



과정기반 작물모형을 이용한 웹 기반 밀 재배관리 의사결정 지원시스템 설계 및 구축

Design and Development of Web-Based Decision Support Systems for Wheat Management Practices Using Process-Based Crop Model

김솔희^a · 석승원^b · 청리광^c · 장태일^d · 김태곤^{e,†}

Kim, Solhee · Seok, Seungwon · Cheng, Liguang · Jang, Taeil · Kim, Taegon

ABSTRACT

This study aimed to design and build a web-based decision support system for wheat cultivation management. The system is designed to collect and measure the weather environment at the growth stage on a daily basis and predict the soil moisture content. Based on this, APSIM, one of the process-based crop models, was used to predict the potential yield of wheat cultivation in real time by making decisions at each stage. The decision-making system for wheat crop management was designed to provide information through a web-based dashboard in consideration of user convenience and to comprehensively evaluate wheat yield potential according to past, present, and future weather conditions. Based on the APSIM model, the system estimates the current yield using past and present weather data and predicts future weather using the past 40 years of weather data to estimate the potential yield at harvest. This system is expected to be developed into a decision support system for farmers to prescribe irrigation and fertilizer in order to increase domestic wheat production and quality by enhancing the yield estimation model by adding influence factors that can contribute to improving wheat yield.

Keywords: Digital agriculture; decision support system; dashboard; wheat; APSIM

I. 서 론

우리나라 밀 소비량은 지속적으로 증가하고 있지만 자급률은 1% 수준밖에 되지 않아 안정적인 생산기반을 마련할 필요가 제기되고 있다. 쌀과 밀, 서류, 콩 등을 포함한 우리나라 1인당 양곡소비량은 2022년 기준 총 125.4 kg이며, 이 중에서 쌀이 약 45.2% (56.7 kg), 그다음으로 밀이 30.3% (38.0 kg)를 차지한다. 2022년 1인당 밀 소비량을 기준으로 밀 소비량은 2012년 (32.9 kg/인)에 비해 연간 0.5%씩 증가하고 있다 (MAFRA, 2023a). 반면 식량자급률 (사료용 제외)은 2022년 기준 1.3%를 밑도는 수준이다 (MAFRA, 2023b). 이러한 문제

를 해결하고자 정부는 2018년 12월에 ‘밀 산업 중장기 발전대책’을 발표하고 이듬해 「밀산업육성법」을 제정 (2019.8.27.)하여 2025년까지 자급률 5%를 목표로 체계적이고 안정적으로 밀 산업을 육성하고 지원할 수 있는 법적 토대를 마련하였다. 밀의 자급률을 향상시키기 위해서는 수입밀 대비 가격과 품질 경쟁력을 확보할 필요가 있다. 밀 재배면적의 확대와 더불어 단위면적당 생산량을 높이고 산업체에서 만족할만한 품질을 향상시키기 위해서는 체계적인 재배 및 관리가 뒷받침되어야 한다.

밀과 같이 대부분 노지에서 재배하는 작물은 시설재배와 다르게 기상환경 조절이 어렵고 돌발 재해 및 병해충 피해와 같은 외부적인 요인에 따라 생산량에 큰 영향을 미친다 (Kang et al., 2015). 이뿐만 아니라 경작지의 위치와 경사, 토성에 따라 양수분의 차이가 발생하여 모든 필지에 일관된 재배환경을 조성하기에도 어려움이 있다 (Park et al., 2018; Seo et al., 2020). Song et al. (2022)은 우리나라 농경지 면적의 95% 가 노지이며, 농가 단위 경지면적이 2 ha 이하인 소규모 농가인 실정을 고려하여 노지 스마트 디지털농업을 접근할 필요성을 제기하였다. 농림축산식품부는 노동집약적이고 경험 위주의 관행농법 위주의 노지재배 방식을 탈피하여 노동력을 절감하는 동시에 안정적인 생산과 생산성 향상을 위해 데이

^a Assistant Research Professor, Department of Smart Farm, Jeonbuk National University

^b Undergraduate, Department of Smart Farm, Jeonbuk National University

^c Ph.D. Student, Department of Rural Construction Engineering, Jeonbuk National University

^d Professor, Department of Rural Construction Engineering, Institute of Agricultural Science & Technology, Jeonbuk National University

^e Assistant Professor, Department of Smart Farm, Jeonbuk National University

† Corresponding author

Tel.: +82-63-270-2557

E-mail: taegon@jbnu.ac.kr

Received: December 28, 2023

Revised: May 02, 2024

Accepted: May 08, 2024

터 기반의 노지 스마트농업 시범사업을 2020년부터 운영하고 있다. 한 예로, 경북 안동 사과 주산지와 충북 괴산 콩 주산지를 대상으로 관수·관비 등 ICT 기자재와 스마트 농기계(드론, 무인트랙터 등)를 지원하고, 기존 농산물산지유통시설(Agricultural Product Processing Complex, APC) 스마트화를 통해 산지에서 발생하는 환경·생육·경영 데이터를 수집하여 수급 예측을 모색하고 있다 (KIFA, 2024).

노지작물의 디지털 기술을 활용한 스마트 농업은 재배 시기별로 환경과 작물 성장 상황을 고려하여 적절한 비료 공급, 관개, 수확시기 조절 등 최적의 계획을 통한 생산성 향상을 도모한다. 이를 위해 작물모형을 활용한 의사결정 지원시스템(Decision Support System, 이하 DSS)을 제안하는 바, 재배 환경과 관리 방법에 따른 작물의 생육 예측 결과를 제공함으로써 작물관리에 대한 농가의 의사결정에 도움을 줄 수 있다. 특히 노동력 및 농자재를 최소한으로 투입하면서 생산량과 품질을 극대화할 수 있도록 작기 내에 다양한 영향인자를 시계열로 고려할 필요가 있다. 이때 필요한 모형이 과정기반 작물모형(Process-based Crop Model)이다. 과정기반 작물모형은 통계기반 작물모형과 달리 식물의 생리기작과 환경요인의 관계를 바탕으로 작물 성장을 시계열로 모의하기 때문에, 생육시기별로 환경요인 및 영농방식에 대한 평가가 가능하다. 특히 기후변화 조건에서 작물의 생육 변화를 모의할 수 있는 다양한 과정 기반 작물 모형 가운데 APSIM(Agricultural Production Systems Simulator)은 작물 생산 예측 시스템이 모듈 형태로 구성되어 있고, 오픈소스 소프트웨어(Open Source Software, OSS)로 제공되어 다양한 환경 조건에서의 모듈을 개발하여 생산량을 예측할 수 있다 (Kim et al., 2015). 통계기반모형은 기계학습모형으로도 불리며, 데이터를 중심으로 유전자형, 환경 등 입력자료와 목적변수인 작물수확량 사이의 복잡한 관계를 근사하여 구할 수 있고 많은 연구에서 활용되고 있다. 하지만 데이터의 양과 질에 민감하여, 충분한 데이터셋이 확보된 작물에만 적용할 수 있고, 블랙박스 모형이기 때문에 잘 보정된 모델이라 할지라도 생산성에 영향을 미치는 원인 인자를 규명하기 어려운 단점을 갖고 있다 (Chang et al., 2023).

