

기후변화에 따른 작물의 수량 예측을 위한 시스템 요구도 분석

김준환¹ · 이충근² · 김현애³ · 이변우³ · 김광수^{3*}

¹농촌진흥청 국립식량과학원 답작과, ²농촌진흥청 국립식량과학원 기획조정과,

³서울대학교 농업생명과학대학 식물생산과학부

(2014년 9월 11일 접수; 2014년 11월 5일 수정; 2014년 11월 25일 수락)

Requirement Analysis of a System to Predict Crop Yield under Climate Change

Junhwan Kim¹, Chung Kuen Lee², Hyunae Kim³, Byun Woo Lee³ and Kwang Soo Kim^{3*}

¹Rice Research Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Suwon 441-857, Korea

²Planning and Coordination Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Suwon 441-857, Korea

³Department of Plant Science, College of Agriculture and Life Science, Seoul National University, Gwanakro 1, Gwanakgu, Seoul 151-921, Korea

(Received September 11, 2014; Revised November 5, 2014; Accepted November 25, 2014)

ABSTRACT

Climate change caused by elevated greenhouse gases would affect crop production through different pathways in agricultural ecosystems. Because an agricultural ecosystem has complex interactions between societal and economical environment as well as organisms, climate, and soil, adaptation measures in response to climate change on a specific sector could cause undesirable impacts on other sectors inadvertently. An integrated system, which links individual models for components of agricultural ecosystems, would allow to take into account complex interactions existing in a given agricultural ecosystem under climate change and to derive proper adaptation measures in order to improve crop productivity. Most of models for agricultural ecosystems have been used in a separate sector, e.g., prediction of water resources or crop growth. Few of those models have been designed to be connected to other models as a module of an integrated system. Therefore, it would be crucial to redesign and to refine individual models that have been used for simulation of individual sectors. To improve models for each sector in terms of accuracy and algorithm, it would also be needed to obtain crop growth data through construction of super-sites and satellite sites for long-term monitoring of agricultural ecosystems. It would be advantageous to design a model in a sector from abstraction and inheritance of a simple model, which would facilitate development of modules compatible to the integrated prediction system. Because agricultural production is influenced by social and economical sectors considerably, construction of an integrated system that simulates agricultural production as well as economical activities including trade and demand is merited for prediction of crop production under climate change.

Key words: Climate change, Requirement analysis, Integrated system, Crop yield, Monitoring



* Corresponding Author : Kwang Soo Kim
(luxkwang@snu.ac.kr)

I. 서 론

CO₂, N₂O, 및 CH₄를 포함하는 온실가스 증가로 인한 기후변화는 생물리화적인 요인에 의해 작물 생산에 영향을 미칠 수 있다(Tubiello *et al.* 2002). 예를 들어, Peng *et al.*(2004)은 미래의 야간온도가 1°C 증가할 경우 수량의 10%가 감소할 것으로 보고하였다. Long *et al.*(2006)은 CO₂ 증가로 작물의 생산성은 증가할 수 있으나 고온에 따른 생산성 감소를 상쇄하기는 어려울 것으로 보고하였다. Matsui *et al.*(1997)은 CO₂의 농도가 높아지게 되면 기공저항의 증가를 초래하고, 이로 인해 고온조건에서 벼의 불임이 증가하는 것으로 보고하였다. 또한, 온실가스 증가와 함께 오존 농도가 증가하여 작물의 생산성을 감소시킬 수 있다(IPCC 2014). 예를 들어, Ainsworth(2008)는 대기중 오존 농도가 62ppb일 때 벼의 생산량이 14% 감소하였다고 보고하였다.

미래의 작물 생산성 변화를 예측하기 위해 온실가스 농도 및 기온의 변화뿐 만 아니라 기후변화 적응을 위한 작물 재배 관리까지 고려되어 왔다(Lobell *et al.*, 2008; Smit and Skinner, 2002). 예를 들어, Rosenzweig and Parry(1994)는 CO₂ 배증 조건에서 주요 곡물의 생산성이 감소할 것으로 예측하였으나 관개시설 기반이 조성된다면 감소의 폭이 줄어들거나 오히려 생산성이 향상할 수도 있다는 것을 보고하였다. Olesen *et al.*(2011)은 기후변화 적응을 위해 재배시기의 변화, 품종 및 다른 작물의 재배가 필요할 것으로 보고하였다. Tubiello *et al.*(2000)은 파종시기와 생태형에 따른 품종 변경을 통해 미래 기후조건에서도 작물 생산성이 현재 수준으로 유지될 수 있다는 것을 보고하였다.

기후변화 조건에서 예측된 작물 생산성은 지역에 따라 다른 변동 양상을 보일 것으로 보고되었다(Parry *et al.*, 2004). 대체적으로 기후변화로 인해 저위도 지역에서 상당한 작물 생산성의 감소가 예측되었지만 고위도 지역에서는 기후변화의 영향이 상대적으로 작을 것으로 예측되었다(Rosenzweig *et al.*, 2013). Matthews *et al.*(1997)은 CO₂ 농도가 현재보다 두 배로 증가할 경우 아시아 지역에서 2100년대의 벼 생산성이 3.8% 감소할 것으로 예측하였다. 이는 기후변화에 따른 작물 생산성 변화가 지역에 따라 상이하므로 적응 대책 역시 지역별로 수립되어야 한다는 것을 암시한다(Lobell *et al.*, 2008).

미래의 작물 생산성을 예측하기 위하여 물리적인 환경조건과 재배조건 변화와 함께 사회경제적인 요인도 함께 고려되어왔다(Parry *et al.*, 2004; Fischer *et al.*, 2005). 예를 들어, Schmidhuber and Tubiello(2007)은 2050년 이전에는 기후변화로 인한 생물리화적인 영향보다는 사회경제적인 요인이 농업 생산성에 영향을 줄 것이나 2050년 이후에는 온도와 CO₂ 농도와 같은 물리적인 요인으로 인해 작물의 생산성이 영향을 받을 것으로 전망했다. Howden *et al.*(2007)은 기후변화 적응 정책을 입안하기 위해 기후변동성, 농산물 교역 상황 및 지속가능한 개발 정책과 같은 복잡한 문제들을 통합적으로 다룰 것을 제안하였다.

기후변화에 따른 작물 생산성에 대한 영향을 보다 현실적으로 예측하기 위해, 온도와 온실가스 농도 변화 등의 생물리화적인 요소 및 재배관리에 따른 작물 생산 기술 요소뿐만 아니라, 지역간 교역과 사회경제적인 요소가 고려되어야 한다. 그러나, 아직까지 국내에서의 연구들은 생물리화적인 요소와 재배관리에 관한 기술 요소들을 기반으로 작물의 생육을 예측하는 모델을 이용하여 미래의 작물 생산성 변동을 예측하여 왔다(Lee *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2013; Shim *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2012). 따라서, 앞으로 생물리화적인 특성 뿐만 아니라 사회경제적인 요소들을 고려할 수 있는 통합적 예측 체계의 구축이 필요할 것이다. 본 연구의 목적은 온톨로지에 기반하여 이러한 통합적 시스템의 개념 모델을 제시하는 것이었다. 이를 위해, 국내의 작물 생산성 예측 결과를 종합하여 주요 작물의 피해양상에 대해 분석하고, 작물 생산성 예측을 위한 수단으로 사용되는 작물 모델들의 보다 체계적인 활용을 위해 요구되는 요소들을 제시하고자 하였다. 또한, 온톨로지 기반 개념 모델을 활용하여 기후적인 요인 뿐만 아니라 사회경제적인 부문까지 통합하여 작물 생산성을 예측할 수 있는 체계를 제시하고자 하였다.

