

REVIEW ARTICLE

Analysis of components and applications of major crop models for nutrient management in agricultural land

Seul-Bi Lee*, Jung-Eun Lim, Ye-Jin Lee, Jwa-Kyung Sung, Deog-Bae Lee, Suk-Young Hong

Division of Soil & Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: seulvi23@korea.kr

Abstract

The development of models for agriculture systems, especially for crop production, has supported the prediction of crop yields under various environmental change scenarios and the selection of better crop species or cultivar. Crop models could be used as tools for supporting reasonable nutrient management approaches for agricultural land. This paper outlines the simplified structure of main crop models (crop growth model, crop-soil model, and crop-soil-environment model) frequently used in agricultural systems and shows diverse application of their simulated results. Crop growth models such as LINTUL, SUCROS, could provide simulated data for daily growth, potential production, and photosynthesis assimilate partitioning to various organs with different physiological stages, and for evaluating crop nutrient demand. Crop-Soil models (DSSAT, APSIM, WOFOST, QUEFTS) simulate growth, development, and yields of crops; soil processes describing nutrient uptake from root zone; and soil nutrient supply capability, e.g., mineralization/decomposition of soil organic matter. The crop model built for the DSSAT family software has limitations in spatial variability due to its simulation mechanism based on a single homogeneous field unit. To introduce well-performing crop models, the potential applications for crop-soil-environment models such as DSSAT, APSIM, or even a newly designed model, should first be compared. The parameterization of various crops under different cultivation conditions like those of intensive farming systems common in Korea, shortened crop growth period, should be considered as well as various resource inputs.

Keywords: agricultural land, crop model, nutrient management

Introduction

1960년대 이후부터 작물 및 농업생태계 모형의 발전으로 작물재배관리와 환경영향에 대한 이해의 폭이 넓어졌다. 효과적인 농경지의 양분관리를 위해서는 작물이 필요한 만큼의 양분을 적절한 시기에 적절한 재료로 공급함으로써 이용되지 못하고 남아서 환경에 노출되는 양분의 양을 최소화하는 것이 바람직하다(Roberts, 2007).

국내에서는 109개 작물에 대한 비료표준사용량과 96개 작물에 대한 토양검정 비료사용량을 제시하고 있다(NAAS, 2010). 토양검정 비료사용량은 현재 토양의 양분 함량을 고려한 비료추천



OPEN ACCESS

Citation: Lee SB, Lim JE, Lee YJ, Sung JK, Lee DB, Hong SY. 2016. Analysis of components and applications of major crop models for nutrient management in agricultural land. Korean Journal of Agricultural Science 43:537-546.

DOI: <https://doi.org/10.7744/kjoas.20160055>

Editor: Taek-Keun Oh, Chungnam National University, Korea

Received: August 22, 2016

Revised: October 12, 2016

Accepted: October 18, 2016

Copyright: ©2016 Korean Journal of Agricultural Science.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

량으로 비교적 합리적이라 할 수 있다. 하지만 정밀농업을 위해서는 작물의 생육단계별 양분요구량, 상품부위의 품질향상을 위한 양분공급, 비료이용효율증진기술, 토양 양분 공급력 및 양분 유실 최소화 등을 고려한 통합적인 농경지 양분관리 도구가 필요하다.

작물 모형은 신품종의 디자인 및 개발, 작물 수량 감소요인 분석, 농경지 관리방안 의사결정 지원 등 다양하게 활용되고 있다(Van Ittersum et al., 2003). 특히 양분반응모형이나 작물생육모형은 양분 사용에 따른 작물 수량의 변화를 서술하기 때문에 세계 여러 나라에서 비료 추천량 결정에 많이 사용되고 있다(Nye, 1992).

이러한 모형들을 이용해 다양한 작물에 대한 비료 등 양분 관리 전략을 모의함으로써 더 나은 양분관리 의사결정 지원 도구로서 활용이 가능하다(Godwin and Jones, 1991; Paz et al., 1999). Van Ittersum et al. (2003)은 가축분으로 투입되어 잔존하는 질소의 영향을 정확하게 평가하면 작물 요구량에 적합한 비료 투입량을 결정할 수 있다고 하였다. 일례로 Schröder and Van Keulen (1997)은 사질 토양의 옥수수 재배지에서 비료 투입량을 결정할 때 모형결과를 기반으로 가축분 발생량에 대한 비례 할당량을 배분하였다. 옥수수 재배지에서 25년 이상의 가축분 사용에 따른 질소 영향에 대한 실험결과가 없어, 가축분 사용 효과에 대해 모의연구가 필요하였다(Schröder and Van Keulen, 1997). 토양 유기 질소의 분해 속도를 장기 포장 실험의 결과값으로부터 측정된 후 이를 모형에 적용하였다. 모의 결과, 시간 경과에 따른 실제 가축분 사용율이 감소되는 시나리오에 의하면 1970년부터 2005년까지 실제 토양 유기질소의 무기화 속도는 연간 18 - 19 kg N ha⁻¹였다. 이러한 결과를 통해 화학비료만으로는 토양 유기질소 풀(pool)을 유지하기 어려우며 가축분의 잔류 효과를 고려한 질소 비료추천의 세부적인 변경이 필요하다고 하였다(Wolf et al., 1989; Van Ittersum et al., 2003).

