

# 한국형 유역수문모형 SWAT-K의 개요



김남원 ▶▶▶  
한국건설기술연구원 선임연구위원  
nwkim@kict.re.kr



이정우 ▶▶▶  
한국건설기술연구원 수석연구위원  
ljw2961@kict.re.kr

구과제인 “지표수 수문성분 해석시스템 개발”과 “지표수 수문성분 해석시스템 기술 실용화” 연구를 통하여 한국형 유역수문해석 모형 SWAT-K (KOREA)가 개발되었다. SWAT-K는 미국 농무성에서 개발된 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)을 모태로 하고 있는 모형으로서 국내 유역특성에 적합하도록 수문성분 계산 알고리즘이 수정되었고 국내 토양 D/B가 탑재되었으며, 기능적 향상을 위하여 다른 모형과의 창조적 결합을 시도한 모듈까지 포함하고 있다.

## 1. 서론

20세기 후반 급격히 진행된 산업화와 도시화는 자연적인 수문성분인 강수, 증발산, 유출, 지하수 등의 수문 순환에 깊은 영향을 끼쳤고, 고도화된 토지이용 및 물공급시설 개발 등 인위적인 수문순환의 변화로 인해 많은 부작용이 생겼다. 또한, 온난화 같은 기후 변화에 따라 강수의 극치 값이 변화하는 등 수문순환 체계의 변화가 일어나고 있어 수자원 이용 및 관리가 더욱 어려워진 게 현실이다. 따라서 자연적, 인위적 변화에 따른 가용수자원 파악은 물론, 효율적인 물 관리, 수자원계획 등 수자원관련 제 분야 효율성을 제고하기 위해서는 원천기술인 수문성분에 대한 명확한 해석을 수행할 수 있는 해석시스템의 개발 및 실용화가 필수적이다. 이를 위해서 21세기 프론티어 사업인 “수자원의 지속적 확보기술개발사업”의 세부연

## 2. SWAT 모형의 발전사

미국 농무성의 Dr. Jeff Arnold에 의해 개발된 SWAT (Arnold 등, 1993)은 토양과 토지이용 관리 조건의 변화에 따른 대규모 복잡한 유역에서 물, 유사, 농업화학물질의 장기간 부하량을 예측하는 모형이다. 이 모형은 CREAMS (Knisel, 1980), GLEAMS (Leonard 등, 1987), EPIC (Izaurralde 등, 2006)을 통합한 SWRRB (Arnold와 Williams, 1990) 모형을 근간으로 하고 있으며, 여기에 하도내 유출 및 유사 추적을 모의하는 모형인 ROTO (Arnold 등, 1995)가 결합된 구조를 가지고 있다. 최초 개발 이후에 버전이 수차례 업그레이드 되었고 (SWAT94.2, 96.2, 98.1, 99.2, 2000, 2005), 최근에는 SWAT2009 버전이 출시되었다.

2000년대 이후에는 각종 기능을 향상시키고 특정

유역에 대한 적용성을 증대시키려는 목적으로 몇 가지 개선된 형태의 파생 모형이 개발되었다. 대표적인 예로 SWAT-G, ESWAT, SWIM, SWAT-K 등을 들 수 있다. SWAT-G (Eckhardt 등, 2002)는 독일에서 개발된 것으로 경사가 급한 산지 유역에 대해 적용성을 높이기 위해서 침투량과 중간유출량 계산모듈을 수정한 모형이다. ESWAT (van Griensven과 Bauwens, 2003, 2005)은 보다 정교한 해석을 위해 계산시간단위를 일 보다 작은 단위로도 모의 가능하게 개선된 모형으로 다목적 함수형 자동보정 기능을 가지고 있다. SWIM (Krysanova 등, 2000)은 질소 순환성분 모의 성능을 높이기 위해서 MATSALU 모형이 SWAT에 결합된 모형이다. 국내의 경우 여러 기초자료 부족과 모형 개발 국가인 미국과 국내유역 특성이 상이하여 그 사용이 제한되고 어렵게 적용되고 있는 점을 극복하고자 SWAT을 국내 현실에 맞게 개선한 SWAT-K가 개발되었다. SWAT-K는 인위적, 자연적인 물순환구조 변화와 지표수-지하수 연계해석, 국내 산림지역, 농업지역, 도시지역에서의 물순환해석 방법을 개선하여 강우, 증발산, 토양수분, 지표수, 지하수 등의 시공간적 분포를 정량적으로 산정할 수 있으며, 유출 해석의 정확성은 물론, 유사 및 비점오염물질의 모의 신뢰성을 제고시킨 한국형 유역수문해석 모형이다.

