

EPIC 작물모형과 시계열 모형과의 예측력 비교

최종산*

Keywords

EPIC 모형(EPIC model), 예측적합도(forecast accuracy), 추세분석(trend analysis), 모형평가(model evaluation)

Abstract

Faced with the need to solve complex and variable management problems in agriculture, agricultural economists have begun to use quantitative methods such as econometric models for their research. However, this approach only allows for research based on quantitative data. Crop simulations have been proposed as an alternative to overcome data limitation. This study aims to introduce an Environmental Policy Integrated Climate (EPIC) model, to demonstrate EPIC's usefulness for estimating past or future crop production by comparing forecast accuracy with forecasting time series methods, and to discuss the possibility of agricultural economists utilizing the EPIC model. Since the research result shows EPIC simulation has high forecast accuracy on crop production and can generate data which are very difficult to acquire in the real world, it is expected that the research integrated with crop simulation by agricultural economists will increase if they have the ability to run EPIC simulation.

차례

- | | |
|----------|------------|
| 1. 서론 | 4. 분석 결과 |
| 2. 선행 연구 | 5. 요약 및 결론 |
| 3. 연구 방법 | |

* 전북대학교 농업경제학과 강사. e-mail: choijongsan@hotmail.com

1. 서론

다양한 생육환경 변수는 작물 생산량 예측을 어렵게 하고 있다. 최근에는 기후 온난화와 같은 환경변화가 심화됨에 따라 미래 식량 확보에 대한 불안감이 고조되고 있는 가운데, 모의실험을 이용한 작물의 잠재적 생산량을 예측하는 모형연구가 요구되고 있다. 또한 과도한 비료와 농약 사용이 생육환경 내에 부정적인 영향을 미치지만 직접 실험을 통해 그 영향력을 규명하는 것은 한계가 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 작물 생산과 생육환경 요인 간의 상호작용 현상에 대한 수학적인 관계를 컴퓨터로 구현하는 작물모의실험(crop simulation)을 활용한 연구방법론이 제시된다. 현 정부에서 중점 추진하고 있는 ‘농산물 수급조절 체계 구축’ 과제에는 이상기후 발생 시 신속하게 수급량 변화를 예측할 수 있도록 기존의 단수예측모형을 개선하거나 새로운 모형을 개발할 계획(농림축산식품부 보도자료, 2013)이 있다. 작물모의실험 기반의 단수예측모형은 이 과제의 대안이 될 수 있다.

작물모의실험의 활용은 미국을 비롯한 여러 국가에서 증가하고 있는 가운데 본 연구에서 소개하는 EPIC(Erosion Productivity Impact Calculator 또는 Environmental Policy Integrated Climate) 모형은 1980년 초, 미 농무부에 의해 토양의 유실·오염과 토양생산성과의 관계를 분석하기 위해 개발되었으며 전 세계적으로 가장 많이 활용되는 작물모의모형(crop simulation model) 중 하나이다(Williams et al. 2008). EPIC 모형은 기후, 물의 순환, 침식, 토양 영양분, 토양온도, 작물성장, 작물환경관리, 경운방법 등에 대해 농가단위에서 국가단위까지 모의실험이 가능하다(Williams 1990). EPIC 모형을 운용하기 위해 연구지역의 기후(weather), 토양(soil), 농업생산관리(crop management), 지형(topography)에 관한 자료는 반드시 입력되어야 할 정보이다. 기후자료는 관측된 기간의 일일 기후자료와 연평균 기후자료가 쓰인다. 일일 기후자료가 없으면 기후생성프로그램을 이용하여 일일 기후자료를 모의 생성하여 사용할 수 있다(Liu et al. 2009). 토양자료는 정부기관에서 발행하는 토양정보를 이용하거나 직접 연구지역의 토양표본을 수집 및 분석해 깊이, 체적밀도, 모래와 점토의 비율, 산성도, 토양 내의 영양소 등을 10개 층(layer)까지 구분하여 입력할 수가 있다. 생산관리(management) 자료는 작물 재배부터 수확까지 진행되는 경운방법, 농기계 사용, 비료 및 농약 사용 등과 같은 농업경영 정보를 말하며 농가단위의 생산관리 자료는 방문조사를 통해 수집되는 경우가 대부분이다. 지형에 관한 정보로써 경지 면적, 위도와 경도, 경지의 기울기 등이 있다. 필수 입력자료 외에 작물의 생육환경과 관련된 자료가 많고 정확성이 높을수록 현실에

근접한 모의실험이 가능해진다.

EPIC 모형은 농업 및 환경 분야에서 다양한 목적을 가지고 많은 연구자에 의해 수행되어왔다. Gassman et al.(2004)은 EPIC 모형 개발 시기부터 2004년까지 EPIC 모형을 이용하여 이루어진 총 156편 논문을 대상으로, 연구주제를 작물 생산량 예측, 토양 영양분의 순환과 손실(nutrient cycling and loss), 침식작용(soil erosion), 토양 탄소분리(soil carbon sequestration), 경제적 분석, 지역 평가(regional assessment), 다른 프로그램과의 연동(interface)으로 분류하여 선행연구를 소개하였다. EPIC 모형을 활용한 논문 중 작물의 생산량 예측을 주제로 한 논문이 50%를 차지하였고 그 다음은 토양침식, 토양영양분의 순환 및 손실에 관한 것이었다.

우리나라의 경우 한석호 외(2011)의 연구에서 EPIC 모형을 소개하고 있으며 최종산(2011)은 캄보디아를 대상으로 기온변화에 따른 쌀 생산량 예측을 위해 EPIC 모형을 이용하였다. 임철희 외(2015)는 국내농업환경에 EPIC 모형의 적용 가능성을 확인하기 위해 쌀과 옥수수의 실제생산량과 EPIC 모의 생산량을 비교하는 연구를 수행하였다. 그들은 모형 보정(calibration)을 하지 않아 연구의 한계점을 가지고 있지만 기후변화에 따른 장기간 모의 및 미래 작물 생산량 추정에 활용이 가능할 것으로 판단하였다. EPIC 모형을 활용한 국내 학술연구는 아직 활발하게 진행되지 못하고 있는 것으로 판단되어 2005년 이후부터 EPIC 모형을 이용한 국외연구의 문헌고찰을 통해 활용사례를 소개하고자 한다. EPIC 모형에서 가장 중요한 역할을 하는 작물생산량 예측력을 평가하기 위해 모의실험 결과(모의값)와 실제 작물생산량을 비교한 연구는 국외에서 다수 있었지만, 농업경제학자에게 익숙한 시계열 자료 예측기법과 비교하여 예측 적합도를 평가한 연구는 없다. 이에 최종산(2011)의 연구에서 보고한 2001~2010년의 캄보디아 쌀 생산량을 모의실험한 결과와 추세분석 기법에 의한 결과를 실제 생산량과 비교해 각 모형의 과거자료에 대한 적합도를 평가하고자 한다(이하 과거자료 적합도라 함). 그의 연구에서 기후변화 시나리오에 반응하는 2011~2060년의 쌀 생산량 모의값을 이용하여 추세분석(trend analysis)을 한 후, 2011~2013년 동안의 EPIC 모형과 추세분석 기법 예측값을 동 기간의 실제 생산량과 비교하여 미래예측 적합도를 평가하였다(이하 미래예측 적합도라 함). 마지막으로 작물모의모형은 농업환경과 작물의 생육환경을 기반으로 구현되기 때문에 주로 농학자 중심으로 운영됐는데, 본고에서는 농업경제학자가 EPIC 모형의 운용가능성에 대해 논의하고자 한다.

