

# WEP 모형을 이용한 경안천 유역 토양수분 모의

## Simulation of Soil Moisture in Gyeongan-cheon Watershed Using WEP Model

노성진\*, 김현준\*\*, 김철겸\*\*\*, 장철희\*\*\*\*

Seong Jin Noh, Hyeon Jun Kim, Cheol Hee Jang

### 요 지

토양수분은 식물의 생장 및 가용수자원 산정 등에 있어서 중요한 요소로서 토양층 상부의 수 m내에 존재하는 수분의 양을 일컫는다. 토양수분과 토양수분의 공간적 시간적 특징들은 증발, 침투, 지하수 재충전, 토양 침식, 식생 분포 등을 지배하는 중요한 요소이다. 강우 등으로 인한 지면과 지표하에서의 순간적인 포화공간의 형성 및 유출의 생성 등을 포함하는 과정과 증발산 등은 모두 비포화대(vadose zone) 혹은 토양층에서의 토양수분의 함량에 크게 의존하게 된다(이가영 등(2005)).

분포형 수문모형은 유역을 격자단위로 세분화하여 매개변수를 부여하고, 증발산, 침투, 지표면유출, 중간유출, 지하수유출, 하도 흐름 등 여러 가지 수문요소를 해석하는 종합적인 수문모형이다. 지표면에 내린 강우가 증발, 침투, 유출될 지는 토양수분의 함량에 크게 의존하게 되며, 따라서 토양수분에 대한 적절한 모의가 분포형 수문모형의 정확도를 좌우하는 핵심이라 할 수 있다. 본 연구에서는 분포형 수문모형인 WEP 모형을 경안천 유역(유역면적: 575km<sup>2</sup>, 유로연장: 49.3km)에 적용하여 토양수분의 시공간분포를 모의하였다.

지점별 토양수분 모의결과, 토양 매개변수의 최대, 최소값 내에서 적절히 모의됨을 확인하였으나, 관측값이 없어 실질적으로 타당하지 여부는 검증하지 못하였다. 토양수분비율, 연간 증발산량, 지표면 유출량 공간분포를 비교한 결과, 토양수분비율이 연간 증발산량 모의에 직접적인 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 일부 격자에서는 토양수분이 지나치게 높게 모의되었는데, 지하수위와 관련있는 것으로 보이며, 구축된 자료가 부족한 지하대수층에 대한 정보부족이 토양수분 계산에도 영향을 준 것으로 보인다. 본 연구는 WEP 모형의 토양수분 해석능력에 대한 시험적용에 그 의의가 있으며, 향후 토양 및 지표하 매개변수 정보가 충분히 갖추어지고, 토양수분 관측결과 있는 대상유역에 대한 적용이 요구된다.

**핵심용어 : 분포형 수문모형, WEP 모형, 격자크기, 모의 시간 간격**

## 1. 서론

토양수분은 식물의 생장 및 가용수자원 산정 등에 있어서 중요한 요소로서 토양층 상부의 수 m내에 존재하는 수분의 양을 일컫는다. 토양수분과 토양수분의 공간적 시간적 특징들은 증발, 침투, 지하수 재충전, 토양 침식, 식생 분포 등을 지배하는 중요한 요소이다. 강우 등으로 인한 지면과 지표하에서의 순간적인 포화공간의 형성 및 유출의 생성 등을 포함하는 과정과 증발산 등은 모두 비포화대(vadose zone) 혹은 토양층에서의 토양수분의 함량에 크게 의존하게 된다(이가영 등(2005)).