### 3. SWAT-K의 특징

SWAT-K 모형에서는 유출 프로세스 및 수질모의의 물리적 재현성과 정확도를 높이기 위해서 계산 구조를 국내 여건에 맞게 개선한 유출 및 수질 계산

모듈로 구성되었다. SWAT 원 버전으로 모델링을 수행할 경우에 유출수문곡선의 첨두부가 과소하게 모의되는 문제, 경사가 급한 유역의 경우 중간유출 성분이 매우 과다하게 산정되는 문제, 하도유출추적 과정의 불안정성 등 유출모의 능력의 한계를 나타내고 있다. 이를 극복하기 위해서 SWAT-K에서는 시간 가중평균 유출곡선지수를 이용한 지표유출량 계산모듈 (SWAT-TWACN), 점합-분리 방식의 토양층 구조화 모듈 (SWAT-CPSL), 지표유출과 토양수의 침투의 유하시간을 고려한 지표유출량과 침투량 계산 모듈 (SWAT-REXINF), 지하수위 상승에 따른 토양수 변화를 고려할 수 있도록 토양수-지하수 연결성 개선 모듈 (SWAT-VSLC), 비선형 저류방정식을 이용한 하도추적 모듈 (SWAT-NSR) 등 개선된 형태의 유출 계산 모듈들로 구성되어있다. 또한, 하도에서의 BOD 모의와 현재 우리나라에서 측정하는 BOD가 상이한 점을 보완하기 위해서 QUAL-NIER 모형의 조류의 내부 생산과 Bottle BOD 모의 기능을 추가하여 수질 계산 구조 역시 국내 여건에 적합하도록 개선된 하도내 수질반응계산 모듈 (SWAT-DMQN)을 가지고 있다. 지하수 해석에 있어서 약점을 가지는 SWAT 모형을 보완하고자 3차원 지하수유동 해석모형 MODFLOW를 완전연동형으로 SWAT에 결합한 지표수-지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW, 도시유출해석 기능 강화를 위해서 미국 EPA에서 개발한 도시유출해석모형 SWMM이 결합된 SWAT-SWMM, 농경지 및 산림지역에서 물순환 구조를 개선한 SWAT-AGRIMAN과 SWAT-EVT 등도 탑재되어있다. SWAT-K의 주요 특징을 SWAT과 비교하여 정리하면 표 1과 같다.

표 1 SWAT-K의 주요 특징

항 목	SWAT	SWAT-K(Korea)
Weather generation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 단일지점 해석</li> <li>- 관측지점별 독립적으로 강우 발생</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 다지점 해석</li> <li>- 지점별 공간적 상관성 고려</li> <li>- Spatial rainfall generator 도입</li> <li>- 호우중심(Storm center) 생성</li> <li>- 강수장(Rainfall field) 개념 적용</li> </ul>

표 1 SWAT-K의 주요 특징(계속)