2. 선행 연구

2.1. 작물 생산량 예측

작물 생산량 예측은 연구자들뿐만 아니라 이해 당사자인 농업인에게 매우 중요한 관심사여서 EPIC 모형이 활용되는 대표적인 영역이다. 작물의 생산량 예측에 관한 선행 연구는 작물의 모의생산량과 관측된(실제) 생산량의 비교를 통한 모형평가(model evaluation)에 관한 연구, 관개용수량 및 기후 관련 인자들 변화에 반응하는 작물 생산량 예측을 포함한다. EPIC 모형평가는 모의값이 얼마나 정교하게 실제 관측값을 예측하였는지 수리·통계적 비교를 통해 이루어진다. 이 과정은 모형의 신뢰성을 확보하는 것으로 보정¹(calibration)과 검증²(validation)의 과정으로 구성된다. 선행연구에서 작물 생산량과 질소비료 시비량, 사육조류 배출물³(litter), 토양 영양분, 관개용수량 및 적용 시기와 같은 생산량 변화에 영향을 주는 요인의 실제 관측값과 모의값 간에 수리·통계적 적합성이 높게 나타나 EPIC 모형이 모의실험에 유용한 도구임을 증명하였다 (Guerra et al. 2005; He et al. 2006; Wang et al. 2006; Ko and Piccinni 2008; Ko et al. 2009; Billen et al. 2009; Gaiser et al. 2010). 관개용수 적용에 따른 작물 생산량 변화에 관한 연구는 관개용수량을 반영하는 시나리오를 구성한 후 이에 반응하는 작물 생산량 예측을 통해 관개용수가 생산량에 미치는 효과를 분석하였다(Liu et al. 2007; Wriedt et al. 2009; van der Velde et al. 2010). 집중호우나 가뭄 등과 같은 기후변화로 인한 농산물의 피해가 증가함에 따라 이 분야에 대한 관심이 높아지고 있지만 기후변화에 따른 작물 생산량 예측연구는 기대만큼 이루어지고 있지 않았다. EPIC 모형은 기후변화 시나리오를 구성하는 강수량, 온도, 이산화탄소 농도와 같은 기후 관련 인자들의 변화에 반응하는 작물 생산량을 예측하는 데 활용되었다(Adejuwon 2005; Sands and Edmonds 2005; Chavas et al. 2009; Farina et al. 2011; Gaiser et al. 2011).

1 모의값과 관측값이 같도록 모형 매개변수(parameters)의 수정과 변환을 통해 매개변수를 결정하는 일련의 과정을 말한다.

2 모형 보정 후, 모형의 모의값과 실제 관측값 간의 비교를 통해 적합성 또는 관측값의 특성을 잘 나타내는지 평가하는 과정을 말한다.

3 작물의 생산량 증대를 위해 질소와 인산을 포함하는 사육조류의 배출물은 농가에 의해 비료로 활용되고 있으나, 경작지나 방목지의 과다 사용으로 인해 배출물 속의 영양분들이 비나 지표수 등에 의해 씻겨 호수 또는 강물로 유입(runoff)됨에 따라 수질악화 또는 부영양화를 발생시킬 수 있다.

2.2. 토양 영양분 순환 및 탄소격리

토양에 질소(nitrogen)나 인(phosphorus)과 같은 영양분을 공급하면 수확량 증가를 기대할 수 있지만, 영양분의 과도한 공급은 수질 오염뿐만 아니라 토양 속 다른 영양분도 파괴할 수 있다. 농경지에서 질소와 인을 포함하고 있는 사육조류 배출물의 빈번한 사용으로 인한 지표수 이동은 환경 및 수질에 영향을 미칠 수 있어 이와 관련된 문제가 중요한 이슈로 등장하고 있다(Vadas 2006; Torbert et al. 2008). 또한, 지구 온난화의 원인으로 지목되고 있는 온실가스(탄소) 감축 노력의 하나로 농업 분야에서는 화석연료의 사용과 농업활동으로 발생하는 탄소를 토양으로 격리하고, 격리된 탄소가 토양에 장기간 저장되어 토양의 질 향상과 작물의 생산성 증대를 가져오는 효과에 관한 연구가 진행 중이다. 하지만 토양에서 직접 이루어지는 탄소격리와 관련된 실험은 많은 시간과 비용이 요구되고 있어 모의실험이 대안으로 제시되고 있다. EPIC 모형은 탄소저장용량을 늘리고 탄소격리에 적합한 경운방법 및 최적관리기법(best management practice)을 선별하는 연구에 활용되었다(Izaurrealde et al. 2006; Abrahamson et al. 2007; Izaurrealde et al. 2007; Causarano et al. 2007; Doraiswamy et al. 2007; Causarano et al. 2008; Gaiser et al. 2008; Abrahamson et al. 2009; Apezteguía et al. 2009).

2.3. 경제적 분석

작부체계, 농업관리체계, 기후 및 환경정책 시나리오에 반응하는 작물생산량과 생육 환경 요인의 모의값은 생태경제모형(bioeconomic model) 내의 환경 및 생산함수를 추정하기 위한 자료로 활용된다. Martínez and Albiac(2006)은 질산 오염(nitrate pollution)을 줄이는 환경정책을 평가하기 위하여 옥수수 생산함수와 질소 오염함수를 도출하였다. Paudel et al.(2006)은 질소비료에 반응하는 목화 생산량 모의값을 2차함수, 제곱근함수, Von Liebig 함수, Mitscherlich Baule 함수를 추정하기 위한 자료로 활용하였다. Bishop et al.(2010)은 농업용수 부족현상 해결의 대안으로 저용수작물(low-water use crop)로의 전환을 위한 경제적 타당성을 분석하고자 이윤극대화 모형 안에서 관개용수량에 반응하는 8가지 작물 생산량 모의값을 생산함수 추정 자료로 활용하였다.

2.4. 지역연구 및 다른 프로그램과의 연동

EPIC 모형은 특정 지역의 농가에서부터 국가 수준까지 적용할 수 있다. 특정 지역을 위한 모의실험은 지역 생육환경을 반영하도록 매개변수를 수정한 후 이루어지고 있다(Barros et al. 2005; Srivastava and Gaiser 2010). 모형의 결과를 시각적으로 표현하고자 지리정보시스템(Geographical Information System) 기반의 GEPIC⁴을 이용하여 연구가 수행되었다(Liu et al. 2007; Liu et al. 2008; Liu 2009; Liu and Yang 2010). 또한, Liu et al.(2009)은 월별기후자료는 있으나 EPIC 모형을 운용하는 데 필요한 일일기후자료가 존재하지 않는 경우, 월별기후로부터 일일기후 자료 생성이 가능한 기후 생성프로그램(MODAWEC)을 개발하였고 EPIC 모형에 응용하여 사례연구로 제시하였다.

3. 연구 방법

3.1. 분석자료

EPIC 모형 예측값이 신뢰성을 갖기 위해서는 모형의 보정과 검증과정을 거치게 된다. 이 과정은 작물 생산량의 실제 관찰값과 동 기간 EPIC 모형 모의값 간의 적합도를 수리·통계적으로 비교해 이루어진다. 최종산(2011)은 캄보디아를 대상으로 두 개의 기후 시나리오를 설정하고 이에 반응하는 우기(wet season)의 쌀 생산량을 2011~2060년까지 모의실험하였다. 그는 이 모의실험에 앞서 2001~2010년 우기의 쌀 생산량 모의값을 생성하였고 <표 1>에서 동 기간 실제 쌀 생산량과 비교를 통해 모형평가를 수행하였다.

4 ArcGIS에 기반을 둔 EPIC0509 버전인 GEPIC은 Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology에서 개발되었고 Visual Basic for Application을 프로그램 언어로 하고 있다. ArcGIS 9.1버전을 GIS 프로그램의 최소사양으로 하고 있으며 사이트(<http://www.eawag.ch/forschung/siam/software/gepic/index>) 방문을 통해 프로그램을 내려받아 사용할 수 있다.

표 1. 캄보디아 우기 실제 쌀 생산량, 2001~2013

연도	단위: 톤/ha												
	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11	'12	'13
생산량	1.9	1.71	1.95	1.73	2.26	2.27	2.41	2.54	2.62	2.76	2.92	2.88	2.93

자료: 캄보디아 Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries(MAFF) 연간보고서(2014)

본 연구는 최종산(2011) 연구의 후속연구로서 그의 연구로부터 생성된 모의값을 본 연구의 분석 자료로 활용하였다. <표 1>에서 2001~2010년의 실제 생산량은 동기간 EPIC 모의값 및 추세분석 예측값을 비교하는 과거자료 적합도 분석에 사용되었고 그 후 2011~2013년의 실제생산량은 미래예측 적합도를 비교·평가하기 위하여 활용되었다.