농업부문의 의사결정지원시스템은 농가의 작목 계획, 생산과 유통, 소비 전 과정에서 데이터를 기반으로 작목 추천 및 생산성 향상, 안정적 소득 증대 등 다양한 목적으로 개발되고 있다. 재배 전 단계의 의사결정은 영농 경험과 지식이 상대적으로 적은 농업인과 귀농인을 대상으로 재배 최적지, 재배 형태, 작목 등을 선정할 때 농업기상 환경을 고려하여 초기 농업 경영을 위한 의사결정에 도움을 줄 수 있는 지원도구들을 제시할 수 있는 시스템이 개발되고 있다. Kim and Cho (2022)는

시설재배를 도입하고자 하는 귀농인의 초기 경영의사결정 지원 인터페이스를 통해 토지/작물 적합성, 시설비용, 경영비 등 의 주요 의사결정 정보를 제공하는 시스템을 설계한 바 있다. 미국 ESRI사는 캐나다 농무부(Agriculture and Agri-Food Canada, AACF)와 협업하여 연간 작물 목록(Annual crop inventory)를 작성하여 캐나다 전역에서 재배되는 밭작물의 종류 및 재배 패턴을 공간정보화하여 제공하고 있다 (ESRI, 2017). 이를 통해 농지를 임대하고자 하는 농민에게 작물 계획 시 주변 경지에서 주로 재배되는 작물에 대한 정보를 제공함으로써 당해연도에 재배 할 품목을 결정하는데에 도움을 주는 시스템을 개발한 바 있다. 한국미래농업연구원은 농림축산식품부의 노지스마트농업 시범사업 공모를 통해 2020년부터 2022년까지 3년간 안동시 임하면 오대리 일대에 61.5 ha 규모의 스마트 노지 과수 생산단지를 조성하고 데이터센터 및 관제센터 구축 및 운영, 미래형 표준과수원 조성 등을 통해 노지분야(사과) 스마트농업 표준 모델을 구축하고자 하였다 (KIFA, 2024). 표준모델을 통해 생육 및 환경데이터를 수집하여 생육 및 병해충을 분석하고, 환경정보 분석과 GIS 지도를 활용하여 권역별 혹은 농가별 의사결정 지원을 위한 방제, 수확량, 비용, 장비 관리 및 예약 등 영농활동 정보를 제공한다. 또한 수확단계에서는 농업생산 형태가 작목반이나 출하반 등 농업단체를 중심으로 조직화되고 규모화되면서 출하단계에서의 의사결정이 단체 전체의 소득 제고에 큰 영향을 미치기 때문에 의사결정자가 합리적인 판단을 하는 데에 정량적인 접근방법에 대한 수요가 지속해서 증가하고 있다. 이에 한국농수산식품유통공사(Korea Agro-Fisheries & Food Trade Corporation, aT)은 농민이 ‘어떤 작물’을 ‘언제 정식’하여 ‘언제’, ‘어디에’, ‘얼마만큼’ 출하할지 의사결정하는데에 도움을 줄 수 있는 농산물 수급안정 지원 분석 플랫폼인 농산물유통종합정보시스템(농넷, NongNet)을 개발하였다 (aT, 2023).

다양한 영농 DSS 가운데 현재 개발되고 있는 재배관리 DSS는 대부분 시설원예를 대상으로 하고 있다. 시설원예 분야 DSS는 최적환경을 설정하고, 이에 맞춰 생육환경을 운영하기 때문에, 효율성을 높이기 위한 최적화 기능이 주된 목적이다. 투입자원 및 에너지를 최소화하면서 목표한 환경을 조성하는 복합환경제어가 대표적인 시스템이다. 반면 노지작물은 환경을 인위적으로 조절하기 어렵기 때문에, 생산성을 높이기 위한 미세조정보다는 생육장애를 일으킬 수 있는 환경을 회피하여 생산성의 급격한 저하를 막는 방향으로 재배기술이 운용된다. 따라서 노지작물을 재배하는 과정에서 실시간으로 기상 및 토양환경 변화를 고려하여 현 상태에서의 생산량 예상과 더불어 다년간의 시계열 환경 데이터로 앞으로 일어날 수 있는 생육장애 상황을 고려할 필요가 있으나, 현재

관련 시스템을 찾아보기 어려운 실정이다.

본 연구에서는 밀을 대상으로 재배관리 의사결정 지원시스템을 웹 기반으로 설계하고 구축하고자 한다. 과정기반 모형을 이용하여 기상여건을 평가하고, 향후 기상을 고려하여 시나리오 분석을 통해 생산량을 예측한다. 재배기간 동안 매일 평가가 이루어지고, 분석 결과가 웹기반 대시보드에 업데이트되어 의사결정을 돋는다. 과정기반 작물모형은 APSIM을 이용하였으며, 재배실험을 통해 수집한 자료를 바탕으로 모델을 구축하였다. 미래기상 예측자료는 기온, 습도, 강수량 등이 복합적으로 작용하기 때문에 임의로 생성하지 않고, 동기간의 과거 관측자료를 활용하였다. 노지 작물을 대상으로 실시간 의사지원서비스의 유사사례를 찾아보기 어렵기 때문에, 파일럿 시스템 구축으로 디지털농업모형의 원형을 제안하고자 한다.

II. 밀 재배관리 의사결정 지원시스템 설계

1. 시스템 구성

본 연구에서 구축한 밀 재배관리 의사결정 시스템은 과거, 현재 및 미래의 기상환경에 따른 밀 잠재 수확량을 종합적으로 평가하며, 사용자의 편의성을 위해 웹기반 대시보드를 이

용하여 정보를 제공하는 방법으로 설계하였다 (Fig. 1). 이 시스템에서는 과거 및 현재의 기상데이터를 이용하여 현재 상태의 생산량을 추정하고, 과거 기후 관측자료(40년)를 바탕으로 남은 작기 동안 과거 기후가 지속되는 상황을 가정하여 잠재 수확량을 산정하여 사용자에게 정보를 제공하는 방식으로 구성하였다. 이를 통해 사용자는 대상지역의 기후에 대한 경험에 많지 않더라도, 데이터를 기반으로 예측을 할 수 있다. 또한 10년 빈도 자연재난(가뭄, 홍수 등) 상황에서 피해 규모를 기울할 수 있어, 선제적인 조치를 취할 수 있다.