II. 기후변화 및 적응 대책에 따른 작물의 생산성 변화

미래 기후조건에서 CO₂ 증가로 인한 수량 증가 효과보다 기온 상승으로 인한 수량 감소 효과가 더 클 것으로 보고되었다(Shim *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2012). 특히, 21세기 전반기에는 기후변화의 효과가

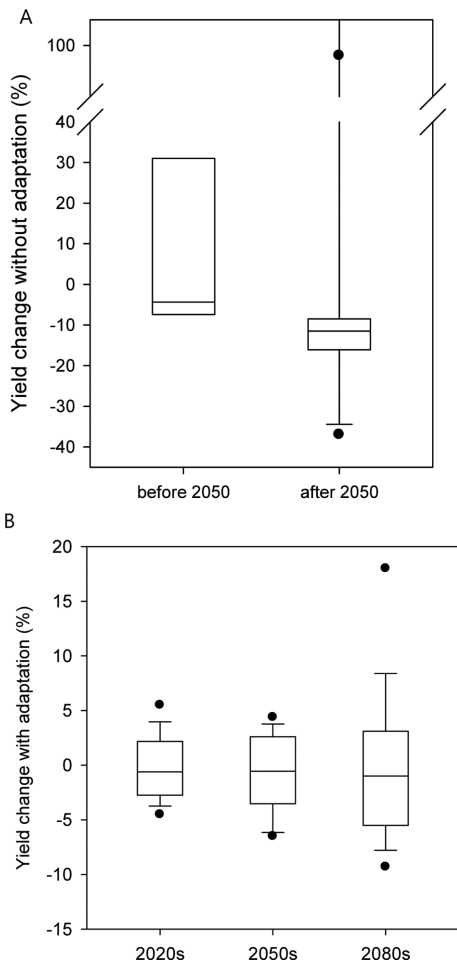


Fig. 1. Simulated changes in rice yield under different climate change scenarios A) without and B) with adaptation measures in Korea. The distribution of rice yield change was obtained using data adapted from Yun (1990), Lee *et al.* (1991), Shin *et al.* (2000), Shim *et al.* (2005), Yoo and Kim (2007), Chung (2010), Lee *et al.* (2010), Seo *et al.* (2010), Shim *et al.* (2010), Ku *et al.* (2011), Lee *et al.* (2012), Kim *et al.* (2012), and Kim *et al.* (2013).

미미하나 후반부에는 작물 생산성이 점차 감소하는 것으로 보고되었다(Lee *et al.*, 2012). 그러나, 개별 연구에 따라 수량 변동폭은 다양하게 제시되었다(Fig. 1). 예를 들어, Shin *et al.*(2000)은 CO₂ 배증 조건에서 중산간지대 및 중북부지역에서 수량이 증가하나 주요 곡창지대인 남부지방에서 수량이 감소하여 국가 전체적으로는 현재대비 11% 감소될 것으로 예측하였다. Lee *et al.*(1991); Yun(1990); Shim *et al.*(2010)은 CO₂ 배증 조건에서 전국 단위의 수량이 9.9%~37% 감소될 것으로 예측하였다. 온실가스의 농도가 좀더 높

아질 것으로 예상되는 시나리오 자료를 사용한 경우 생산성의 감소폭이 상대적으로 증가하는 경향을 보였다. 예를 들어, Kim *et al.*(2012)은 SRES A1B 시나리오에서 현재 대비 2090년대에 8% 감소할 것이나 RCP 8.5 시나리오에서는 13% 감소할 것으로 예측하였다. 또한, Yoo and Kim(2007)은 SRES A1 시나리오 조건에서 2080년대에 벼의 생산성이 16.5% 감소할 것으로 예측하였다.

기후변화에 따른 수량 감소는 여러 요인이 복합적으로 작용하여 나타날 것으로 예상된다. 고온으로 인해 생육기간 단축과 야간 호흡 소모량 증가로, 결국 작물의 생산성을 감소시키게 될 것으로 예상된다(Kim *et al.*, 2012; Yun 1990; Lee *et al.*, 1991; Shin *et al.*, 2000). 예를 들어, 고온에서의 빠른 발육으로 개화기와 출수기가 앞당겨지며 등숙기간도 단축된다(Lee *et al.*, 1991). 이러한 생육기간의 단축은 생태형에 따라 다르게 나타나며, 만생종의 경우 지역에 따라 등숙기가 3~18일 정도로 가장 많이 감소할 것으로 예측되었다(Shim *et al.*, 2005). Lee *et al.*(2012)은 기후변화에 따른 벼 생산성 변화에 영향을 미치는 요인으로 기후 온난화가 59.8%로 가장 영향이 크며 다음으로 재배시기 11.8%, CO₂ 시비효과 9.7%, 벼 생태형 1.7% 등 순으로 제시했다.

작물 생산성 감소 요인을 극복하기 위한 방법으로 농기수준에서 비교적 손쉽게 적용할 수 있는 재배 시기의 이동 및 지역별 벼 품종 교체가 제안되어 왔다(Kim *et al.*, 2013). 예를 들어, Seo *et al.*(2010)은 중생종이나 중만생종을 재배하거나, 출수기를 늦추면 쌀 수량 감소 및 품질의 저하를 막을 수 있을 것으로 제안하였다. 이 밖에 작부체계를 통해 쌀수량 감수를 줄이는 대안도 시도되고 있다. Ku *et al.*(2011)은 기후변화에 따른 생산성 감소에 대한 대안으로 벼의 2기작 재배의 가능성을 연구하였다. Lee *et al.*(2010)은 과거 30년(1931-1960)의 이양가능 기간이 지역별로 4월 28일~5월 23일이었으나, 최근 30년(1971-2000)에는 4월 24일~5월 16일로 4~7일 정도 빨라진 것으로 보고하였다. 이러한 추세가 유지된다면 2기작의 가능성은 계속 확대될 것으로 보인다.

기후변화에 대응하기 위한 재배관리를 적용하였을 때는, 적응을 위한 재배관리를 하지 않았을 경우보다 작물의 생산성 감소가 적을 것으로 예측되었다(Fig 1B). 예를 들어, Lee *et al.*(2012)은 최적기에 파종할

경우 2050년 이전에는 수량이 증가하며, 그 이후에도 현재의 파종기를 유지하는 경우에 비해 수량의 감소가 적을 것으로 예측하였다. Yun(1990) 역시 CO₂ 배증 조건에서 지역에 따라 20~37%의 수량 감소를 예상하였으나, 40일 이상 이양을 지연하였을 경우 수량 증가가 18%에 이를 것으로 예측하였다. Yoo and Kim (2007)의 경우, 지역에 따라 이양기를 15, 23, 30일 앞당겨야 할 것으로 제시하였으며, 이 경우 벼 생산량이 2030년대, 50년대에 각각 1.76%, 3.41% 증가하며 2080년대에는 2.52% 감소할 것으로 보고하였다. Kim *et al.*(2013)은 RCP 8.5 시나리오를 사용하였을 경우 조생종 및 중생종은 파종시기를 앞당길 경우 미래로 갈수록 높은 수량을 예측할 수 있었으나, 파종시기를 지연할 경우 감수현상이 심화될 것으로 보고하였다. 반면, 중만생종의 경우에는 지연파종으로 미래로 갈수록 증수가 가능할 것으로 예상되었다. 품종 교체 및 재배 시기 이동에 따른 생산성의 변화가 비교적 많이 연구된 것에 비해, 비료나 관개로 인한 작물 생산성 변동에 대한 연구는 미미하였다. 따라서, 앞으로의 연구에서 기후변화 조건에서 시비의 효율 및 시비 시기, 관개 방법 및 양에 따른 생산성의 변화폭을 예측할 수 있는 연구가 필요할 것으로 사료되었다.

작물에 따라 기후변화에 따른 영향은 상반된 결과를 가져올 수 있다. 예를 들어, 콩의 경우, 기후변화에 따른 기온효과로 생산성이 감소하는 것으로 예측되었다. Kim *et al.*(2012)은 2070년대 이후로 콩의 생산성이 2.9~4.7% 감소하는 수준에 이를 것으로 예측하였다. Seo *et al.*(2006)은 경기 북부지역에서 기후변

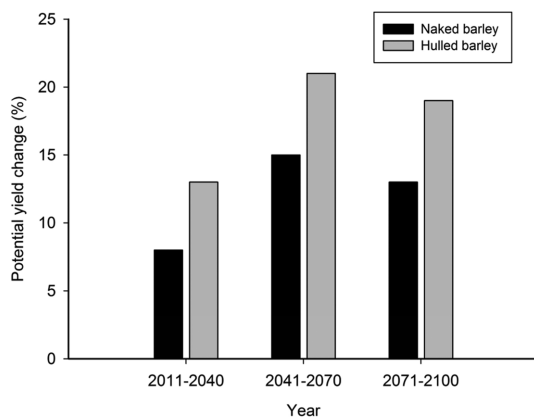


Fig. 2. Simulated change in barley yield under given climate change scenarios (after Shim *et al.*, 2011).

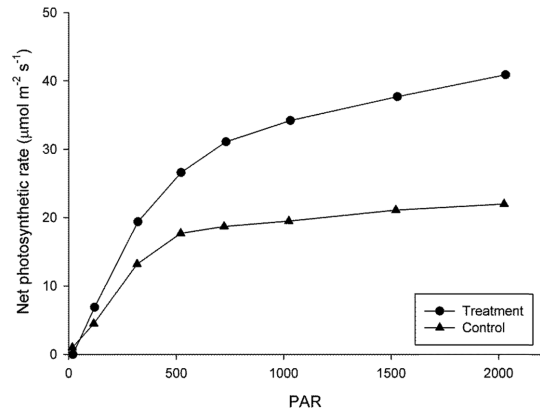


Fig. 3. Change in photosynthesis rate under different concentration of CO₂ for barley (after Lee *et al.*, 1999).

