Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers
DOI : https://doi.org/10.5389/KSAE.2017.59.6.089

Vol. 59, No. 6, pp. 89~100, November 2017
ISSN 1738-3692 | eISSN 2093-7709

APEX 모델의 국내 적용을 위한 데이터베이스 구축 및 고랭지 밭에 대한 적용성 평가

Construction of Database for Application of APEX Model in Korea and Evaluation of Applicability to Highland Field

구자영* · 김종건* · 최순군** · 김민경** · 정재학*** · 임경재*,†

Koo, Ja-Young · Kim, Jonggun · Choi, Soon-Kun · Kim, Min-Kyeong · Jeong, Jaehak · Lim, Kyoung Jae

Abstract

The Agricultural Policy/Environmental eXtender (APEX) model was developed to extend EPIC's capabilities of simulating land management impacts for small-medium watershed and heterogeneous farms. APEX is a flexible and dynamic tool that is capable of simulating a wide array of management practices, cropping systems, and other land uses across a broad range of agricultural landscapes. APEX have its own agricultural environmental database including operation schedule, soil property, and weather data etc., by crops. However, agriculture environmental informations the APEX model has is all based on U.S. As this can cause malfunction or improper simulation while simulating highland field. In this study, database for APEX model to be utilized for South Korea established with 44,814 agriculture fields in Pyeongchang-gun, Korea from 2007 to 2016. And assessed domestic applicability by comparing T-P unit load criteria presented by National Institution of Environmental Research and result of APEX model. As a result of APEX model simulation, average T-P value for decade was 6.18. Average T-P of every year except 2011 was in range of 5.37~10.43 and this is being involved into criteria presented by National Institution of Environmental Research. It is analyzed that adjusting slope factor can make the model applicable for domestic agricultural environment.

Keywords: APEX model, Database, Field-scale model, Hydrologic modeling, Total phosphorus

Ⅰ. 서 론

최근 급격한 기온 상승 및 이상기상 출연 등 기후변화로 야기되는 집중 호우와 강우 패턴의 변화는 작물의 생육시기 및 생육 특성 등 농업환경 전반에 영향을 미치고 있다 (Lee et al., 2008). 특히 집중 호우는 농업지역에서 발생하는 비점오염에 의한 수질오염 기여도를 증가시킬 것으로 예상되며 이에 기후변화에 따른 비점오염원 관리의 필요성이 더욱 중요시되고 있다 (Kim et al., 2013). 환경부에서는 비점오염원을 저감하기 위해 비점오염원 관리지역 지정 및 탁수저감대책, 흙탕물저감사업, 비점오염원 처리시설 확충 등 다양한 관리대책 수립 및 저감사업을 진행하고 있다 (MOE, 2007; Choi, 2007). 또한 비점오염원의 관리 방안을 수립하기 위해 환경부에서는 2008년부터 환경기초조사사업을 통해 17 개 단일피복에 대해 수계별 대표 피복을 정하고, 이에 대한 7년간의 모니터링 결과에 근거하여 피복별 유량가중평균농도 (EMC, Event Mean Concentration) 및 비점오염원 원단위 값을 도출하여 유역모델 구축을 위한 기초자료를 제공하고 있다 (NIER, 2015). Ryu (2016)은 환경기초조사사업의 장기간 토지피복별 모니터링 결과를 통해 도출된 강우계급별 EMC 자료를 활용하여 국내 유역의 비점오염원 모의에 적합한 Long-term Hydrologic Impact Assessment Model with Asymptotic Curve Number Regression Equation and Water Quality (L-THIA ACN-WQ) 모형을 개발하였고, 국내 총량단위유역에 적용성이 매우 높은 것으로 나타났다. 하지만 L-THIA ACN-WQ 모형은 최적관리기법 적용 및 영농형태 변화에 따른 비점오염 발생 특성 등 아직까지 정책지원 및 비점오염 거동 특성 분석에 한계점을 지니고 있다.

국내에서 비점오염 거동 특성에 Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Srinivasan and Arnold, 1994), Hydrological Simulation Program—Fortran (HSPF) (Bicknell et al., 1997) 등 다양한 유역 모형들이 활용되고 있으며, 미국 농무성 (USDA, United States Department of Agriculture) 산하의 농업연구

* Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University
** Climate Change and Agroecology Division, National Institute of Agricultural Science
*** Texas A&M AgriLife Research, Texas A&M University
† **Corresponding author**
Tel.: +82-33-250-6468 Fax: +82-33-259-5560
E-mail: Kyoungjaelim@gmail.com
Received: October 19, 2017
Revised: October 24, 2017
Accepted: October 24, 2017

www.kci.go.kr

청 (ARS, Agricultural Research Service)과 자원보전연구청 (NRCS, Natural Resources Conservation Service), 텍사스 A&M 농업생명연구소 (Texas A&M AgriLife Research)에서는 보전 실행에 따른 환경 개선효과를 정량적으로 개선하기 위한 국가 프로젝트 CEAP (Conservation Effects Assessment Project)에서 농업비점오염 영향을 평가하고 보전효과를 분석하기 위해 APEX (Agricultural Policy/Environmental eXtender) (Williams and Izaurralde, 2005) 모델과 SWAT 모델을 이용하여 농업비점오염 영향을 평가하고 보전효과를 분석하고 있다 (Kim et al., 2013). APEX 모델은 USDA와 텍사스 A&M 농업생명연구소에서 개발한 모델로서 전 농장/소규모 유역 관리에 활용하기 위해 개발되었다. 이 모델은 바람과 물에 의한 침식, 지속가능성과 경제성, 관개와 수질, 토질, 작물 경합, 날씨와 해충 등의 요소를 고려한 다양한 토지 관리 전략을 평가하기 위해 구성되어 있다 (Williams et al., 2012). 토지 관리 기능은 관개, 배수, 제방, 완충대, 단구, 수로, 비료, 가축분뇨 관리, 저류지, 저수지, 윤작 및 작물 선택, 농약 살포, 방목 및 경운 등을 포함한다. APEX 모델은 이러한 농장 관리 기능 이외에도 지구 기후/CO_2 변화의 영향을 평가하는 등 다른 파생적인 응용 분야에 활용될 수 있다. 더욱이 APEX 모델은 유역 및 필지단위 모델로서 필지단위의 평가가 가능하다. 필지단위 평가 모델의 입력자료는 먼저 필지에서 이루어지는 영농행위, 농약 및 화학비료와 축산비료의 시비 등 각종 영양물질의 투여, 필지에서의 침투 및 이를 통한 영양물질의 얕은 지하수로의 이동 등을 고려하기 위한 토층별 토양 속성, 장기 기상자료, 그리고 다양한 영농방법에 대한 데이터베이스 등이 있다 (NIER, 2012).

그러나 APEX 모델은 경사가 완만한 미국 지형을 바탕으로 개발되어 국내를 대상으로 한 데이터베이스 부재의 한계를 지니고 있다. 이로 인해 APEX 모델과 관련된 국내 연구는 거의 전무한 실정이며, 미국을 기반으로 구축된 토양특성자료, 기상자료, 영농자료 등의 데이터베이스를 국내에 적용하기에는 불확실성이 발생하게 된다. 더욱이 모델의 결과를 검정하기 위한 모니터링 자료는 시간/공간적 제약과 인력, 경제적 문제로 인해 자료 확보에 어려움이 발생한다.