이러한 예측 기반 의사지원시스템의 핵심 요소는 현재의 기상자료 활용, 과정기반모델을 통하여 현재까지의 누적된 생육상태를 고려한 미래 예측, 그리고 쉬운 사용성으로 요약 할 수 있다. 본 연구에서는 현재의 기상자료 활용을 위하여, 데몬을 이용하여 매일 기상청에서 자료를 수집하여 분석에 활용하고 있다 (Kim et al., 2014). 과정기반모형은 데스크탑용 프로그램으로 제공되고 있어 사용자는 해당 프로그램을 사용자 컴퓨터에 설치하여 운영해야 하나, 본 연구에서는 서버에 프로그램을 설치하여 분석하고, 이용자는 따로 프로그램을 설치하지 않더라도 이용할 수 있도록 설계하였다. 웹으로 모든 기능을 구현함으로써, 사용자는 항상 최신의 기능으로 구동되는 시스템을 활용할 수 있다.

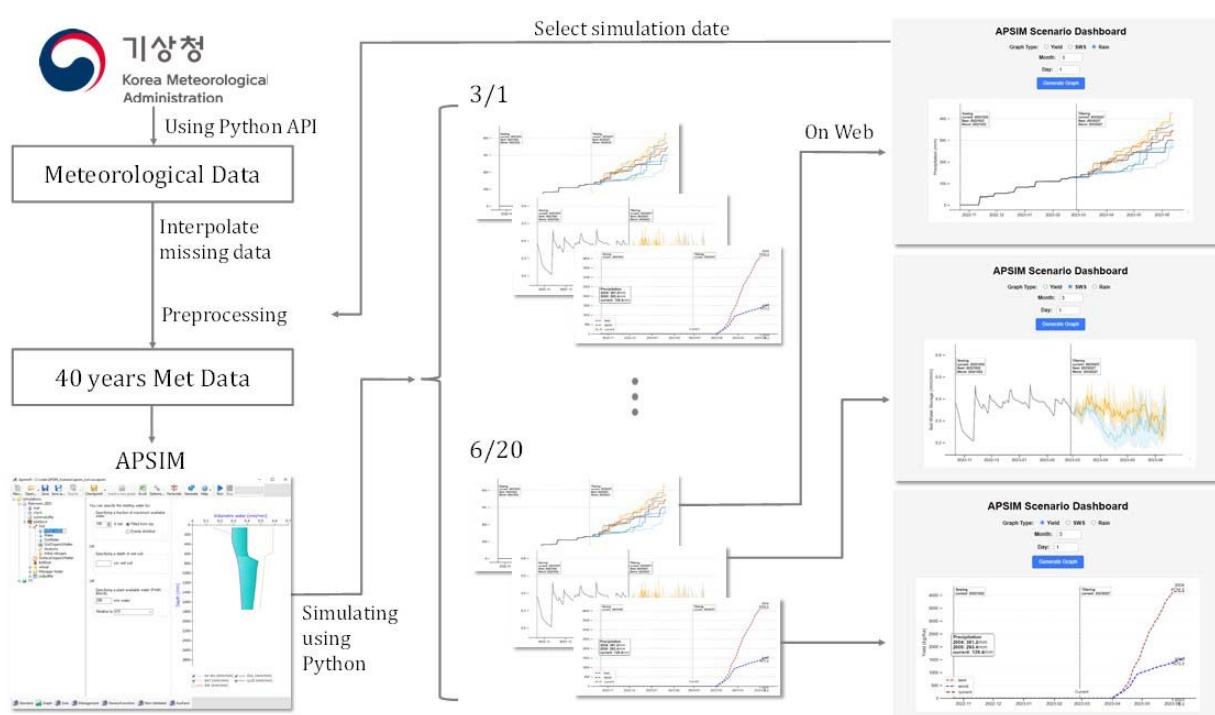


Fig. 1 Framework of web-based wheat farming decision support systems with APSIM scenario

2. APSIM 모델

APSIM (Agricultural Production Systems siMulator)은 기후 변화에 따른 작물의 생산성 예측에 주로 활용되는 과정 기반 작물 모델링 프레임워크이다 (McCown et al., 1996). AIPSIM과 같은 물리 기반 작물 모델은 대기, 토양, 기후, 현장 관리 방식 등 변이성에 따라 에너지, 물, 영양소 교환을 기반으로 일일 작물 성장을 모의한다 (Batchelor et al., 2002). 특히 APSIM은 주로 곡물인 섬유질 작물을 대상으로 다양한 토양 환경 (pH, 질소 및 인 함량, 토양수분 등)을 입력자료로 고려할 수 있으며, GIS와 연동하여 공간적인 생산 예측이 가능하다 (Wang et al., 2002). APSIM은 기상 및 토양 환경, 재배방식에 따라 작물의 생육 속도를 일 단위로 계산함으로써 잠재 생산성을 예측할 수 있지만, 해충이나 질병의 영향을 포함할 수 없다는 단점이 있다 (Keating et al., 2003; Asseng et al., 2013).

밀 생육과 관련한 APSIM-Wheat 모듈은 CERES 모델 (Ritchie and Otter, 1985)을 포트란 버전으로 이식한 코드를 모태로 많은 실험과 연구를 통해 생산량과 질소 함량 예측의 신뢰성이 검증되었다 (Brown et al., 2014). 주로 밀 품종, 강우량, 시비량, 관개량 등을 주요 입력자료로 이용한다. 또한

APSIM은 컴포넌트 기반으로 모델이 구성되어, 시스템을 이루는 각 기능들이 독립적으로 개발되어 결합할 수 있다. 관개는 영농관리의 기본으로 토양내 수분이동이 주요한 매커니즘이다. APSIM은 SWIM3 모듈을 이용하여 토양 내 수분을 모의하고 있다. SWIM3 모형은 1차원 집체형 물리모형으로, 리처드 방정식 (Richards, 1931)에 대한 수치 해석을 통해 물의 흐름을 해석한다 (Huth et al., 2012).

