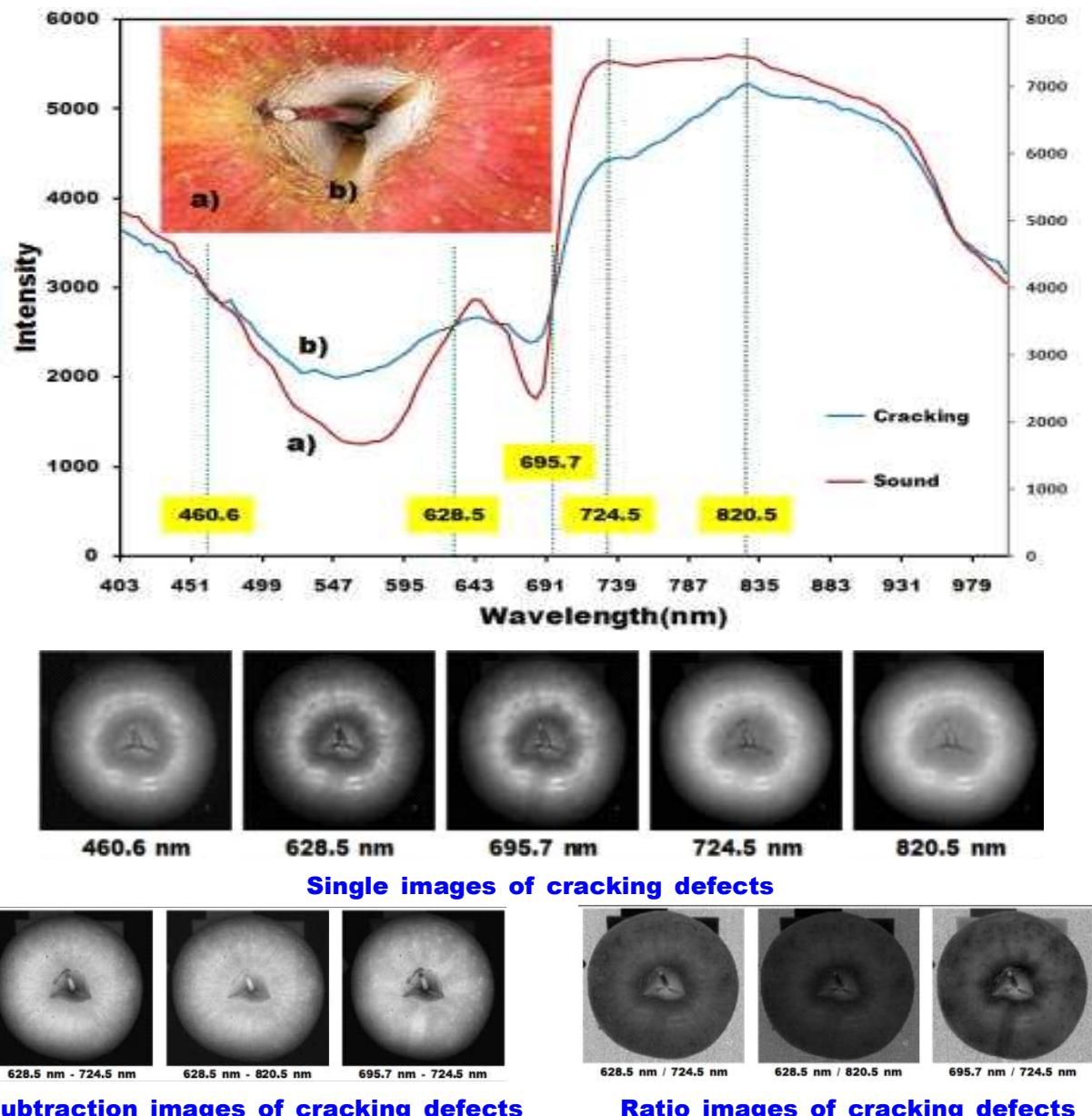


그림 31. 열과 결합에 대한 VNIR 초분광 반사 분광 특성 및 영상(1번 시료)

(나) 추출된 초분광 영상은 각각 460.6, 628.5, 695.7, 724.5, 820.5 nm의 단일 파장이었으며 5개의 파장에 대한 차(Subtraction) 영상(628.5 - 724.5 nm, 628.5 - 820.5

nm, 695.7 - 724.5 nm)과 비(Ratio) 영상(628.5/724.5 nm, 628.5/820.5 nm, 695.7/724.5 nm)에 대한 초분광 영상을 보여주고 있다.

(다) 각각의 초분광 영상에서와 같이 단일 밴드에서 획득한 초분광 영상에 대한 차 영상과 비영상에서 검출하고자 하는 열과 결합 부위의 명암(Gray level)이 변화되는 것을 관찰할 수 있으며 결합 유형별로 반응하는 특정 파장 대역을 초분광 영상으로 확인할 수 있었다.

## (2) VNIR 파장 대역에서의 병해 결함에 대한 분광 및 초분광 영상 특성

(가) 그림 32은 병해 결함이 발생된 사과에 대한 5개의 단일 파장 초분광 영상과 단일 파장을 서로 조합하여 차 영상 및 비영상을 나타낸 것으로서 밴드 조합에 의해서 결합 부위의 명암이 변화되는 것을 확인할 수 있었다.

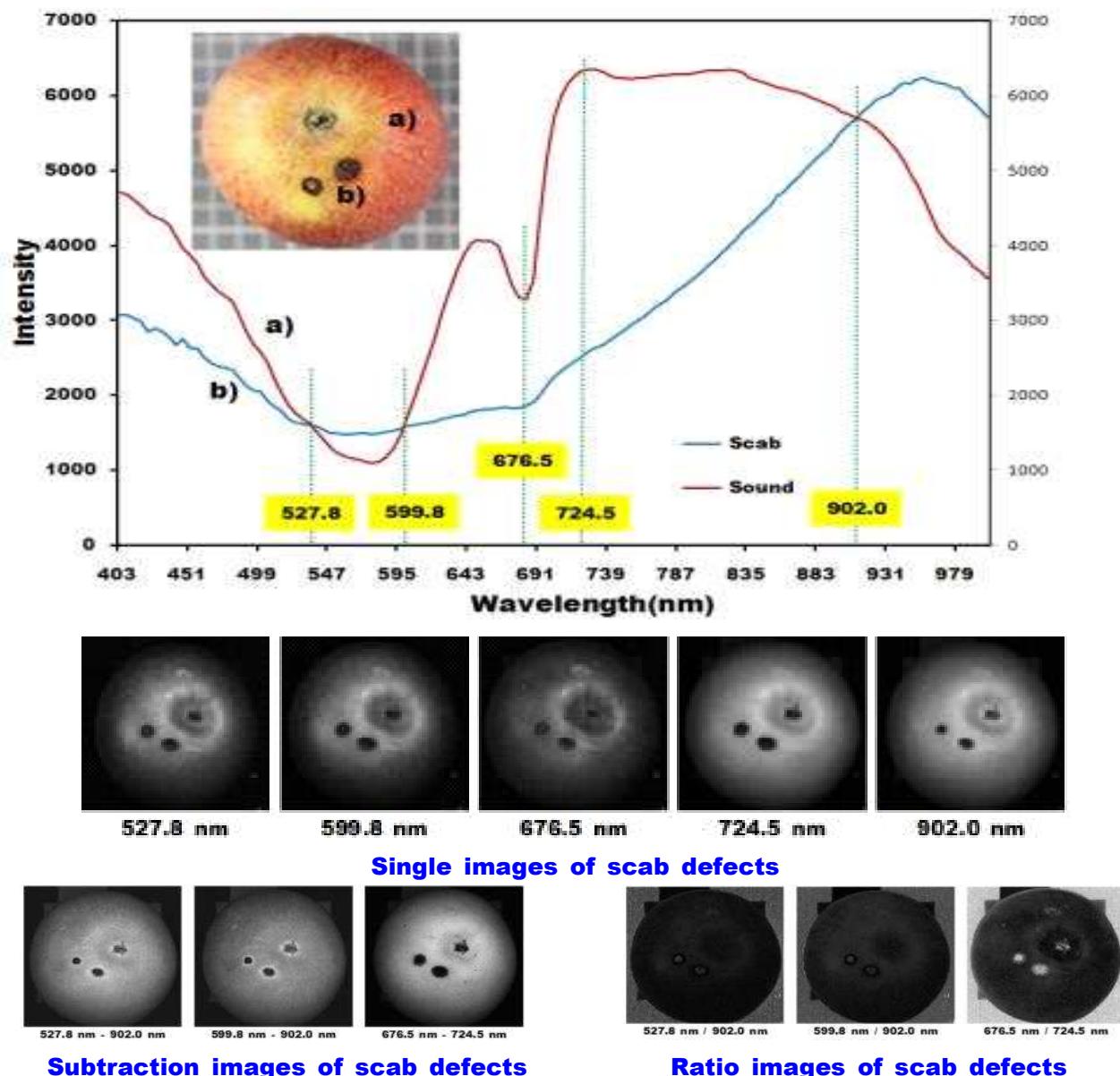


그림 32. 병해 결함에 대한 VNIR 초분광 반사 분광 특성 및 영상(2번 시료)

(나) 3개의 차 영상 중에서 676.5-724.5 nm에서 결함 부위가 더 어둡게 표현되었으며 3 개의 비 영상에서도 676.5/724.5 nm가 더 밝은 영상으로 표현되어 병해 결함 검출에 있어서 유용한 것으로 판단되었다.

(3) VNIR 파장 대역에서의 착색 불량 결함에 대한 분광 및 초분광 영상 특성

그림 33은 착색 불량이 발생된 사과 시료의 5개의 단일 파장 VNIR 초분광 영상 및 이 영상들을 조합하여 차 영상 및 비 영상을 구한 초분광 영상을 보여주고 있으며 특정 밴드(499.0, 566.2 nm) 또는 밴드 조합에 따라 미착색 부위가 용이하게 검출되었다.

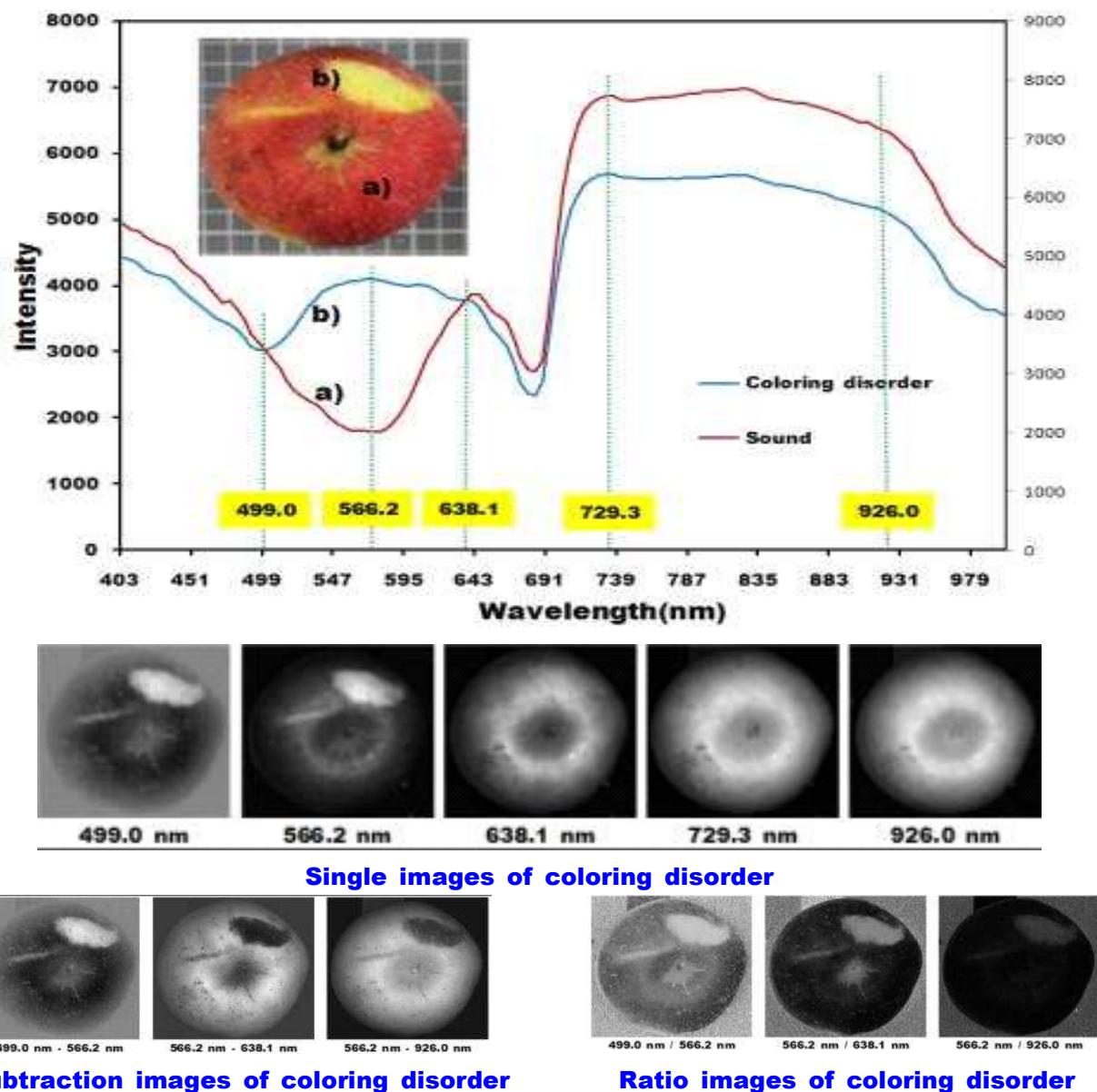


그림 33. 착색 불량에 대한 VNIR 초분광 반사 분광 특성 및 영상(14번 시료)

(4) VNIR 파장 대역에서의 상처 결함에 대한 분광 및 초분광 영상 특성

- (가) 상처가 발생된 사과 시료에 대한 VNIR 초분광 영상들도 단일 파장의 초분광 영상과 이들 영상을 차 또는 비 조합에 따라서 상처 부위의 영상이 각각 다른 정도로써 표현되었으며 결함이 용이하게 검출되었다.
- (나) 전체 차 영상 중에서는 724.5 nm - 902.0 nm의 차 연산에서 상처 부위가 다른 정상 부위보다 밝게 표현되었으며 동일한 두 파장의 비 연산에서는 상처 부위가 다른 정상 부위보다 어둡게 나타나는 특징을 보여주었다.
- (다) 추후 사과의 전표면 결함 검출을 위한 파장 선택시에 이러한 차 또는 비연산의 특징을 이용하여 이치화 영상을 구현한다면 결함 검출을 용이하게 수행할 것으로 판단되었다.

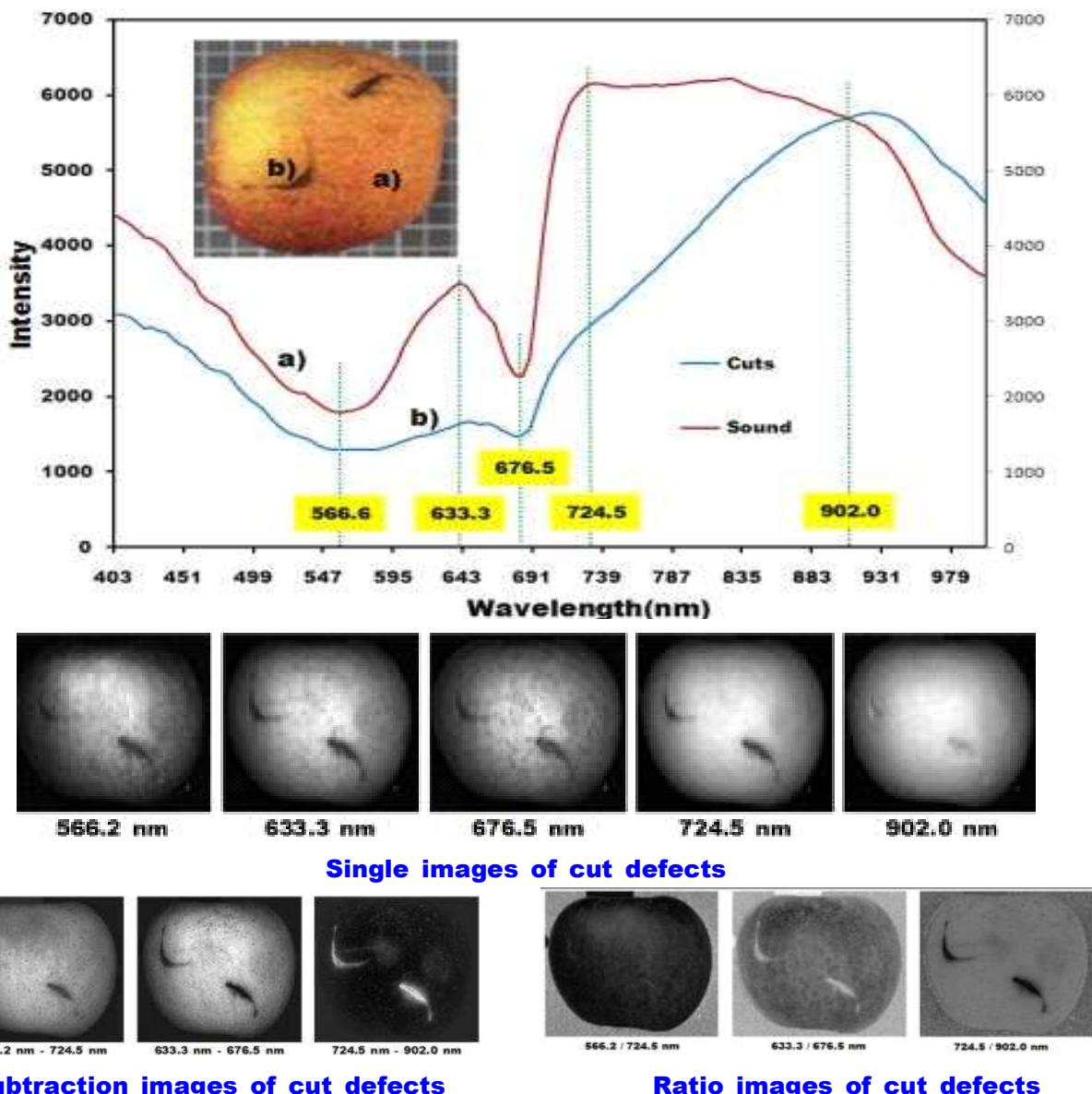


그림 33. 상처 결함에 대한 VNIR 초분광 반사 분광 특성 및 영상(10번 시료)

(5) VNIR 파장 대역에서의 명 결함에 대한 분광 및 초분광 영상 특성

(가) 그림 34에서와 같이 명 결함이 발견된 시료에 대한 VNIR 초분광 영상에서는 육안 및 단일 파장의 초분광 영상으로는 검출이 용이하지 않은 명 부위가 차 영상 ( $724.5 - 825.3$  nm) 및 비 영상( $575.8/724.5$  nm)에서 검출되는 것을 확인되었다.

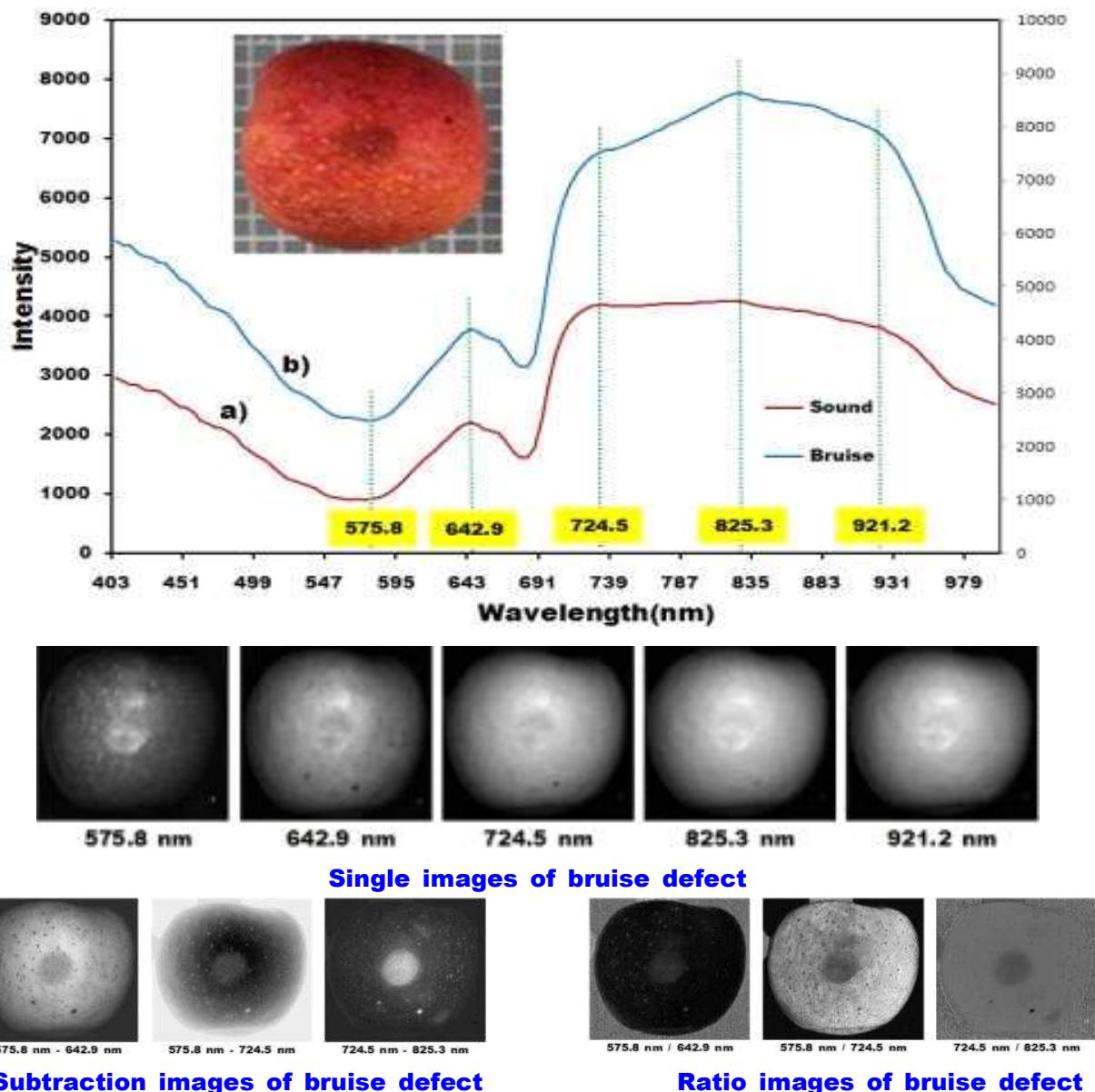


그림 34. 명 결함에 대한 VNIR 초분광 반사 분광 특성 및 영상(10번 시료)

나. 결함 부위의 SWIR 초분광 반사 분광 및 초분광 영상 특성

(1) SWIR 파장 대역에서의 열과 결함에 대한 분광 및 초분광 영상 특성

(가) 그림 35는 열과 결함이 발생된 1번 시료의 SWIR 초분광 영상을 나열한 것으로서 5개의 주요 파장대역에 해당되는 단일 파장 초분광 영상을 비롯하여 2개의 파장들에 대한 차 영상 및 비 영상에 대한 초분광 영상을 나타내었다.

(나) 추출된 SWIR 초분광 영상은 1121.8, 1173.0, 1256.2, 1435.4, 1512.2 nm 파장대역이었으며 비 영상 1435.4/1512.2 nm에서 열과 부위가 과육부분과 구분이 되었지만 꽃지 부분과는 혼동이 될 우려가 있기에 추후 분석 기법을 적용하여 열과만 검출할 수 있는 알고리즘 개발이 필요할 것으로 판단되었다.

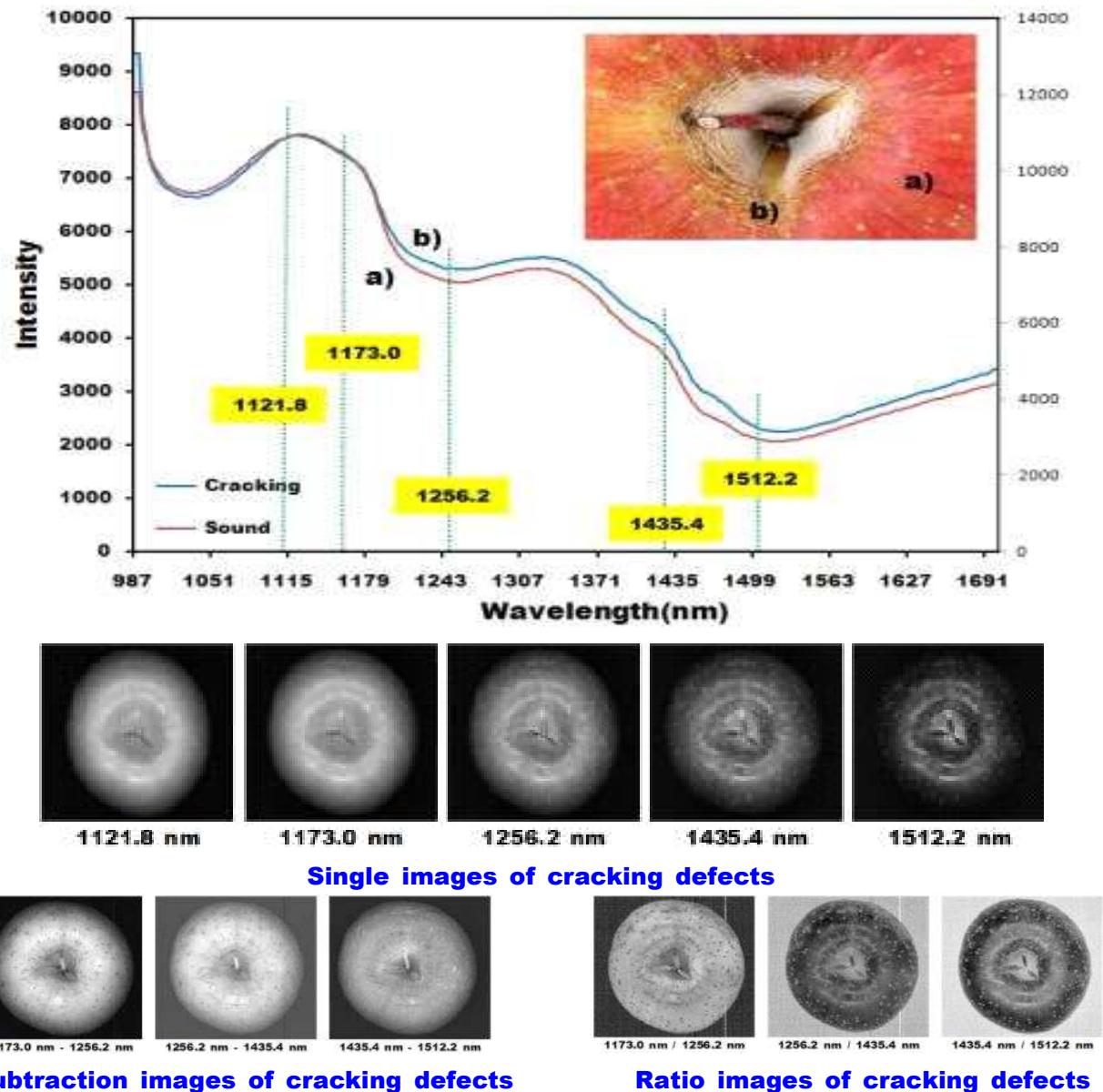


그림 35. 열과 결함에 대한 SWIR 초분광 반사 분광 특성 및 영상(1번 시료)

## (2) SWIR 파장 대역에서의 병해 결함에 대한 분광 및 초분광 영상 특성

(가) 그림 36은 병해 결함이 발생된 사과 시료에서 SWIR 파장대역에서 5개의 단일 밴드 영상(1029.0, 1115.4, 1249.8, 1381.0, 1505.8 nm)을 추출하였으며 이 5개의 밴드 영상 중에서 2개의 초분광 영상을 조합하여 차 영상 및 비 영상을 계산하였다.

(나) 차 영상(1029.0–1249.8 nm, 1029.0–1505.8 nm, 1115.4–1505.8 nm)에서는 병해 부분이 주변 영상보다 어두운 반점으로 표현되었으며 상대적으로 비 영상(1029.0/1249.8 nm, 1029.0/1505.8 nm, 1115.4/1505.8 nm)에서는 주변 과피 조직보다 밝게 표현되어 2개의 단일 파장 조합으로 병해 결합 검출이 가능함을 알 수 있었다.

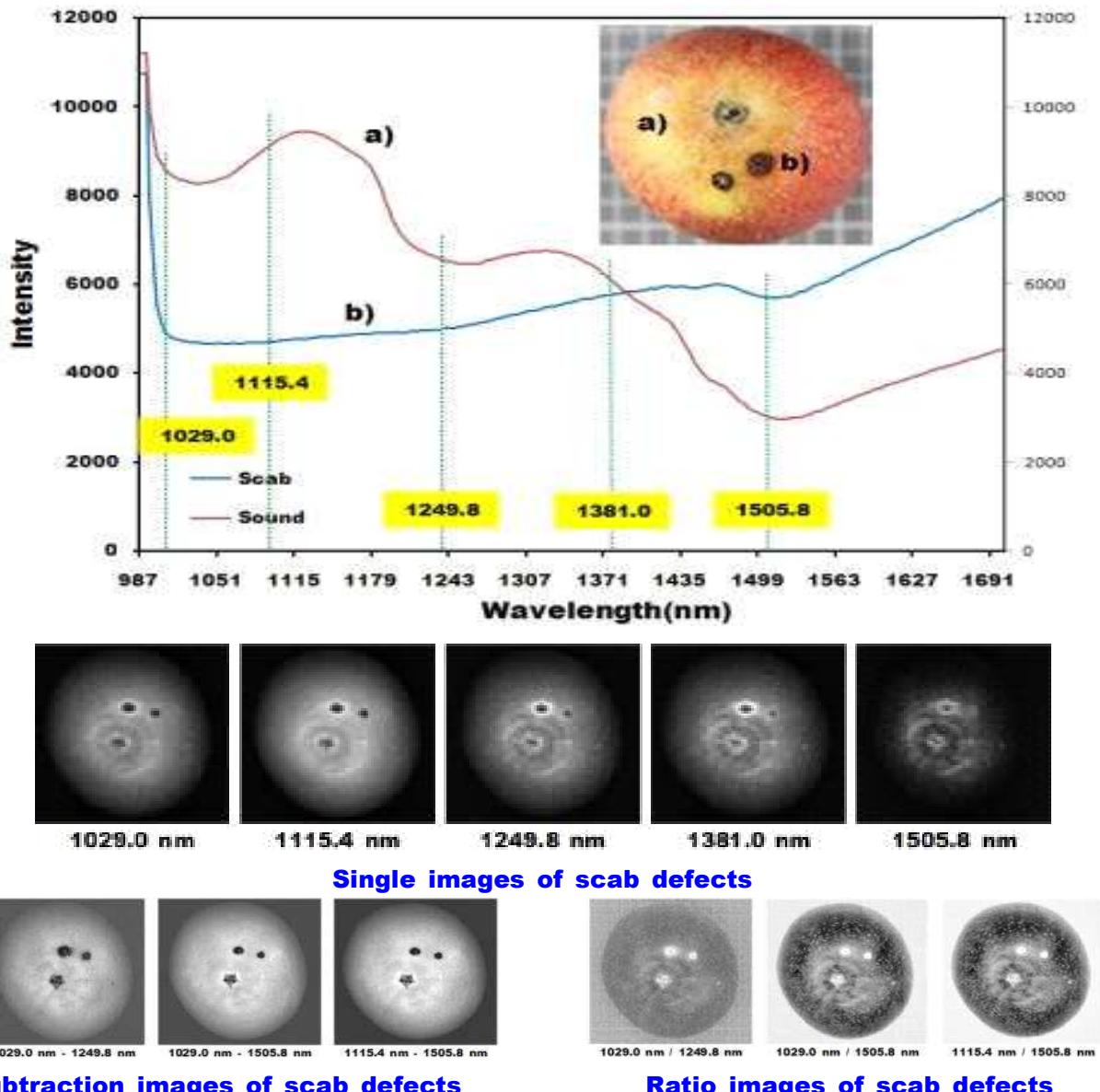


그림 36. 병해 결합에 대한 SWIR 초분광 반사 분광 특성 및 영상(2번 시료)

(3) SWIR 파장 대역에서의 착색 불량 결합에 대한 분광 및 초분광 영상 특성

(가) VNIR 파장대역이 색상 정보를 포함하고 있는 반면에 SWIR 파장대역은 색상에 대한 정보를 포함하고 있지 않기에 그림 37의 단일 파장 영상을 비롯해서 차 영상 및 비 영상에서도 미 착색에 대한 착색 불량 결합이 불가능하였다.

(나) 추후 착색 불량 결합과 관련되어 색소 성분과 관련된 안토시아닌 계열의 화학적

성분에 대한 검출이 가능하다면 SWIR 파장 대역에서도 색상 결함 검출이 가능할 것이다.

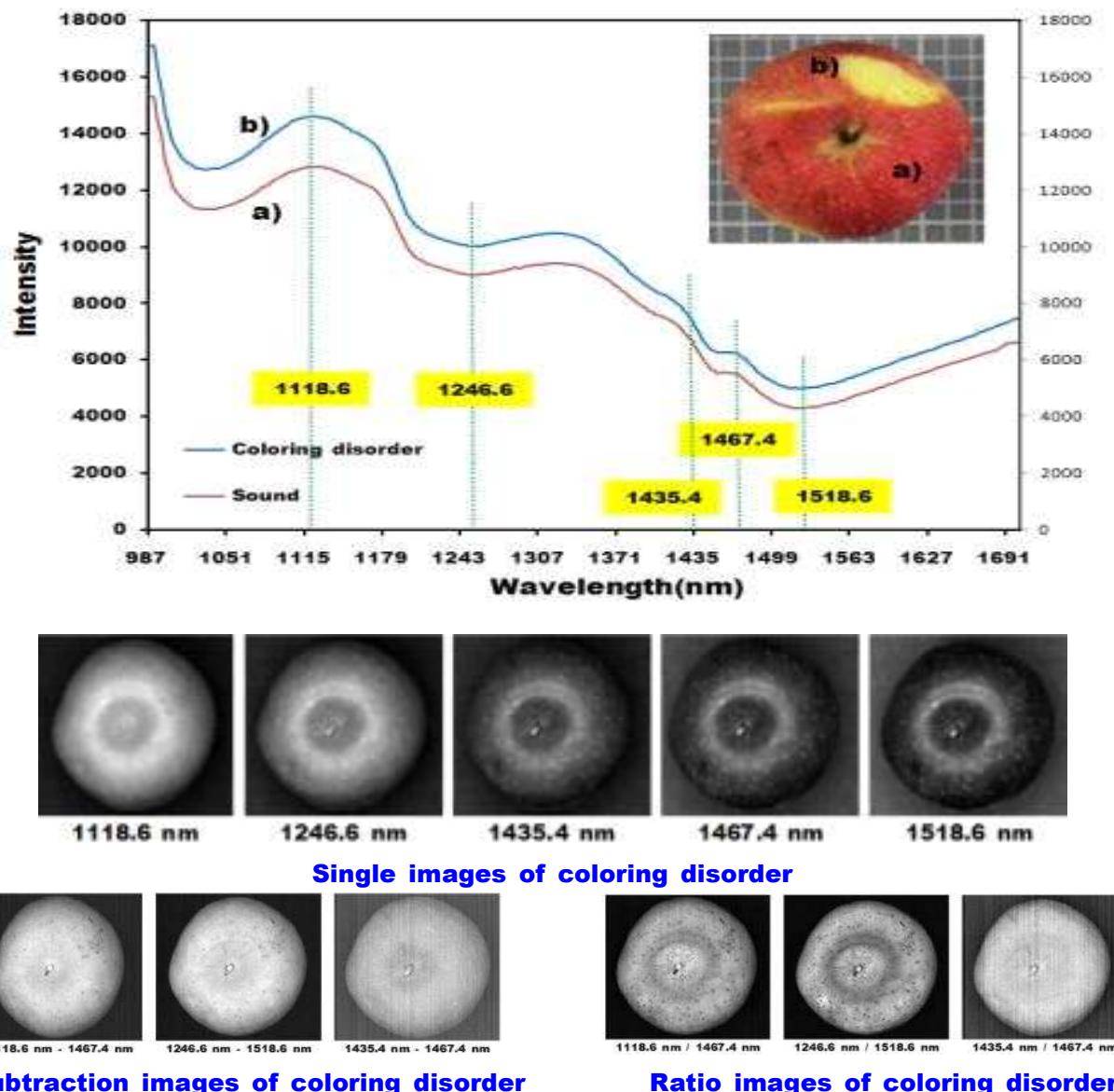


그림 37. 착색 불량에 대한 SWIR 초분광 반사 분광 특성 및 영상(2번 시료)

#### (4) SWIR 파장 대역에서의 상처 결함에 대한 분광 및 초분광 영상 특성

그림 38는 사과 표면에 발생한 상처 결함에 대한 SWIR 초분광 영상으로서 단일 파장(1125.0, 1192.2, 1320.2, 1432.2, 1515.4 nm)에서 추출한 5개의 파장을 비롯하여 이를 영상을 서로 조합한 차 영상 및 비 영상에서 상처 결함에 대한 영상을 확인할 수 있었다.

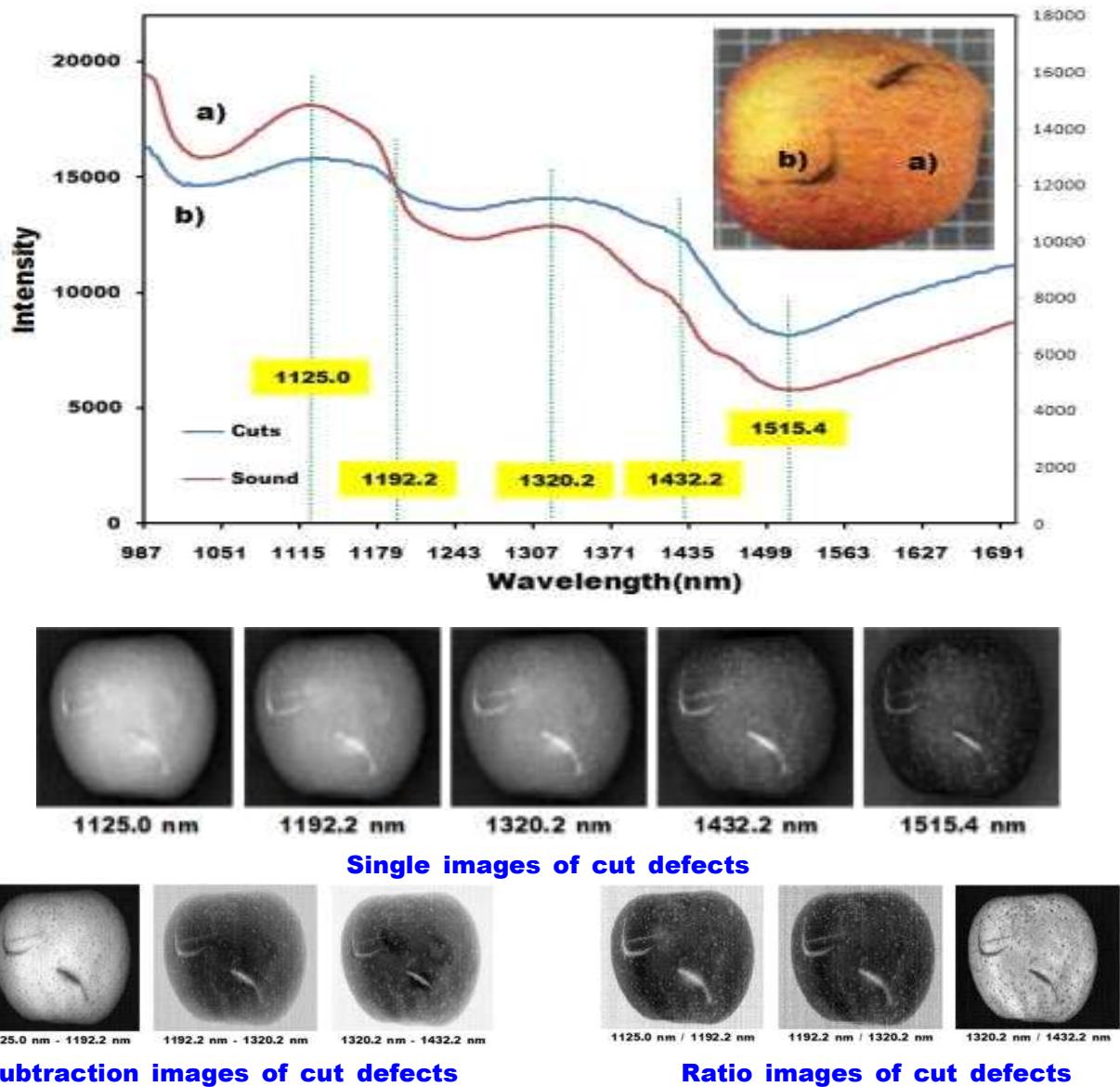


그림 38. 상처 결함에 대한 SWIR 초분광 반사 분광 특성 및 영상(10번 시료)

##### (5) SWIR 파장 대역에서의 명 결함에 대한 분광 및 초분광 영상 특성

그림 39은 명이 발생된 사과 시료에 대해서 5개의 단일 파장(1057.8, 1125.0, 1182.6, 1323.4, 1598.6 nm)의 SWIR 초분광 영상, 이 5개의 파장을 서로 조합하여 계산된 차 영상 및 비영상에서 명 검출이 용이하였다.

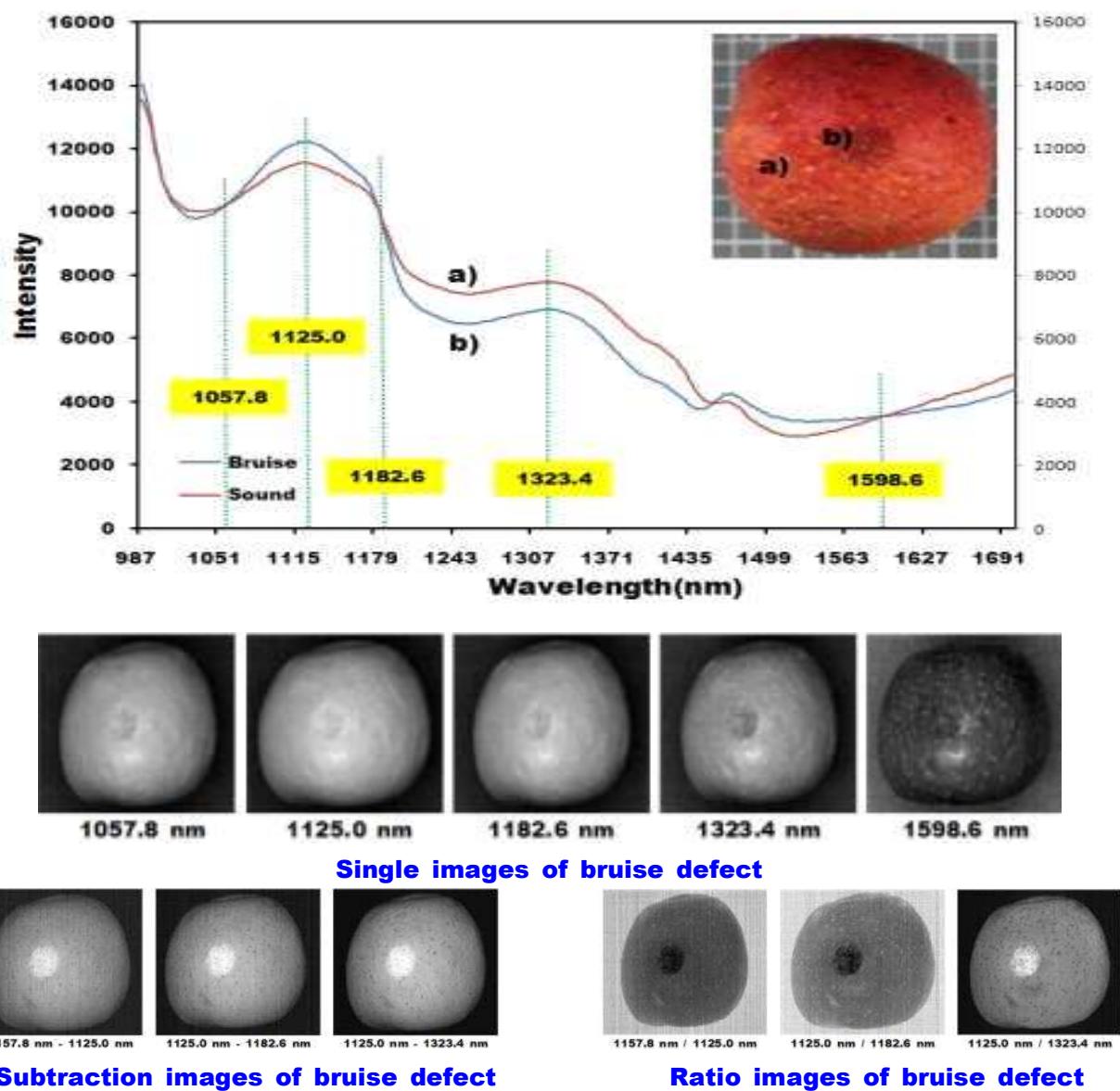


그림 39. 명 결함에 대한 SWIR 초분광 반사 분광 특성 및 영상(10번 시료)

### 제3절 정지 상태에서의 표면 결함별 검출용 알고리즘 개발

#### 가. 사과 결함 검출을 위한 최적 파장 선정 알고리즘 개발

- (1) 획득한 초분광 반사 분광 및 영상에서 사과 결함을 검출하기 위한 알고리즘을 개발하기 위하여 그림 40과 같은 최적 파장 선정 및 영상 처리 과정으로 진행하였다.
- (2) 결함별 15개 사과 시료에서 추출한 정상 및 결함 부위에 대한 ROI의 반사 스펙트럼 데이터를 각각 입력 변수로 하여 분산분석(ANOVA ; Analysis of variance) 및 상관분석(CR ; Correlation analysis)을 실시하였으며 가장 우수한 결과 값을 최적 파장으로 선정하였다.
- (3) 선정된 최적 파장들은 단일 파장 영상, 차 영상, 비 영상 및 복합 영상들로 계산되었으며 각 결함별로 검출 알고리즘을 개발하기 위하여 임계 값(Threshold value)을 결정하고 이 값을 기준으로 재구성된 초분광 영상에 적용하여 0과 1의 이치화 영상(Binary image)으로 변환하여 결함을 검출하고자 하였다.