국내의 작물 모형 연구는 주로 기후변화와 같은 환경변화에 따른 작물 수확량 예측(Shim et al., 2010; Kim et al., 2013; Lim et al., 2015)이나 농업 비점오염원 평가 모델(Kim et al., 2014) 등이 주를 이루고 있다. 따라서 국내의 종합적인 농경지의 양분관리도구로서 모형의 활용에 대한 연구를 강화할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 국외에서 개발된 주요 작물 모형들의 모의 구조와 모의 단계를 이해하고 적용사례를 분석하였다. 이를 통해 국내에서 작물모형을 활용하여 농경지 양분관리 도구로서 활용가능성을 모색하고자 하였다.

작물모형의 구분과 유형

모형은 크게 경험적 모형(empirical model)과 기계론적 모형(mechanistic model)으로 나눌 수 있다. 경험적 모형은 관찰된 현상을 기술하는 통계학적 도구이며, 기계론적 모형은 관찰된 현상의 원인이나 과정을 수학적으로 서술한다(Baldwin et al., 1973; Barber and Cushman, 1981). 모형은 모의하고자 하는 시스템이 무엇이나에 따라 구분된다. 광, 온도, CO₂ 조건 등의 외부자극에 대한 작물의 생육특성을 모의하는지, 작물-토양간의 다양한 process를 모의하는지, 작물-토양-환경에서 양분의 유출 등의 환경영향에 대한 농업생태계의 특정 변수에 대해 설명하는지에 따라 모형의 모의 기작과 모의 수준이 달라진다.

작물생육모형은 외부환경조건들의 변이에 따른 작물성장상태를 시간에 따라 예측하는 수식들의 집합으로(Lim and Lee, 2009), 초기의 작물 주요 생리작용의 평가 수준에서 다양한 환경조건에서의 생장 또는 재배관리방법에 따른 양분의 거동, 분배 및 작물 경제성 분석까지 가능한 정도로 발전하였다(Jones et al., 2003).

모형의 예측정확성을 높이기 위해 수학적 모형이 현실을 어느 정도로 모사할 수 있는지, 컴퓨터 프로그램에 의해 모형이 얼마나 정확하게 반영되는지, 관측값은 얼마나 정확한지 고려해야 한다. 특히 수학적 모형이 현실을 잘 반영하기 위해서는 최적화에 의한 보정(calibration), 불확도 분석, 독립자료집단과의 비교, 특정 process를 교체를 통한 모형의 남은 부분들에 대한 검증이 필요하다(Van Ittersum et al., 2003).

모형에서 보정이란 작물의 생장, 발육 및 유전적 특성 등과 관련된 모수(parameter)의 특성을 모형에 반영하는 것이다. 보정과정은 불특정 모수들을 선택하여 그 영역 내에서 모델 결과값과 실제값 차이를 정량적으로 평가하는 일

치도로 나타낼 수 있다. 보정과정 후 모형이 작물성장상태나 수량 등의 특성을 어느 정도까지 모의하는지는 보정과정에 사용된 관찰 결과값 외에 다른 결과값을 이용하여 모형을 통계학적으로 검증(validation)한다. 불확도 분석은 실측치와 비교하여 남아있는 전체 모형값의 차이를 정량적으로 평가한다. 독립자료집단과 비교를 위해 실험결과와 모형값을 1:1로 plotting하거나 실험과 모델간의 편차를 실험결과와 plotting한다(Van Ittersum et al., 2003).

농업 시스템에서 많이 사용되는 작물모형으로는 DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer), APSIM (Agricultural Production system SIMulator)모형이 있다. 대표적인 작물생육모형으로는 네덜란드 와게닝겐 de Wit 연구팀에서 개발한 SUCROS (Simple and Universal CROp growth Simulator), LINTUL (Light INTerception and Utilisation)계통 모형이 있다(Zhu et al., 2011). 그 외에도 작물-토양의 관계에서 토양의 양분 공급력을 중심으로 작물 수량 반응을 설명해 주는 QUEFTS (QUantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils) 등이 있다. Table Table 1 - 5는 주요 작물모형별로 농업환경에서 주로 사용되는 모형의 구성과 입력자료의 유형, 적용에 대해 요약하여 나타내었다.

주요 작물모형의 구성의 이해 및 적용

1. DSSAT의 이해 및 적용

Table 1에는 DSSAT의 구성요소와 최소 요구 데이터 셋, 적용 예를 요약하여 나타내었다. DSSAT은 CROPGRO와 CERES 작물 성장모델이 통합된 모형으로 작물 모델, 데이터 베이스, 지원소프트웨어, 적용 프로그램의 패키지로 구성되어있다. DSSAT은 다른 기후, 토양 관리방법에 관련된 토양-식물체-대기의 거동에 대한 함수로써 작물 성장, 발달 및 수량을 모의한다(Bouma and Jones, 2001; Sudharsan et al., 2013; Jeong et al., 2014). DSSAT은 작물의 영양생장 및 생식생장단계에 따른 광합성, 호흡, 광합성물질의 분배, 식물 성장, 노화 등의 생리학적 과정을 모의할 수 있다.

Table 1. Overview of various application of DSSAT CSM (Cropping system model) model used for agricultural system (Jones et al., 2003).