본 연구에서 제안한 의사지원시스템은 생산량 예측도 수행 하지만, 시나리오를 기반으로 기상조건, 관개, 양분관리 여부에 따른 생산성 저하를 파악하고, 이를 최소화할 수 있는 선제적 대안을 검토하는 것이 목표이다. 이에 밀의 생물리학적 특성을 고려하여 기상조건 변화에 따른 생산량을 예측하는 데 있어서 APSIM이 적합하다고 판단하여 시스템 내에 탑재하였다. 본 연구에서 사용한 버전은 APSIM 7.10 r4218이다.

3. 시스템 특징

시스템상에서 특정 일자를 입력하면, 해당 일자까지의 기상환경과 해당 일자부터 수확 때까지 평년 기상환경을 반영하여 생산량을 추정할 수 있다. 기상환경은 일조 시간, 일사

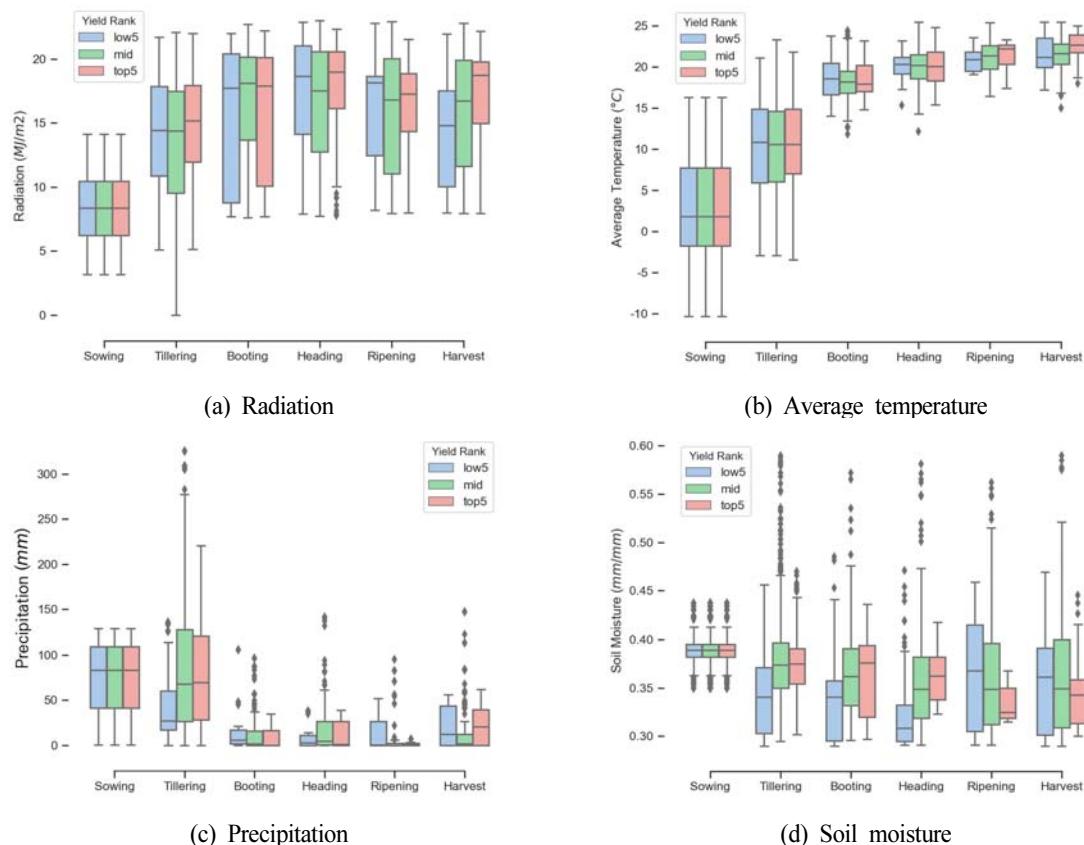


Fig. 2 Meteorological conditions for the top-, mid-, low- five years of wheat production by growth stage

량, 일평균온도, 상대습도, 최대온도, 최저온도, 강수량, 풍속으로 기상청에서 제공하는 공공데이터인 일별 종관기상관측(ASOS, Automated Surface Observing System) 데이터를 활용한다. 수집한 기상데이터와 APSIM 모형을 이용하여 특정 일자 상태를 기준으로 수확시기의 잠재생산량을 모의한다. 또한, 과거 기상데이터를 이용하여 APSIM 모형으로 현재 기후상황에서의 생산량을 추정하고, 이 결과 중 수확시기의 생산량이 가장 높은 10분위(5개년)와 가장 낮은 1분위(5개년)의 기상환경 조건을 시각화하여 비교분석하였다.

시스템 내에서 생산량에 영향을 주는 시기와 주요 지표에 대해 탐색하기 위하여 생장 단계별 광량, 평균온도, 강수량, 토양수분 분포에 대하여 분석할 수 있다. 기상환경 조건은 밀 생육단계별로 광량, 평균온도, 강수량, 토양수분에 대한 데이터 분포를 생산량의 정도(Top, Mid, Low)에 따라 구분하였다(Fig. 2). 광량은 수확기, 평균온도는 성숙기 및 수확기, 강수량은 분열기부터 수확기, 토양수분 역시 분열기부터 수확기까지 고려가 필요하다. 이는 현재 밀의 생육단계의 노지환경에 대한 정보를 제공함으로써 풍작 혹은 홍작의 여부를 미리 짐작할 수 있고 잠재생산량을 예상할 수 있다.

III. 밀 재배관리 의사결정 지원시스템 적용성 평가

1. 모델링 데이터 설정

가. 품종 및 재배환경

적용성 평가를 위하여 밀 생산성 실증을 위한 실험데이터

를 구축하였다. 밀 품종은 농촌진흥청에서 2015년 개발한 신 품종인 새금강밀(품종보호권 등록번호 제 6967호, 학명 *Triticum aestivum L.*)로 선정하였다. 새금강밀은 금강밀에 비하여 수발아율이 낮고 수량성이 높은 제면(국수)용 밀이다(RDA, 2023).

실험 포장은 전북특별자치도 익산시 함라면 일대로, 면적은 처리구당 400 m^2 이며, 포장 내 파종한 새금강밀의 재식밀도는 280 plants/m^2 , 재식간격은 210 mm 이다 (Fig. 3). 비료시비는 관행 표준재배로 설정하여 파종시 36.4 kg N/ha 로 기비, 발아 후 54.6 kg/ha 추비로 설계하였다. 재배기간은 10월 파종하여 약 8개월 간 재배하였으며, 구체적인 파종일자는 2022년 10월 22일, 수확일자는 2023년 6월 13일이었다.