3.2. 추세분석 기법

EPIC 모형과의 예측 적합도를 비교하기 위해 사용된 예측기법은 지수평활모형(exponential smoothing model)이다. 이 모형은 최근 관측값에 더 많은 가중치를 부여하는 방법으로 과거 관측값을 지수적으로 가중평균하여 미래를 예측하게 되며, 적용 및 계산이 쉽고 높은 정확도를 가진 방법으로 알려져 있어 본 연구에 활용되었다. 지수평활 모형에는 추세(trend)를 고려하지 않는 단순지수평활법(simple exponential smoothing), 추세를 고려하는 Holt의 선형지수 평활법(holt's linear exponential smoothing), 지수추세법(exponential trend method), 추세조정가법(additive damped trend), 추세조정승법(multiplicative damped trend) 등이 있으며 그 외에 추세와 계절성(seasonality)을 동시에 고려하는 모형 등이 있다. 본 연구는 <표 1>과 같이 연간 시계열 자료로 뚜렷한 추세를 가지고 있어 추세를 고려하지 않는 단순지수평활법과 계절성을 포함하는 예측기법은 제외하였다. 단순지수평활법은 시계열 자료의 평활값과 평활계수(smoothing parameter)로만 구성되지만 본 연구의 예측기법들은 시간 변화에 따른 추세 평활값과 추세평활계수(trend smoothing parameter), 추세감소계수(damped parameter)를 포함하고 있으며 예측식(forecasting equation), 평활식(smoothing equation), 추세식(trend equation)으로 구성된다.

예측기법 이용 시 고려되어야 할 사항은 적절한 표본수(sample size)의 결정이다. 이것은 질적연구(qualitative method) 또는 양적연구(quantitative method)를 수행하는 모

든 연구자가 직면하는 과제 중의 하나이며, 부적절하고 부정확하거나 과도한 표본수는 연구의 질과 정확성에 영향을 미친다(Baker and Edwards 2012; Bartlett et al. 2001). 1년 또는 2~3년 단위로 급격히 변하는 유행과 관련된 분야의 소비 및 구매 패턴분석이나, 선진국의 해외원조 확대에 농업생산량이 급격히 증가한 개발도상국의 작물생산량 예측을 위한 추세분석을 할 경우 과도한 표본수는 오히려 예측결과의 정확성을 떨어뜨릴 우려가 있다. Hyndman and Kostenko(2007)은 추세분석기법의 최소 표본수는 추정 계수(coefficient)의 수와 무작위성(randomness)을 고려하여 결정할 것을 제안했다. 분석자료에 무작위성이 존재하지 않는다고 가정하면 분기별 또는 월별 계절 변동성을 가지고 있는 계절평활지수 기법의 최소 표본은 'm + [추정 계수]' 공식을 통해 구할 수 있다. 여기서 m은 분기별 계절 변동성인 경우 4이고 월별인 경우에는 12이다. 계절평활지수 기법에서 추정해야 할 계수는 평활계수, 추세평활계수, 계절평활계수, 평활초깃값, 추세초깃값으로 분기(계절) 평활지수 기법의 최소 표본수는 9개가 되며 월별 평활지수 기법의 최소 표본수는 17개다. 본 연구의 분석기법은 계절성을 고려하지 않기 때문에 m=0이고 Holt의 선형지수 평활법과 지수추세법에서 추정해야 할 계수는 평활계수, 추세평활계수, 평활초깃값, 추세초깃값으로 최소 표본수는 4개이다. 추세조정방법 및 승법은 추세감소계수를 포함하므로 5개가 된다. 하지만 모든 자료는 무작위성을 내포하고 있으므로 최소 표본수보다 많은 표본수를 확보할 것을 강조하였다(Hyndman and Kostenko 2007). 이외, Kalekar(2004)은 계절평활지수 기법의 최소 표본수는 두 번의 계절 변동값을 갖는 8개를 제안하였다. Markridakis는 미시, 거시, 산업, 금융, 인구 통계 등과 관련한 연간, 분기별, 월별 시계열 자료를 합한 3,003개 자료를 선정하여 예측전문가를 대상으로 여러 예측기법의 정확성을 비교하기 위한 경쟁대회를 주관하였다. 이 중 645개의 연간 시계열 자료는 최소 표본수를 14개로 결정하여 자료를 선정하였고 표본수 중간값은 19개였다(지원철 1995; Markridakis 2000). 이처럼 예측분석기법에 이용되는 표본수는 통계적으로 수용되는 표본수 30개 이하에서 예측분석이 이루어지고 있으며 본 연구의 시계열 자료는 뚜렷한 추세를 가지고 있다. 즉, 실제값과 예측값의 차이인 오차가 크지 않을 것으로 예상되며 최소 표본수 기준을 넘으므로 본 연구 모형 및 자료는 활용가치가 있다고 판단된다.

지수평활모형은 요소형태(component form), 오차수정형태(error correction form), 상태공간형태(state space form)로 나타낼 수 있다. 이 중 일반적으로 연구모형을 소개할 때 요소형태 모형으로 나타낸다.

Holt의 선형지수 평활법 요소형태는 다음과 같다.

- (1) $\hat{Y}_{t+h|t} = L_t + hT_t$
- (2) $L_t = \alpha Y_t + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1})$
- (3) $T_t = \beta^*(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta^*)T_{t-1}$

여기서 식 (1)은 예측식, 식 (2)는 평활식, 식 (3)은 추세식을 나타낸다. 식 (1)의 $\hat{Y}_{t+h|t}$ 는 t 시점에서 t+h 시점에 대한 예측값을 의미하며, L_t 는 t 시점의 평활값, Y_t 는 t 시점의 실측값, α 는 평활계수, T_t 는 t 시점의 추세평활값, β^* 는 추세평활계수를 의미한다.

식 (2)와 (3)을 오차수정 형태로 나타내기 위하여 잔차(residual)인 $e_t = Y_t - (L_{t-1} + T_{t-1}) = Y_t - \hat{Y}_{t|t-1}$ 를 식 (2)에 대입하면 식 (4)와 같은 평활식을 도출할 수 있으며 도출된 식 (4)를 식 (3)에 대입하면 식 (5)와 같은 추세식을 도출할 수 있다.

- (4) $L_t = L_{t-1} + T_{t-1} + \alpha e_t$
- (5) $T_t = T_{t-1} + \alpha\beta^* e_t$

오차수정모형과 유사한 공간상태 형태의 평활식과 추세식을 다음과 같이 나타낸다.

- (6) $L_t = L_{t-1} + T_{t-1} + \alpha e_t$
- (7) $T_t = T_{t-1} + \beta e_t$

이 세 모형 형태 간에는 $\beta = \alpha\beta^*$ 관계가 성립하는 것을 알 수 있으며 어떤 형태로 분석하든지 같은 예측값을 얻을 수 있다. 여기서 α 와 β 는 0과 1 사이의 값을 가지게 된다. 본 연구의 예측분석에 활용한 통계 프로그램 R(R core team 2014)은 공간상태형태에서 추정된 예측값을 제공하고 있어 다른 예측기법은 공간상태 형태로 나타내고자 한다.

지수추세법은 Holt의 선형지수법과 달리 예측식을 선형관계로 나타내는 것이 아니라 지수로 나타내고 있으며 평활식도 가법(addition)이 아닌 승법(multiplication)으로 나타낸다.

- (8) $\hat{Y}_{t+h|t} = L_t T_t^h$
- (9) $L_t = L_{t-1} T_{t-1} + \alpha e_t$

$$(10) \quad T_t = T_{t-1} + \beta \frac{e_t}{L_{t-1}}$$

여기서 $e_t = Y_t - (L_{t-1}T_{t-1}) = Y_t - \hat{Y}_{t|t-1}$ 가 된다.

추세조정가법과 추세조정승법은 선형을 가정하는 추세가 예측값을 과대추정할 수 있는 단점을 보완할 수 있으며 장기적 시간 변화에 따라 추세감소(damped)를 고려하기 위해 추세감소계수(damped parameter)를 포함하고 있다(Hyndman and Athanasopoulos 2013). 추세조정가법은 다음과 같다.

$$(11) \quad \hat{Y}_{t+h|t} = L_t + (\emptyset + \emptyset^2 + \dots + \emptyset^h)T_t$$

$$(12) \quad L_t = L_{t-1} + \emptyset T_{t-1} + \alpha e_t$$

$$(13) \quad T_t = \emptyset T_{t-1} + \beta e_t$$

여기서 $e_t = Y_t - (L_{t-1} + \emptyset T_{t-1}) = Y_t - \hat{Y}_{t|t-1}$ 가 성립하며, 추세감소계수인 \emptyset 은 0과 1 사이에 값을 가진다. 만약 $\emptyset=1$ 이면 Holt의 선형지수법과 같게 된다.

