



## 농업 비점오염원 평가를 위한 SWAT-APEX 모델의 적용성 검토

### The Applicability of SWAT-APEX Model for Agricultural Nonpoint Source Pollution Assessment

정충길\* · 박종윤\* · 이지완\* · 정 혁\* · 김성준\*\*†

Jung, Chung Gil · Park, Jong Yoon · Lee, Ji Wan · Jung, Hyuk · Kim, Seong Joon

#### ABSTRACT

This study is to check the applicability of SWAT-APEX (Soil and Water Assessment Tool-Agricultural Policy / Environmental eXtender) model as combined watershed and field models by applying the APEX to paddies in a watershed (465.1 km<sup>2</sup>) including Yedang reservoir. Firstly, the SWAT were calibrated with 3 years (2000~2002) daily streamflow and monthly water quality (T-N and T-P) data, and validated for another 3 years (2003~2005) data. The average Nash-Sutcliffe model efficiency (ME) of streamflow during validation was 0.73, and the coefficient of determination (R<sup>2</sup>) of T-N and T-P were 0.77 and 0.73 respectively. Next, running the SWAT-APEX model with the SWAT calibrated parameters for paddies, the R<sup>2</sup> of T-N and T-P were 0.80 and 0.76 respectively. The results showed that SWAT-APEX model was more correctly predicted for T-N and T-P loads than SWAT model. The difference results between watershed and field models was predicted to have substantial impact on NPS loads, especially on T-N and T-P loads. Therefore, to improve negative NPS load simulations should be considered the model characteristics as simulating mechanism to properly select the NPS model for agricultural watershed.

**Keywords:** Nonpoint source, SWAT, APEX, Paddy fields, Agricultural water quality

#### 1. 서 론

근래 농촌지역에서의 하천 및 저수지의 수질오염에 관하여 관심이 고조되고 있으며 오염원에 대한 파악과 대책을 세우기 위해 관련분야에서 많은 연구가 진행 되고 있다. 특히 축산 및 농지에서 비 정량적으로 발생하는 비점오염원에 관한 연구는 국가적인 차원에서 이루어지고 있다. 비점오염원은 점오염원 외의 오염원으로 오염의 정도는 낮지만 주로 강우에 따른 유출에 의해 배출되기 때문에 배출 장소와 경로가 불분명하고 다양하다. 또한, 적용범위가 광범위하고 특정지점에 국한 되지 않기 때문에 수질개선을 위해서는 반드시 비점오염원의 평가 및 관리가 필요하다(Shin et al., 2001; Kim et al., 2008).

비점오염원의 발생과 배출 그 저감대책에 의한 소멸 기작은 매우 복잡하여 그 정확한 정량적 관계를 밝히지 못하고 있다. 오염원의 특성상 특정 장소에 국한되지 않고 광범위한 지역에

걸쳐 존재하며 수문순환과정 등 복잡한 자연현상을 수반하여 나타나기 때문에 오염원 파악은 사회적, 기술적으로 복잡하고 발생량의 조절이 쉽지 않다. 이러한 비점오염원의 효율적인 관리를 위해서는 지형, 지질, 기후 및 토양특성, 수문학적 특성, 영농형태 및 토지이용방법 등과 같은 다양한 변화 요인들을 포괄적으로 수용하여 전반적인 관리대책을 세우는 것이 필요하며, 이러한 관리 및 오염물질의 이동 기작 등의 예측은 수학적 모델을 통한 모델링 기법에 의해 농촌지역에서 발생하는 수질오염의 원인과 현황을 정량적으로 구명하고 수질오염을 저감하기 위한 최적관리방안을 마련할 수 있다.

비점오염원의 관리를 위한 유역모델은 적용지역과 계산시간 등에 따라 다양하게 구분 할 수 있다. 수문순환을 고려하여 농업비점오염원의 발생 및 거동을 평가할 수 있고 공간적인 변이에 따른 모의가 가능한 모델로는 ANSWERS, AGNPS, SWRRB, SWAT, HSPF 모델 등이 있다. 그 중 가장 많이 사용되고 있는 유역 단위모델 중 대표적인 모델인 SWAT 모델은 유역 내 수문 순환 및 비점오염원의 발생 및 거동을 고려하며, Geographic Information System (GIS) 기반의 모델로서 수문 및 수질현상의 시간적·공간적 변화를 모의할 수 있다. 모델구동을 위한 입력자료로 일 기상자료를 이용하여 고랭지 지역과 같은 기상변화가 심한지역의 수문 및 수질 현상 모의가 가능하며, 토양과 토

\* 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과  
 \*\* 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수  
 † Corresponding author Tel.: +82-2-450-3749  
 Fax: +82-2-444-0186  
 E-mail: kimsj@konkuk.ac.kr