화로 인해 콩의 생산성이 1~15% 감소할 것으로 예측하였다. 반면, 보리의 경우, 겨울철 온도 증가 등의 이유로 생산성이 상당히 증가하는 것으로 예측되었다. 예를 들어, 쌀보리, 결보리의 생산성이 2070년대 이후로 대략 13%~19% 정도 증가할 것으로 예측되었다 (Fig. 2). 가을보리의 경우, 같은 조건에서 45%~58% 증가할 것으로 예상되었다(Kim *et al.*, 2012).

다른 주요 작물들이 기후변화에 따라 생산성이 감소하는 것과 달리 보리의 생산성 증가는 CO₂ 농도의 변화와 겨울철 온도 변화에 따른 것으로 판단된다. Lee *et al.*(1999)은 보리가 800ppm 이상의 CO₂ 농도조건에서 광합성의 속도가 증가하는 것으로 보고하였다(Fig. 3). 그러나, 작물이 장기간 고농도의 CO₂에 노출되었을 경우, 탄소시비효과가 감소하는 경향이 있어 이를 고려한 생산성 예측이 필요하다(Shim *et al.*, 2011). Shim *et al.*(2002)은 겨울철 분얼기의 온도상승은 줄기의 신장을 저해하고 이삭의 신장에 도움이 되는 것으로 보고하였다. 그러나, 이러한 생산성 향상 효과는 품종에 따라 차이를 보여 기후변화 대응 고온 적응성 맥류 육성이 필요하다는 것을 암시하였다.

기후변화에 따른 생물리화학적 영향은 작물별 또는 품종별로 상이한 결과를 초래하기 때문에, 주어진 조건에서의 생산성을 예측하는 것이 중요하다. 작물 생육 및 생산성을 예측하기 위해 비생물학적 환경반응을 생물리화학적으로 해석하여 정량화하는 작물 생육모델과 주어진 작물의 생육 환경조건을 기반으로 공간적인 재배 적합도를 파악하기 위한 재배적지 모델들이 기후변화에 따른 작물 생산성 예측에 활용되어 왔다. 이들

모형들을 활용하여 기후변화의 영향 및 취약성 평가, 더 나아가 기후변화에 따른 위험도를 예측할 수 있다.

III. 기후변화에 따른 작물 생산성 변화를 예측하기 위한 모델

국내에서는 주로 Decision Support System for Agrotechnology Transfer(DSSAT) 및 ORYZA 2000와 같은 작물 생육을 예측하기 위한 모델들이 사용되어 왔다. DSSAT은 여러 작물 모델이 모듈형태로 구성된 하나의 시스템으로 전세계적으로 널리 사용되고 있다 (Jones *et al.*, 2003; Thorp *et al.*, 2012; White *et al.*, 2011; Fig. 4). DSSAT으로 예측될 수 있는 주요 작물들로 벼, 옥수수, 콩, 밀 등이 있으며, 최근에는 전 구수준에서 기후변화에 따른 작물 생산성 예측을 위해 대응량 처리기능이 추가된 시스템이 개발되었다 (Elliott *et al.*, 2013).

폭넓은 사용자와 모델 활용을 위한 많은 자료가 축적되어 있는 DSSAT 모델은 기후변화 연구에 중요한 모델로 여겨지고 있으나, 여전히 DSSAT 모델을 기후

변화 연구에 적용하기에는 한계점 또한 적지 않다. 우선, DSSAT 모델의 광합성 예측은 Radiation Use Efficiency (RUE)에 의존하고 있어 CO₂ 농도에 따른 광합성 변화를 예측하는 것에 한계가 있다. 예를 들어, 벼의 모듈인 CERES-Rice 모델의 광합성량은 잠재 광합성량과 이를 제한하는 계수들에 의해 결정된다. 그러나, 이들 계수들을 결정하기 위해 사용되는 수식들은 주로 경험식에 의존하기 때문에, 경험식이 만들어진 조건에서 벗어난 경우에는 오차의 크기가 커질 위험이 있다. 또한, 고온 조건에 대한 반응이 체계적으로 구성되어 있지 않아, 고온에 의한 불임 모의를 효과적으로 수행할 수 있도록 모델 알고리즘의 수정이 필요하다(Nguyen *et al.*, 2014).

토양, 기상 및 재배관리 정보뿐만 아니라 품종의 특성을 고려하여 생육을 예측하는 벼 생육 모형으로 ORYZA 2000 모델이 사용되어 왔다(Boumann *et al.*, 2001). ORYZA 2000 모델은 동화산물의 생산량과 분배량을 결정하는 모듈, 농경지에서의 수분 동태를 모의하는 모듈, 그리고 식물체 및 토양의 질소 동태를 모의하는 모듈로 구성되어 있다(Fig. 5). 또한, 수량을

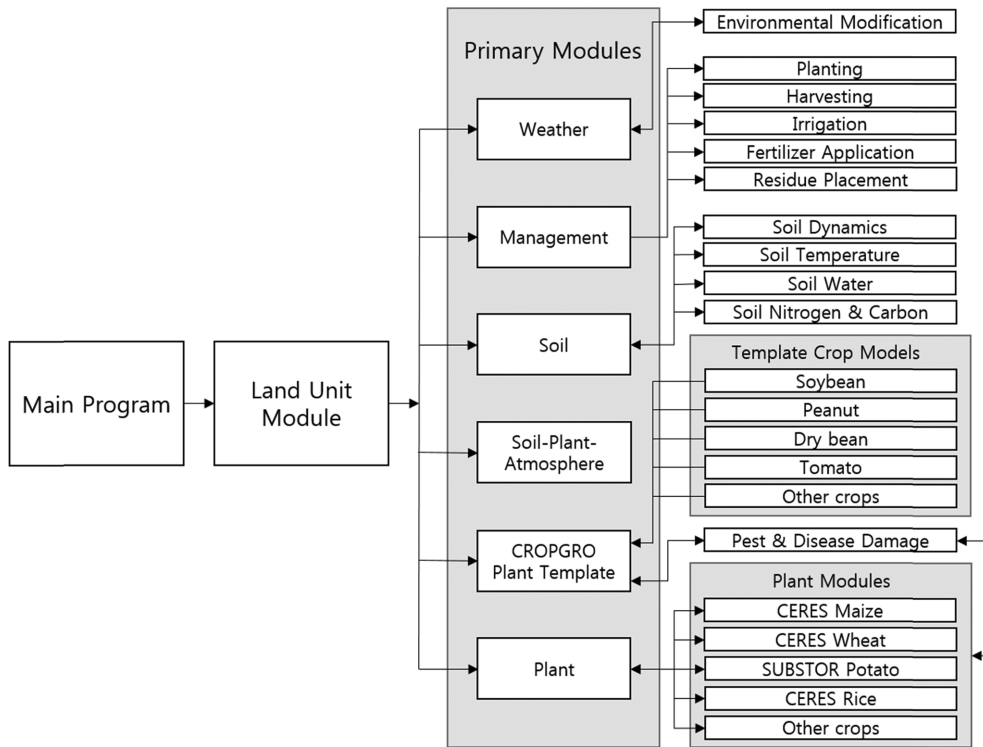


Fig. 4. Schematic view of components of the DSSAT-CSM (after Jones *et al.*, 2003).

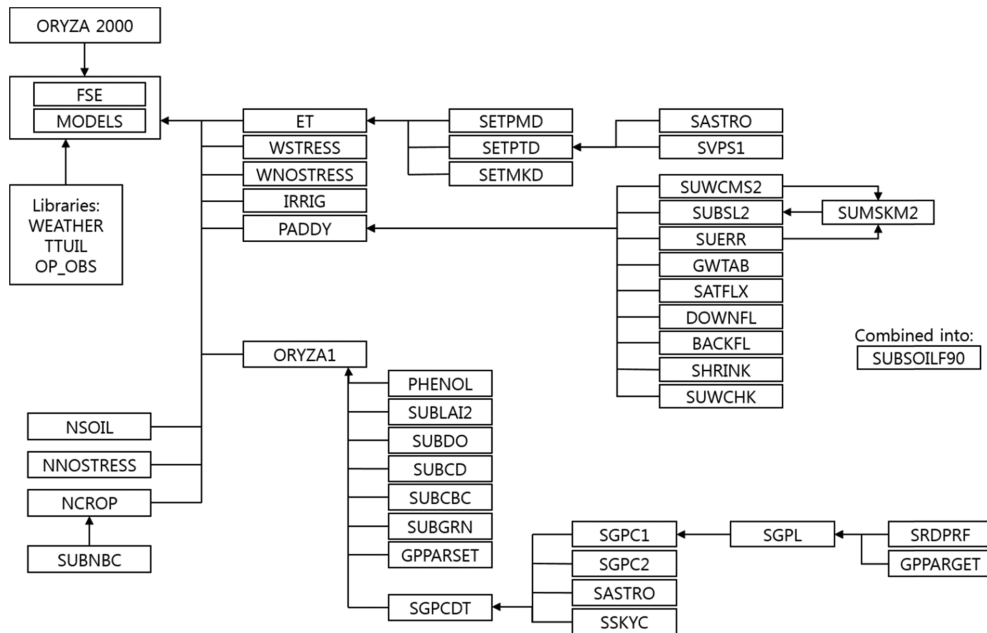


Fig. 5. Schematic view of components of ORYZA 2000 (after Bouman *et al.*, 2001).