분포형 수문모형은 유역을 격자단위로 세분화하여 매개변수를 부여하고, 증발산, 침투, 지표면유출, 중간유

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : [sjnoh@kict.re.kr](mailto:sjnoh@kict.re.kr)  
\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원 · E-mail : [hjkim@kict.re.kr](mailto:hjkim@kict.re.kr)  
\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 · E-mail : [cgkim@kict.re.kr](mailto:cgkim@kict.re.kr)  
\*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : [chjang@kict.re.kr](mailto:chjang@kict.re.kr)

출, 지하수유출, 하도 흐름 등 여러 가지 수문요소를 해석하는 종합적인 수문모형이다. 지표면에 내린 강우가 증발, 침투, 유출될 지는 토양수분의 함량에 크게 의존하게 되며, 따라서 토양수분에 대한 적절한 모의가 분포형 수문모형의 정확도를 좌우하는 핵심이라 할 수 있다. 본 연구에서는 분포형 수문모형인 WEP 모형을 경안천 유역(유역면적: 575km<sup>2</sup>, 유로연장: 49.3km)에 적용하여 토양수분의 시공간분포를 모의하고 결과를 분석하였다.

## 2. 모형의 개요

### 2.1 WEP 모형의 개요

WEP 모형은 일본의 토목연구소, 과학기술진흥사업단, Jia 등이 공동으로 개발한 물리적인 기반의 공간 분포형 모형(Physically Based Spatially Distributed)이다. WEP 모형은 격자 기반 모형으로 유역을 평면 격자로 분할하여 각각의 격자를 계산단위로 하며, 연직방향으로 표층, 과도층, 지하대수층으로 나누어진다. 수평 방향으로 표면류와 하도류는 각각 1차원 운동과 기법으로 추적되고 지하수 흐름은 각 층간의 함양, 침투, 양수량 등을 고려하여 2차원 해석을 하며, 이때 지표면, 하도와의 물 교환을 고려한다. 토지이용은 크게 수역, 나지-식생역, 불투수역 등의 세가지로 분류되며, 각 요소별로 다시 세부 분할된다.

### 2.2 WEP 모형의 토양수분 매개변수 및 모형화

WEP 모형에서는 표층 토양에서 지하수위까지를 수분전달층으로 설정하여 침투를 모의한다. 침투는 호우시와 비호우시로 구분하여 비호우시에는 Richard 식을, 호우시에는 Green-Ampt 식을 적용한다. 다음의 식과 같이 강우강도가 투수계수보다 작을 때는 비호우시로, 강우강도가 투수계수보다 클 때는 호우시로 간주된다. 이와 같은 차별적 적용을 통해 모의시 시간 효율을 높일 수 있다.

$$I \leq K_s \Rightarrow \text{Richard's Eq.} \quad (1)$$

$$I > K_s \Rightarrow \text{Green-Ampt method} \quad (2)$$

여기서,  $I$ : 강우강도,  $K_s$ : 포화투수계수이다.

Jia와 Tamai (1997)는 실제 강우의 다층 토양에서의 침투에 적용 가능한 "Generalized Green-Ampt 모형"을 제시하였고, 이 모형이 WEP 모형에 사용되었다. Green-Ampt 모형은 초기함수율이 낮은 균일한 토양층에 대하여 강한 강우 등으로 지표면이 담수 하는 경우에는 침입전선 (wetting front)이 형성된다고 가정하고 Darcy 법칙을 이용하여 침투현상을 표현하였다(土木研究所, 2002).

침투 관련 방정식에서 토양수분과 흡인압 관계 및 토양수분과 불포화투수계수의 관계는 다음의 Havercamp 식 (식 (3)) 및 Mualem 식 (식 (4))을 통해 계산된다.

$$\theta = \frac{\alpha(\theta_s - \theta_r)}{\alpha + (\ln(\phi))^\beta} + \theta_r \quad (3)$$

여기에서  $\theta$ : 체적함수율 [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>],  $\theta_s$ : 포화수분율 [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>],  $\theta_r$ : 잔류수분율 [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>],  $\phi$ : 흡인압 [cm/H<sub>2</sub>O],  $\alpha$ ,  $\beta$ : 상수이다.

$$K(\theta) = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^n \quad (4)$$

여기에서  $K_s$ : 포화투수계수 [cm/s],  $K$ : 불포화 투수계수 [cm/s],  $n$ : 상수이다.

