

## 토양특성 변화에 따른 수문성분 민감도 분석

Sensitivity Analysis of Hydrologic Components According to  
Change Characteristic Soil

김남원\*, 이병주\*\*, 이정은\*\*\*

Nam Won Kim, Byong Ju Lee, Jeong Eun Lee

### 요    지

최근 유역단위의 수자원 계획 및 관리를 비롯하여 물 배분 문제 등에 관심이 집중되면서 장기유출모의 또한 국내에 많이 적용되고 있는 실정이다. 장기유출 모의시 가장 중요시 되는 부분 중 하나는 정확한 토양 수분 모의이며 이는 다양한 토양특성인자와 매우 밀접한 관계가 있을 뿐 아니라 지표면 유출량, 중간 유출량, 지하수 유출량 및 증발산량에도 큰 영향을 주게 된다. 통상 토양수분 함양량을 비롯하여 수문성분 발생량에 영향을 주는 대표적인 토양 매개변수는 토양의 깊이, 용적밀도, 포화수리전도도, 가용토양수분량, 포장 용수량, 영구위조점 등이 있다. 본 연구에서는 이러한 토양 특성인자의 변화에 따른 수문성분의 변동성을 정량적으로 평가하기 위해 토양 매개변수들을 물리적으로 고려할 수 있으며 최근 국내에 많이 활용되고 있는 SWAT 모형을 이용하여 토양 매개변수 변화에 따른 수문성분 변화량을 분석하고자 한다.

핵심용어 : 토양특성인자, 수문성분, SWAT

### 1. 서 론

우리나라 하천은 하상경사가 매우 급하고 6~9월에 강우량이 집중되어 여름철에 홍수문제가 빈번하게 발생하고 있다. 반면 봄, 겨울에는 수량 부족으로 가뭄이 발생하는 등 계절적으로 일정치 못한 하천 유량으로 인해 수자원관리에 여러 가지 어려움이 많다. 또한 도시화, 산업화로 인한 인구의 집중과 토지이용의 고도화에 따라 다량의 용수가 필요하게 되었다. 이에 따라 수자원의 효율적인 이용과 관리가 무엇보다도 중요하며 이를 위해서는 수자원 부존량을 월별, 지역별로 정확하게 파악할 수 있는 기술 확립이 요구된다(김남원 등, 2007).

이러한 기술을 확립하기 위해서는 토양의 물리적인 특성을 반영하여 공간적으로 수문성분 모의를 수행하는 모형에 대한 연구가 많이 수행되어야 하나 공간자료의 부재 등으로 인해 과거 우리나라에는 총괄형 개념적 모형을 이용한 연구가 많이 수행되어 온 것이 사실이다. 따라서 본 연구에서는 토양을 중심으로 물의 거동을 공간적으로 모사할 수 있는 준 분포형 장기유출모형인 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)을 이용하여 토양특성에 따른 수문성분 변화량을 정량적으로 분석하고자 한다.

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원 · E-mail : nwkim@kict.re.kr

\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : bilee@kict.re.kr

\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : leus22@kict.re.kr

## 2. SWAT 모형 이론

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Arnold 등(1993)에 의해 개발된 유역모델로 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동을 예측하기 위해 개발되었다.

유출거동은 강우의 변화는 물론 지형, 지질적인 형태에 크게 영향을 받고 있기 때문에 장기간의 수문학적 모의를 위해서는 기상, 토양형태, 토지이용, 토지피복, 지형 및 지질자료 등에 대한 정보가 필요하며, 이에 따라서 시간적인 해석은 물론 공간적인 수문성분의 모의가 이루어진다. 이러한 성분별 모의를 위해 전체 유역을 소유역으로 구분하고, 각 소유역에 대해 동일한 토양특성과 토지피복형태를 갖는 면적별로 구분하여 동일한 유출현상을 갖는 단위로 나타내는데, 이 단위를 수문학적 반응단위(Hydrologic Response Unit; 이하 HRU)라 한다. 따라서 SWAT 모형은 모든 수문성분에 대해서 각 HRU별로 모의를 하며 모의 결과 값은 해당 소유역의 주하도 유입량이 된다. 이렇게 각 소유역에 대해서 계산단위시간동안 해당 HRU들로부터 들어온 주하도 유입량은 하도추적을 통해 각 소유역 유출량이 된다.