결정하기 위해 사용되는 주요 모듈들이 우리나라 환경에 알맞도록 개선되었다. 예를 들어, 영화수 예측 모듈과 임실율 예측 모듈이 Cui and Lee(2002)과 Nguyen *et al.*(2014)에 의해 개발되었다. 또한, 종실중을 예측하기 위해 등숙율과 수량이 상호 연계되어 일별로 예측하기 위한 모듈이 추가되었다. ORYZA 2000 모델은 개별 지점별로 모의를 수행하도록 설계되어 있기 때문에, 고해상도 기상자료를 사용하여 기후변화 예측을 수행하기에는 어려운 단점이 있다. 이를 개선하기 위해 ORYZA 2000 모델을 고급 컴퓨터 프로그래밍 언어를 사용하여 개선하고 대용량 처리 모듈을 개발하는 것이 필요할 것으로 사료되었다.

국내에서는 널리 사용되고 있지 않지만 호주 및 뉴질랜드를 중심으로 사용되고 있는 Agricultural Production Systems Simulator(APSIM) 모델 역시 해외에서 기후변화에 따른 작물 생산성 예측에 널리 사용되고 있다 (Keating *et al.*, 2003; Asseng *et al.*, 2004). APSIM 모델은 DSSAT과 마찬가지로 여러 작물 모델들이 작물 생산 예측 시스템의 모듈 형태로 구성되어 있다. 토양, 기상 및 재배관리에 따라 일별 작물 생육 속도를 계산하여 작물의 잠재 생산성을 예측할 수 있다. 또한, 수분과 질소 영양분의 제약에 따른 획득 가능한 수량을 모의할 수 있다. APSIM과 GIS를 연동하여 공

간적인 작물 생산 예측이 가능하고 병렬처리를 위한 기능이 포함되어 있다. 모델의 프로그램 소스 코드가 공개되어 있어 우리나라 환경에 알맞은 모듈을 개발하여 추가할 수도 있다. 그밖에, Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard (STICS, Brisson *et al.*, 1998), Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC, Williams 1990), Cropping Systems Simulator (CropSyst, Stockle *et al.*, 1994), Global Agro-Ecological Zones (GAEZ, FAO Land and Water Development Division, 1996) 모델들이 특정 지역 또는 전세계를 대상으로 기후변화 조건에서 작물 생육의 변화를 예측하기 위해 사용되었다.

국내외에서 작물 생산성 모델이 기후변화 영향평가를 위해 사용되어 왔으나 작물 생산성 예측 모델의 한계를 고려한 예측 자료의 분석이 필요하다. 우선, 작물 생산성 모델의 정확도가 고려되어야 한다. 작물 생산성 모델은 현실에서 재배되고 있는 작물의 생육 과정을 간단한 수식을 사용하여 모사하는 것이기 때문에 실제 자료와 차이가 있을 수밖에 없다. 이는, 현재까지 밝혀진 작물에 대한 이해수준을 모델의 특정 생육 과정에 적용하였기 때문이다. 예를 들어, 대다수의 작물 생산성 모델들은 상승된 이산화탄소에 반응하는 작물의 생리적 특성들을 고려하지 못하는 경우가 많다.

또한 미래의 기후 조건에서 자주 발생할 것으로 예상되는 고온, 한발, 침수 등 환경적 스트레스가 작물 생육과 수량에 미치는 영향에 대한 고려 또한 부족한 경우가 많다.

모델의 특성에 따라 기후변화에 따른 생산성 변동 양상은 다르게 예측될 수 있다. 예를 들어, Chung (2010)은 AquaCrop 모델을 사용하여 기준년도(1971-2000)에 비해 2020년대와 2080년대에 잠재 생산량이 각각 23% 및 98%까지 증가할 것으로 예측하였다 (Fig. 1). O(2005)는 RICEMOD-300 모델을 사용하여 CO₂ 배증 조건에서 기온 및 강수에 대하여 모두 수량 상승효과를 보일 것으로 예상하였다. 그러나 이들이 사용한 모델들은 벼 생육의 생물리화학적 과정을 모의하기 보다 증발산량을 바탕으로 수량을 추정하는 모델이었다. 이러한 모델들은 탄소동화작용에 대하여 생물리화학적 과정을 모의하는 다른 작물 생육 모형에 비해 CO₂ 농도 조건에 더 민감하게 반응하는 경향이 있고 호흡으로 소모된 동화산물에 대한 고려가 적어, CO₂ 영향이 과대 추정된 것으로 사료되었다. 따라서, 작물 모델의 특성을 파악하여 이로부터 예측된 자료의 세밀한 분석이 필요할 것으로 사료되었다. 또한, 앞으로의 연구를 통해 작물에 대한 이해 수준을 높이고 이를 최대한 모델에 적용하는 노력이 필요하다. 따라서, 단기적으로는 모델 평가를 통해 오차를 유발하는 부분을 개선할 수 있는 서브모델의 개발 및 도입이 필요하다. 장기적으로는 모델 전체적인 프레임 워크를 개선하여 다양한 요소들을 고려할 수 있는 작물 생산성 모델 개발이 필요할 것으로 사료된다.

작물 생산성 모델에 사용되는 입력자료 역시 작물 생산성 예측자료의 신뢰성에 영향을 준다. 작물 모델들은 대개 품종, 재배관리 및 기상에 의한 작물 생육의 영향을 정량화하기 위한 입력자료들이 사용된다. 예를 들어, 작물 모델들은 발육속도와 동화산물 분배율 지수 등을 포함하여 품종모수를 사용하여 품종간 숙기와 생육량의 차이를 계산한다. 이들 품종모수의 정확한 값을 추정하기 위해서 상당한 노력과 시간이 필요하나, 작물별로 수없이 많은 품종이 있으므로 이들 품종에 따른 품종모수를 구하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서, 대부분의 경우, 일부 대표 품종에 대한 품종모수를 구하고 이를 다른 품종에 적용하는 경우가 대부분이다.

작물 생육에 직접적으로 영향을 미치는 재배관리 정

보의 경우 역시 다양한 모수값이 필요하나 이들의 정확한 값들을 확보하기는 어렵다. 예를 들어, 시비관리 및 물관리에 따라 작물의 생육 양상이 변화하지만 실제로 시비관리를 제외하고는 이러한 재배관리 정보를 얻기가 쉽지 않다. 또한, 많은 재배관리 정보를 작물 모델에 적용하는 것은 작물 모델의 실용성을 저하시킬 수 있다.

기상정보의 경우 지역별 기상관측소에서 자료가 생산되므로 비교적 단순하고 얻기도 쉽다. 그러나, 기상 자료는 주로 특정 지점에서 생산이 되므로 자료 품질의 공간적 한계가 존재한다. 예를 들어, 대상 지점이 기상 관측소와 거리가 멀수록, 또는 지형지물의 변화가 클수록 실제 기상과 획득된 기상정보의 차이가 커진다. 또한 기후변화 연구를 위해 얻어진 미래 기상 시나리오 자료의 경우, 자료 자체의 정확도가 낮을 것으로 예상된다. 따라서, 이러한 입력자료의 한계로 인해 작물 모델로 예측된 생산성 자료 역시 불확실성이 존재한다.

개별 작물 모델이 가지고 있는 특성 때문에, 동일한 토양 및 기상 자료를 입력자료로 사용하더라도 예측되는 작물의 생산성에는 차이가 발생한다. 이러한 모델 간의 차이를 파악함으로써 작물 모델이 가지는 불확실성을 최소화하여 작물 생산성 예측의 신뢰성을 높일 수 있다. 예를 들어, Asseng *et al.*(2013)은 27개의 작물모델을 사용하여 밀의 미래 수량을 예측한 결과값은 전구기후모델, 온실가스 배출 시나리오, 기후자료 규모축소 방법에 따른 변이보다 작물 모델 선택에 따른 변이가 더 큰 것으로 보고하였다. 특히, 미래 온도가 증가함에 따라 작물 모델에 따른 생산성 예측 값의 불확실도가 증가하는 것으로 보고하였다.