2011년 8월 3일 투고  
 2011년 9월 14일 심사완료  
 2011년 9월 26일 게재확정

지이용 및 관리 상태에 따라 반응한 대규모 유역의 물과 토사 유출 및 농업화학물질 거동에 대한 토지관리 방법의 영향도 예측 가능하다 (Heo et al., 2008). 또한, 논 및 밭에서의 비점오염원 관리를 위한 Field (필드) 모델로 Agricultural Policy / Environmental eXtender (APEX) 모델이 널리 사용되고 있다. APEX 모델은 농경지에서의 영양물질 농도와 식물계에서의 탄소 흐름, 유출량 및 다양한경지의 특정 관리기법으로부터의 일단위 영양물질 발생량을 모의하기 위해 설계된 필드 모델이다. 필드 모델이란 유역수준에서의 모의가 아니라 농경지 수준의 좀 더 상세한 논 및 밭에서의 물리적인 현상을 모의하고 농작물 수확 및 수질을 얻고자 모의되는 모델로 필드는 토양속성, 토지이용, 관리기법 및 지형등의 균일한 요소로부터 구분된다. SWAT 모델과 달리 APEX 모델에서는 필드간의 교류가 가능하며 추가적으로 SWAT 모델의 결과를 비교할 수 있다. 최근에는 유역모델과 필드모델이 결합된 SWAT-APEX 모델링 연구가 진행되고 있으며 다방면에서 활용되고 있다. Gassma et al. (2002)은 시험유역 두 곳을 선정하여 거름의 인의 비율을 조절함으로써 최적관리기법을 적용하여 SWAT-APEX 모델로 모의함으로써 필드에서의 비점오염 저감효과를 분석하였다. 아직까지 국내 유역에 SWAT-APEX 모델을 적용한 사례가 없고 그에 따른 모델의 적용성 또한 평가되어있지 않다. 따라서, 국내 유역내에 논 및 밭에서의 비점오염평가 및 최적관리기법 적용에 따른 효과를 평가하기위해서 본 연구를 진행하였다.

이번 연구에서는 SWAT 모델링을 이용한 유역차원 모의와 APEX 모델을 결합한 SWAT-APEX 모델링을 이용하여 유역-필드를 연계한 모의를 실행하였으며 APEX 모델에서 세분화된 농경지에서의 필드수준의 세세한 모의가 유역전체에 미치는 영향을 고려한 결과를 비교분석하여 유역 내에 위치한 논에서의 비점오염원 기작을 모의함에 있어 SWAT-APEX 모델에 적용성을 평가하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 대상유역 및 입력자료

본 연구에서는 농업용저수지를 포함하고 하류부에 논농사가 행해지고 있는 예당저수지유역을 대상유역으로 선정하였다 (Fig. 1). 예당저수지는 행정구역상으로 충청남도 예산군 대흥면, 웅봉면, 광서면 및 신양면 등 4개면에 걸쳐 펼쳐진 저수지로 1964년에 준공된 농업용 저수지이다. 총저수량은 47,103 m<sup>3</sup>이며 만수면적 1,088.7 ha, 수혜면적 6,917.4 ha의 규모이다. 예당저수지 유역의 유역면적은 465.1 km<sup>2</sup>이며, 유역평균표고 315 m, 유역평균경사는 25.9 %이다. 지난 10년간 연평균 강우량은 1,226.6

mm, 연평균 기온은 13.4 °C이며 유역 내 토지이용분포 중 논, 밭은 각각 25.5 %, 9.2 %로 118.7 km<sup>2</sup> 및 42.8 km<sup>2</sup>로 이루어져 있다.

예당저수지 상류유역은 계곡 폭이 다소 좁은 협곡을 이루고 있고, 저수지 하류측은 하천연안을 중심으로 비교적 넓은 평야를 형성하고 있다. 평야를 중심으로 평지가 많아 주민의 대부분이 농업에 종사하고 밭보다 논이 많아 벼농사가 발달되어 있다. 또한, 생사, 인경 등을 생산하는 섬유공업과 무연탄, 활석을 산출하는 광업을 포함하여 광공업이 활발하지만 지난 수십 년을 걸쳐 도시개발, 단지 및 주거지 조성 등에 의한 토지이용의 변화가 적고 농경지 유지를 더불어 농업이 집중적으로 행해지고 있는 유역으로 농업에서의 오염원 발생이 하천 수질에 직접적인 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 유역 내에 논과 밭에서의 비점오염원 모의 기작 평가대상으로 적절하다고 판단되어 본 유역을 선정하였다.

기본 지형입력자료로 SWAT 모델과 APEX 모델이 동일한 입력자료가 요구된다. 이는, SWAT 모델링이 이루어진 결과로부터 소유역내 논을 선택하여 APEX 모델링이 이루어지기 때문이다. NGIS의 1:5,000 수치지도로부터 격자크기 30 m의 DEM (Digital Elevation Model)을 제작하고 (Fig. 2a), SWAT 모델의 자동경계추출 (Automatic Delineation)모듈에서 DEM을 입력자료로 하여 지형전처리 과정을 수행하였다. 토지이용도는 수문해석 및 비점오염원 평가에 있어 필수 정보 중에 하나이다. 토지이용 정보는 증발산, 침투, 지표유출 등의 수문학적 구성 요소들에 영향을 미치며, 이러한 토지이용의 영향은 유출량의 변화뿐만 아니라 질소와 인으로 대표되는 비점오염원 부하량에 직접적인 영향을 미친다. 따라서, 수문해석 및 비점오염원 평가에 있어 필수 정보 중에 하나인 토지이용도는 환경부로부터 1:25,000 토지이용도 구축하였다 (Fig. 2b). SWAT 모델은 토양층을 중심으로 물수지를 파악하는 모델이므로 토양통 자료를 구축하는 것이 핵심이다 (Kim et al., 2006). 이를 위해 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 기준으로 분류하였다 (Fig. 2c). 또한, SWAT-APEX 모델링에서 농업용 저수지 고려에 따른 유역 물수지와 하천 유출량의 변화와 저수지 방류량에 따른 비점오염원 유출발생량을 고려하기 위하여 농어촌공사 예산지부로부터 저수지의 제원과 월별 방류량, 관개용수량 및 수해지구에 관한 자료를 구축하였다.