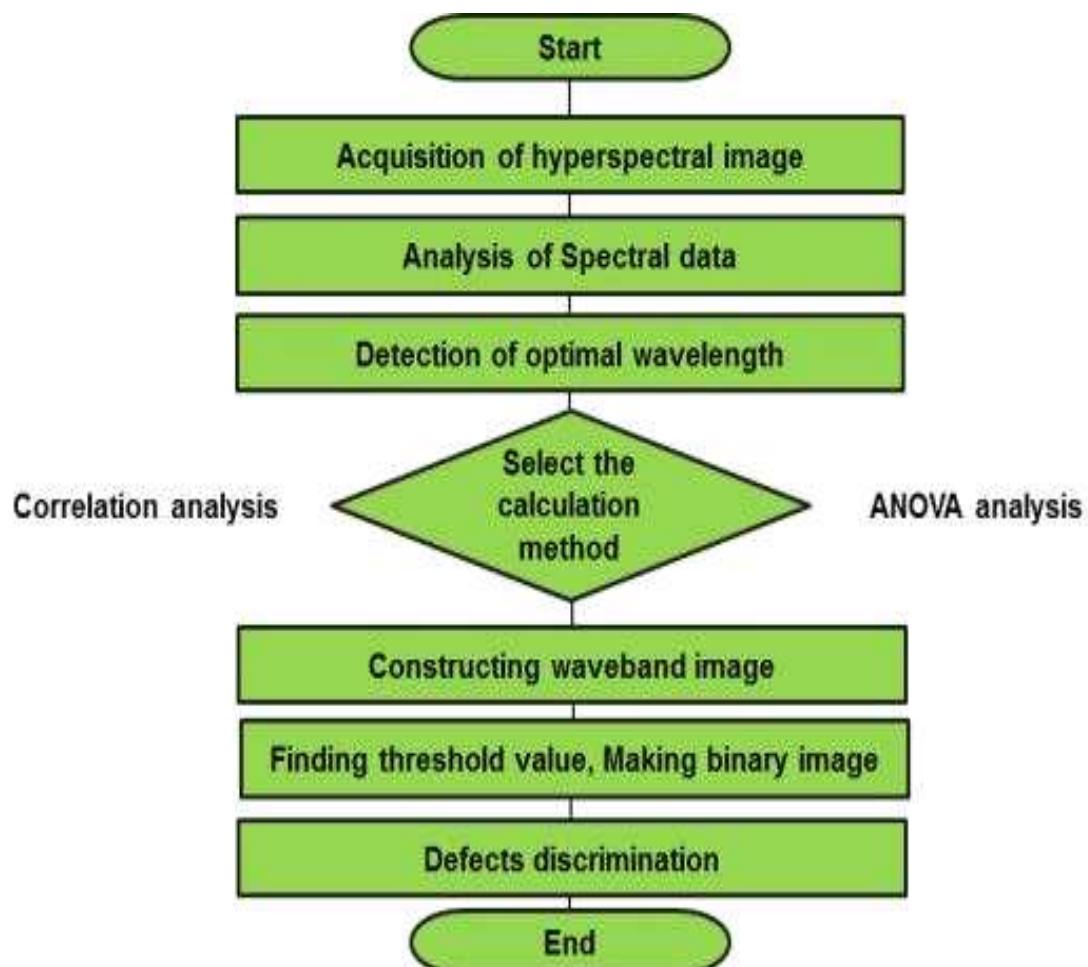


그림 40. 결함 검출을 위한 최적 파장 선정 및 초분광 영상 처리 과정

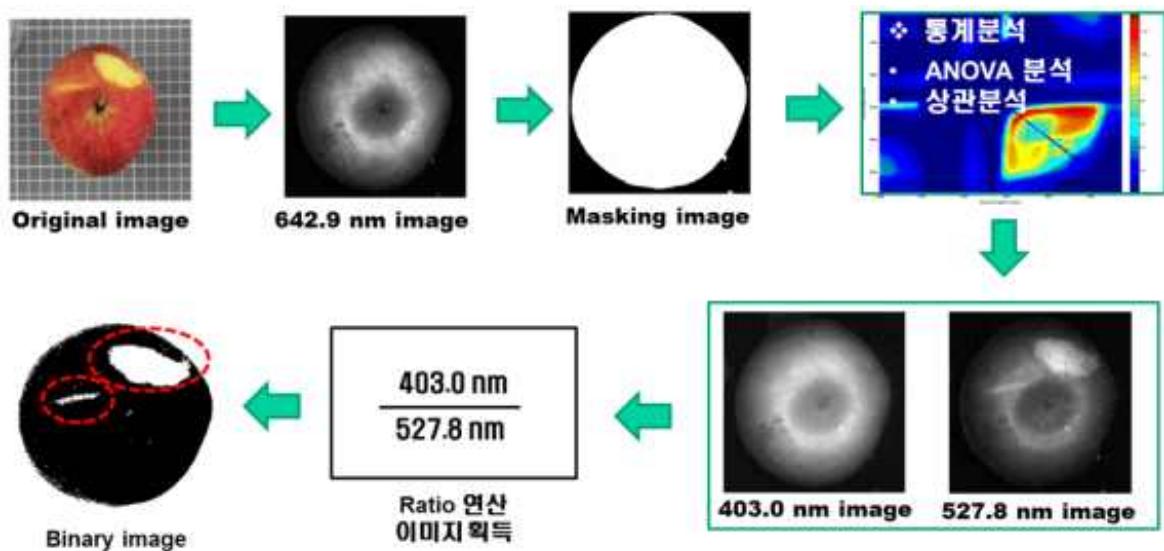


그림 40. 정지상태에서 획득한 사과 초분광 영상의 결함 검출 알고리즘

#### 나. VNIR 파장대역에서 단일 파장을 이용한 사과 결함 검출용 알고리즘 개발

- (1) 사과의 내·외부에서 발생된 결함을 신속하게 검출하기 위해서는 최적의 단일 파장에서 100% 검출이 가능하다면 검출 시스템의 단순화가 가능하고 구축 비용도 적게 소요되기에 가능하다면 결함 검출이 가능한 단일 파장을 찾는 것이 유리하다.
- (2) 그림 41은 추정한 초분광 영상들에서 사과 이외의 배경 영상을 제거하기 위해 제작된 마스킹 템플릿에 대한 영상으로서 사과 영상을 제외한 나머지 배경 영상 정보는 '0'으로 연산하여 처리하였다.

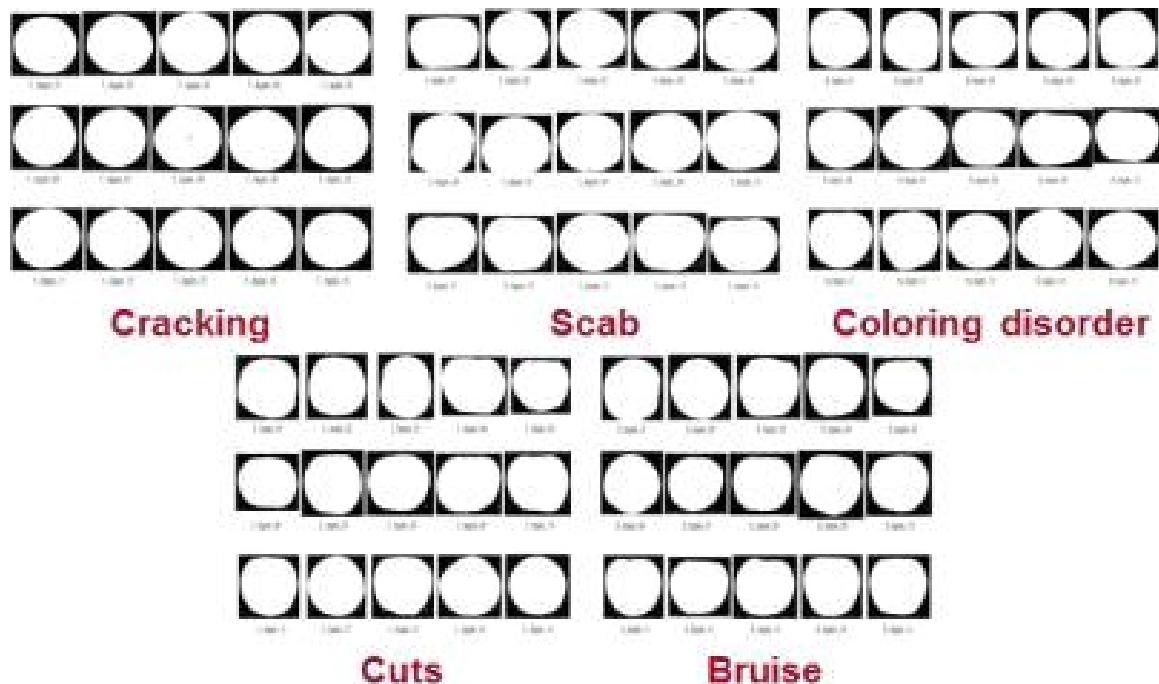


그림 41. 초분광 영상의 배경 제거를 위한 마스킹 템플릿

### (3) VNIR 파장 대역에서의 최적 단일 파장 결과

(가) 그림 42는 VNIR 파장 대역에서 정상 및 결함 부위에 대해서 분산분석 결과로서 각각의 결함에서 F-값이 가장 큰 파장을 선정하였다.

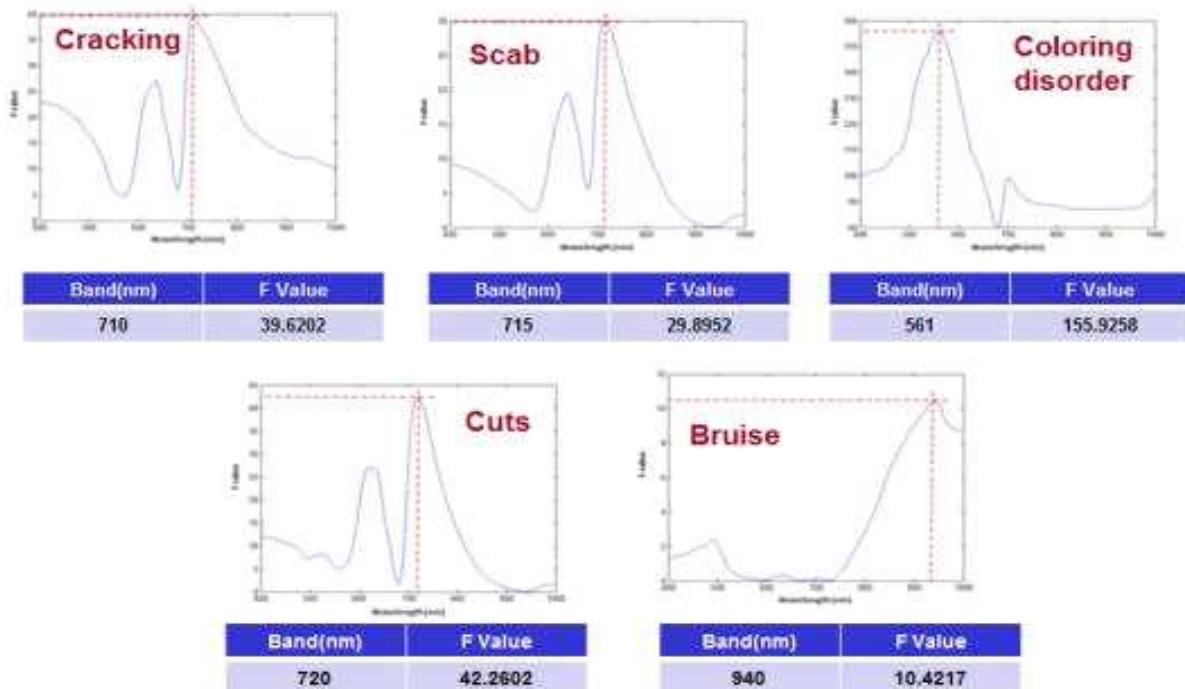


그림 42. VNIR 파장 대역에서의 최적 단일 파장의 분산분석 결과

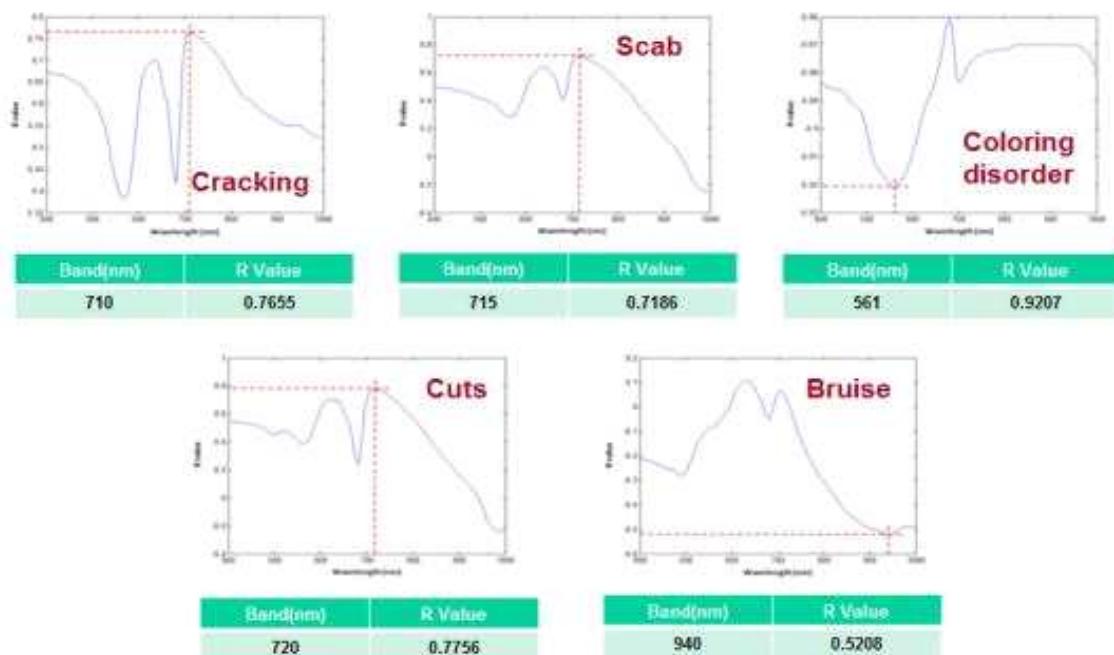


그림 43. VNIR 대역에서의 상관분석 결과

- (나) 그램에서와 같이 열과에서는 710 nm, 병해에서는 715 nm, 착색 불량에서는 561 nm, 상처에서는 720 nm, 명 부위에서는 940 nm 파장이 선정되었다.
- (다) 그림 43은 VNIR 파장 대역에서 결합 검출을 위한 최적의 단일 파장을 선정하기 위한 상관분석 결과로서 분산분석의 결과와 동일한 결과로 계산되었으며 착색 불량에 대한 R-값이 0.9207으로 가장 우수한 상관관계를 나타내었다.
- (라) 사과 결함을 검출하기 위해 선정된 단일 파장을 이용하여 초분광 반상 영상을 이치화한 영상은 그림 44과 같으며 결합 검출율은 열과, 미착색, 상처는 100%였으며 병해는 86.7%였고 명 부분은 6.7%로 저조하였다.
- (마) 단일 파장을 이용한 사과 결함 검출 알고리즘을 개발하였으며 결합 검출 결과에서 명 부위의 검출을 제외하고는 우수한 결과였으며 명 부위는 표면 색상이 정상 부위와 유사하여 VNIR 파장 대역에서는 구분이 어려운 것으로 추측되었다.

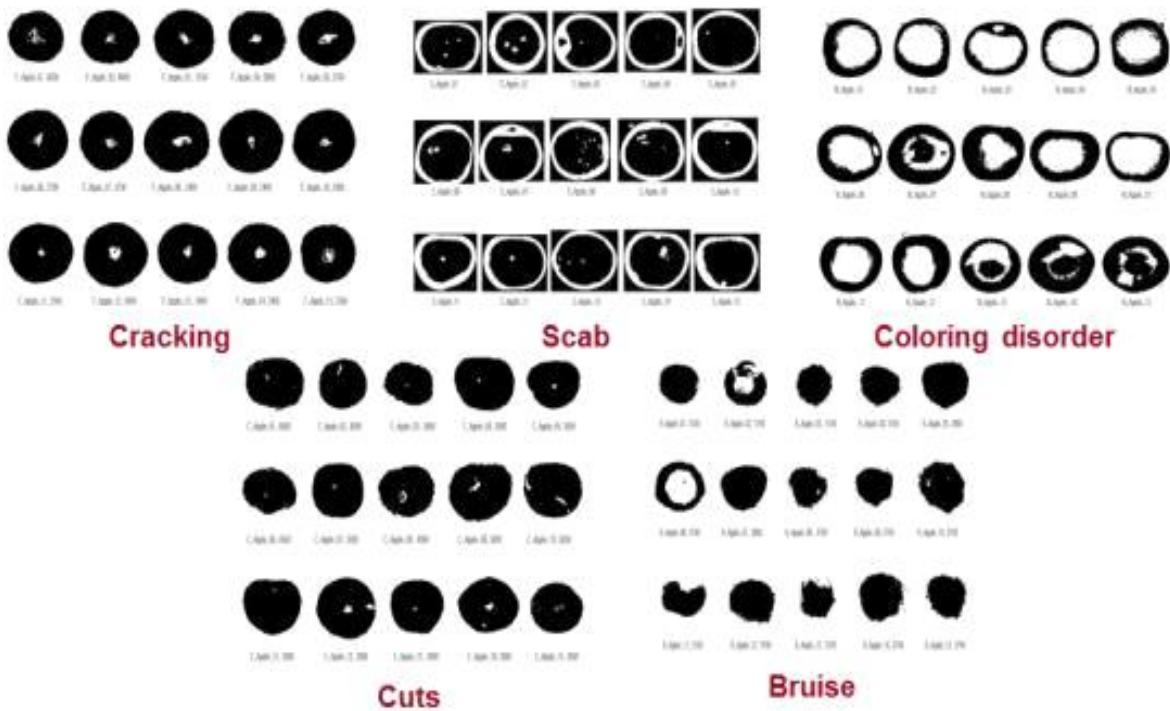


그림 44. VNIR 파장 대역에서 단일 파장을 이용한 이치화 영상 결과

#### (4) VNIR 파장 대역에서의 차 영상 및 비 영상 획득을 위한 2개 최적 파장 결과

- (가) 최적 파장들의 연산에 의한 결합 검출 알고리즘 개발

단일 파장에서의 결합 검출의 한계를 극복하기 위해서 분산분석 및 상관 분석에서 2개 이상의 최적 파장을 선발하여 그림 42에서와 같이 차 영상 및 비 영상을 구하였으며 최종 이치화 영상을 이용하여 결합을 검출하고자 하였다.

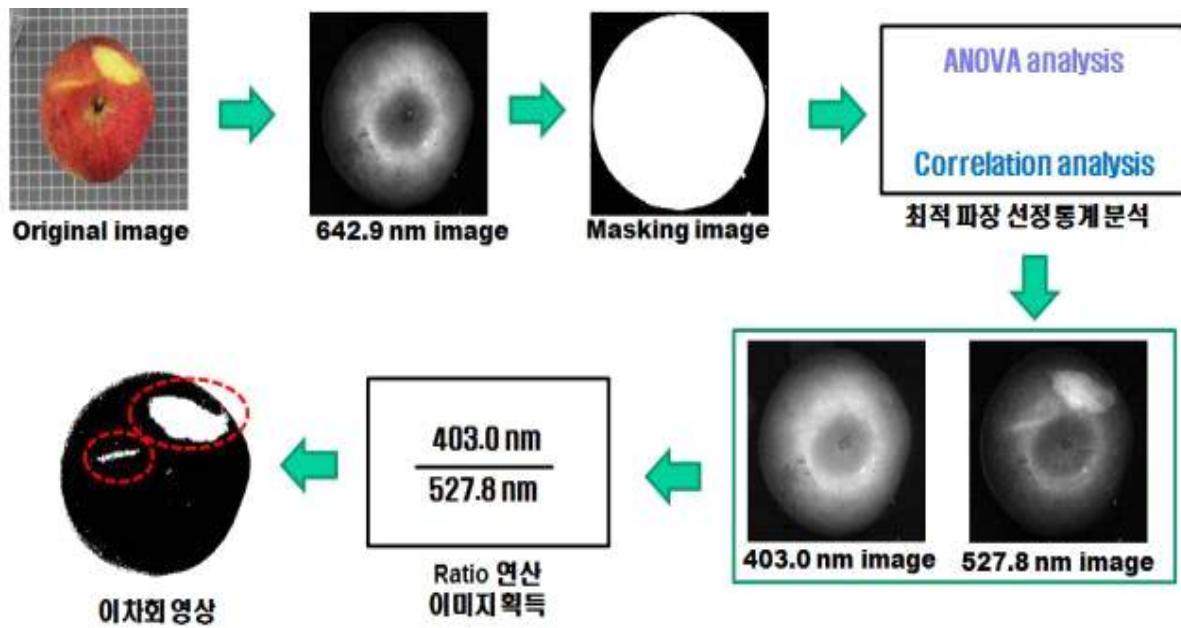


그림 45. 사과 결함 검출을 위한 초분광 영상의 이치화 과정

(나) VNIR 파장대역에서의 최적 2개 파장(비 영상)을 이용한 분산분석 결과

- ① 그림 46은 VNIR 파장대역에서 정상 부위와 결함 부위에 대해서 결함 검출을 위한 최적 파장을 통계적으로 선별하기 위한 분산분석의 결과로서 각 결함별로 선별된 2개의 파장에 대한 등고선 그래프(Contour)로서 2개의 파장에 대한 비 영상의 값(F-value)이 큰 파장일수록 붉은색으로 표현되며 관련성이 작은 파장일수록 파란색으로 표현하였다.
- ② 각각의 결함별로 선별된 2개의 파장은 열과에서는 792 nm와 806 nm, 병해 결함에서는 720 nm와 964 nm, 착색 불량에서는 403 nm와 528 nm, 상처 결함에서는 739 nm와 998 nm, 명 결함에서는 749 nm와 753 nm 파장에서 최적의 비 영상에 대한 분산분석 결과를 나타내었으며 선별된 각각의 결함별 파장을 이용하여 결함 검출 알고리즘 개발에 적용하고자 하였다.

(다) VNIR 파장대역에서의 최적 2개 파장(비 영상)을 이용한 이치화 영상 결과

그림 47는 상관분석을 이용하여 선정된 최적 2개 파장의 비 영상을 임계값을 적용하여 이치화 영상으로 변환한 영상으로서 열과, 병해, 미착색, 상처과에서는 15개 결함 시료에 대한 100% 결함 검출이 가능했으며 명에 대해서는 73.3%의 판별율을 보여주었다.

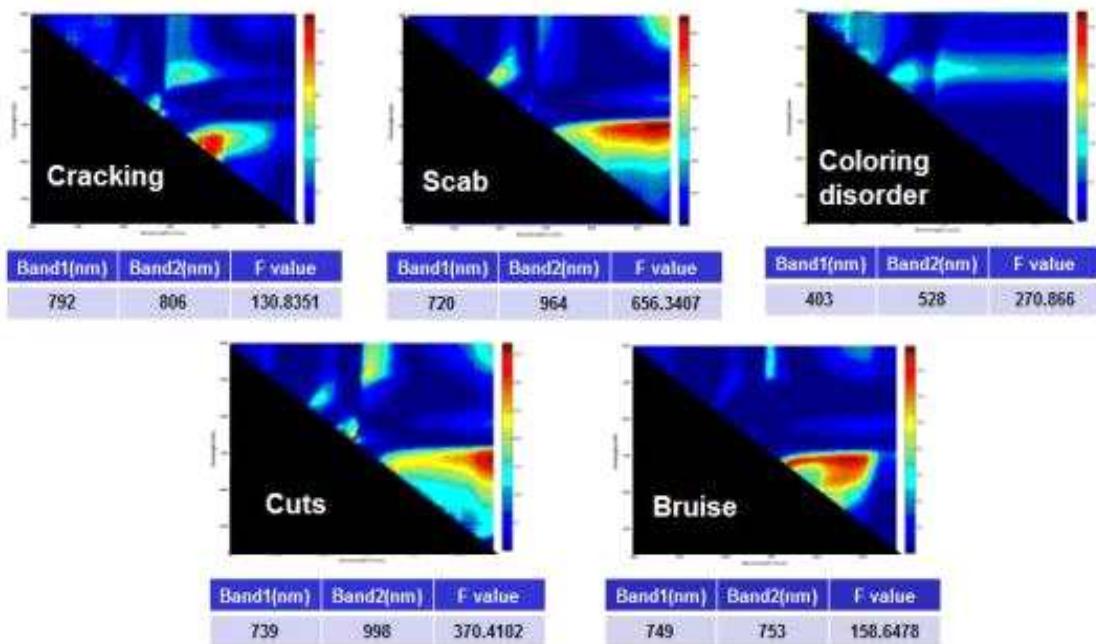


그림 46. VNIR 파장대역에서 상관분석을 이용한 최적 2개 파장(비 영상) 결과

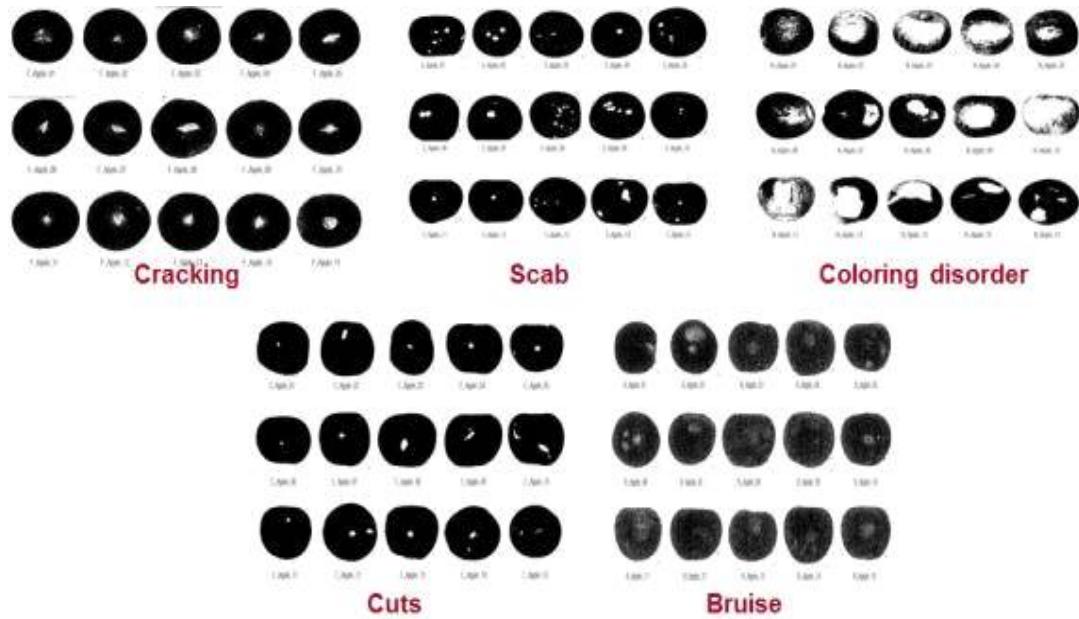


그림 47. 사과 결함 검출을 위한 초분광 영상의 이치화 영상(비 영상)

(라) VNIR 파장대역에서의 최적 2개 파장(차 영상)을 이용한 상관분석 결과

그림 48는 VNIR 파장 대역에서 각 결함별로 최적의 파장을 선발하기 위한 차 영상의 상관분석 결과로서 분산분석의 결과와 동일한 파장대역이 선발되었으며 상관 계수(R)은 병해 결함 검출에 대한 729/964 nm에서 0.9793으로 가장 높게 나타났으며 열과 검출에 대한 792/806 nm에서 0.9076으로 가장 적은 값을 나타냈지만 결함 별로 선발된 2개 파장에 대한 비는 전체적으로 우수한 상관관계를 보여주었다.

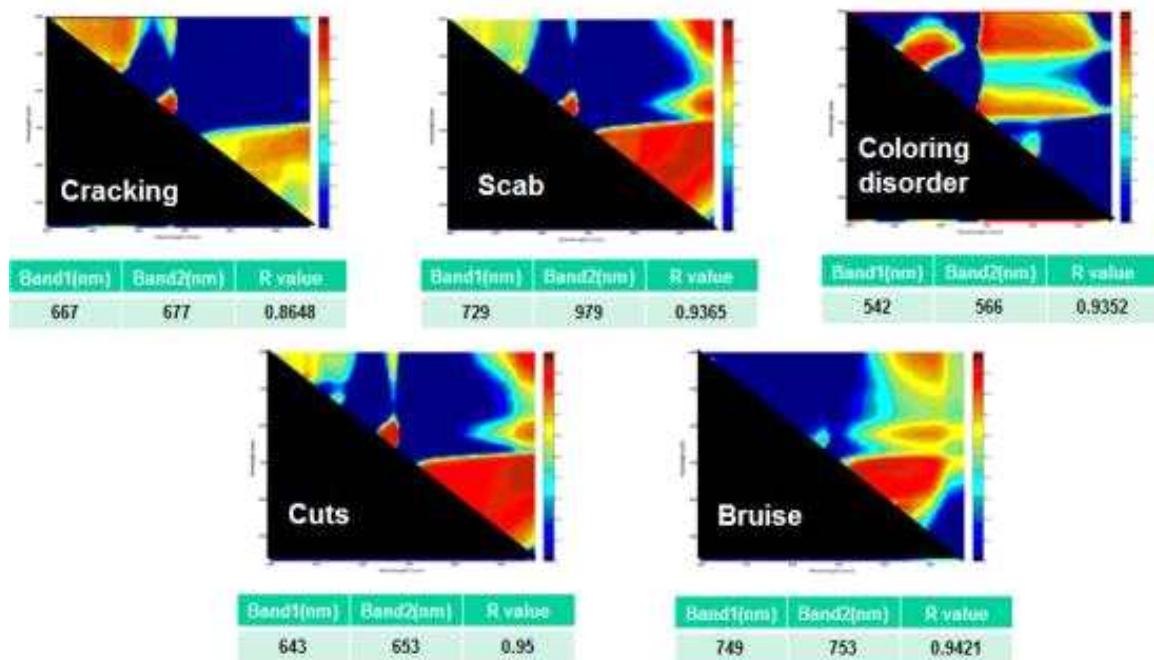


그림 48. 사과 결함 검출을 위한 초분광 영상의 상관분석 결과

(마) VNIR 과장대역에서의 최적 2개 과장(차 영상)을 이용한 이치화 영상 결과

그림 49은 상관분석을 이용하여 선정된 최적 2개 과장의 차 영상을 임계값을 적용하여 이치화 영상으로 변환한 영상으로서 열파, 병해, 미착색, 상처과에서는 15개 결함 시료에 대한 100% 결함 검출이 가능했으며 명에 대해서는 73.3%의 판별율을 보여주었다.

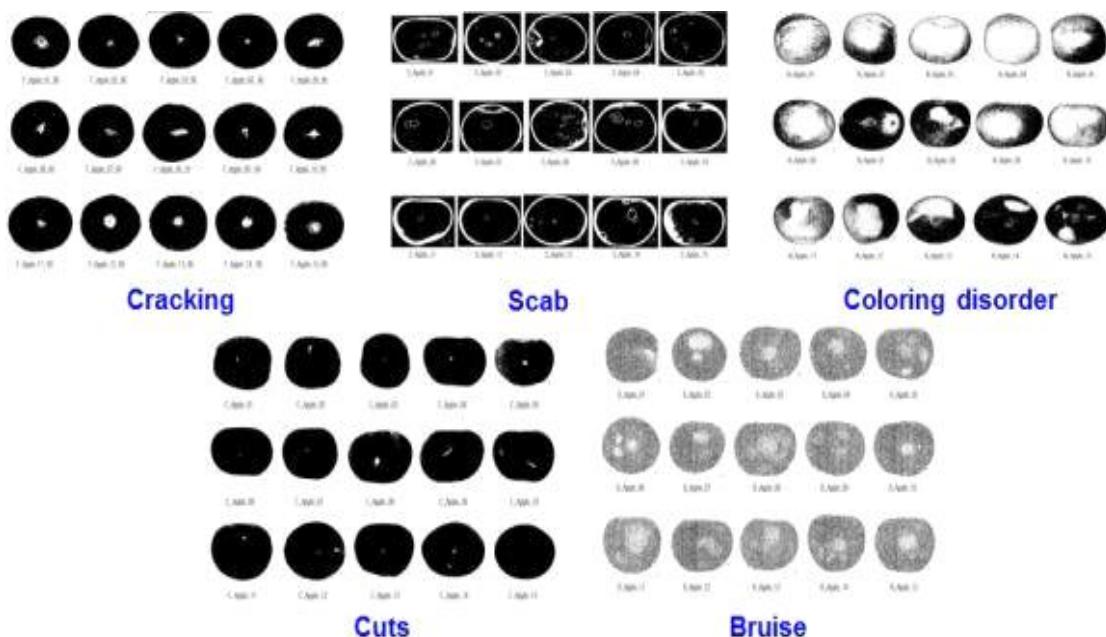


그림 49. 사과 결함 검출을 위한 초분광 영상의 이치화 영상(차 영상)

(5) VNIR 파장 대역에서의 복합 영상 획득을 위한 3개 최적 파장 결과

(가) VNIR 파장대역에서의 최적 3개 파장(복합 영상)을 이용한 분석 결과

① 그림 50 및 51은 각각 사과 결함 검출을 위한 3개의 최적 파장 선정을 위한 분산분석 및 상관분석 결과를 보여주고 있으며 적용된 복합 파장에 관한 연산은 (1 번째로 선발된 밴드 - 3번째로 선발된 밴드)/(2번째로 선발된 밴드 - 3번째로 선발된 밴드)를 적용하였다.

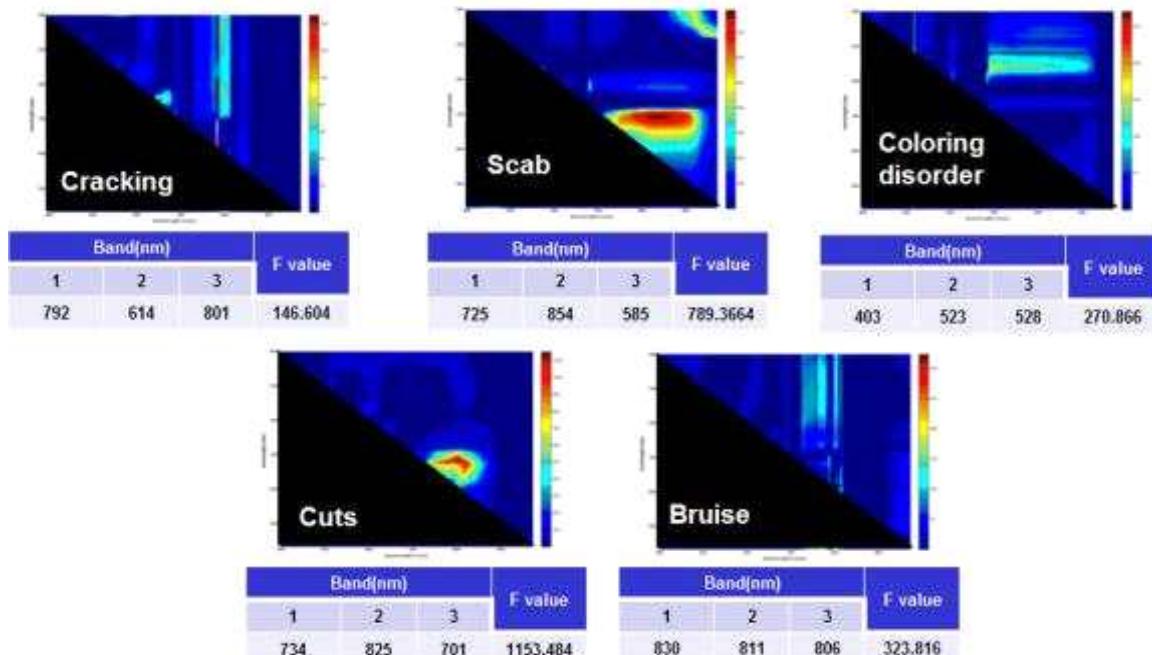


그림 50. VNIR 파장대역에서 3개의 최적 파장 선정을 위한 분산분석 결과

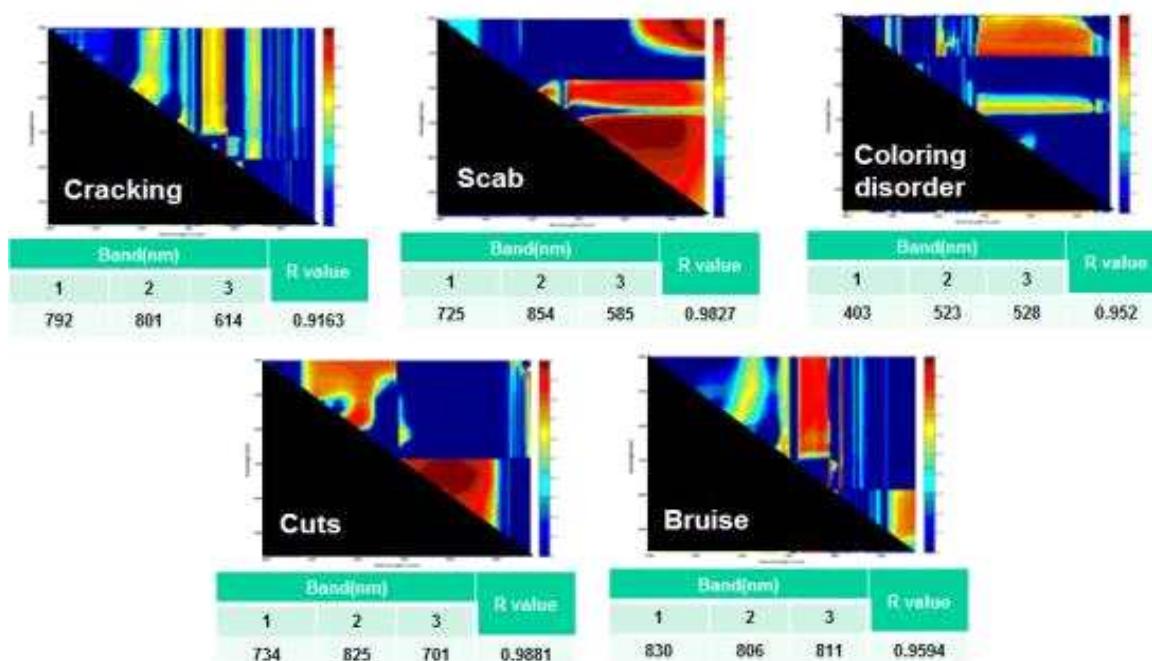


그림 51. VNIR 파장대역에서 3개의 최적 파장 선정을 위한 상관분석 결과

② 상관분석과 분산분석으로 선발된 3개의 파장은 모든 결함에서 일치된 결과를 보여주었으며 명 결함에 있어서 2번째로 선발된 파장과 3번째로 선발된 파장의 순서가 변경되었다.

(나) VNIR 파장대역에서의 최적 3개 파장(복합 파장)을 이용한 이치화 영상 결과 그림 52는 최적 파장으로 선정된 3개의 파장에 복합 파장 연산을 적용하여 획득한 초분광 영상에 각각의 결함별로 임계값을 지정하여 이치화 영상으로 변환한 결과이며 열과, 병해, 상처는 100%의 결함 판별율로 나왔으며 착색불량은 86.7%, 명은 93.3%의 양호한 검출 결과를 보여주었다.

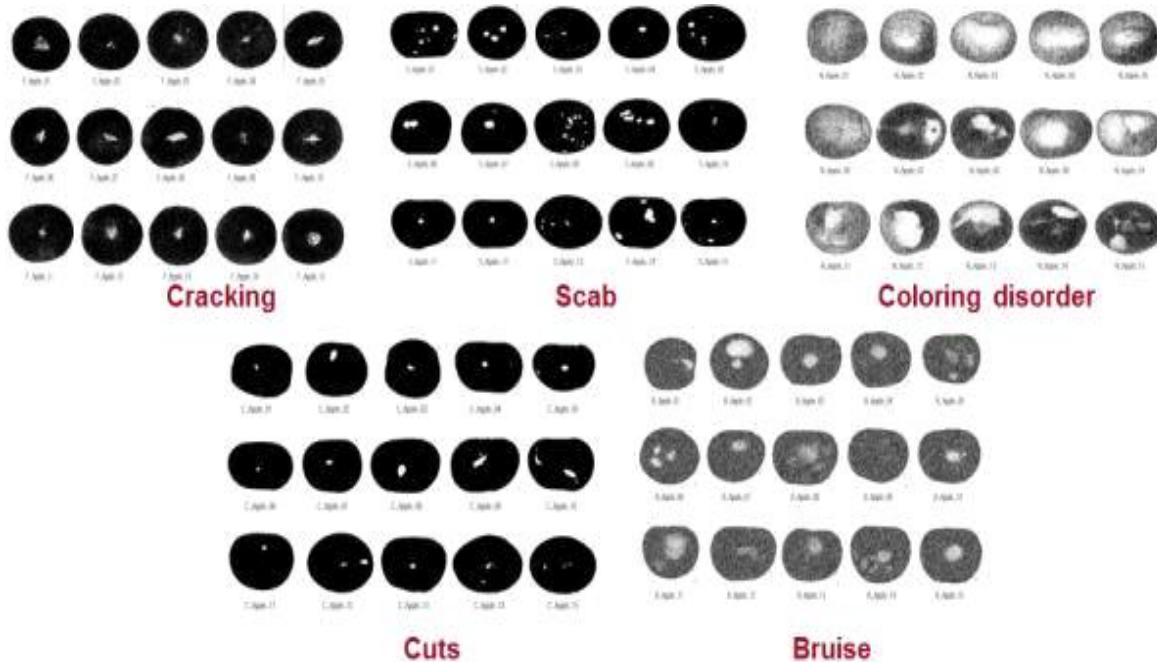


그림 52. 사과 결함 검출을 위한 초분광 영상의 이치화 영상(복합파장)

다. SWIR 파장대역에서 단일 파장을 이용한 사과 결함 검출용 알고리즘 개발

(1) 사과 결함 부위 검출을 위한 최적 단일 파장 선발 결과

(가) 그림 53은 SWIR 파장대역에서 사과 결함 검출을 위해 분산분석을 적용하여 선발된 최적 단일 파장을 나타낸 것으로서 열과는 1051 nm, 병해는 1691 nm, 착색불량은 1119 nm, 상해는 1599 nm, 명 결함은 1131 nm으로 확인되었다.

(나) 그림 54은 SWIR 파장대역에서 결함 검출을 위한 최적의 단일 파장을 선정하기 위한 상관분석 결과로서 분산분석의 결과와 동일한 파장으로 계산되었으며 상처 결함에 대한 R 값이 0.9277로 가장 높게 나타났으며 명에 대한 R 값이 0.5382로서 저조하였다.

(다) 그림 52는 사과 결함을 검출하기 위해서 선발된 단일 파장을 이용하여 각 결함에

대한 이치화 영상을 적용한 것으로서 결함 검출율은 열파와 명 결함은 80%, 병해는 93.3%, 상처는 100%였으며 색상 정보에 의존하는 착색 불량은 0%로 나타났으며 착색 불량과 관련되어서는 VNIR 파장대역에서 100%로 검출하였기에 추후 착색 불량의 검출은 VNIR 파장을 병행하는 것이 효율적인 것으로 판단되었다.