국내에서 기후변화에 따른 작물 생산성의 예측을 위해 지금까지 수행되어 오던 단편적인 작물 생산성 예측을 지양하고 복수의 작물 모델들을 사용하여 생산성을 예측하고 이들을 비교 분석하여 통합하는 것이 필요할 것이다. 이를 위해, 공통된 입력자료의 생산 및 모의 수행에 대한 프로토콜이 요구된다. 예를 들어, Rosenzweig *et al.*(2013)는 기후변화 시나리오 자료로부터 입력자료의 생산 과정뿐만 아니라 작물 모델 모의 수행 및 개선 방법에 대한 프로토콜을 제시하였다. 또한, 농업 생산성과 지역간의 교역을 고려할 수 있는 경제 모델을 활용하기 위한 프로토콜과 대응량의 자료를 처리하기 위한 IT 관련 프로토콜을 제시하였다.

우선, 국내 환경에 적합한 기후변화 시나리오 자료로부터 작물 모델의 입력자료 생산을 위한 프로토콜 개발이 필요하다. 예를 들어, 농촌 진흥청에서는 RCP 기후변화 시나리오를 바탕으로 남한에 걸쳐 30m 공간 해상도를 가진 초고해상도 기후자료를 생산하였다. 이러한 자료를 사용하여 격자별로 작물 생산성 예측이 가능하다. 또한, Kim *et al.*(2013)은 30m 고해상도 기후자료를 일정 구역 단위로 묶어 생산성 예측을 하였다. 한편, 기상청에서는 1km 수준의 공간 해상도와 일 단위의 시간 해상도를 가진 국가 표준 기후변화 시나리오 자료를 제공하고 있다. 이들 자료는 전지구 기후모델로부터 지역규모 모델을 사용하여 동적으로 규모 축소한 자료를 상세화한 자료이다. Glotter *et al.*(2014)는 동적 규모축소 모델자료는 전지구 기후모델 자료에 비해 작물 모델의 예측 정확도를 높이지 못하였다고 보고하였다. 따라서, 이들 자료를 사용하여 신뢰성 있는 작물 생산성 예측을 가능하게 할 것인가에 대한 검증이 필요하다. 또한, 국내에서 다수의 지역규모 수치기상모델로부터 생산된 여러 종류의 기후변화 시나리오 자료의 활용 방법에 대한 정립이 필요하다. 예를 들어, 격자별 자료와 일정 구역별로 평균된 기후자료를 사용한 경우의 작물 생산성 예측 자료의 신뢰성을 분석하여 보다 합리적인 기상 입력 자료 생성 방식의 제안이 필요하다.

기상 입력자료와 함께, 작물 재배 관리 및 품종 선택에 대한 프로토콜 정의가 필요할 것으로 사료된다. 기후변화 조건에서 생산성 감소를 상쇄하기 위해 시비량이나 시비시기가 조정될 수 있다. 효과적인 시비량과 시비 시기를 파악하기 위해, 현재 조건에서의 실험 결과 자료와 예측자료의 비교 분석이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 지역별로 기후변화에 대응하기 위해 적합한 품종을 선택할 수 있도록 지원하기 위해 국내에 가용한 품종들을 대상으로 작물 생육 모델의 모수를 선정하는 것이 필요하다.

개별 모델들이 예측한 작물 생산성 값들로부터 보다 신뢰성있는 예측자료를 생산하기 위해 멀티 모델 앙상블 방법이 사용될 수 있다. 그러나, 여러 모델의 예측 값을 하나로 통합하기 위해 개별 모델별 가중치 계산이 필요하나 작물 모델을 대상으로 연구된 바가 없다. 반면, Vidal and Wade(2008)는 복수의 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 수자원 앙상블 예측자료를 생산하기 위해 Reliability Ensemble Averaging(REA),

Kolmogorov-Smirnov 검정 통계치, 및 Taylor Skill Score를 사용하였다. Majda and Gershgorin(2011)은 엔트로피에 기반한 정보이론을 사용하여 앙상블 예측을 위한 가중치 계산 방법을 제시하였다. 작물 생산성 관측자료와 모델 예측 자료와의 비교를 통해 앙상블 예측자료 생산에 필요한 가중치 계산이 가능하므로, 이에 대한 관측체계 구축 및 자료 공유 체계 개발이 시급하다.

IV. 작물 생산성 예측 모델 개선을 위한 모니터링 체계

작물 모델의 예측자료를 검증하기 위해서는 작물의 생육 자료가 필수적이며 선진국을 중심으로 이러한 자료 수집이 장기간에 걸쳐 이루어지고 있다. 예를 들어, USDA/ARS 에서는 기후변화에 따른 농업 생태계의 기능 변화 양상에 대한 자료 수집 및 축적을 위해 Long-Term Agro-Ecosystem Research(LTAR) 네트워크를 10여개소에서 운영 중이다. 이렇게 수집된 장기 관측자료는 기후변화로 인한 작물의 반응 양상을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 작물 모델의 신뢰도를 향상시키기 위한 자료를 제공할 수 있다.

국내의 장기 모니터링 자료로 대표적인 것이 농촌진흥청 국립식량과학원에서 수행하고 있는 벼 작황시험이다. 벼 작황시험은 기상조건에 따른 벼 발육형 및 수량과의 관계를 파악하여 작황예측 및 시책자료에 활용하기 위한 목적으로 1975년부터 시행되어왔으며, 처음에는 전국 총 27개 지점에서 모니터링되었으나 2012년부터는 20개 지역에서 수행되고 있다 (농촌진흥청, 1981, 2012). 벼 작황시험에 사용되는 품종은 현재 그 지역에서 주로 재배되는 4-6개의 대표품종들로 실제 농가 상황을 반영하도록 하였다. 조사항목은 시대별로 약간 변화하였으나 출수기와 수량 및 수량 구성요소는 계속해서 조사되었다. 앞서 언급한 바와 같이 벼 작황시험의 품종은 실제 농가 상황을 반영하기 위하여 품종을 고정하지 않고 그 당시의 대표품종을 사용하였기 때문에 기후변화 영향평가를 위한 자료로 활용하기에는 한계가 있다. 그러나, 지역별 대표품종의 연차 변화가 크지 않기 때문에 기술적으로 전체 추세의 변화를 추적하는 것은 가능하다. 작물 모델을 개선하기 위해서는 출수기와 건물중 자료가 필요하다. 벼 작황시험 자료의 경우, 출수기는 동일 방법으로 조사

되었으나 건물중 자료는 시대에 따라 다른 자료들이 확보되었다. 예를 들어, 1986년까지는 이앙 후 25일과 30일에 건물중이 조사되었으나 그 이듬해부터는 6월 21일에만 조사되었다. 또한, 6월 21일 건물중은 정부 중앙 연구소 3개 지역에서만 조사되었으며, 특히 가장 중요한 시기인 출수기의 건물중이 조사되지 않아 작물 모델 개선을 위한 자료로 활용하기에 충분하지 못한 단점이 있었다. 이를 보완하기 위해 2012년부터 조사 항목에 출수기 건물중을 포함하고 있다.

국내에서는 기후변화 조건에서 작물의 생리적 반응을 모니터링할 수 있는 기반이 부족한 실정이다. 예를 들어, 야외에서 CO₂ 농도 증가에 따른 작물의 생리적인 반응을 연구하기 위한 Free Air CO₂ Enrichment (FACE) 설비가 국내에서 운영된 사례가 없어 기초적인 자료 수집에 한계가 있다. 이를 대신하여 온도 및 CO₂ 구배 비닐하우스가 사용되고 있으나, 이 역시 소수의 장소에서 실험이 수행되고 있어 주요 작물에 대한 자료를 확보하기에는 한계가 있다. 일부에서 CO₂ 및 CH₄ 플럭스 등 비교적 장기간의 관측 실험이 수행되고 있으나, 이들 연구들은 산림이나 벼를 대상으로 하고 있어, 대상 작물의 확대가 필요할 것으로 사료된다. 따라서, 농업 생태계 전반에 걸친 모니터링 프로토콜 개발과 집중 관측을 위한 수퍼 사이트 구축이 필요할 것으로 사료된다.

