

# SWAT-AGRIMAN의 적용



김 남 원 ▶▶▶

한국건설기술연구원 선임연구원  
nwkim@kict.re.kr



박 기 욱 ▶▶▶

한국농어촌공사 농어촌연구원  
park.kiwook@gmail.com



김 철 겹 ▶▶▶

한국건설기술연구원 수석연구원  
cgkim@kict.re.kr

## 1. 서론

우리나라의 농업용수는 전체 용수사용량의 50% 이상을 차지하고 있다. 그러나 우리나라에서는 지금까지 농업용수 사용량에 대한 정확한 계측이 이루어지지 못하고 있으며 농업 소유역이 가지고 있는 복잡한 형태의 물순환으로 인하여 장기유출량 추정 및 정량적인 물수지 분석이 곤란한 경우가 발생하고 있다. 농업용수의 합리적인 용수수급계획과 물관리 개선을 목적으로 하는 모형개발이 많이 이루어지고 있지만 다양한 수문학적 현상을 잘 재현하는 모형은 그리

많지 않다.

SWAT 모형은 유출, 토양수분변화, 지하수 충전량, 경작형태에 따른 비점오염원 해석, 동일한 토지 이용에서의 토양침투량 개별 산정이 가능하므로 윤환 관개 및 절수 등의 합리적인 관개계획을 수립하는데 매우 적용성이 높다. 또한 작물의 종류에 따른 증발산량을 산정하여 관개수량을 결정할 수 있으며 GIS/RS 기술과 연계하여 종합적인 농촌용수의 효율적인 관리가 이루어질 수 있는 준분포형 수문순환형 모형이다.

SWAT 모형에서 구분되는 소유역별로 여러 종류의 작물과 토양에서의 다양한 증발산을 반영할 수 있으며, 각 HRU에서 유출이 구분되어 계산되고, 유역의 총 유출량을 얻기 위한 흐름을 추정한다. 이러한 물수지방정식을 근간으로 하여 담수상태의 논에 대한 수문성분을 정량적으로 평가하기 위해서는 기본적으로 관개용수의 수원종류, 위치, 관개량, 관개시기 등이 고려되고 있다.

SWAT 모형을 이용하게 되면 토지이용별로 작물 생장을 위한 인위적인 용수공급이 가능하고, 우리나라의 논과 같이 담수채배를 위한 논에 대한 수문성분을 제어할 수 있다. 그러나 SWAT 모형에서 제공하고 있는 관개관련 모듈에는 담수채배를 주로 하는 우리나라의 용수관리 특성을 반영할 수 없는 등 몇 가지 문제점을 내포하고 있다. 즉, 담수상태의 논에 대한 수문성분 해석에 있어 그 해석 절차와 담수방법, 관개용수 공급방법 등의 모듈이 원활하게 연계되지 않으며, 담수상태의 증발산량 산정 등의 문제가 있음을 알 수

있다.

관개기간중 일정 기간동안 연속적으로 관개하는 우리나라의 관개특성상 모형의 모의를 위한 입력자료 및 매개변수의 설정이 모형의 성능을 평가하는 중요한 요인이 된다. 이 기사에서는 관개지구를 포함하는 농촌유역에서의 SWAT 모형의 적용을 위해 개발된 SWAT-AGRIMAN의 특성을 기술하고, 실제 농촌유역에 적용을 통한 활용방안을 검토해보고자 한다.

## 2. 모형의 구조

### 2.1 기본구조

SWAT 모형에서 제공하는 담수상태의 HRU (Hydrologic Response Unit)에 대한 해석은 관개용수의 공급과 시비, 제초, 방제 및 작물생장관리 등을 통해 이루어진다. 관개용수의 공급은 자동관개와 계획관개로 나누어진다. 먼저 자동관개는 천층대수층과 심층대수층 및 유역외부에서 관개가 이루어질 때 적용할 수 있으며, 작물생장에 필요한 토양수분량을 먼저 산정하여 관개용수를 공급하여 토양층의 수분이 항상 포장용수량에 이르도록 구성되어 있다.