Modules	Land unit, Weather, Soil (dynamics, temperature module, water module, soil nitrogen and carbon module), SPAM (Soil-Plant-Atmosphere),CROPGRO, Individual plant growth modules (CERES-maize, CERES-wheat, CERES-rice, SubStor-potato, Other plant models), Management operation module
Minimum data set for operation for model	<p><u>Site:</u> Latitude and longitude, Elevation</p> <p>Average annual temperature, Average annual amplitude in temperature, Slope and aspect, Major obstruction to the sun, Drainage, Surface stones</p> <p><u>Weather:</u> Daily global solar radiation, Maximum and minimum air temperatures, Precipitation</p> <p><u>Soil:</u> Classification, Soil layer basic profile characteristics, in situ water release curve characteristics, Bulk density, Organic carbon, pH, Root growth factor, Drainage coefficient, Water, Ammonium and nitrate by soil layer</p> <p><u>Initial conditions:</u> Previous crop, Root, and nodule amounts, Numbers and effectiveness of rhizobia</p> <p><u>Management:</u> Cultivar name and type, Planting date, Depth and method, Row spacing and direction, Plant populations, Irrigation and water management, Dates, Methods and amounts or depths, Fertilizer (inorganic) and inoculant applications, Residue (organic fertilizer) applications (material, depth of incorporation, amount and nutrient concentrations), Tillage, Harvest schedule</p>
Type of application	Crop management, Fertilizer management, Irrigation management, Precision management, Climate change, Climate variability, Yield forecasting, Pest management, Tillage management, Sustainability, Education

CERES-Maize는 과정기반(process-based) 작물생육모형으로 유전계수, 작물 재배관리(파종일, 파종밀도, 줄 간격, 질소비료 유형 및 시용량, 시용날짜 등), 토양특성(토성, 층위, 유기, 알베도, 수분함량, 배수 상한(draind upper limit) 및 하한(draind lower limit), 배수 계수, 질소 무기화 factor, 비옥도, 유기 탄소 함량 등), 기상인자(일일 최대 및 최소 기온, 강우, 복사량)의 입력자료를 사용한다. CERES-Maize 모형은 일일 옥수수 성장, 발달 및 최종 알곡 수량을 모의한다(Jones and Kiniry, 1986).

또한 질소 수지 모듈은 유기물의 순환과정(무기화, 질소의 부동화, 질산화, 탈질화) 및 요소의 가수분해, 암모니아 휘산, 질소의 식물체 흡수, 다른 기관으로의 전달과정 등을 모의할 수 있다(Jones et al., 2003).

Jeong et al. (2014)는 논에서 재생된 하수처리수를 농업용수로 관개시 질소 시용율 및 질소 율거름이 벼의 수량에 미치는 영향을 DSSAT v4.5을 이용해 평가하였다. 모형을 활용하기 위해 자료 입력, 보정 및 검증, 일치도 평가의 단계를 거쳤다. 모의결과 재생된 하수처리수를 이용해 논벼 관개시 적절한 질소 사용량은 표준 비료 사용량보다 20 - 50% 감소하며, 이때 질소 율거름 시용율은 사용된 질소비료에서 10 - 20 kg ha⁻¹정도 감소한다고 하였다.

Nangia et al. (2008)은 DSSAT 모형으로 질소 비료사용량과 율거름양이 옥수수 수량, 수분 생산성, 질소이용율 및 질소 용탈에 미치는 영향을 평가하였다. 이 때 2주에 한번 675 mm의 관개를 실시하고 250 kg N ha⁻¹의 분시를 할 경우 최소 질소 용탈(10.4 kg NO₃-N ha⁻¹)과 최대 수분 생산성(1.13 kg m⁻³ET)을 갖는 최적 시나리오 나타났다. 이를 통해 질소 비료의 양과 시기를 조절하고 수분을 조절함으로 상당량의 질소 용탈이 감소할 수 있다고 하였다(Nangia et al., 2008).

Pinitpaitoon et al. (2011)은 옥수수 재배시 합리적인 유기재료와 화학비료의 최적조합을 결정하기 위해 DSSAT의 Seasonal Analysis module을 이용하여 평가하였다. 낮은 품질의 퇴비는 기존 퇴비(1.8 - 2.4% N)보다 질소 함량이 3 - 4배 높거나 퇴비가격이 많이 떨어졌을 때 화학비료만큼의 수익성이 있다고 하였다.

Miao et al. (2006)은 CERES-Maize v.3.5를 이용하여 옥수수 포장을 4개의 관리구역으로 나누고 최적의 질소 시용량을 평가했을 때 경제적인 최적의 질소 시용율은 70 - 250 kg ha⁻¹이며 관리구역2에서는 최적 질소 시용율이 130 - 150 kg ha⁻¹로 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 작물 성장 모델은 질소 관리와 수익성 향상을 위한 유용한 도구라고 평가하였다.

Gabrielle et al. (1998)은 CERES-N Maize 모형에 총 근관 광합성(net canopy photosynthesis), 토양층위내 뿌리의 성장과 분포, 질소의 흡수, 작물 부위별 탄소 및 질소 동화물질의 분배에 대한 계수들을 도입하여 유채를 위한 CERES-Rape모형을 개발하였다. Gabrielle et al. (1998)은 토양에서 질소 유효도가 낮을 때 질소 스트레스 효과를 총 광합성과 엽 또는 꼬투리 연장과 관련하여 고려하여 유채 생육 단계별로 질소의 흡수율을 CERES-Rape모형으로 모의하였다. 질소 처리수준이 낮을 때 노화가 빨리 진행된 부위를 제외하고 성장단계의 시간경과에 따른 다양한 부위의 생체중과 질소 축적량은 모의 수준이 높았다. 다만 개화기 이후에는 작물의 질소 흡수량 모의 수준이 다소 감소되었으나 작물 질소 흡수 거동과 건물중에 대해 비료 사용 효과를 모의하는데 CERES-Rape 모형이 효과적이라고 평가하였다. Gabrielle et al. (1998)는 CERES-Rape모형이 일일 작물 질소 요구도와 토양의 양분 유효도를 고려한 질소 공급력을 모의할수 있으므로 합리적인 양분관리 도구로 활용 가능하다고 하였다.