기후변화에 의해 생물학적 요인들이 작물의 생산성에 미치는 영향 역시 변화할 것이기 때문에, 선진국에서는 병해충의 관측자료를 포함하여 농업 생태계 전반에 걸친 생물상의 관측자료 수집이 시도되고 있다. 예를 들어, International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), International programme of biodiversity science (DIVERSITAS) 등을 중심으로 Future Earth라고 하는 10년간의 다학제적 국제 연구 계획이 수립되어 전 지구 환경변화 모니터링을 위해 생태계 관측 시스템의 통합이 시도되고 있다. 국내에서도, 이러한 프로그램에 참여하여, 국내뿐만 아니라 해외에서의 작물 생육 및 병해충 관련 자료를 수집하고 분석을 통한 미래 기후조건에서의 작물 생산성 예측이 필요할 것으로 사료된다.

V. 농업 경제 모델과 작물 생산성 모델의 연계 체계

농업 생산은 기상과 같은 물리적 환경뿐만 아니라

소비자 수요 및 교역과 같은 사회 경제적인 변화에 영향을 받기 때문에, 농업 생산성 모델과 경제 모델을 통합하려는 시도가 되어 왔다. 예를 들어, Leclre *et al.*(2013)은 작물 생육 모델인 STICS 모델과 미시 경제 모델을 통합하여 농지 규모에서 자생적인 적응을 통해 작물 수량과 총이익의 부정적인 영향을 크게 완화할 수 있으며, 이를 통해 유럽의 생산수준을 높일 수 있을 것으로 보고하였다. 미국에서는 Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP)을 통해 동아시아와 같은 지역 규모에서의 작물 생산성을 예측하고 이를 경제모델과 연계하여 기후변화 영향을 평가하려는 시도가 되고 있다. 또한, 전 세계에 걸쳐 주요 식량 작물에 대해 다양한 작물 모델에서 예측된 자료를 수집하고 종합하여 기후변화의 전세계적인 식량 안보 영향을 파악하려는 연구가 진행 중이다. 이와 함께, 미국과 유럽에서는 기후변화에 대응하여 지역이나 국가규모에서 농업 생산 부문의 최적화를 위한 대응대책 수립을 위해 개별 분야별로 사용되는 모델들을 경제 모델과 통합하는 노력을 하고 있다.

VI. 온톨로지 기반 작물 생산성 예측 체계의 개념 모델

농업 생태계는 생물, 기후, 토양 및 경제 환경이 서로 복잡하게 연결되어 있어 개별 분야의 피해를 감소시키기 위한 적응 대책들에 의해 농업 부문 내 다른 영역에 의도하지 않은 파급 효과를 초래할 수 있다. 예를 들어, 기후변화로 감소가 예상되는 작물의 생산성을 향상시키기 위해 시비량을 증가시킬 경우 질소의 하천 및 지하수 유입이 증가할 수 있어 농업용수의 수질에 영향을 끼칠 수 있다. 논인 경우, 간단 관계를 통해 관개시기를 감축할 경우 CH₄의 배출을 감소시킬 수 있으나 탈질현상으로 인한 온실가스 배출의 증가를 초래할 수 있다. 따라서, 작물 생산성과 관련한 농업 생태계의 요소들을 다각적으로 고려한 기후변화 적응 대책을 수립하기 위해서는 농업의 각 분야와 연동한 예측 시스템이 필요하며, 더불어 사회경제적인 분야를 통합하여 이들 분야의 변동 양상을 예측해야 한다. 이를 위해, 작물 모델과 같은 개별적인 모델뿐만 아니라, 분야별 모델들을 연계한 통합 시스템의 구축이 필요하다.

Gruber(1993)은 온톨로지를 사용하여 어떤 대상을 개념적으로 정형화 할 수 있다고 제안하였다. 통합적

인 작물 생산성 및 최적화 시스템은 농업 생태계의 개별 요소들을 대표하고 이들간의 상호작용을 설명할 수 있는 모듈들로 구성되어야 하므로, 온톨로지 기반의 설계를 통해 복잡한 시스템을 체계적으로 구축할 수 있도록 지원할 수 있다. 온톨로지를 사용하여 모델을 설계할 때, 모델 대상을 클래스로 정의한다. 클래스 내에는 모델 대상이 가지고 있는 속성과 기능을 표현하기 위한 변수들과 함수들로 구성된다. 그리고, 클래스가 객체로 구현되어 실질적인 모델링의 기능을 수행한다. 추상적인 개념으로부터 현실을 대표하는 대상을 표현하기 위해 클래스간의 상속을 사용할 수 있다. 예를 들어, 잎이 LEAF이라는 클래스로 정의되었다고 한다면 벼의 잎은 RICE_LEAF이라는 클래스로 정의될 수 있으며, 이때 RICE_LEAF 클래스는 LEAF 클래스의 속성과 함수들을 기반으로 벼 잎의 특성을 묘사할 수 있는 보다 구체화된 속성과 함수들이 추가된다.

농업 생태계 내에서 작물의 생산성을 예측하기 위한 통합 시스템 구축을 위해 우선 농업 생태계내에서 물질 순환 및 에너지 교환에 기여를 하는 생물학적 및 비생물학적 요소들을 대표할 수 있는 ELEMENT 라는 기본 클래스가 정의된다. ELEMENT 클래스에는 모델 대상이 가지고 있는 물질과 에너지의 양을 대표하기 위한 속성들을 가진다. 또한, 이들의 변화량을 계산할 수 있는 함수들로 구성된다. ELEMENT 개체로부터 실질적인 농업 생태계내 생물학적 또는 비생물학적 요인들을 표현하기 위해 상세화된 클래스들로 파생된다(Fig. 6). 예를 들어, ELEMENT 클래스로부터 식물체의 개별 기관을 대표하는 ORGAN이 파생되고

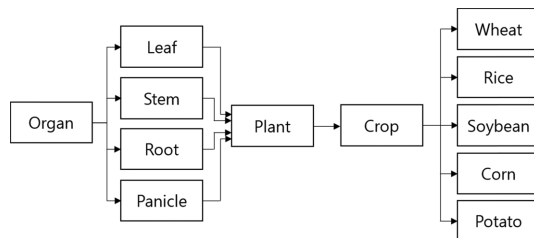


Fig. 6. Inheritance structure of components of an integrated crop yield prediction system. *Plant* is served as a base class for *Crop*, which is used as parent class for individual crops, e.g., *Wheat* and *Rice*. The *Plant* class consists of *Leaf*, *Stem*, *Root*, and *Panicle*, which are derived from the base class *Organ*. The *Organ* class is defined using variables and functions to represent pool and flux of materials and energy.

ORGAN으로부터 LEAF, STEM, ROOT, PANICLE 클래스들이 상속된다. 이들 객체들이 모여 PLANT란 클래스가 정의되고, 이로부터 다시 CROP이라는 파생 클래스가 정의된다. 이때 CROP 클래스는 작물 생육 모델이 가지고 있는 변수와 함수들을 포함하고 있도록 정의된다. 이후, RICE와 SOYBEAN과 같이 각각 벼와 콩을 대표할 수 있는 특화된 클래스들이 CROP 모듈로부터 파생된다.

주어진 생태계 공간내에서 상세화된 개별 분야의 클래스들을 이용하여 에너지 흐름과 물질 순환을 파악하기 위해, 클래스 사이의 물질과 에너지 교환을 모의하기 위한 인터페이스 클래스가 사용된다(Fig. 7). 인터페이스 클래스에 해당 경관내의 물질과 에너지의 총량을 대표하는 속성들이 정의되고, 물질들을 통화단위로 전환할 수 있는 함수와 속성역시 정의된다. 국내의 복잡한 지형을 고려할 때, 인터페이스 클래스가 처리할 수 있는 공간적 범위는 수계를 중심으로 설정되는 것이 타당할 것으로 사료된다. 대상 수계내의 개별 격자 지점에 존재하는 생물학적 또는 환경적 요인들을 표현하기 위해 격자지점별로 ATMOSPHERE, CROP, SOIL 클래스에서 얻어진 객체들이 생성되고 이들 객체들이 인터페이스 클래스내에서 정의된다. 이러한 인터페이스 클래스로부터 특정 수계를 대표하는 객체가 생성되고 경관규모의 인터페이스 객체 간의 연결을 통해 각 수계별로 생산된 자원들을 교환하기 위한 교역 시스템이 구성된다(Fig. 8). 경관 규모 객체간의 교역 항목으로 물, 농작물, 축산물뿐만 아니라 개별 항목들의 통화적 가치를 포함하여 지역간 교역에 따른 경제효과를 모의 할 수 있다.