추세조정승법은 추세감소계수가 지수추세법의 지수와 대체된 모형과 동일하다는 특징을 가지고 있다.

$$(14) \quad \hat{Y}_{t+h|t} = L_t T_t^{(\emptyset + \emptyset^2 + \dots + \emptyset^h)}$$

$$(15) \quad L_t = L_{t-1} T_{t-1}^{\emptyset} + \alpha e_t$$

$$(16) \quad T_t = T_{t-1}^{\emptyset} + \beta \frac{e_t}{L_{t-1}}$$

여기서 $e_t = Y_t - (L_{t-1} T_{t-1}^{\emptyset}) = Y_t - \hat{Y}_{t|t-1}$ 가 성립하며, 추세조정가법의 추세감소계수와 마찬가지로 \emptyset 은 0과 1 사이에 값을 가진다. 만약 $\emptyset=1$ 이면 지수추세법과 같게 된다.

평활지수법의 평활계수(α), 추세평활계수(β), 추세감소계수(\emptyset), 초깃값 L_0 와 T_0 는 OLS 추정방식과 같은 오차제곱의 합(sum of squares error)을 최소화하는 값으로 추정되지만 OLS와 달리 적합선(fitted line)은 비선형(non-linear)이 될 수 있다(Hyndman and Athanasopoulos 2013).

EPIC 모형의 신뢰성을 갖기 위한 모형 보정과 검증 후에 생성된 모의값은 그 자체로 EPIC 모형 결과로 인정받지만 모의값을 이용한 계량경제 및 통계기법 적용은 구체적이고 정형화된 결과를 얻을 수 있도록 도움을 준다. 최종산(2011)은 2060년까지 과거

10년(2001~2010년)간의 평균기온을 반영하는 기온평균 시나리오와 2060년까지 평균 최대온도와 최저온도가 각각 약 2.5°C 상승하는 기온상승 시나리오를 설정하고 이에 반응하는 쌀 생산량을 모의실험하였다. 두 기온 시나리오에 반응한 50년간의 쌀 생산량 모의값은 생산량을 종속변수로 하고 시간변수를 독립변수로 하는 추세분석을 위한 자료로 활용되었다. 본 연구에서 추세분석을 한 이유는 추세를 반영한 추세분석 기법과의 미래예측 적합도를 비교하기 위함이다.

50년 EPIC 모의값을 이용한 추세분석 모형은 다음과 같다.

$$(17) \quad Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 D_i T + u_{it} \quad i = 1, 2; t = 1, \dots, 50$$

여기서 Y_{it} 는 종속변수로서 EPIC 모형의 쌀 생산량 모의값이며 i 는 두 기후시나리오인 평균기온 시나리오와 기온상승 시나리오이다. t 는 2011년부터 2060년까지 50년간의 모의기간을 나타내며 T 는 추세를, D_i 는 더미변수(평균기온 시나리오인 경우에는 1, 기온상승 시나리오인 경우에는 0)를 나타내며, u_{it} 는 교란항 또는 오차항을 나타낸다.

분석모형은 평균기후 시나리오와 기온상승 시나리오로 구성된 2개의 횡단면자료를 가지고 있고 각 횡단면 자료는 50년의 시계열 자료를 가지고 있어 각 객체의 자료를 포괄하는 기간이 같으며 그 안의 시차가 없는 균형패널자료에 적합한 SAS의 TSCSREG(Time Series Cross Section Regression) 프로시저를 이용했다. 패널자료는 횡단면 자료에서 나타날 수 있는 이분산(heteroscedasticity)의 문제, 시계열 자료의 자기상관(autocorrelation)과 동시적 상관관계(contemporaneously correlated)의 문제점이 동시에 발생할 가능성을 내포하고 있다. 자료 간의 동시 발생적 상관관계에 의한 1차 자기상관오차구조를 가정하는 Parks 모형으로 추정하였다(SAS Institute Inc. 1999). Parks 모형의 오차항은 $u_{it} = \rho u_{it-1} + \epsilon_{it}$ 구조를 가져 전년도 오차항이 금년도 오차항에 영향을 미치는 영향을 ρ 값을 통해 나타내고 있어 전년도의 쌀 생산량을 별도의 독립변수에 포함하지 않고서도 그 변화를 파악할 수 있다.

3.3. 적합도 평가기준

EPIC 모형 모의값과 추세분석 기법 예측값의 적합도는 실제 관측값에 대한 예측오차에 의해 결정이 된다. 즉, 예측오차가 작을수록 적합도는 높아진다. 추세를 분석하기 위해 이용한 R은 오차평균(ME), 루트오차제곱평균(RMSE), 절대오차평균(MAE), 오차평균백분율(MPE), 절대오차평균백분율(MAPE)을 적합도 평가기준으로 제공하고 있다.

이 중 MAPE는 모형 간 예측오차의 비교가 쉽고, 오차제곱방식보다 이상치(outlier)에 대해 민감하게 반응하지 않아 전체 추세를 보다 유용하게 파악할 수 있다. 또한, 신뢰도가 높은 기준으로 평가받고 있어 많은 연구자에 의해 이용되고 있는 것으로 보고되고 있다(송근석과 이충기 2009). 본 연구에서 이용된 MAPE를 구하는 공식은 다음과 같다.

$$(18) \text{ MAPE} = N^{-1} \sum_{t=1}^T \left(\frac{|Y_t - \hat{Y}_{t|t-1}|}{|Y_t|} \right) \times 100$$

여기서 N 은 실제 관측값의 기간을 의미하며 Y_t 는 t 시점의 실제 관측값, $\hat{Y}_{t|t-1}$ 는 $t-1$ 시점에서 t 시점의 예측값을 나타낸다. MAPE 값이 10% 이하인 경우에는 매우 정확한 예측으로 평가되고 있다.

4. 분석 결과

본 연구에서 추정된 추세분석 기법이 적절한지를 판단하기 위해 각 모형의 잔차항에 대한 백색잡음(white noise) 여부를 검정해야 한다. 대표적인 검정방법으로 Box-Pierce와 Ljung-Box Q 통계량 검정이 있다. 본 연구의 시계열 표본수가 적기 때문에 소표본 검정에 더 정확한 통계량을 제공하는 Ljung-Box Q 통계량 검정을 사용하였다. 검정 결과는 <표 2>와 같으며 각 모형의 유의확률은 유의수준 5%보다 높게 나타나 잔차항은 백색잡음 또는 독립성이라 귀무가설을 기각할 수 없다. 그러므로 기간별로 잔차항은 자기상관성(autocorrelation)이 존재하지 않아 본 연구의 추세분석 기법들은 적합한 것으로 판단된다.

표 2. 추세분석 기법의 Ljung-Box Q 통계량 검정 결과

추세분석 기법	통계량	자유도	유의확률
Holt의 선형지수 평활법	7.159	9	0.621
지수추세법	8.289	9	0.505
추세조정가법	7.167	9	0.620
추세조정승법	6.943	9	0.643

<표 3>은 최소자승법에 의해 추정된 추세분석 기법의 평활계수(α), 추세평활계수(β), 추세감소계수(ϕ), 초깃값 L_0 와 T_0 를 보여주고 있다. 또한 <표 1>의 첫 10년의 쌀 생산량에 대한 EPIC 모형과 추세분석 기법의 적합도를 나타내는 MAPE 값을 제시

하였으며 이 값을 이용하여 모형 간의 과거자료에 대한 적합도를 비교할 수 있다.

추세분석 기법의 과거자료 적합도를 보면 모든 모형에서 10% 이하 값을 갖기 때문에 매우 정확하게 캄보디아 쌀 생산량 과거자료에 대해 추정하고 있는 것으로 나타났다. EPIC 모형의 적합도는 추세분석 기법보다 조금 떨어지지만 10% 이하 값을 가져 매우 정확하게 과거자료에 대해 추정하고 있다. <표 3>에서 과거자료 적합도를 나타내는 MAPE 값이 매우 낮아 과거자료에 대해 매우 정확히 반영하고 있듯이, <그림 1>을 통해 EPIC 모형과 추세분석 기법의 추정값은 2001년에서 2010년까지 실제 쌀 생산량의 추세를 정확하게 반영하고 있는 것을 알 수 있다.