이에 본 연구의 목적은 필지단위의 모델인 APEX 모델의 국내 적용을 위한 데이터베이스를 구축하고, 지목별 유량가중 강우-유출수 농도를 고려한 원단위를 통해 APEX 모델의 적용성을 평가하는 데 있다. 이 때, 적용성 평가 대상지역은 비점오염원의 관리 필요성이 꾸준히 제기되고 있는 해발 600 m 이상의 고랭지 밭으로 선정하였다.

II. 재료 및 방법

1. APEX 모델

APEX 모델의 각 필지 구동 요소는 1980년대 초 침식이 생산성에 어떠한 영향력을 미치는지 평가하기 위해 개발된 EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) (Williams et al., 1984) 모델에서 유래되었다. CREAMS (Knisel, 1980) 및 SWRRB (Williams et al., 1987)의 다양한 요소들이 EPIC 모델을 개발하는데 사용되었고, 이 후에 GLEAMS (Leonard et al., 1987) 모델의 농약 관련 기능이 추가되었다 (Williams et al., 2012). 1985년 국가 RCA 적용 (Leonard et al., 1987) 이래로 EPIC 모델은 지속적인 확장과 개선을 거쳐 농업 경영에 있어 중요한 많은 과정을 모의할 수 있게 되었다 (Sharpley and Williams, 1980; Williams, 1995). EPIC 모델에서 중요한 구성요소는 날씨 모의 구동, 수문, 침식-퇴적, 양분 순환, 농약의 분해과정, 작물 생장, 토양 온도, 경작, 경제성 및 작물 환경 제어 등이며, 변경 가능한 관리 요소는 윤작, 경운 작업, 관개 일정 관리, 배수, 제방 작업, 토양 개량, 방목, 가지치기, 솎음 및 수확, 비료와 농약의 사용량 및 사용 시기 조절 등이 있다 (Williams et al., 2012).

APEX 모델은 EPIC 모델의 기능을 농장 전체 또는 소규모 유역으로 확장하기 위해 개발되었으며, EPIC 모델의 기능 이외에도 복잡한 지형 및 수로 시스템에서 유역 출구까지 여러 영역에 걸쳐 존재하는 물, 퇴적물, 양분 및 농약을 추적하는 기능을 포함하고 있다 (Fig. 1) (Williams et al., 2012). 이러한 추적 메커니즘을 통해 표면 유출, 환원수, 침전물 퇴적 및 분해, 양분 이동 및 지하수 흐름 간의 상호작용을 평가하여 각 유역 출구에서 질소 (암모니아태, 질산태 및 유기태)와 인 (용해성, 흡착/미네랄 및 유기성) 및 농약의 농도 등의 수질 예측이 가능하다 (Williams et al., 2012).

APEX 모델에서 유역을 생성하고 추적 메커니즘을 생성하기 위해서는 Fig. 2와 같이 배수 면적, 가장 먼 지점에서 유역 출구까지의 수로 길이 (CHL, Channel length), 하도구간의 수로 길이 (RCHL, Channel length of routing reach)를 이용한다. APEX 모델에서 유역은 여러 영역으로 세분화할 수 있는데, 세분화 과정은 각 영역이 토양 및 토지이용, 영농관리, 계절 측면에서 상대적으로 동질성을 가질 수 있도록 필요한 만큼 세분화되어 질 수 있다 (Williams et al., 2012).

APEX 모델의 구동은 사용자가 모의하고자 하는 필지/소유역별 배수 면적, CHL, RCHL 등의 지형 정보와 기상지점, 대상 필지/소유역별 토양통과 재배하는 작물의 입력을 필요로 한다. 위의 자료를 입력하게 되면 APEX 모델 내 자체적으로 보유하고 있는 데이터베이스와 매치하여 농업환경 (작물

www.kci.go.kr

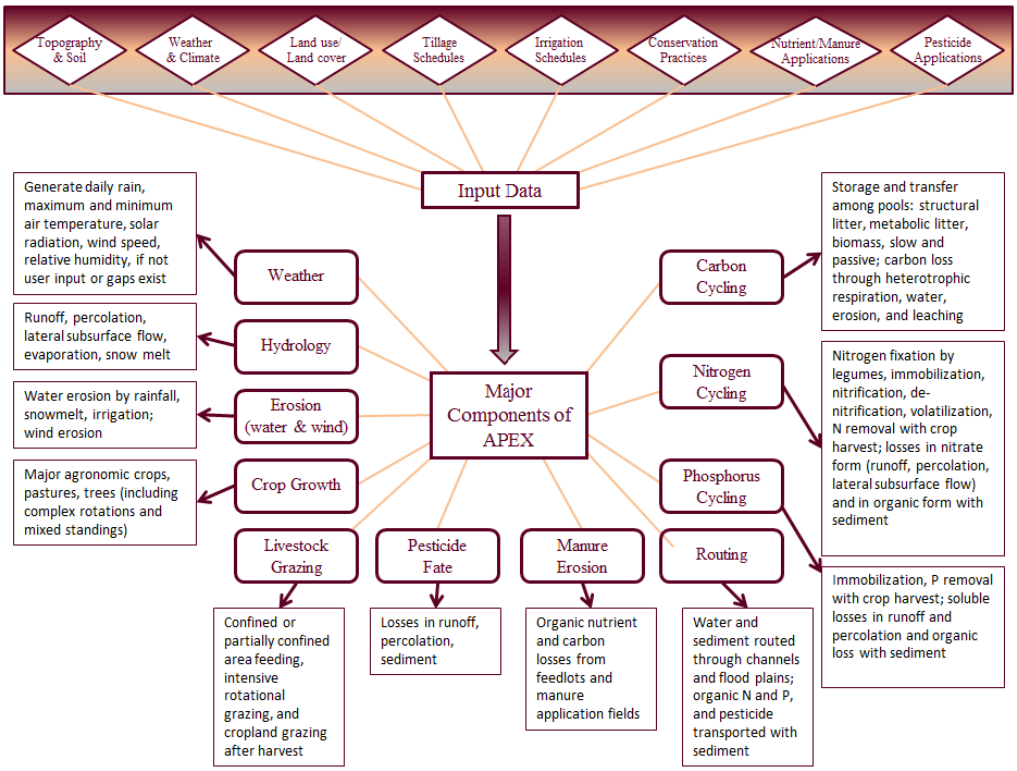

Fig. 1 Major components of APEX (Kim et al., 2014)