나. 기상자료 전처리

모형 검증을 위하여 재배실험을 수행하였고, 작기는 2022년 10월 파종하여 2023년 6월 수확함에 따라 기상자료도 해당기간에 맞추어 구축하였다. 프로그램을 통해 10월 1일부터 6월 30일까지 자료를 1981년부터 2022년까지 구축하고, 특정일자를 지정하면, 2022년 10월 1일부터 2023년 특정일자까지 관측자료를 채우고, 특정일로부터 6월 30일까지 과거 자료를 붙여넣는 방식으로 과거 40년에 대한 기상자료를 자동 입력하여 모델링되도록 코드를 작성하였다. 수집 자료 중 광량에 대한 데이터는 제공되고 있지 않아, Penman-Monteith 식을 사용하여 추정하였다.

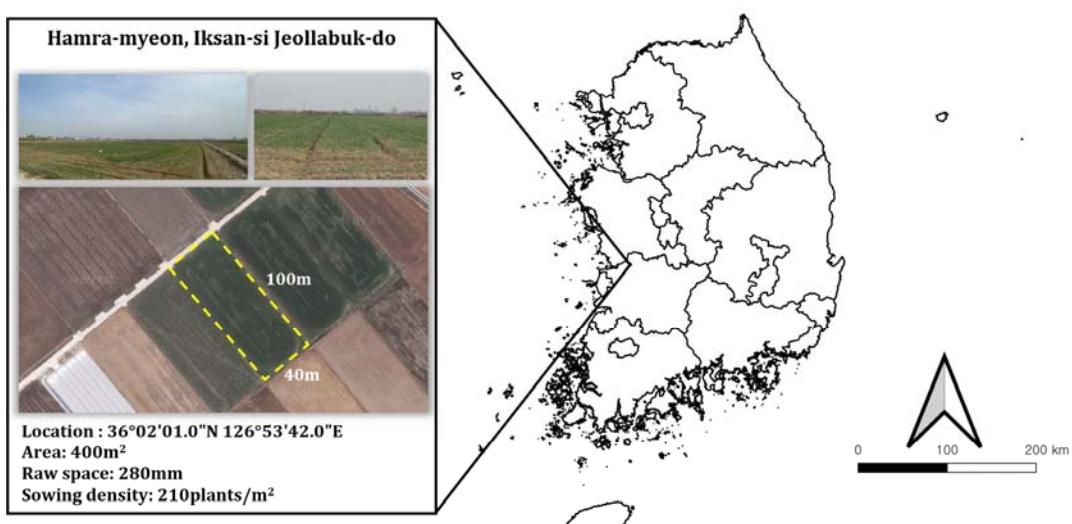


Fig. 3 Geographical location for field tests in wheat farming (Harmra-myeon, Iksan-si, Jeollabuk-do)

다. 밀 생육단계 구분

식물은 선형적으로 성장하지 않고, 생육단계에 따라 계단 형태로 성장패턴이 달라진다. 수집한 데이터를 시계열 자료로 다루면서, 일단위로 연속적으로 분석할 수 있지만, 생육단계별로 생기는 변곡점을 반영하기 어렵다는 특징이 있다. 이에 밀재배 영농기술매뉴얼은 식물계절 (phenology)을 중심으로 작물의 생육단계에 따라 재배 관리 작업을 설명한다. 본 연구에서는 밀의 생육단계를 설정하기 위하여, North Dakota Agricultural Weather Network Center (NDAWNC)에서 제시한 유효적산온도 (Accumulated Growing Degree Days, GDD)에 따라 파종기 (Sowing), 분蘖기 (Tillering), 신장기 (Booting), 개화 및 출수기 (Heading), 등숙기 (Ripening), 수확기 (Harvest) 인 총 6단계로 구분하여 Table 1에 정리하였다 (NDAWNC, 2023).

Table 1 Growth stages of wheat by accumulated growing degree days (GDD) suggested by NDAWNC

Wheat growth stage	Accumulated GDD (unit: °C)
Sowing	0-538
Tillering	538-1,396
Booting	1,396-1,539
Heading	1,539-1,768
Ripening	1,768-1,825
Harvest	1,825

2. APSIM 파라미터 설정

APSIM 모형 구동을 위하여 다양한 환경변수를 지정해야 한다. 특히 토양특성에 따라, 물관리 효율이 달라지므로, 시험포장에서 직접 수집한 현장데이터를 사용하였다. 시험포장의 토성은 식양토 (Clay Loam, 입경조성이 모래가 28%, 미사가 37%, 점토가 35% 내외 분포되어 있는 토양)로 흙토람 서비스에서 제공하는 토양특성을 이용하여 APSIM 파라미터를 설정하였다. 토양의 용적밀도 (Bulk density)는 깊이와 무관하게 1.050 g/cm^3 로 적용하였다. 토양수분 파라미터는 토심에 따라 10 cm 단위 (총 깊이 80 cm 이내), 80~100 cm, 100~150 cm, 150~200 cm까지 총 11단계의 깊이에 따른 각각의 토양수분 관련 파라미터 값을 설정하였다 (Table 2).

3. 밀 생육단계별 환경요인에 따른 생산량 예측

시스템 내에서 특정 일자를 입력하면 평균온도, 강수량, 토양수분에 대하여 현재까지의 상황과 수확 예상일까지의 분포를 예측하고 그 결과를 시각화하여 제공한다. 예시로 2023년 3월 1일을 기준으로 제안한 시스템에서 제공하는 그래프를 Fig. 4와 같이 도시하였다. Fig. 4에서 3월 1일까지는 현재 작기에 대한 데이터이므로 하나의 선이 그려지는 것을 확인할 수 있고, 3월 1일 이후의 기간은 과거 평균온도를 이용하여 범위를 보여준다. 이 그래프를 통해 선택한 연도와 날짜의 평균온도가 과거 40년의 평균에 비해 높고 낮음을 확인할 수 있다. 3월 1일 이후의 온도 분포를 나타내는 구간 (회색 배경)

Table 2 Parameters related to soil moisture in APSIM

Depth layer (cm)	BD (g/cm ³)	AirDry (mm/mm ³)	L.L.15 (mm/mm ³)	DUL (mm/mm ³)	SAT (mm/mm ³)	Wheat L.L. (mm/mm ³)
0-10	1.050	0.150	0.290	0.400	0.590	0.290
10-20	1.050	0.260	0.290	0.400	0.590	0.290
20-30	1.050	0.290	0.290	0.400	0.590	0.320
30-40	1.050	0.290	0.290	0.400	0.590	0.320
40-50	1.050	0.300	0.300	0.400	0.590	0.350
50-60	1.050	0.310	0.310	0.400	0.590	0.380
60-70	1.050	0.320	0.320	0.410	0.530	0.410
70-80	1.050	0.330	0.330	0.480	0.530	0.480
80-100	1.050	0.340	0.340	0.470	0.520	0.470
100-150	1.050	0.350	0.350	0.460	0.510	0.460
150-200	1.050	0.360	0.360	0.440	0.490	0.440