그림 1. EPIC 모형과 추세분석 기법의 과거생산량(2001~2010)에 대한 추정 결과

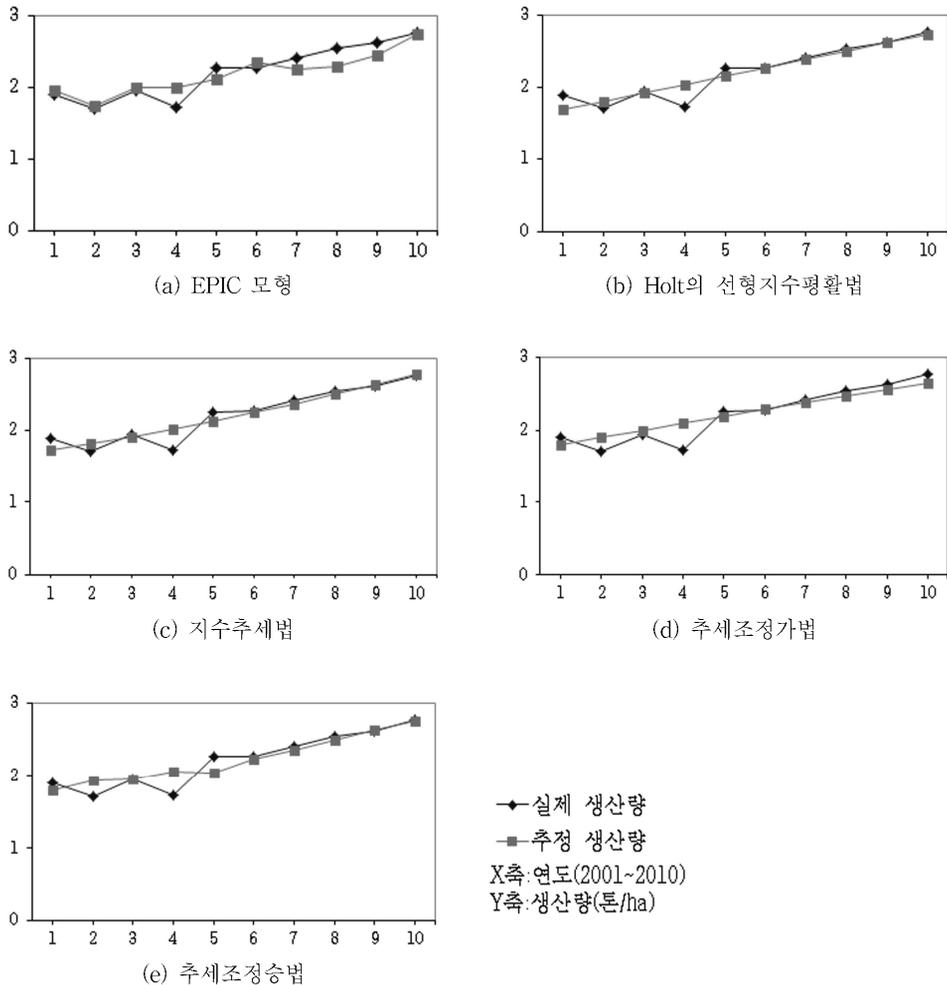


표 3. 추세분석 기법의 계수 및 초깃값과 과거자료 적합도 결과

계수 및 초깃값	EPIC 모형	Holt의 평활법	지수추세법	추세조정가법	추세조정승법
α	-	0.0003	0.0003	0.0001	0.3549
β	-	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
\emptyset	-	-	-	0.9788	0.9778
L_0	-	1.5778	1.6357	1.6930	1.6926
T_0	-	0.1159	1.0544	1.1070	1.0596
MAPE (%)	5.704	4.378	4.528	5.449	5.405

추세분석기법과 EPIC 모형은 과거자료를 추정하는 방법에 있어서 차이점이 존재한다. 앞서 설명하였듯이 추세분석 기법은 최근 관측값에 더 많은 가중치를 부여하는 방법으로 과거 관측값을 지수가중평균하여 미래를 예측하는 반면에, EPIC 모형은 작물 생산량과 관련 있는 매개변수들의 실제 관측값 입력 또는 수정 후 모의실험을 통해 추정하게 된다. 토양 층(layer)별 정확한 정보, 작물재배부터 수확까지의 정확한 열 단위(heat unit), 작물재식밀도(plant population density), 작물스트레스(plant stress), 엽면적지수(leaf area index), 수확지수(harvest index)가 대표적인 매개변수들이다(Williams 2006). EPIC 모형은 추세분석 예측방법과 확연한 차이가 있음에도 불구하고 과거자료 적합도가 매우 우수한 것으로 나타나고 있다. EPIC 모형의 위와 같은 과정은 모형의 신뢰성을 얻기 위한 것이며 이 과정이 끝나면 연구자는 연구목적에 맞게 작물환경 및 기후변화, 경영기법 변화 등에 반응하는 미래 작물생산량에 대한 모의실험이 가능해진다. 최종산(2011)은 모형평가를 통해 과거자료에 대한 신뢰성을 확보한 후 기후 시나리오별로 2011~2060년간 쌀 생산량 모의실험을 하였다. 본 연구는 모의실험을 통해 생성된 미래의 쌀 생산량 모의값을 이용하여 식 (17)을 이용하여 추세분석을 하였는데 그 결과는 <표 4>와 같다. 추세분석의 2011~2013년 결과값은 동 기간의 실제 생산량에 대한 미래예측 적합도를 평가하는 데 사용되었다.

표 4. EPIC 모형의 추세분석 결과

변수	추정값	표준오차
상수항	2.673	0.123*
추세	0.049	0.004*
더미×추세	0.034	0.002*
R^2	0.805	

*p < 0.001

추정된 모형의 설명력을 나타내는 결정계수(R^2)는 0.805로 높게 나타났으며 독립변수의 유의수준은 1% 이내로 유의한 것으로 나타나 추세분석 모형 추정은 잘 이루어졌다고 판단된다.

2011~2013년 동안의 EPIC 모형 모의값, 추세분석 기법에 의한 예측값을 동 기간의 실제 생산량과 비교하여 미래예측 적합도를 평가한 결과는 <표 5>와 같다.

표 5. EPIC과 추세분석 기법의 미래 생산량 예측 및 적합도 결과

단위: 톤/ha

예측 연도	실제 생산량	EPIC 모형				추세분석 기법			
		A	B	C	D	E	F	G	H
2011	2.92	2.76	2.66	2.76	2.72	2.85	3.28	2.73	2.88
2012	2.88	3.05	2.96	2.84	2.77	2.97	3.47	2.81	3.02
2013	2.93	2.71	2.63	2.92	2.82	3.08	3.65	2.89	3.15
MAPE (%)	-	6.160	7.341	2.458	4.766	3.543	19.173	3.341	4.525

- 주) A: 기온평균 시나리오에 반응한 EPIC 모형실험의 모의값
- B: 기온상승 시나리오에 반응한 EPIC 모형실험의 모의값
- C: 기온평균 시나리오에 반응한 EPIC 모의값의 추세분석 결과
- D: 기온상승 시나리오에 반응한 EPIC 모의값의 추세분석 결과
- E: Holt의 선형지수평활법에 의한 미래 예측값
- F: 지수평활법에 의한 미래 예측값
- G: 추세조정가법에 의한 미래 예측값
- H: 추세조정승법에 의한 미래 예측값

추세분석 기법의 지수평활법을 제외하고는 모든 모형에서 3년간의 실제 생산량에 대하여 매우 정확한 예측을 하고 있으며 EPIC 모형에서는 원래 모의값보다 이 모의값을 이용한 추세분석 결과가 좀 더 정확한 예측을 하고 있다. 모형 중에서 기온평균 시나리오에 반응한 모의값의 추세분석 결과가 가장 정확한 예측을 하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 <표 5>의 EPIC 모형 C와 D의 추세분석 결과를 확장하여 기후변화 시나리오에 반응하는 쌀 생산량의 변화를 10년 간격으로 분석한 결과는 <표 6>과 같다.