계획관개는 하천과 저수지를 관개용수의 수원으로 이용할 때 적용할 수 있으며, 우리나라 벼재배와 같이 논에서의 담수가 가능하도록 구성되어 있다. 물론 자동관개 기능을 이용하더라도 담수상태의 논지역을

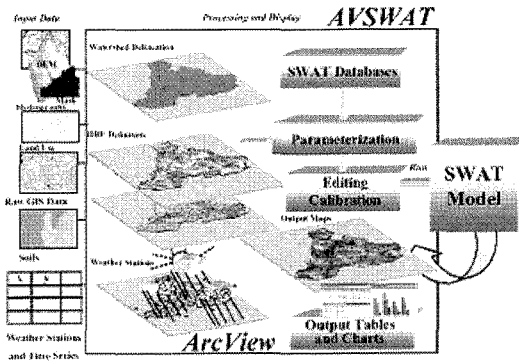


그림 1. SWAT 모형의 개요

표 1. 관개용수 공급을 위한 HRU 입력자료

변수명	내 용
IRR	- 관개용수 수원 종류 : 하천, 저수지, 관정 등
IRRNO	- 관개용수 수원의 위치(하천지류, 소유역, 저수지 번호)
FLOWMIN	- 하천의 최소유량(minimum in-stream flow) - 관개용수량은 FLOWMIN 이상의 경우에만 가능
DIVMAX	- 하천의 최대 관개용수량 - 하천에서 HRU로 취수되는 양은 DIVMAX를 초과할 수 없음
IPOP	- HRU에서 담수여부 결정 - 해당 HRU를 저류지역으로 지정함으로써 담수상태 모의가능
POT_VOLX	- 최대 담수량 설정(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )
POT_VOL	- 현재 담수량 설정(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )

모의할 수는 있으나, 담수량과 관개량에 대한 사용자의 임의 조작이 제대로 이루어지지 않는 문제점을 가지고 있다. 그림 1은 SWAT 모형의 기본적인 구조를 나타내고 있다.

#### 2.1.1 HRU 성분

토지이용도와 토양도의 중첩을 통해 구축된 HRU의 지형자료에 논지역의 관개용수 공급을 위한 여러 가지 매개변수의 입력을 더해 관개용수의 공급이 이루어지게 된다. 기 구축된 HRU의 특성은 토지피복상태가 논지역이라는 것만 고려된 상태로 구축되어 지므로, 이에 대한 관개용수 공급은 HRU의 입력자료의 지정을 통한 세부적인 명령으로 반영이 가능하다. 관개용수의 공급을 위한 HRU의 세부적인 명령은 관개용수의 수원의 위치, 종류 뿐만아니라, 담수 여부, 최대 관개량 및 최대 담수량 등을 포함한다. SWAT에서 논에서의 용수공급을 위한 HRU의 입력 자료는 표 1에 나타내고 있다.

#### 2.1.2 MGT 성분

논밭의 작물은 생장과 동시에 또는 그보다 먼저 작물이 생장할 수 있는 조건이 해당지역에 갖추어져야 한다. 지금까지 국내에 소개되고 사용되어지고 있는 수많은 모형에서는 작물생장에 필요한 토양수분, 생육단계, 비료, 농약 등 제반 관리기능을 고려하지 못

표 2. SWAT모형의 관리기능(Management operation)