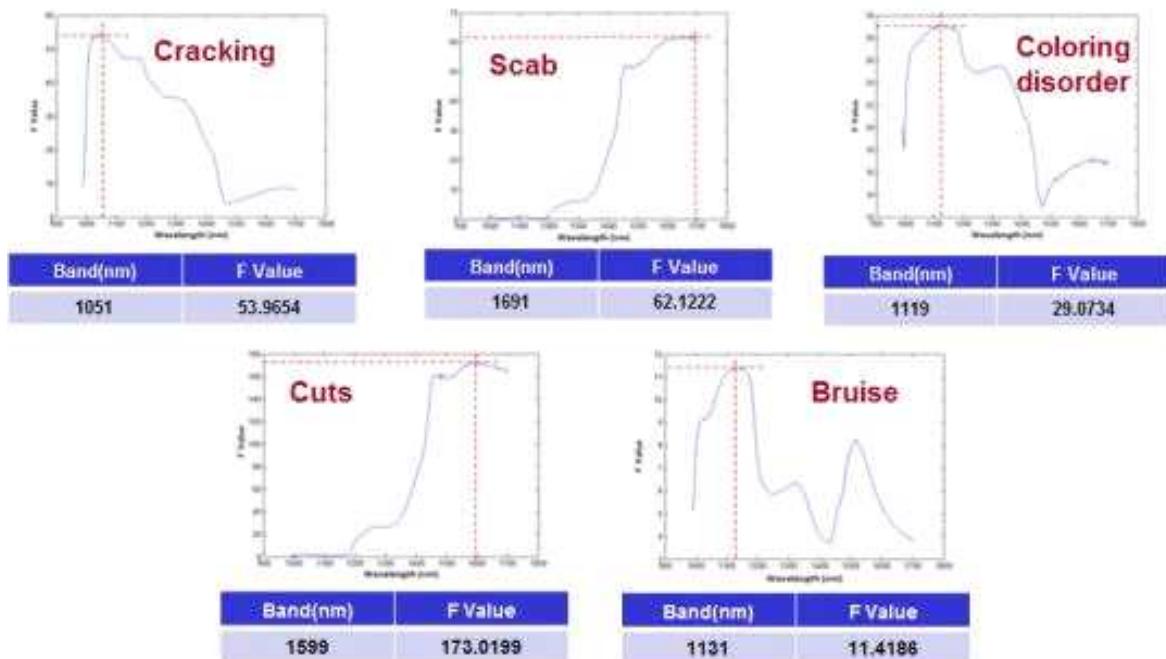


그림 53. SWIR 파장 대역에서의 최적 단일 파장의 분산분석 결과

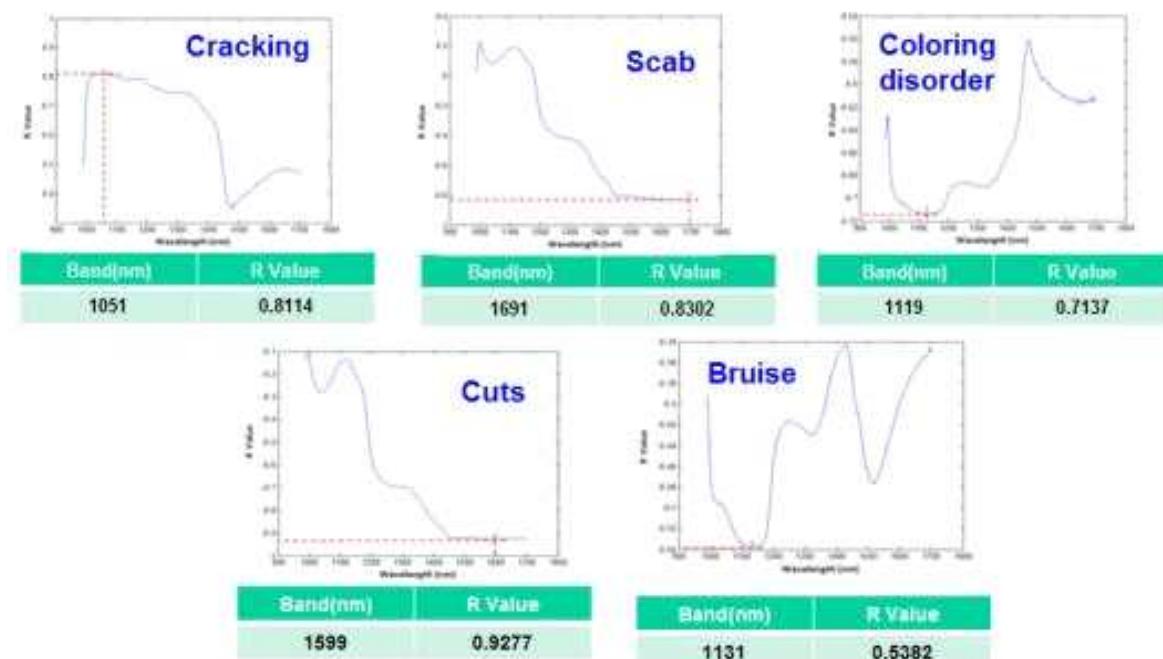


그림 54. SWIR 파장 대역에서의 최적 단일 파장의 상관분석 결과

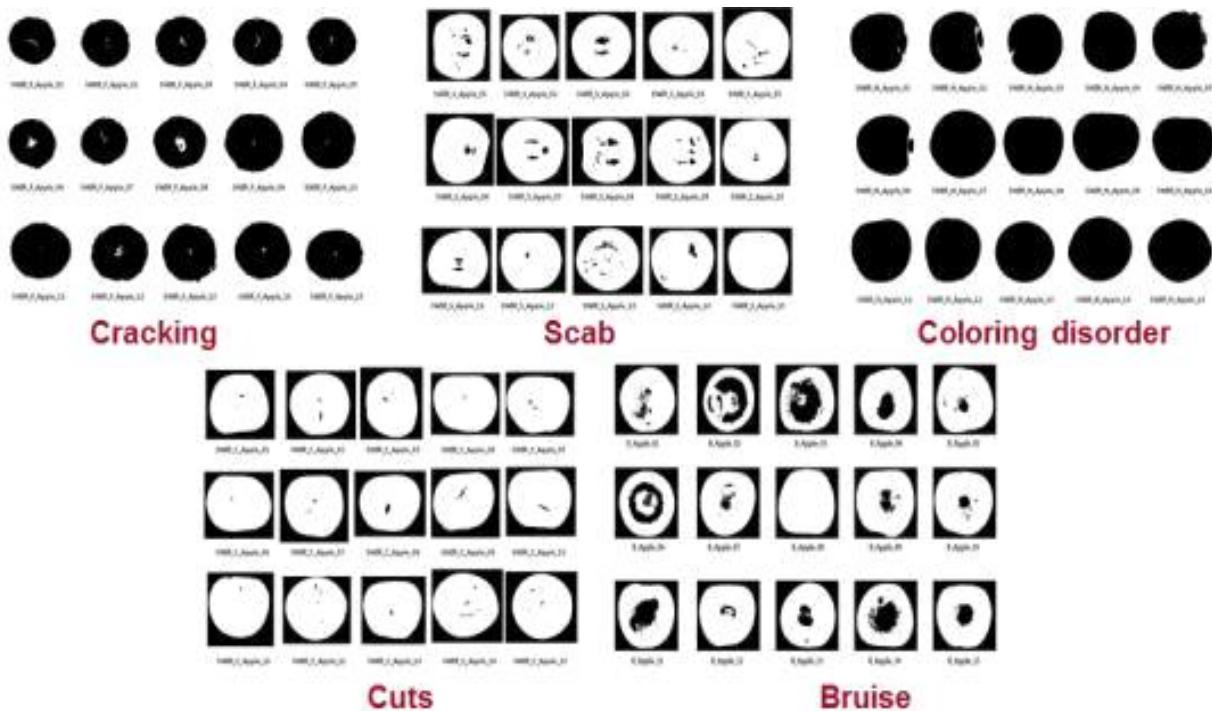


그림 55. SWIR 과장 대역에서 단일 과장을 이용한 이치화 영상 결과

(2) SWIR 과장 대역에서의 차 영상 및 비 영상 획득을 위한 2개 최적 과장 결과

(가) SWIR 과장대역에서의 최적 2개 과장(비 영상)을 이용한 분산분석 결과

그림 56은 SWIR 과장대역에서 비 영상에 대한 최적의 2개 과장을 선정하기 위해 분산분석을 적용했던 결과를 나타낸 것으로서 열과에서는 1103/1119 nm과장대역에서 가장 높은 F값을 나타냈으며 병해는 1701/987 nm, 착색 불량은 994/987 nm, 상처와 명 결함은 987/994 nm에서 가장 높은 F값을 보여주었다.

(나) SWIR 과장대역에서의 최적 2개 과장(비 영상)을 이용한 상관분석 결과

- ① 그림 57는 SWIR 과장 대역에서 각 결합별로 최적의 결합 검출을 위한 비 영상의 상관분석 결과를 나타낸 것으로서 열과 결합에서는 1103/1119 nm과장대역에서 가장 높은 F값을 나타냈다.
- ② 1384 nm, 착색 불량, 상처 및 명 결함은 모두 987/994 nm에서 가장 높은 F값을 보여주었으며 상처 결합의 R 값이 0.9805로 가장 높은 상관관계를 보여주었으며 착색불량 결합이 0.832로 가장 적은 값으로 나타났다.

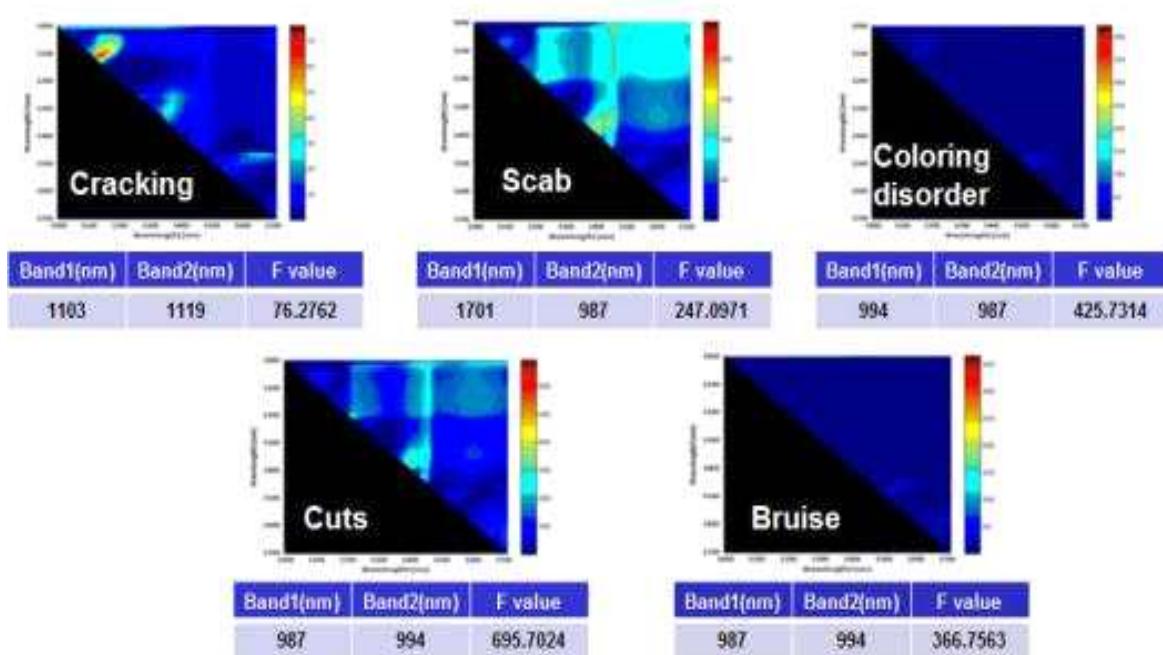


그림 56. SWIR 파장대역에서 분산분석을 이용한 최적 2개 파장(비 영상) 결과

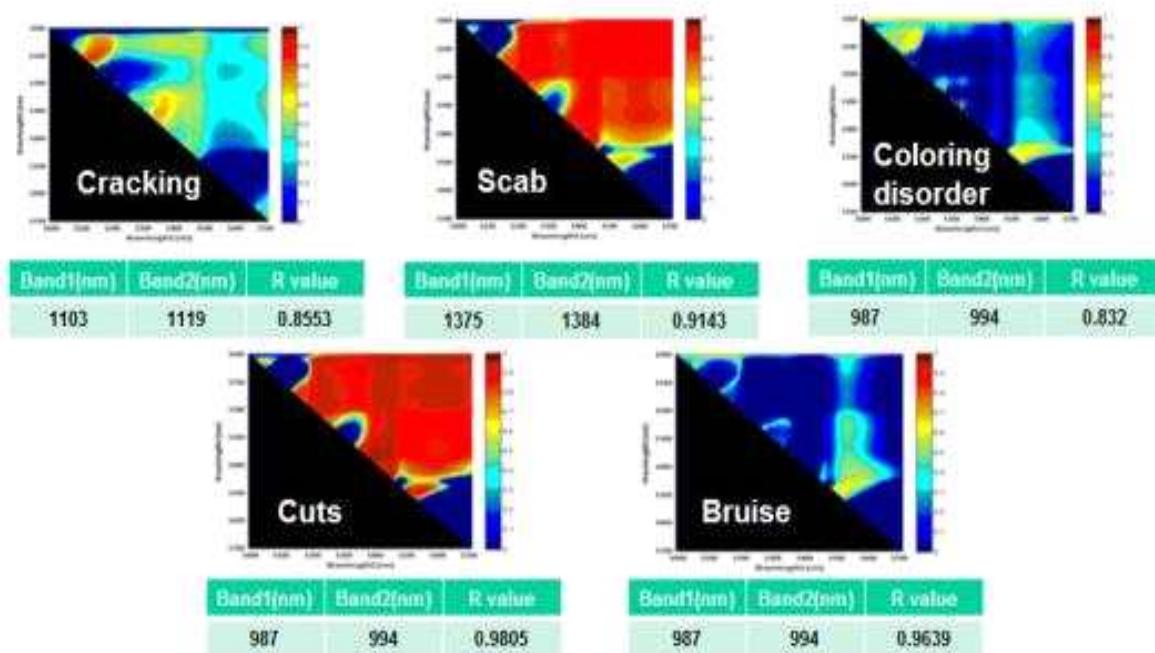


그림 57. SWIR 파장대역에서 상관분석을 이용한 최적 2개 파장(비 영상) 결과

(다) SWIR 파장대역에서의 최적 2개 파장(비 영상)을 이용한 이치화 영상 결과

그림 58는 각각의 결함에서 최적 파장으로 선정된 2개의 파장에 대한 비 영상을 이치화하여 결합 검출을 한 결과에서 열과는 73.3%, 병해는 93.3%, 상처는 13.3%, 착색불량은 0%, 명 결함은 93.3%로 나타났다.

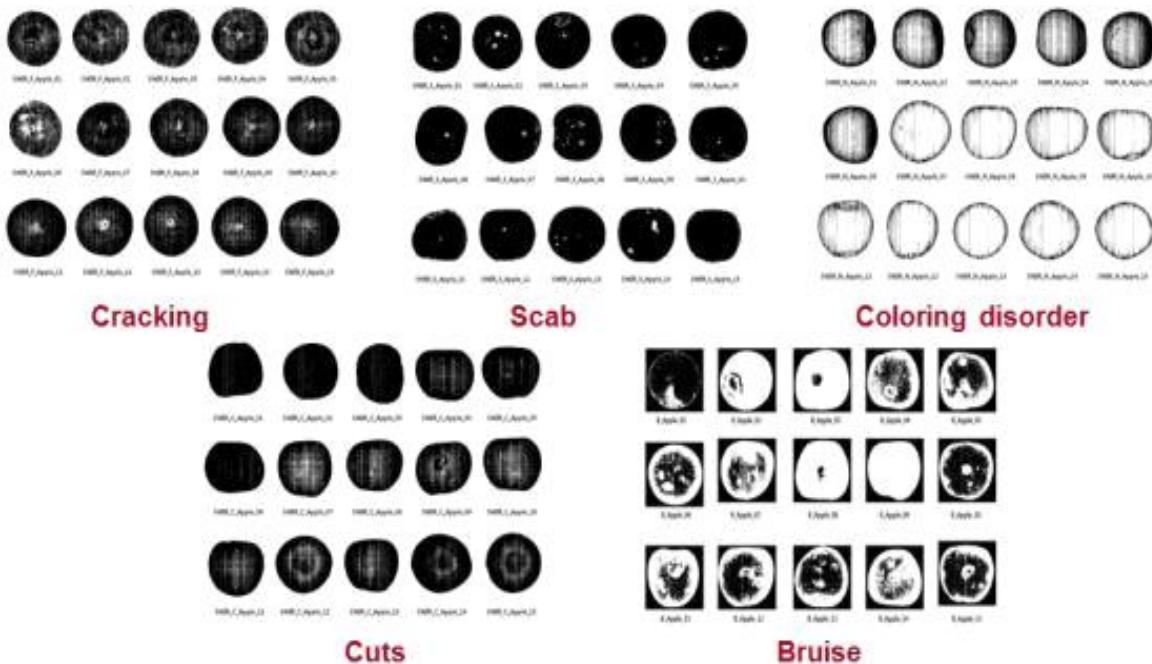


그림 58. 사과 결함 검출을 위한 이치화 영상(비 영상) 결과

(라) SWIR 파장대역에서의 최적 2개 파장(차 영상)을 이용한 분산분석 결과

- ① 그림 59은 SWIR 파장대역에서 결함 검출을 위한 차 영상에 대한 최적의 2개 파장을 선정하기 위해 분산분석을 실시한 결과를 나타내고 있다.
- ② 분산 분석결과에서와 같이 열과에서는 1381 - 1378 nm, 병해는 1371 - 1359 nm, 착색불량에서는 1359 - 1355 nm, 상처 결함에서는 1602 - 987 nm, 명 결함에서는 1304 - 1298 nm에서 가장 높은 F값들을 보여주었다.

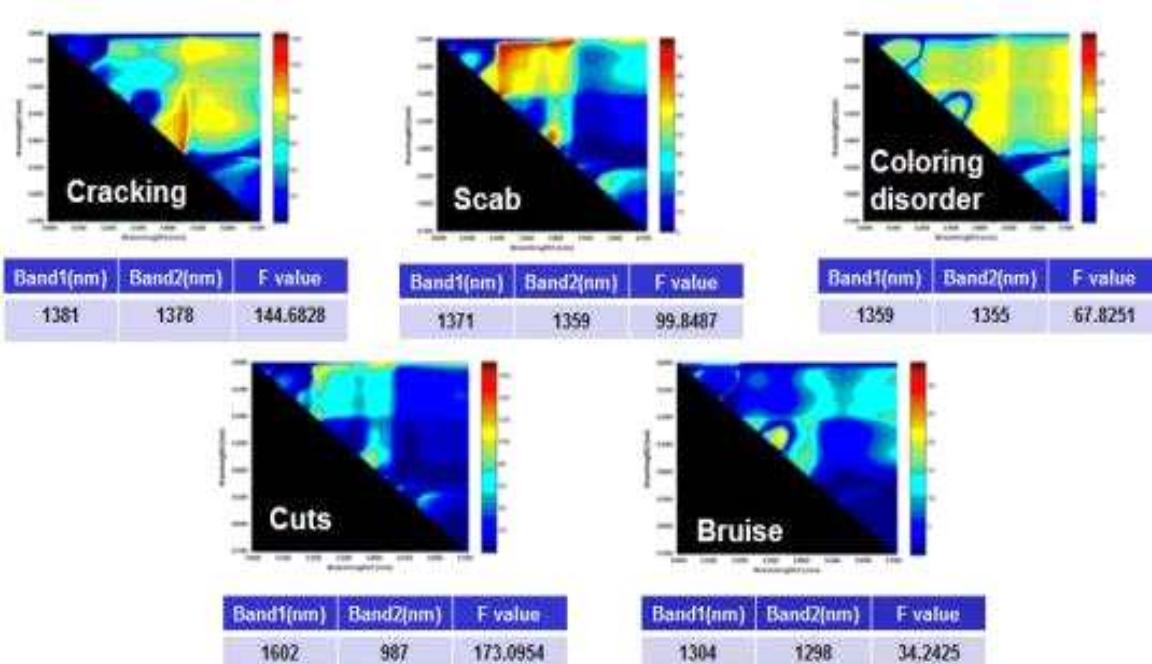


그림 59. SWIR 파장대역에서 분산분석을 이용한 최적 2개 파장(차 영상) 결과

(마) SWIR 파장대역에서의 최적 2개 파장(차 영상)을 이용한 상관분석 결과

그림 55는 SWIR 파장 대역에서 사과의 결함을 검출하기 위한 최적의 2개 파장을 선정하기 위해 상관분석을 한 결과로서 분산분석과 동일한 결과를 보여주었다.

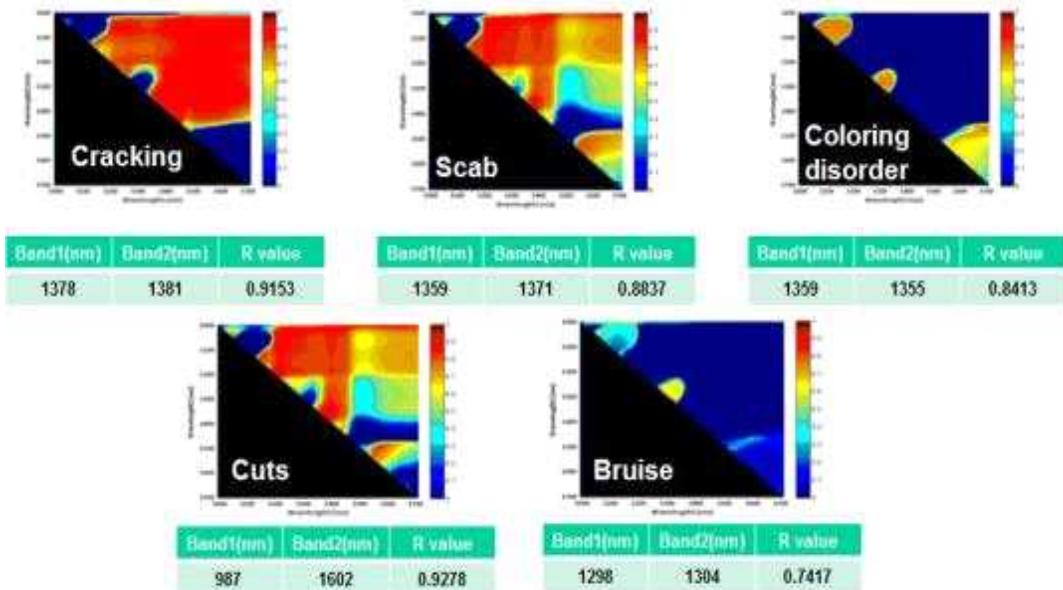


그림 60. SWIR 파장대역에서 분산분석을 이용한 최적 2개 파장(차 영상) 결과

(바) SWIR 파장대역에서의 최적 2개 파장(차 영상)을 이용한 이치화 영상 결과

그림 61는 각각의 결함에서 최적 파장으로 선정된 2개의 파장에 대한 차 영상을 이치화하여 결함 검출을 한 결과로서 열과는 46.7%, 병해는 93.3%, 상처는 100.0%, 착색불량은 0%, 명 결함은 46.7%로 나타났다.

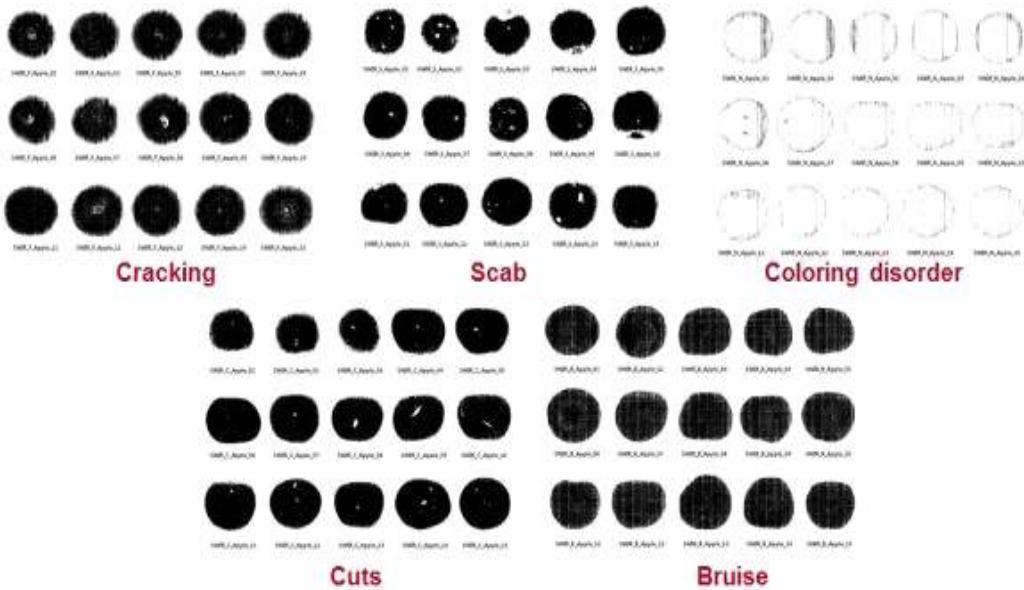


그림 61. 사과 결함 검출을 위한 이치화 영상(차 영상) 결과

(3) SWIR 파장 대역에서의 복합 영상 획득을 위한 3개 최적 파장 결과

(가) SWIR 파장대역에서의 최적 3개 파장(복합 영상)을 이용한 분석 결과

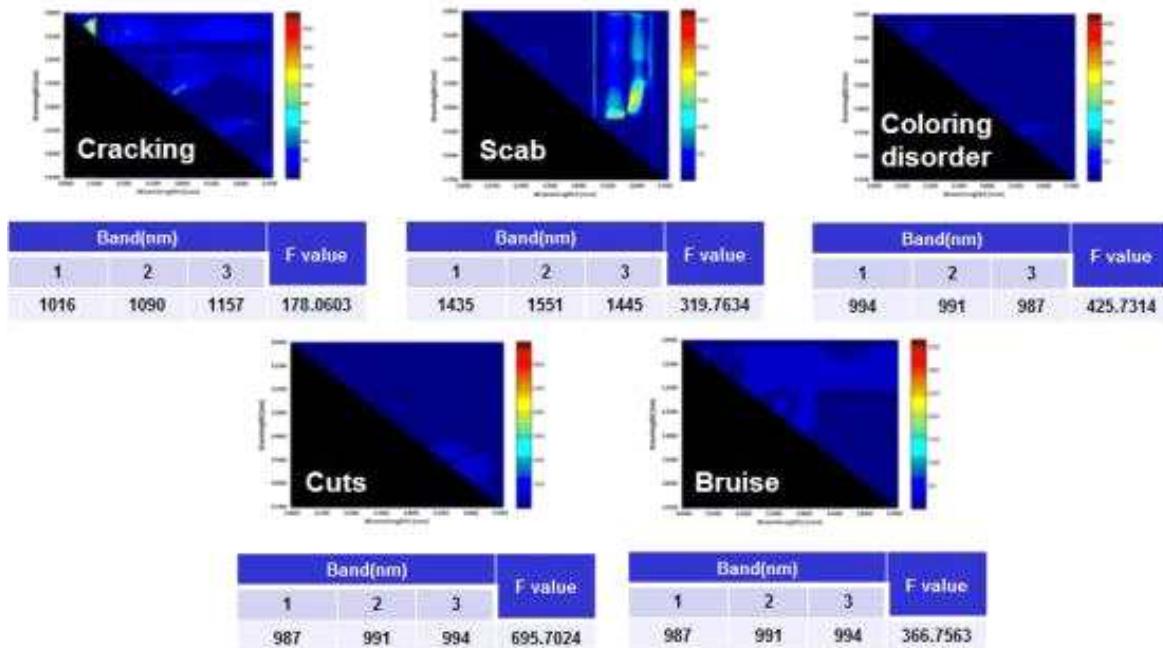


그림 62. SWIR 파장대역에서 3개의 최적 파장 선정을 위한 분산분석 결과

라. 정지 상태에서의 정상 및 결함 사과의 이치화 판별 결과

(1) 가시광 및 근적외선(VNIR) 초분광 영상의 이치화 영상 판별 결과

가시광 및 근적외선(VNIR) 초분광 영상 시스템을 이용하여 정지상태에서의 정상 및 결함 사과의 이치화 판별 결과에서 단일 파장에서는 열파, 미착색, 상처 결함이 100% 판별 되었으며 차 파장에서는 병해, 미착색, 명이 100% 결과를 보여주었으며 비파장에서는 열파, 병해, 미착색, 상처에서 100% 판별 결과를 보여주었으며 복합파장에서는 열파, 병해, 상처가 100%판별률을 보여주었다.

표 1 VNIR 초분광 영상을 이용한 정상 및 결함 사과의 이치화 영상 판별 결과

결함 유형	단파장	차파장	비파장	복합파장
열파	100.0	93.3	100.0	100.0
병해	86.7	100.0	100.0	100.0
미착색	100.0	100.0	100.0	86.7
상처	100.0	66.7	100.0	100.0
명	6.7	100.0	73.3	93.3

## (2) 근적외선(SWIR) 초분광 영상의 이치화 영상 판별 결과

근적외선 초분광 영상 시스템을 이용하여 정지상태에서의 정상 및 결함 사과의 판별결과에서는 상처 결함이 단파장과 차파장에서 100% 판별률을 보여주었으며 시료의 색상 특성과는 무관한 근적외선 영역 파장대역에서는 미착색이나 착색 불량과 같은 색상 정보를 이용하여 검출할 수 있는 결함에 대해서는 0%의 판별률을 보여주었다.

표 2 SWIR 초분광 영상을 이용한 정상 및 결함 사과의 이치화 영상 판별 결과

구분	단파장	차파장	비파장	복합파장
열과	80.0	46.7	73.3	53.3
병해	93.3	93.3	93.3	93.3
미착색	0.0	0.0	0.0	0.0
상처	100.0	100.0	13.3	6.7
명	80.0	46.7	93.3	0.0

### 마. 가시광 및 근적외선 파장대역에서의 사과 결함 검출을 위한 최적 파장

(1) 그림 63은 각각 열과, 병해, 착색불량, 상처, 명이 발생한 결함사과에 대한 566.2 nm 및 878.0 nm 파장대역의 초분광 영상으로서 근적외선 파장대역의 878.0 nm 파장대역에서의 영상을 제외하고는 결함 부위의 명암이 정상 부위와 차이나는 것을 알 수 있었다.

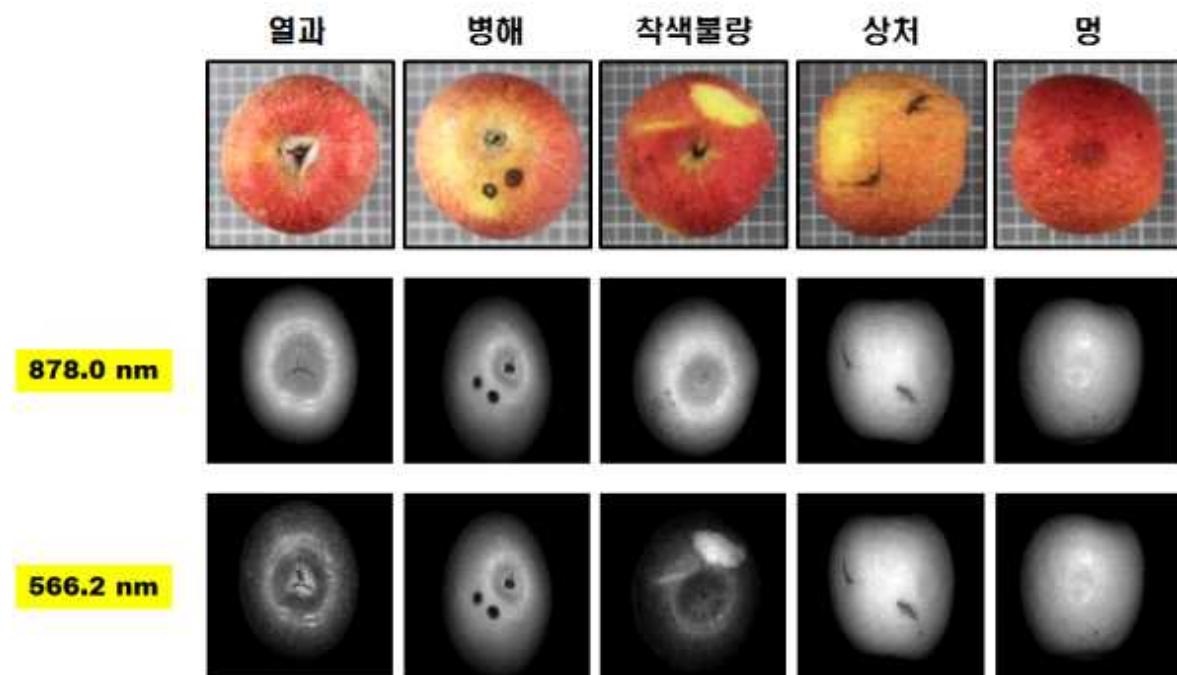


그림 63. 다양한 사과 결함에 대한 566.2 nm 및 878.0 nm 파장대역의 초분광 영상

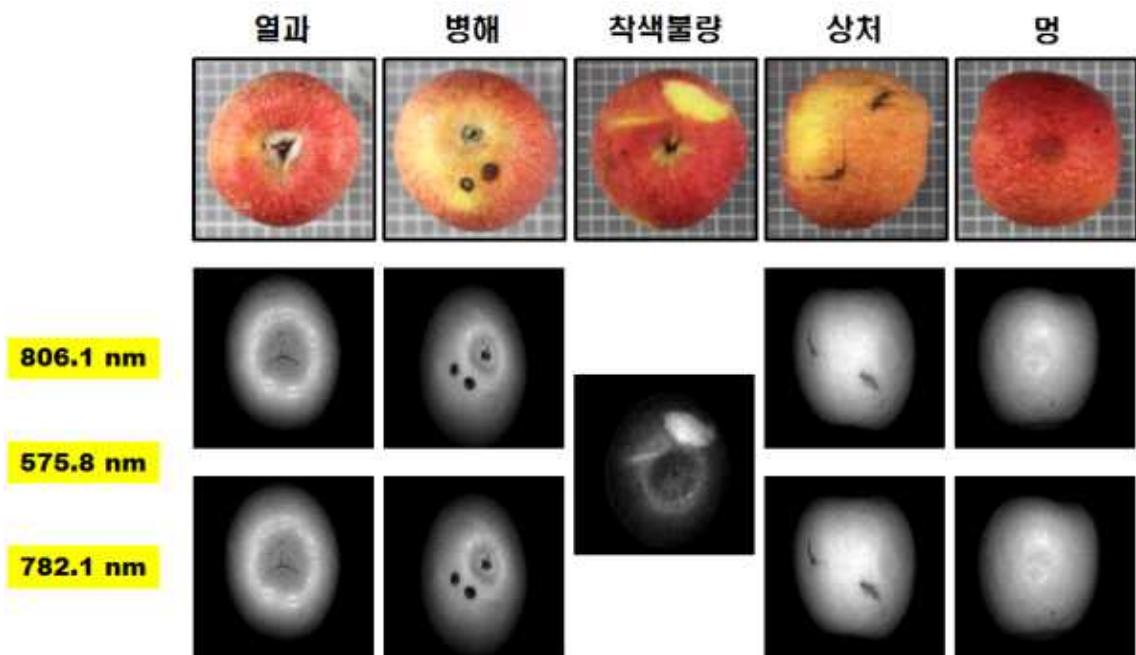


그림 64. 다양한 사과 결함에 대한 806.1, 575.8, 782.1 nm 파장대역의 초분광 영상

(2) 그림 64은 각각 열과, 병해, 착색불량, 상처, 명이 발생한 결함사과에 대한 806.1, 575.8, 782.1 nm 파장대역의 초분광 영상으로서 착색 불량에 대해서는 가시광 파장 대역인 575.8 nm에서 색상 이상 부분을 뚜렷하게 판별할 수 있었다.

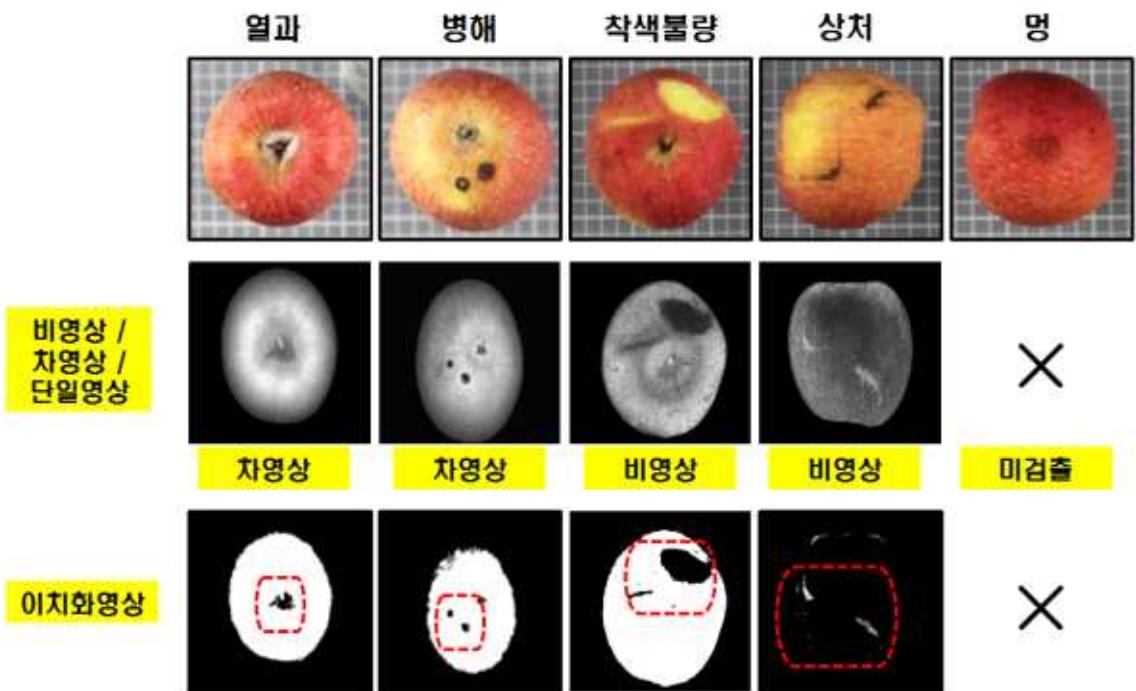


그림 65. 다양한 사과 결함에 대한 단일, 차, 비 연산을 적용한 이치화 영상 결과

(3) 그림 65는 열과에 대해서는 2개의 차 연산(806.1-782.1 nm)을 적용한 차 영상과 획득한 차 영상에 대해서 문턱값(threshold value)을 적용하여 흑과 백의 이치화 영상(binary image)로 변환한 것으로서 열과, 병해, 착색불량, 상처의 결합 부위는 이치화되어 백색으로 표현되었지만 명 부위는 이치화가 이루어지지 않은 것을 알 수 있다.

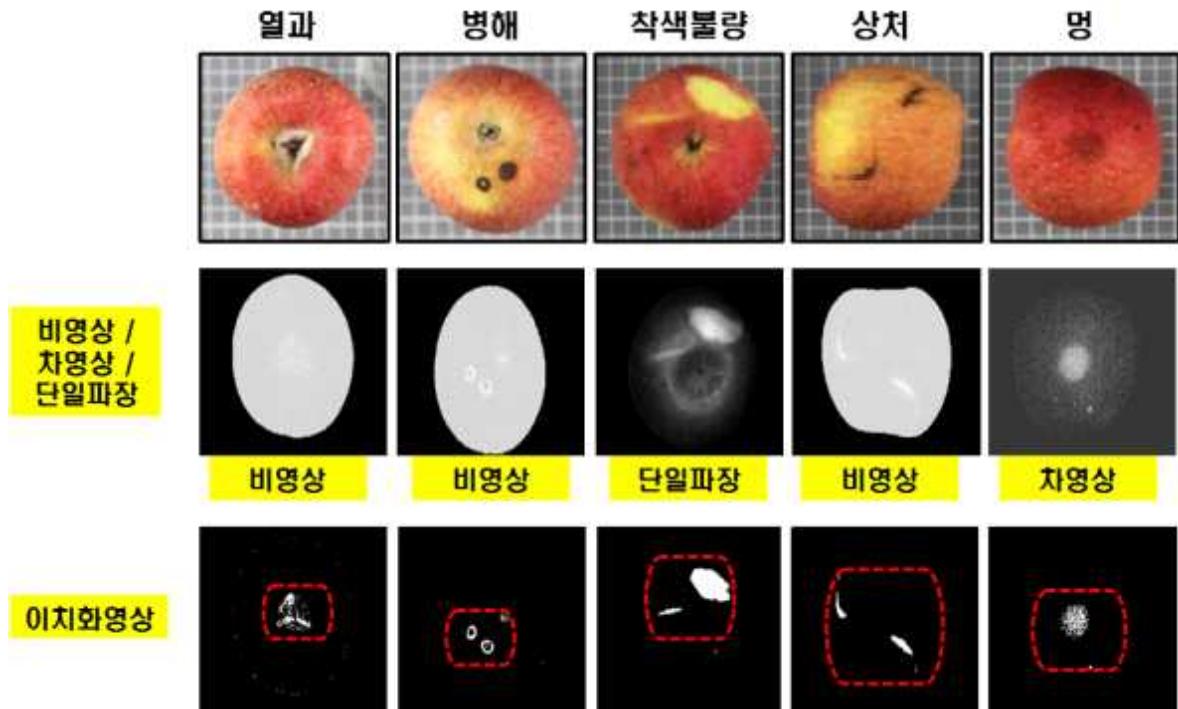


그림 66. 결합 사과 검출을 위한 초분광 영상의 이치화 영상 결과

(4) 그림 66은 그림 65에서의 이치화 영상을 반전시켜서 배경과 정상 부위를 모두 검은 색으로 변환시키고 결합 부위만을 백색으로 표현하여 재구성한 영상으로서 명이 발생한 결합 사과에서는 차 영산을 적용하여 이치화했을 때 결합 부위가 판별되는 것을 확인할 수 있었다.

(5) 그림 67은 3개의 가시광 및 근적외선 파장대역을 선발하여 비 연산, 차 연산을 적용하고 이치화 영상을 구현한 것으로서 열과, 병해, 상처에서는 806.1/782.1 nm의 비 연산에서 결합이 검출되었으며 착색불량은 575.8 nm의 단일파장에서 색상불량 결합을 검출하였고 명 결합은 806.1 - 782.1 nm의 차 연산에서 결합이 검출된 것을 확인할 수 있었다.

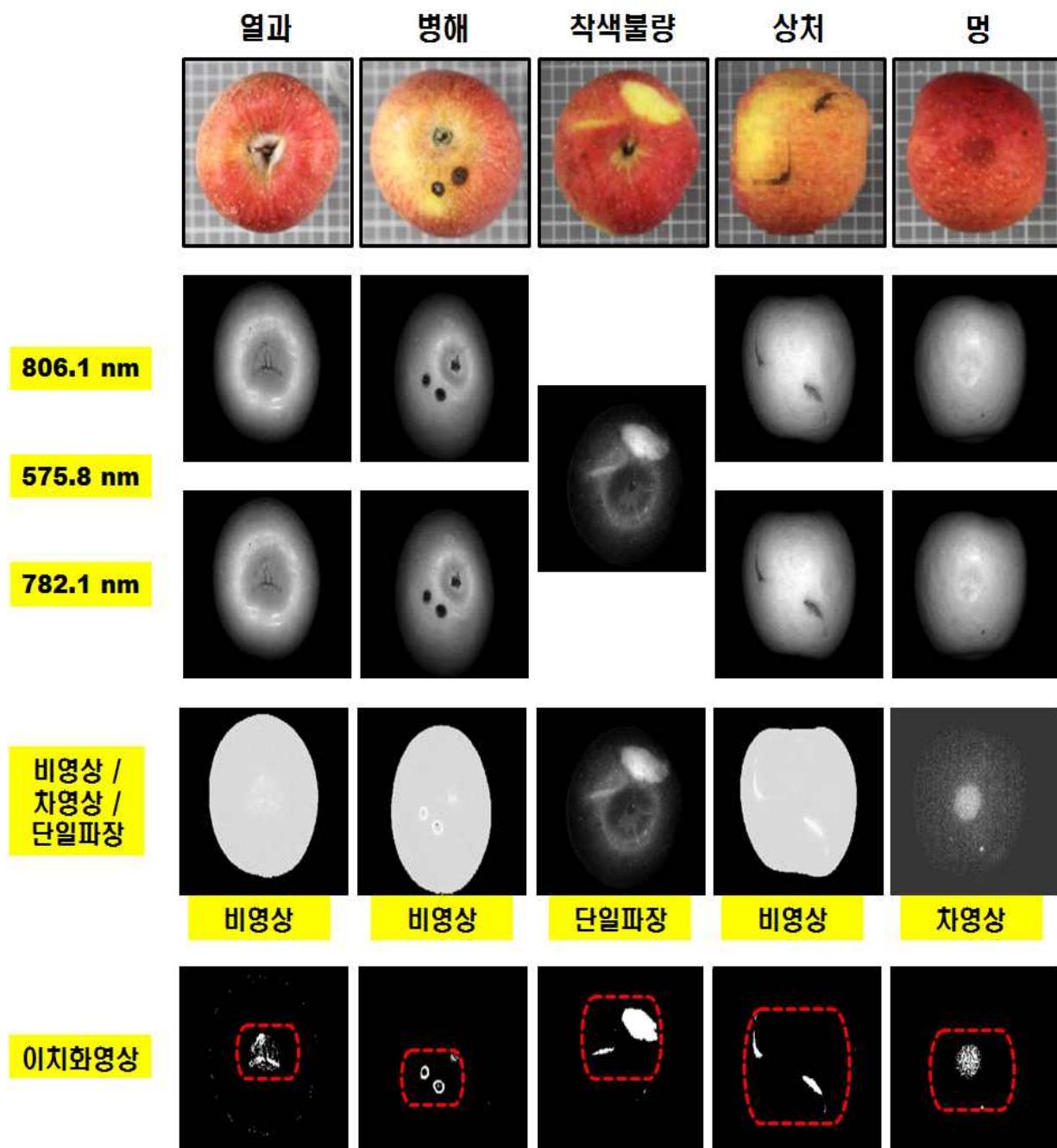


그림 67. 결함 사과 검출을 위한 3개의 파장대역과 초분광 영상의 이치화 영상 결과

## 제4절 사과 전체 표면 결함 검출 메커니즘 설계

### 가. 사과 전체 표면 결함 검출을 위한 메커니즘 검토

사과의 측면 및 상하부를 동시에 스캔하여 영상을 획득하고 영상분석법을 적용하여 표면 결함을 검출하기 위한 시스템을 설계하고자 하였다. 사과의 전체 표면에 대한 영상을 확보하기 위한 기존 상용 영상 측정 시스템과 신규 결함 검출 시스템의 메커니즘(mechanism)을 검토하였다. 사과의 전표면 영상을 획득하기 위한 설계 방식으로 사과를 회전시키면서 전진하는 방식으로 영상획득부에서 영상범위를 조정하여 관심영역(FOV; Field of view)를 사과 2~3개 정도로 확보하고자 하였다. 영상획득부의 영상장치는 초분광 영상 카메라, 2 CCD 카메라, 3 CCD 카메라 등의 카메라를 적용하여 사과 표면 결함 검출 시스템 적용을 검토하였다.