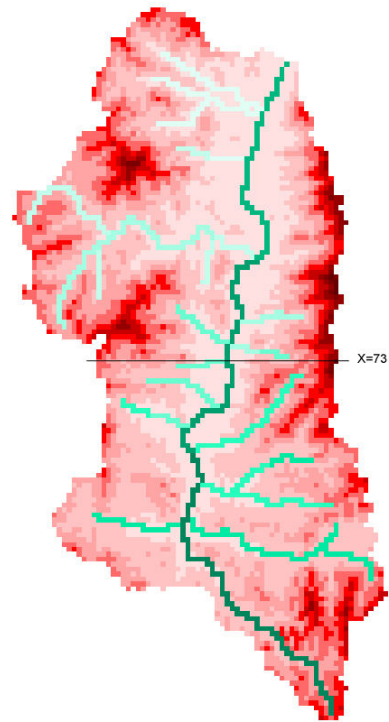
### 3. 대상유역 및 입력자료 구축

#### 3.1 대상유역

대상유역인 경안천 유역은 경기도 용인시, 광주시 등 1도 2시 11개 읍면을 포함하고 있으며, 총 73,310가구, 219,062명의 인구가 거주하고 있다. 유역면적은 575.32 km<sup>2</sup>, 유로연장은 49.30 km, 유역평균폭이 11.67 km인 중규모 하천이다. 유역의 토지이용현황은 임야 452.45 km<sup>2</sup> (79%), 주거지 24.37 km<sup>2</sup> (4%), 농경지 91.99 km<sup>2</sup> (16%), 기타 6.51 km<sup>2</sup> (1%)로 임야가 차지하는 비중이 높은 지역으로 고산준령은 없으나, 유역경사 28.8%로 비교적 급한 지세를 나타내고 있다 (건교부, 2001). 본 장에서는 경안 수위관측소를 출구지점으로 하는 유역에 대해 수문모의를 수행하였으며, 유역 면적은 256.16 km<sup>2</sup>이다.

경안천 유역의 연 평균 강우량은 1200.5 mm이고, 연 평균 기온은 10.9 °C, 연 평균 상대습도는 72%, 연 평균 계기증발량은 1020.2 mm로 우리나라의 평균적인 기후특성을 나타내고 있는 유역이다.

경안천 유역 및 인근유역에 위치한 기상청 및 건설교통부에서 관할하는 우량관측소는 남한산성, 광주, 경안, 모현, 포곡, 용인, 운학, 남곡 (이상 건설교통부) 및 수원, 이천, 양평 (이상 기상청)의 11개소가 위치하며, 수위관측소는 경안, 도평 2개소가 위치하고 있다.



#### 3.2 입력자료 구축

##### 3.2.1 지형자료

가로, 세로 200 m 격자를 기본 격자로 사용하여 대상유역인 경안천 유역 포함하는 11,388개 (동서 방향 78 × 남북 방향 146)의 사각형 격자망을 구성하였으며, 이 중 경안 수위표를 유역 출구로 하는 유역내 실 계산 격자수는 6,479개이다. 해석대상에 대한 공간정보를 제공하는 기본적인 틀인 수치고도모형은 환경부에서 구축된 1"간격 (약 30 m)의 자료를 원본으로 하였고, GIS Tool을 이용하여 가로, 세로 200 m의 격자로 재구성하였다. 그림 1은 모형에서 사용한 수치고도모형과 하천망의 위치를 나타낸다(건기연, 2005).

##### 3.2.2 표층토양 관련자료

표층토양 자료는 농촌진흥청의 정밀토양도를 활용하여 유역내 40개 토양통에 대한 자료를 구축하고, 다시 각 토양통별 토양층 자료 입력을 위해 USDA에서 분류하고 있는 12개 토성으로 구분하였다. 분류된 토양에 대해 투수계수, 잔류수분율, 포화수분율, 포장용수량, 단분자수분율,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $n$  등의 매개변수가 요구되며, 모형에 적용된 토양종류별 물리적 특성치는 표 1과 같다.