MGT_OP	관리기능	내 용
1	planting/beginning of growing season	작물종류, 생장시점, 수확지수 등 입력
2	irrigation operation	관개용수량, 관개일시(월, 일)
3	fertilizer application	시비일시(월, 일) : 비료종류 지정
4	pesticide application	살충제 살포 일시(월, 일) : 살충제종류 지정
5	harvest and kill operation	수확일시(월, 일) : 수확과 동시 작물소멸
6	lillage operation	경운일시(월, 일) : 경운방법 지정
7	harvest only operation	수확일시(월, 일) : 수확지수, 효율 지정
8	kill/end of growing season	HRU의 작물생장 중단 일시(월, 일)
9	grazing operation	건초의 수확일시(월, 일), 수확지수 지정
10	auto irrigation initialization	자동관개(월, 일) : 수분스트레스 지정
11	auto fertilizer initialization	자동시비(월, 일) : 질소스트레스 지정
12	street sweeping operation	도로 청소시기(월, 일) : 오물제거효율 지정
13	release and impound	방류 및 담수 시기(월, 일)
0	end of year rotation flag	공란 설정(더 이상의 관리기능이 없음)

하고 있는 실정이다.

SWAT 모형은 작물생육단계를 고려하여 매년 반복되는 작물생장 시점 및 종점, 시비, 방제, 관개, 논에서의 담수 및 저류시기, 작물의 수확 및 소멸 등 총 14가지의 관리기능을 포함하고 있어 우리나라의 논지대를 포함하는 경작지의 수문성분 해석에 아주 적합하다고 하겠다. 특히 논에서의 비재배에 관계되는 저수 및 방류기능, 관개용수 공급 기능은 필수적인 요소라고 하겠다. SWAT 모형에서 다루고 있는 관개용수 공급과 관련된 HRU의 제어명령 및 입력자료는 표 2에 나타난 바와 같다. SWAT 모형의 관리기능에서는 살충제, 비료, 경운 등 종류 및 방법은 데이터베이스로 입력되어 있어 현장에서 이루어지는 방법을 선택하여 지정할 수 있도록 설계되어 있다.

## 2.2 SWAT 모형 개선

SWAT 모형의 적용에 있어 논지역에 대한 관개량의 제어에 있어 과다한 용수를 공급하게 되어 논 HRU의 최대담수량을 초과하는 물은 하천유출로 이어지게 되어 최대담수량을 얼마로 설정하는 것이 SWAT 모형의 성능을 나타내는 데 있어 중요한 요인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 SWAT 모형의 관개용수 공급과 제어기능을 개선한 SWAT-AGRIMAN에서는 관개량 제어, 논 HRU의 담수면적 산정, 침투량과 토양수분 추정, 증발산량 산정 과정 등에 대하여 우리나라 농촌유역의 수문해석이 가능하도록 반영하였다. 다음 표 3에는 SWAT 모형과 SWAT-AGRIMAN 의 논 HRU의 해석을 위한 주요 변경내용을 보여주고 있다.

표 3. SWAT 모형과 SWAT-AGRIMAN의 주요 기능 개선

구 분	SWAT	SWAT-AGRIMAN
담수량 제어	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 일정량 관개</li> <li>- 관개량 제어 불능</li> </ul> $IRR_{applied} = \text{Min}(IRR_{available}, IRR_{fixed})$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 현재의 담수심 고려</li> <li>- 필요수량 관계</li> </ul> $S_{need} = S_{max} - S_i$ $S_{need}, S_i = f_r(S_{-n}, pcp, seep, ET)$ $IRR_{control} = \text{Min}(S_{need}, IRR_{available}, IRR_{fixed})$
담수면적	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 원추형(유역경사를 고려)</li> </ul> $SA = \frac{\pi}{10^4} \cdot \left( \frac{3}{\pi} \cdot \frac{V}{slope} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 계단식 형태</li> </ul> $SA = fr \cdot Area_{hru}$
침투량 산정	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 토양층간 수분이동</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 토양층 포화외 침투과정 수정</li> </ul>
증발산량 산정	$ET = ET_{plant} + ET_{soil}$	$ET = ET_{plant} + ET_{soil} + ET_{water}$