그림 2는 하나의 HRU에서 강수(PCP)로 인한 지표수( $Q_{sur}$ ), 토양수 또는 측방흐름( $Q_{lat}$ ), 침투량( $Q_{sep}$ ), 지하수 함양량( $Q_{rchrg}$ ), 지하수( $Q_{gw}$ ), 증발산량(ET) 등의 수문성분 거동형태를 도시한 것이다. SWAT 모형에서는 수정 SCS 방법을 이용하여 지표수를 산정하고 강수량에서 지표수를 뺀 나머지 양은 토양표면 아래로 침투하게 된다. 이 양은 기존 토양수분량에 추가되어 포장용수량(field capacity)을 초과하는 토양수분량은 중력수로 정의되어 측방흐름과 침투량으로 이동하게 된다. 나머지 토양수분량은 식생과 기상조건에 따라 영구위조점(permanent wilting point)에 도달할 때까지 모관수로 정의되어 증발산으로 토양총내에서 제거된다. 마지막 토양총에서의 침투량은 지하수 함양량으로 얇은 대수층(shallow aquifer)에 저장되어 있는 지하수 함양량에 추가된다. 이 양 중 일정부분은 하천으로 회귀하는 지하수로, 또는 깊은 대수층(deep aquifer) 및 토양총으로 이동한다.

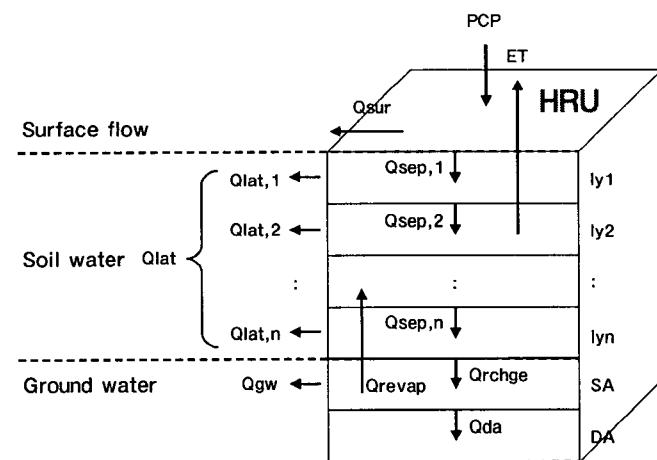


그림 1. HRU의 수문성분 모의 모식도

## 3. 토양 특성인자 산정

앞서 소개한 바와 같이 SWAT 모형은 토양총을 중심으로 지표수, 토양수, 지하수, 증발산 등의 수문성분을 모의하므로 토양 특성에 대한 변수들은 각 수문성분량에 상당한 영향을 주게 된다. 표 1은 SWAT 모형에서 요구하는 각 토양특성인자와 각 인자의 하한치와 상한치를 나타낸 것으로 본 연구에서는 모형 적용을 위해 농업과학기술원 (과학기술부, 2004)의 연구결과를 이용하여 토양특성인자를 구축하였다.

표 1. 토양특성인자 및 적용범위

변수명	변수 설명	단위	하한치	상한치	적용범위
HYDGRP	수문학적 토양군	A/B/C/D	0.00	0.00	유출
SOL_ZMX	최대 근원 깊이	mm	0.00	3500.00	유출
ANION_EXCL	음이온 반발로 인한 토양의 공극비	-	0.01	1.00	수질
SOL_Z	토양표면으로부터 각 토양층 깊이	mm	0.00	3500.00	유출/수질
SOL_BD	각 토양층의 습윤용적밀도	Mg/m <sup>3</sup>	1.10	2.50	유출
SOL_AWC	각 토양층의 가용토양수분능	mm/mm	0.00	1.00	유출
SOL_K	각 토양층의 포화수리전도도	mm/hr	0.00	2000.00	유출
SOL_CBN	각 토양층의 유기탄소 함양	%	0.05	10.00	수질
CLAY	각 토양층의 점토 함양비	%	0.00	100.00	유출
SILT	각 토양층의 실트 함양비	%	0.00	100.00	유출
SAND	각 토양층의 모래 함양비	%	0.00	100.00	유출
ROCK	각 토양층의 자갈 함양비	%	0.00	100.00	유사
SOL_ALB	습윤토양 반사도	-	0.00	0.25	유출
USLE_K	토양침식인자	a)	0.00	0.65	유사

a)  $0.013(\text{ton m}^2 \text{ hr})/(\text{m}^3\text{-ton cm})$

#### 4. 토양 매개변수 민감도 분석

토양 매개변수가 유출에 미치는 영향을 파악하기 위해 구축된 토양특성인자들을 SWAT 모형에 적용하여 민감도 분석을 수행하였다. 대상유역은 남한강에 위치한 충주댐 상류유역으로 선정하였으며 소유역은 수자원단위지도 (건설교통부, 2002)에서 제시한 단위유역을 토대로 7개로 구분하였다(그림 2). 고려된 매개변수는 가용토양수분능(AWC), 용적밀도(SOL\_BD), 포화수리전도도(SOL\_K), 토양깊이(SOL\_Z)이며  $-80\% \sim +100\%$  범위 내에서  $\pm 20\%$  단위로 증감시켜 지표수, 측방흐름, 지하수, 총유출량, 증발산량의 변화량을 분석하였다.