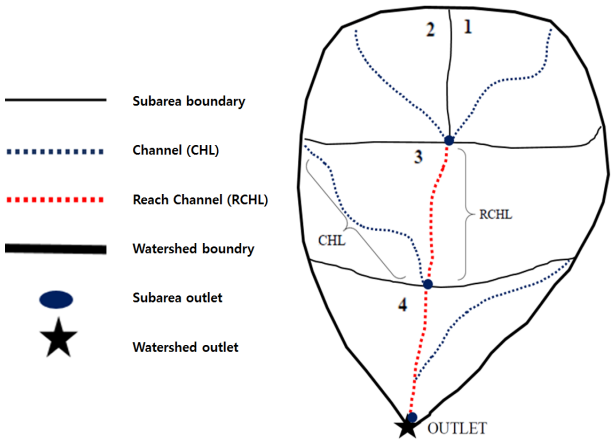

Fig. 2 Illustration of the routing mechanism within a watershed in APEX

수확량, 유출량, SS, T-N, T-P 등)을 모의하게 된다. 그러나 현재 APEX 모델의 자체 데이터베이스는 미국 자료를 기반으로 구축되어 있어, 국내를 대상으로 모의하기 위해서는 국내 실정에 맞는 데이터베이스 구축이 필요하다. 여기에 해당하는 데이터베이스는 각 토양통에 대한 토양특성자료, 재배 작물별 영농 자료, 기상지점의 날씨 통계 자료 등이 포함된다. APEX 모델의 구동 결과는 필지/소유역별 작물의 수확량(ton/ha), 유출량(mm), 퇴적물량(ton/ha), 퇴적물을 통해 이동된 N, P의 양(kg/ha), 수용성 N, P의 양(kg/ha), 가축분뇨 양(ton/ha), 퇴적물을 통해 이동된 탄소의 양(kg/ha) 등을 포함한다 (Williams et al., 2012).

2. 국내 적용 가능한 APEX 모델 입력자료 수집

APEX 모델을 구동하기 위한 입력자료는 필지/소유역별 지형자료, 기상자료, 토양 속성 자료, 작물별 영농 정보 등을 필요로 한다. 필지/소유역별 지형자료는 각 필지/소유역에 대한 면적, CHL, RCHL, 경사 등에 대한 정보를 의미하며, APEX 모델을 필지별로 구동하기 위해서는 농경지에 대한 경계 자료를 기반으로 각 농경지별 지형인자를 구축할 필요가 있다.

우리나라 농경지 경계 자료를 사용하기 위한 방안으로는 세 가지 방법이 있다. 1)농경지에 대한 정사영상을 활용하여 농경지에 대하여 디지타이징 하는 방법, 2)국토지리정보원(NGII, National Geographic Information Institute)에서 제공하는 1:5,000의 수치지형도에서 논, 밭, 과수원, 목초지 등에 대한 경지계/지류계 자료를 활용하여 농경지 경계를 추출하여 활용하는 방법, 3)농림수산식품교육문화정보원(EPIS, Korea Agency of Education, Promotion and Information Service in

www.kci.go.kr

Food, Forestry and Fisheries)에서 농경지에 대한 면적 및 속성 정보를 고해상도 위성과 항공영상을 이용하여 디지털 맵으로 제작한 스마트 팜 맵을 활용하는 방법이다.

첫 번째 방법인 정사영상을 활용하여 수동으로 디지타이징 하는 방법은 자료의 정확성 측면에서 뛰어난 장점이 있지만, 전국에 대하여 실행하는 것은 현실적으로 한계가 발생한다. 반면, 두 번째 방법인 수치지형도의 경우 항공사진을 벡터화하여 전국에 대한 농경지 경계 자료가 구축되어 있으나, 농경지내 묘지, 밭과 밭 경계에 대한 오류가 존재한다. 이에 본 연구에서는 EPIS에서 구축한 스마트 팜 맵을 농경지 경계 자료로 활용하였다 (EPIS, 2017). 스마트 팜 맵은 전문가로 구성된 검증단의 내업검수 및 현장검증을 실시하였으며, 내업검수를 통해 스마트 팜 맵 전체 폴리곤 중 계수조정형 샘플링 (KS-QISO 2891-1) 기준에 따른 폴리곤 샘플을 추출하고 이를 항공사진과 비교 분석하여 검증한 자료이다 (EPIS, 2015).

지형인자를 구축하기 위한 방법으로는 Park et al. (2007)이 제시한 Digital Elevation Model (DEM) 생성 방법에 따라 Koo et al. (2016)이 구축한 전국 5 m×5 m DEM 자료를 활용하였다. Koo et al. (2016)은 국토지리정보원에서 제공하는 축척 1:5,000의 수치지형도와 수치지도활용소프트웨어를 사용하여 등고선 자료를 추출하였고, 추출한 등고선 자료를 이용하여 Tin data를 생성, 이를 5 m×5 m DEM 자료로 변환하였다.

기상자료의 경우 기상청 자료를 활용하여 구축하였으며 (KMA, 2017), APEX 모델 사용자의 편의를 도모하기 위하여 사용자가 모의하고자 하는 기간의 기상자료를 실시간으로 구축 가능한 GUI (Graphical User Interface) 기반의 툴을 개발하였다. 이 GUI는 Open Source로 제공되는 PyQt를 기반으로 제작하였으며, 국가수자원관리종합정보시스템 (WAMIS, Water Resources Management Information System)에서 OPEN API 형태로 제공하는 기상청의 기상자료를 활용하였다. OPEN API는 공공기관이나 특정 기관에서 보유하고 있는 데이터베이스를 이용자가 접근하여 정보를 재활용할 수 있도록 제공하고 있는 개발자 인터페이스이다.

토양통의 경우 농촌진흥청 국립농업과학원 (NAS, National Institute of Agricultural Sciences)에서 제공하는 전국 1:25,000 수치정밀토양도를 활용하여 각 농경지를 대표하는 토양통을 산정하였다. 또한 각 토양통에 대한 토양특성자료는 농촌진흥청 토양환경정보시스템 "흙토람"에서 제공하는 자료를 활용하여 구축하였다 (NAS, 2017a).

APEX 모델을 구동하기 위한 작물별 영농 정보의 경우 APEX 모델 내에 데이터베이스를 보유하고 있으나 이 데이터베이스는 미국 자료를 기반으로 구축되어 있어 국내 실정에 맞는 영농관리에 대한 자료를 구축할 필요가 있다. 작물별 영농관리에는 작물의 파종, 수확시기, 경운 등의 영농일정과 시비량, 작물별 생육에 필요한 비료의 성분과 잠재 열단위 (PHU, Potential Heat Unit) 등이 있다. 작물별 영농관리 자료 구축에 필요한 자료들은 농촌진흥청의 "농사로"를 기반으로 구축하였으며 (NAS, 2017b), 농촌진흥청의 농업경영종합정보시스템 (http://amis.rda.go.kr), 농우바이오 (http://www.nongwoobio.co.kr), 네이버지식백과 (http://terms.naver.com) 등의 웹 검색을 통해 보완하였다.

APEX 모델 내 작물별 영농관리에 필요한 자료 중, PHU는 작물이 출현해서 생리적 성숙에 도달하기까지 걸리는 생장온도 일수 또는 열 단위 총수를 의미한다. APEX 모델의 구동 중, 첫 해에 이루어지는 모든 영농작업은 파종기에 입력된 PHU와 각 작업에 할당된 날짜에 기반한 열 단위 비율을 할당받게 되는데, 이는 연 단위로 날씨에 맞춰 영농작업 일정을 조정하는데 사용된다. 다시 말해서, PHU를 활용할 경우 온도에 따라 파종시기, 시비시기, 수확시기 등의 영농일정을 다르게 모의할 수 있음을 의미한다. 작물별 PHU를 산정하기 위한 공식은 식 (1)과 같다.

$$PHU = \sum_{i=1}^{n}((T_{\max} + T_{\min})/2 - T_b) \quad (1)$$

여기서, n은 작물의 생육일수, $T_{\max}$는 최고온도, $T_{\min}$는 최저온도, T_b는 작물별 기본온도인 5 ℃ 혹은 10 ℃를 의미한다. 일반적으로 기본온도는 작물에 따라 다르지만 가을채소와 같이 저온에서 자라는 작물은 5 ℃, 온대지방의 여름철 작물은 10 ℃, 고온을 필요로 하는 작물은 15 ℃로 설정한다. 본 연구에서는 농사로에서 제공하는 작물별 재배적온을 일평균온도로 적용하여 작물별 PHU를 산정하였다.