항 목	SWAT	SWAT-K(Korea)
Soil D/B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• STATSGO(State Soil Geographic) D/B</li> <li>- 연구기관 : U.S. NRCS (Natural Resources Conservation Service)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 현장실험과 검증을 통한 국내토양에 대한 물리적 특성자료 D/B 구축</li> <li>- 연구기관 : 국립농업과학원</li> </ul>
Model Integration	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 도시지역 지표면 유출특성 모사의 한계</li> <li>- 투수/불투수 지역의 합성 유출곡선지수 (Curve Number) 의존</li> <li>- 배수시스템 고려 못함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SWAT-SWMM 통합모형 개발</li> <li>- SWAT에 도시유역모형 SWMM (Stormwater Management Model) 결합</li> <li>- 도시지역의 불투수지역, 배수시스템, 저류지 등 도시제반시설 고려 가능</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 총괄형(lumped) 방식의 지하수 해석</li> <li>- 대수층의 분포형 수리지질특성 고려못함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SWAT-MODFLOW 통합모형 개발</li> <li>- SWAT에 3차원 지하수유동해석모형 MODFLOW 결합</li> <li>- 분포형 지하수 함양량, 지하수위 모의가능</li> <li>- 지하수 양수정 고려 가능</li> <li>- 하천과 대수층간 상호작용 모의 가능</li> </ul>
Module Enhancement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 점두유출량 과소 산정</li> <li>- NRCS 유출곡선지수법, Green&amp;Ampt 방법에 의한 침투량 계산</li> <li>- 전날 토양수량 의존형 계산 방식</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SWAT-TWACN 모듈 개발</li> <li>- 국내 유출특성을 고려한 지표유출 모의 방법 개선</li> <li>- 시간가중평균 유출곡선지수법 (Temporally Weighted Average Curve Number Method) 개발 · 탑재로 점두유출량 모의 정확도 향상</li> <li>- 전날, 금일 토양수량 의존형 계산 방식</li> <li>- 금일 강우량 효과 고려 가능</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 하도유출추적 결합</li> <li>- 모의 유출수문곡선 첨두부의 과도한 감쇠 또는 하강부의 수치적 불안정 발생</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SWAT-NSR 모듈 개발</li> <li>- 국내 유출특성을 고려한 하도유출추적 모의 방법 개선</li> <li>- 비선형저류법(Nonlinear Storage Routing Method) 개발 · 탑재로 하도유출추적 정확도 향상</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지표하 중간유출량(lateral flow) 과다산정</li> <li>- 첫번째 토양층 설정 방식의 개념적 오류</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SWAT-CPSL 모듈 개발</li> <li>- 국내 유역특성을 고려한 중간유출 모의방법 개선</li> <li>- 결합 · 분리방식의 토양층 구조화 기법 (Combining-Partitioning Soil Layer Method) 개발 · 탑재로 중간유출량 모의 정확도 향상</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 강우에 대한 유출응답 변화가 작게 모의되어 홍수기 집중호우 모의 제약</li> <li>- 급경사 지역 침투량 과다 산정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SWAT-REINF 모듈 개발</li> <li>- 초과침투량 재분배 (Redistributing Excessive Infiltration) 기법 개발 · 탑재로 강우에 대한 유출 민감도 증가</li> <li>- 지표유출의 집중시간과 토양수의 연직 유하시간 고려</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 토양수대와 지하수대 분리 방식</li> <li>- 지하수위 상승이 토양수에 미치는 영향 반영 못함</li> <li>- 토양수의 지하수간 일방향 구조</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SWAT-VSL 모듈 개발</li> <li>- 가변 토양층 구조화 기법 (Variable Soil Layer Construction) 개발 · 탑재로 지하수위 상승, 하강에 따른 토양수 변화 모의 가능</li> </ul>

#### 4. SWAT-K의 구조

SWAT-K의 주요 모듈의 계산방식을 소개하면 다음과 같다.

##### 4.1 지표면 유출

SWAT-K 모형에서는 일 단위 지표유출량을 모의하기 위해서 토양의 포화수량, 포장용수량, 위조점에서 토양수량 등의 토양특성과 계산된 실제 토양수량에 따라 일 단위로 유출곡선지수(Runoff Curve Number, CN)가 변하는 수정 NRCS-CN 법을 근간으로 하고 있다. 이 방법은 토양의 물리적인 특성을

반영할 수 있고 CN값의 시변성을 표현할 수 있는 장점이 있으나, 국내 유역에 적용할 경우 유출수문곡선의 침투부가 관측치에 비해 과소하게 산정되는 경향이 있다. 이는 금일 발생한 강수의 영향은 전혀 고려하지 않고 전날 종점시 토양수분량에 따라 CN 값이 결정되는 데서 기인한다. 따라서 SWAT-K 모형에서는 금일 발생한 강수로 인한 토양수 증가를 고려할 수 있도록 개발된 시간적으로 가중 평균된 유출곡선 지수(Temporally **W**eighted **A**verage **C**urve **N**umber, SWAT-TWACN) 산정법을 개발(Kim and Lee, 2008)하여 모형의 지표유출 계산 루틴에 추가하였다.