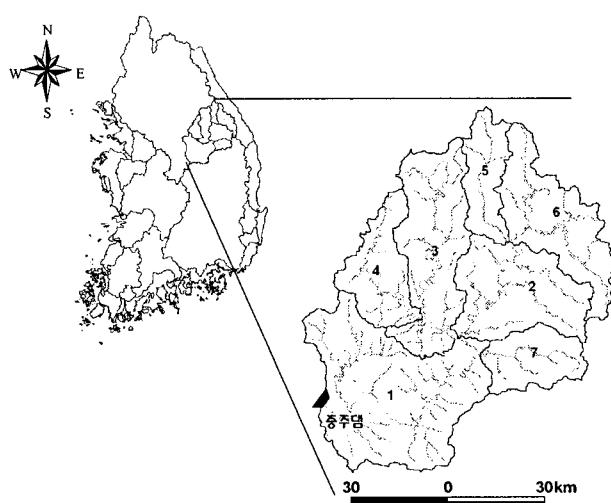


그림 2. 충주댐 상류유역 및 소유역 구분

그림 3은 민감도 분석 결과를 도시한 것으로서 대체로 4개 매개변수 모두 수문성분의 변화가 크게 나타남을 알 수 있다. AWC의 경우 값이 감소함에 따라 모관수의 감소로 인해 증발산량은 감소하고 총유출량은 증가하며 값이 커짐에 따라 반대로 증발산량은 일정부분 증가하고 총유출량은 감소하는 것으로 나타났다. SOL\_BD의 경우 값의 변화에 따라 총유출량과 증발산량의 변동폭은 작게 나타나나 지표수, 측방흐름 및 지하수에 의한 유출량은 변동폭이 큰 것으로 나타났으며 SOL\_BD 값이 60% 이상 커질 경우는 일정한 값에 수렴하는 것으로 나타났다. SOL\_K의 경우 값이 작아짐에 따라 측방흐름에 의한 유출량과 총유출량은 작아지고 지표수와 지하수 유출량과 증

발산량은 증가하는 것으로 나타나며, 값이 증가할 경우 감소하는 경우와 반대되는 현상이 발생함을 알 수 있다. SOL\_Z는 값이 작아짐에 따라 전체 토양수분함량이 감소하고 이로 인해 증발산량과 지표면 유출량이 감소하는 것을 알 수 있으며, 값이 커짐에 따라 반대 현상을 보이나 각 성분별 변동폭은 작은 것으로 나타났다.

수문성분별 최대 변화 정도를 파악하기 위해 표 2와 같이 -80%와 +100%에 대한 수문성분 변화율을 나타내었다. 지표수와 측방흐름 유출량은 SOL\_BD에서 각각 56.49%, 60.92%로 변화율이 가장 크게 나타났으며 지하수 유출량과 총유출량 및 증발산량은 SOL\_AWC에서 각각 87.75%, 25.32%, 40.84%로 가장 큰 변화율을 보이는 것으로 나타났다.