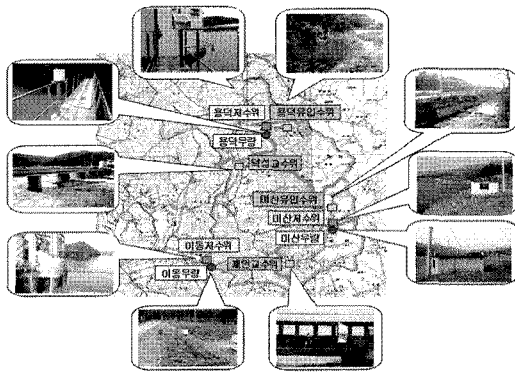


그림 2. 유역도 및 관측기 위치 및 전경

### 3. SWAT-AGRIMAN의 적용

#### 3.1 대상유역

SWAT-AGRIMAN의 적용을 위한 대상유역은 경기도 용인시, 평택시에 위치하고 있는 이동저수지 관개지구이며, 농업용수 관리 전문기관인 한국농어촌공사

농어촌연구원에서는 경기도 평택의 이동저수지와 그 관개지구인 이동지구를 2000년부터 관개용수수급 해석을 위한 시험지구를 설치 운영하여 시험지구 현장 계측 및 분석을 통하여 유역, 수원공, 관개지구의 유출량, 저수량, 관개량, 배수량을 포함한 다년간의 계량화된 물관리 기초자료를 축적하고 이를 용수수급 계획 및 물관리 개선 등 관련 연구에 활용하고 있다.

#### 3.2 입력자료

대상유역의 주수원공인 이동저수지를 중심으로 상류에 용덕저수지, 미산저수지 2개의 저수지가 상류부에 위치하고 있으며, 대상유역 전체를 대상으로 모형을 적용하였을 때는 총대상면적이 159.7 km<sup>2</sup>이고 소유역이 21개로 분할되어 개별 소유역에 대한 농촌용수의 거동을 분석하는 데 있어 적용의 어려움이 많은

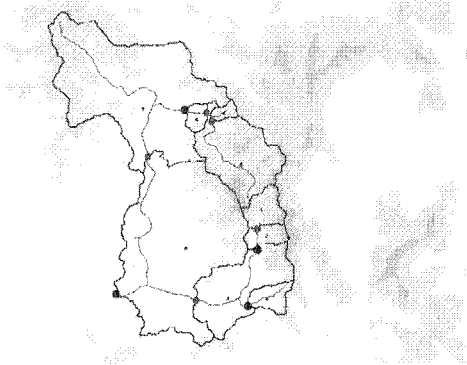


그림 3. DEM 및 관측지점

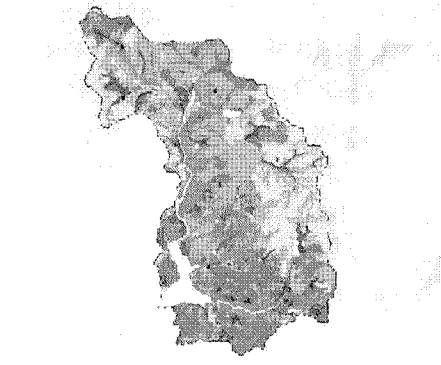


그림 4. 토지피복도

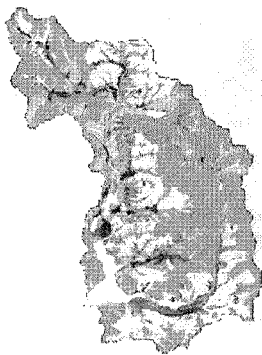


그림 5. 정밀도양도

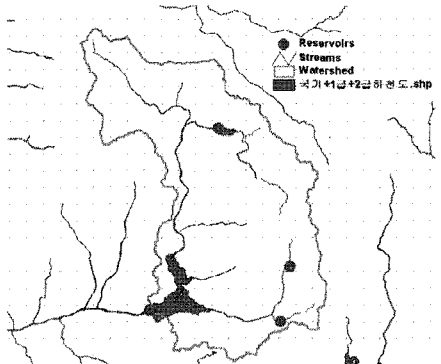


그림 6. 하천도

실정이었다. 이번 연구에서는 전체 지역을 대상으로 한 모형의 적용보다 조금 더 세분화하여 SWAT모형의 거동을 분석하고자 한다.