CERES-Maize모형으로부터 유래한 SIMPOTATO 생육모형은 하부모형을 이용하여 토양 수분 및 질소 변화와 근권 하부의 수분과 질소의 거동에 대해 모의한다. Hodges (1998)는 SIMPOTATO 생육모형을 활용하여 초기 토양 상태와 일일 기상 조건에 기초한 감자의 질소 요구량을 모의하였고 모형을 이용해 질소 투입을 관리하면 최고 수량을 얻은 처리구의 시비량에서 30%까지 절감이 가능하다고 하였다.

Salmerón et al. (2014)은 DSSAT v.4.5를 이용해 피복작물과 옥수수 이모작에서의 질소 순환을 평가하였다. 최적화된 수분과 질소 관리하에서 모의한 질소 용탈은 연간 44 - 98 kg N ha⁻¹로 여전히 높았지만 피복작물-옥수수 이모작 체계에서는 질소 용탈을 31%(휴경 후 옥수수재배 대비)까지 저감할 수 있을 것으로 평가되었다.

Liu et al. (2011)는 DSSAT-CENTURY 모형을 이용하여 자유 배수와 인위 배수를 갖춘 관거배수(tile drainage) 시

시스템에서 옥수수와 콩의 수량과 질산태 질소의 누적 유실량을 모의하였다. 모의결과 수분함량과 누적 질산태 질소 배수 손실량에 대한 nRMSE값은 각각 9.9 - 14.8%, 17.8 - 25.2%였다. 또한 DSSAT의 CERES-Maize와 CROPGRO-Soybean 작물모형은 콩과 옥수수의 수량에 대해 nRMSE값이 4.3 - 14.0% 수준으로 모의하였다. 이를 통해 Liu et al. (2011)은 DSSAT v.4.5는 다양한 배수 관리하의 토양표면의 수분함량, 누적 질산태 질소 배수 유출량, 옥수수와 콩 수량을 모의에 유용한 도구라고 하였다.

전 세계적으로 작물관리, 시비관리, 관개관리, 기후변화, 식량 안보, 병해충 관리 및 수량 예측 등 다양한 분야에서 DSSAT 모형이 적용되었다(Jones et al., 2003). 특히 DSSAT 모형은 국내 비료시비량과 질소 수지 평가, 시나리오 연구에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 DSSAT 유형의 작물모형은 균일한 포장조건의 작물 생산량을 기반으로 모듈이 디자인되어 있어 포장내 불균일한 양분상태, 작황에 대한 부분에 대해 DSSAT 모형을 개선하는 연구가 필요하다.

2. APSIM의 이해 및 적용

Table 2는 APSIM 모형을 요약하여 나타내었다. APSIM은 서로 다른 기후와 관리 요인이 토양 특성에 어떤 영향을 미치는지 평가하는 도구로서 다양한 작물 모형이 통합된 농업생태계 모형이다(McCown et al., 1996). APSIM은 농장 시스템에서의 생물-물리학적 과정을 설명하기 위해 개발되었으며 모형에 'plugged in' 방식으로 개별 모듈이 도입된다. 모듈은 보리, 유채, 옥수수, 콩 등 다양한 작물과 초지, 잡초, 수목류를 포함하는 작물모듈, 물 수지, 질소 및 인 변환과정, 토양 pH, 침식 등의 토양 process 모듈과 넓은 범위의 재배관리 모듈을 포함한다(Keating et al., 2003). APSIM은 작물 관리, 물 수지, 기후 영향, 작부 체계, 종 상호작용, 토지 이용 연구, 토양 영향(침식, 산성화, 질산태 질소 용탈), 작물 적응 및 육종 등 다양한 분야에 응용되어 왔다(Keating et al., 2003).

Akponikpé et al. (2010)은 APSIM 모형으로 수수를 재배할 때 가축분, 수수의 잔류물, 화학비료의 사용 효과에 대한 23년 장기 시나리오 분석을 실시하였다. 그 결과 관행(30 kg N ha⁻¹)에 비해 15 kg N ha⁻¹의 질소 비료의 투입시 수량이 가장 낮은 해에도 더 높은 최소 수량을 보장해주므로 소규모 농업인에게는 더 합리적이라고 추천하였다.

Table 2. Overview of various application of APSIM model used for agricultural system (Keating et al., 2003).