모델의 입력자료가 되는 기상자료는 천안, 부여, 보령 기상관측소의 강수량, 온도, 태양복사량, 풍속, 상대습도 자료를 구축하였고 예산, 신양 및 비봉 관측소지점의 강우량 자료를 활용하였다. 모델의 보정을 위한 실측자료는 국가수자원관리종합정보시스템 (Water Resources Management Information System, WAMIS)에서 제공하는 유역 출구 지점부에 위치해 있는 원평

(WP) 수위관측소에서의 수위자료 (2000~2009년)를 유량자료로 환산하여 사용하였으며, 수질자료는 환경부 무한천2 (MH2) 수질관측망에서의 Total-Nitrogen (T-N), Total-Phosphorus (T-P) 농도자료를 구축하여 오염 발생량으로 환산하였다 (Fig. 1).

본 연구에서는 논에서의 비점오염원 부하량을 유역차원에서 평가하기 위해 APEX 0604 모델을 적용하였다. 강우에 따른 오염발생량과 논에서의 시비 및 관개에 따른 비점오염원 기작을 모의하기 위해 SWAT 모델에서 구축된 소유역내에서의 논 지역만을 선택하여 APEX 모델로 모의하였다. 이러한 과정은 APEX 및 SWAT 모델에 자동적으로 통합적인 변환과 모의가 가능하게

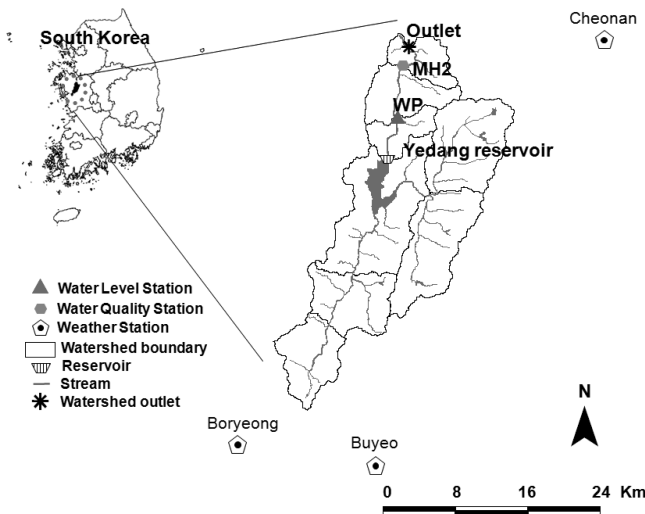


Fig. 1 The location of study area

하는 SWAT-APEX Program (SWAPP) 인터페이스를 사용하여 모의가 이루어졌다.

## 2. SWAT 모델 개요

SWAT 모델은 미국 농무성 농업연구소 (USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 물리적 기반의 준 분포형 장기 강우-유출 모델로서, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위해 개발된 모델로 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적의 4가지 부모모델로 구성되어 있다. 이 중 수문 부모모델에서는 토양과 토지이용조건에 의해 결정되는 수문반응단위 (Hydrologic Response Unit, HRU)로 SCS 유출곡선법 (Soil Conservation Service, 1972)과 Green & Ampt 침투법 (Green and Ampt, 1911)을 이용하여 지표유출량을 산정하며, 측방유출량은 Sloan et al. (1993)에 의해 개발되고 Sloan and Moore (1984)에 의해 정리된 동역학적 저류모델 (Kinematic Storage Model)을 이용한다. 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산한다. 잠재증발산량을 산정하기 위하여 Hargreaves 방법, Priestley-Taylor 방법과 Penman-Monteith 방법을 제공하며, 작물과 토양의 증발산을 분리하여 모의하기 위해 Ritche 방법 (1972)을 이용한다.