#### (1) 상단 카메라 부착 방식 색상 판별 장치

(가) 사과 표면에 발생하는 결함을 검출하기 위한 파일 선별 시스템에서는 파일의 이송 방법에 따라서 컵(cup), 트레이(tray) 등의 선별 접시위에 놓인 상태이거나 롤러(roller), 그로멧(grommet) 등과 같은 회전 이송장치에 의한 방식을 주로 사용하고 있다.

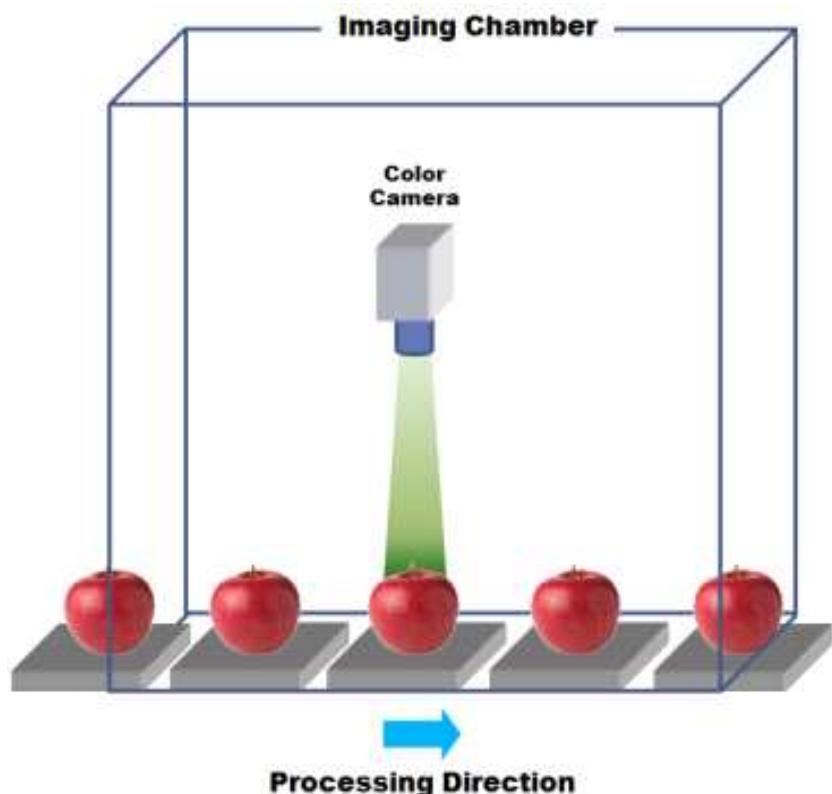


그림 68. 상단 카메라를 이용한 사과 색상 판별 장치 개념도

- (나) 선별 접시 방식은 인력에 의해 사과를 투입하기 전에 육안 검사 후에 꼭지가 위로 향한 상태로 컵 또는 트레이에 올린 상태로 이송되면서 일반 칼라 카메라를 이용하여 색상이나 외부 결함을 판별하고 있다.
- (다) 그림 68과 같이 상단 카메라를 이용한 사과 색상 판별 장치는 이송되는 라인의 상부에 부착된 카메라를 이용하여 꼭지 또는 위로 향해 있는 부분에 대해서만 칼라 영상 측정이 가능하였다.
- (라) 그림 69는 토마토 색상 선별을 위해 현장에 설치된 카메라와 영상 프로그램 화면으로서 이러한 시스템은 측면 및 하부에 대한 결함 검출이 불가능하지만 메카니즘이 단순하고 상대적으로 설치비가 저렴하여 일선 농산물 산지 유통센터의 사과 선별라인에 주로 설치되어 있지만 실효성은 많이 저하되고 있다.

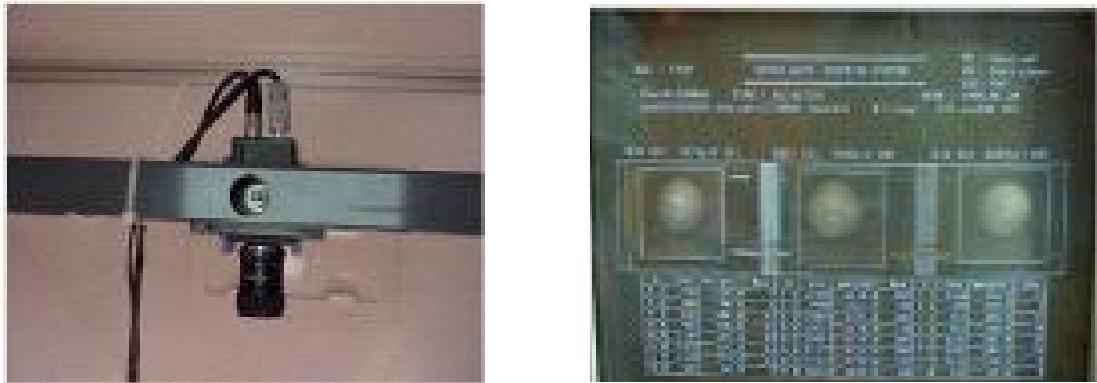


그림 69. 상단 카메라를 이용한 색상 판별 장치

## (2) 상단 및 측면 카메라 부착 방식 색상 판별 장치

- (가) 상단 카메라를 이용한 색상 판별 장치는 기존 선별설비에 카메라만 부착되는 시스템이며 이러한 카메라를 상부이외에 측면에 2대의 칼라 카메라를 추가로 좌우 측에 설치하여 상단 및 측면 영상을 확보하기 위한 시스템도 보급되어 있다.
- (나) 이 시스템에서도 상단 및 좌우측의 영상을 확보함으로써 기존의 상단 카메라 장치만을 이용한 영상획득에 대한 한계를 보완하고자 하였지만 하단부 영상 측정이 불가능하다.
- (다) 사과는 컵 또는 트레이에 안착된 상태로 선별라인을 진행하기 때문에 좌우측의 카메라 영상도 컵이나 트레이 방식에서는 외부에 노출되어 있는 부위에 대한 일부의 측면 영상 획득만 가능하다.

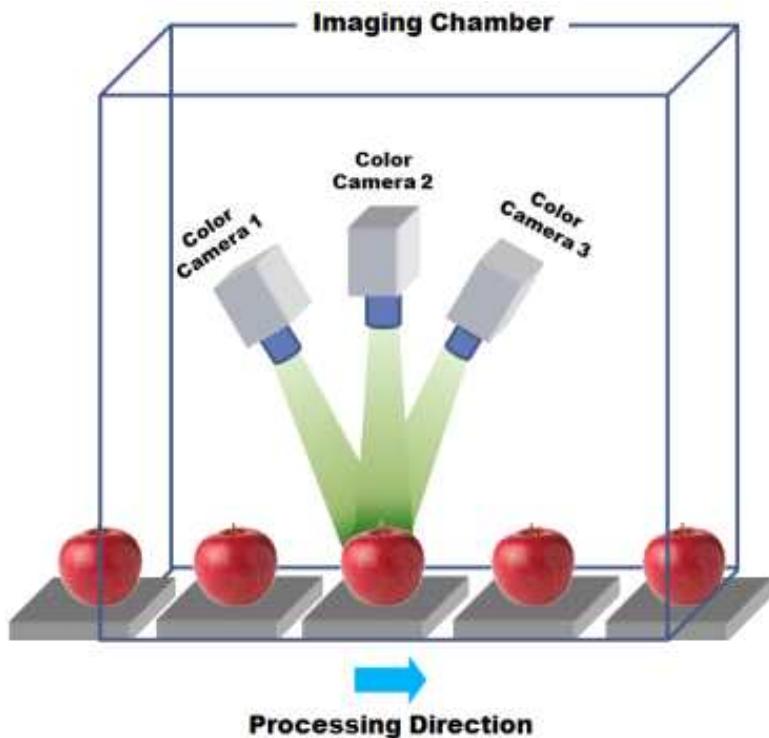


그림 70. 3대의 칼라 카메라를 이용한 색상 판별 시스템

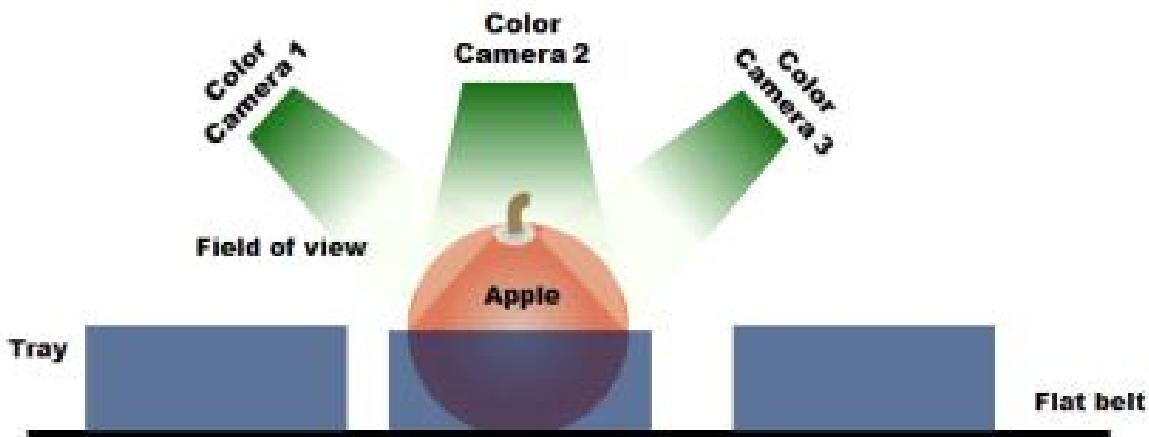


그림 71. 3대 칼라 카메라를 이용한 사과 영상 획득

### (3) 6대의 칼라 카메라를 이용한 사과 전체 표면 영상 판별 시스템

- (가) 사과의 전체 표면을 측정하기 위해 일본에서 개발한 로터리식 RGB 프로그래시브 카메라 측정 시스템은 총 6대의 카메라를 이용하여 사과의 색상(결함 측정 제외)을 선별할 수 있는 시스템을 개발하였다.
- (나) 6대의 카메라 위치는 상부 및 하부에 각각 1대씩 위치하고 있으며 측면영상을 촬영하기 위해서 4대의 카메라가 측면에 장착되어 있다.

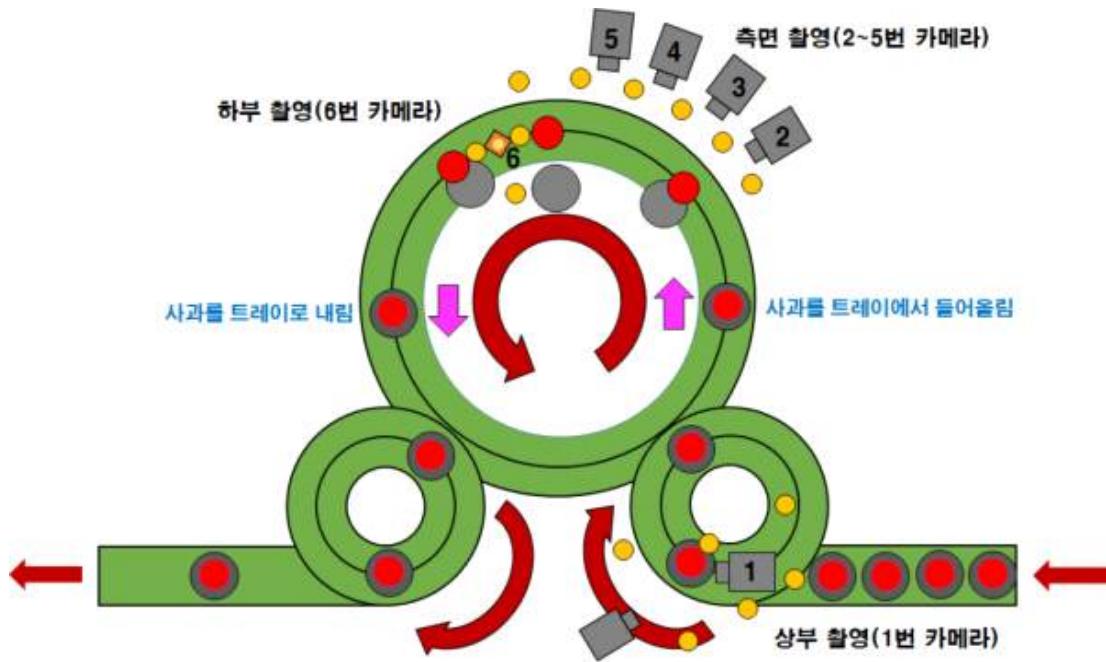


그림 72. 6대의 카메라를 이용한 사과 색상 판별 시스템 평면도

- (다) 이 시스템은 구조가 복잡하고 고가(4억 원/대)이며 공기 압축을 이용하여 사과를 흡착하는 방식으로서 사과의 크기에 따라서 진공 압력에 의한 원물 손상이 발생하는 단점이 있다.
- (라) 크기가 큰 사과를 흡착할 때 진공 압력이 너무 낮을 경우에 영상 측정 시스템을 이동하는 중에 사과가 낙하하여 선별 작업이 중단되는 경우가 발생하기도 한다.

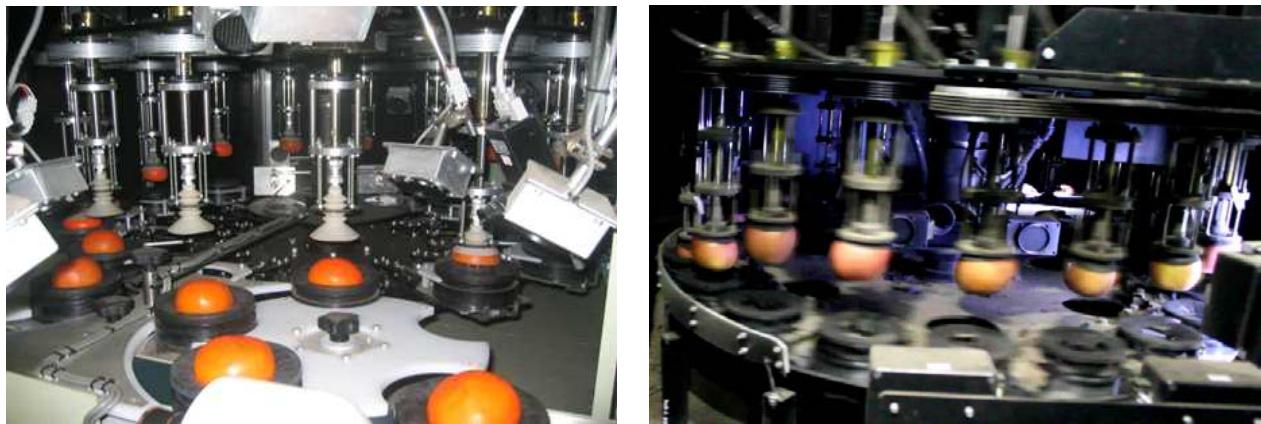


그림 73. 6대 카메라를 이용한 색상 판정 시스템

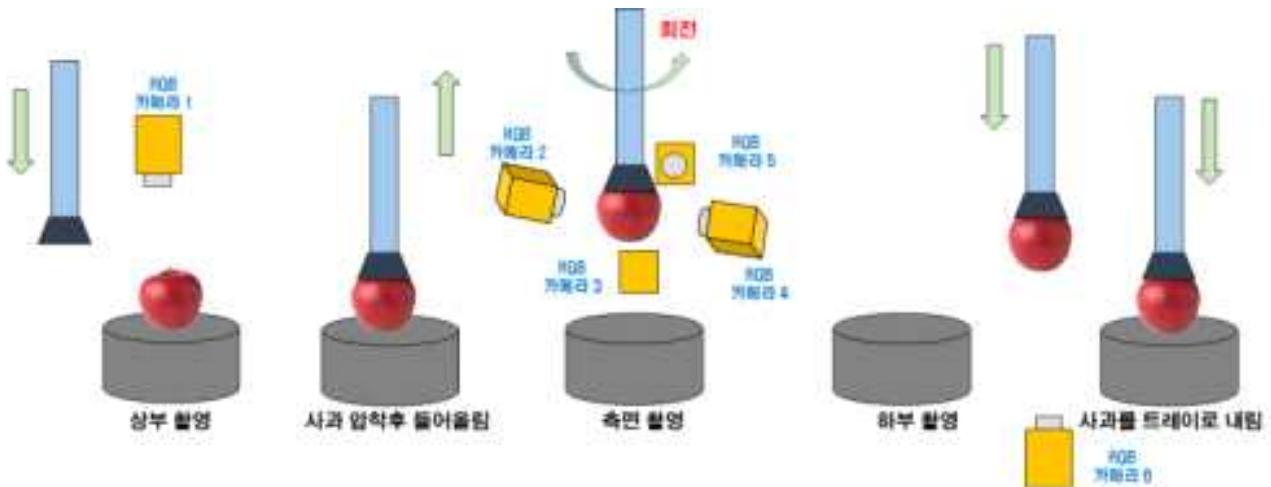


그림 74. 6대 카메라를 이용한 사과 전체 표면 영상 측정 순서

#### 나. 사과 전체 표면 결합 검출을 위한 메커니즘 설계

- (1) 상용 시스템에서 1대 또는 다량의 카메라를 이용하여 상부 또는 전체 표면의 색상만을 검출하는 시스템으로서 트레이에 고정된 사과를 촬영하는 방식이다.

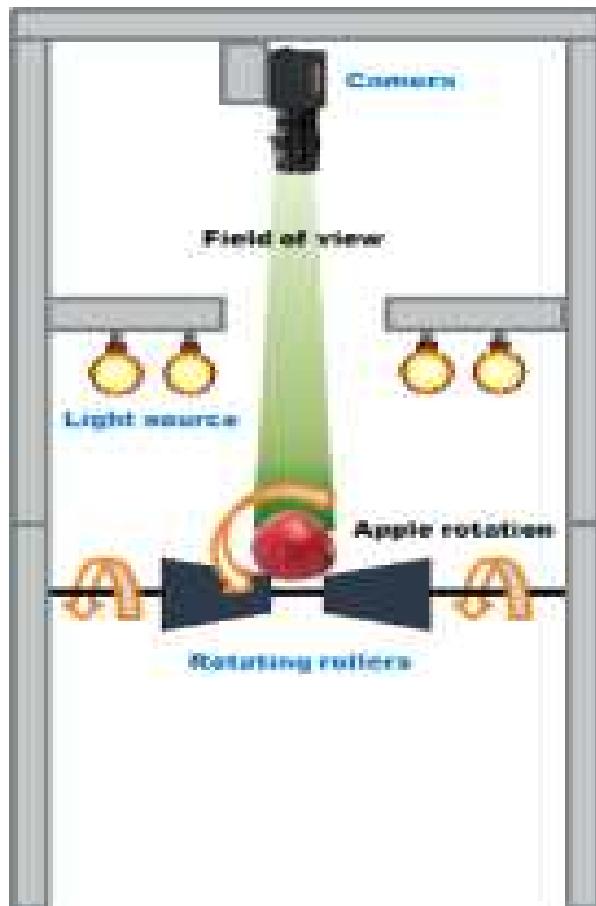


그림 75. 사과 전체 표면 영상 장치 및 롤러

- (2) 본 연구에서는 사과 전체 표면 결함 검출을 위해 1개의 사과에 대해서 4개의 롤러를 이용하여 사과를 회전시키면서 영상장치를 이용하여 사과의 전표면을 스캔하고 표면 결함을 검출할 수 있는 메커니즘을 구현하고자 하였다.
- (3) 시스템 구성은 롤러 회전부, 조명부, 영상획득부, 제어부 등으로 구성하였으며 상단부의 영상부는 3개의 가시광선 및 근적외선 파장 대역이 조합된 3 CCD 카메라, NIR 카메라와 칼라 카메라가 조합된 2 CCD 카메라, 가시광선 및 근적외선 초분광 영상 카메라 등을 적용하고자 하였다.

## 제5절 사과 전체 표면 결함 검출 시스템 제작

사과 전체 표면 결함 검출을 위해 롤러 회전 방식으로 사과를 구동시키고 각각의 롤러를 구동 체인으로 연결하여 직선 방향으로 이송시킬 수 있는 시스템을 제작하였다. 롤러 회전 구동부는 롤러의 회전 속도와 롤러가 연결되어 있는 구동 체인의 이송 속도를 제어할 수 있도록 제작하였으며 영상 획득부는 영상 획득 카메라, 조명 장치, 제어 장치 등으로 구성하였으며 초분광 영상카메라, 2CCD 카메라, 3 CCD 카메라 등이 측정 장치에 마운트될 수 있도록 구조물을 제작하였으며 조명 장치도 추후 요인 실험을 위한 확장성이 용이하도록 제작하였다. 또한 영상 획득장치의 제어부에서는 각각의 카메라 장치를 이용하여 사과의 회전 영상을 측정하고 저장된 이미지를 분석하여 이동 상태에서의 표면 결함을 가능성을 판별하고자 하였다.

### 가. 사과 전체 표면 결함 검출 시스템의 구성

#### (1) 롤러 회전부

사과 전체 표면 결함 검출 시스템의 메커니즘은 사과의 전체 표면 인식을 위한 회전 장치와 초분광 반사 영상 기술을 이용한 내·외부 결합 검출 시스템에서 롤러 회전부는 사과의 표면에 발생되는 열과, 병해, 상처, 착색불량, 명 등을 검출하기 위해 굴림 장치로 구성되며 2개의 롤러가 한조를 이루어 연속적으로 배열되어 구동되는 시스템으로 롤러의 회전 속도와 전진 속도를 제어할 수 있다.

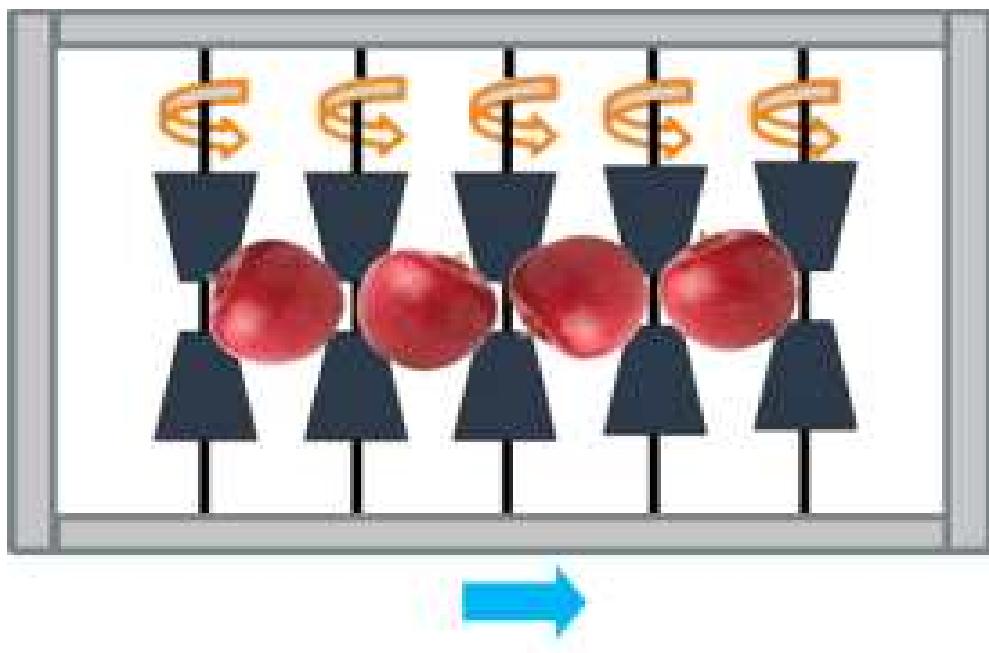


그림 76. 사과 전체 표면 결함 검출을 위한 롤러 회전 장치 모식도

## (2) 영상 측정부

영상 측정부는 총 3대의 카메라를 장착하여 실험을 진행하였으며 각각의 영상장치는 다음과 같다.

### (가) 2 CCD 컬러-NIR 카메라

- ① 사과의 내외부 결함 검출을 위해서는 기존의 단일 칼라 카메라를 이용하는 칼라 영상으로는 한계가 있으며 칼라 영상과 근적외선 영상을 동시에 측정할 수 있는 2 CCD 카메라를 적용하였다.
- ② 연구에 사용된 카메라는 렌즈를 통해서 입력되는 영상은 2 방향 프리즘 빔 분할기(2 way prism beamsplitter)에서 컬러 영상은 가시광선 영역의 380~780 nm 파장 대역에서 영상이 획득되는 CCD 센서로 상이 맷히고 NIR 영상은 근적외선 파장 대역의 750~950 nm에서 영상이 획득되는 CCD 센서로 동시에 상이 맷히는 구조로 되어 있다.

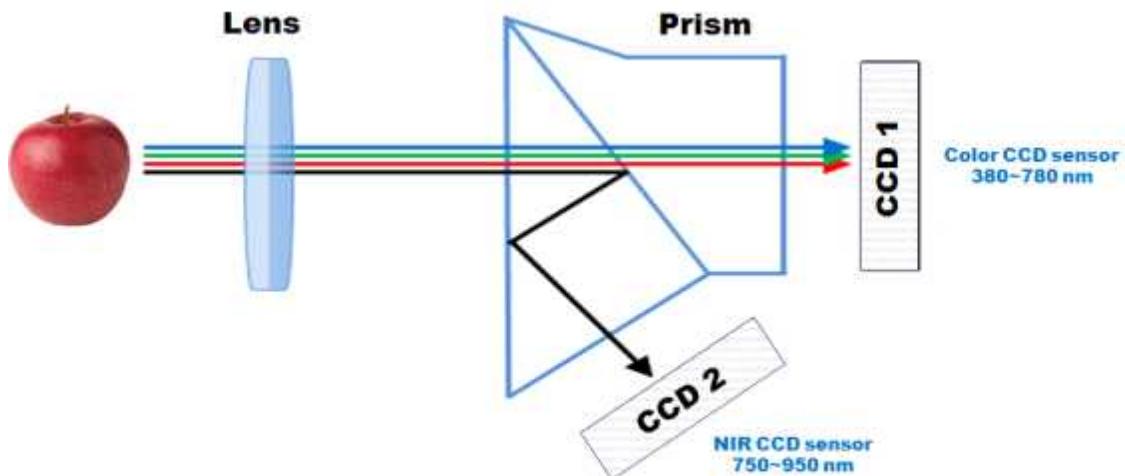


그림 77. 2 CCD 컬러-NIR 카메라 개념도

- ③ 기존의 칼라 카메라 1대와 NIR 카메라를 1대의 카메라로 통합한 장치로서 각각의 카메라를 사용했을 때 발생되는 위상차를 제거할 수 있는 장점이 있지만 특정 파장대역이 아닌 통합된 칼라 영상과 NIR 영상이 획득되는 단점이 있으며 AD-080GE(JAI, Japan)을 사용하였다.

표 2. CCD 카메라의 주요 사양

구 분	특성
카메라 측정 방식	Area Scan
영상 측정 화소	$1024 \times 768$ pixels
영상 획득 방식	RGB 24 bit, near-IR 8 bit
초당 프레임수	30
스캐닝 모드	프로그레시브 스캔(Progressive Scan)
파장 범위	380~780, 750~950 nm
작동 온습도 범위	0°C to 40°C, RH 90% or less
치수	55 (H) x 55 (W) x 98.3 (L) mm

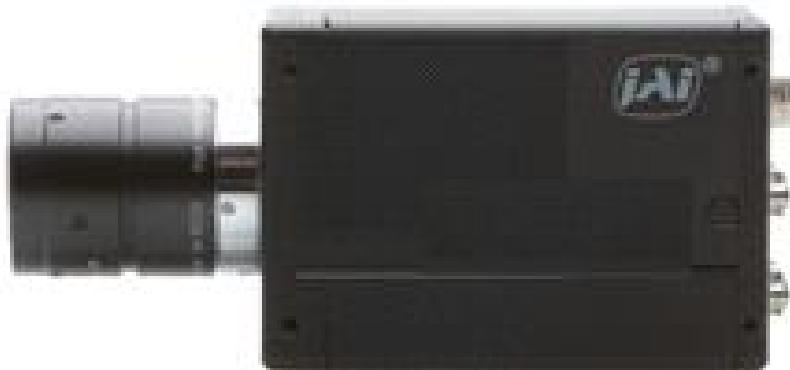


그림 78. 실험에 사용된 2 CCD 카메라(AD-080GE)

## (나) 필터 교체형 3 CCD 카메라

- ① 필터 교체형 3CCD 카메라는 3개의 가시광선 및 근적외선 파장 대역에서 선택된 특정 파장을 적용할 수 있도록 제작된 카메라로서 F-마운트 렌즈를 통해서 들어온 영상은 3 방향 프리즘 빔 분할기(3 way prism beamsplitter)를 통해서 3 방향으로 장착되어 있는 CCD 센서로 각각 가시광선 또는 근적외선 영상이 형성되는 구조이다.
- ② 각각의 CCD 센서 앞에는 25 mm 구경의 밴드 패스 필터가 특정 파장대역의 광을 통과시켜서 CCD 센서에 영상을 맷하게 하며 본 연구에서 적용된 3가지 필터는 590, 740, 900 nm가 선택되어 장착되었다.

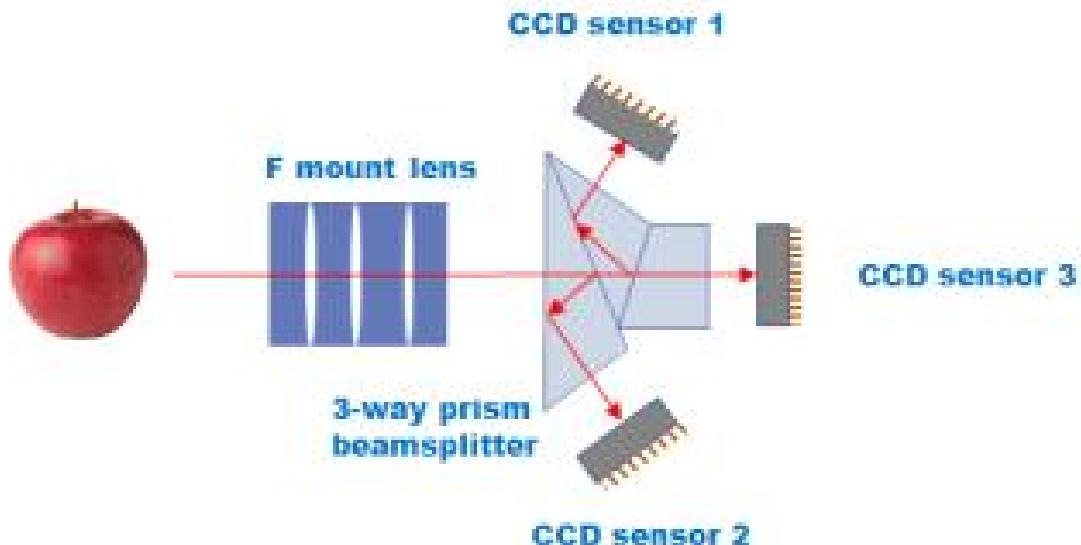


그림 79. 3 CCD 카메라의 센서 배열 및 프리즘 개념도

- 렌즈를 통해서 들어온 광은 빔 분할기와 광학적 필터인 밴드 패스 필터를 통과하면서 광의 세기가 감소되어 기타 카메라보다 광의 세기를 상대적으로 강한 램프를 사용해야 하는 단점이 있으며 동일한 광을 사용할 시에는 CCD 센서의 감도에 따라 영상의 선명도가 약해지게 됨



그림 80. 필터 교체형 3 CCD 카메라의 측정 개념도와 장치

#### (다) 가시광선 및 근적외선 초분광 영상 카메라

초분광 영상 카메라가 전체 가시광선 및 근적외선 파장대역에서 밴드별로 영상을 획득할 수 있으며 본 연구에서는 파장대역이 400~1000 nm인 카메라를 장착하여 사용하였다.

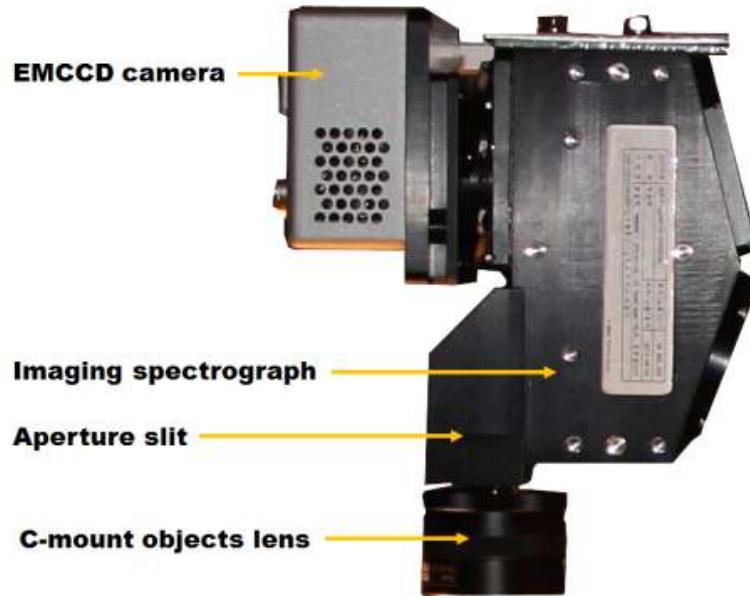


그림 81. 가시광선 및 근적외선 초분광 영상 카메라

#### 나. 사과 전체 표면 결함 검출 시스템의 설계 및 제작

##### (1) 시스템 설계

사과 전체 표면 결함 검출 시스템의 설계를 위해 롤러 회전부와 이를 제어할 수 있는 제어부, 영상 측정부와 영상 측정 제어부 등으로 구성하였으며 영상 측정 제어부와 롤러 회전 제어부는 추후 통합된 하나의 시스템으로 조합할 예정이며 시작기는 각각의 제어부로 나누어 설계하였다.

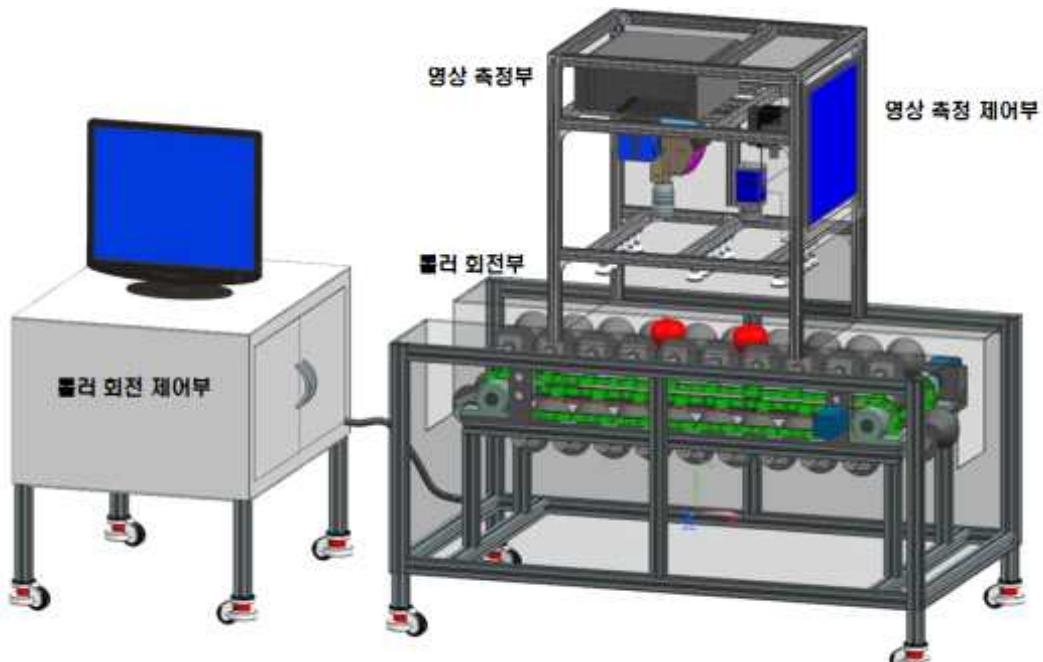


그림 82. 사과 전표 표면 결함 검출을 위한 1차 시작기

## (2) 영상 측정부

- (가) 영상 측정부에는 가시광선 및 근적외선 초분광 영상 카메라, 2 CCD 카메라, 3 CCD 카메라를 비롯하여 3열의 램프, 제어용 pc와 모니터를 장착할 수 있도록 설계하였다.
- (나) 조명장치는 가시광선 파장대역에서의 컬러 영상과 근적외선 파장대역에서의 근적외선 영상을 별광하는 램프를 광원으로 선택하였다.
- (다) 각각의 카메라 장치의 FOV가 동시에 확보되지 못하기 때문에 1열과 2열 사이의 램프에는 2 CCD 카메라와 3 CCD 카메라를 장착시켰으며 2열과 3열 사이의 램프에는 초분광 영상 카메라를 장착시켰다.

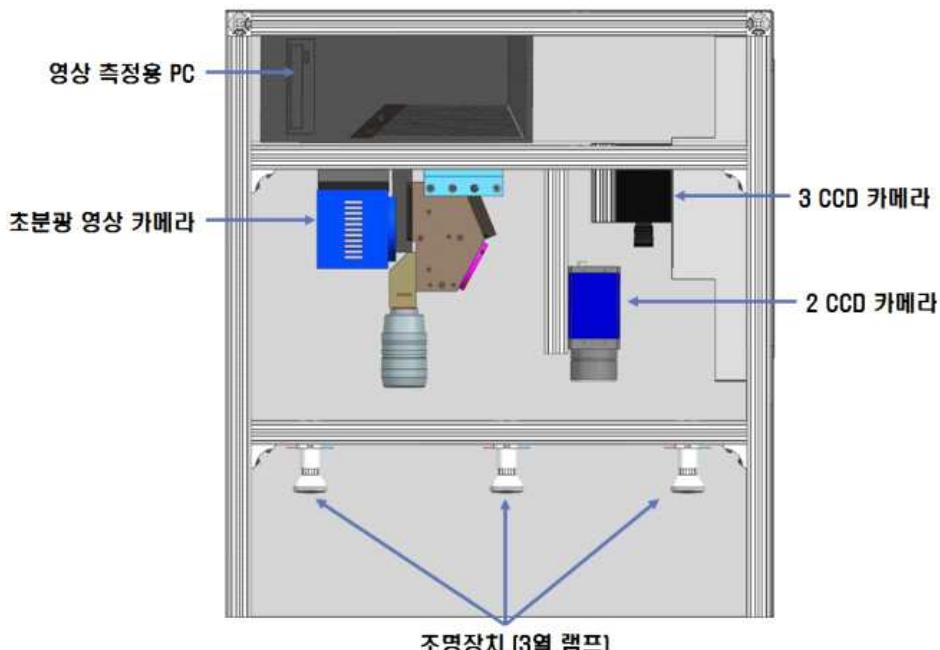


그림 83. 사과 결함 측정 시스템의 영상 측정부

## (3) 롤러 회전부

- (가) 사과를 회전시키기 위한 회전 롤러를 좌우측으로 배열하여 구동 체인으로 서로 연결하여 전진 방향으로 이송할 수 있고 롤러의 간격은 조절 가능하도록 설계하였다.
- (나) 카메라의 시각 영역을 통과하는 동안에 FOV와 전체 표면을 스캔할 수 있는 회전 속도를 구현하기 위해서 자전 속도와 전진 속도를 제어할 수 있는 서보 모터를 각각 장착하여 설계하였다.

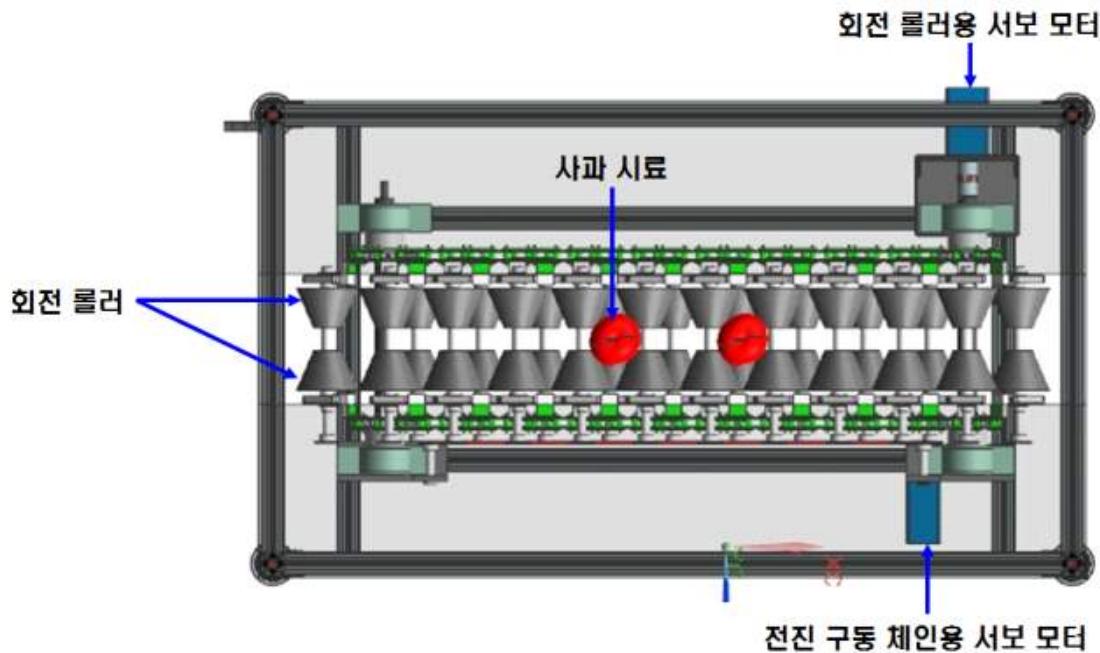


그림 84. 사과 결합 측정 시스템의 롤러 회전 및 구동부

#### (4) 사과 전체 표면 결합 검출 시작기 제작

- (가) 사과 표면 결합 검출 시작기는 사과의 전체 표면을 영상으로 확보하기 위해 롤러 회전부 상단에 영상 챔버를 장착시켰으며 롤러의 자전 속도와 구동 체인의 전진 속도를 제어하기 위한 롤러 회전 제어부를 조합하여 제작하였다.
- (나) 제작된 시작기는 사과를 비롯한 구형상의 과일에 대한 추가 실험을 진행할 수 있으며 사용자가 설정한 일정한 속도로 자전이 가능하며 분당회전속도(RPM)로 조절하며 전진 이송 속도는 최소 1 mm/s에서 최대 1 m/s로 제어가 가능하였다.
- (다) 제작된 시스템은 사과를 비롯한 구형상의 과일에 대한 추가 실험을 진행할 수 있으며 사용자가 설정한 일정한 속도로 자전이 가능하며 분당회전속도(RPM)로 조절하며 전진 이송 속도는 최소 1 mm/s에서 최대 1 m/s로 제어가 가능하다.
- (라) 롤러 회전부의 롤러와 롤러 사이의 간격인 피치는 115 mm로 제작되었으며 롤러의 폭은 기본 180 mm이며 한쪽의 롤러를 조절하여 폭 조절이 가능하도록 하였다.

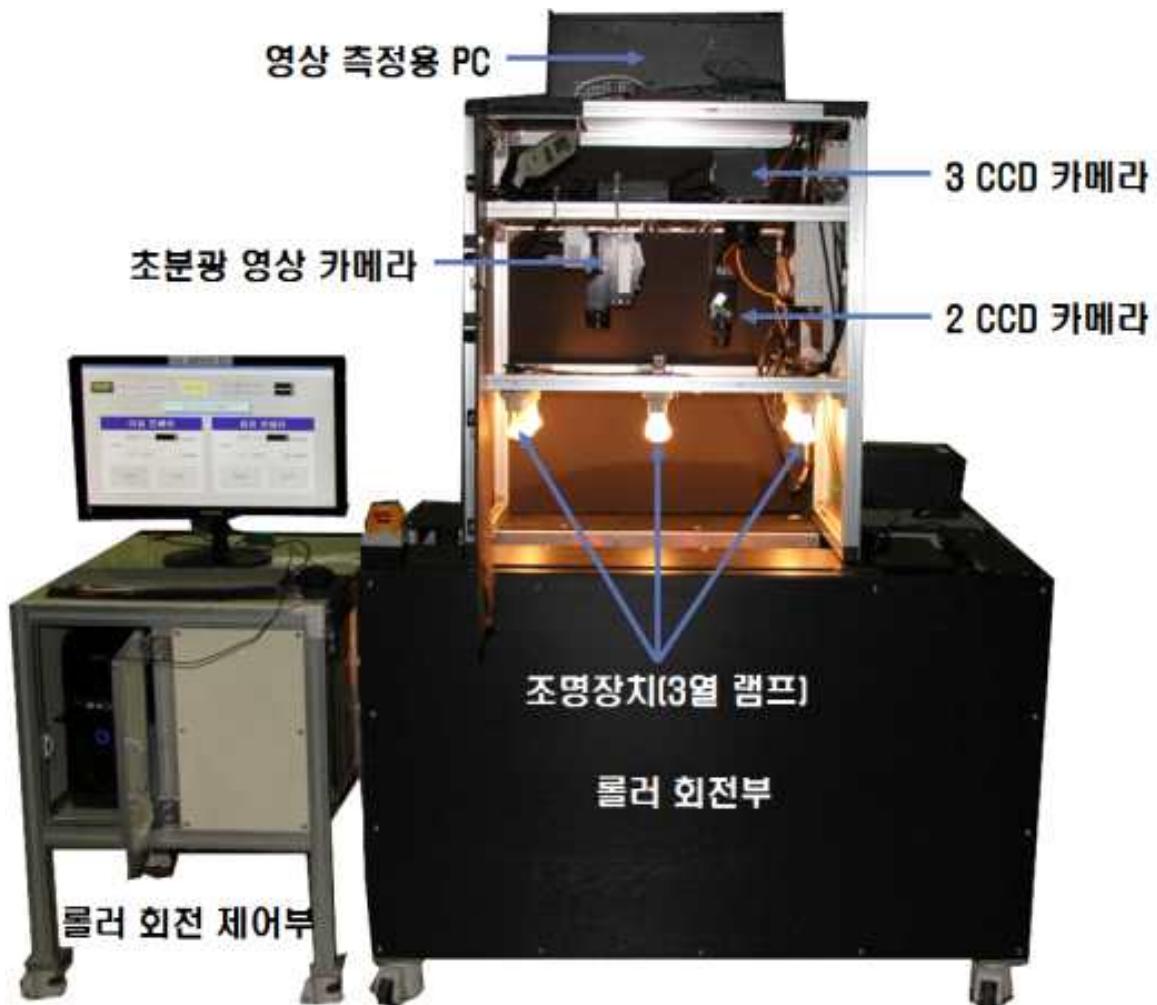


그림 85. 제작된 사과 표면 결함 검출을 위한 시스템



그림 86. 롤러 회전 제어 프로그램(1차)



그림 87. 사과를 회전시키기 위해 제작된 구동 롤러

다. 이동 상태에서의 표면 결함용 검출용 알고리즘 및 프로그램 개발

(1) 사과 회전 영상 획득을 알고리즘 개발

제작된 사과 전체 표면 결함 검출 시스템의 초분광 영상카메라, 2CCD 카메라, 3 CCD 카메라로부터 측정된 영상을 이용하여 결함 검출 알고리즘 및 프로그램을 개발하였다.