BD: Bulk density (g/cm^3)

AirDry: Specified air-dry water content ($\text{mm water}/\text{mm}^3 \text{ soil}$)

L.L.15: 15 Bar lower limit of soil water content ($\text{mm water}/\text{mm}^3 \text{ soil}$)

DUL: Drained upper limit ($\text{mm water}/\text{mm}^3 \text{ soil}$)

SAT: Saturated water content ($\text{mm water}/\text{mm}^3 \text{ soil}$)

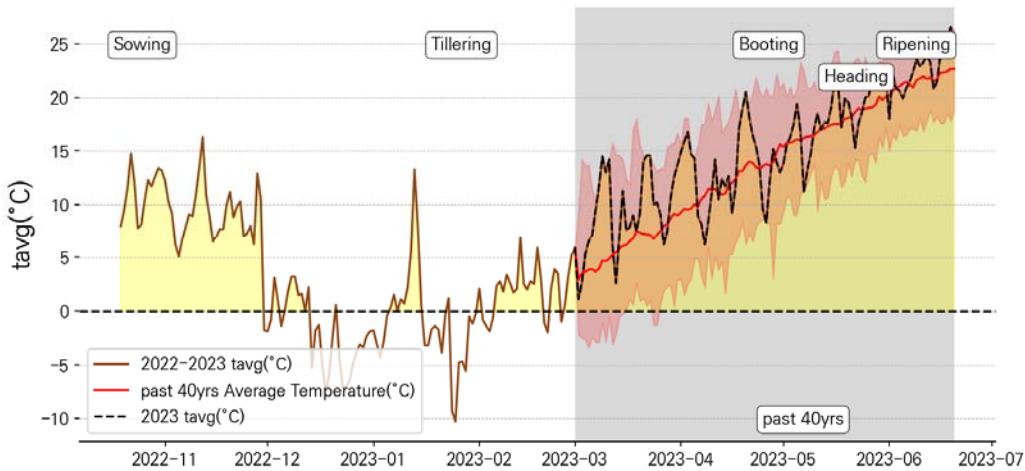


Fig. 4 Average temperature and GDD trend by wheat growth stage

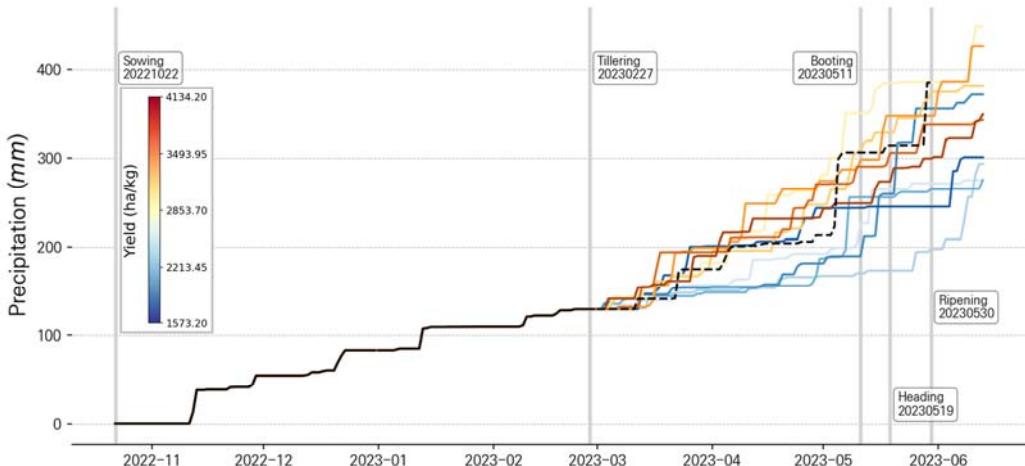


Fig. 5 Precipitation trend and simulation by top- and bottom-yield year during past 40 years

에서 적색 영역은 40년간 평균온도를 의미하며, 황색 영역은 평균온도를 기록한 날의 적산온도를 나타낸다. 이는 밀의 생육 발달에 영향을 주는 기간으로 적산되는 온도의 누적량이 많을수록 밀의 생육단계가 앞당겨질 수 있음을 예상할 수 있다. 의사지원시스템이 운영되는 현 시점(3월 1일)에는 미래 상황을 확률적으로 표현하였으며, 실측값과 비교하기 위하여 2023년 실제 온도를 검은색 점선으로 도시하였다.

강수량 정보의 경우 현재까지의 누적강수량을 시각화하고 기준일자 이후의 누적 강수량은 APSIM 시뮬레이션을 통하여 생산량 상위 10%와 하위 10%의 누적 강수량 분포를 시각화 하였다 (Fig. 5). 앞서 Fig. 4와 같이 평가하는 현재 시점에는 미래기상을 알 수 없으므로 과거기상을 활용한 시나리오 결과를 도시하였으며, 실제 결과와 비교하기 위하여 사후에 실

측데이터를 검은 점선으로 표시하였다. 토양수분 정보도 현재 상태를 기준으로 생산량 상위 5개년과 하위 5개년의 분포를 도시함으로써 현 상태를 진단할 수 있다 (Fig. 6). 사후 실제 기상을 바탕으로 한 결과를 검은 점선으로 표시하였다. 강수량은 당해연도의 강수량이 높고 낮음에 대하여 정성적으로 비교 가능하지만, 토양수분은 토양수분센서를 통해 실시간으로 정량적으로 평가가 가능하다는 특징이 있다. 이에 APSIM 모형은 동일한 토성 조건에서 기상환경 조건 변화에 따라 생산량을 추정한 결과이므로, 현재 상태의 강수량 상태와 토양수분 함량 그래프를 함께 고려하여 당해연도 밀재배 환경이 습해 혹은 가뭄 피해를 겪고 있는지에 대한 판단을 도울 수 있으며 이는 농가에서 관수 전략을 수립할 때 의사결정을 지원할 수 있다. 예를 들어, 토양수분 함량의 경우 파종기와 수