표 6. 기후시나리오별 쌀 생산량 변화와 차이

연도	시나리오별 쌀 생산량 변화		단위: 톤/ha
	기온평균(C)	기온상승(D)	두 시나리오의 생산량 차이(C-D)
2011	2.76	2.72	0.03
2020	3.50	3.17	0.34
2030	4.33	3.66	0.67
2040	5.16	4.15	1.01
2050	5.99	4.64	1.34
2060	6.82	5.14	1.68

<표 6>의 기온평균 시나리오에서 2020년 쌀 생산량은 3.5톤/ha이 될 것으로 분석되며, 2060년에는 2020년보다 약 두 배 정도 증가한 6.82톤/ha이 될 것으로 예상된다. 기온상승 시나리오의 쌀 생산량은 평균기온 시나리오보다 낮은 것으로 나타났다. 두 시나리오의 쌀 생산량 차이는 시간이 흐를수록 그 격차가 커져 2040년에는 1톤/ha에 이를 것으로 보이며 2060년에는 1.68톤/ha이 될 것으로 예상된다. 이러한 결과는 안정된 쌀 생산량 확보를 위해 기후변화로 인한 기온상승을 억제할 수 있는 선제적 대응 및 농업정책의 필요성을 제공해주고 있다.

5. 요약 및 결론

EPIC 모형을 비롯한 작물모의모형은 식물학자 또는 농학자들에 의해 주로 활용되어 농업경제학자의 모형 활용에 대한 관심도가 다를 수 있다. 하지만 농업 관련 연구에 경제, 농학, 수문학, 환경, 토양 등 다양한 분야의 전문가와 협력하는 다학제(multidiscipline) 간 연구의 중요성이 커짐에 따라, 농업경제학자의 작물모의모형에 대한 이해 및 활용은 다른 학문과의 원활한 의사소통과 학문적 교류를 위해 중요하다. 모의실험은 현실이나 현장에서 수행하기 힘든 실험을 컴퓨터를 이용하여 대신 구현한다. 특히, 자연현상을 기반으로 하는 농업의 특수성으로 인해 농업현장에서 일어나는 모든 현상에 대하여 연구자가 모니터링을 하고 관련 자료를 수집하는 데 한계가 있다. 이런 한계성을 극복하기 위하여 연구자들은 작물모의실험을 통해 자료를 수집한다. 작물모의실험은 현장실험보다 훨씬 단축된 시간 안에 적은 비용으로 현장실험과 유사한 결과를 도출할 수 있는 장점이 있다.

EPIC 모형 개발 당시 Erosion Productivity Impact Calculator로 명명된 것에서 알 수 있듯이 초기에는 토지 생산성, 침식, 토양 양분 등 토양 및 토지 연구에 많이 활용되었다. 그 후 Environmental Policy Integrated Climate로 재명명하여 기상변동요인, 관개수리 적용량, 그 외 경영관리기법 및 농업의 변화에 반응하는 단위면적당 수확량 예측연구에 활용되고 있다. 선행연구에서도 EPIC 모형은 관개용수 적용, 경운방법, 농업관리체계, 윤작과 같은 전반적인 농업활동에 반응하는 작물 생산량 예측 모의실험에 유용한 도구로 활용되고 있다. 또한 기후 온난화로 인한 탄소 배출을 최소화하는 방법으로 토양탄소 분리에 관한 연구와 GIS 같은, 다른 프로그램과의 결합을 통한 연구도 수행된다. 최근 들어 기후변화에 관한 연구가 주요 이슈로 등장하고 있어 기후변화에 반응하는 작물의 생산량 변화에 관한 연구는 다수 있을 거라 예상하였지만 아직은 활발하게 진행되지 못하고 있다. 미래 기상요인 변동을 반영하는 기후변화 시나리오의 일일 기후 자료를 생성하기 위한 기후모형설계의 복잡성이 기후변화에 따른 작물생산량 예측에 관한 연구를 어렵게 하는 원인일 것으로 생각된다. 이러한 연구의 제한점은 EPIC 모형과 자료 호환이 가능한 기후시뮬레이터인 WXP3020과 WXGEN을 이용하여 기상변동을 반영한 기후시나리오를 만들어 극복할 수 있다. 캄보디아 기온 시나리오에 따른 쌀 생산량 모의실험은 두 기상시뮬레이터가 생성한 일일기후자료를 활용하였다.

현존하는 모든 모형이 현실을 정확히 반영할 수 없듯이 EPIC 모형도 실제 농업환경을 정확히 반영할 수 없어 EPIC 모형의 현실성과 예측 결과에 대한 신뢰성에 의문을 제기한다. 실험통계가 가용한 지역에서 실험 결과값을 이용하여 모형의 파라미터 수정 및 변환을 통해 해당 지역의 작물환경을 정확히 반영하는 현실적인 모의실험이 될 수 있다. EPIC 모형 개발자인 Williams(1990)은 농가에서 국가단위까지 적용할 수 있다고 했으나 국가단위에서 모형의 매개변수 값을 구하는 것은 현실적으로 불가능하다. 그 대신 파라미터의 초깃값(default)이 주어져 해당 매개변수에 대한 실험 결과값이 없을 때 이 초깃값을 이용할 수 있다. 하지만 서론에서 언급하였듯이 토양, 기후, 생산관리, 지형에 관한 자료는 기본적이면서 필수적이다. EPIC 모형의 예측 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 모형 보정과 검정을 위한 모의실험 결과값인 모의값과 실제 관측값 간의 오차측정으로 모형평가가 수행된다. 평가 결과를 수용할 수 있다면, 즉 신뢰성이 확보되었다면 연구목적에 맞는 최종 모의실험을 하게 된다. 모형평가에서 수용할 수 없는 오차가 발생하게 되면 예측오차 조정을 위해 모형 보정단계로 돌아가 정확한 과거자료 및 실험통계자료를 반영하여 관련 매개변수 수정 및 모의값 생성 후 모형평가를 다시 수행한다. 이러한 과정의 반복은 모형 예측 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위한 것으로 모든 작물모의모형을 이용한 연구에서 필수적으로 수행되어야 할 과정이

다. 그러나 경제분석 선행연구에서 경제모형을 구성하는 작물생산함수 또는 환경함수를 추정하기 위한 관련 변수를 EPIC 모형을 통해 수집하더라도, 최종 모의실험 전에 반드시 수행되어야 하는 모형의 보정과 검증과정이 생략되거나 설명이 부족한 것을 발견할 수 있었다. 또한, EPIC 모형 연구의 활용에 대해 미국 농업환경에서 실험통계 결과에 의존하는 EPIC 모형에 우리나라의 농업 및 기상요인을 반영한 예측결과를 두고 신뢰문제에 의문이 제기될 수 있다. 미국은 사막부터 흑한기후까지 포함하는 나라로 같은 미국 내에서도 기후, 토양, 생산관리 일정, 작물생육환경 관련 요인들이 다른 다양한 지역에서 EPIC 모형이 활용되고 있을 뿐만 아니라, 선행연구를 통해 다양한 국가에서 수행되고 있음을 확인할 수 있었다. 연구지역의 농업환경을 정확히 반영하는 자료 확보가 선행된다면 어느 지역이든 적용할 수 있다. 우리나라에서는 임철희 외(2015)가 EPIC 모형의 유효성 평가를 통해 국내 적용 가능성을 확인하였고 기후변화에 반응하는 생산량 변화뿐만 아니라 다양한 예측분야에 활용될 수 있을 것으로 판단하였다.

EPIC 모형의 예측 적합도를 평가하기 위해서 추세를 반영하는 추세분석 기법과 비교하였다. 과거자료 적합도에서 두 모형은 MAPE 적합도 기준의 10% 이내로 매우 정확한 예측을 하였지만, EPIC 모형의 예측 적합도는 추세분석 기법 적합도보다 다소 떨어진 결과를 보여주었다. 미래예측 적합도에서도 지수평활법을 제외한 두 모형은 MAPE 적합도 기준의 10% 이내로 매우 정확한 예측 적합도를 보여주었다. 특히 기온 평균 시나리오에 반응한 EPIC 모형의 추세분석 결과값(<표 5>의 C 참고)은 가장 높은 적합도를 가진 것으로 나타났다. 본 연구에서 EPIC 모형은 추세분석 기법만큼 높은 예측 적합도를 보여주었다. 추세분석 기법은 추세를 반영하는 작물 생산량 예측값을 제공하지만, EPIC 모형은 다양한 작물 생육환경 변수에 반응하는 작물 생산량을 예측할 수 있을 뿐만 아니라 시간 변화에 따라 생육환경 변수의 변화도 예측할 수 있다. 농업경제학자는 생육환경 변수를 독립변수로 하고 생산량을 종속변수로 하는 생산함수 추정과 같은 계량분석을 통해 작물 생산량에 대한 생육환경 요인의 영향 및 두 변수 간의 인과관계를 분석할 수 있어 EPIC 모형의 활용도는 더 높아질 것으로 기대된다.