앞서 기술한대로 SWAT-K 모형에서는 지면위에 내린 강우량을 지표유출량과 침투량으로 분리하기 위해서 토양수량의 함수에 따라 일별로 변하는 수정 SCS 유출곡선지수법을 근간으로 하고 있으며, 금일 발생한 강우량의 영향이 반영될 수 있도록 이를 개선한 시간가중평균 유출곡선지수법을 따르고 있다. 이 방법으로 국내 유역에서와 같이 유출수문곡선의 침투부가 급격히 증가하는 양상을 잘 모사할 수 있다. 그러나, 작은 강우량에도 침투치가 급변하게 모사되어 홍수기가 아닌 비홍수기에도 유출의 민감도가 커서 관측치에 비해 비이상적으로 크게 나타나는 경우가 발생한다. 따라서 홍수기 큰 강우사상에 대해서는 유출량이 민감하게 반응하고 비홍수기 작은 강우사상에 대해서는 유출량이 상대적으로 둔감하게 반응할 수 있는 초과침투량 재분배 모듈(**R**edistributing **E**Xcessive **I**Nfiltration module, SWAT-REXINF)을 개발하였다. 이 기법은 토양층의 보수능을 초과하는 침투량 처리 방식을 개선한 것으로 지표유출의 집중시간과 토양층내에서의 침투과정의 지체시간의 상대적인 크기를 고려하여 시간가중 유출곡선 지수법에 의해 계산된 지표유출량과 침투량을 재분배시키는 방식을 취하고 있다.

#### 4.2 지표하 유출

SWAT 모형에서는 중간유출, 침투, 토양 증발, 식물에 의한 증산 등의 수문과정을 모사하기 위해서 토양수대를 토양의 물리적 특성에 따라 몇 개의 층으로 구조화하여 각 층별로 순차적으로 성분이 이루어진다. 지표하 유출을 모의하기 위해 운동학적 저류모형(kinematic storage model)을 채택하고 있다. 특히, 중간유출량은 경사 및 경사장, 포화수리전도도, 공극률, 포장용수량을 초과한 배수가능한 토양수량(excessive soil water) 등의 함수로 계산되며, 각 층별로 계산된 중간유출량을 합산하고 지체를 고려하여 주하도로 보낸다. 지표유출로 인한 영양물질의 이송을 모사하기 위하여 사용자가 입력한 첫 번째 토양층을 둘로 구분하여 상부 10mm의 새로운 토양층을 자동 생성되도록 알고리즘화되어 있고 각 층에 동일 성질의 토양 특성값을 부여하고 있다. 그러나 같은 토양 특성을 가진 층을 임의적으로 둘로 구분하는 것은 토양 물리적 관점에서 보면 적절하지 않다. 또한 생성된 첫 번째 층이 매우 얇기 때문에 수분 보유능이 작아 배수가능 토양수량이 매우 크게 산정되어 중간유출량 또한 비현실적으로 크게 계산된다. 비교적 경사가 급한 국내유역에 모형을 적용할 경우 이러한 현상이 두드러지게 발생한다. 따라서 중간유출량이 비현실적으로 크게 계산되는 현상을 방지하고자 결합-분리형 토양층 구조화 모듈(**C**ombining-**P**artitioning **S**oil **L**ayer, SWAT-CPSL)을 개발하여 토양층 구조를 보다 현실성 있게 개념화하였다. 이 모듈에서는 중간유출 및 침투량 등의 지표하 유출 성분을 계산할 때에는 1, 2 토양층을 합쳐 하나의 토양층으로 간주하며, 증발산, 영양물질 순환 및 이송 모의 단계에서는 다시 두 개의 토양층으로 분리하여 계산하도록 알고리즘화 되었다. 토양층 분리시에는 해당 층내 함수비가 균질하다는 가정하에 토양층 두께에 비례하여 토양수분량, 중간유출량, 침투량이 재분배되도록 처리되어있다.