(1) 파장대역이 987~1701 nm인 근적외선 초분광 영상 시스템을 이용하여 내부 결함의 한 종류인 갈변이 발생된 사과를 대상으로 하였다.

(가) 롤러 회전 장치에 의해 회전하는 사과는 카메라의 촬영 영역에 전체 표면이 노출되어야 하며 이를 수치적으로 계산하여 영상 획득을 위한 알고리즘 개발에 적용하였다.

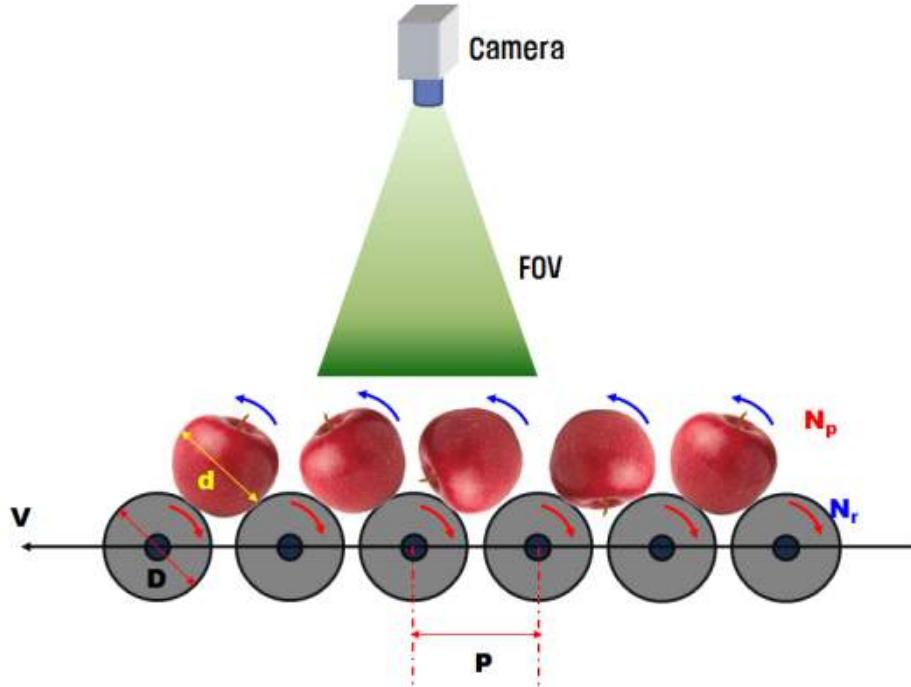


그림 88. 사과 회전 영상 획득을 위한 롤러와 사과의 회전속도 산출

- (나) 상단의 카메라에서 2개의 사과를 관심영역(Field of view; FOV)으로 확보하고자 할 때 롤러가 반시계 방향으로 전체가 회전할 때 롤러의 회전방향과 반대로 사과는 시계 방향으로 회전하게 된다.
- (다) 롤러 회전 장치가 일정한 거리( $s$ )를 직진하는 동안에 롤러의 회전속도( $N_r$ )과 직경( $D$ ), 사과의 회전속도( $N_p$ )와 직경( $d$ ) 사이에는 다음과 같은 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\text{롤러의 회전속도, } N_r = \frac{s}{\pi D} \quad (1)$$

$$\text{사과의 회전속도, } N_p = \frac{s}{\pi d} \quad (2)$$

$$\text{롤러와 사과의 회전 비율, } \frac{N_p}{N_r} = \frac{D}{d} \quad (3)$$

- (라) 수식(2)에서와 같이 단위 거리를 움직이는 동안에 사과의 회전속도는 롤러의 회전속도 또는 물체의 직경과는 무관하게 사과의 직경에 반비례하는 것을 알수 있으며 사과의 직경인  $d$  값으로 측정한 사과의 직경을 80 mm로 가정했을 때 FOV의 전진 거리를 300 mm로 설정하였을 경우에 사과는 카메라의 영상획득시에 평균 1.19 회전하게 된다.

- (마) 롤러 회전 장치에서 롤러는 전진을 하면서 반시계 방향으로 회전하게 되고 롤러

위에 올려진 사과는 전진을 하면서 시계방향으로 회전을 하게 되며 이때 롤러의 직경(D), 롤러 중심 사이 간격인 피치(P), 롤러의 원주속도( $V_r$ ) 및 전진속도( $V_{rf}$ ), 사과의 원주 속도( $V_c$ ) 및 전진속도( $V_{cf}$ )는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{사과의 원주속도, } V_c = -V_r \text{ [m/s] 또는 } n_c = \frac{DN_r}{d} \text{ [rev/s]} \quad (4)$$

$$\text{사과의 전진속도, } V_{cf} = V_{rf} \quad (5)$$

$$\text{사과가 거리 } s \text{를 이동하는데 소요되는 시간, } t = \frac{s}{V_{rf}} \text{ [s]} \quad (6)$$

## (2) 사과 회전 영상의 획득

### (가) 2 CCD 카메라를 이용한 회전 사과의 컬러 및 NIR 영상 획득

- ① 2 CCD 카메라를 이용하여 가시광선 영역인 380~780 nm 파장 대역에서 획득한 RGB 컬러 영상과 근적외선 영역인 750~950 nm 파장 대역에서 획득한 NIR 영상에 대한 회전 사과의 영상을 획득하였다.

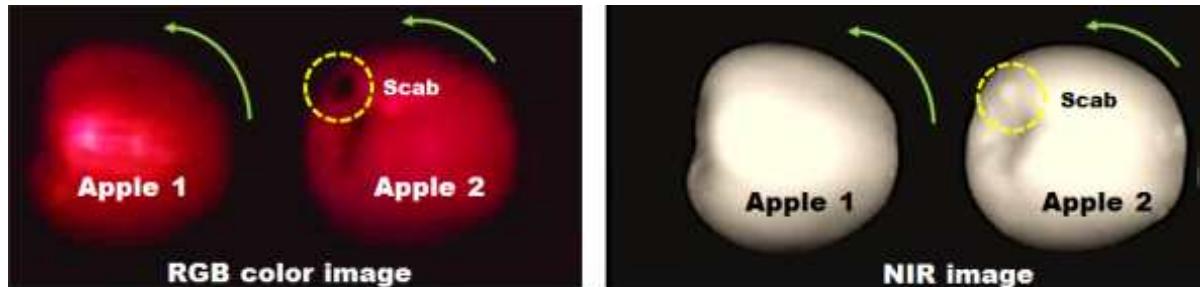


그림 89. 2 CCD 카메라를 이용한 회전 사과의 컬러 및 NIR 영상의 획득

- ② 영상 챔버의 상단에 부착된 2 CCD 카메라에서 높이에서 획득되는 FOV는 사과 2개의 영상을 동시에 획득할 수 있으며 꼭지 부분에 결함이 있는 사과를 회전 롤러로 구동시켰으며 전진 이송은 진행되지 않았다.
- ③ 1초 동안 30프레임의 영상을 획득하였으며 대략 1프레임당 33 ms(1000ms/30frame)간격으로 추출되었다.

### (나) 결함 검출을 위한 회전 사과의 영상 획득

- ① 하단의 영상은 2개의 회전 사과에 대해 1초 동안 획득한 30프레임의 영상을 나타낸 것으로서 2번째 사과가 먼저 결함이 검출되기 시작하였다.

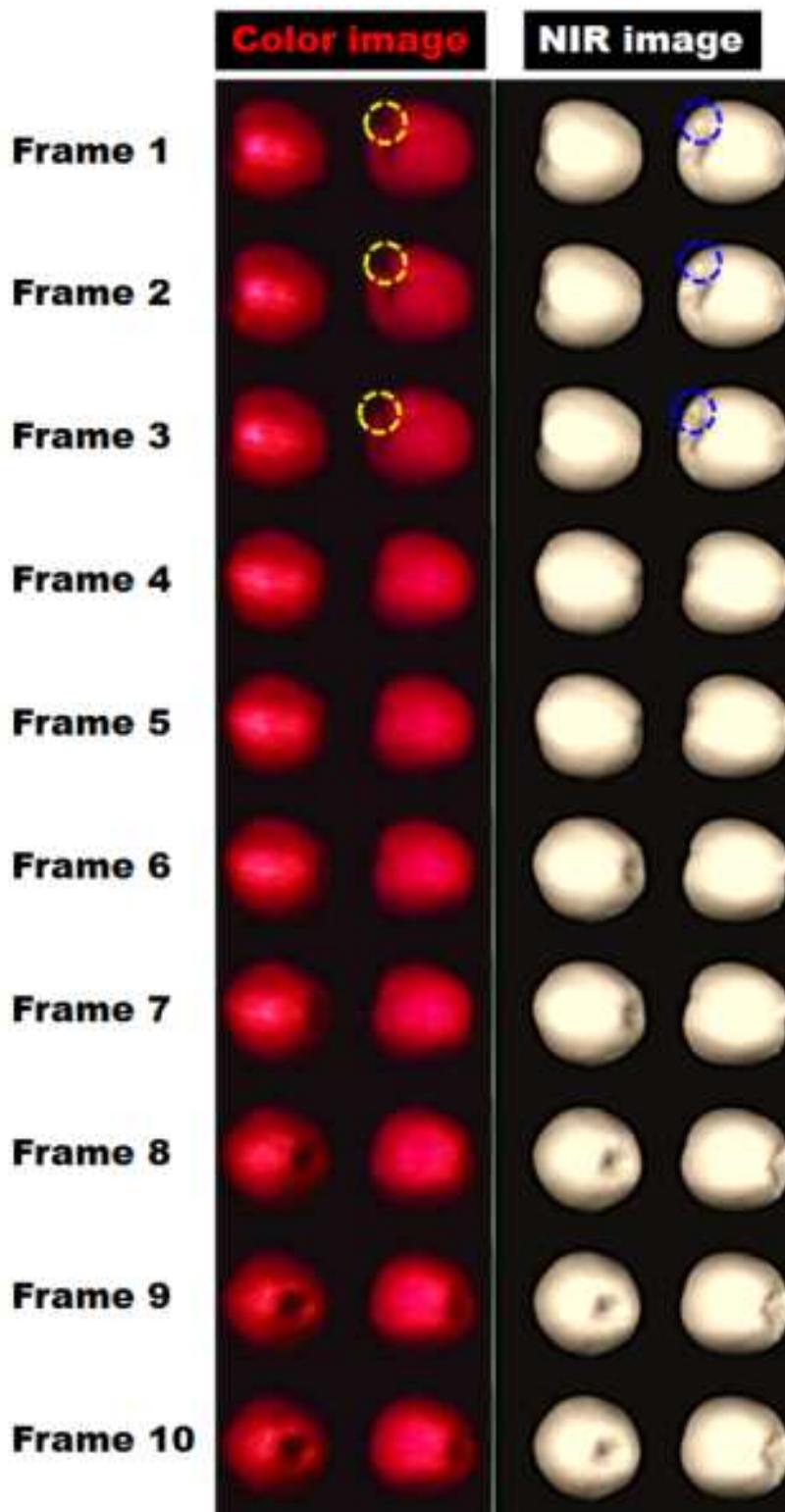


그림 90. 1~10번 컬러 및 NIR 프레임 영상

② 1번 사과는 15 프레임 영상에서부터 결함이 검출되어 23 프레임까지 8프레임까지 266 ms 동안에 표면 결함이 노출되었으며 2번 사과는 1~3, 18~28 프레임까지 총 13프레임 동안에 표면 결함이 측정되었다.

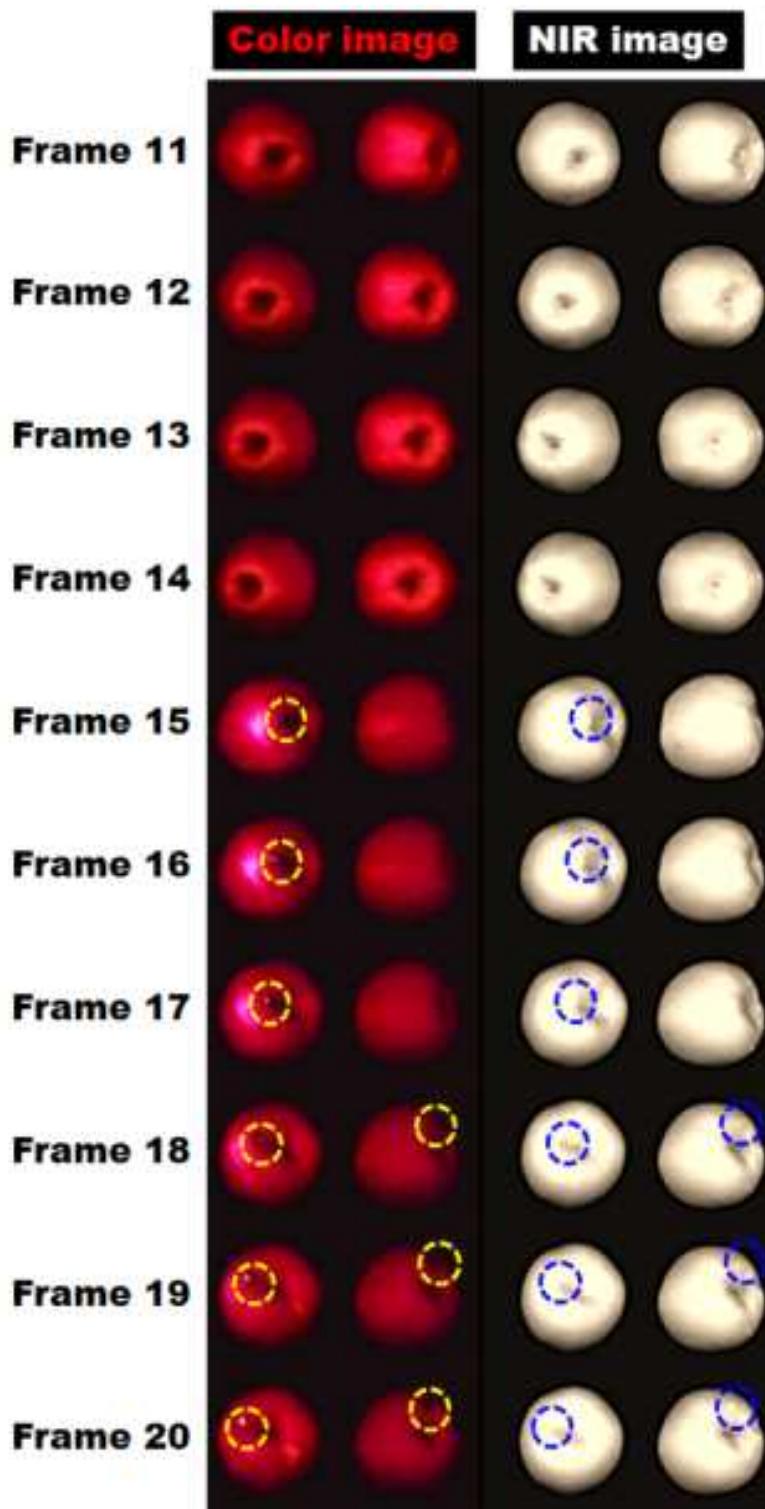


그림 91. 11 ~ 20번 컬러 및 NIR 프레임 영상

③ 사과의 동일한 부위에 결함이 발생한 사과가 롤러에 놓인 방향에 따라 동일한 롤러의 회전속도에서 결함이 노출되는 횟수 차이가 발생하였으며 추후 결함이 사과의 정중앙에 놓여져 있을 때의 최소 노출 횟수를 산출할 필요가 있을 것으로 판단되었다.

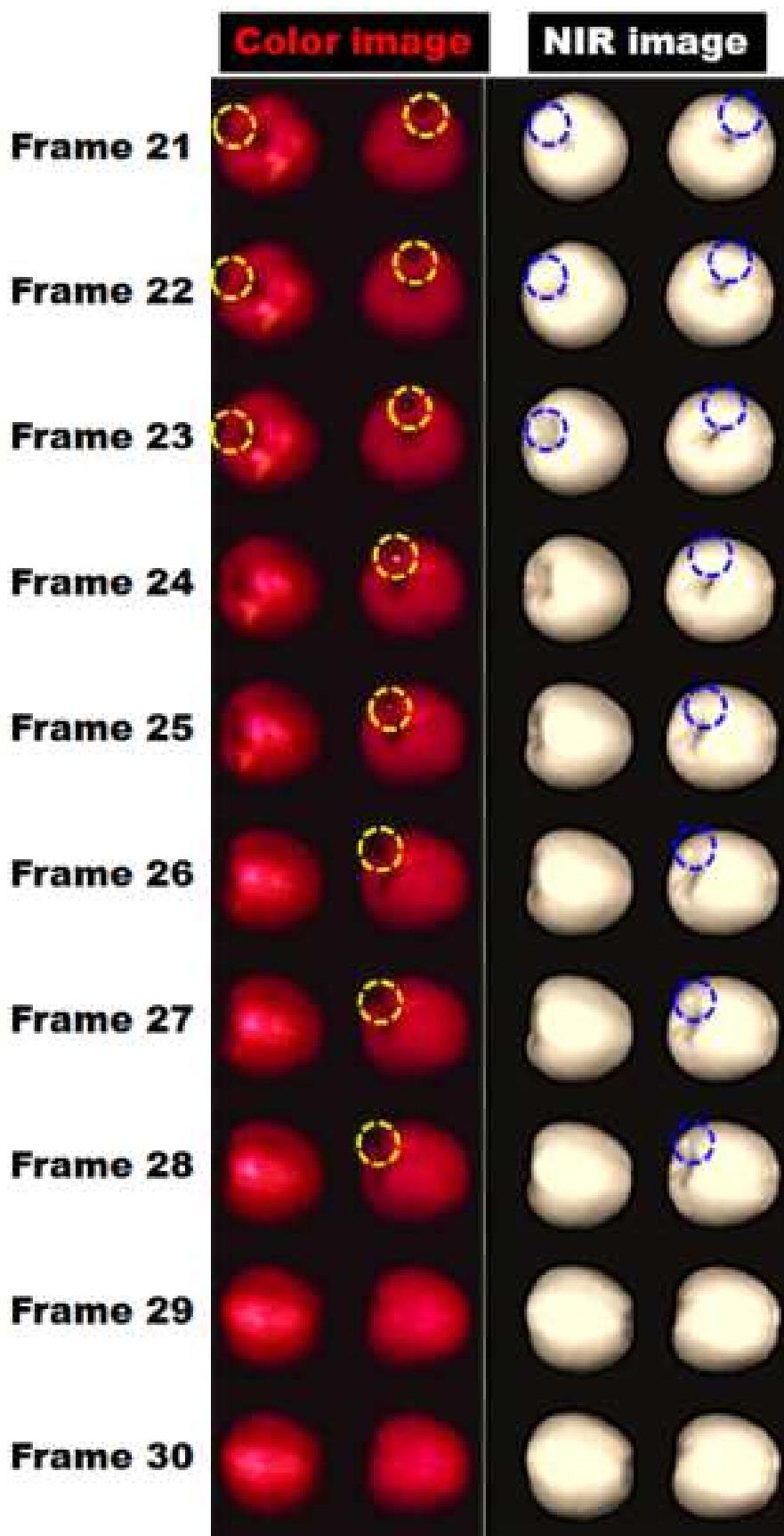


그림 92. 21~30번 컬러 및 NIR 프레임 영상

(다) 3 CCD 카메라를 이용한 회전 사과의 영상 획득 프로그램 개발

- ① 3 CCD 카메라를 이용하여 3파장의 밴드 패스필터(590, 740, 900 nm)를 이용하여 획득한 정지 사과를 측정하였으며 각각의 영상 획득을 확인하였다.
- ② 3 CCD 카메라를 이용하여 초당 30 프레임의 촬영 속도로 회전하면서 진행하는 사과로부터 590, 740, 900 nm 파장 대역의 영상을 획득하였으며 시료에 대한 물리적인 위상차는 발생하지 않은 것으로 판단되었다.
- ③ 590 nm 파장 대역에서는 색상 불량이나 외부 결함을 영상으로 확인하기에는 감도가 양호하지 못했으며 단일 파장 대역으로는 사과의 결함을 검출하기에는 한계가 있으며 비영상, 차영상 등의 검출 알고리즘을 적용하여 이치화 영상을 구현한다면 결함을 검출할 수 있을 것이다.
- ④ 획득된 영상은 광학적 필터에 의한 광 세기가 감소되어 영상의 화질과 선명도가 저하되는 문제가 발생되었으며 추후 광포화(light saturation)가 발생되지 않는 범위내에서 추가적으로 광을 적용하여 근적외선 영상 획득할 필요가 있다.

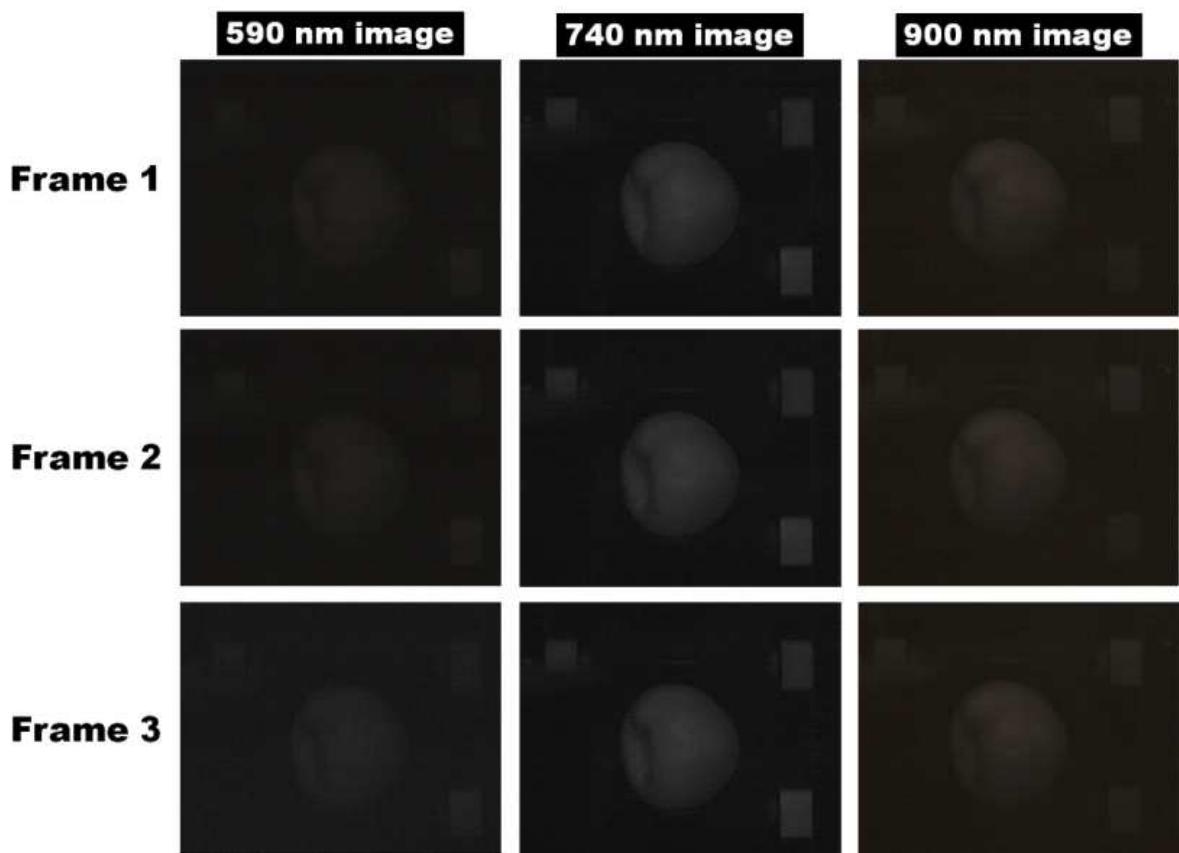


그림 93. 3 CCD 카메라로부터 획득된 590, 740, 900 nm 파장 영상

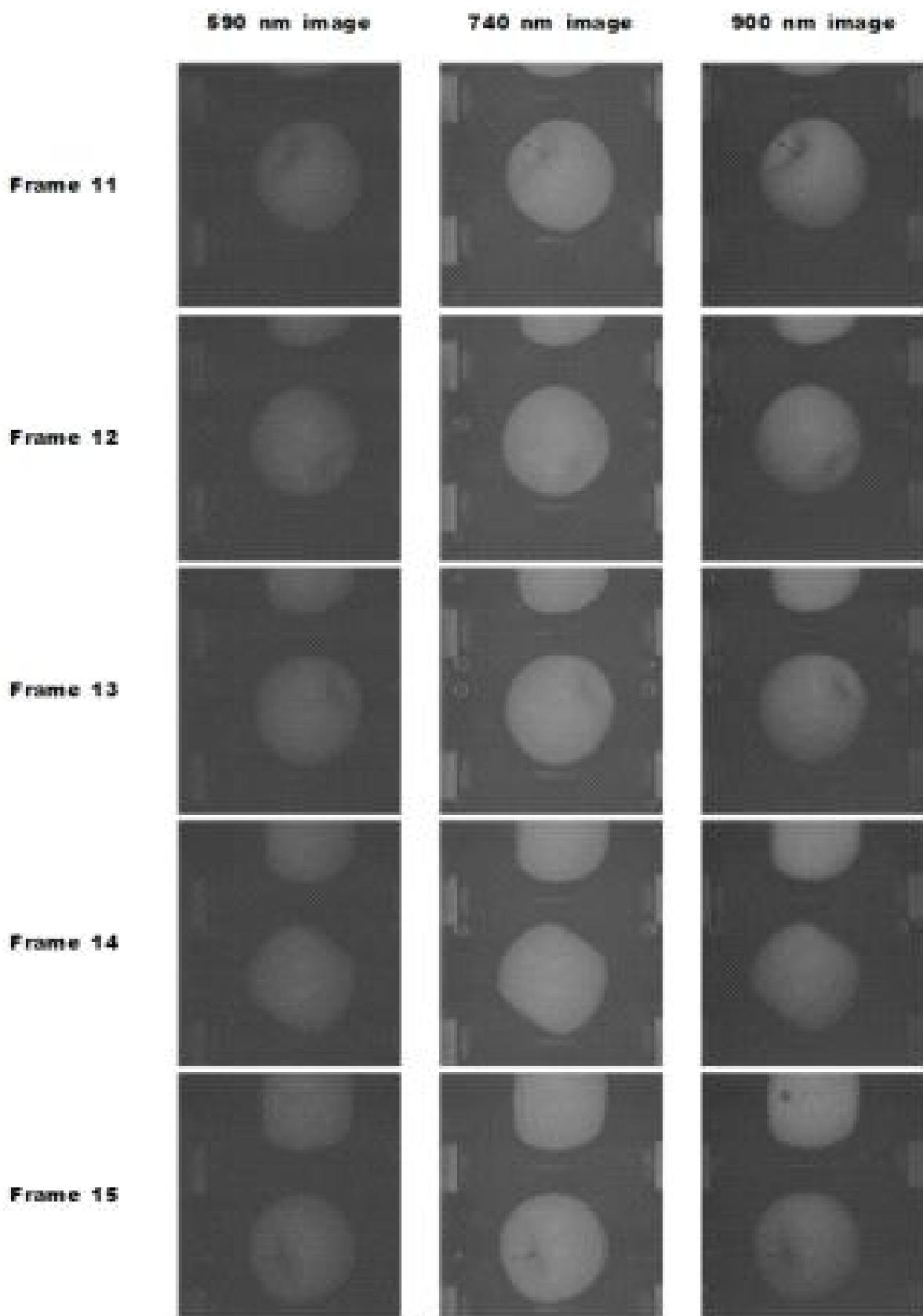


그림 94. 3 CCD 카메라로부터 획득된 회전하는 사과의 590, 740, 900 nm 파장 영상

(라) 초분광 영상 카메라를 이용한 회전 사과의 영상 획득

- ① 하단의 영상은 가시광선 및 근적외선 초분광 반사 영상으로 획득한 회전 사과의 영상으로 라인 스캔으로 획득되어지는 영상으로 인해 사과의 영상이 연속적으로 저장되었다.
- ② 사과 표면에 1 cm 직경의 이물질을 부착시킨 후 회전 사과에서 영상에서 검출되는 것을 확인할 수 있었다.

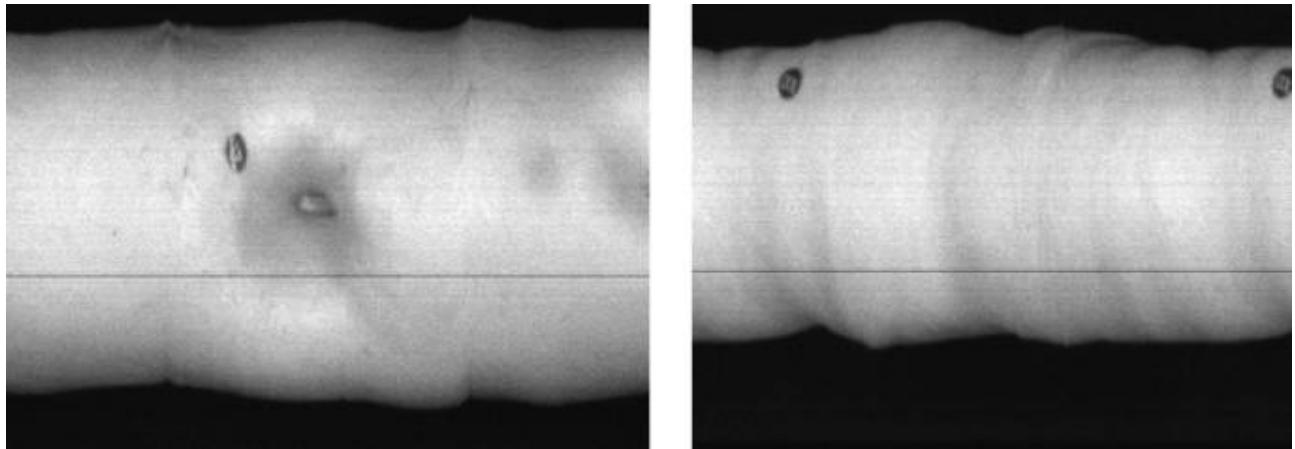


그림 95. 회전 사과의 VNIR 초분광 반사 영상

#### 라. 근적외선 초분광 반사 영상을 이용한 내부 갈변 검출

근적외선 초분광 반사 영상 시스템을 이용하여 이동 상태에서의 내외부 결함 검출에 대한 가능성을 검토하기 위한 사과 내부 갈변 검출 실험을 수행하였다. 가시광선 및 근적외선 초분광 영상에 대해서 선발된 3개의 최적 파장을 적용하여 사과 내부 결함(갈변, 곰팡이병, 밀병 등)에 대한 검출 판별률을 검토하였다.

##### (1) 공시재료

- (가) 실험에 사용된 사과는 경북 문경에서 생산된 후지 품종의 사과로서 전체 106 개의 사과를 준비하였으며 이중에서 내부 결함이 발생한 사과들 중에서 주로 갈변이 발생된 불량 사과 61개와 내부 상태가 정상으로 확인되는 사과 45개를 사용하였다.
- (나) 시료로 제공된 사과는 비파괴 당도선별기를 이용하여 밀병, 갈변, 내부 곰팡이 썩음병 등의 내부 이상으로 판별되어 선별된 것으로서 157개의 사과를 제공받았다.
- (다) 전체 106개의 사과들은 외부에서 육안으로 확인했을 때는 내부 이상 유무를 판별할 수 없을 만큼 외형상의 차이점은 없었으며 근적외선 초분광 반사 스펙트럼을 획득하고 실험이 완료된 후에 꼭지가 위로 향하는 방향을 기준으로 횡단면(transverse section)으로 절단하여 내부 갈변 유무와 정상 여부를 판단하였다.

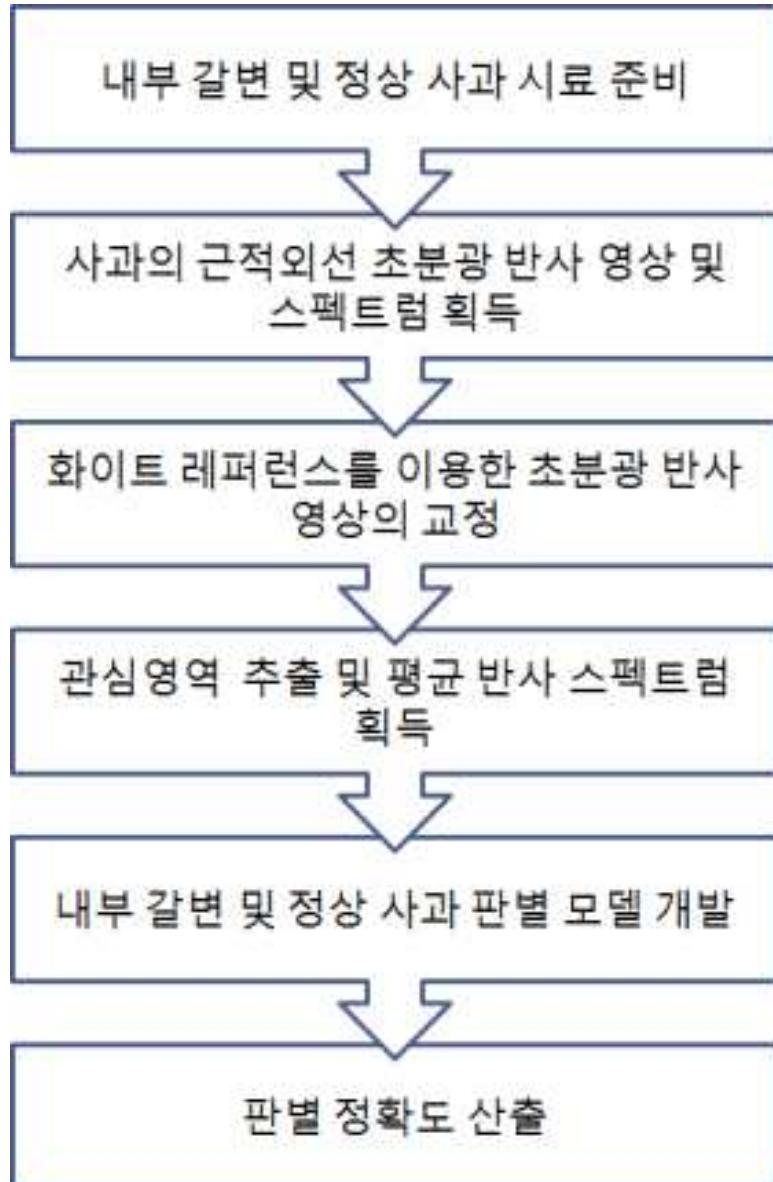


그림 96. 내부 갈변 검출 과정

(2) 근적외선 초분광 영상시스템(Near infrared hyperspectral imaging system)

- (가) 시스템 구성 : 영상 분광기(imaging spectrograph), 640×512 픽셀로 구성된 InGaAs(indium gallium arsenide) FPA 카메라(focal-plane-array camera), 150 W 텅스텐-할로겐(tungsten-halogen lamp), 25 $\mu\text{m}$  슬릿(slit), 시료 이송 테이블, 35 mm focal length 렌즈 등으로 구성되어 있다.
- (나) 반사 스펙트럼의 측정은 사과 2개를 시료 이송테이블에 위치시키고 노출시간(exposure time)은 20 ms, 스텝핑 모터에 의한 1회 라인스캔의 이동 거리는 0.5 mm로 설정하였으며 전체 500회를 스캔하여 반사 영상과 스펙트럼을 획득하였다

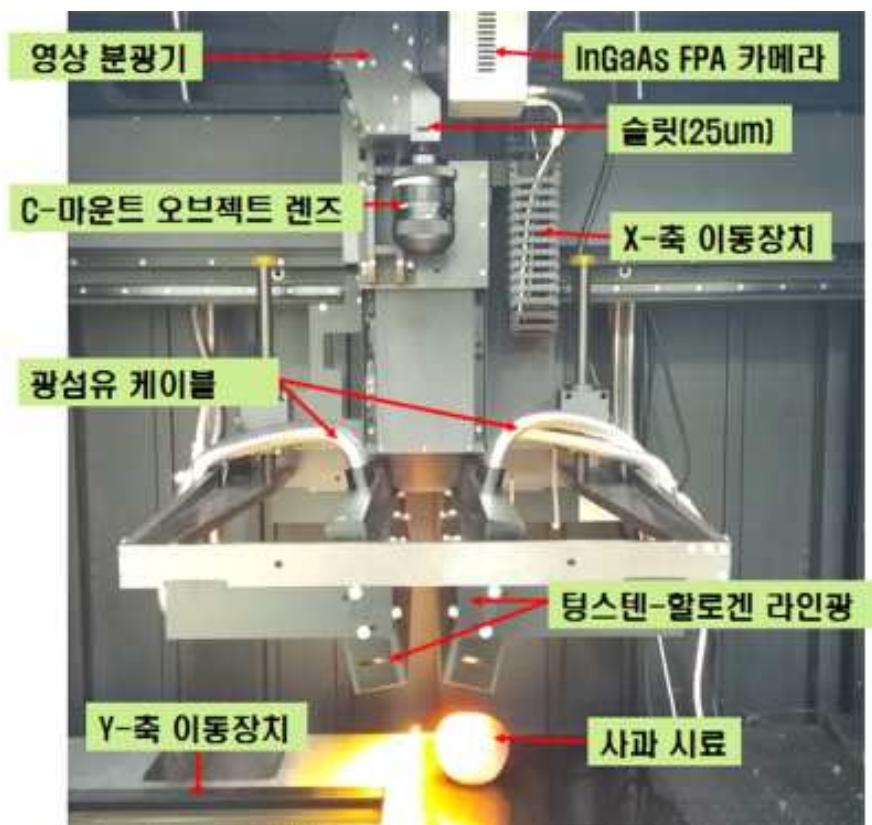


그림 97. 근적외선 초분광 반사 영상 시스템

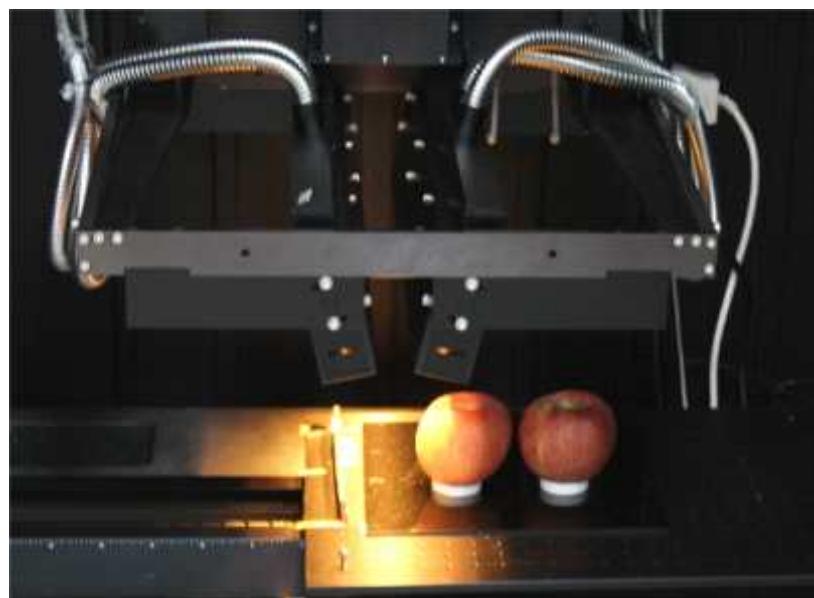


그림 98. 내부 갈변 사과의 근적외선 초분광 영상 획득

(3) 근적외선 초분광 반사 영상에서의 스펙트럼 획득 및 분석

(가) 사과에 대한 초분광 반사 영상은 파장범위가 987~1701 nm(224 밴드)에서 각각

획득되어 졌으며 각 파장별 영상은 수직축이 640 픽셀이고 수평축이 550 픽셀로 구성되었으며 획득된 데이터는 최종적으로 224 bands × 640 픽셀 × 550 픽셀의 3차원 하이퍼큐브 형태의 데이터 구조로서 컴퓨터에 저장되었다.

- (나) 획득한 초분광 영상에 대한 불규칙한 세기와 장비에서 발생하는 노이즈를 제거하기 위해서 기준 백색과 기준 검은색에 대한 초분광 영상을 별도로 획득하여 사과 영상을 교정하였다.
- (다) 이때 사용된 기준 백색은 광 반사율이 99%이상인 테프론 재질의 기준판을 사용하였으며 기준 검은색은 램프의 전원을 차단한 상태에서 카메라 렌즈의 커버를 덮고 이미징 센서로 획득된 초분광 영상을 사용하였다.
- (라) 내부 갈변 및 정상 사과 시료는 꼭지가 위로 향한 상태에서 초분광 반사 영상을 측정하였으며 2개씩 획득한 영상은 꼭지를 제외한 부분에 대한 관심영역(region of interest ; ROI)를 추출하였다.
- (마) 내부 결함 검출을 위해 가시광선 및 근적외선 분광 기술의 적용 가능성을 검토하기 위해 실험을 진행하였으며 정지 상태에서의 내부 갈변 정확도를 파악하여 추후 결과를 반영하여 이동 상태에서의 사과의 내부 결함을 판별하고자 하였다.