현재 EPIC 모형은 DOS 버전에서 WINDOW 기반의 모형까지 다양하다. 최근 연구 흐름은 GIS와 같은 다른 프로그램과 연결되어 사용되기 때문에 GIS를 운용할 수 있는 능력을 갖추는 것도 중요할 것으로 보인다. EPIC 모형은 농작물 생산모형뿐만 아니라 토양, 수질, 작물생태환경과 관련된 요소에 대해서도 모의실험이 가능하므로 농업환경과 작물생태시스템 및 순환과정에 대한 높은 이해력이 요구된다. EPIC 모형 안에서 다양한 농학·환경용어가 존재하기 때문에 용어에 대한 이해력 또한 요구된다. 앞으로 다른 프로그램과의 호환성이 우수하고 진화된 새로운 EPIC 모형의 등장으로 실제 농업

현장을 현실성 있게 구현하는 능력과 모형 결과의 정확성이 강화될 것으로 예상됨에 따라 기존 생산체계의 변화에 따른 생산량 예측분야, 지구 온난화 방지의 대안으로 제시되고 있는 토양 탄소분리, 기후변화로 인한 생산량 예측분야 연구에 활용될 수 있을 것이다. 농업경제학자가 EPIC 모형과 같은 작물모의모형의 운용능력을 갖춘다는 것은 수량적 자료의 존재 여부에 따라 연구 가능성이 결정되는 한계에서 벗어나 농업과 관련된 다양한 연구주체에 쉽게 접근할 수 있을 것이다. 그에 따라 EPIC 모형의 결과에 대한 경제적 분석을 통해 농업정책시행 전에 미리 평가할 수 있으며 의사결정에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- 농림축산식품부 보도자료. 2013. 6. 28. “농산물 수급불안에 선제적 대응을 위해 농업관측 시스템 개편.”
- 임철희, 이우균, 송용호, 엄기철. 2015. “미래 작물생산량 추정을 위한 EPIC 모형의 국내 적용과 평가.” 「한국기후변화학회지」 제6권 제1호. pp. 21-31.
- 송근석, 이충기. 2009. “결합기법을 이용한 관광수요예측.” 「관광·레저연구」 제21권 제1호. pp. 183-202.
- 지원철. 1995. “신경망을 이용한 시계열 분석: MI-Competition Data 에 대한 예측성과 분석.” 「한국전문가시스템학회지」 창간호. pp. 135-148.
- 최종산. 2011. “EPIC 시뮬레이션을 이용한 캄보디아 쌀 생산량 예측.” 「전략지역심층연구 논문집 II: 동남아시아 1」. 대외경제정책연구원.
- 한석호, 이병훈, 박미성, 승준호, 양현석, 신성철. 2011. 「기상요인을 고려한 단수예측모형 개발 연구」. 한국농촌경제연구원.
- Abrahamson, D., Causarano, H., Williams, J., Norfleet, M., and Franzluebbbers, A. 2009. “Predicting Soil Organic Carbon Sequestration in the Southeastern United States with EPIC and the Soil Conditioning Index.” *Journal of Soil and Water Conservation*. vol. 64, no. 2, pp. 134-144.
- Abrahamson, D., Norfleet, M., Causarano, H., Williams, J., Shaw, J., and Franzluebbbers, A. 2007. “Effectiveness of the Soil Conditioning Index as a Carbon Management Tool in the Southeastern USA based on Comparison with EPIC.” *Journal of Soil and Water Conservation*. vol. 62, no. 2, pp. 94-102.
- Adejuwon, J. O. 2005. “Assessing the Suitability of the EPIC Crop Model for Use in the Study of Impacts of Climate Variability and Climate Change in West Africa.” *Singapore Journal of Tropical Geography*. vol. 26, no. 1, pp. 44-60.
- Apezteguía, H. P., Izaurralde, R. C., and Sereno, R. 2009. “Simulation Study of Soil Organic Matter Dynamics as Affected by Land Use and Agricultural Practices in Semiarid Córdoba, Argentina.” *Soil and Tillage Research*. vol. 102, no. 1, pp. 101-108.
- Baker, S. E., and Edwards, R. 2012. “How Many Qualitative Interviews is Enough?” Discussion Paper, National Center of Research Methods. Available at <http://eprints.ncrm.ac.uk/2273/4/how_many_interviews.pdf>.
- Barros, I., Williams, J. R., and Gaiser, T. 2005. “Modeling Soil Nutrient Limitations to Crop Production in Semiarid NE of Brazil with a Modified EPIC Version: II: Field Test of the Model.” *Ecological Modelling*. vol. 181, no. 4, pp. 567-580.
- Bartlett, J. E., Kotrlik, J. W., and Higgins, C. C. 2001. “Organizational Research: Determining Appropriate Sample Size in Survey Research.” *Information Technology, Learning, and Performance Journal*. vol. 19, no. 1, pp. 43-50.

- Billen, N., Röder, C., Gaiser, T., and Stahr, K. 2009. "Carbon Sequestration in Soils of SW-Germany as Affected by Agricultural Management: Calibration of the EPIC Model for Regional Simulations." *Ecological Modelling*. vol. 220, no. 1, pp. 71-80.
- Bishop, C. D., Curtis, K. R., and Kim, M. K. 2010. "Conserving Water in Arid Regions: Exploring the Economic Feasibility of Alternative Crops." *Agricultural Systems*. vol. 103, no. 8, pp. 535-542.
- Cambodia MAFF Annual Report. 2014. "Annual Report for Agriculture Forestry and Fisheries 2010-2013." Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Phnompenh, Cambodia.
- Causarano, H. J., Doraiswamy, P. C., McCarty, G. W., Hatfield, J. L., Milak, S., and Stern, A. J. 2008. "EPIC Modeling of Soil Organic Carbon Sequestration in Croplands of Iowa." *Journal of Environmental Quality*. vol. 37, no. 4, pp. 1345-1353.
- Causarano, H. J., Shaw, J. N., Franzluebbbers, A. J., Reeves, D. W., Raper, R. L., Balkcom, K. S., Norfleet, M. L., and Izaurralde, R. C. 2007. "Simulating Field-scale Soil Organic Carbon Dynamics using EPIC." *Soil Science Society of America Journal*. vol. 71, no. 4, pp. 1174-1185.
- Chavas, D. R., Izaurralde, R. C., Thomson, A. M., and Gao, X. 2009. "Long-term Climate Change Impacts on Agricultural Productivity in Eastern China." *Agricultural and Forest Meteorology*. vol. 149, no. 6, pp. 1118-1128.
- Doraiswamy, P., McCarty, G., Hunt, E., Yost, R., Doumbia, M., and Franzluebbbers, A. 2007. "Modeling Soil Carbon Sequestration in Agricultural Lands of Mali." *Agricultural Systems*. vol. 94, no. 1, pp. 63-74.
- Farina, R., Seddaiu, G., Orsini, R., Steglich, E., Roggero, P. P., and Francaviglia, R. 2011. "Soil Carbon Dynamics and Crop Productivity as Influenced by Climate Change in a Rainfed Cereal System under Contrasting Tillage using EPIC." *Soil and Tillage Research*. vol. 112, no. 1, pp. 36-46.
- Gaiser, T., de Barros, I., Sereke, F., and Lange, F. M. 2010. "Validation and Reliability of the EPIC Model to Simulate Maize Production in Small-holder Farming Systems in Tropical Sub-humid West Africa and Semi-arid Brazil." *Agriculture, Ecosystems and Environment*. vol. 135, no. 4, pp. 318-327.
- Gaiser, T., Judex, M., Igué, A. M., Paeth, H., and Hiepe, C. 2011. "Future Productivity of Fallow Systems in Sub-Saharan Africa: Is the Effect of Demographic Pressure and Fallow Reduction more Significant than Climate Change?" *Agricultural and Forest Meteorology*. vol. 151, no. 8, pp. 1120-1130.
- Gaiser, T., Stahr, K., Billen, N., and Mohammad, M. A. R. 2008. "Modeling Carbon Sequestration under Zero Tillage at the Regional Scale. I. The Effect of Soil Erosion." *Ecological Modelling*. vol. 218, no. 1, pp. 110-120.
- Gassman, P. W., Williams, J. R., Benson, V. W., Izaurralde, R. C., Hauck, L. M., Jones, C. A.,