Modules	Biophysical modules (Crop module), Management modules (SOILWAT, APSWIM, RESIDUE, SOILN, CERES, PAPRAN, PERFECT, MANURE, SOILP, SOILpH, EROSION), Data input/output module (MANAGER), Simulation engine
Minimum data set for operation for model	Initialization data: generic data Simulation specific parameter data: site, cultivar, management characteristics
Type of application	Crop management, Water balance, Climate risk and impacts, Cropping systems, Inter-cropping and species interactions, Land use studies Soil impacts (erosion, acidity, organic matter, leaching), Crop adaptation/breeding

3. LINTUL과 SUCROS의 이해 및 적용

Table 3은 LINTUL과 SUCROS 모형을 요약하여 나타내었다. SUCROS와 LINTUL 계통의 모형의 개발로 광이용 효율과 광합성과 관련한 작물 잠재생산량 모의가 가능하게 되었다(Spitters and Schapendonk, 1990; Van Laar et al., 1997; Van Ittersum et al., 2003). LINTUL은 엽면적지수와 Lambert-Beer 법칙을 이용하여 일별 광차단을 기반으로 한 건물 생산량을 계산한다. 총 지상부 생산량은 수확지수(Harvest Index, HI)와 건물중의 분배 함수로 표현된다. SUCROS에 특정화된 모듈은 건물생산성을 모의할 때 균락의 총 CO₂동화, 유지 및 생장호흡의 2단계로 구분한다. SASTRO와 SGPC 1모듈의 일장과 일중 일사각을 이용해 흡수 광유효도의 함수로서 일별 총 CO₂동화속도 및 광합

성유효복사(Photosynthetically active radiation, PAR)를 계산한다(Bouman et al., 1996). LINTUL 1과 SUCROS 1은 잠재생산량을, LINTUL 2와 SUCROS 2은 수분 제한 생산량을 모의한다. ORYZA2000, WOFOST, SWHEAT, TOMGRO, SWAP, SPASS 등이 SUCROS 계통의 모형에 속한다(Van Ittersum et al., 2003). LINTUL과 SUCROS 모형은 광, 온도, 양수분이 최적인 상태의 작물잠재생산량을 평가하여 수량생성 인자와 수량 제한인자를 평가한다(Gimplinger and Kaul, 2009). Gimplinger and Kaul (2009)은 다른 제한 요소가 없는 잠재적 성장 조건에서 일일 광 차단율과 광이용효율을 통해 건물 생산량을 평가하는 도구로 LINTUL을 이용해 grain amaranth (*Amaranthus* sp.)에 대한 LINTUL 검정과 보정을 실시하여 모형의 예측력을 높였다. 작물의 잠재 생산량을 평가하고 작물 재배시 적정 양분 필요량을 산정할 때 LINTUL과 SUCROS 모형의 강점이 있을 것으로 판단된다.

Table 3. Overview of various application of LINTUL/SUCROS model used for agricultural system (Bouman et al., 1996; Van Ittersum et al., 2003).

Calculation step	Phenological development, Dry matter partitioning and sink size, Leaf area development, CO ₂ concentration
Minimum data set for operation for model	Physiological age, Temperature, Day length, Heat sum (in day-degrees), Transplanting date, The age of seedling, Total dry matter production, Formulation rate of spikelets and grains, Crop growth rate between flower initiation and flowering, Leaf dry weight, Specific leaf area, Relative leaf death rate (function of temperature), Light use efficiency, Light saturated photosynthetic rate, Initial slope of the photosynthesis-light response curve
Type of application	Dry matter production, Gross CO ₂ assimilation of the canopy, Maintenance and growth respiration, World food research (potential and water-limited food production), Plant breeding, Crop management, Climate change impact and adaptation

4. WOFOST의 이해 및 적용

Table 4는 WOFOST모형의 모듈, 최소 요구 데이터 구성, 적용사례를 정리하여 나타내었다. WOFOST는 환경조건(토양, 기후), 작물 특성, 작물 관리(관개, 비료사용)에 따른 작물 잠재 생산성을 작물 출현에서부터 완숙기까지 모의할 수 있다(Van Diepen et al., 1989). WOFOST는 점 분석(point analysis)에 기초하기 때문에 WOFOST의 모의 결과를 국가나 지역적 범위로 확대하기 위해서는 대표지점의 선발이 특히 중요하다. WOFOST에서 잠재수량을 모의하기 위한 조건으로 SUCROS접근법과 Penman 방정식을 사용한다. 이때 토양 물 수지는 실제 근권 깊이, 지하수에서 근권의 깊이 층, 지하수위 10 m에서 근권의 깊이의 3가지 부분으로 된 tipping bucket 접근법을 이용한다. WOFOST는 3가지 주요 성장 제한조건 즉, 작물 성장이 광과 온도에 의해서만 제한되는 잠재생산성, 수분 제한 생산성, 양분 제한 생산성에 대하여 단계적으로 작물 수량을 모의한다(Van Diepen et al., 1989). 입력자료는 기후(일일 최소, 최대 기온, 일사량, 습도, 풍속, 월강수량, 강우일수), 토양 층위(근권부위, 하부토양층을 구분하여 토성, 최대 근권 깊이, 지하수위), 토양 물리성(포장용수량, 유효수분 함량, 토양 수리전도도), 토양 비옥도(무비구에서의 NPK 기본 흡수량, NPK비료로부터 이용율), 작물(초기 건물중, 엽의 수명, 동화 및 호흡속도를 결정하는 특성, 생물계절학적 발달 속도, 사멸속도, 작물 기관에 분배된 동화산물의 양, 작물 기관별 양분 최소 및 최대 농도)자료를 사용한다(Van Diepen et al., 1989). 모형 결과값은 잠재 생산성, 수분제한 생산성, 양분제한 생산성 부분으로 구분되어 제시된다. 잠재생산성 결과에서 10일 성장 cycle 단위별로 활엽, 줄기, 저장 기관의 건물중, 엽면적 지수, 발달 단계, 근권 깊이, 작물 증산속도, 총 동화속도, 유지호흡 속도, 총 지상부 생체량이 제시된다. 수분 제한 생산성에서 토양 수분 수지(실제 증산량, 증발속도, 토양 수분함량, 표면 수분 보유 및 토양내 저장 수분량, 지하수위)결과는 전체 시스템 및 근권 부에 대한 것으로 구분되어 제시된다. 마지막으로 모의된 잠재생산성, 수분 제한생산성, 양분제한 생산성, 수확 지수, 비료사용량이 제시된다(Van Diepen et al., 1989).