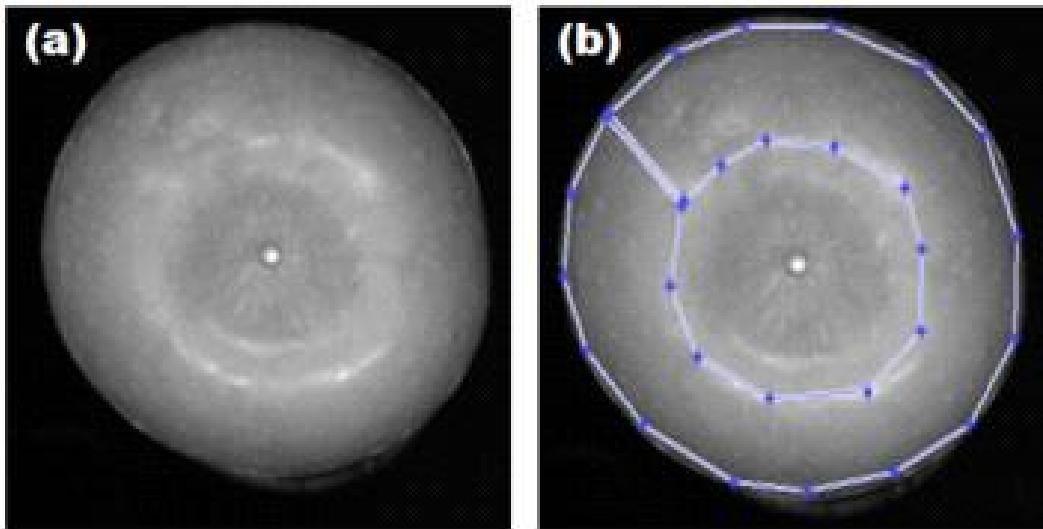
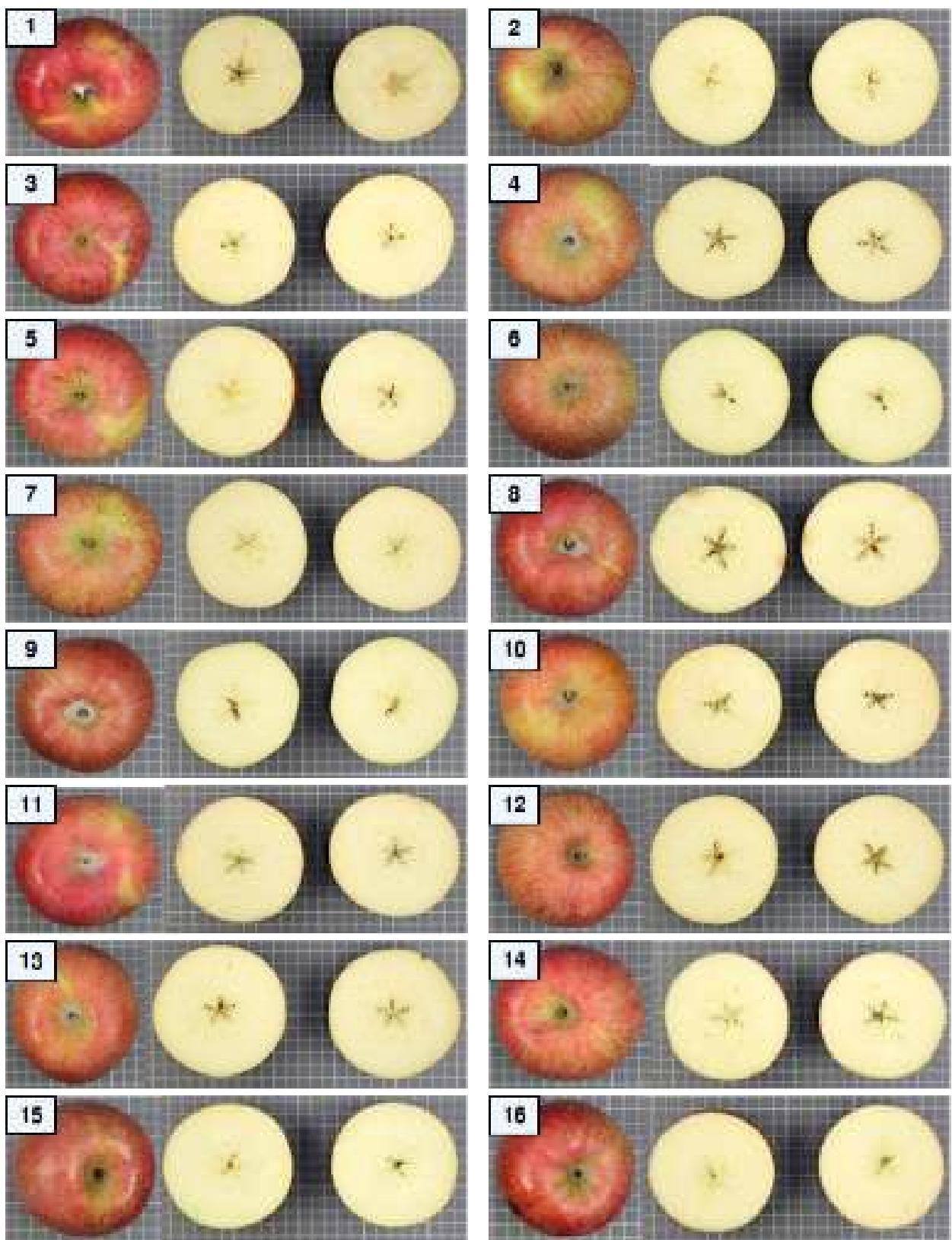
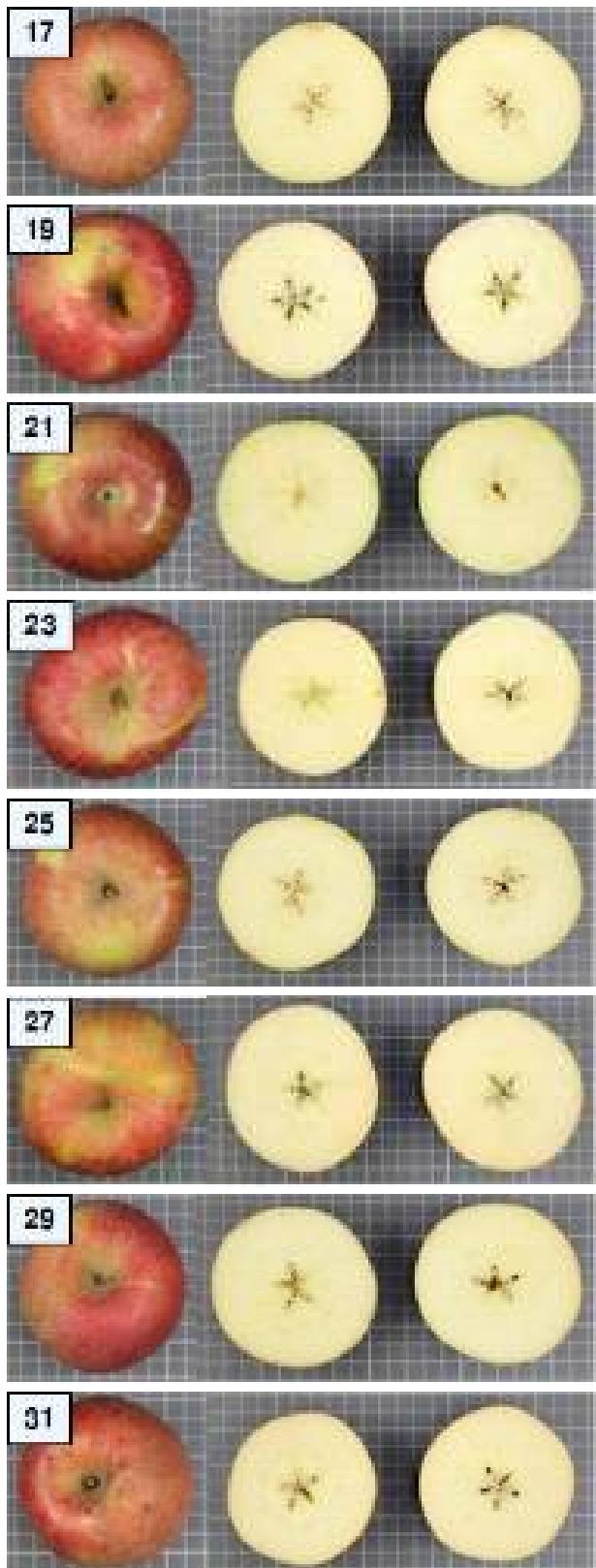


그림 99. 내부 갈변 판별을 위한 관심영역 추출

#### (4) 정상 사과(45개)의 외관 및 내부 절단면 모습

- (가) 그림 100은 정상사과(45개)의 외관 및 내부 절단면 모습으로 그림 101의 내부 갈변(61개)이 발생된 사과와는 외관적으로는 큰 차이가 없지만 내부갈변이 발생된 사과의 경우에는 절단후의 내부가 심하게 부패된 것을 확인할 수 있다.
- (나) 근적외선 초분광 반사 영상 시스템을 이용하여 비파괴적으로 반사 영상 및 스펙트럼을 획득하였으며 이를 이용하여 정상 및 내부결함이 발생된 사과의 판별 가능성을 검토하였다.





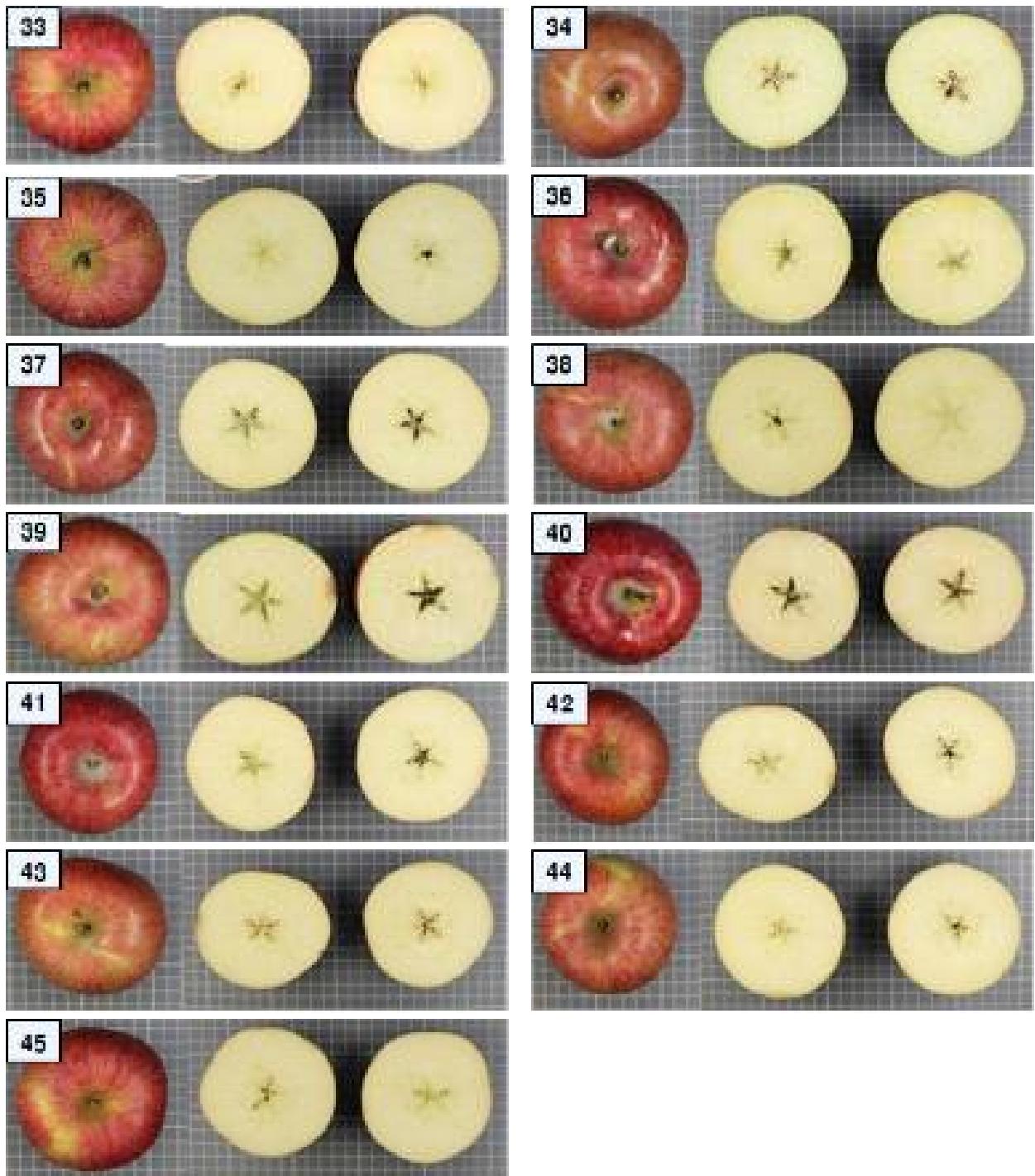


그림 100. 정상 사과의 외관 및 내부 절단면 사진

(5) 내부 갈변이 발생된 사과(45개)의 외관 및 내부 절단면 모습

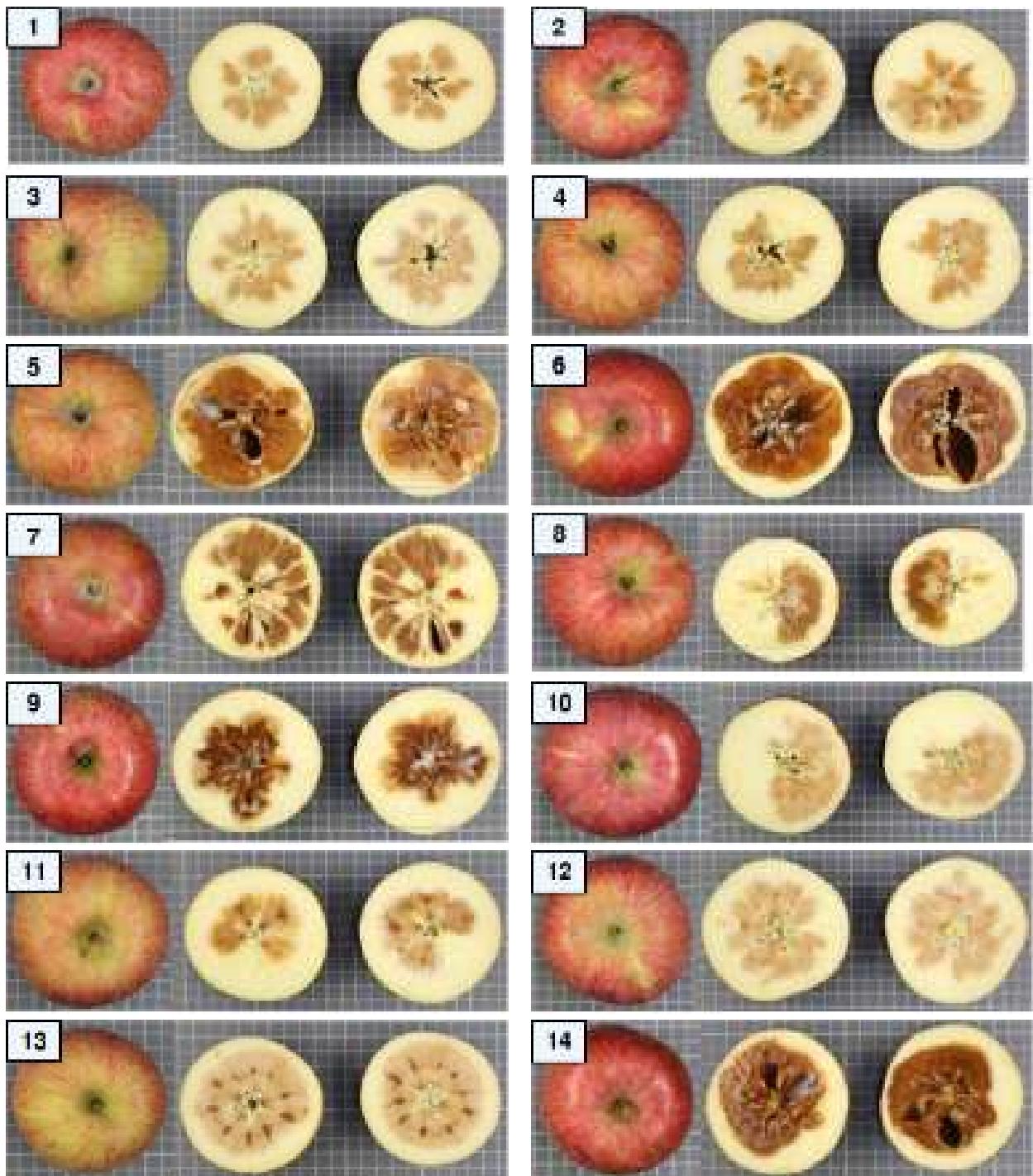
(가) 사과의 품질은 색, 모양, 표면 결함, 향 등과 같은 외부적인 인자와 당도, 산도, 경도,

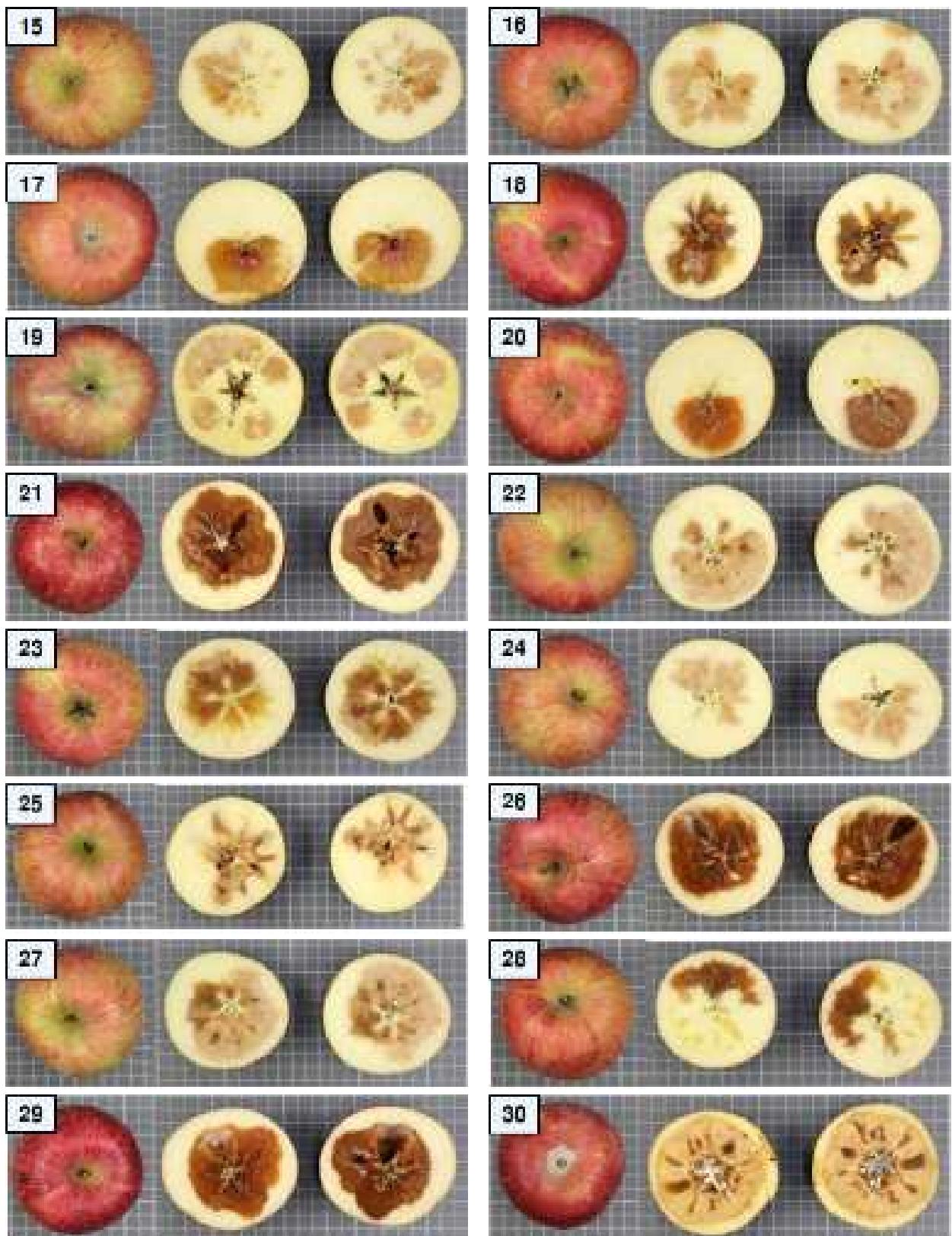
숙도, 밀병 유무, 내부 갈변 정도 등과 같은 내부적인 인자로 나눌 수 있음

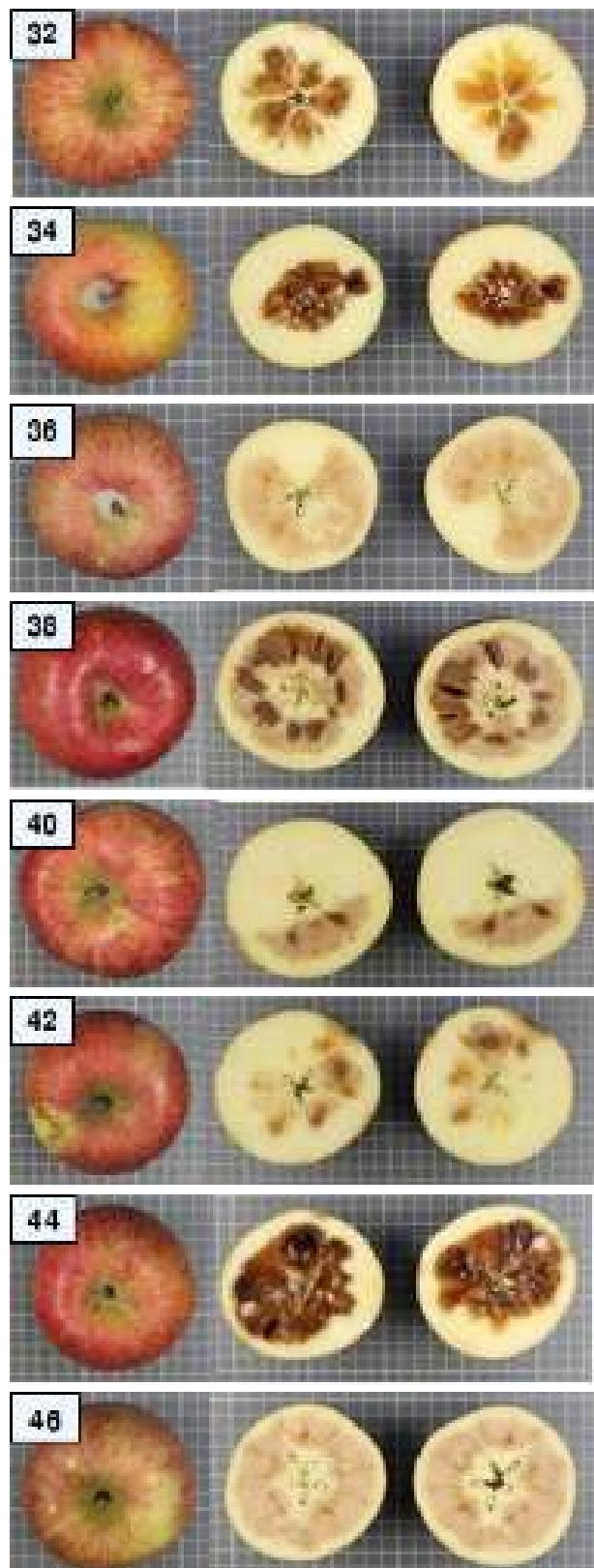
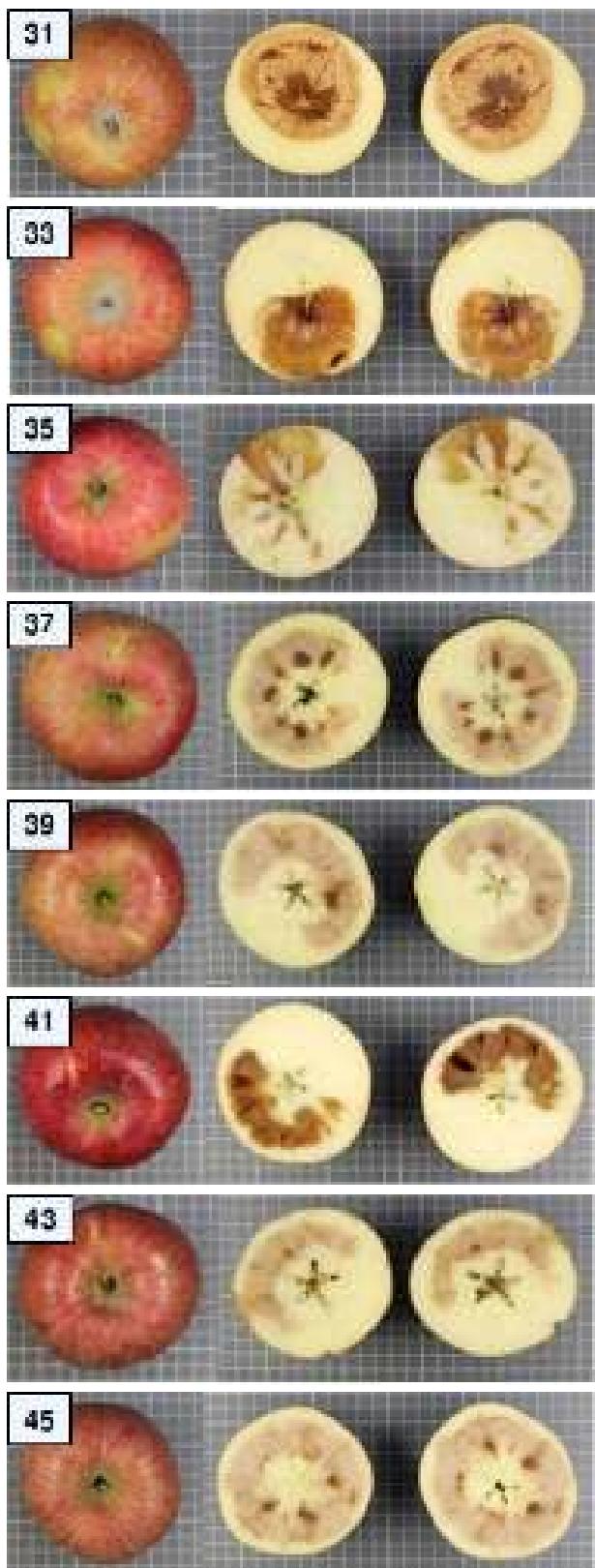
(나) 이중 밀병(water-core)과 내부갈변(internal browning)은 외관상으로는 정상과 일과

판별이 어렵기 때문에 선별되지 않은 불량 사과가 유통될 경우에 소비자들에게 강한 불만을 받게됨

(다) 밀병은 수확기가 다가오면서 발생되는 생육장애의 일종으로서 과실 내에 당 알코올의 일종인 소르비톨(sorbitol)이 축적량이 증가하여 세포 밖으로 나와 세포사이를 채우면서 투명해 보이게 되며 심하지 않은 밀병은 저장 기간 중에 소멸되지만 증상이 심한 경우에는 내부갈변으로 확대되어 부패하게 됨







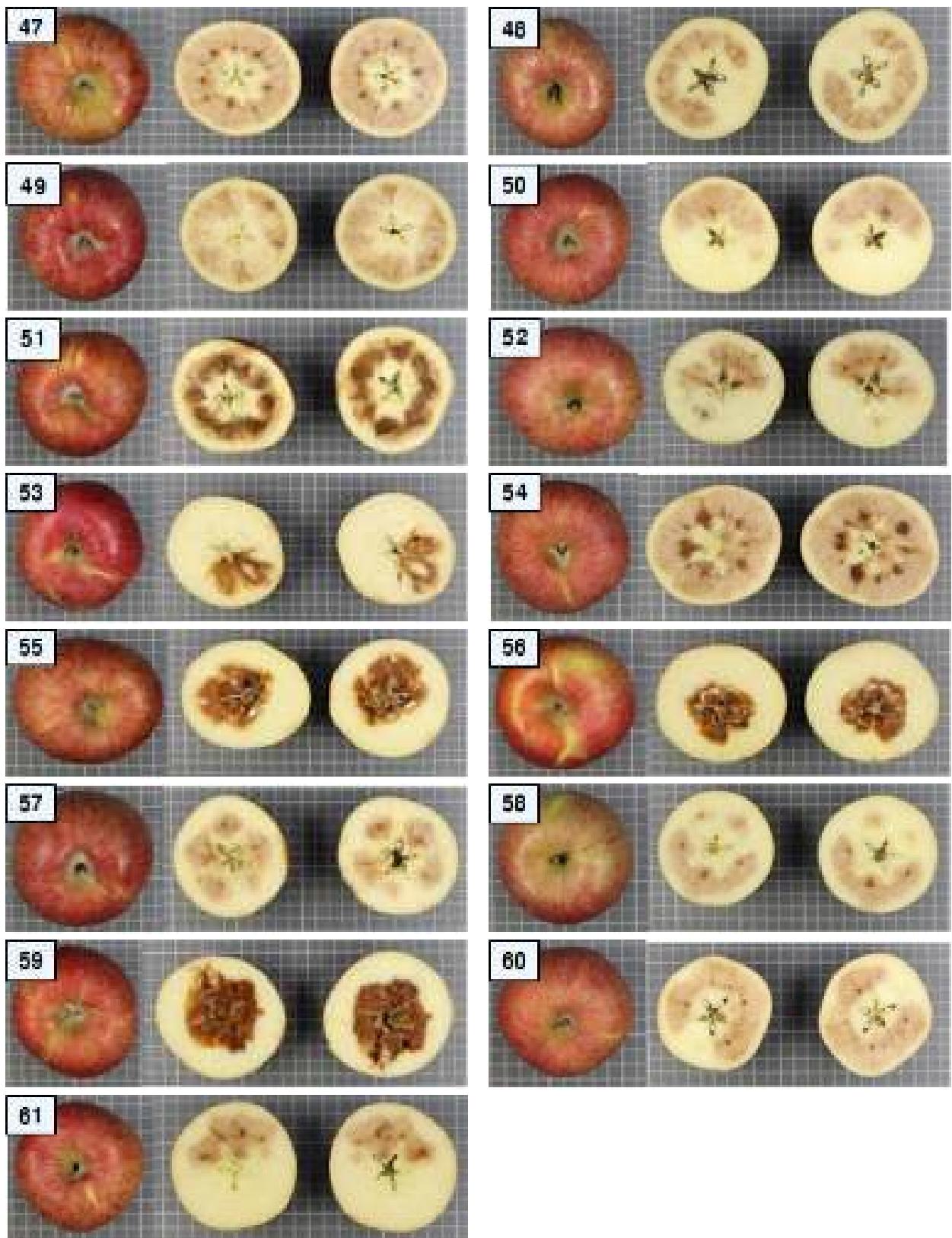


그림 101. 내부 갈별이 발생된 사과의 외관 및 내부 절단면 사진

(6) 근적외선 초분광 영상에 대한 영상 보정 및 판별 모델 개발

(가) 기준 백색 레퍼런스 플레이트와 암흑조건에서 측정한 기준 검은색에 대한 초분광

영상을 별도로 획득하여 사과 영상을 교정하여 내부 갈변 검출을 위한 알고리즘 개발에 적용하였다.

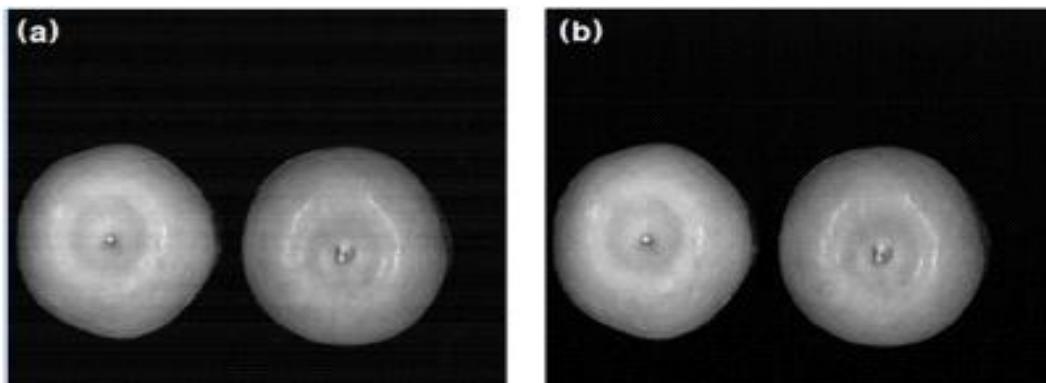


그림 102. 근적외선 초분광 영상에 대한 광 보정 전영상(a) 및 후영상(b)

- (나) 보정된 사과 영상은 미세하게 발생된 노이즈를 제거한 영상으로 변환하였다.
- (다) 사과의 크기별로 수집되는 관심영역의 픽셀 수는 차이가 있었으며 평균 29,000 픽셀들로 구성되어 획득되었다.
- (라) 전체 106개의 사과 시료에 대해서 꼭지를 기준으로 상단 부위에 대한 ROI를 추출하여 평균 스펙트럼을 산출하였다.

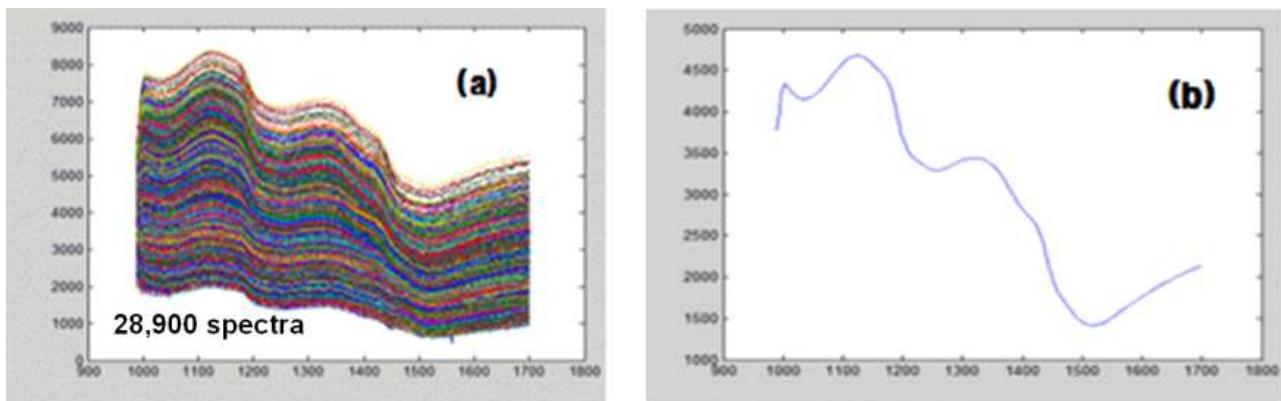


그림 103. 추출된 반사 스펙트럼과 이를 평균한 반사스펙트럼

- (마) PLS-DA를 이용한 판별 정확도를 산출하기 위해서 정상사과(45개) 및 내부갈변 사과(61개)의 전체 평균 반사스펙트럼을 독립 변수로 사용하였으며 이때 정상사과는 ‘0’으로 내부 갈변이 발생된 사과는 ‘1’로 지정하였으며 0.5를 기준으로 판별 정확도를 구하였다.

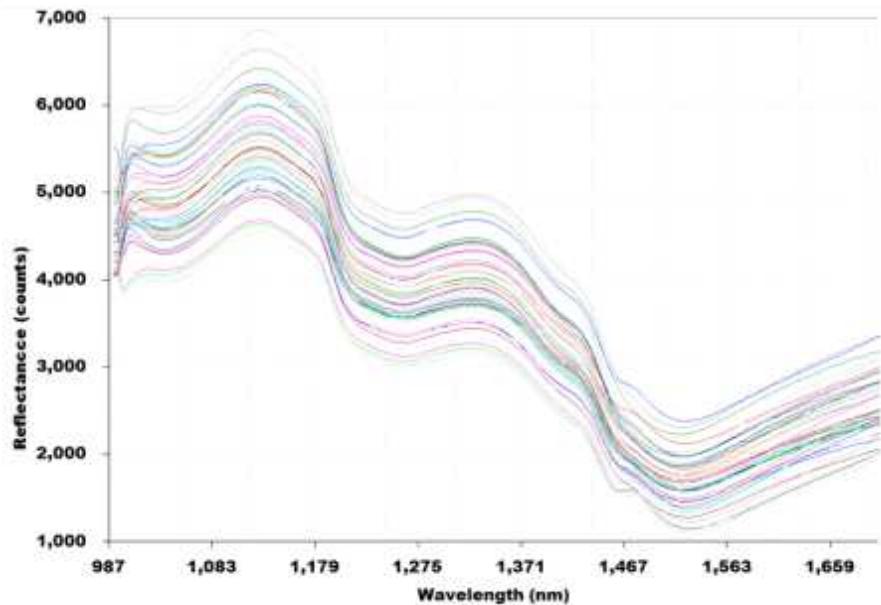


그림 104. 정상사과 45개의 전체 평균 반사 스펙트럼

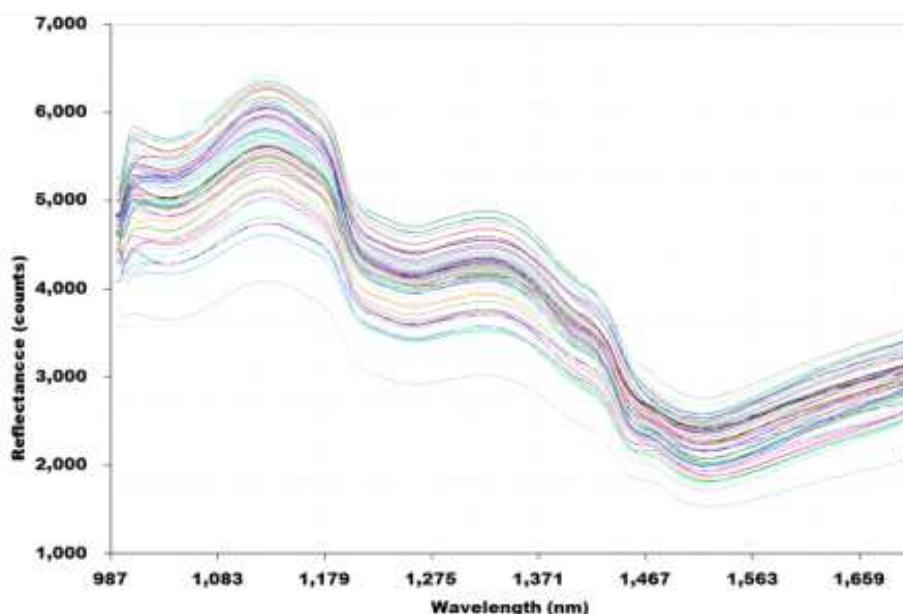


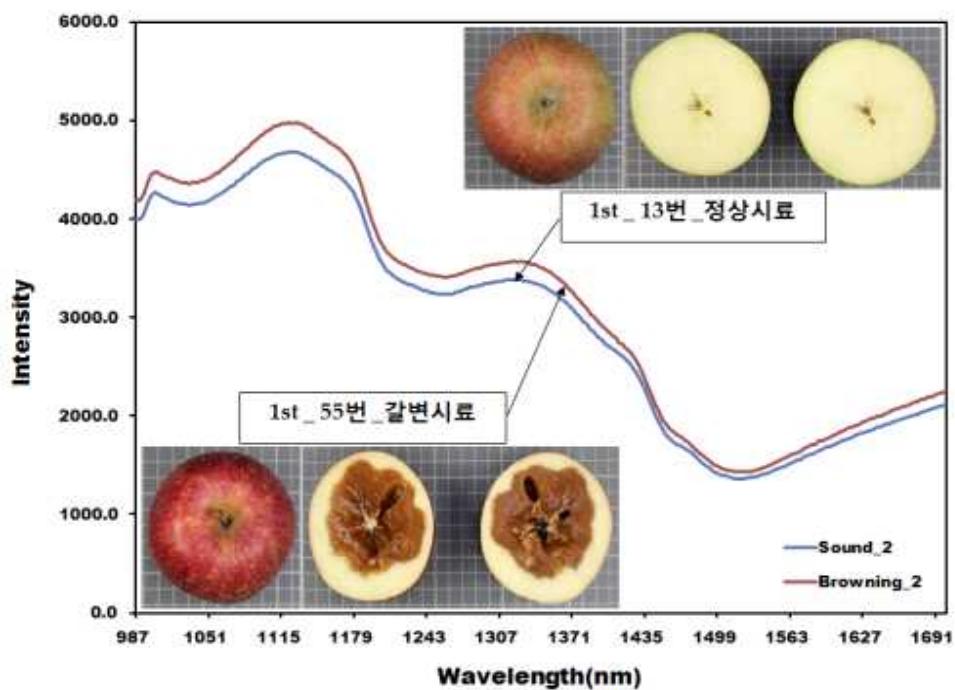
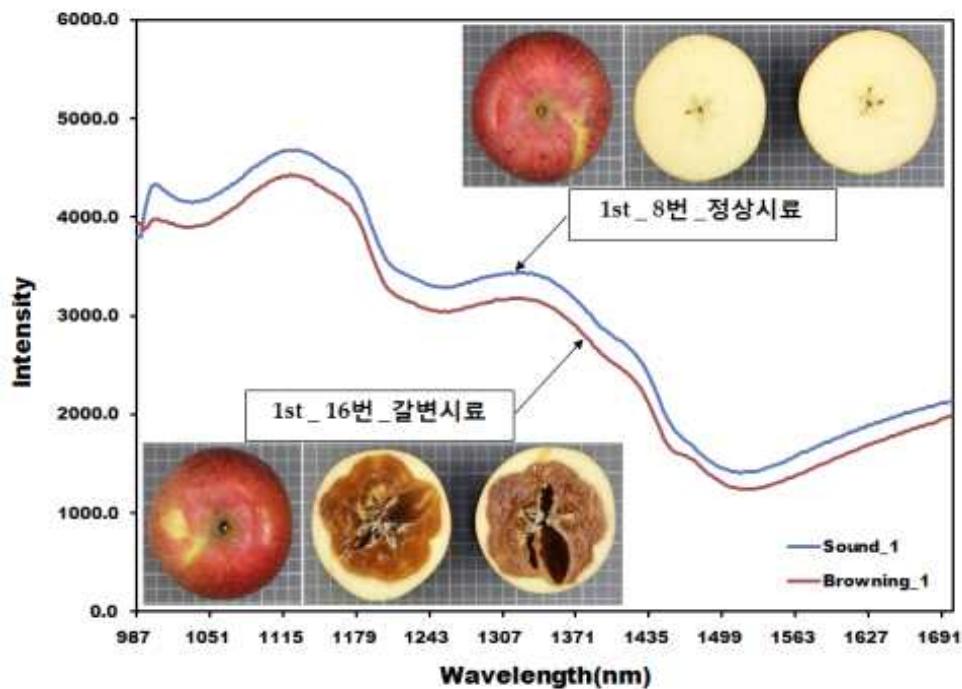
그림 105. 내부 갈변 발생사과 61개의 전체 평균 반사 스펙트럼

#### (7) 내부 갈변 사과의 검출 예측 결과

(가) 개발된 PLS-DA 예측 모델 결과에서는 정상 사과 45개는 판별 기준 상수 값인 '0'을 기준으로 0.5이상으로 판별된 사과는 14개로서 판정 정확도는 68.9%였으며 내부 갈변 사과 61개는 판별 기준 상수 값인 '1'을 기준으로 0.5 이하로 판별된 사과는 14개로서 판정 정확도는 77%로 나타냈다.

(나) 이는 기존의 투과 스펙트럼을 이용하는 비파괴 선별 장치가 내부 이상 사과의 검출 정확도가 90%이상인 것과 비교할 때 판별 정확도가 양호하지 못한 결과를 보

여주었다.



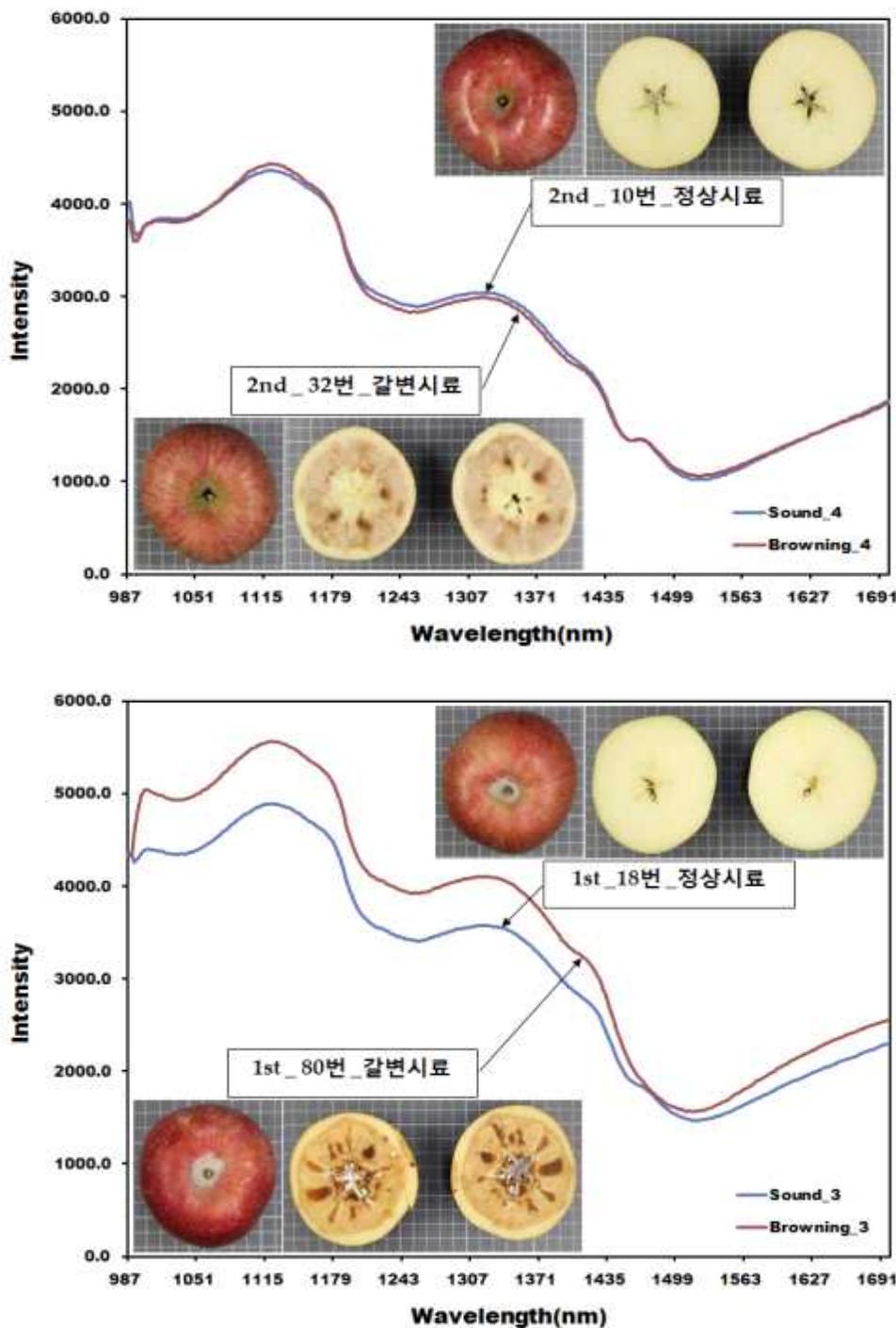


그림 106. 정상사과와 내부 갈변 사과의 평균 반사 스펙트럼 비교

- (다) 초분광 반사 영상 시스템은 내부 이상 사과에 대한 광의 침투 깊이가 투과식에 비교할 때 적고 스펙트럼 정보를 반영하기에는 한계가 있는 것으로 판단되었음
- (라) 따라서 본 과제에서는 초분광 영상 카메라를 이용하여 사과의 전체 표면에서 발생할 수 있는 결함을 검출하고 기존 산지유통센터에 설치되어 운영하고 있는 가시 광선 및 근적외선 분광 센서(VNIR spectrometer)를 이용하여 당도와 내부 결함을 검출하는 것이 효율적인 것으로 판단되었음

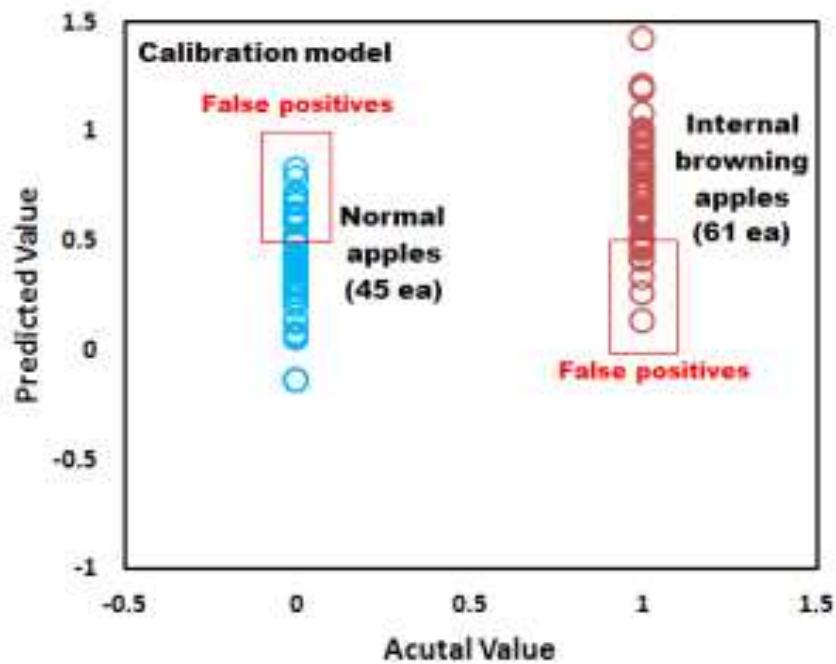


그림 107. 갈변 사과 검출을 위한 PLS-DA의 calibration 모델

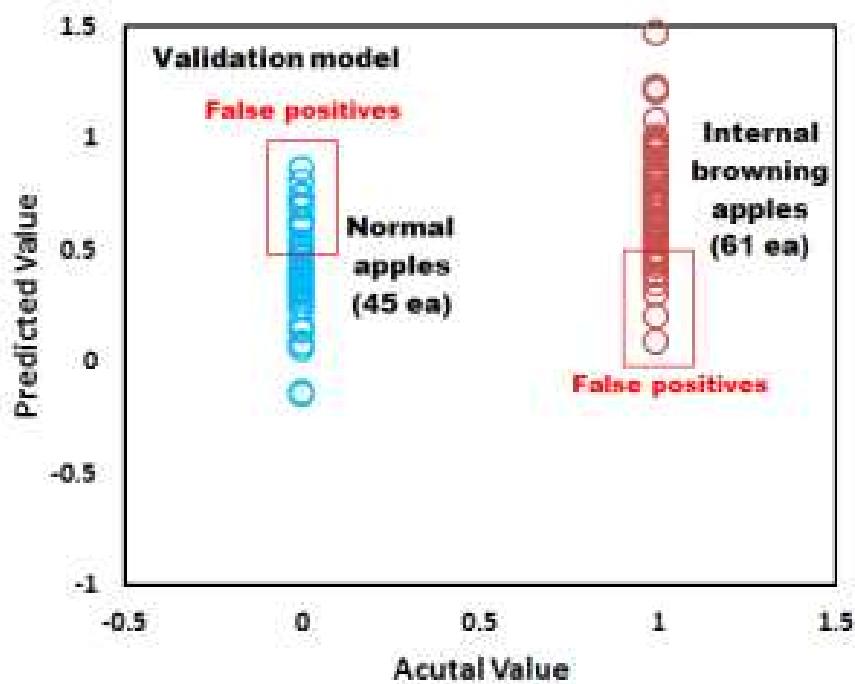


그림 108. 갈변 사과 검출을 위한 PLS-DA의 validation 모델

## 제6절 사과의 전체 표면 결합 검출 시스템 성능시험

### 1. 시스템 구동 및 제어부 성능시험

#### 가. 사과 전체 표면 결합 검출 시스템 보완

(1) 기존 산지유통센터의 선별시설을 고려한 장치 제작

(가) 제작된 시스템은 회전 롤러를 이용한 사과 전체 표면 결합 검출 영상 시스템으로서 기존 산지유통센터에 설치된 선별 장치와의 연계가 가능하도록 시스템을 추가하여 제작하고 보완하고자 하였다.