- Atwood, J. D., Kiriir, J. R., and Flowers, J. D. 2004. "Historical Development and Applications of the EPIC and APEX Models." Ames: Center for Agricultural and Rural Development. Iowa State University, Iowa, the US.
- Guerra, L., Hoogenboom, G., Hook, J., Thomas, D., Boken, V., and Harrison, K. 2005. "Evaluation of On-farm Irrigation Applications using the Simulation Model EPIC." *Irrigation Science*. vol. 23, no. 4, pp. 171-181.
- He, X., Izaurralde, R., Vanotti, M., Williams, J., and Thomson, A. 2006. "Simulating Long-term and Residual Effects of Nitrogen Fertilization on Corn Yields, Soil Carbon Sequestration, and Soil Nitrogen Dynamics." *Journal of Environmental Quality*. vol. 35, no. 4, pp. 1608-1619.
- Hyndman, R. J., and Athanasopoulos, G. 2013. "Forecasting: Principles and Practice." a free on-line textbook. Available at <<https://www.otexts.org/fpp>>.
- Hyndman, R. J., & Kostenko, A. V. 2007. "Minimum Sample Size Requirements for Seasonal Forecasting Models." *Foresight*. vol. 6, no. Spring, pp. 12-15.
- Izaurralde, R., Williams, J. R., McGill, W. B., Rosenberg, N. J., and Jakas, M. 2006. "Simulating Soil C Dynamics with EPIC: Model Description and Testing against Long-term Data." *Ecological Modelling*. vol. 192, no. 3, pp. 362-384.
- Izaurralde, R., Williams, J. R., Post, W. M., Thomson, A. M., McGill, W. B., Owens, L., et al. 2007. "Long-term Modeling of Soil C Erosion and Sequestration at the Small Watershed Scale." *Climatic Change*. vol. 80, no. 1, pp. 73-90.
- Kalekar, P. S. 2004. "Time Series Forecasting using Holt-Winters Exponential Smoothing." Kanwal Rekhi School of Information Technology. pp. 1-13.
- Ko, J., and Piccinni, G. 2008. "Simulation for Irrigation Management of Corn in South Texas." *Korean Journal of Crop Science*. vol. 53, no. 2, pp. 161-170.
- Ko, J., Piccinni, G., and Steglich, E. 2009. "Using EPIC Model to Manage Irrigated Cotton and Maize." *Agricultural Water Management*. vol. 96, no. 9, pp. 1323-1331.
- Liu, J. 2009. "A GIS-based Tool for Modelling Large-scale Crop-water Relations." *Environmental Modelling and Software*. vol. 24, no. 3, pp. 411-422.
- Liu, J., Fritz, S., Van Wesenbeeck, C., Fuchs, M., You, L., Obersteiner, M., and Yang, H. 2008. "A Spatially Explicit Assessment of Current and Future Hotspots of Hunger in Sub-Saharan Africa in the Context of Global Change." *Global and Planetary Change*. vol. 64, no. 3, pp. 222-235.
- Liu, J., Wiberg, D., Zehnder, A. J. B., and Yang, H. 2007. "Modeling the Role of Irrigation in Winter Wheat Yield, Crop Water Productivity, and Production in China." *Irrigation Science*. vol. 26, no. 1, pp. 21-33.
- Liu, J., Williams, J. R., Wang, X., and Yang, H. 2009. "Using MODAWEC to Generate Daily Weather Data for the EPIC Model." *Environmental Modelling and Software*. vol. 24, no. 5, pp. 655-664.

- Liu, J., Williams, J. R., Zehnder, A. J. B., and Yang, H. 2007. "GEPIC—modelling Wheat Yield and Crop Water Productivity with High Resolution on a Global Scale." *Agricultural Systems*. vol. 94, no. 2, pp. 478-493.
- Liu, J., and Yang, H. 2010. "Spatially Explicit Assessment of Global Consumptive Water Uses in Cropland: Green and Blue Water." *Journal of Hydrology*. vol. 384, no. 3, pp. 187-197.
- Makridakis, S., & Hibon, M. 2000. "The M3-Competition: Results, Conclusions and Implications." *International Journal of Forecasting*. vol. 16, no. 4, pp. 451-476.
- Martínez, Y., and Albiac, J. 2006. "Nitrate Pollution Control under Soil Heterogeneity." *Land Use Policy*. vol. 23, no. 4, pp. 521-532.
- Paudel, K. P., Lohr, L., and Cabrera, M. 2006. "Residue Management Systems and their Implications for Production Efficiency." *Renewable Agriculture and Food Systems*. vol. 21, no. 2, pp. 124-133.
- Prato, T., Zeyuan, Q., Pederson, G., Fagre, D., Bengtson, L. E., and Williams, J. R. 2010. "Potential Economic Benefits of Adapting Agricultural Production Systems to Future Climate Change." *Environmental Management*. vol. 45, no. 3, pp. 577-589.
- R Core Team. 2014. "R: A Language and Environment for Statistical Computing." R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available at <<http://www.R-project.org/>>.
- Sands, R. D., and Edmonds, J. A. 2005. "Climate Change Impacts for the Conterminous USA: An Integrated Assessment Part7. Economic Analysis of Field Crops and Land Use with Climate Change." *Climatic Change*. vol. 69, no. 1, pp. 127-150.
- SAS Institute Inc. 1999. "SAS/ETS User's Guide, Version 8." SAS.
- Srivastava, A. K., and Gaiser, T. 2010. "Simulating Biomass Accumulation and Yield of Yam (*Dioscorea Alata*) in the Upper Ouémé Basin (Benin Republic)-I. Compilation of Physiological Parameters and Calibration at the Field Scale." *Field Crops Research*. vol. 116, no. 1, pp. 23-29.
- Thomson, A. M., Izaurralde, R. C., Rosenberg, N. J., and He, X. 2006. "Climate Change Impacts on Agriculture and Soil Carbon Sequestration Potential in the Huang-Hai Plain of China." *Agriculture, Ecosystems and Environment*. vol. 114, no. 2, pp. 195-209.
- Torbert, H. A., Gerik, T. J., Harman, W. L., Williams, J. R., and Magre, M. 2008. "EPIC Evaluation of the Impact of Poultry Litter Application Timing on Nutrient Losses." *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. vol. 39, no. 19, pp. 3002-3031.
- Vadas, P. A., Krogstad, T., and Sharpley, A. N. 2006. "Modeling Phosphorus Transfer between Labile and Nonlabile Soil Pools." *Soil Science Society of America Journal*. vol. 70, no. 3, pp. 736-743.
- van der Velde, M., Wriedt, G., and Bouraoui, F. 2010. "Estimating Irrigation Use and Effects on Maize Yield during the 2003 Heatwave in France." *Agriculture, Ecosystems and Environment*. vol. 135, no. 1, pp. 90-97.

- Wang, X., Harmel, R., Williams, J., and Harman, W. 2006. "Evaluation of EPIC for Assessing Crop Yield, Runoff, Sediment and Nutrient Losses from Watersheds with Poultry Litter Fertilization." *Transactions of the ASAE*. vol. 49, no. 1, pp. 47-59.
- Williams, J. R. 1990. "The Erosion Productivity Impact Calculator(EPIC) Model: A Case History." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*. vol. 329, no. 1255, pp. 421-428.
- Williams, J. R., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Gassman, P. W., and Green, C. 2008. "History of Model Development at Temple, Texas." *Hydrological Sciences Journal*. vol. 53, no. 5, pp. 948-960.
- Williams, J. R., Wang, E., Meinardus, A., Harman, W. L., Siemers, M., and Atwood, J. D. 2006. "EPIC Users Guide v. 0509." Blackland Research and Extension Center, Temple, Texas.
- Wriedt, G., Van der Velde, M., Aloe, A., and Bouraoui, F. 2009. "Estimating Irrigation Water Requirements in Europe." *Journal of Hydrology*. vol. 373, no. 3, pp. 527-544.

원고 접수일: 2015년 2월 25일

원고 심사일: 2015년 3월 4일

심사 완료일: 2015년 9월 16일