Nutrient Decision Support System (NuDSS)은 관개 벼논의 지점 특이적인 양분 관리(site-specific nutrient management, SSNM)를 기반으로 최근 개발된 양분결정지원시스템 software이다(Witt et al., 2005). Xie et al. (2007)은 WOFOST와 NuDSS을 이용하여 2가지 hybrid 벼 품종의 잠재생산성을 평가하고 달성 가능한 목표 수량을 위한 질소 비료 사용량을 제시하였다. 중만생종 Shanyou 63, 만생종 Xieyou 46의 잠재 생산량은 12 t ha^{-1} 와 10 t ha^{-1} 였으며 농가 관행수량은 $7.5, 6.5 \text{ t ha}^{-1}$ 로 달성가능 수량은 잠재생산량의 각각 70%, 75%로 설정하였을 때 NuDSS에 의해 150 kg ha^{-1} 와 120 kg ha^{-1} 의 질소비료를 사용량이 추천되었다. 이는 관행 질소 비료량의 70% 수준으로 평가되었다. WOFOST는 다양한 기후와 토양 조건에서 포장단위의 작물 생산성과 성장을 분석할 수 있는 도구로 판단된다(Van Diepen et al., 1989).

Table 4. Overview of various application of WOFOST model used for agricultural system (Van Diepen et al., 1989; Bouman et al., 1996).

Modules	WMAIN41 (Main program), APPLE (Agricultural Production Potential in Land Evaluation), NUTRIE (Calculate nutrient limited yields and nutrient requirement), WOSUB
Minimum data set for operation for model	Monthly climatic data (minimum and maximum air temperature, irradiation, humidity, wind speed, monthly rainfall, rainy day) Soil profile data (soil type, maximum rooting depth, presence of groundwater table) Soil physical data (soil moisture, soil hydraulic conductivity, soil moisture tension, field capacity, amount of available soil moisture) Soil fertility data (base uptake of NPK from unfertilized soil, recovery fraction of NPK fertilizer) Crop data (initial dry weight, life span of leaves, assimilation and respiration rate, rate of phenological development, death rate, fraction of assimilates partitioned to plant organs, minimum and maximum nutrient concentration per plant organ)
Type of application	Quantitative land evaluation, Regional yield forecasting, Analysis of risk and inter-annual yield variation, Quantification of the effects of climate change

5. QUEFTS의 이해 및 적용

Table 5는 QUEFTS모형의 모형화 과정, 최소 요구 데이터의 구성, 적용사례를 정리하였다. QUEFTS 모형은 토양 분석 결과에 기반한 토양 및 비료 양분(NPK)의 공급력 상태 함수로써 작물 수량을 정량화 하는데 이용된다(Smaling and Janssen, 1993). 다른 양분에 비해 특정양분이 제한적일 때 특정양분은 식물체 내에서 희석되어 완숙기에 식물체 내 농도가 최소값이지만, 특정 양분이 충분할 경우 특정양분의 농도는 식물체내에서 축적되어 최대값에 도달한다 (Van Keulen and Van Heemst, 1982; Smaling and Janssen, 1993).

Liu et al. (2006)은 QUEFTS 모형을 이용하여 옥수수과 밀에서 최소 및 최대 양분 이용률(kg grain kg^{-1})이 밀에서는 N (25와 56), P (171과 367), K (24와 67)이며 옥수수에서는 N (21과 64), P (126과 384), K (20과 90)이라고 하였다. 이 결과는 식물 건물량 중 평균 N : P : K의 비율이 밀에서 6.7 : 1 : 6.2, 옥수수에서는 6.0 : 1 : 5.4이며 보정된 QUEFTS 모형 모의값을 이용하여 토양 N, P, K 함량, 사용된 비료의 회수율 및 토양 특성간의 관계를 평가할 수 있다고 하였다. QUEFTS는 많은 토양 비옥도 평가 연구에 적용되어 왔으며 WOFOST에 통합되었다(Pathak et al., 2003; Van Ittersum et al., 2003). QUEFTS 모형은 열대지방의 풍화가 심하게 된 토양을 기반으로 개발되어 왔으므로 다른 기후, 토양 특성 관련 모수의 적용이 필요할 것이다. 위의 결과들을 종합해 볼 때 작물모형은 작물 생육단계별 잠재 생산성 예측을 기반으로 다양한 기후, 토양에서의 작물 수량과 성장을 모의할 수 있으므로 적정 양분관리 도구로서의 활용도가 높을 것으로 판단된다.

Table 5. Overview of various application of QUEFTS model used for agricultural system (Smaling et al., 1993).

Calculation step	Calculation steps 1. Chemical soil properties and potential supplies 2. Potential supply and actual uptake 3. Actual uptake of nutrients and yield ranges 4. Combining yield ranges to one yield estimate
Minimum data set for operation for model	Soil texture, C, N, P, K content, pH, CEC Crop variety, Growth duration, Temperature, Rainfall Recovery fraction of N, P Crop yield, Harvest index, Nutrient uptake
Type of application	Crop yield, Nutrient uptake, Fertilizer recovery

Conclusion

국외에서는 다양한 작물모형을 활용하여 작물의 생육과 생산성을 정밀하게 예측하고 농경지 관리방법별 시나리오 영향평가를 위해 활발하게 이용되고 있으며 다양한 작물모형의 다양한 작물모형의 적용 또한 활발한 것으로 평가되었다. 작물모형은 작물의 잠재 생산성을 예측하고 작물 생육 단계별, 토양 양분 공급력을 고려한 양분관리도구로서 활용성이 높을 것으로 평가되었다.