(나) 추가로 설계된 구성안은 투입부, 롤러회전부와 표면결합 검출부, 전송부, 배출부 등으로 구성하였다.

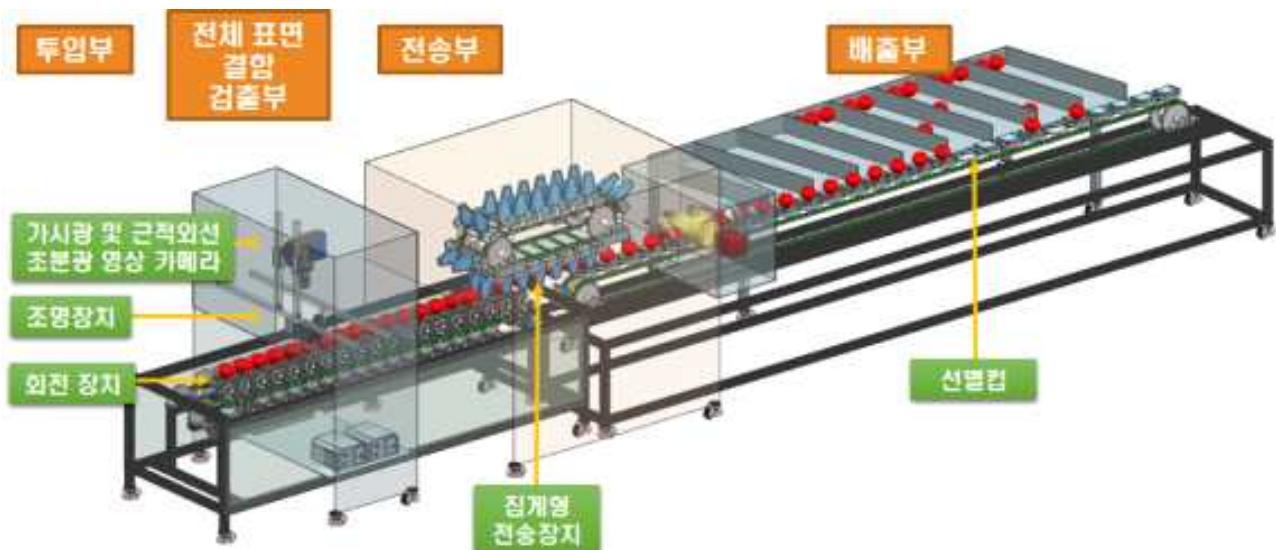


그림 109. 사과 전체 표면 결합 검출 시스템 모식도

(2) 롤러 회전부 길이 확장 및 롤러 재질 변경

(가) 롤러 회전부에 있어서는 롤러가 장착된 구동부가 전체 길이가 1 m 정도로서 영상 챔버가 상단에 장착되어 투입부와 배출부의 공간 확보가 어려웠다.

(나) 롤러 회전부는 투입부의 여유 공간을 확보하기 위해 롤러 구동부의 길이를 기존 1 m에서 2 m 정도로 연장하였으며 기존 영상 챔버가 롤러 회전부 상단에 장착된 시스템에서 보완되는 시스템에서는 추가로 프레임과 이동 바퀴를 장착하여 독립적으로 이동이 가능하도록 하였다.

(다) 기존 경도가 강한 고무 재질의 롤러에서 사과 회전시 알맞은 마찰력과 경도를 갖는 실리콘 재질로 변경하여 제작하였다.

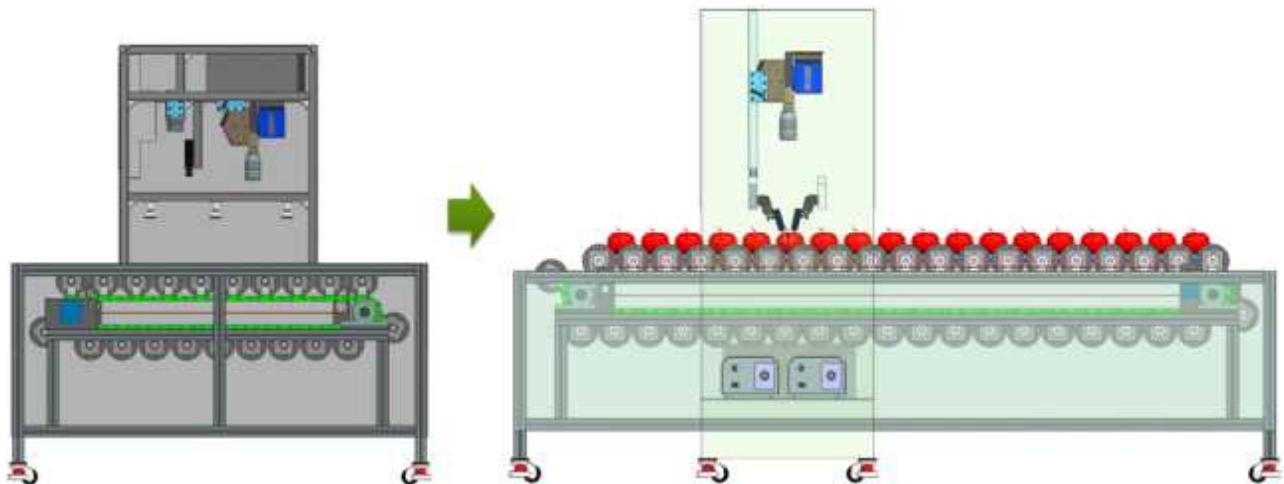


그림 110. 기존의 롤러 구동부(좌) 및 개선된 롤러 구동부 모식도(우)

#### 나. 기준 비파괴 선별 시스템과의 연계를 위한 추가 장치 제작

##### (1) 기준 시스템 연계를 위한 장치 구상

제작된 시스템은 회전 롤러를 이용한 사과 전체 표면 결함 검출 시스템으로서 기존 APC에 설치된 선별 장치와의 시스템 연계가 가능하도록 시스템을 보완하였다.

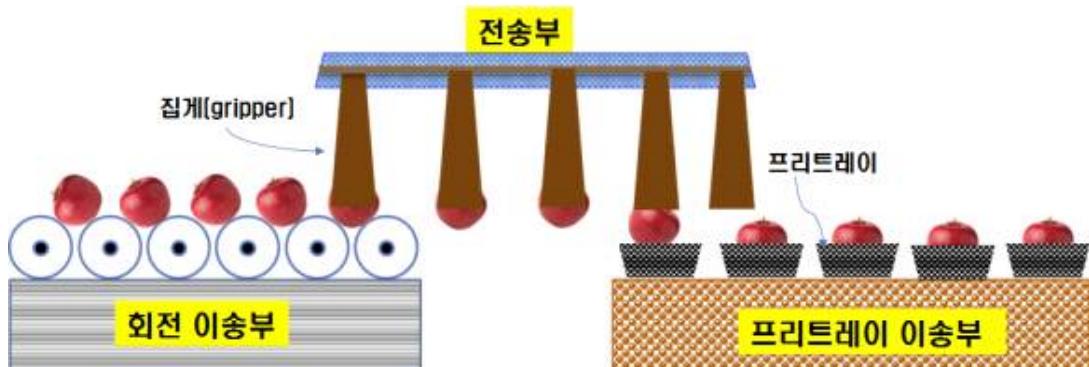


그림 111. 기준 선별시설과의 연계를 위한 집게 방식의 사과 전송 장치 모식도

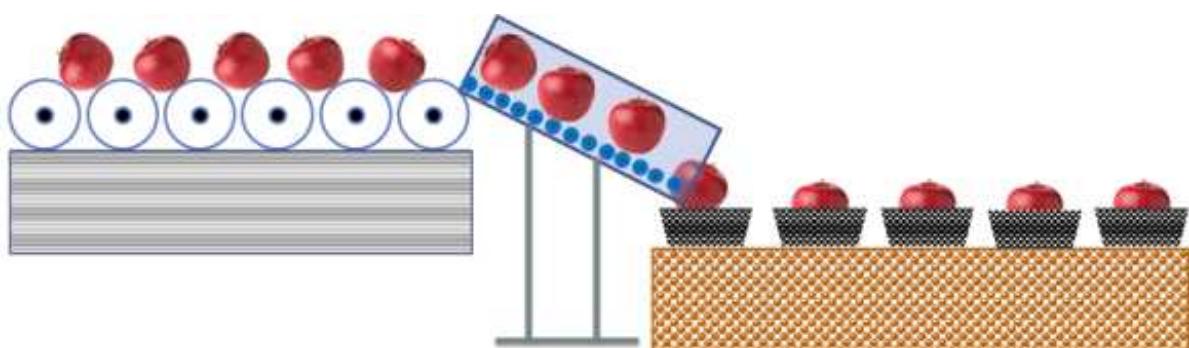


그림 112. 기준 선별시설과의 연계를 위한 자유낙하 방식의 사과 전송 장치 모식도

## (2) 사과 전송부 설계

전송부는 기존의 외부 결합 검출부에서 측정이 완료된 사과는 추가로 전송 장치(transfer unit)를 이용하여 기존의 비파괴 품질 선별 시스템으로 이송할 수 있도록 집계형 방식으로 설계하였다.

## (3) 이송중 회전 사과 결합 검출 시스템 제작

### (가) 회전 롤러와 영상 챔버로 구성된 사과 표면 결합 검출 시스템 제작

#### ① 가시광 및 근적외선(VNIR) 초분광 영상 측정 챔버

ⓐ 제작된 사과 표면 결합 검출 시스템은 400~1,000 nm 파장대역의 VNIR 초분광 영상 카메라와 6개의 100W 텅스텐-할로겐 램프, 광섬유와 각도 조절용 구조 라인광 6개로 구성된 조명 장치가 장착되었다.

ⓑ 텅스텐-할로겐 램프는 광량(light intensity)의 조절이 가능하며 각도 조절용 구조 라인광은 개별 점등할 수 있도록 구성하였다.

ⓒ 초분광 영상 카메라와 라인광 조명 장치는 높이와 각도 조절이 가능하여 이송 중 사과의 초분광 영상 획득시에 최적의 영상 측정 조건과 광 조건을 설정할 수 있다.

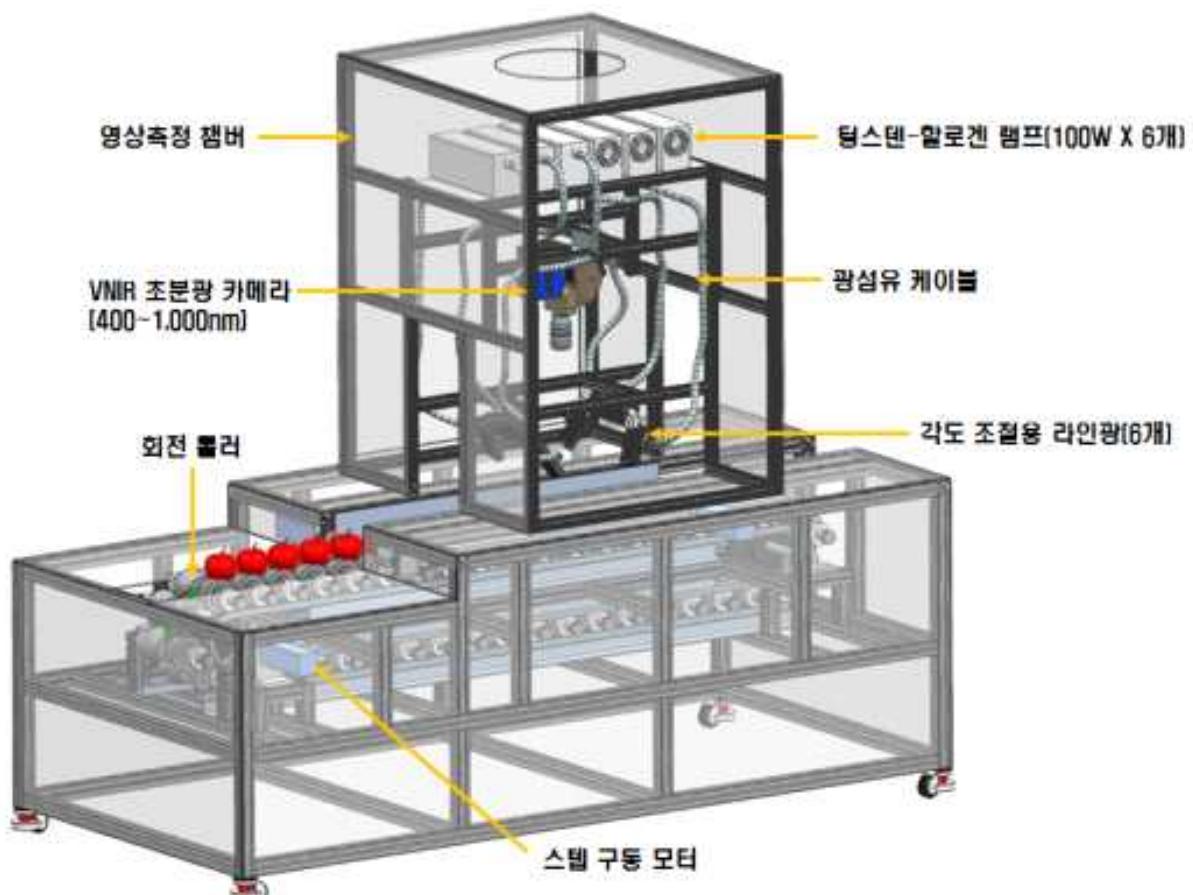


그림 113. 초분광 영상 카메라와 회전롤러 장치 부분의 모식도

④ 영상 측정 챔버의 모식도에서는 롤러 회전부에 챔버가 장착되어 있지만 추후 제작에서는 영상 측정 챔버도 별도로 이동이 가능하도록 캐스터를 장착하여 제작하였다.

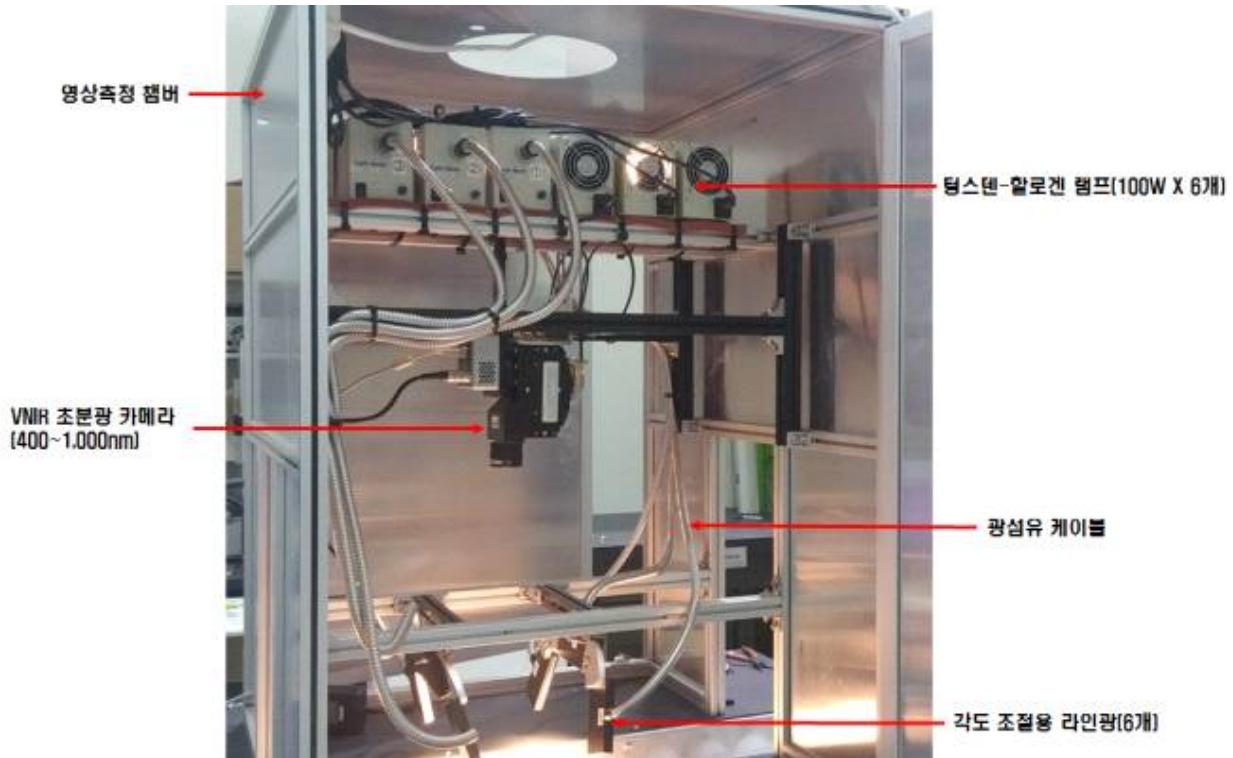


그림 114. 이송중 회전사과 검출을 위해 제작된 VNIR 초분광 영상 측정 챔버

## ② 사과 이송 및 회전을 위한 롤러 구동 장치

ⓐ 롤러 회전 장치는 좌·우 속도조절이 가능한 회전 롤러가 장착된 롤러 회전부, 서보 모터, 타이밍 벨트 등으로 구성된다.

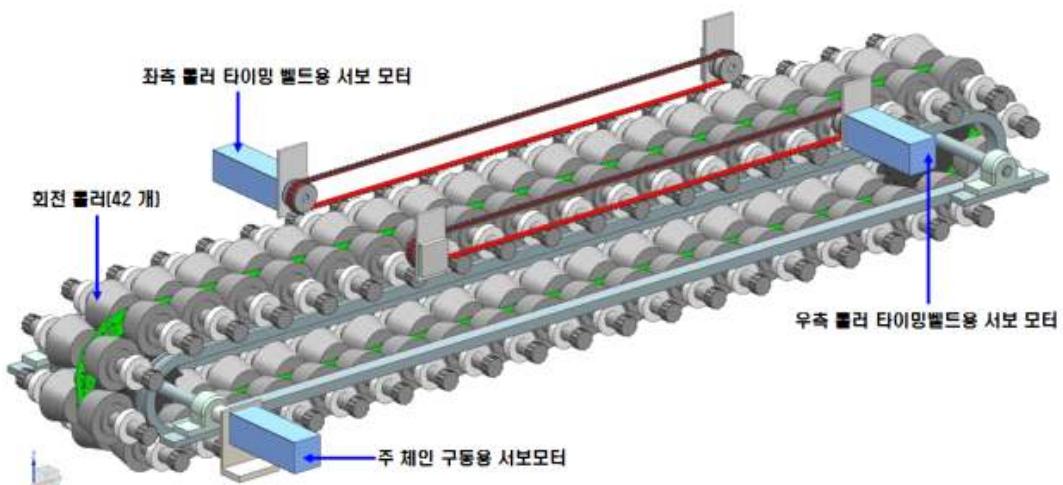




그림 115. 사과의 이송 및 회전 사과 영상 획득을 위한 롤러 회전부

④ 롤러는 흰색의 실리콘 재질로 제작되었으며 전체 길이는 2 m 정도로서 총 42개가 체인에 연결되어 구동되며 영상 획득이 이루어지는 1 m 정도의 구간에서는 타이밍 벨트에 의해 좌우 롤러가 체결되어 개별 속도 조절이 가능하도록 구성하였다.

#### (4) 기존 선별시설 연계를 위한 이송중 회전 사과 결함 검출 시스템 제작

(가) 개발된 이송중 사과 표면결함 검출 시스템은 사과가 회전 롤러를 이송하는 방식으로 기존 선별 시설에서는 동일한 방식이 없기 때문에 현재 운영중인 컵식 선별 방식이나 트레이 선별 방식과의 연계가 가능한 것을 구현하기 위해 그림 134에서와 같이 추가 장치를 제작하였다.

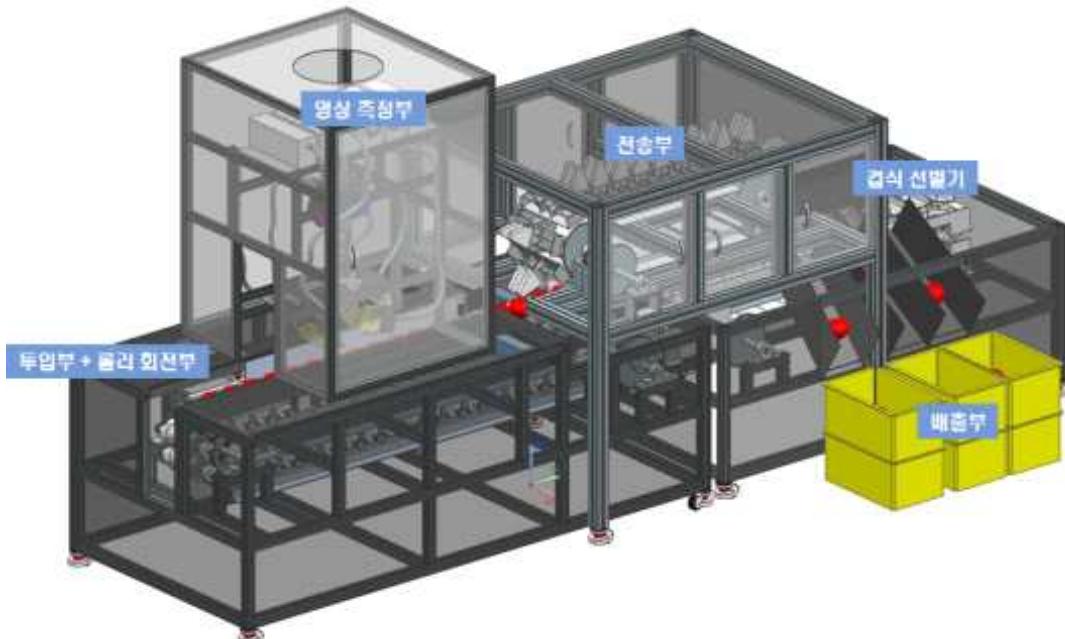


그림 134. 전송부와 컵식 선별부가 추가된 이송중 사과 결함 검출 시스템 모식도

(나) 제작된 이송 사과의 전체 표면 결함 검출 시스템은 그림 135에서와 같이 투입부, 롤러회전부, 영상측정부, 전송부, 컵식 선별부, 배출부 등으로 구성되어 있다.



그림 135. 전송부와 컵식 선별부가 추가된 이송중 사과 결함 검출 시스템

(다) 이송 사과의 표면 및 내부 결함 검출 시스템은 가시광 및 근적외선 파장 대역(400 ~1,000 nm)의 초분광 영상 카메라와 회전 롤러를 이용하여 사과를 이송시켜 사과의 전체 표면에 대한 결함 검출하는 시스템이다.

#### ① 투입부 및 롤러 회전부

흰색의 실리콘 재질로 제작된 장구 형상의 회전 롤러(좌·우 각각 42개)가 체인으로 체결되어 있으며 초분광 영상이 획득되는 1 m 구간에서는 좌·우측 롤러를 타이밍 벨트로 연결되어 회전 속도 조절 가능하다.

#### ② 가시광선 및 근적외선 초분광 영상 측정 챔버

제작된 사과 표면 결함 검출 시스템은 400~1,000 nm 파장대역의 가시광선 및 근적외선 초분광 영상 장치 (EMCCD 카메라, 영상 분광기, C-마운트 렌즈)와 광량 조절이 가능한 6개의 100W 수정 텅스텐-할로겐 램프, 광섬유와 각도 조절용 구조 라인가이드 6개로 구성된 조명 장치 장착되었다.

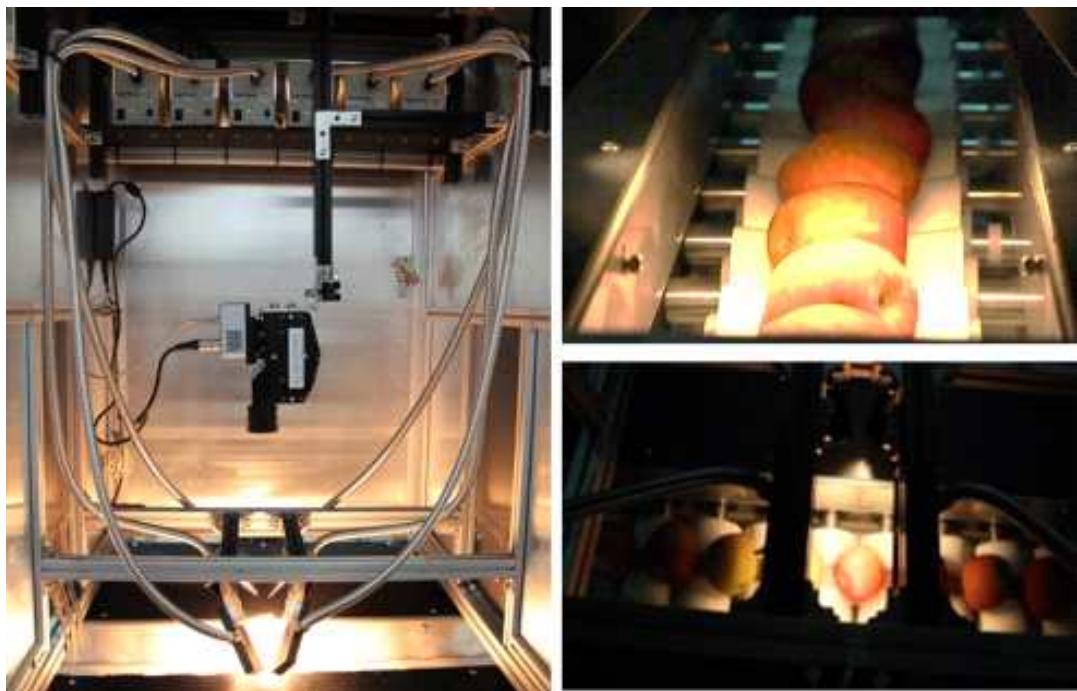


그림 136. 영상 측정부 및 롤러 회전부에 조사되는 텅스텐-할로겐 라인 구조광

#### (5) 사과 전송 장치

회전 사과 영상을 획득하기 위해 개발된 롤러 회전부는 기존 산지유통센터에 보급되어 있는 선별 시스템과의 연계를 위해 좌·우로 각각 23개 집게형의 전송 장치로 구성되어 있다.



그림 137. 롤러 회전부에서 컵식 선별부를 연계시키기 위한 전송장치

#### (6) 컵식 선별 장치

사과 롤러 회전 장치에서 회전되는 사과의 전체 표면에 대한 사과 영상을 획득한

후에 전송 장치에 의해 이송되는 사과를 컵 선별 장치의 선별 컵에 안착시킨 후에 영상 획득 장치의 판정 결과를 전달받아 결함별로 판정되는 사과를 등급에 해당되는 배출부 방향으로 선별 컵을 전도시켜 사과를 배출시킨다.



그림 138. 정상 및 결함 사과를 배출시키기 위한 컵식 선별 장치



그림 139. 최종 제작된 이송 사과 전체 표면 결함 검출 시스템

다. 이송 사과의 초분광 영상 획득을 위한 검출 알고리즘 및 프로그램 개발

(1) 회전 사과의 내외부 결함 판정을 위한 검출 알고리즘 개발

(가) VNIR 초분광 영상을 이용한 회전 사과의 결함 검출 판정 과정

VNIR 초분광 영상 카메라를 이용하여 회전하는 사과의 결함을 검출하기 위해 개

발된 프로그램은 파장(nm)과 센서 픽셀(pixel)과의 연산을 위해 다음의 수식을 적용하고 있다.

$$\text{Wave(Pixel)} = \text{Pixel} \times \text{Pixel_Disp} + \text{Pixel0_Wave}$$

여기서, Pixel0\_Wave = 293.529257

Pixel Dispersion = 0.3

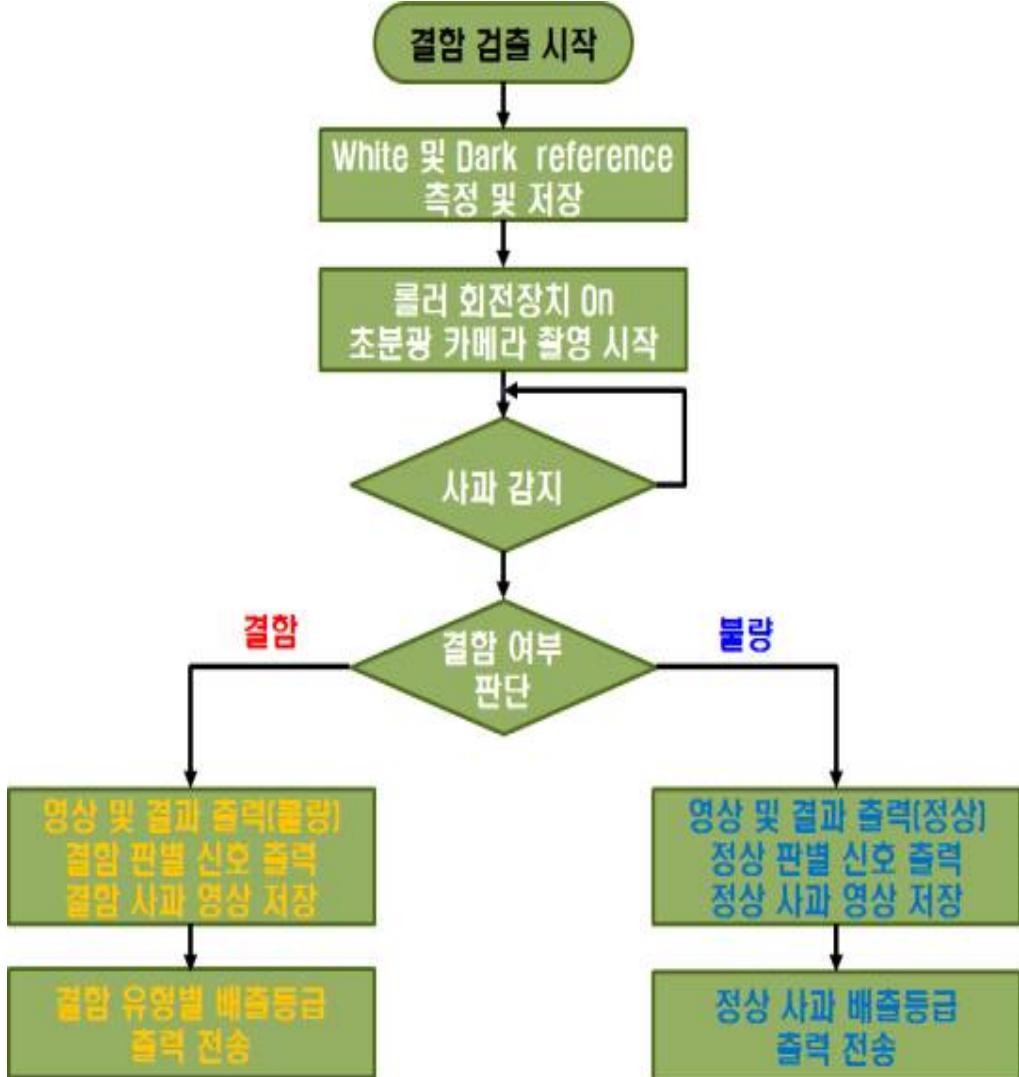


그림 116. 초분광 영상 카메라를 이용한 사과 전체 표면 결함 검출 과정

- (나) 전체적인 평정 과정은 VNIR 초분광 카메라의 백색(White panel)과 흑색(Dark)에 대한 기준 값을 이용하여 정규화된 데이터(Normalized data)를 획득하였다.
- (다) 저장된 백색과 흑색에 대한 기준 값은 실시간으로 획득되는 회전 사과에서 발생되는 노이즈를 제거하여 선명한 초분광 영상을 제공한다.
- (라) 회전하는 사과를 자동으로 인식하기 위해 소프트웨어 트리거(trigger) 기능을 적용

용하였으며 사과에 대한 반사 스펙트럼과 배경이 되는 회전 롤러의 반사 스펙트럼의 비(ratio)를 이용하였다.

- (마) 최적의 초분광 영상을 획득하기 위해 노출시간(exposure time) 설정과 CCD gain 설정 항목과 함께 모니터 상에 표시되는 영상의 빈도수를 추가하였다.
- (바) 검사값 설정 항목은 사과 결함 검출을 위해 사전에 선정된 파장 대역을 입력하고 차 또는 비 연산을 수행할 수 있으며 소프트웨어 트리거에 의해서 저장되는 회전 사과는 관측 영역(FOV)에서 벗어나고 다시 배경을 촬영하게 되면 저장이나 판별 과정을 수행하지 않는다.
- (사) 획득된 초분광 영상은 사전에 설정하여 입력한 파장대역과 두 파장을 이용한 차(subtraction) 또는 비(ratio) 연산기능이 적용하여 새로운 초분광 영상 데이터를 형성하고 연산된 초분광 영상 데이터에 문턱값(threshold value)을 적용하여 0과 1의 이치화 영상으로 변환하여 결함 사과를 검출하였다.
- (아) 결함 사과는 유형별로 배출단수를 별도로 하여 배출부에서 구분하여 선별할 수 있으며 정상 및 결함 사과로 분류하여 선별할 수 있도록 설정하였다.



그림 117. 초분광 영상 측정을 위한 카메라 설정(좌) 및 랜드 연산 설정(우)

## (2) 이송중 회전 사과 결함 검출 프로그램을 위한 사용자 환경 개발

- (가) 이송중 회전 사과 결함 검출 프로그램은 VNIR 초분광 카메라를 인식하고 초분광 카메라에서 획득한 영상을 연산하여 결함을 판별할 수 있도록 구성되어 있으며 초기 버전부터 업그레이드하여 개발되었다.
- (나) 작동 메뉴는 크게 시작, 정지, 설정, 영상 확인과 종료 버튼으로 구성하였으며 시작에서는 백색과 검은색에 대한 기준 값(Reference value)을 사과 영상 획득

전에 선택하여 측정할 수 있도록 하였다.

- (다) 결합 검출을 위한 영상 확인 창은 세로 배열로 총 3개를 배치하였으며 각각의 결합 검출을 위해 2개의 선택된 파장을 입력할 수 있도록 하여 2개의 파장을 이용하여 차(subtraction) 연산이나 비(ratio) 연산하여 처리된 영상을 확인할 수 있도록 하였으며 단일 밴드에 대한 영상도 구현이 가능하다.

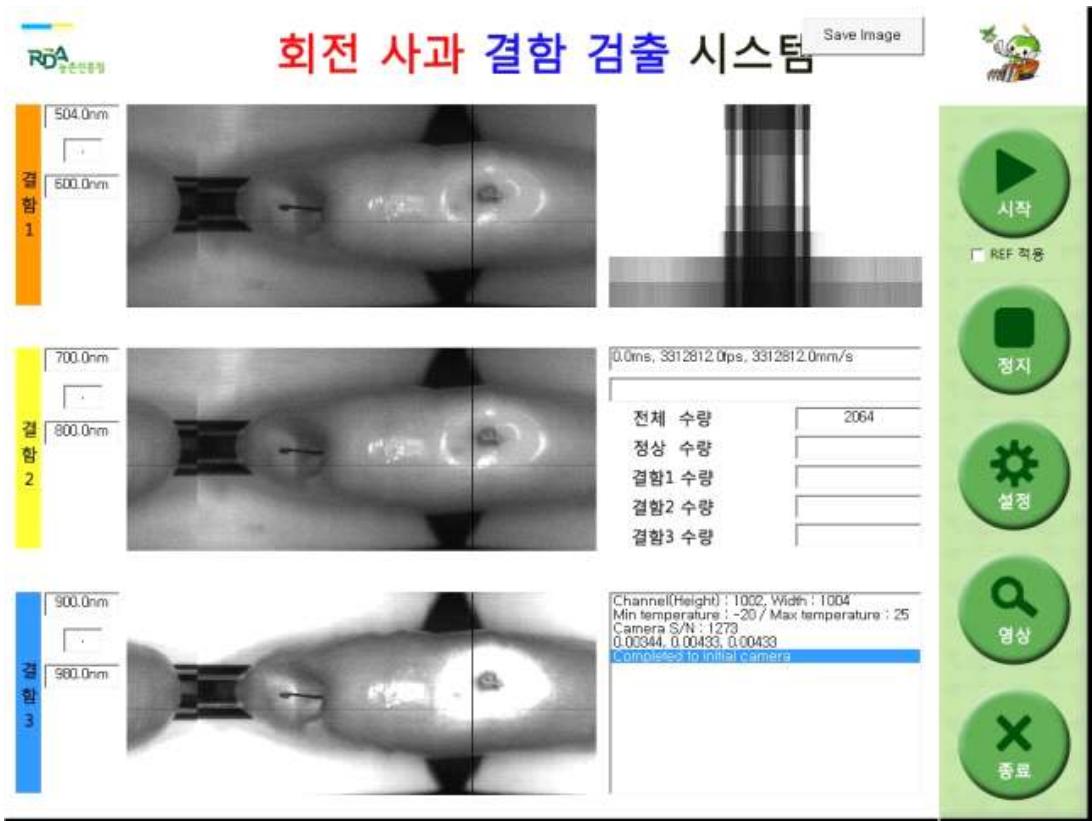


그림 118. 이송 사과 결합 검출 프로그램 사용자 환경(GUI). Version #1

- (라) 개선된 이송 사과 결합 검출 프로그램에서는 결합 1, 2, 3에서 설정한 초분광 영상의 연산에 따라 구현된 초분광 영상에 문턱값을 적용하여 이치화된 영상을 추구하였으며 배경 제거를 위한 마스킹 영상도 추가로 구성하였다.
- (마) 이송 사과의 영상 획득은 소프트웨어 트리거 기능을 적용하였으며 화면중앙에서 획득되는 영상 세기값(intensity value)이 사과 이외의 값을 획득하다가 사과의 값을 획득할 때 값이 변화하는 비율을 측정하여 영상이 저장되는 것으로 하였다.
- (바) 영상이 획득되고 나면 배경을 지우고 획득된 사과의 템플리트를 획득하여 결합 1, 2, 3에서 연산된 초분광 영상에서 문턱값을 적용하여 특정 기준값 이상으로 이치화 영상을 구현하여 결합 부위를 표현하게 하였다.

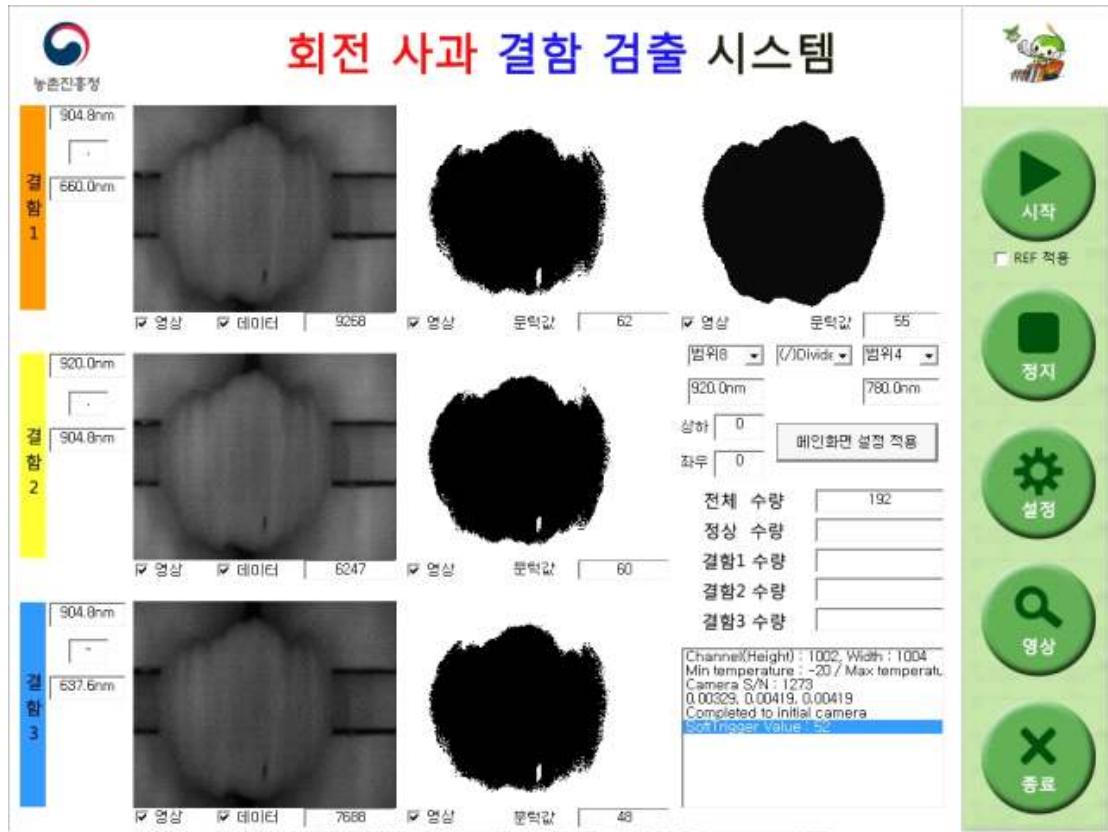


그림 119. 이송 사과 결합 검출 프로그램 사용자 환경(GUI). Version #8

라. 사과 결합 검출시스템의 구동 및 제어 성능시험 롤러의 회전 성능 평가

#### (1) 성능실험 방법

(가) 공시재료는 현장적용시험이 실시되는 진안마이산조합공동사업법인에서 ‘15년에 생산된 후지 사과 시료를 사용하였으며 구동 롤러의 회전 테스트를 위해 사과 크기(직경, 중량)별로 사전 선별된 사과를 구분하여 준비하였다.

(나) 구동 롤러의 회전 속도와 전진 속도에 따른 결합 검출 정확도 실험

구동롤러 회전 상태 점검 및 이송체인 직진 속도별 결합 검출 실험을 위해 구동 롤러 자전 속도별 사과 슬립률 확인하고 구동 롤러 회전 및 직진 속도별 결합 검출 정확도 산출하였다.

(다) 좌우측 구동 롤러의 속도 구배에 따른 획득한 라인스캔 초분광 카메라 영상의 사과 전체 표면 노출 정도를 비교하여 최적의 회전속도를 설정하였으며 개발된 사과 결합 검출 프로그램을 이용하여 구동 롤러 회전 속도별 결합 검출 정확도를 산출하였다.