## 3. APEX 모델 개요

APEX 모델은 분포, 연속, 일단위 간격에 논, 밭 또는 소유역

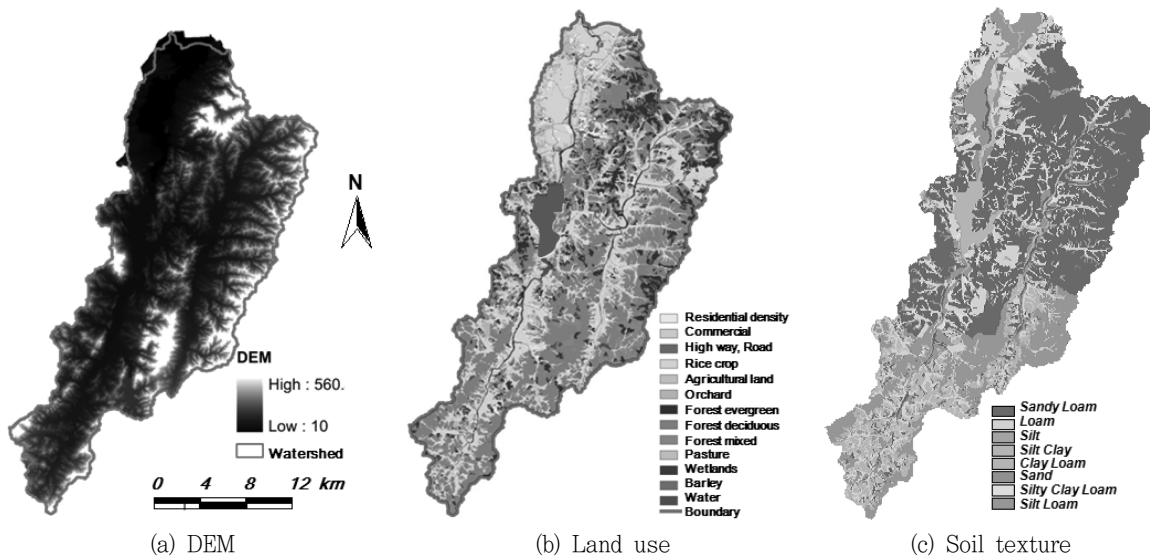


Fig. 2 Spatial input data

에서의 수문/수질 모델이다. 이 모델은 세세한 필드수준에 모델링과 추적, 유역내에 농장/필드 규모의 소지역간 연결 및 추적이 가능하다. APEX 모델은 필드 및 유역수준에 농업관리기법의 차이를 모의하기 위해 널리 시험되었다. APEX 모델은 과거 5년 이내에 모델버전과 인터페이스가 급격히 발전하였다. Williams et al. (2006)이 확장시킨 APEX 0604 모델은 가장 최근에 출시된 모델 버전으로 GIS 인터페이스가 가능한 ArcAPEX로 형태로 사용된다. APEX 모델이 기존 유역모델과의 차이점은 하천에서의 소유역별 추적과 각각의 HRU 단위간 공간적인 흐름이 없어 산술적인 합에 의해서 모의가 이루어지는 유역모델이 반해 APEX 모델의 필드단위는 각각의 유일한 토지이용 및 토양을 대표하여 나타내어지며 필드 단위간 특정 순서를 정하여 공간적인 추적이 가능하다. 특히, 논에서의 배수로 및 용수로에 따른 필드 순서를 정함으로써 유역이 아닌 필드단위에 세세한 모의가 가능하게 된다.

APEX 모델은 Environmental Policy Integrated Climate (EPIC) 모델로부터 개발되었다. EPIC 주요 구성성분은 기상모의, 수문, 침식, 퇴적, 질소순환, 농약 및 시비량, 작물생장, 토양 온도, 경작, 비용, 식물 환경영향모의 등이며 EPIC 모델에 일반적인 유역규모는 100 ha까지의 필드규모로 소유역 필드단위에서 이루어진다. APEX 모델은 전체의 논, 밭 및 소유역에서의 EPIC 모델에 성능을 확장하기 위해 개발되었다. EPIC 모델의 기능이 외에 APEX 모델은 유역출구에서의 복잡한 토지와 하천에 대한 하도, 유사량, 질소 및 농약성분을 추적할 수 있다. 또한, APEX는 지하수 및 저수지 모듈을 구성성분으로 추가하였다. 추적 기간은 소지역간에 지표유출, 환원수, 유사 침전, 질소이동 및 지하수 유출을 평가하기 위해 제공된다. 질소 (암모니아, 질산염 및 유기질소), 인 (용해, 흡착/미네랄 및 유기 인) 및 농약 농도와 관련된 수질은 유역출구 및 각각 소지역에서 모의된다. APEX는 대부분 SWAT의 이론을 따르며, 다른 점은 질소순환 및 발생을 위하여 Reddy et al. (1979) 및 Godwin et al. (1984)의 결합된 방정식을 사용한다. 이 방정식은 Reddy et al. (1979)의 1차 Kinetic rate equation 기초로 결합된 방정식이다. APEX 모델에서의 영양물질 관련 방정식은 SWAT 모델과 차이가 있다. APEX 모델에서의 질소순환 이론식은 다음과 같다.

$$QNO_3 = QT \times CNO_3 \quad (1)$$

$$YON = 0.001 \times Y \times CON \times ER \quad (2)$$

$$RNV = WN_3 \times (1.0 - \exp(-AKN - AKV)) \quad (3)$$

식 (1)은 지표 및 지표하 유출에 의한 질산화 관련식을 의미하

며 여기서, QNO<sub>3</sub>는 토양층으로부터 NO<sub>3</sub>-N의 손실양이며 QT는 총 침투량을 의미한다. CNO<sub>3</sub>는 NO<sub>3</sub>-N 전체 토양층에서의 총 침투동안의 NO<sub>3</sub>-N의 평균농도를 의미한다. 식 (2)는 유사량에 의한 유기질 질소변화를 나타내고 YON은 유기질 질소 유출을 의미하며 Y는 단위면적당 유사량, CON은 상부토양층에서의 유기질 질소농도이며 ER은 농축계수를 의미한다. 식 (3)은 질산화 관련 식으로 RNV는 질산화 및 증발량이며 WN<sub>3</sub>는 NH<sub>3</sub>의 무게, AKN은 질산화 조절변수 및 AKV는 증발조절변수이다. 또한, 영양물질 중 APEX 모델에서의 인순환 이론식은 다음과 같다.

$$YSP = 0.01 \times CSP \times Q / KD \quad (4)$$

$$RMP = DECR \times FOP \quad (5)$$

$$MPR = WPML - WPMA \times PSP / (1. - PSP) \quad (6)$$

식 (4)는 지표유출에 의한 용해성 인의 손실 관련식으로 YSP는 유출량 Q에 의한 인 손실량을 의미하고 CSP는 토양층에서의 인의 농도, KD는 유사량으로부터 이동되는 인의 농도이며 APEX 모델에서는 일반적으로 KD는 100으로 사용된다. 식 (5)는 무기물화 관련식이다. 여기서, RMP는 유기질 인의 무기물화 비율을 나타내고 DECR은 순수 유기 인에서의 부패비율이며 FOP는 작물에서의 잔존하는 유기질 인을 의미한다. 마지막으로 식 (6)은 무기질 인의 순환 관련식으로 MPR은 무기질 인의 유출비율, WPMA는 단위면적당 이온상태의 무기질 인의 양, PSP는 인의 흡착계수를 나타낸다.