대상유역내에 단일저수지로 구성하고 있는 유역, 하천, 관개지구 등에 대한 검토를 통하여 미산저수지 유역을 선정하였다. 이 지역은 전체 시험지구 면적의 약 14%인 22.2 km<sup>2</sup>에 달하고 있으며, 수해면적은 149.3 ha이다. 모형의 적용을 위한 기상자료는 그림 1에 나타난 바와 같이 4지점의 관측자료를 이용하였고, 그 외 필요한 자료는 기상청의 수원관측소의 자료를 이용하였다.

### 3.3.1 용수공급량 및 담수심 변화

#### 가. 용수공급량 분석

관측된 모니터링 자료로부터 SWAT-AGRIMAN의 일별 용수공급조건을 도출하기 위하여 월별 용수공급량 및 관개일수로부터 일별 평균관개량을 산정하였다.

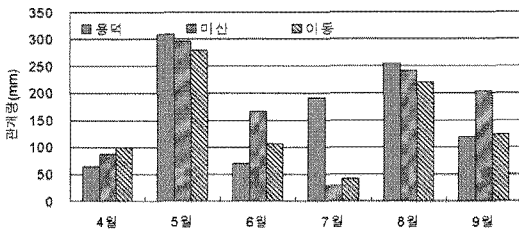


그림 7. 월별 용수공급량

#### 나. 담수심 변화

대상지구에서 관측된 담수심 자료는 다음의 그림 8과 같다. 논에서 벼의 생육에 따라 유지되는 담수심은 일정한 값을 유지하는 것이 아니라 강우 혹은 관

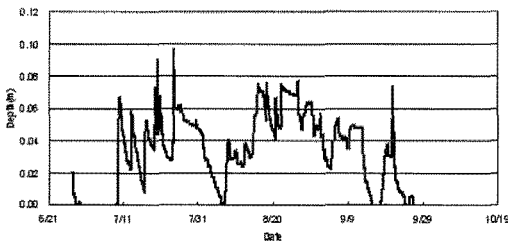


그림 8. 대상지구내 담수심 측정결과

개에 따라 증가하고, 평상시 일정량씩 감소하는 형태로 유지되며 최대 100mm 내외로 유지되는 특징을 나타내었다. 따라서 SWAT-AGRIMAN의 적용을 위해서 관측자료로부터 월별 평균담수심을 산정하였고 이를 모형의 적용에 이용하였다.

### 3.4 모형의 적용

시험지구내 선정된 저수지의 저수량 변화를 검토한 결과 관측된 일별 저수량과 SWAT 모형과 SWAT-AGRIMAN에 의해 산정된 저수량의 변화가 유사한 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다. 기존의 생육단계별로 필요한 적정담수심을 단시간에 공급하는 것으로 모의하였던 것에 비해 일별로 평균공급량을 공급하도록 입력자료를 구축하여 모의함에 따라 실제 용수공급에 따른 저수량 변화와 유사한 결과를 얻은 것으로 판단된다. 저수량은 두 모형에서 실측값과 변화형태가 유사하여 잘 모의하고 있는 것으로 나타나고 있으나 그림 9에 나타내고 있는 바와 같이 SWAT 모형은 관개기에 실측값과 모의값이 많은 차이를 보여주었다. 이는 SWAT 모형이 가지는 용수공급을 제어하는 기능과 논에서의 물의 거동에 대한 해석이 실제와 다른 점이 나타나고 있는 것으로 판단된다. 이러한 문제점은 중간낙수시기, 저수지 운영을 위한 사전방류 등의 인자들을 추가적으로 고려하여야 하며 비재배를 위한 용수공급에 대한 신중한 검토가 필요함을 알 수 있었다.