국내 농경지 양분관리 도구로서 작물 모형을 도입하고 적용하기 위해서는 국내 주요 작물별 모수를 개발하고 모의수준에 대한 검토가 필요하다. 또한 선행 개발된 작물 모형이 주로 노지작물 위주로 설계되어 있기 때문에 노지 외에 시설재배지, 논, 과수와 같은 국내 다양하고 복잡한 재배작물과 재배환경, 관리방법을 모형에 반영하기 위한 모수 개발 과정이 필요할 것이다. 그리고 이러한 모형을 국내 적용할 때 수요자 맞춤형의 모형의 결과값이 해석되어 제공되어야 할 것이다. 작물, 토양, 환경을 통합적으로 모의할 수 있는 모형의 활용과 연구가 더욱 강화되어야 할 것이다.

국내 농업환경에 최적화된 작물모형의 개발은 농민에게는 포장 환경을 고려한 정밀 작물재배 관리방안을 제시하므로 경제성을 높여주고 농업분야 연구자들에게는 환경변화 등과 관련된 시나리오 적용을 통해 농업생태계의 변화를 예측하고 농경지의 양분을 합리적으로 관리할 수 있는 도구가 될 것으로 기대된다.

Acknowledgements

본 연구는 농촌진흥청 시험연구과제 “과제명: 시설재배 유형별 양수분 요구도 산정 및 생리대사물질 평가(과제번호: PJ010899)”의 연구비 지원을 통해 수행하였습니다.

References

- Akponikpè PBI, Gerard B, Michels K, Biélders C. 2010. Use of the APSIM model in long term simulation to support decision making regarding nitrogen management for pearl millet in the Sahel. *European Journal of Agronomy* 32:144-154.
- Baldwin JP, Nye PH, Tinker PB. 1973. Uptake of solutes by multiple root systems from soil. III. A model for calculating the solute uptake by a randomly dispersed root system developing in a finite volume of soil. *Plant and Soil* 38: 621-635.
- Barber SA, Cushman JH. 1981. Nitrogen uptake model for agronomic crops. pp. 382-409. *Modeling Waste Water Renovation-Land Treatment* edited by Iskandar IK. Wiley-Interscience, New York.
- Bouma J, Jones JW. 2001. An international collaborative network for agricultural systems applications (ICASA). *Agricultural Systems*

70:355-368.

- Bouman BAM, van Kullen H, van Laar HH, Rabbinge R. 1996. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. *Agricultural systems* 52:171-198.
- Gabrielle B, Denoroy P, Gosse G, Justes E, Andersen MN. 1998. Development and evaluation of a CERES-type model for winter oilseed rape. *Field Crops Research* 57:95-111.
- Gimplinger DM, Kaul HP. 2009. Calibration and validation of the crop growth model LINTUL for grain amaranth (*Amaranthus* sp.). *Journal of Applied Botany and Food Quality* 82:183-192.
- Godwin DC, Jones CA. 1991. Nitrogen dynamics in soil-plant systems. In *Modeling plant and soil systems* edited by Hanks J et al. pp. 287-321. *Agronomy Monographs* 31, ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, USA.
- Hodges T. 1998. Water and nitrogen applications for potato: commercial and experimental rates compared to a simulation model. *Journal of Sustainable Agriculture* 13:79-90.
- Jeong HS, Jang TI, Seong CH, Park SW. 2014. Assessing nitrogen fertilizer rates and split applications using the DSSAT model for rice irrigated with urban wastewater. *Agricultural Water Management* 141:1-9.
- Jones CA, Kiniry JR. 1986. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas A&M University Press.
- Jones JW, Hoogenboom G, Porter CH, Boote KJ, Batchelor WD, Hunt LA, Wilkens PW, Singh U, Gijsman AJ, Ritchie JT. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18:235-265.
- Keating BA, Carberry PS, Hammer GL, Probert ME, Robertson MJ, Holzworth D, Huth NI, Hargreaves JNG, Meinke H, Hochman Z, McLean G, Verburg K, Snow V, Dimes JP, Silburn M, Wang E, Brown S, Bristow KL, Asseng S, Chapman S, McCown RL, Freebairn DM, Smith CJ. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18:267-288.
- Kim DJ, Roh JH, Kim JG, Yun JI. 2013. The Influence of shifting planting date on cereal grains production under the projected climate change. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 15:26-39. [In Korean]
- Kim MK, Choi SK, Jung GB, Kim MH, Hong SC, So KH, Jeong JH. 2014. APEX (Agricultural Policy/Environmental extender) model-An emerging tool for agricultural environmental analyses. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 47:187-190. [In Korean]
- Lim CH, Lee WK, Song YH, Eom KC. 2015. Assessing the EPIC model for estimation of future crops yield in South Korea. *Climate Change Research* 6:21-31. [In Korean]
- Lim JT, Lee BW. 2009. Crop growth modeling. Kyeongjin, Seoul, Korea. [In Korean]
- Liu HL, Yang JY, Tan CS, Drury CF, Reynolds WD, Zhang TQ, Bai YL, Jin J, He P, Hoogenboom G. 2011. Simulating water content, crop yield and nitrate-N loss under free and controlled tile drainage with subsurface irrigation using the DSSAT model. *Agricultural Water Management* 98:1105-1111.
- Liu M, Yu Z, Liu Y, Konijn NT. 2006. Fertilizer requirements for wheat and maize in China: The QUEFTS approach. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74:245-258.
- McCown RL, Hammer GL, Hargreaves JNG, Holzworth DP, Freebairn DM. 1996. APSIM: A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems* 50:255-271.
- Miao Y, Mulla DJ, Batchelor WD, Paz JO, Robert PC, Wiebers M. 2006. Evaluating management zone optimal nitrogen rates with a crop growth model. *Agronomy Journal* 98:545-553.
- NAAS (National Academy of Agricultural Science). 2010. Fertilizer Recommendation for crops (revision). RDA, Suwon, Korea.
- Nangia V, de Fraiture C, Turrill H. 2008. Water quality implications of raising crop water productivity. *Agricultural Water Management* 95:825-835.
- Nye PH. 1992. Towards the quantitative control of crop production and quality. II. The scientific basis for guiding fertilizer and