그림 120. 구동 롤러의 회전 성능평가를 위해 준비된 시료

(4) 회전 롤러 제어 프로그램은 직진 속도와 방향(정·역)을 제어할 수 있으며 구동 롤러의 회전방향을 조절하기 위해 좌·우측 타이밍 벨트의 구동 속도와 방향(정·역)도 별도로 제어할 수 있도록 프로그램을 재구성하였다.



그림 121. 회전 롤러 구동 프로그램 사용자 환경(GUI)

## (2) 성능실험 결과

(가) 구동 롤러의 회전 성능을 평가하기 위해 준비된 사과 시료는 사과 1은 무게가 368 g이며 수직방향 원주가 300 mm, 수평방향 원주가 30.5 mm였으며 사과 2는

무게가 276 g, 수직방향 원주가 273 mm, 수평방향 원주가 28.3 mm로서 무게는 사과1, 2의 무게 차이는 25%정도였다.

표. 롤러 회전과 사과 회전과의 회전속도 비교

롤러 회전속도 (RPM)	사과 회전 속도(RPM)			
	사과 1		사과 2	
	수직 방향	수평 방향	수직 방향	수평 방향
22.58	1차	20.22	20.91	23.36
	2차	20.32	20.27	23.18
	3차	20.69	20.55	22.81
	평균	20.41	20.57	23.12
27.15	1차	24.73	24.79	27.86
	2차	24.96	24.97	27.40
	3차	24.33	24.90	27.57
	평균	24.67	24.88	27.61
31.44	1차	29.21	28.35	31.97
	2차	28.49	28.80	32.09
	3차	28.57	28.35	31.97
	평균	28.76	28.50	32.01
36.12	1차	32.26	32.79	37.11
	2차	33.21	32.43	37.19
	3차	32.43	32.37	37.11
	평균	32.63	32.53	37.14
40.82	1차	37.33	36.07	41.10
	2차	37.27	36.00	41.38
	3차	36.70	35.64	41.57
	평균	37.10	35.91	41.35
45.43	1차	41.81	40.91	45.00
	2차	41.10	40.91	45.69
	3차	42.55	40.82	45.45
	평균	41.82	40.88	45.38

(나) 롤러의 회전속도가 가장 낮은 22.58 rpm에서는 사과 2의 수직방향을 제외하고는 사과 1, 2에서 회전속도가 더 낮게 측정되었으며 롤러의 회전속도 27.15 rpm이상

에서는 사과 1, 2의 회전속도는 낮게 회전하였다.

- (다) 그레프에서와 같이 전체적으로 둘러 회전속도와 사과 1, 2의 회전속도는 rpm이 증가할수록 사과도 더 높은 속도로 회전하였으며 동일 둘러 회전속도에서 사과 2의 회전속도가 수직 또는 수평방향에서 사과 1보다 상대적으로 빠르게 회전하였다.

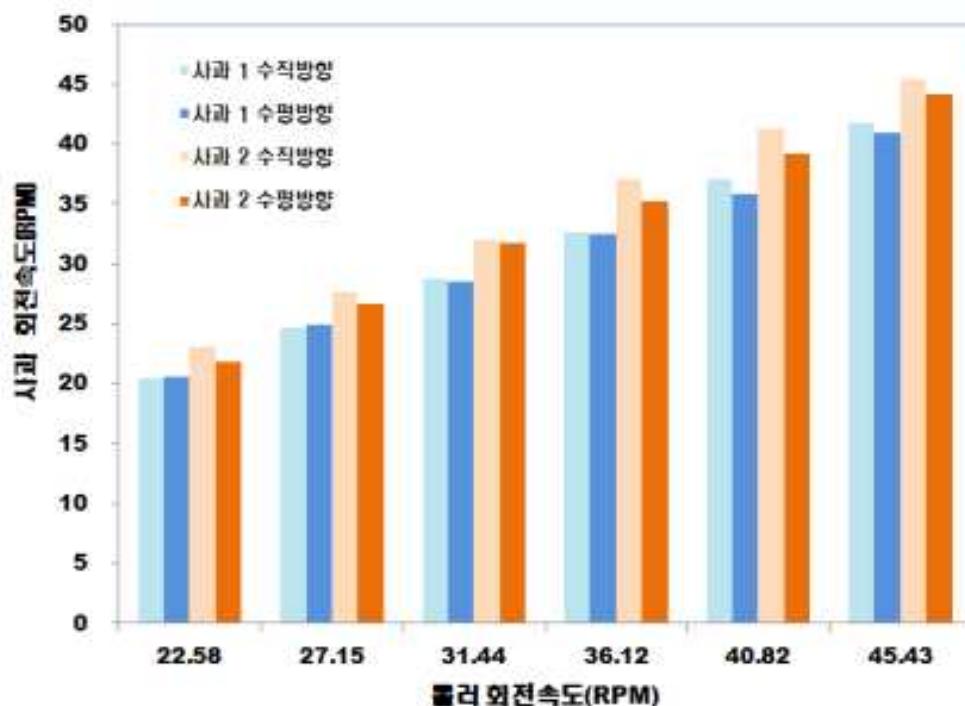


그림 122. 둘러 회전속도와 사과(1, 2) 회전속도의 비교

- (라) 하단의 표에서와 같이 사과 1은 둘러의 회전속도(a)와 사과의 회전속도(b)의 비(a/b)가 수직 및 수평방향에 상관없이 약 1.1의 비율로 회전하였으며 상대적으로 무게가 덜 나가는 사과 2는 수직 및 수평방향으로 약 1.0의 비율로 회전하여 사과 1의 슬립률이 더 높은 것을 확인할 수 있었다.
- (마) VNIR 초분광 영상 카메라의 관측영역(FOV ; Field of View) 설정에 있어서 고려해야 할 인자로 작용할 수 있으며 회전되는 사과의 직경에 따라 카메라에 노출되는 횟수와 범위에도 영향을 줄 것으로 판단되었다.

표. 롤러 회전속도와 사과 회전속도와의 속도 비율

롤러회전속도 평균(a, RPM)	사과 회전속도 평균(b, RPM)			
	사과 1		사과 2	
	수직 방향 (a/b)	수평 방향 (a/b)	수직 방향 (a/b)	수평 방향 (a/b)
22.58	20.4(1.1)	20.6(1.1)	23.1(1.0)	21.9(1.0)
27.15	24.7(1.1)	24.9(1.1)	27.6(1.0)	26.6(1.0)
31.44	28.8(1.1)	28.5(1.1)	32.0(1.0)	31.7(1.0)
36.12	32.6(1.1)	32.5(1.1)	37.1(1.0)	35.3(1.0)
40.82	37.1(1.1)	35.9(1.1)	41.3(1.0)	39.2(1.0)
45.43	41.8(1.1)	40.9(1.1)	45.4(1.0)	44.1(1.0)

## 2. 이송중 회전 사과의 표면 결함 검출 성능시험

### 가. 단일 파장별 VNIR 초분광 영상 측정 실험

#### (1) 재료 및 방법

(가) 공시재료는 전북 진안에서 '15년에 생산된 후지 사과 시료중에서 정상 및 결함 시료를 사용하였으며 중량별로(300g 미만, 300g 이상 350g미만, 350g 이상) 3단계로 분류하였다.



그림 123. 300g 미만 정상 사과와 결함사과 유형

표 300g 미만 정상 사과와 결함사과 유형

구분	중량(g)	수직방향 원주(cm)	수평방향 원주(cm)	결함유형
정상	288	28.3	28.3	
	258	27.0	27.5	
	259	27.2	26.6	
	261	27.1	27.0	
	297	28.5	28.0	
	273	27.5	27.3	
	243	25.5	28.0	
	260	27.5	27.0	
	263	27.2	26.8	
	298	28.6	28.6	
	268	27.0	26.9	
	268	27.0	27.5	
결함	255	27.2	26.9	측면주름, 상단반점
	287	27.8	28.5	하단반점
	254	26.7	27.0	황색무늬
	268	27.2	27.2	측면 명
	251	26.5	26.8	상단황색무늬, 하단주름
	288	28.3	29.1	상단미착색
	267	27.7	26.5	하단미착색
	259	26.8	27.7	상단황색무늬
	265	26.8	27.7	상단부패, 상단미착색
	249	26.6	27.6	상단병해, 하단미착색
	271	27.5	27.9	측면하단명, 하단명, 미착색, 반점
	277	27.2	28.4	하단명, 미착색, 상단병해
	274	27.5	27.3	열과, 하단미착색
	259	27.6	27.0	상단병해, 상단주름
	273	27.9	27.7	상단미착색, 명, 하단명
	263	27.1	26.7	측면부패
	267	27.7	27.2	측면미착색, 하단황색무늬
	284	27.1	28.4	측면명
	235	25.7	26.5	측면명
	272	28.7	27.7	측면미착색, 하단황색무늬



그림 124. 300g 이상 350g 미만 정상 사과와 결함사과 유형

표 300g 이상 350g 미만 정상 사과와 결함사과 유형

구분	중량(g)	수직방향 원주(cm)	수평방향 원주(cm)	결함유형
정상	303	28.8	29.2	
	301	28.2	28.5	
	300	28.4	28.6	
	327	29.6	29.5	
	316	28.7	29.8	
결함	344	30.5	30.2	정상
	313	28.9	29.2	상단미착색
	324	28.9	28.9	상단미착색
	330	29.2	29.6	측면명, 상단미착색
	347	29.4	29.9	하단명
	345	30.2	30.0	하단반점
	309	28.9	28.8	측면명
	309	27.6	30.4	측면미착색, 하단반점
	332	28.5	29.8	전체미착색, 측면반점
	310	28.4	28.8	상하단미착색
	312	29.1	28.9	하단부패, 측면병해
	306	28.4	28.6	상단병해
	324	28.8	29.0	측면미착색
	347	29.8	29.5	열과, 하단미착색
	333	28.9	30.1	하단부패, 하단반점
	312	28.4	29.3	상하단미착색
	315	28.9	29.1	측면미착색
	311	28.2	29.5	상단황색무늬
	330	29.8	29.8	하단명
	311	28.8	29.3	측면미착색



그림 125. 350g 이상 정상 사과와 결함사과 유형

표 29 350g 이상 정상 사과와 결함사과 유형

구분	중량(g)	수직방향 원주(cm)	수평방향 원주(cm)	결함유형
정상	361	29.2	30.7	
	363	30.4	30.5	
	360	29.7	30.3	
	374	30.6	30.6	
	364	29.6	30.7	
	357	30.5	30.7	
결함	389	30.8	31.0	상부 미착색
	350	29.5	30.0	상부혹반점2개, 측면명, 꼭지병
	379	30.8	30.5	측면 미착색
	352	31.0	30.0	측면혹반점, 측면노란반점
	354	30.0	30.4	하단다수혹반점, 상부미착색
	354	30.2	30.0	상단미착색, 하단다수반점
	358	29.9	30.2	상하단미착색
	467	32.8	33.1	상단열과
	352	28.9	30.3	상단미착색
	356	29.8	30.9	하단부파
	380	29.8	31.8	상하단미착색
	370	30.8	31.0	상단미착색

(나) 실험에 사용된 시료는 중량과 결함 유형별로 롤러 회전 장치에 투입되어 회전하는 정상 및 결함 유형별 사과로부터 단일 파장의 초분광 영상을 획득하기 위한 실험을 수행하였다.

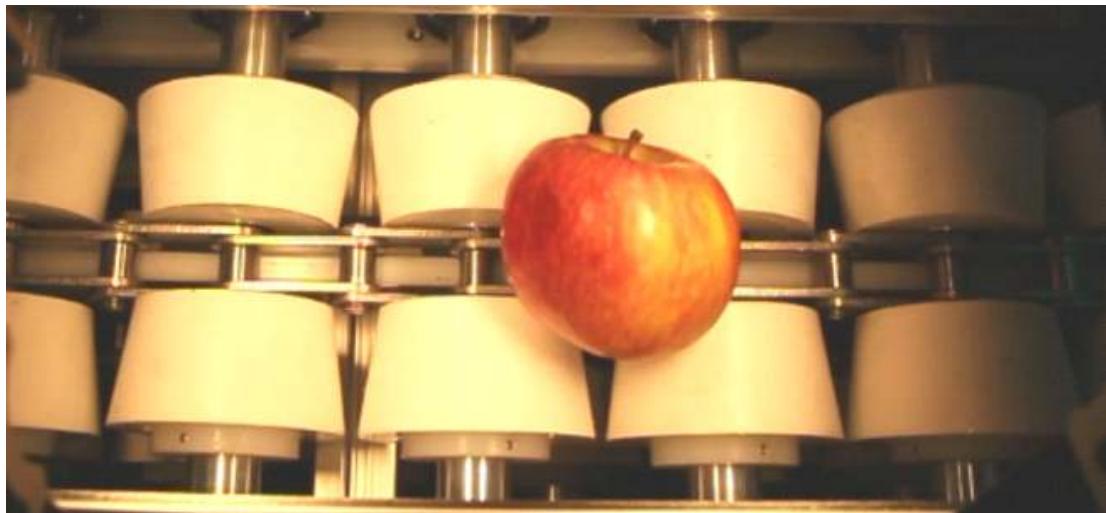


그림 126. 구동 롤러에서 회전중인 사과

## (2) 성능실험 결과

- (가) 회전 사과로부터 획득한 단일파장의 VNIR 초분광 영상은 478.8, 550.4, 700.2, 777.2, 849.2 nm 파장대역에서 영상을 추출하였으며 명이 발생하여 부패가 진행되는 결함사과의 결함 부위가 파장대역별로 정상 부위와 구분되어 표현되었다.
- (나) 영상획득을 위해 사용한 프로그램은 카메라 제조사에서 제공하는 소프트웨어 개발 키트(SDK ; Software Development Kit)을 기본으로 하여 제작된 프로그램을 사용하여 획득하였다.
- (다) 획득한 회전 사과의 영상은 구동 롤러가 직진 작동을 하지 않고 롤러만 회전한 상태에서 획득한 영상으로 결함부위가 연속해서 추출되었다.

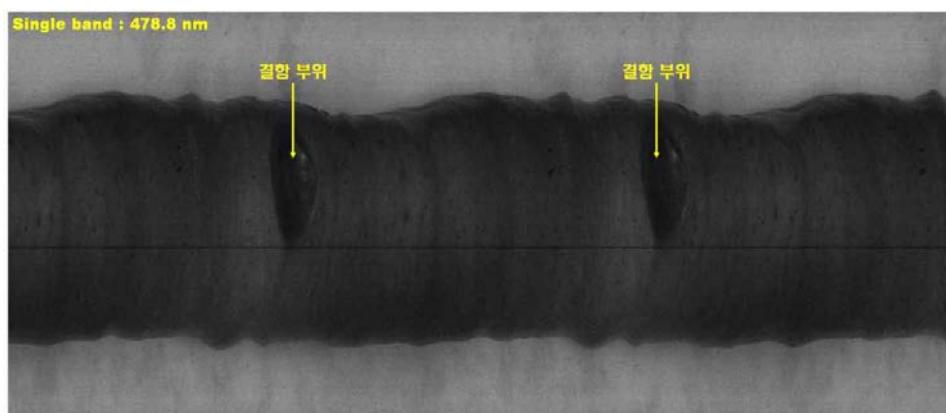


그림 127. 478.8 nm 파장대역에서의 회전 사과의 초분광 영상

(라) 740 nm 파장대역의 가시광선 영역에서는 550 nm 이하에서는 전체적으로 낮은 반사도 값으로 영상이 어둡게 측정되었으며 700 nm에서 근적외선 영역 전인 750 nm 영역에서는 광 포화(light saturation) 현상과 같이 높이 반사도를 나타낸다.

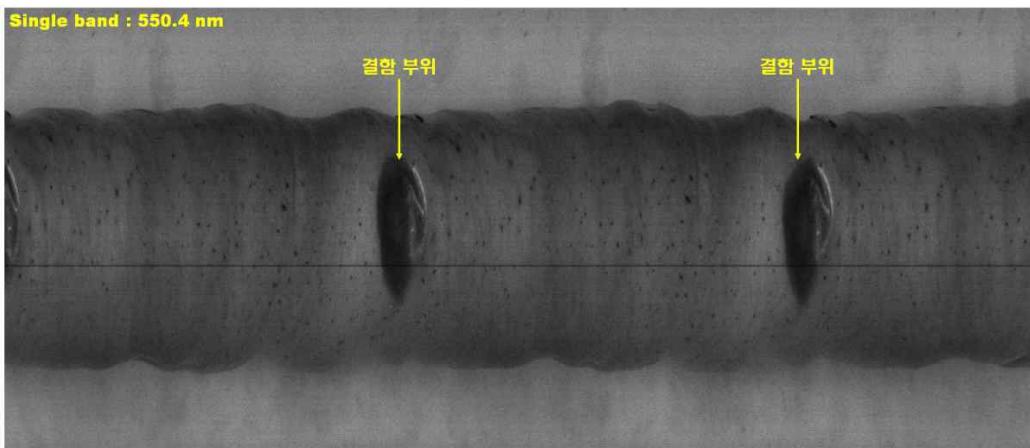


그림 128. 550.4 nm 파장대역에서의 회전 사과의 초분광 영상

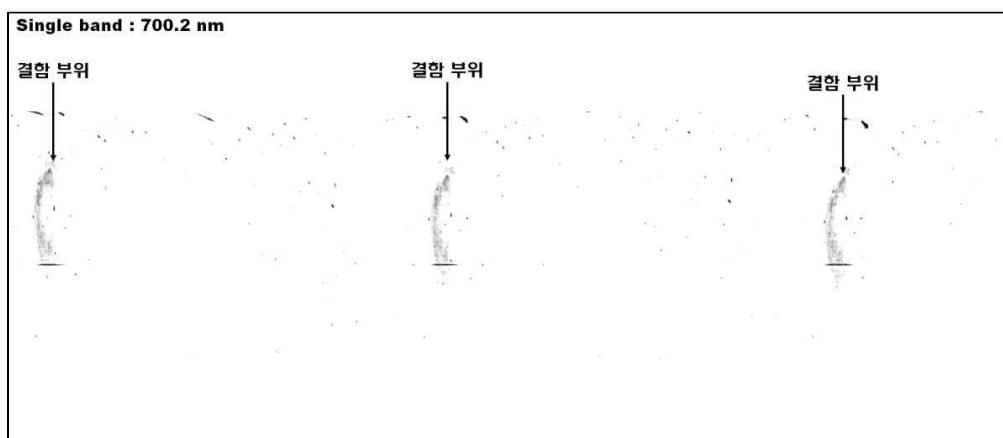


그림 129. 700.2 nm 파장대역에서의 회전 사과의 초분광 영상

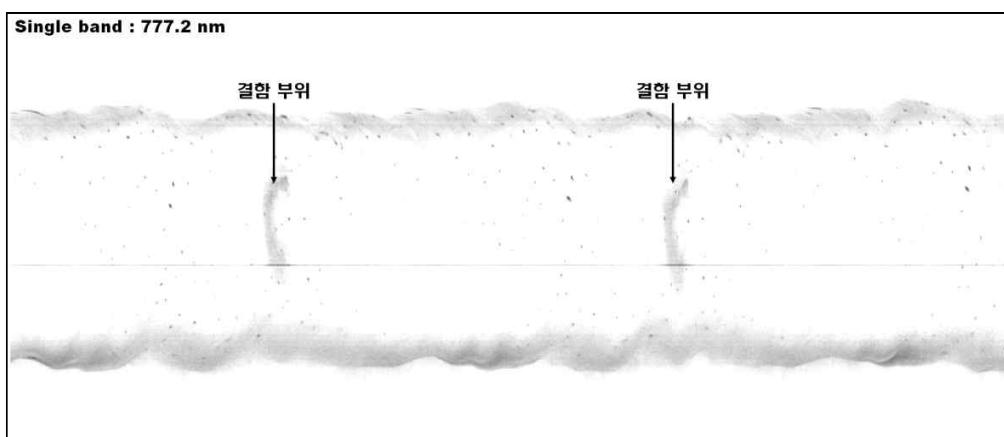


그림 130. 777.2 nm 파장대역에서의 회전 사과의 초분광 영상

(마) 근적외선 파장대역인 849.2 nm에서는 결함 부위와 정상 부위의 밝기 차이가 분명하게 표현되어 결함 검출을 위한 이치화 영상 변환에 유리할 것으로 판단된다.

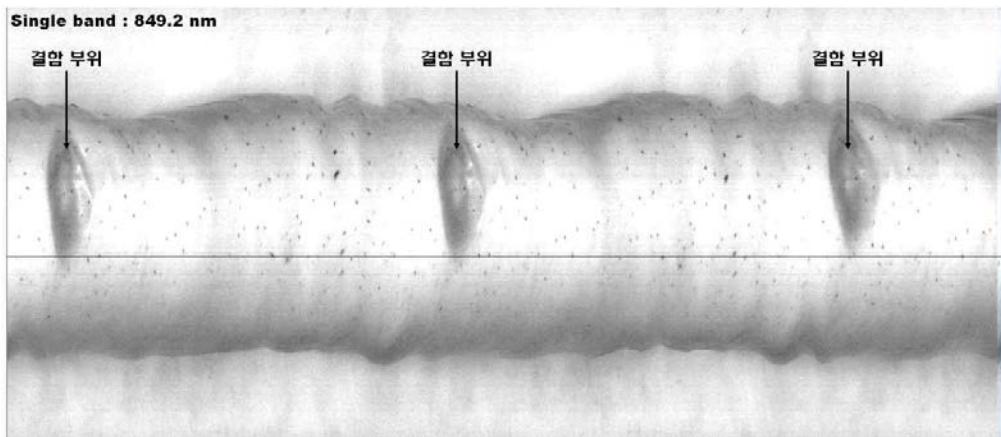


그림 131. 849.2 nm 파장대역에서의 회전 사과의 초분광 영상

(바) 개발된 사과 결함 검출 프로그램을 이용하여 직진 및 회전 구동을 동시하는 회전 사과의 초분광 영상을 획득하였으며 이때 구동롤러의 회전속도는 22.58 rpm, 직진 속도는 50mm/s로 설정하였다.

(사) 병해(Scab)가 발생한 결함 사과의 회전 영상에서 3개의 단일 파장 472.8, 633.6, 793.6 nm에서 꽃받침(Calyx) 및 정상 부위와는 차별화되어 병해 부위가 검출되는 것을 확인할 수 있었으며 추후 이치화 영상 알고리즘을 적용하여 판별하고자 하였다.



그림 132. 회전 사과의 단일 파장 VNIR 초분광 영상(472.8, 633.6, 793.6 nm)>



그림 133. 회전 사과의 단일 파장 VNIR 초분광 영상(472.8, 633.6, 793.6 nm)

## 나. 이송 사과의 전체 표면 결합 검출 시스템의 표면 결합 판정 성능 실험

### (1) 이송 속도별 사과의 최소 결합 검출 크기 구명 실험

(가) 이송되는 사과의 직진 속도별로 측정할 수 있는 결합의 최소 크기를 구명하기 위해 그림 140과 같은 시료와 조건을 이용하여 실험을 진행하였다.

(나) 이송속도는 시간당 3,600개를 측정할 수 있는 속도인 100 mm/s 조건, 시간당 5,400개를 측정할 수 있는 속도인 150 mm/s 조건, 시간당 7,200개를 측정할 수 있는 조건으로 하였으며 적용 파장은 단파장은 905, 920 nm로 검출하였으며 차연산은 905-638 nm을 적용하여 검출하였다.

(다) 그림 140에서 결합(1)은 병해이며 결합(2)는 상처이며 크기는 각각 직경 2 mm, 길이 4 mm로서 이송속도별로 획득한 이치화 영상의 픽셀수를 산출하였다.

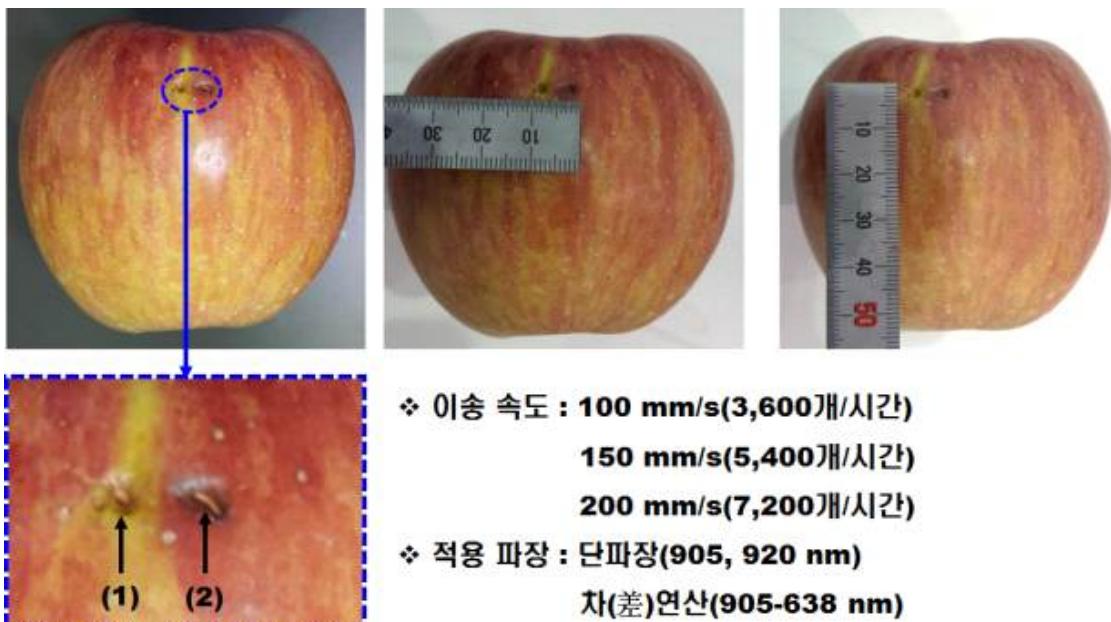


그림 140. 이송 속도별 최소 결합 검출 크기 구명을 위한 공시재료 및 조건

### (2) 이송 속도 100 mm/s(처리량 3,600개/시간)에서의 이치화 영상 결과

(가) 그림 141은 이송속도 100 mm/s에서 이송되는 결합 사과의 회전 영상으로서 상단은 905 - 638 nm 차 연산에서 획득한 초분광 영상이며 이치화 영상은 905 - 638 nm의 초분광 영상에 대한 이치화 영상을 나타내고 있다.

(나) 하단의 이치화 영상에서는 실제 2개의 결합 부위가 이치화되어 흰색으로 표시되어 있으며 2개에 대한 픽셀 개수는 총 225 픽셀로 나타내어졌으며 100 mm/s의 이송속도에서는 결합 검출이 양호한 것으로 판단되었다.

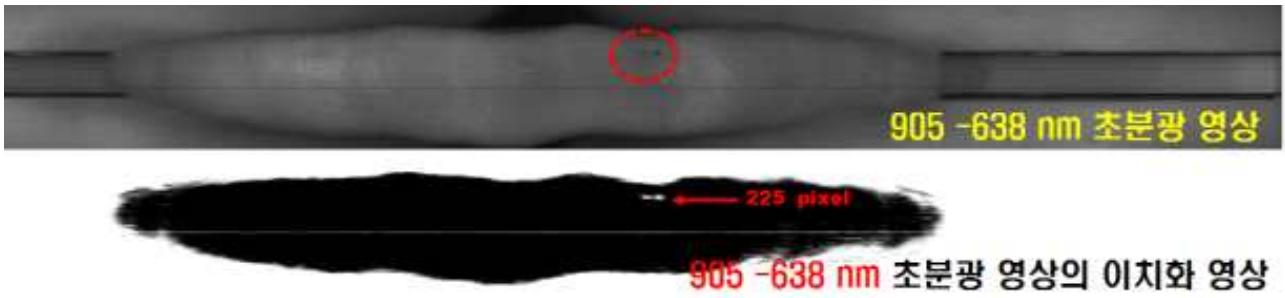


그림 141. 이송 속도 100 mm/s(처리량 3,600개/시간)에서의 이치화 영상 결과

(3) 이송 속도 150 mm/s(처리량 5,400개/시간)에서의 이치화 영상 결과

- (가) 그림 142는 이송속도 150 mm/s에서 이송되는 결함 사과의 회전 영상으로서 상단은 920 nm 단일 파장에서 획득한 초분광 영상이며 이치화 영상은 920 nm의 초분광 영상에 대한 이치화 영상을 나타내고 있다.
- (나) 150 mm/s의 이송속도에서는 사과의 결함 부위가 2회 노출되어 동일한 결함 부위가 2번의 검출되었으며 앞부분에서는 2개의 결함중 1개로 통합되어 검출되었고 뒷부분에서는 2개의 결함이 모두 검출되었으면 각각 92, 145 픽셀이 측정된 것으로 나타났다.
- (다) 이송속도 100 mm/s에서 보다는 전체 결함 픽셀수가 237 픽셀로 많았지만 사과 회전시 2회 노출로 인한 결함 부위가 중복으로 측정된 경우로서 상대적으로 속도가 증가될수록 검출되는 검출 픽셀수가 감소하는 것으로 판단되었다.

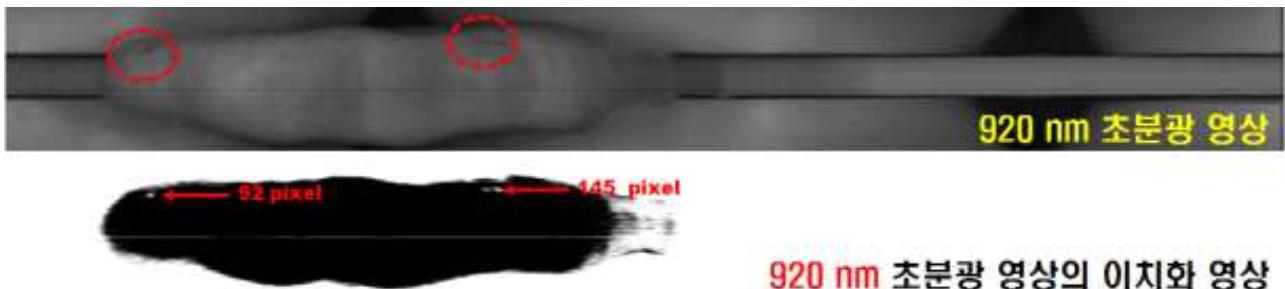


그림 142. 이송 속도 150 mm/s(처리량 5,400개/시간)에서의 이치화 영상 결과

(4) 이송 속도 200 mm/s(처리량 7,200개/시간)에서의 이치화 영상 결과

- (가) 그림 143은 이송속도 200 mm/s에서 이송되는 결함 사과의 회전 영상으로서 상단은 905 nm 단일 파장에서 획득한 초분광 영상이며 이치화 영상은 905 nm의 초분광 영상에 대한 이치화 영상을 나타내고 있었다.
- (나) 이송속도 100 mm/s, 150 mm/s에서는 사과의 결함 부위 2개가 모두 획득되었지만 이송속도 200 mm/s에서는 2개 부위중의 1개만 측정되는 것을 확인할 수 있었으며 이송속도가 증가됨에 따라 동일한 FOV(Field of View; 관측영역)에서 사과

보다는 룰러부가 보다 많이 영상으로 획득되는 것을 알 수 있으며 세로축의 해상도(resolution)는 1004 픽셀로 동일하지만 가로축의 사과에 대한 해상도는 상대적으로 감소된 것으로 판단되었다.



그림 143. 이송 속도 200 mm/s(처리량 7,200개/시간)에서의 이치화 영상 결과

#### (5) 이송속도와 사과 결함의 픽셀 크기 비교 실험

(가) 이송되는 사과의 직진 속도가 증가함에 따라 초분광 영상으로 획득한 이치화 영상의 픽셀값의 변화를 구명하기 위한 실험을 수행하였으며 이때 이송속도는 시간당 3,600개를 측정할 수 있는 속도인 100 mm/s 조건, 시간당 5,400개를 측정할 수 있는 속도인 150 mm/s 조건, 시간당 7,200개를 측정할 수 있는 조건으로 하였으며 적용 파장은 단일파장은 905, 920과 차 연산은 905-638 nm을 적용하여 검출하였다.

(나) 그림 144에서 실험에 사용된 결함의 유형은 병해로서 결함의 크기는 직경 7 mm 정도였으며 각각 이송속도별로 획득한 이치화 영상의 픽셀수를 계산하였다.

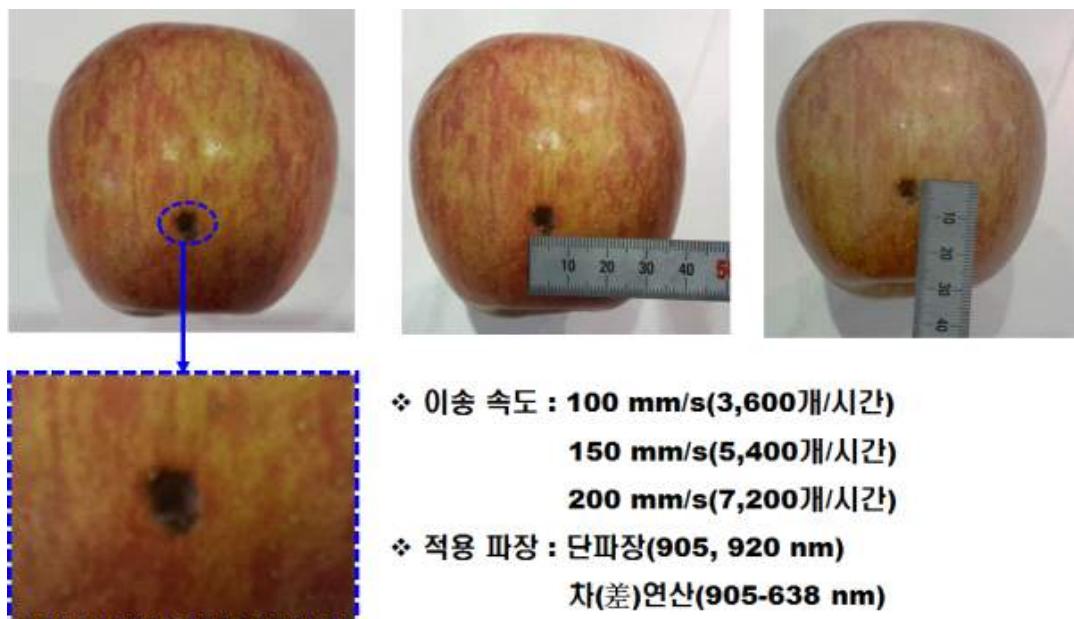


그림 144. 이송속도와 사과 결함의 픽셀 비교를 위한 공시재료 및 조건

(다) 그림 145는 이송속도 100 mm/s에서 이송되는 결합 사과의 회전 영상으로서 상단은 905 nm 단일 파장에서 획득한 초분광 영상을 대표적으로 보여주고 있으며 이치화 영상은 각각 905, 920, 905-638 nm의 초분광 영상에 대한 이치화 영상을 나타내고 있다.

(라) 각각의 이치화 영상의 픽셀 결과에서와 같이 적용되는 파장과 문턱값이 상이하므로 검출 픽셀수도 차이가 났으며 가장 많은 검출 픽셀수는 905-638 nm의 차연산에서 321 픽셀이 검출되었다.

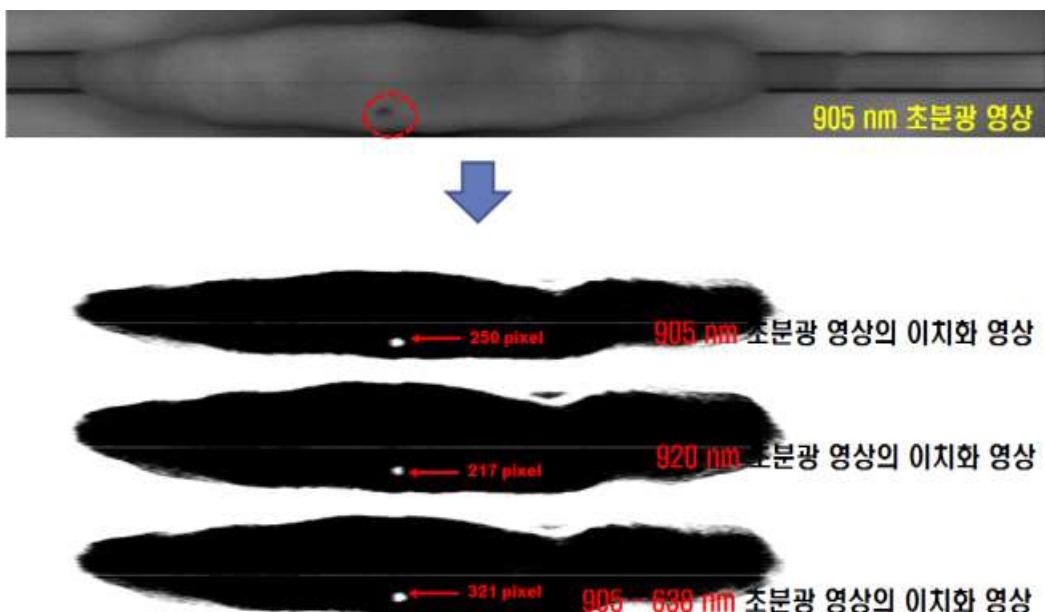


그림 145. 이송 속도 100 mm/s(처리량 3,600개/시간)에서의 이치화 영상 결과

(마) 그림 146은 이송속도 150 mm/s에서 이송되는 결합 사과의 회전 영상으로서 상단은 920 nm 단일 파장에서 획득한 초분광 영상을 대표적으로 보여주고 있으며 이치화 영상은 각각 905, 920, 905-638 nm의 초분광 영상에 대한 이치화 영상을 나타내고 있다.

(바) 각각의 이치화 영상의 픽셀 값은 905 nm파장의 이치화 영상에서는 204 픽셀, 920 nm 파장의 이치화 영상에서는 150 픽셀, 905-638 nm 차연산의 이치화 영상에서는 209 픽셀의 결과를 나타내었으며 이송속도 100 mm/s에서와 같이 가장 많은 검출 픽셀수는 905-638 nm의 차 연산에서 검출되었다.

(사) 그림 147은 이송속도 200 mm/s에서 이송되는 결합 사과의 회전 영상으로서 상단은 905 nm 단일 파장에서 획득한 초분광 영상을 대표적으로 보여주고 있으며 이치화 영상은 각각 905, 920, 905-638 nm의 초분광 영상에 대한 이치화 영상을 나타내고 있다.



그림 146. 이송 속도 150 mm/s(처리량 5,400개/시간)에서의 이치화 영상 결과

- (아) 각각의 이치화 영상의 픽셀 값은 905 nm파장의 이치화 영상에서는 232픽셀, 920 nm 파장의 이치화 영상에서는 195 픽셀, 905-638 nm 차연산의 이치화 영상에서는 199 픽셀의 결과를 나타내었다.
- (자) 이송속도가 증가할수록 동일한 결함 크기에 대해서 비례적으로 픽셀수가 증가하지는 않았으며 이는 사과가 회전하면서 결함의 위치나 방향이 바뀌면서 검출되는 픽셀수에서 차이가 나는 것으로 판단되었다.



그림 147. 이송 속도 200 mm/s(처리량 7,200개/시간)에서의 이치화 영상 결과

## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야 기여도

### 제1절 : 목표대비 달성도

당초 목표	가중치(%)	개발 내용	달성도(%)
1) 사과의 전체 표면 결함 분광 특성 구명	30	1) 사과 표면 내외부 결함 요인 구명 시험을 통한 결함 유형별 분광 특성 구명	100
2) 적정 파장 대역 선발 및 시작기 개발	30	2) 정지 상태에서의 내외부 결함 검출용 알고리즘 개발 및 이송중 사과의 전체 표면 결함 검출 시스템 개발	100
3) 사과 전체 표면 결함 판정 시스템 성능시험	40	3) 이송중 사과의 전체 표면 결함 검출 알고리즘 개발 및 표면 결함 판정 성능시험	100
	100%		100

### 제2절 : 정량적 성과

연도 성과지표명		당초 목표 (전체)	실적	달성도 (%)	가중치 (%)
논문게재	SCI	-	2	100	
	비SCI	3	3	100	20
산업재산권	출원	1	1	100	10
	등록				
학술발표	국제	1	2	100	10
	국내	3	10	100	40
정책자료 기관제출		1	1	100	5
영농기술·정보 기관제출		1	1	100	5
세미나, 심포지엄, 워크숍		-	1	100	
홍보성과		10	163.5	100	10
계		20	184.5	100	100

## 제 5 장 연구 결과의 활용 계획

- 개발기술의 산업재산권 등록 및 기술이전
  - 이송중 사과의 결함 검출 시스템
- 정책자료 기관제출
  - 이송중 사과의 표면 결함 검출 시스템 보급지원 건의
- 영농기술·정보 기관제출
  - 이송중 사과의 표면 결함 검출 시스템 사용 방법 및 이용 효과
- 학술지 논문 게재
  - 국내외 주요 학술지 게재 및 학술대회 논문 발표

## 제 6 장 연구 과정에서 수집한 해외 과학 기술 정보

해당사항 없음

## 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 등록한 연구시설·장비 현황

해당사항 없음

## 제 9 장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적

### 가. 연구실 안전조치 이행계획

#### ○ 안전관리대책

- 연구실 안전 환경관리자 지정 운영 및 연구실 정기 점검 실시
- 신규 연구참여자에 대한 8시간 교육 및 전체 연구참여자를 대상으로한 정기 교육 실시
- 연구참여자에 대한 산업재해보험 가입
- 연구활동 종사자에 대한 연 1회 특수건강검진 실시

### 나. LMO 연구시설 및 수입신고 현황

해당사항 없음

## 제 10 장 연구개발과제의 대표적 연구실적

번호	구분 (논문 /특허 /기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문게재지/ 특허등록국가	Impact Factor	논문게재일 /특허등록일	사사여부 (단독사사 또는 중복사사)	특기사항 (SCI여부/ 인용횟수 등)
1	논문	Detection of melamine in milk powders using near-infrared hyperspectral imaging combined with regression coefficient of partial least square regression model	농과원	주저자	TALANTA	3.545	2016.1.16.	단독사사	SCI
2	논문	Development of a Portable 3CCD Camera System for Multispectral Imaging of Biological Samples	농과원	공동	Sensors	2.245	2014.10.27.	단독사사	SCI
3	논문	Non-destructive and Rapid Prediction of Moisture Content in Red Pepper ( <i>Capsicum annuum L.</i> ) Powder Using Near-infrared Spectroscopy and a Partial Least Squares Regression Model	농과원	주저자	바이오시스템 공학회지	0.3818	2014.09.01.	단독사사	KCI
4	논문	Development and Performance Evaluation of Falling-type Dried-Persimmon Weight Sorting System Utilizing Load Cell	농과원	주저자	바이오시스템 공학회지	0.3818	2015.12.01.	단독사사	KCI
5	논문	Development of Models for the Prediction of Domestic Red	농과원	주저자	바이오시스템 공학회지	0.3818	2015.03.02.	단독사사	KCI

	Pepper ( <i>Capsicum annuum L.</i> ) Powder Capsaicinoid Content using Visible and Near-infrared Spectroscopy							
--	---	--	--	--	--	--	--	--

## 제 11 장 기타사항

해당사항 없음

## 제 12 장 참고문헌

- 서상룡, 성제훈. 1997. 컴퓨터 시각에 의한 사과 결점 검출. *한국농업기계학회지*. 22(2) : 217~226.
- 농림축산식품부. 농산물 검사기준 『17. 사과』. 2015.
- 이수희, 노상하. 1998. 기계시각을 이용한 후지사과의 색 측정. *한국농업기계학회 동계 학술대회 논문집*. 374~379.
- 이수희, 노상하. 1999. 기계시각을 이용한 후지사과의 형상선별에 관한 연구. *한국농업 기계학회 동계학술대회 논문집*. 569~574.
- 손미령, 조래광. 2000. 사과 착색도의 비파괴 측정을 위한 근적외 분광분석법의 응용. *농한국식품저장유통학회지*. 7(2) : 155~159.
- 이강진, 강석원, 최규홍, 손재룡, 김기영. 2005. 사과와 배의 내부품질판정용 투과식 근적외선시스템 개발. *농업공학연구소 시험연구사업보고서*. 332~342.
- 이강진, 이호영, 권현중, 손재룡, 강석원, 최완규. 2006. 가시광선 및 근적외선 투과스펙트럼을 이용한 내부 갈변 사과의 신속 검출. 2006. *한국농업기계학회 하계학술대회 논문집*. 11(2) : 423~426.
- 조병관, 백인석, 이남근, 모창연. 2011. 초분광 반사광 영상을 이용한 '후지' 사과의 명검출에 관한 연구. *바이오시스템공학회지*. 36(6) : 484~490.
- Tao, Y., Heinemann, P. H., Varghese, Z., Morrow, C. T., & Sommer, H. J., III 1995. Machine vision for colour inspection of potatoes and apples. *Transactions of the ASAE*. 38(5) : 1555~1561.
- Nalcano, K. 1997. Application of neural networks to the color grading of apples. *Computers and Electronics in Agriculture*. 18 : 105~116.
- Aleixos, N., Blasco, J., Navarrón, F., Moltó, E., 2002. Multispectral inspection of citrus in real-time using machine vision and digital signal processors. *Computers and Electronics in Agriculture*. 33(2) : 121~137.
- Leemans, V. and Destain, M.F. 2004. A real-time grading method of apples based on features extracted from defects. *Journal of Food Engineering*. 6 : 83~89.
- Mehl, P.M., Chen, Y.R., Kim, M., Chan, D.E., 2004. Development of a hyperspectral imaging system for the detection of apple surface defects and contaminations. *J. Food Eng.* 61 : 67 - 81.
- Unay, D., & Gosselin, B. (2006). Automatic defect segmentation of 'Jonagold' apples on multi-spectral images: A comparative study. *Postharvest Biology and Technology*, 42 : 271 - 279.

## 주         의

1. 이 보고서는 농촌진흥청에서 시행한 「농업기초기반연구사업」의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농촌진흥청에서 시행한 「농업기초기반연구사업」의 연구 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.