또한 작물 생육에 필요한 축산비료의 성분은 축종에 따라 다른 성분을 지니고 있어 농경지별 사용하는 축산비료의 종류 (우분, 돈분, 계분)를 결정해야 한다. 그러나 축산비료의 경우 농민에 의해 결정되며, 여러 종류의 축산비료를 혼합하여 사용하기도 하여 농경지별 축산비료의 성분을 입력하는 데 한계가 발생한다. 이에 본 연구에서는 Jung et al. (1996)이 추정한 사육 축종별 발생하는 가축분뇨 발생 비율인 우분 60.7 %, 돈분 32.0 %, 계분 7.3 %로 섞은 축산비료 자료를 생성하였으며, 이를 퇴비의 기본 성분으로 활용하였다.

3. APEX 적용성 평가

본 연구에서는 비점오염물질의 관리 필요성이 꾸준히 제기되고 있는 해발 600 m 이상의 고랭지 밭을 대상으로 APEX

www.kci.go.kr

모델의 국내 적합성을 평가하였다. 대상지역은 우리나라 고랭지 밭의 62 %를 보유하고 있는 강원도 지역 중 평균 고도가 753.68 m인 평창군으로 선정하였다 (Fig. 3). 평창군은 도암댐 상류지역에 위치한 지역으로 고랭지 밭에서 배출되는 비점오염물질의 유입으로 호소 내 부유물질이 수질환경기준 II 등급을 초과시키는 지역으로 비점오염원 관리가 매우 필요한 지역이다 (MOE, 2016).

평창군은 46,413 개의 밭을 포함하고 있으며, 통계청 자료에 따르면 2015년 평창군 재배작물은 주로 감자 29 %, 배추 22 %, 무 11 %, 양배추 7 %, 고추 7 % 등으로 구성되어 있다. 이 때, 각 농경지에 대한 대표 토양통을 산정함에 있어 "기타"로 분류되는 1,599 개의 밭은 제외하고 44,814개의 밭을 대상으로 하였다. 5 m×5 m DEM과 스마트 팜 맵을 활용하여 평창군 농경지에 대한 공간 정보를 구축한 결과 평창군 해발고도별 농경지 현황은 Table 1과 같이 산정되었다. 평창군의 해발고도별 농경지 분포를 보면 총 44,814 개의 농경지 중에서 43.28 %에 해당되는 19,395 개의 농경지가 준고랭지에 속하는 해발고도 400 m 이상 ~ 600 m 미만에 분포되어 있으며, 34.95 %에 해당되는 15,676 개의 농경지가 해발고도 600 m 이상의 고랭지에 분포되어 있었다. 또한 평창군의 농경지는 평균 16.86 %로 산정되었으나 해발고도가 높아짐에 따라 경사도는 31.19 %까지 산정되는 것으로 분석되었다.

APEX 모델의 입력변수는 Choi et al. (2016)이 APEX-PADDY 개발 당시 국내 환경을 모의하기 위해 사용하였던 변수를 사용하였다. 단, 밭 경사 등 지형인자와 관련된 변수는 본 연구에서 사용된 DEM을 활용하여 산정한 값을 적용하

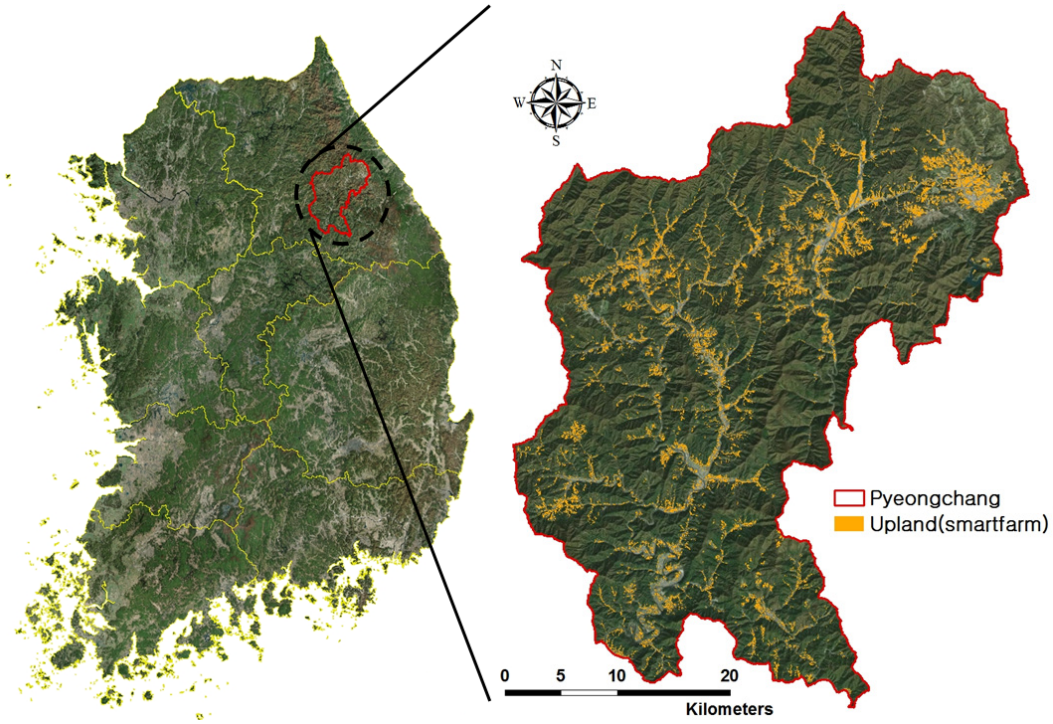

Fig. 3 Study area: Pyeongchang-gun

Table 1 Status of field by Pyeongchang-gun elevation

Elevation (*e*, meter)	Number of field			Mean slope (%)	
	Count	Percentage (%)	Accumulate		
$200 \leq e < 400$	9,743	21.74	9,743	13.68	16.86
$400 \leq e < 600$	19,395	43.28	29,138	15.53	
$600 \leq e < 800$	14,211	31.71	43,349	18.46	
$800 \leq e < 1,000$	1,387	3.10	44,736	20.35	
$1,000 \leq e$	78	0.17	44,814	31.19	

www.kci.go.kr

였다.