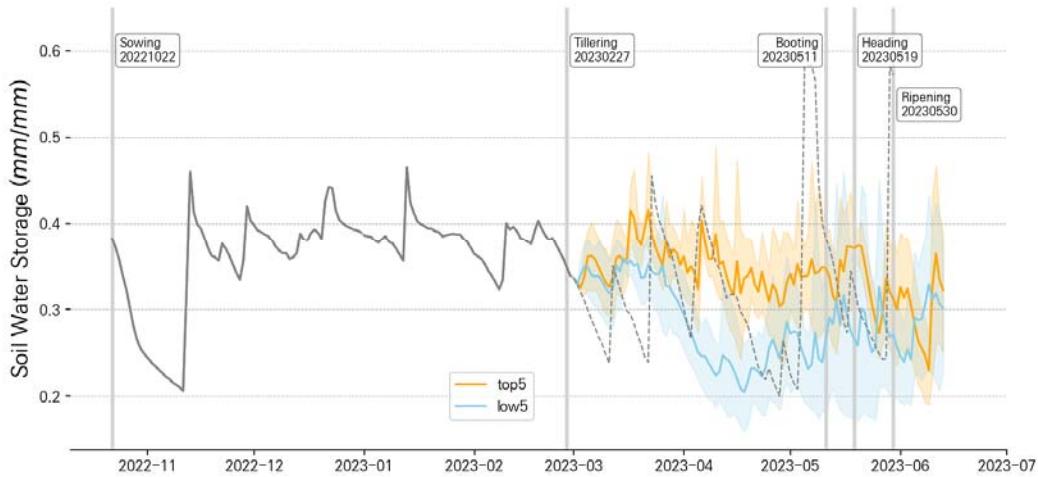


Fig. 6 Soil moisture trend and simulation by top- and bottom-yield year during past 40 years

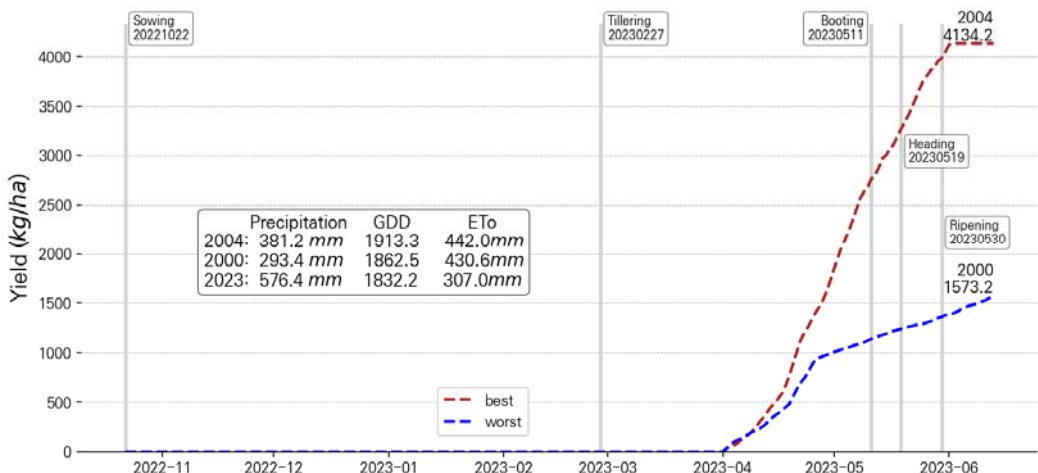


Fig. 7 Potential yield estimation based on current weather condition

확기를 제외한 단계에서 생산량 상위 5개년이 하위 5개년보다 높았으며 통계적으로 유의미하였다. 이는 모형이 신장기, 개화 및 출수기와 등숙기에 관계시 밀 생산량 증대를 설명할 수 있음을 의미한다.

최종적으로 기상환경 (평균온도, GDD, 강수량, 토양수분)을 기반으로 당해연도의 생산량을 추정하여 잠재 생산량의 최대치 및 최소치 시나리오에 대한 결과를 도출한다 (Fig. 7). 2023년 수확기를 예상할 경우 최대 생산량은 4,134 kg/ha (2004년 기준) 정도로써 이 시기의 누적 강수량은 381.2 mm였다. 반대로 기상환경이 양호하지 않아 (2000년 기준 기상), 예상되는 피해는 최소 생산량 약 1,573 kg/ha로 추정되었다. 이 시기의 누적강수량은 293.4 mm였다. 실제 시험포장의 수

확률은 1,598.9 kg/ha로 본 시스템에서 분석기에 예측한 범위 내로 확인하였다.

이러한 과거 기상 기반 시나리오 분석과정은 매일 새벽에 ASOS 일별 기상자료를 업데이트하여 자동으로 구동되도록 시스템을 개발하였다. 현 시점 (영농기 중 특정일)을 기준으로 종관기상데이터를 업데이트하고, 미래 기상시나리오로 과거 40년치 기상자료를 활용하여 모델을 구동한다. 분석결과를 시각화할 수 있도록 데이터를 저장하고, Figs. 5, 6, 7에 해당하는 분석결과 그래프를 이미지로 저장하여 웹에서 확인할 수 있도록 개발하였다. 분석결과를 미리 계산하여 저장함으로써 웹기반 서비스 제공시 실시간으로 데이터 확인이 가능하도록 구현하였다.

IV. 결 론

기상환경 조절이 어려운 노지재배에서 가뭄 혹은 습해에 따른 급격한 생산량 저하에 대응할 수 있는 의사지원시스템이 필요하다. 이에 본 연구는 밀을 대상으로 재배관리 의사결정 지원시스템을 웹 기반으로 설계하고 구축하였다. 이 시스템은 생육단계에서의 기상환경을 1일 단위로 수집 및 측정하여 토양수분 함량을 예측할 수 있는 기능을 설계하였다. 이를 기반으로 과정기반 작물모형 중 하나인 APSIM을 이용하여 밀 재배 단계별 의사결정에 따른 잠재생산량을 실시간으로 예측하는 기능을 탑재하였다.

밀 재배관리 의사결정 시스템은 사용자의 편의성을 고려하여 웹기반 대시보드를 통해 실시간 재배환경 정보를 제공하고자 하였으며, 과거, 현재 및 미래의 기상환경에 따른 밀 잠재 수확량을 종합적으로 평가할 수 있도록 설계하였다. 이 시스템에서는 APSIM 모형을 기반으로 과거 및 현재의 기상데이터를 이용하여 현재 상태의 생산량을 추정하고, 과거 40년 간의 기상 데이터를 바탕으로 미래 기상을 예측하여 수확시 잠재생산량을 추정할 수 있다. 이를 통해 사용자는 대상 지역의 기후에 대한 경험이 부족하더라도 과거 기상데이터를 바탕으로 생산량을 예측할 수 있고, 10년 빈도의 자연 재난 상황에서 최소-최대 피해 규모를 가늠할 수 있다.