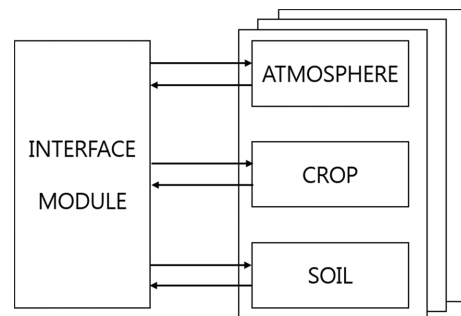


Fig. 7. Overview of an interface class that mediates data exchange between objects for elements of agricultural ecosystems including atmosphere, crop, and soil at each site in a given area.

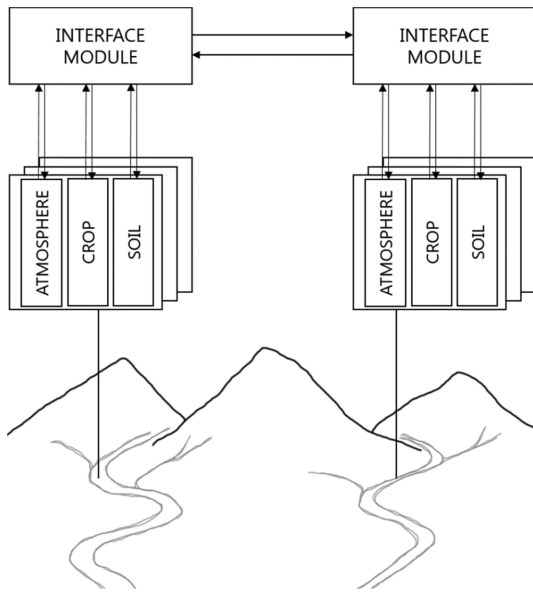


Fig. 8. Data exchange between interface objects that represent watersheds.

통합적인 기후변화 영향평가 시스템 구축을 위해 단계적인 접근이 필요하다. 우선, 농업 생태계내의 개별 분야를 대표할 수 있는 모델들의 개발 및 보완이 필요하다. 현재까지 사용되고 있는 작물 모델 및 경제 모델들은 인터페이스 모듈을 통해 물질과 에너지를 교환할 수 있도록 설계가 되어 있지 않다. 따라서, 물질과 에너지를 교환하기 위한 프로토콜과 이를 구현할 수 있는 표준 체계가 필요하다. 또한, 농업 생태계 통합 예측 시스템을 구축하기 위해 전국 규모의 시스템을 개발하기 보다 소규모의 지역을 대상으로 파일럿 통합 시스템의 구축 및 검증이 필요하다. 기본적인 생태계 구성 모델들이 지역규모에서도 적용 가능하므로, 농업 생태계 집중 관측이 이루어지고 있는 지역을 중심으로 개별 클래스를 개발하고 관측자료를 활용한 검증이 요구된다. 이러한 개별 클래스들을 하나의 시스템으로 구성하여 지역 전체적인 생산성의 변동이나 기후변화 영향을 파악할 수 있는지 검증이 가능할 것이다.

적 요

온실가스 증가로 인한 기후변화는 농업 생태계에 다양한 경로로 영향을 미쳐 작물 생산에 영향을 미칠 수 있다. 또한, 농업 생태계는 생물, 기후, 토양 및 경제 환경이 서로 복잡하게 연결되어 있어 개별 분야

에 초점을 맞춘 적응 대책들은 농업 부문 내 다른 영역에 의도하지 않은 파급 효과를 초래할 수 있다. 기후변화 조건에서 복잡한 농업 생태계의 상호작용을 고려하면서 최적의 작물 생산성을 유지하기 위해 개별 분야별 모델을 연계한 통합 예측 시스템 구축이 요구된다. 이러한 통합시스템을 구축하기 위해서는 단계적 접근이 필요하다. 국내에서 사용되고 있는 모델들은 통합시스템에 적합하도록 설계된 것이 아니기 때문에, 이를 위한 모델의 재개발이 필요하다. 농업생태계 감시를 위한 수퍼사이트와 위성사이트의 구축을 통해 장기간 작물 생육 자료를 확보하고 이를 개별 분야 모델의 개선에 활용할 수 있다. 모델 대상의 추상화와 상속과정을 통해 보다 유연한 형태의 통합 모델의 모델 개발이 가능할 것이다. 마지막으로, 농업분야는 사회경제적인 요인에 지대한 영향을 받기 때문에, 농업 생산과 경제분야가 연계될 수 있는 통합 시스템 구축이 바람직 할 것 이다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ009860)의 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

Ainsworth, E. A., 2008: Rice production in a changing climate: a meta-analysis of responses to elevated carbon dioxide and elevated ozone concentration. *Global Change Biology* **14**(7), 1642-1650.

Asseng S., F. Ewert, C. Rosenzweig, J. W. Jones, J. L. Hatfield, A. C. Ruane, K. J. Boote, P. J. Thorburn, R. P. Rötter, D. Cammarano, N. Brisson, B. Basso, P. Martre, P. K. Aggarwal, C. Angulo, P. Bertuzzi, C. Biernath, A. J. Challinor, J. Doltra, S. Gayler, R. Goldberg, R. Grant, L. Heng, J. Hooker, L. A. Hunt, J. Ingwersen, R. C. Izaurralde, K. C. Kersebaum, C. Müller, S. Naresh Kumar, C. Nendel, G. O'Leary, J. E. Olesen, T. M. Osborne, T. Palosuo, E. Priesack, D. Dipoche, M. A. Semenov, I. Shcherbak, P. Steduto, C. Steckle, P. Stratonovitch, T. Streck, I. Supit, F. Tao, M. Travasso, K. Waha, D. Wallach, J. W. White, J. R. Williams, and J. Wolf, 2013: Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change* **3**, 827-832.

Asseng, S., P. D. Jamieson, B. Kimball, P. Pinter, K. Sayre, J. W. Bowden, and S. M. Howden, 2004: Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops*

- Research* **85**(2-3), 85-102.
- Bouman, B. A. M., M. J. Kropff, T. P. Tuong, M. C. S. Wopereis, H. F. M. ten Berge, H. H. van Laar, 2001: *ORYZA2000 : modeling lowland rice* (1st ed.). International Rice Research Institute and Wageningen University and Research Centre, 235pp.
- Brisson, N., B. Mary, D. Ripoche, M. H. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoullaud, P. Gate, F. Devienne-Barret, R. Antonioletti, C. Durr, G. Richard, N. Beaudoin, S. Recous, X. Tayot, D. Plenet, P. Cellier, J. M. Mached, J. M. Meynard, and R. Delacolle, 1998: STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* **18**(5-6), 311-346.
- Chung, S. O., 2010: Simulating evapotranspiration and yield response of rice to climate change using FAO-AquaCrop. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* **52**(3), 57-64. (in Korean with English abstract)
- Cui, R. X., and B.W. Lee, 2002: Spikelet number estimation model using nitrogen nutrition status and biomass at panicle initiation and heading stage of rice. *Korean Journal of Crop Science* **47**(5), 390-394.
- Elliott, J., D. Kelly, N. Best, M. Wilde, M. Glotter, and I. Foster, 2013: The parallel system for integrating impact models and sectors (pSIMS). *Proceedings of the Conference on Extreme Science and Engineering Discovery Environment: Gateway to Discovery (XSEDE '13)* **21**, 1-8.
- FAO Land and Water Development Division, 1996: *Agro-Ecological Zoning Guidelines*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fischer, G., M. Shah, F. N. Tubiello, and H. V. Velhuizen, 2005: Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990-2080. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* **360**(1463), 2067-2083.
- Glotter, M., J. Elliott, D. McInerney, N. Best, I. Foster, and E. J. Moyer, 2014: Evaluating the utility of dynamical downscaling in agricultural impacts projections. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **111**(14), 8776-8781.
- Gruber, T. R., 1993. A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition* **5**(2), 199-220.
- Howden, S. M., J. F. Soussana, F. N. Tubiello, N. Chhetri, M. Dunlop, and H. Meinke, 2007: Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **140**(50), 19691-19696.
- Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. C. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijsman, and J. T. Ritchie, 2003: The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* **18**(3-4), 235-265.
- 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**(3-4), 267-288.
- Kim, D. J., J. H. Roh, J. G. Kim, and J. I. Yun, 2013: The Influence of shifting planting date on cereal grains production under the projected climate change. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**(1), 26-39. (in Korean with English abstract)
- Kim, D. J., S. O. Kim, K. H. Moon, and J. I. Yun, 2012: An outlook on cereal grains production in South Korea based on crop growth simulation under the RCP8.5 climate condition. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **14**(3), 132-141. (in Korean with English abstract)
- Ku, B. I., M. K. Choi, S. K. Kang, T. S. Park, Y. D. Kim, H. K. Park, J. K. Ko, and B. W. Lee, 2011: Growth and yield in early seasonal cultivation for rice double cropping in Southern Korean Paddy Field. *The Journal of the Korean Society of International Agriculture* **23**(5), 520-530. (in Korean with English abstract)
- Leclere D., P. A. Jayet, N. de Noblet-Ducoudr, 2013: Farm-level autonomous adaptation of European agricultural supply to climate change. *Ecological Economics* **87**, 1-14.
- Lee, B. W., J. C. Shin, and J. H. Bong, 1991: Impact of climate change induced by the increasing atmospheric CO₂ concentration on agroclimatic resources, net primary productivity and rice yield potential in Korea. *Korean Journal of Crop Science* **36**(2), 112-126. (in Korean with English abstract)
- Lee, C. K., J. Kim, J. Shon, W. Yang, Y. H. Yoon, K. J. Choi, and K. S. Kim, 2012: Impacts of climate change on rice production and adaptation method in Korea as evaluated by simulation study. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **14**(4), 207-221. (in Korean with English abstract)
- Lee, C. Y., Y. C. Kim, H. C. Park, S. M. Kim, I. S. Choi, 1999: Effects of elevated CO₂ concentration on photosynthesis, transpiration, stomatal conductance and intercellular CO₂ concentration of barley. *Journal of Agricultural technology and Development Institute* **3**(2), 37-41. (in Korean with English abstract)
- Lee, J. T., K. M. Shim, H. S. Bang, M. H. Kim, K. K. Kang, Y. E. Na, M. S. Han, and D. B. Lee, 2010: An analysis of changes in rice growth and growth period using climatic tables of 1960s (1931~1960) and 2000s (1971~2000). *Journal of Korean Society of Soil Science and Fertilizer* **43**(6), 1018-1023. (in Korean with English abstract)
- Lobell, D. B., B. B. Marshall, C. Tebaldi, M. D. Mastrandrea,