SWAT 모델의 HRU와 유사하게 APEX 모델의 필드단위는 특정 토지이용, 관리 및 토양속성을 가진 소지역으로 나뉜다. APEX 모델은 소지역경계, 소지역 토지이용/토양도/경사 분석 및 기상 자료를 기반으로 입력 변수들이 생성된다. 이 변수들은 APEX geodatabase 파일에 저장된다. APEX 0604 입력파일들은 APEX geodatabase 파일로부터 추출되어진다 (Gassman et al., 2010). APEX의 인터페이스 발달은 APEX와 SWAT 모델을 결합하여 통합적으로 관리 할 수 있게 입력파일의 직접적인 변환을 가능하게 한다. APEX는 SWAT 모델의 점오염원 입력자료의 형태로 각각의 필드 출구지점에서 유출, 유사, 질소 및 인등을 포함한 결과 파일을 만들어진다. APEX 인터페이스는 APEX와 SWAT 모델 사이에 완전한 연결을 위해 APEX 모델 모의결과를 SWAT 모델의 소유역 입력자료로 변환을 가능하게 한다. 이는, SWAT 하천망에서의 소유역 및 HRU에서 형성된 오염부하량 및 유출량 대신 점오염원 형태의 APEX 필드 모의 값이 입력됨으로써 이루어진다.

Table 1 The calibrated SWAT model parameters

	Parameter	Definition	LB	UB	Sensitivity	Adjusted Value
Q	ESCO	Soil evaporation compensation factor	0	1	High	0.95
	ALPHA_BF	Baseflow alpha factor for land with slow response to recharge	0	1	High	0.03
	RCHRG_DP	Deep aquifer percolation fraction	0	1	Medium	0.6
	GW_DELAY	Groundwater delay	0	500	High	61
	GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.02	0.2	Medium	0.2
SN	SMFMX	Maximum snow melt rate	1.4	6.9	Medium	1.4
	SMFMN	Minimum snow melt rate	1.4	6.9	Medium	1.4
	SMTMP	Snow melt base temperature	-5	5	High	5
SD	CH_COV	Channel cover factor	0	1	High	0.8
	CH_EROD	Channel Erodibility	0	1	High	0.2
	LAT_SED	Sediment concentration in lateral and ground water flow	0	5000	High	12
	USLE_P	USLE equation support practice factor	0	1	Medium	0.01
T-N	NPERCO	Nitrogen percolation coefficient (Variable of SWAT and APEX)	0	1	High	0.77
	SOL_NO3	Organic nitrogen enrichment ratio (Variable of SWAT and APEX)	0	5	Medium	0.5
T-P	PHOSKD	Phosphorus soil partitioning coefficient (Variable of SWAT and APEX)	100	200	High	195
	GWSOLP	Concentration of soluble phosphorus in groundwater contribution to streamflow from subbasin	0	1000	High	0.3

Q: Streamflow, SN: Snow parameter, SD: Sediment, T-N: Total Nitrogen, T-P: Total Phosphorus, LB: Lower bound, UB: Upper bound

#### 4. SWAT-APEX 모델링 연계

SWAT-APEX모델은 상세한 시나리오 모의를 제공하고 특히 농업과 관련된 많은 시나리오의 수질영향의 모의를 효율적으로 할 수 있도록 제공하며, 기존 두 모델 중 하나의 모델에 의존하는 것보다 APEX와 SWAT의 장점을 모두 사용 할 수 있는 기회를 제공한다. 기존 SWAT 모델을 모의한 결과를 HRU 규모 내에 있는 논과 밭에 Pointsource 형태로 APEX 모델로 모의가 된 후 최종적으로 SWAT 모델로 모의를 하여 논과 밭에 기작을 집중적으로 적용 할 수 있게 된다.

SWAT-APEX 모델링은 다음과 같은 단계로 이루어진다. 1) 기존 SWAT 모델로 모의된 결과로부터 SWAPP에 의해 필도모의를 위한 토지이용을 선택한 후 SWAT-APEX 모델링을 위한 APEX 구동과일들을 생성한다. 2) APEX 모델로 논에서 모의된 후 유출과 오염원 결과 파일 (.SWT)을 만들어진다. 3) SWAPP\_ADD 프로그램에 의해 선택된 소유역에서 모의된 APEX 수질 결과는 점오염원 형태의 자료로 각각 필드출구지점에 입력된다. 4) 점오염원형태로 입력된 APEX 결과파일을 포함하여 최종적으로 SWAT 모의가 이루어진다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. SWAT 모델의 검보정

매개변수 추정을 위하여 SWAT의 입력유형별 매개변수를 정

Table 2 The SWAT results of streamflow during calibration and validation periods

Period	PCP (mm)	Discharge (mm)		Runoff ratio (%)		R <sup>2</sup>	RMSE	ME	
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.				
Calibration	2000	1508.1	727.5	656.5	48.2	43.5	0.87	3.98	0.74
	2001	877.5	442.4	458.0	50.4	52.2	0.83	2.08	0.75
	2002	1205.7	568.8	545.0	47.2	45.2	0.79	1.72	0.75
Validation	2003	1510.7	700.7	671.5	46.4	44.5	0.70	2.59	0.68
	2004	1358.2	547.0	623.7	41.1	47.4	0.84	1.95	0.80
	2005	1342.3	570.9	706.3	42.5	52.6	0.68	5.85	0.71