토양층의 바닥을 통과한 침투량이 비포화대를 거치면서 지체·감쇠된 후 얇은 대수층으로의 함양이 이루어진다. 수리지질특성에 따라 이 지체·감쇠가

상이하하게 나타나는데 이러한 지체감쇠를 나타내기 위해서 SWAT 모형에서는 토양대 아래 비포화대를 하나의 선형저수지로 간주하여 지수형 감쇠 가중합수로 표현된 함양량과 침투량간의 관계식(급일 발생한 함양량과 작일 남아있는 침투량간의 가중 합)으로 함양량을 계산하게 된다. 그러나 이 개념은 지하수 심도가 작은 경우에만 적용 가능하여 심도가 깊은 경우 지체를 구현하기 어렵다. 일례로 강우량과 지하수위간의 시간적 지체가 한 달 이상 차이가 날 경우, SWAT의 단일 저수지 형태의 지체 방식을 적용하면 지체시간이 1~2일 정도밖에 구현할 수 없다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 직렬로 설치된 다수의 저수지로 표현하여 시간적 지체를 유연하게 반영할 수 있도록 모형을 수정하였다. 즉, SWAT-K에서는 저수지 개수  $n$ 번만큼 순차적으로 계산되도록 수정한 다단 저수지 저류 추적(multi-reservoir storage routing)법으로 침투와 함양간의 시간적 지체를 구현한다.

### 4.3 지하수 유출

SWAT은 상대적으로 느린 흐름인 지하수 흐름해석에 문제점을 가지고 있으며, MODFLOW는 지하수 흐름 해석을 제외한 나머지 물 순환성분에 대한 해석 방법이 포함되어 있지 않아 주요 입력 자료인 지하수 함양량의 결정에 어려움이 많다. 따라서 두 모형간의 장점은 유지하면서 단점을 상호 보완한다면 수문순환 성분을 요소별로 정량화시킬 수 있다. 이를 위해 세계 최초로 SWAT과 MODFLOW를 완전연동형 방식으로 결합한 SWAT-MODFLOW 모형을 개발하였다(김남원 등, 2004a). 이 결합모형에서는 MODFLOW가 SWAT내에서 호출되는 형식으로 결합되었다. SWAT에서 계산된 함양량을 MODFLOW의 분포형 셀(cell)에 자동 입력하고, MODFLOW의 RIVER패키지를 이용하여 지표수-지하수의 수두차이에 따른 물 교환량을 계산하여 순 지하수 유출량이 계산된다. 무심천 유역을 대상으로 모형의 검증 과정

이 완료되었으며(Kim et al., 2008), 모의 결과 갈수기에 대수층으로부터 하천으로 유입하는 현상과 홍수기에 상승한 하천수가 대수층으로 유입되는 현상을 적절히 표현할 수 있고, 분포형 양수량을 고려한 유출모의를 통해 양수량에 따른 지표수 유출량 감소와 지하수위의 지하 분포를 확인할 수 있었다. 또한 이 모형을 정안천 유역(김남원 등, 2004b; 김남원 등, 2006), 무심천 유역(김남원 등, 2007), 미호천 유역(정일문 등, 2007) 등에 적용하여 하천-대수층 상호작용 해석, 지하수 함양의 공간분포 해석, 양수에 의한 지하수계와 하천유량의 변화 해석 등 지표수, 지하수와 관련된 다양한 현안 문제를 해결하는데 유용하게 활용될 수 있음을 입증하였다.

초기의 SWAT-MODFLOW 모형은 토양수가 침투과정을 거쳐 지하수로 유입되는 일방향 구조를 갖고 있어 지하수위 상승 및 하강에 따른 토양수량, 침투량, 중간유출량 등 수문성분량의 변화를 고려하기에는 제한이 있었다. 따라서 지하수위 변화에 따른 토양수의 분포양상 변화를 고려할 수 있도록 토양수-지하수간의 연결 구조를 양방향으로 개선하여 두 영역간의 연결성을 강화하였다. 지하수위가 상승할 경우 토양대와 지하수대간의 중첩 영역이 생기게 되는데, 이 중첩 영역을 지하수대로 간주하여 영역 내 흐름거동이 지하수 유동 메커니즘을 따르는 토양수-지하수 결합루틴을 새롭게 개발하였다. 결합루틴은 지하수 상승, 하강에 따라 토양수대의 두께가 변하는 가변 토양층 방식(Variable Soil Layer Construction, SWAT-VSLC)으로 계산을 수행할 수 있도록 코드를 구성하였다. 또한, 지하수면이 토양수대에 위치한 경우는 지하수 증발산이 기작되도록 MODFLOW의 증발산 패키지(EVT Package)와 연동하도록 되어 있다.