APEX 모델의 모의 결과를 검증하기 위한 방법으로는 원단위법을 활용하였다. 원단위법은 광범위 또는 미계측 지역에 대한 비점오염원 정량화를 위해 연간 오염물질량을 일평균으로 환산하여 사용하는 방법으로 '95년 수행한 연구용역사업에서 도출된 5 개 지목별 BOD, T-N, T-P 원단위를 수질오염총량제 및 물환경관리기본계획 등의 부하량 산정에 이용하고 있다 (NIER, 2010). 원단위는 비점오염부하량을 정량적으로 산정하기 위해 개발되었지만 유역 내 시·공간적 특성을 반영하기에는 한계가 있다.

하지만 원단위가 10여년 경과됨에 따른 생활환경, 토지이용 변화 등의 비점오염원 발생 및 유출 특성 변화를 고려하고자 BOD와 T-P에 대한 개선된 원단위가 도출되었다 (Table 2) (NIER, 2014). 개선된 원단위는 환경기초조사사업을 통해 23 개 중분류 토지피복 중 습지, 수역 등을 제외한 17 개 토지피복 (대분류)에 대해 123 개 지점에서 장기간 강우-유출 조사를 통해 도출되었다. 기존 원단위에 비해 개정된 원단위는 도심내 녹지면적 증가와 생활폐기물 발생량 감소에 따라 대지의 원단위가 감소하였으며, 논과 밭은 기존 대비 1.8~2.9 배 범위로 증가한 것이 특징이다.

그러나 APEX 모델 내에서 BOD에 대한 모의를 하지 않는 한계로 인해 APEX 모델 모의 결과의 적합 여부를 판단하는 항목에서 BOD를 제외하였다. 이에 따라 본 연구에서는 연강수량의 차이에서 발생하는 불확실성을 줄이고자 모의기간을 10년 (2007~2016년)으로 설정하여 1) 각 월별 10년 평균 T-P 값을 산정하여 APEX 모델의 모의 결과를 분석하였으며, 2) 각 연도마다 필지별로 계산된 평균 값을 개선된 T-P 원단위와 비교하여 APEX 모델의 적용성을 평가하였다.

Ⅲ. 결과 및 토의

1. 전국단위 APEX 모델 입력자료 구축

가. 전국 기상자료 구축

기상청에서는 종관기상관측소, 방재기상관측소, 농업기상관측소의 기상 관측 정보를 제공하고 있다. 종관기상관측소는 종관기상관측장비에 의해 기온, 습도, 풍향, 풍속, 기압, 강수량, 일조, 일사, 지면온도, 초상온도, 지중온도를 자동 관측하며, 방재기상관측소에서는 자동기상관측장비를 통해 기온, 바람, 강수 등을 자동 관측한다. 그리고 농업기상관측소에서는 농업기상관측장비를 통해 농업에 필요한 요소와 기상현상을 관측하고 있다. APEX 모델에서는 강수, 최저온도, 최고온도, 일사량, 상대습도, 풍속 등의 기상 자료가 필요하기 때문

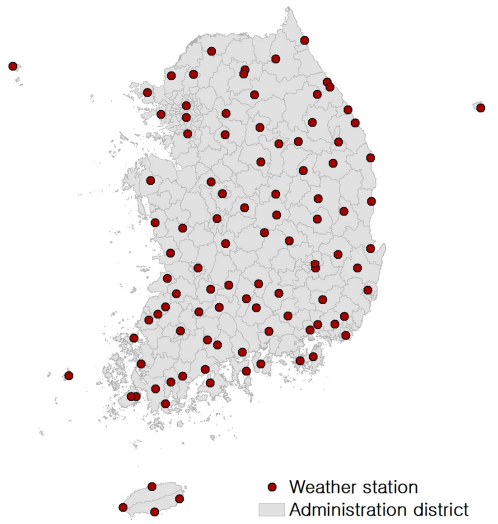

Fig. 4 Ninety nine weather gauge stations of the Korea Meteorological Administration

Table 2 BOD, T-P load rate revised by National Institute of Environmental Research in 2014 (kg/km^2/day)

Water quality parameter	Land cover		The level-1 land cover		The level-2 land cover	
	Level-1	Level-2	Mean	Range	Mean	Range
BOD	field	upland (highland)	4.24	1.44 ~ 11.96	4.38 (17.30)	0.82~49.81
		greenhouse			11.85	2.08~43.06
		orchard			2.69	0.43~2.91
		others			1.45	0.32~5.30
T-P	field	upland (highland)	1.435	0.080 ~ 11.319	1.400 (5.371)	0.321~10.896
		greenhouse			3.511	0.418~11.319
		orchard			0.630	0.239~1.733
		others			0.813	0.080~1.749

www.kci.go.kr

에 종관기상관측자료를 활용하여 전국 99개 지점에 대한 기상자료를 구축하였다 (Fig. 4; Fig. 5).

평창군을 대상으로 적용성 평가를 위해 사용한 기상관측지점은 10년 이상의 기상자료를 보유하고 있는 대관령과 영월의 기상관측소 자료를 활용하였다. 정선 기상관측소는 10년의 자료를 보유하고 있지 않아 입력자료에서 제외하였다. 대관령과 영월 기상관측소에 대한 연도별 연강수량은 Table 3과 같이 산정되었으며, 10년 평균 강수량은 대관령에서 1247.8 mm, 영월 1206.7 mm로 산정되었다. 이에 10년 평균 강수량보다 많은 강수가 발생한 연도는 2007년, 2010년, 2011년, 2012년

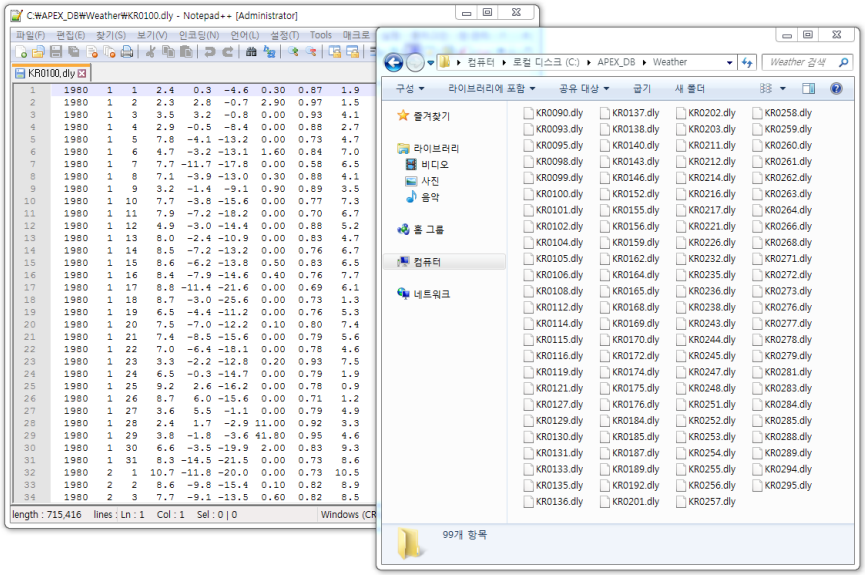

Fig. 5 Weather data from ninety nine weather gauge stations

Fig. 6 Flow chart of GUI for building real-time weather data

Table 3 Annual precipitation in Pyeongchang-gun

Weather station	Annual precipitation (mm)									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Daegwallyeong	1,223.3	1,128.6	1,331.7	1,217.3	1,762.1	1,288.7	1,052.3	1,308.2	981.9	1,184.0
Yeongwol	1,714.9	876.6	1027.0	1,341.2	1,975.9	1,398.8	1,240.0	876.5	676.0	940.4

www.kci.go.kr

으로 나타났다.