Obs.: Observed data, Sim.: Simulated data, PCP : Precipitation

리하여, 총 유출량 및 침투유량과 감수곡선 형태에 영향을 미치는 매개변수와 유사량 및 T-N, T-P 발생량 보정을 위한 매개변수를 선정하고 민감도 분석에 따른 최적의 매개변수를 Table 1에서와 같이 선정하였다. 지표수흐름관련 매개변수로는 ALPHA\_BF, ESCO 순으로 민감하게 반응하였고, 지하수흐름은 GWDELAY, GW\_REVAP 순으로 나타났다. T-N 매개변수로는 SOL\_NO3와 T-P 매개변수로는 GWSOLP가 가장 민감하였다.

모델에 대한 검보정은 총 5개년도 (2000~2005)동안 모의를 실시하였으며 3개년 (2000~2002)동안 예당저수지의 저수위와 유역출구지점에서의 총 유출량을 이용하여 보정하였으며, 3개년 (2003~2005)간의 자료를 대상으로 검증을 실시하였다. 결과의 적합성과 상관성을 판단하기 위해서 결정계수 (R<sup>2</sup>)와 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE)를 사용하였으며, 모

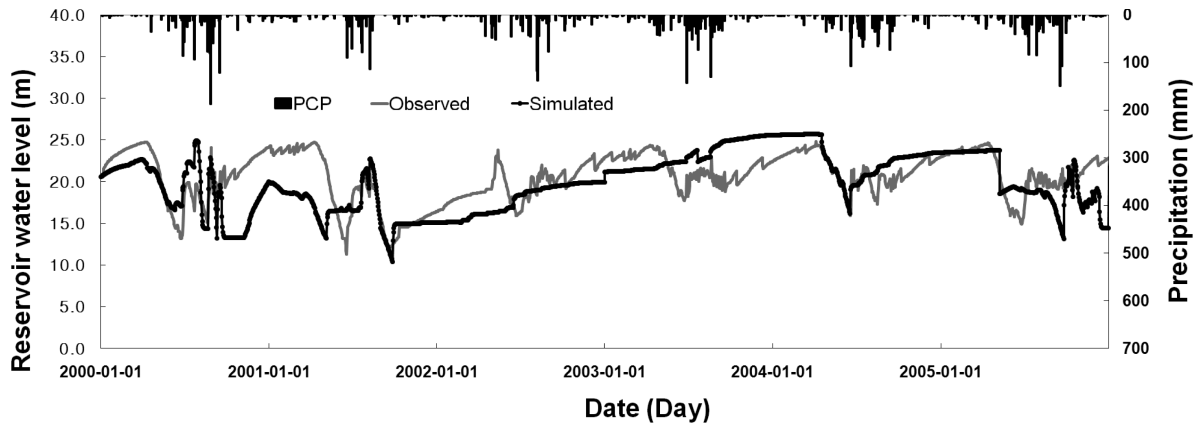


Fig. 3 Comparison of observed and SWAT simulated reservoir water level

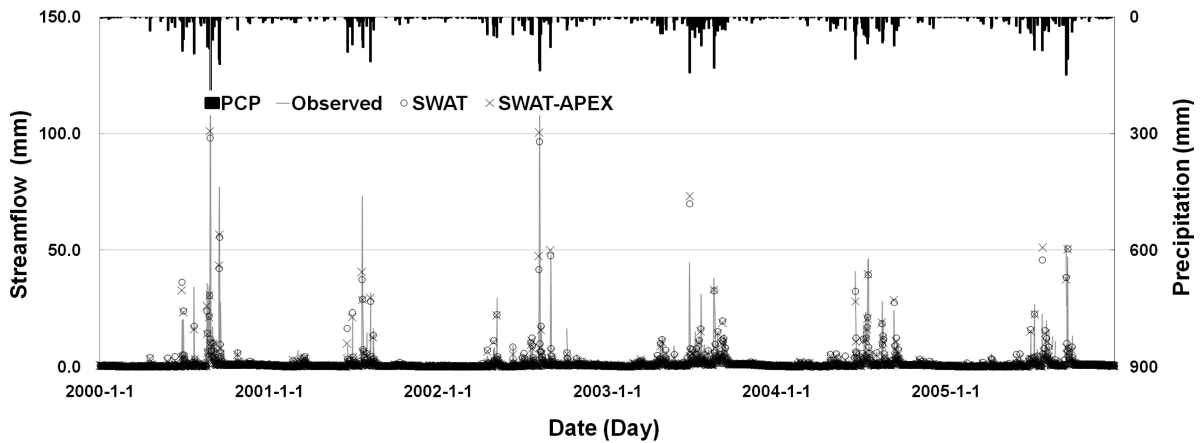


Fig. 4 Comparison of observed and simulated (SWAT and SWAT-APEX) streamflow

Table 3 Summary of statistics for annual NPS pollution loads for the SWAT calibration and validation periods (unit: kg/year)