- W. P. Falcon, and R. L. Naylor, 2008: Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science* **319**, 607-610.
- Long S. P., E. A. Ainsworth, A. D. B. Leakey, J. Nosberger, and D. R. Ort, 2006: Food for thought: Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentration. *Science* **312**, 1918-1921.
- Majda A. J. and B. Gershgorin, 2011: Improving model fidelity and sensitivity for complex systems through empirical information theory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **108**(25), 10044-10049.
- Matsui T., O. S. Namuco, L. H. Ziska, and T. Horie, 1997: Effects of high temperature and CO₂ concentration on spikelet sterility in indica rice. *Field Crop Research* **51**, 213-219.
- Matthews, R. B., M. J. Kropff, T. Horie, D. Bachelet, 1997: Simulating the impact of climate change on rice production in Asia and evaluating options for adaptation. *Agricultural Systems* **54**, 399-425.
- Nguyen, D. N. K. J. Lee, D. I. Kim, A. T. Nguyen, B. W. Lee, 2014: Modeling and validation of high-temperature induced spikelet sterility in rice. *Field Crops Research* **156**, 293-302.
- O, S. N., 2005: Effects of climate change on rice economic risk assessment using CO₂ doubling scenarios. *Journal of the Korean Meteorology Society* **41**, 507-517.
- Olesen J. E., M. Trnka, K. C. Kersebaum, A. O. Skjelvg, B. Seguin, P. Peltonen-Sainio, F. Rossi, J. Kozyra, and F. Micale, 2011: Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy* **34**(2), 96-112.
- Parry, M. L., C. Rosenzweig, A. Iglesias, M. Livermore, and G. Fischer, 2004: Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change* **14**(1), 53-67.
- Peng, S., J. Huang, J. E. Sheehy, R. C. Laza, R. M. Visperas, X. Zhong, G. S. Centeno, G. S. Khush, and K. G. Cassman, 2004: Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **101**(27), 9971-9975.
- Rosenzweig C., J. Elliott, D. Deryng, A. C. Ruane, C. Miller, A. Arneth, K. J. Boote, C. Folberth, M. Glotter, N. Khabarov, K. Neumann, F. Piontek, T. A. M. Pugh, E. Schmid, E. Stehfest, H. Yang, and J. W. Jones, 2013: Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **111**(9), 1-6.
- Rosenzweig C., J. W. Jones, J. L. Hatfield, A. C. Ruane, K. J. Boote, P. Thorburn, J. M. Antle, G. C. Nelson, C. Porter, S. Janssen, S. Asseng, B. Basso, F. Ewert, D. Wallach, G. Baigorría, J., and M. Winter, 2013: The agricultural model intercomparison and improvement project (AgMIP): Protocols and pilot studies. *Agricultural and Forest and Meteorology* **170**, 166-182.
- Rosenzweig, C. and M. L. Parry, 1994: Potential impact of climate change on world food supply. *Nature* **367**, 133-138.
- Schmidhuber J. and F. N. Tubiello, 2007: Global food security under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **104**(50), 19703-19708.
- Seo, H. C., S. K. Kim, Y. S. Lee, and Y. C. Cho, 2006: Geographical shift of quality soybean production area in northern Gyeonggi Province by year 2100. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**(4), 242-249. (in Korean with English abstract)
- Seo, Y. H., A. S. Lee, B. O. Cho, A. S. Kang, B. C. Jeong, and Y. S. Jung, 2010: Research Notes: Adaptation study of rice cultivation in Gangwon Province to climate change. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **12**(2), 143-151. (in Korean with English abstract)
- Shim, K. M., K. A. Roh, K. H. So, G. Y. Kim, H. C. Jeong, and D. B. Lee, 2010: Assessing impacts of global warming on rice growth and production in Korea. *Climate Change Research* **1**(2), 121-131. (in Korean with English abstract)
- Shim, K. M., S. H. Min, D. B. Lee, G. Y. Kim, H. C. Jeong, S. B. Lee, and K. K. Kang, 2011: Simulation of the effects of the A1B climate change scenario on the potential yield of winter naked barley in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **13**(4), 192-203. (in Korean with English abstract)
- Shim, K. M., S. H. Yun, Y. S. Jung, J. T. Lee, and K. H. Hwang, 2002: Impact of recent weather variation on yield components and growth stages of winter barley in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**(1), 38-48. (in Korean with English abstract)
- Shim, K. M., Y. S. Lee, Y. K. Shin, K. Y. Kim, and J. T. Lee, 2005: Changes in simulated rice yields under GCM 2 x CO₂ climate change scenarios. *Proceedings of the Korean Society of Crop Science Conference* **45**(2), 12-27. (in Korean with English abstract)
- Shin, J. C., C. G. Lee, Y. H. Yoon, and Y. S. Kang, 2000: Impact of climate variability and change on crop productivity. *Proceedings of the Korean Society of Crop Science Conference* **45**(2), 12-27. (in Korean with English abstract)
- Smit, B., and M. W. Skinner, 2002: Adaptation options in agriculture to climate change: a typology. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* **7**(1), 85-144.
- Stockle, C. O., S. A. Martin, and G. S. Campbell, 1994: CropSyst, a Cropping systems simulation model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural Systems* **46**(3), 335-359.
- Thorp, K. R., J. W. White, C. H. Porter, G. Hoogenboom, G. S. Nearing, and A. N. French, 2012: Methodology to evaluate the performance of simulation models for

- alternative compiler and operating system configurations. *Computers and Electronics in Agriculture* **81**, 62-71.
- Tubiello, F. N., C. Rosenzweig, R. A. Goldberg, S. Jagtap, and J. W. Jones, 2002: Effects of climate change on US crop production: simulation results using two different GCM scenarios. Part I: Wheat, potato, maize, and citrus. *Climate Research* **20**(3), 259-270.
- Tubiello, F. N., M. Donatelli, C. Rosenzweig, and C. O. Stockle, 2000: Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. *European Journal of Agronomy* **13**(2-3), 179-189.
- Vidal J. P., and S. D. Wade, 2008: Multimodel projections of catchment-scale precipitation regime. *Journal of Hydrology* **353**(1-2), 143-158.
- White, J. W., G. Hoogenboom, B. A. Kimball, and G. W. Wall, 2011: Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. *Field Crops Research* **124**(3), 357-368.
- Williams, J. R., 1990: The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: a case history. *Philosophical Transactions: Biological Sciences* **329**(1255), 421-428.
- Yoo, G. Y., and J. E. Kim, 2007: *Development of a methodology assessing rice production vulnerabilities to climate change*. KEI/RE-14, Korea Environment Institute, Seoul, 84pp.
- Yun, J. I., 1990: Analysis of the climate impact on Korean rice production under the carbon dioxide scenario. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **26**(4), 263-274. (in Korean with English abstract)