본 시스템은 전국의 기상데이터와 해당 필지의 토양환경에 대한 정보를 이용하여 작물모형을 구동하여 잠재생산량을 예측할 수 있으므로 타 지역에 적용이 가능하다는 장점이 있다. 향후 토양 내 질소 함량 등 밀 생산량 증가에 기여할 수 있는 영향인자를 추가하여 생산량 추정 모형을 고도화하여, 국내 밀 생산량 및 품질 증대를 위해 농가에서 관수 및 비료 처방에 대한 의사결정 지원시스템으로 확장할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업 (과제명: 밀 생산성 향상 디지털농업 모델 개발 및 실증, 과제번호: RS-2022-RD010066) 지원에 의해 이루어졌음.

REFERENCES

- Asseng, S., F. Ewert, C. Rosenzweig, J. Jones, J. Hatfield, A. Ruane, K. Boote, P. Thorburn, R. Rotter, D. Cammarano, N. Brisson, B. Basso, P. Martre, I. Aggarwal, C. Angulo, A. Waha, K. Prasad, J. Singh, P. Grassini, J. Wolf, S. Semenov, and A. Challinor, 2013. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change* 3: 827-832. doi: 10.1038/nclimate1916.
- aT(Korea Agro-Fisheries & Food Trade Corporation), 2023. NongNet. Available at: <https://www.nongnet.or.kr/> (accessed on 2023.11.25).
- Batchelor, W. D., B. Basso, and J. O. Paz, 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *European Journal of Agronomy* 18: 141-158. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00101-6.
- Brown, H. E., N. I. Huth, D. P. Holzworth, E. I. Teixeira, R. F. Zyskowski, J. N. Hargreaves, and D. J. Moot, 2014. Plant modelling framework: software for building and running crop models on the APSIM platform. *Environmental Modelling & Software* 62: 385-398. doi: 10.1016/j.envsoft.2014.09.005.
- Chang, Y., J. Latham, M. Licht, J. Johnson, P. Smith, G. Brown, and R. Miller, 2023. A data-driven crop model for maize yield prediction. *Communications Biology* 6: 439. doi: 10.1038/s42003-023-04833-y.
- ESRI, 2017. Farm planning and decision making. Web-based apps help agricultural producers, consumers digest information. Available at: <https://www.esri.com/about/newsroom/arcnews/web-based-apps-help-agricultural-producers-consumers-digest-information/> (accessed on 2023.11.20).
- Huth, N. I., K. L. Bristow, and K. Verburg, 2012. SWIM3: model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55(4): 1303-1313. doi: 10.13031/2013.42243.
- Park, J., H. Ahn, and B. Lee, 2018. The agriculture decision-making system (ADS) based on deep learning for improving crop productivity. *Journal of The Korea Institute of Information and Electronic Communication Technology* 11(5): 521-530. doi: 10.17661/jkiiect.2018.11.5.521. (in Korean).
- Kang, J., S. Jung, S. Nor, W. So, and C. Sim, 2015. Design and implementation of produce farming field-oriented smart pest information retrieval system based on mobile for u-farm. *Journal of the Korean Electronic Communications Association* 10(10): 1145-1156. doi: 10.13067/JKIECS.2015.10.10.1145. (in Korean).
- Keating, B. A., R. S. Carberry, G. L. Hammer, M. E. Probert, M. J. Robertson, D. Holzworth, N. I. Huth, J. N. G. Hargreaves, H. Meinke, Z. Hochman, G. McLean, K.

- Verburg, V. Snow, J. P. Dimes, M. Silburn, E. Wang, S. Brown, K. L. Bristow, S. Asseng, S. Chapman, R. L. McCown, D. M. Freebairn, and C. J. Smith, 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18: 267-288. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00108-9.
11. KIFA(Korea Institute of Future Agricultural), 2024. Retrieved March 11, 2024, from <http://kifa.farm/>.
12. Kim, J., C. K. Lee, H. Kim, B. W. Lee, and K. S. Kim, 2015. Requirement analysis of a system to predict crop yield under climate change. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 17(1): 1-14. doi: 10.5532/KJAFM.2015.17.1.1. (in Korean).
13. Kim, K. J., and Y. Y. Cho, 2022. Design of initial decision-making support interface for crop facility cultivation. *Journal of Internet of Things and Convergence* 8(2): 71-78. doi: 10.20465/KIOTS.2022.8.2.071. (in Korean).
14. Kim, T., J. Lee, W.-H. Nam, and K. Suh, 2014. Development of RESTful web service for loading data focusing on daily meteorological data. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(6): 93-102. doi: 10.5389/KSAE.2014.56.6.093. (in Korean).
15. MAFRA(Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs), 2023a. Agri-Food Statistics. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Available at: <https://lib.mafra.go.kr/Search/Detail/53083>.
16. MAFRA(Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs), 2023b. Determination report. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Available at: <https://www.mafra.go.kr/bbs/home/795/568964/artclView.do>.
17. McCown, R. L., G. L. Hammer, J. N. G. Hargreaves, D. P. Holzworth, and D. M. Freebairn, 1996. APSIM: a novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems* 50: 255-271. doi: 10.1016/0308-521X(94)00055-V.
18. NDAWNC(North Dakota Agricultural Weather Network Center), 2023. Retrieved November 22, 2023, from <https://ndawn.ndsu.nodak.edu/help-wheat-growing-degree-days.html>.
19. RDA(Rural Development Administration), 2023. Nongsaro. Retrieved November 22, 2023, from <https://nongsaro.go.kr/portal/remoteFileView.do?url=https%3A%2F%2Fatis.rda.go.kr>.
20. Richards, L. A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics* 1: 318-333. doi: 10.1063/1.1745010.
21. Ritchie, J. R., and S. Otter, 1985. Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model. ARS-United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service (USA) 38.
22. Seo, D., Y. Kim, and E. Kim, 2020. A plan to establish precision agricultural system to enhance agricultural competitiveness. Report of Korea Rural Economic Research Institute pp.1-206. (in Korean).
23. Song, K. E., J. G. Jung, S. Cho, J. Y. Kim, and S. Shim, 2022. Development of smart digital agriculture technology for food crop production in Korea-the path forward based on expert feedback. *The Korean Journal of Crop Science* 67(1): 27-40. doi: 10.7740/kjcs.2022.67.1.027. (in Korean).
24. Wang, E., M. Robertson, G. Hammer, P. Carberry, D. Holzworth, H. Meinke, S. Chapman, J. Hargreaves, N. Huth, and G. McLean, 2002. Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM. *European Journal of Agronomy* 18: 121-140. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00100-4.