Year	PCP (mm)	T-N		T-P		R <sup>2</sup>	
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	T-N	T-P
2000	1508.1	1043.3	740.0	61.6	47.2	0.66	0.63
2001	877.5	1455.3	1182.1	26.6	17.0	0.85	0.85
2002	1205.7	2475.5	2106.6	60.2	50.2	0.82	0.74
2003	1510.7	1468.3	1390.9	46.6	41.8	0.79	0.79
2004	1358.2	1092.8	763.2	43.2	26.3	0.73	0.69
2005	1342.3	1165.2	1083.2	108.5	58.8	0.73	0.68
Mean	1300.4	1448.5	1211.0	54.4	41.5	0.77	0.73

Obs.: Observed data, Sim.: Simulated data, PCP : Precipitation

Table 4 Summary of statistics for annual NPS pollution loads for SWAT-APEX calibration and validation periods (unit: kg/year)

Year	PCP (mm)	T-N		T-P		R <sup>2</sup>	
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	T-N	T-P
2000	1508.1	1043.3	804.9	61.6	82.8	0.72	0.75
2001	877.5	1455.3	1288.7	26.6	29.1	0.87	0.85
2002	1205.7	2475.5	2320.7	60.2	104.2	0.79	0.70
2003	1510.7	1468.3	1471.2	46.6	88.6	0.80	0.79
2004	1358.2	1092.8	817.3	43.2	58.6	0.71	0.67
2005	1342.3	1165.2	1149.2	108.5	145.6	0.89	0.82
Mean	1300.4	1448.5	1308.8	54.4	41.5	0.80	0.76

Obs.: Observed data, Sim.: Simulated data, PCP : Precipitation

델의 효율성 검증은 Nash and Sutcliffe (1970)가 제안한 모델 효율성계수 (Model Efficiency, ME)를 사용하였다. Fig. 3은 검 · 보정기간동안의 실제 저수위와 SWAT 모델로 모의된 일별 저수위를 비교한 것이며, Table 2는 유출결과, Table 3은 수질결

과를 연도별로 정리한 것이다. 유출량에 대한 RMSE는 1.72 ~ 5.85 mm/day, R<sup>2</sup>는 0.68 ~ 0.87, ME는 0.68 ~ 0.75였다. T-N 및 T-P는 R<sup>2</sup>가 각각 0.66 ~ 0.85 및 0.63 ~ 0.85의 범위를 보였다.

Table 5 Statistical summary during wet day (34) and dry day (37) for SWAT and SWAT-APEX

Component		SWAT					SWAT-APEX					Observed			
		Ave.	Max	Min	SD	R <sup>2</sup>	Ave.	Max	Min	SD	R <sup>2</sup>	Ave.	Max	Min	SD
Wet day	T-N	162.9	464.4	19.3	111.6	0.77	175.3	483.4	25.4	117.1	0.83	187.8	768.9	26.4	154.6
	T-P	4.89	47.12	0.18	9.04	0.75	7.35	69.94	0.23	11.79	0.80	6.30	61.84	0.14	9.80
Dry day	T-N	49.2	404.9	0.2	76.6	0.75	53.7	419.6	0.3	78.6	0.75	73.2	391.3	0.7	97.5
	T-P	0.38	1.94	0.05	0.37	0.70	0.46	2.87	0.04	0.55	0.71	1.14	5.70	0.03	1.48

Ave.: Average data, Max: Maximum data, Min: Minimum data, SD: Standard Deviation

## 2. SWAT-APEX 모델의 적용성 평가

SWAT-APEX 모델의 적용을 위하여, SWAT에서의 8개 소 유역에 논 지역을 APEX 모델로 총 47개의 HRU 수준으로 구분하고 SWAT과 동일한 매개변수를 이용하여 모의하였다. Fig. 4는 SWAT 모델과 SWAT-APEX 모델의 검·보정기간동안의 실측치와 모의치의 유출곡선을 비교한 것이며 SWAT 보다 SWAT-APEX가 실측치에 접근하는 것을 알 수 있었다. Table 4는 6년간의 T-N, T-P의 모의결과를 정리한 것으로, R<sup>2</sup>가 각각 0.71~0.89 및 0.67~0.85의 값을 보여, SWAT 모델로 모의한 결과보다 향상된 것을 알 수 있었다. 두 모델간의 결과 비교를 위하여, 6년 동안의 수질 측정자료를 강우시 (Wet day)와 평상시 (Dry day)로 구분하여 비교한 결과는 Table 5와 같다. 총 71개의 자료 중에서 특히 강우시 (34개 자료) 측정값을 보면, T-N, T-P의 R<sup>2</sup>가 SWAT은 0.71, 0.75, SWAT-APEX는 0.80, 0.83의 값을 보여, SWAT-APEX 모델이 강우시 논에서의 비점오염원 부하량을 SWAT보다 잘 모의하는 것을 확인할 수 있었다.

## V. 결 론

본 연구에서는 예당저수지 유역을 대상으로 SWAT 모델과 SWAT-APEX 모델에 비점오염원 부하량을 모의한 결과를 R<sup>2</sup>와 ME를 산정하여 SWAT-APEX 모델링에 적용성을 평가하였다. 농업용 저수지로부터 저수지 및 하류 지점에서의 미치는 유출량 및 관개기간동안 논에 공급되는 용수량의 전반적인 저수지 운영을 실제로 고려하여 논에서의 농업비점오염원 부하량을 정확하게 모의하고자 하였다. 저수지 운영을 고려함으로써 모델상으로 모의함에 있어 무강우시 저수지 방류에 따른 유출증가와 관개량에 따른 논에서의 비점오염원 발생 등의 불확실한 요소를 보완하여 실측값과의 상관성을 높였다.