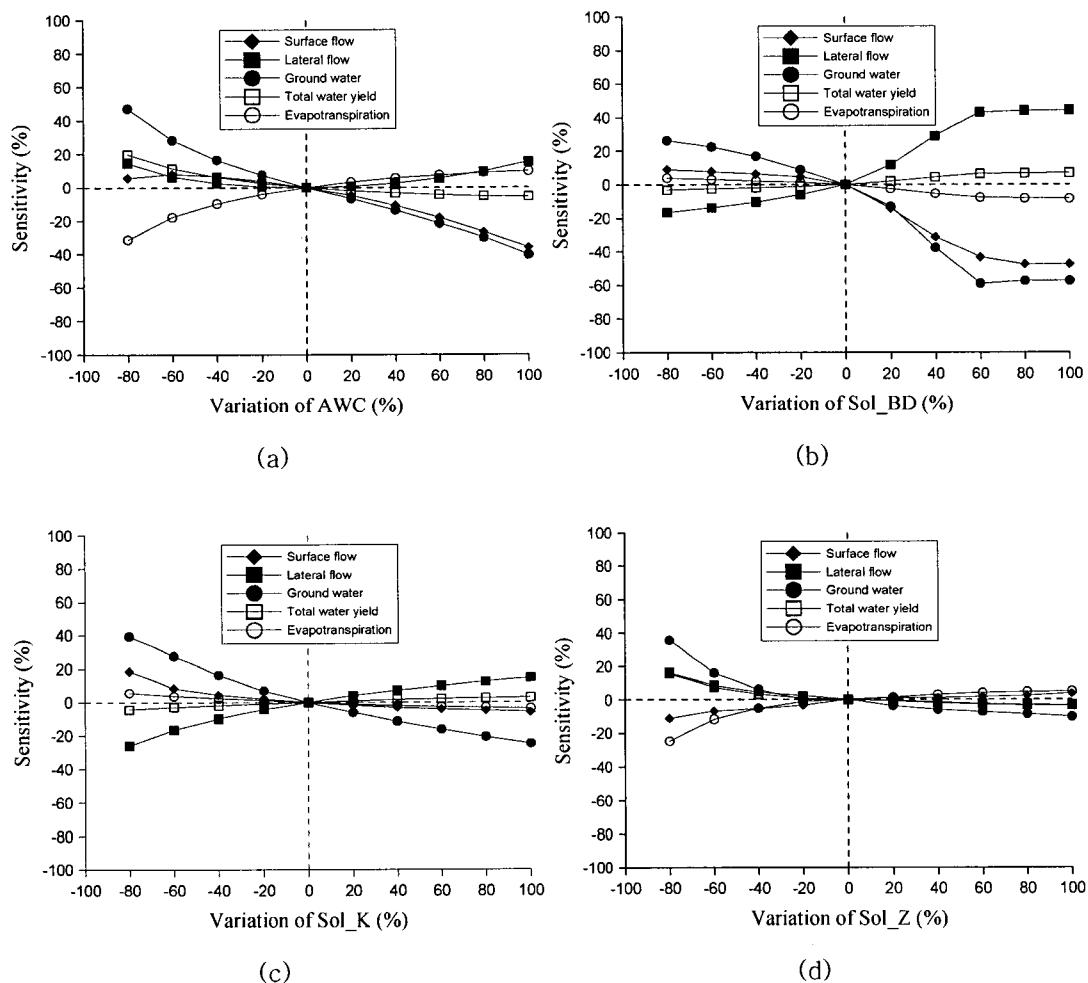


그림 3. 토양 매개변수 민감도 분석 결과

표 2. 토양 매개변수 변동에 따른 수문성분 최대 변화율

구분	지표수		측방흐름		지하수		총유출량		증발산량	
	-80%	+100%	-80%	+100%	-80%	+100%	-80%	+100%	-80%	+100%
SOL_AWC	5.64	-36.28	14.27	15.07	47.20	-40.55	19.71	-5.61	-31.30	9.54
SOL_BD	9.01	-47.48	-16.69	44.23	26.23	-57.44	-3.14	6.78	3.94	-8.44
SOL_K	18.46	-5.90	-25.98	14.90	39.53	-24.79	-4.40	2.90	5.52	-3.61
SOL_Z	-11.11	3.71	16.44	-3.17	35.63	-10.22	15.63	-3.45	-24.73	5.11
최대변화률	56.49%		60.92%		87.75%		25.32%		40.84%	

## 5. 결 론

지역에 따른 공간적인 수자원 부존량을 파악하고 수자원계획을 수립하기 위해서는 해당 지역의 고유특성인 토양특성을 파악하고 이에 따른 수문성분의 거동 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다 하겠다. 본 연구에서는 토양의 물리적인 특성을 기반으로 지표수, 토양수, 지하수, 증발산 등의 수문성분을 모의할 수 있는 준 분포형 장기유출 모형인 SWAT을 이용하여 토양특성인자에 따른 수문성분의 민감도 분석을 수행하였다. 이를 위해 우리나라 토양통에 대한 농업과학기술원의 연구결과를 토대로 모형에서 요구하는 토양특성인자를 구축하였으며 가용토양수분능, 용적밀도, 포화수리전도도, 토양깊이에 따른 민감도 분석 결과 지표수와 측방흐름 유출량은 용적밀도에서 각각 56.49%, 60.92%로 변화율이 가장 크게 나타났으며 지하수 유출량과 총유출량 및 증발산량은 가용토양수분능에서 각각 87.75%, 25.32%, 40.84%로 가장 큰 변화율을 보이는 것으로 나타났다.

본 연구에서 제시한 결과는 토양특성에 따른 수문성분량을 정량적으로 분석할 수 있을 뿐만 아니라 지역적 갈수 및 홍수특성과 수자원 잠재부존량을 파악하는데 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

## 감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 2-2-2)에 의해 수행되었습니다. 지원에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부(2002). 수자원단위지도 구축.
2. 과학기술부(2004). 수자원의 지속적 확보기술개발사업-지표수 수문성분 해석기술 개발 보고서, 한국건설기술연구원.
3. 김남원, 이병주, 이정은, 정일문, 김철겸, 이정우, 하상건(2007). "지표수 수문해석과 토양특성과의 관계", 수문해석을 위한 토양수리특성과 토양전자지도의 활용, 농업과학기술원, pp. 57-70.
4. Arnold, J. G., P.M. Allen, and G. Bernhardt(1993). A comprehensive surface- groundwater flow model. Journal of Hydrology. Vol. 142. pp.47-69.