### 4.4 하도유출추적

초창기 SWAT 모형의 하도추적 방법은 변동저류추적법(variable storage routing method)

을 사용하였으나, AVSWAT2000 버전이 되면서 Muskingum 추적법이 추가되었으며 최근에는 이 방법이 SWAT 사용자들에게 주로 이용되고 있다. 하도 유출추적을 위해서 Muskingum 추적법 또는 변동저류법을 이용하는데, 일 단위로 유출모의를 수행할 경우 매개변수 설정 범위의 제약에 따라 수치적 불안정 또는 과도한 감쇠현상이 발생한다. 따라서 이러한 모형의 단점을 극복하기 위해서 비선형 저류추적법 (Nonlinear Storage Routing method, SWAT-NSR)에 근간한 하도추적법을 추가로 모형에 탑재하였다(Kim and Lee, 2010). 이 방법은 연속방정식과 Manning 식을 결합한 비선형 저류방정식을 하도유출추적의 기본 방정식으로 하며, 이를 시간 차분화하여 방정식의 해인 수심과 유출량을 반복 기법에 의해 계산된다. 시간 차분의 영향으로 유량이 매우 급변할 경우에 수치적으로 약간의 불안정한 현상이 발생할 수 있는데, 이를 해소하기 위해서 시간간격을 몇 개의 소 시간간격으로 자동적으로 분할하도록 알고리즘화하여 수치적 안정성을 확보하였다. 비선형 저류추적법은 하도의 조도계수나 하도경사, 하도의 단면형 등 하도의 특성을 직접적으로 반영할 수 있는 장점이 있다.

#### 4.5 하도수질반응

초기의 SWAT은 SWRRB의 수질 모의 방법이 사용되었으나 SWAT 96.2 버전에서부터 유역으로부터 발생된 오염원의 하천 내 변화양상을 모의하기 위하여 QUAL2E 모형의 수질 모듈을 추가하였다. 그러나 QUAL2E는 1차원 정상상태 모의 모형으로 대상 수체의 흐름이 연속적이어야 한다는 전제조건하에 모의가 이루어져야 하며 기준유량에 따른 하천의 수질은 적절하게 모의하지만 연속적인 일단위의 수질 모의에는 한계가 있다. 한편 우리나라는 하상 경사가 크고, 강수에 의한 하천 유량의 계절적 편중이 심하며 일부 하천은 하천 내에 크고 작은 보와 댐, 저수지 등에 의하여 연속적인 흐름이 이루어지지 않으며 이

는 특히 갈수기에 심해진다. 이에 따라 하천의 재포기 현상이 활발히 이루어지며 하류로 갈수록 하천의 정체 현상에 따른 조류의 내부 생산이 발생한다. 따라서 우리나라 하천의 정교한 수질 모의를 위하여 불연속적인 흐름에 따른 모의 특성을 고려할 수 있는 수질 모델이 필요하다. 특히 기존의 하천수질모델은 대부분 연속적인 하천을 기준으로 개발되어 DO중심의 구조이나 우리나라는 하천과 지형의 특성에 의하여 DO부족현상은 나타나지 않고 내부의 유기물 재생산이 이루어지기 때문에 DO중심의 모델 구조를 유기물 및 영양물질 중심의 구조로 전환할 필요성이 제기되고 있다. 또한 현재 시행중인 1차 수질오염총량관리제에서 대상물질로 지정되어 있는 BOD는 우리나라의 경우 수질공정시험법에 의하여 5일단위의 Bottle BOD를 측정하고 있으나, SWAT에서는 CBOD<sub>u</sub>형태로 BOD가 모의되고 있다. 따라서 SWAT 모형 내에 국립환경과학원에서 개발한 QUAL-NIER 모형의 반응식을 이용하여 조류의 분비와 사멸에 따른 내부유기물 생산과정 및 질산화에 의한 산소소모량(NOD)과 조류 호흡에 의한 산소소모량(AOD)을 고려하여 장기간의 Bottle BOD5 모의가 가능하도록 BOD모의 구조를 개선한 SWAT-DMQN (Dynamic Modified QUAL-NIER) 모듈을 개발, 탑재하였다 (김남원과 신아현, 2009).