논에서의 강우시 유출되는 비점오염원 기작을 평가하기 위해 두 모델에서 지표유출유무를 구분하여 Wet day 및 Dry day에 따른 비점오염원 부하량을 실측값과 비교하였다. 통계적 수치로 평균, 최대값, 최소값, 표준편차 및 R<sup>2</sup>를 산정하여 모의값과 실

측값의 분포정도를 분석하였으며 SWAT 및 SWAT-APEX 모델 각각의 결과는 Dry day에 비해 Wet day의 R<sup>2</sup>가 2~5 % 및 8~9 % 높았으며 Wet day에 T-N, T-P의 R<sup>2</sup>가 SWAT은 0.71, 0.75, SWAT-APEX는 0.80, 0.83의 값을 보였다. 또한, 수질측정기간 동안에 비점오염원 부하량 분포정도는 최대값에서의 SWAT-APEX 모델 T-N, T-P 결과가 각각 2 %, 10 % 실측값에 가까웠다. Wet day 동안에 SWAT 모델에 비해 SWAT-APEX 모델이 실측값과 근접함을 알 수 있으며 SWAT 모델의 결과가 실측값에 비해 과소평가됨을 알 수 있다. 이에 비해 Dry day동안에 결과는 두 모델에 차이가 비교적 적음을 알 수 있다. 이는, SWAT-APEX 모델이 논을 세부적으로 구분하여 상세한 물리적 요소 (경사, 독높이, 도랑너비 및 관개)를 모델상에서의 입력이 용이하고 이를 고려한 필드 모의를 함으로서 가능하다고 생각된다. 특히 강우시 유출특성에 의해 발생하는 비점오염원 발생 기작을 모의하는데 있어 SWAT 모델에 비해 정확함을 알 수 있었다.

본 연구를 통하여, 토지이용별 비점오염원 부하량의 비교 분석에 따른 논지역의 하류하천 수질에 미치는 영향을 월별, 시기별로 분석하여 농촌유역의 관개시기 별 적합한 BMP 시나리오를 산정하는데 적합한 유역-필드모델로서 활용될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 따라서, SWAT-APEX 모델은 강우시 불분명하게 반응하는 비점오염원기작을 모의함에 있어 기존의 유역모델에 비해 정확한 모의가 이루어져 농촌유역의 비점오염원 모델로서 제공될 수 있다. 추 후 연구로, 저수지 규모에 따른 모델에 적용성을 평가하기 위해 다양한 농업용 저수지를 모의 비교함으로써 SWAT-APEX 모델링 적용성에 대해서 좀 더 정교한 연구가 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 환경부에서 시행한 환경기초조사사업의 세부과제 “BMPs 효과모의 모델링과 Web 기반의 비점오염 저감기술 정보제공 지원시스템 개발” 재원으로 한강물환경연구소의 지원을 받아 수행된 기초연구사업에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Gassman, P. W., E. Osei, A. Saleh, and L.M. Hauck, 2002. Application of an environmental and economic modeling system for watershed assessments. *Journal of the American Water Resources Association* 38(2): 423-438.
2. Gassman, P. W., J. R. Williams, X. Wang, A. Saleh, and E. Osei, 2010. ARCAPEX: ARCGIS interface for Agricultural Policy Environmental eXtender (APEX) hydrology / water quality model. *Journal of the International Agricultural Engineering* 18(1-2): 59-71.
3. Godwin, D. C., C. A. Jones, J. T. Ritchie, P. L. G. Vlek, and L. G. Youngdahl, 1984. The water and nitrogen components of the CERES models. *In Proc. Intl. Symp. on Minimum*, 95-100.
4. Green, W. H. and G. A. Amp, 1911. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences* 4: 11-24.
5. Heo, S. G., D. S. Yoo, K. S. Kim, H. H. Ahn, Y. S. Park, J. G. Kim, W. S. Jang, and H. J. Lim, 2008. Evaluation of nonpoint source pollution at highland watershed using the SWAT. *Journal of the KCID* 15(2): 36-49 (in Korean).
6. Kim, N. W., I. M. Chung, and Y. S. Won, 2006. An integrated surface water-groundwater modeling by using fully combined SWAT-MODFLOW model. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 26(5B): 481-488 (in Korean).
7. Kim, J. H., K. H. Han, and J. S. Lee, 2008. Characteristics of agricultural non-point source pollutants by rainfall events in rural watersheds. *Journal of Korean Society on Water Quality* 24(1): 69-77 (in Korean).
8. Nash J. E. and J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models Part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290.
9. Reddy, K. R., R. Khaleel, M. R. Overcash, and P. W. Westerman, 1979. A nonpoint source model for land areas receiving animal wastes: II. Ammonia volatilization. *Trans. ASAE* 22(6): 1398-1404.
10. Ritche, J. T., 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research* 8: 1204-1213.
11. Shin, E. S., J. Y. Choi, and D. H. Lee, 2001. Characteristics of non-point source pollutants in surface runoff from rural area. *Journal of the KSWQ* 17(3): 299-311 (in Korean).
12. Sloan, P. G. and I. D. Moore, 1984. Modeling surface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research* 20(12): 1815-1822.
13. Sloan, P. G., I. D. Moore, G. B. Coltharp, and J. D. Eigel, 1993. Modeling surface stormflow and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds. Water Resources Inst., Report 142, Univ. Kentucky, Lexington.
14. Soil Conservation Service, 1972. Section 4 : Hydrology In national engineering handbook, SCS.