본 연구에서는 사용자의 편의를 도모하고자 실시간으로 기상자료의 구축이 가능한 GUI기반의 툴을 개발하였다(Fig. 6). 이 툴은 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 기상자료를 CSV 형식으로 저장하며, 이를 APEX 모델과 SWAT 모델에서 사용할 수 있는 DLY, TXT의 포맷으로 기상자료를 구축한다. 이 때, 기상청에서 관측되지 않은 날짜의 기상자료는 '9999'로 표기하며 사용자의 보정을 필요로 한다.

나. 전국 토양 속성 자료 구축

APEX 모델의 국내 토양특성자료는 Table 4의 토양특성을 대상으로 Choi et al. (2016)이 토양환경정보시스템 "흙토람"의 자료를 활용하여 377개 토양통에 대한 자료를 구축한 바 있다. 그러나 Choi et al. (2016)이 구축한 토양특성자료는 2000년대 초반의 흙토람 자료를 활용한 것으로, 흙토람에 새로 구축된 백령, 봉성, 청룡, 초정, 대평, 독도, 의귀, 강릉, 회수, 임자, 장호, 정방, 정읍, 수산, 태안, 우지, 유현에 대한 17개의 토양통과 332 개의 갱신된 토양특성자료가 적용되지 않았다. 이에 본 연구에서는 흙토람에서 제공하는 394 개의 토양통에 대한 토양특성자료를 구축하였다. 단, 제방통의 경우 흙토람에 명시는 되어 있으나 제공되는 토양특성자료가 없어 제외하였다. 또한, 45 개 토양통 (사동~압곡)에 대한 자료는 흙토람에 갱신되지 않아 농촌진흥청에서 구축한 토양특성자료를 적용하였다.

Table 4 Soil properties

Variable	Description
HSG	Hydrologic soil group
Z	Depth to bottom of layer (m)
BD	Moist bulk density (t/m^3)
UW	Soil water content at wilting point (m/m)
FC	Soil water content at field capacity (m/m)
SAN	Sand content
SIL	Silt content
PH	Soil pH
SMB	Sum of bases(Ca^{++}, K^{+}, etc.) (cmol/kg)
WOC	Organic carbon concentration (%)
CEC	Cation exchange capacity (cmol/kg)

다. 전국 작물별 영농 자료 구축

본 연구에서는 농사로를 기반으로 한 웹 검색을 통해 국내 농경지에서 재배하는 작물 중, 콩, 옥수수, 감자, 고구마, 팥,

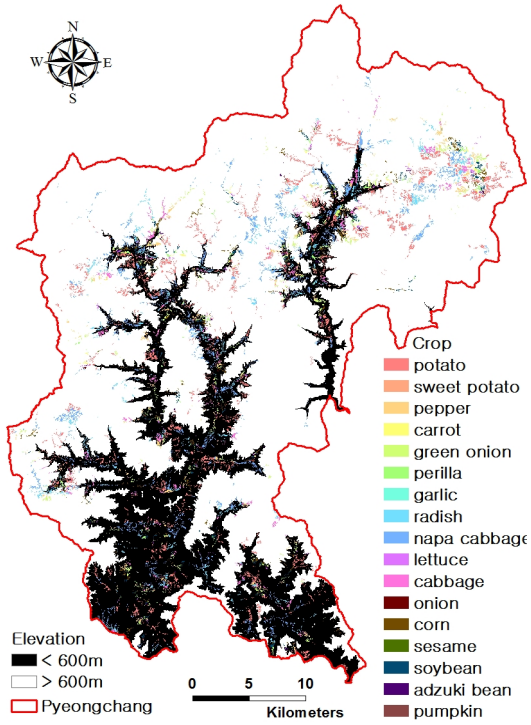

Fig. 7 Spatially distributed results in Pyeongchang-gun field depending on the cultivation area of each crop

Table 5 Number of fields determined according to cultivation area by crops

Crop	Number of fields	Crop	Number of fields
potato	13,049	carrot	792
napa cabbage	9,855	lettuce	616
radish	5,130	adzuki bean	440
cabbage	3,240	onion	176
pepper	3,060	pumpkin	132
green onion	2,736	sweet potato	88
corn	2,640	garlic	44
soybean	1,628	sesame	44
perilla	1,144	sum	44,814

www.kci.go.kr

배추, 무, 고추, 양파, 파, 마늘, 시금치, 상추, 호박, 양배추, 오이, 수박, 당근, 참깨, 들깨, 땅콩에 대한 영농 자료를 작형에 따라 구축하였다 (Table 5). 평창군에 적용한 작물 중, 감자, 당근, 무, 배추, 상추, 양배추, 양파는 고랭지에 대한 재배 일정을 적용하였으며, 대파와 오이의 경우는 봄철 재배가 이루어지는 영농일정을 적용하였다. APEX 모델 구동에 필요한 농경지별 재배 작물은 통계청의 작물별 재배면적 비율에 따라 Fig. 7과 같이 평창군 밭에 임의 배분하였다 (Table 6).

Table 6 Sowing time, harvest time, potential heat unit for 21 crops (NAS, 2017b)

Crop	Cropping type	Date		Potential heat unit
		Sowing	Harvest	
potato	spring	3/10	7/5	1,620
	summer	5/5	9/5	
	fall	7/30	11/15	
	winter	1/5	5/5	
	highland	4/15	10/1	
sweet potato		3/25	10/10	3,150
pepper		3/15	7/30	1,500
carrot		4/20	8/20	1,500
	highland	5/20	9/20	
green onion	spring	4/10	11/15	3,000
	fall	6/10	4/20	
perilla		5/25	9/15	2,600
peanut		6/15	10/15	2,880
garlic		10/15	7/15	3,250
radish	spring	3/30	6/20	1,800
	highland	6/1	9/10	
napa cabbage	spring	4/10	6/5	1,250
	fall	8/15	11/15	
	highland	5/1	8/15	
lettuce	summer	5/10	7/20	1,375
	fall	8/1	10/10	
	winter	10/25	2/20	
	highland	4/15	7/15	
water melon		4/25	7/20	1,000
spinach		3/15	4/15	750
cabbage	spring	3/10	7/20	1,012.5
	fall	7/15	10/30	
	highland	5/20	9/15	
onion		9/5	5/30	3,360
	highland	3/10	9/30	
cucumber	spring	4/20	7/20	1,125
	fall	11/1	3/5	
corn		4/25	9/20	1,950
sesame		6/5	9/15	2,700
soybean		5/10	10/5	2,450
adzuki bean		6/15	10/5	2,090
pumpkin		4/25	7/25	1,000

2. 개정 원단위를 활용한 APEX 모델 모의 결과 검증

가. 월별 10년 평균 T-P 산정 결과

본 연구에서 구축한 데이터베이스를 활용하여 각 월별 10년 평균 T-P값을 모의한 결과 Fig. 8과 같이 산정되었다. 4월의 경우, 평창군에서 재배하는 작물의 50 %이상을 차지하는 감자, 배추, 대파 등의 밑거름 시비로 인한 밭의 인 함유량 증가와 로터리 작업으로 인한 밭 토양 교란에 의하여 T-P가 높게 산정되었다. 7월부터 9월까지의 T-P가 높게 산정된 이유는 밭작물들의 추비의 영향과 밭 농사가 끝난 뒤 휴경지로 모의됨으로써 강우인자의 영향을 크게 받았기 때문으로 사료된다. 그러나 본 연구대상지역을 포함한 국내 고랭지 밭에서는 밭의 휴경기간 동안 호밀 혹은 헤어리베치 등의 녹비작물을 파종하여 비점오염 저감사업을 이루어지고 있다. 이에 따라 향후 APEX 모델을 국내 고랭지 밭에 적용하기 위해서는 휴경기간에 파종하는 녹비작물을 고려한 정확한 영농일정의 적용이 필요할 것으로 판단된다.