## 5. 결론

21세기 프론티어 사업인 “수자원의 지속적 확보기술개발사업”의 연구성과로서 강우, 증발산, 지표수, 토양수, 지하수, 오염물질의 시공간적 거동과 분포를 한국 실정에 맞게 정량적으로 산정할 수 있는 한국형 유역수문모형 SWAT-K가 개발되었다. 이 모형은 지표수와 지하수의 연계, 토양 및 식생변화, 유사 및 비점오염원 해석 등 복합 요소를 고려한 유역 통합해석이 가능하여 국가의 수자원/환경 계획 및 평가와 관련된 문제를 해결하는데 활용할 수 있다.

사사

원의 지속적 확보기술개발사업의 연구성과(과제번호 2-2-3)로서 연구비 지원에 감사드립니다. ☺

본 기사는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자

## 참고문헌

1. Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1993). A comprehensive surface groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, Vol.142, pp. 47-69.
2. Arnold, J.G., Williams, J.R., and Maidment, D.R. (1995). Continuous time water and sediment routing model for large basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(2), pp. 171-183.
3. Arnold, J.G., Williams, J.R., Nicks, A.D., and Sammons, N.B. (1990). *SWRRB - A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management*, Texas A&M University Press, College Station, 255pp.
4. Eckhardt, K., Haverkamp, S., Fohrer, N., and Frede, H.-G. (2002). SWAT-G, a version of SWAT99.2 modified for application to low mountain range catchments. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27, pp. 641-644.
5. Izaurrealde RC, Williams JR, McGill WB, Rosenberg NJ, Quiroga Jakas MC. 2006. Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data. *Ecological Modeling*, 192(3-4), pp. 362-384.
6. Kim, N.W., Chung, I.M., Won, Y.S., and Arnold, J.G. (2008). Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. *Journal of Hydrology*, Vol. 356, pp. 1-16.
7. Kim, N.W., Lee, J. (2008). Temporally weighted average curve number method for daily runoff simulation. *Hydrological Processes*, Vol. 22, pp. 4936-4948.
8. Kim, N.W., Lee, J. (2010). Enhancement of the channel routing module in SWAT. *Hydrological Processes*, Vol. 24, pp. 96-107.
9. Knisel, W.G. (1980). *CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*, USDA Conservation Research Report, 26, 643pp.
10. Krysanova, V., Wechsung, F. and Arnold, J.G. (2000). *SWIM User Manual*, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany.
11. Leonard, R.A., Knisel, W.G., Still, D.A. (1987). GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems. *Trans. ASAE*, 30(5), pp. 1403-1428.
12. van Griensven, A., and W. Bauwens. (2003). Multiobjective autocalibration for semidistributed water quality models. *Water Resources Research*, 39(32), SWC9.1-SWC9.9.
13. van Griensven, A., and W. Bauwens. (2005). Application and evaluation of ESWAT on the Dender basin and Wister Lake basin. *Hydrological Processes*, 19(3), pp.827-838.
14. 김남원, 신아현 (2009). "SWAT 모형의 하도 수질 모듈의 개선." *수질보전 한국물환경학회지*, 25(6), pp.902-906.
15. 김남원, 정일문, 원유승 (2004a). "완전 연동형 SWATM-ODFLOW 결합모형, (I) 모형의 개발." *한국수자원학회 논문집*, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp.499-507.

16. 김남원, 정일문, 원유승 (2004b). "완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형, (II) 모형의 적용." 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp.509-515.
17. 김남원, 정일문, 원유승 (2006). 완전연동형 SWAT- MODFLOW 모형을 이용한 지표수-지하수 통합 유출모의. 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제26권, 제5B호, pp. 481-488.
18. 김남원, 정일문, 이정우, 원유승 (2007). "지표수-지하수 통합모형을 이용한 무심천 유역의 수문과정 해석." 한국수자원학회논문집, 제40권, 제5호, pp.419-430.
19. 정일문, 김남원, 이정우 (2007). "유역 유출과정과 지하수위 변동을 고려한 분포형 지하수 함양량 산정방안." 한국지하수토양학회 논문집, 12(5), pp. 19-32.