- management practice, particularly in poorer countries. *Journal of Plant Nutrition* 15:1151-1173.
- Pathak H, Aggarwal PK, Roetter R, Kalra N, Bandyopadhyaya SK, Prasad S, Van Keulen H. 2003. Modelling the quantitative evaluation of soil nutrient supply, nutrient use efficiency, and fertilizer requirements of wheat in India. *Nutrient cycling in Agroecosystems* 65:105-113.
- Paz JO, Batchelor WD, Babcock BA, Colvin TS, Logsdon SD, Kaspar TC, Karlen DL. 1999. Model-based technique to determine variable rate nitrogen for corn. *Agricultural Systems* 61:69-75.
- Pinitpaitoon S, Suwanarit A, Bell RW. 2011. A framework for determining the efficient combination of organic materials and mineral fertilizer applied in maize cropping. *Field Crops Research* 124:302-315.
- Roberts TL. 2007. Fertilizer Best Management Practices. General Principles, Strategy for their Adoption, and Voluntary Initiatives vs. Regulations. Proc. of IFA International Workshop, 7-9 March 2007, Brussels, Belgium. p. 29. International Fertilizer Industry Association, Paris, France.
- Salmerón M, Caverro J, Isla R, Porter CH, Jones JW, Boote KJ. 2014. DSSAT nitrogen cycle simulation of cover crop-maize rotations under irrigated mediterranean condition. *Agronomy Journal* 106:1283-1296.
- Schröder JJ, Van Keulen H. 1997. Modelling the residual effect of slurry applied to maize land on dairy farms in the Netherlands. *Netherlands Journal of Agricultural Science (Netherlands)* 45:477-494.
- Shim KM, Roh KA, So KH, Kim GY, Jeong HC, Lee DB. 2010. Assessing impacts of global warming on rice growth and production in Korea. *Climate Change Research* 1:121-131. [In Korean]
- Smaling EMA, Janssen BH. 1993. Calibration of QUEFTS, a model predicting nutrient uptake and yields from chemical soil fertility indices. *Geoderma* 49:21-44.
- Spitters CJT, Schapendonk AHCM. 1990. Evaluation of breeding strategies for drought tolerance in potato by means of crop growth simulation. In *Genetic Aspects of Plant Mineral Nutrition*. pp. 151-161. Springer, Netherlands.
- Sudharsan D, Adinarayana J, Raji Reddy D, Sreenivas G, Ninomiya S, Hirafuji M, Kiura T, Tanaka K, Desai UB, Merchant SN. 2013. Evaluation of weather-based rice yield models in India. *International Journal of Biometeorology* 57:107-123.
- Van Diepen CA, Wolf J, Van Keulen H, Rappoldt C. 1989. WOFOST: A simulation model of crop production. *Soil use and management* 5:16-24.
- Van Ittersum MK, Leffelaar PA, Van Keulen H, Kropff MJ, Bastiaans L, Goudriaan J. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy* 18:201-234.
- Van Keulen H, Van Heemst HDJ. 1982. Crop response to the supply of macronutrients (No. 83-871514. CIMMYT.). p. 46. Wageningen, Netherlands.
- Van Laar HH, Goudriaan J, Van Keulen H. 1997. SUCROS97: Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations. *Quantitative Approaches in Systems Analysis*, No. 14. de Wit CT Graduate School for Production Ecology and Resource Conservation. p. 52. Wageningen, Netherlands.
- Witt, C., T.H. Fairhurst, J.E. Sheehy, A. Dobermann, and A.G. Kerstan. 2005. A nutrient decision support system (NuDSS) for irrigated rice. PPI/PPIC and IPI, Singapore, and IRRI, Los Banos, Philippines.
- Wolf J, De Wit CT, Keulen H. 1989. Modelling long term crop response to fertilizer and soil nitrogen. I. Model description and application. *Plant and Soil* 120:11-22.
- Xie WX, Wang GH, Zhang QC. 2007. Potential production simulation and optimal nutrient management of two hybrid rice varieties in Jinhua, Zhejiang Province, China. *Journal of Zhejiang University Science B* 8:486-492.
- Zhu XG, Zhang GL, Tholen D, Wang Y, Xin CP, Song QF. 2011. The next generation models for crops and agro-ecosystems. *Science China Information Sciences* 54:589-597.