나. 연도별 평균 T-P 산정 결과

본 연구에서 구축한 데이터베이스를 이용하여 평창군 44,814개 밭을 대상으로 모의한 결과 Table 7, Fig. 9와 같이 10년 평균 T-P값은 6.18 kg/km^2/day로 산정되었다. 더욱이, 연강수량이 1,850 mm 이상으로 모의되었던 2011년을 제외한 모든 연도의 평균 T-P 모의값은 국립환경과학원에서 제시한 밭에 대한 T-P 원단위의 범위인 0.321~10.896 kg/km^2/day에 속하는 것으로 산정되었다. 그러나 각 연도별 산정된 T-P 값의 75

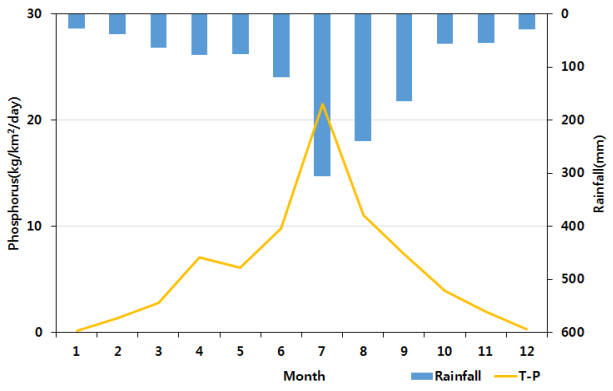

Fig. 8 Simulation result of monthly averaged T-P for 10 years

www.kci.go.kr

Table 7 Simulated result of T-P by year using APEX model

Simulated value	T-P (kg/km^2/day)										
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Mean 10 year
Precipitation (mm)	1497.8	1051.0	1237.8	1255.5	1861.8	1322.6	1109.6	1176.2	887.7	1109.0	1250.9
Mean	10.43	9.62	7.41	8.27	14.47	9.81	7.12	7.25	5.37	7.51	6.18
Maximum	206.28	86.44	85.08	71.84	165.32	110.09	49.01	42.35	43.11	43.56	122.50

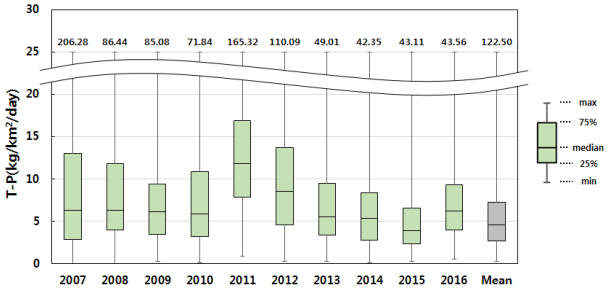

Fig. 9 Box plot graph of simulated result of T-P by year

%~최대값의 범위에서 T-P 원단위 범위와의 차이가 4 배에서 높게는 19 배까지 차이가 발생하는 것으로 나타났다 (Fig. 9). 이는 평창군의 해발고도가 높아짐에 따라 경사도가 증가하며, 특히 해발고도 1,000 m 이상의 밭에서는 평균경사 31.19 %까지 증가하는 것으로 미루어 볼 때, 기상인자와 경사인자의 복합작용에 의한 것으로 사료된다. 이에 따라 향후 APEX 모델을 국내 고랭지 밭을 대상으로 모의하기 위해서는 급경사지에 대한 경사인자 조정이 필요할 것으로 판단된다.

Ⅳ. 결 론

본 연구는 농업환경에 대하여 필지단위로 모의가 가능한 APEX 모델의 국내 적용을 위한 전국 데이터베이스를 구축하고, 비점오염원의 관리 필요성이 꾸준히 제기되고 있는 고랭지 밭을 대상으로 한 APEX 모델의 모의 결과를 비점오염원 원단위와 비교하여 APEX 모델의 국내 적용성을 평가하기 위해 수행되었다.

본 연구에서는 사용자의 편의를 도모하기 위해 실시간으로 기상자료의 구축이 가능한 GUI를 개발하였으며, 국내를 대상으로 APEX를 모의할 수 있도록 전국 99 개 기상관측지점에 대한 기상자료, 394 개 토양통에 대한 토양특성자료와 국내에서 주로 재배하는 21개 작물에 대한 작형별 영농활동에 대한 데이터베이스를 구축하였다.

APEX 모델의 국내 적용성을 평가하기 위해 평균 고도 753.68 m, 평균 밭 경사 16.86 %인 강원도 평창군의 44,814 개의 밭을 대상으로 T-P를 모의하였다. 그 결과 10년 평균 강수량 이상의 강수가 내린 2011년을 제외한 연도의 연평균 T-P 값은 원단위 범위에 포함되는 수치로 산정되어 APEX 모델의 국내 고랭지 밭을 대상으로 한 모의가 가능한 것으로 판단되었다.

그러나 각 연도별 산정된 T-P의 최대값은 원단위 범위에서 4 배에서 19 배까지 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 평창군의 해발고도가 1,000 m 이상인 밭에서는 평균경사 31.19 %까지 증가하며, 밭 농사가 끝난 뒤 농경지가 휴경지로 모의됨으로서 강우인자의 영향을 크게 받았기 때문으로 사료된다. 따라서 APEX 모델을 국내 고랭지 밭에 적용하기 위해서는 실제 농민들이 밭의 휴경기간 동안 호밀 혹은 헤어리베치 등의 녹비작물을 파종하듯이, 휴경기간 동안 파종하는 녹비작물의 영농자료를 추가 구축하고, 경사인자에 대한 변수 조정이 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 APEX 모델의 국내 적용을 위한 데이터베이스를 구축하였으며, APEX 모델이 국내 필지/소유역 단위의 모델로서 활용될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 미국의 경우 APEX 모델의 결과를 SWAT 모델과 연결하여 농경지 규모부터 대유역에 대한 분석을 수행하고, 이를 미국의 국가 정책자료로 활용하고 있다. 이처럼 본 연구의 결과는 국내 비점오염원 관리지역 혹은 최적관리기법 적용에 따른 필지/유역 단위의 저감 효과를 분석하고 국가 정책자료를 도출하기 위한 기초자료로 활용 될 것으로 기대된다.