일별 저수량 측정자료에 의한 상관분석 결과

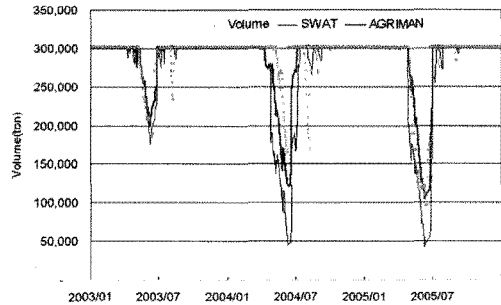


그림 9. 대상지구내 농업용저수지 일별 저수량 모의 결과

SWAT과 SWAT-AGRIMAN의 R2가 각각 0.504, 0.580으로 나타나 SWAT-AGRIMAN의 의한 결과가 좀더 나은 결과값을 보이는 것으로 나타났으며, 수원공의 월별 저수량을 비교한 결과 최소값을 보인 2004년 6월의 실제 저수량이 123,200톤으로 SWAT 모형이 48,080톤, SWAT-AGRIMAN이 94,080톤으로 산정되어 SWAT-AGRIMAN에 의해 관개용수로 공급에 따른 저수상황을 모의할 수 있을 것으로 판단되었다.

#### 4. 결론

장기유출모형인 SWAT 모형은 담수상태의 작물 재배를 위한 관개용수의 공급 등의 기본적인 틀을 가지고 있으나 그 구조와 해석방법상 결함을 내포하고 있다. 본 연구에서는 이러한 결함을 제거하고 오류를 수정, 보완하여 우리나라의 논농사의 특성을 합리적으로 모사할 수 있는 SWAT-AGRIMAN을 소개하고, 그 적용성을 평가하였다.

이 지구는 관개지구의 환원수량, 저수지의 여수로 방류량 및 용수 사용량 등에 따라 저수지의 유입하천

및 하류하천의 장기유출량에 복잡한 형태로 영향을 미치고 있다. 이러한 농업용수 이용에 따른 농촌유역의 유출량, 저수량, 관개량 등 각 수문요소에 대한 정량적 분석이 필요하다. 본 연구에서는 단위유역에 대한 모형의 거동을 분석한 결과 농촌유역내에서의 수문성분의 검토가 가능하였으며, 이로부터 본 연구에서 목표로 하고 있는 농촌용수의 물수지 해석 및 수원공의 적정운영을 위한 모형으로 사용이 가능할 것으로 판단되었다.

따라서 SWAT-AGRIMAN은 논지역을 포함한 유역의 유출거동특성과 농업용수 이용에 따른 수문성분 변화 양상을 파악하는 데 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 농업지역의 순용수량과 수문순환 과정을 정량적으로 평가하고, 농업용수로 인한 수문자료의 불확실성 제고에 많은 기여할 것으로 기대된다.

#### 사사

본 기사는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업의 연구성과(과제번호 2-2-3)로서 연구비 지원에 감사합니다. 🍀

#### 참고문헌

1. 김남원, 이병주, 이정은, 2006, SWAT 모형을 활용한 충주댐 유역의 용설 영향 평가, 한국수자원학회 논문집, 제39권, 제0호, pp. 833-843.
2. 농업기술연구소, 1986, 한국의 답토양, 농업기술연구소
3. 문종필, 김태철, 2006, SWAT2000모형을 이용한 갑천수계의 소유역별 유출량 추정, 한국농공학회논문집, 제38권, 제5호, pp. 29-38.
4. 김동주, 박기욱, 조진훈, 2008, SWAT 모형을 이용한 농업용 저수지 관개특성 분석, 2008년도 한국수자원학회 학술발표회 논문집.
5. 이용준, 박민지, 박기욱, 김성준, 2008, 농업용 저수지 운영을 고려한 SWAT 모형의 수문학적 거동 분석, 한국지리정보학회지, 제11권, 제1호, pp.20-30.
6. Arnold, J.G., R. Sirinivansan, R.S. Mittiah, and J.R. Williams, 1998, Large area hydrologic modeling and assessment, Part I: Model development, Journal of the American Water Resources Association (JAWRA), 34(1), pp. 73-89.