그러나 본 연구에서는 APEX 모델 결과를 검정함에 있어 시간/공간적 제약과 인력, 경제적인 문제로 인한 모니터링 자료 확보의 문제로 실측값과의 검증을 실행하지 못한 한계가 발생하였다. 이에 따라, 향후 필지별 실측자료 확보 후 APEX 모델 모의 결과에 대한 정확한 검증을 수행할 계획이다. 또한 본 연구에서 구축한 국내 데이터베이스와 농경지에 대한 지형자료를 활용하여 농민들이 직접 자신의 밭에서 재배하는 작물과 시비량을 입력할 경우 밭에 대한 농업환경을 모의하여 토양과 양분의 유출, 더 나아가 작물의 생산량까지 산정할 수 있도록 APEX 모델을 웹 기반으로 연계할 예정이다.

www.kci.go.kr

사 사

본 연구는 농촌진흥청 농업과학기술 연구개발사업 (과제번호: PJ0125492017)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Bicknell, B. R., J. C. Imhoff, J. L. Kittle, A. S. Donigian, and R. C. Johanson, 1997. Hydrological Simulation Program-FORTRAN, User's Manual for Release 11. EPA 600/R-97/080. Athens, GA: United States Environmental Protection Agency.
2. Choi, S. C., M. K. Kim, K. H. So, and T. I. Jang, 2016. Application of APEX-PADDY Model Considering Rice Cultivation Environment, *Rural resource* 58(2): 23-27 (in Korean).
3. Choi, J. Y., 2007. Study on the Establishment of Designation Criteria for Nonpoint Pollution Source Management Area, Ministry of Environment (in Korean).
4. Korea Agency of Education, Promotion and Information Service in Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, Http://www.epis.or.kr. Accessed 22 August 2017.
5. Korea Agency of Education, Promotion and Information Service in Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, 2015. Smart Farm Map Construction Plan, Sejong: Korea Agency of Education, Promotion and Information Service in Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (in Korean).
6. Kim, M. K., S. K. Choi, G. B. Jung, M. H. Kim, S. C. Hong, K. H. So, and J. H. Jeong, 2014. APEX (Agricultural Policy/Environmental eXtender) Model – An Emerging Tool for Agricultural Environmental Analyses, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 47(3): 187-190 (in Korean).
7. Kim, M. K., S. I. Kwon, G. B. Jung, S. C. Hong, M. J. Choi, S. G. Yun, and K. H. So, 2013. Small-Scale Pond Effects on Reducing Pollutants Load from a Paddy Field, *Korean Journal of Environmental Agriculture* 32(4): 355-358 (in Korean).
8. Knisel, W. G., 1980. CREAMS, A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems, U.S. Department of Agriculture. Conservation Research Report 26.
9. Koo, J. Y., D. S. Yoon, D. J. Lee, J. H. Han, Y. H. Jung, J. E. Yang, and K. J. Lim, 2016. Effect of DEM Resolution in USLE LS Factor, *Journal of Korean Society on Water Environment* 32(1): 89-97 (in Korean).
10. Korea Environment and Resources Corporation, 1996. Study on Compost-related Legislation and Product Standardization. (in Korean)
11. Korea Meteorological Administration, Http://www.kma.go.kr. Accessed 6 September 2017.
12. Lee, S. H., I. H. Heo, K. M. Lee, S. Y. Kim, Y. S. Lee, and W. T. Kwon, 2008. Impacts of Climate Change on Phenology and Growth of Crops: In the Case of Naju, *Journal of the Korean Geographical Society* 43(1): 20-35 (in Korean).
13. Leonard, R. A., W. G. Knisel, and D. A. Still, 1987. GLEAMS: Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems, *Transations of the ASAE* 30(5): 1403-1418.
14. Ministry of Environment, 2007. Management Measures of Nonpoint Source Pollutants in the Watershed of Lake Soyang, Ministry of Environment (in Korean).
15. Ministry of Environment, 2016. Monitoring and Evaluation of NPS Pollution Priority Management Region of Lake Doam (VIII), Wonju, Kangwon: Ministry of Environment (in Korean).
16. National Institute of Agricultural Sciences, Http://soil.rda.go.kr. Accessed 1 October 2017a.
17. National Institute of Agricultural Sciences, Http://www.nongsaro.go.kr. Accessed 30 August 2017b.
18. National Institute of Environmental Research, 2010. Study on Application Method of Watershed Management Model for Total Water Polution Load Control –Revision of Technical Guidelines for Total Pollution Control-, Incheon: National Institute of Environmental Research (in Korean).
19. National Institute of Environmental Research, 2012. Development of a Reduction Effect Model for BMP Application, Incheon: National Institute of Environmental Research (in Korean).
20. National Institute of Environmental Research, 2014. Improvement of Unit Cost of Nonpoint Source, Incheon: National Institute of Environmental Research (in Korean).
21. National Institute of Environmental Research, 2015. A Monitoring and Management Scheme for the Non-Point Sources (III), National Institute of Environmental Reseach (in Korean).
22. Park, C. S., S. K. Lee, and Y. C. Suh, 2007. Development of an Automatic Generation Methodology for Digital Map, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 10(3): 113-122 (in Korean).
23. Putman, J., J. Williams, and D. Sawyer, 1988. Using the Erosion Productivity Calculator (EPIC) Model to Estimate the Impact of Soil Erosion for the 1985 RCA Appraisal, *Journal of Soil and Water Conservation* 43(4): 321-326.
24. Ryu, J. C., 2016. Development and Evaluation of ArcGIS-based watershed-scale Long-term Hydrologic Impact Assessment (L-THIA) ACN-WQ system. Ph.D. diss., Kangwon, Ind.:Kangwon University.
25. Srinivasan, R. and J. G. Arnold, 1994. Integration of a Basin-scale Water Quality Model with GIS, *Journal of the American Water Resources Association* 30(3): 453-462.
26. Statistics Korea, Http://kosis.kr.

www.kci.go.kr

27. Steglich, E. M. and J. W. Williams, 2013. *Agricultural policy/ Environmental eXtender Model User's Manual*, AgriLife Research Texas A&M System, Temple, Texas.
28. Sharpley, A. N. and J. R. Williams, 1990. EPIC--Erosion/ Productivity Impact Calculator: 1.Model Documentation, United States Depart of Agriculture. Technical Bulletin 1768.
29. Williams, J. R., 1995. The EPIC Model. pp 909-1000 In V.P. Singh, Computer models of watershed hydrology, Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO.]
30. Williams, J. R. and R. C. Izaurralde, 2005. The APEX Model. In:Watershed Models, V. P. Singh and D. K. Frevert editors, Chapter 18: 437-482. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL.
31. Williams, J. R., R. C. Izaurralde, and E. M. Steglich, 2012. *Agricultural Policy/Environmental eXtender Model Theoretical Documentation*, Agrilife Research Texas A&M System. Temple, Texas.
32. Williams, J. R, C. A. Jones, and P. T. Dyke, 1984. A Modeling Approach to Determining the Relationship between Erosion and Soil Productivity, *Transactions of the ASAE* 27: 129-144.
33. Williams, J. R., A. D. Nicks, and J. G. Arnold, 1985. SWRRB, A Simulator for Water Resources in Rural Basins, *Journal of Hydraulic Engineering* 111(6): 970-986.

www.kci.go.kr