표 1. 토성별 물리적 특성치

Soil type	hydraulic conductivity(m/s)	Saturated moisture content	Residual moisture content	Field capacity	mono-molecular moisture content	alpha	beta	n
loamy sand	2.92E-04	0.39	0.04	0.125	0.015	380	4.3	6
sand	1.79E-03	0.375	0.045	0.091	0.015	650	5.7	5
sandy loam	1.06E-04	0.385	0.039	0.207	0.015	500	3.9	7
loam	3.35E-05	0.399	0.061	0.27	0.015	2,500	4.45	8
silt	1.22E-04	0.489	0.05	0.3	0.015	15,000	5.5	9
silt loam	5.07E-05	0.439	0.065	0.33	0.015	60,000	6	10
sandy clay loam	3.66E-05	0.374	0.063	0.255	0.015	500	3.5	12
clay loam	2.27E-05	0.442	0.079	0.318	0.015	1,000	3.95	14
silty clay loam	3.09E-05	0.482	0.09	0.366	0.015	6,500	5	16
sandy clay	3.15E-05	0.385	0.117	0.339	0.015	370	3.05	17
silty clay	2.67E-05	0.481	0.111	0.384	0.05	1,200	3.85	18
clay	4.10E-05	0.459	0.098	0.396	0.05	1,400	3.7	20

#### 4. 모형의 적용

##### 4.1 모의 조건

1987년 ~ 1991년까지 5년간을 1시간의 간격으로 모의하였으며, 1987년은 지하수위 및 토양 수분의 초기값 영향을 줄이기 위해 위빙업 기간으로 설정하였다. 경안 수위관측소 지점의 유출 자료를 이용해 보정(1988 ~ 1989) 및 검정(1990 ~ 1991)을 수행하였으며, 표층 토양 매개변수에 대해서는 별도의 보정을 하지 않았다.

##### 4.2 모의 결과

그림 1에서 X=73인 격자들의 해발고도분포는 다음의 그림 2와 같다. 이 단면중 Y=45, 47인 격자의 표층토양 수분 모의결과를 그린 것이 그림 3이다. 두 지점 모두 표층토양이 Sandy loam을 이루어진 지점인데, 강우시 토양수분이 급속히 상승하여 포화수분을 값인 0.385에 달하고, 약 10일 후에는 0.15정도로 감소되는 패턴을 보였다.

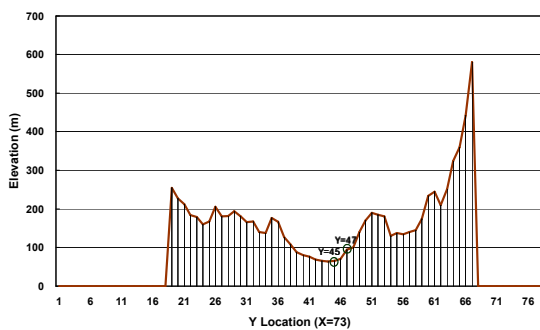


그림 2. 해발고도분포(X=73)

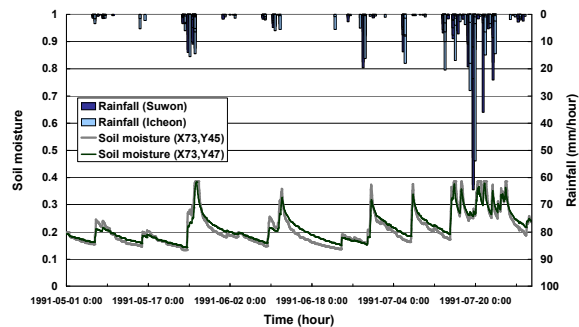
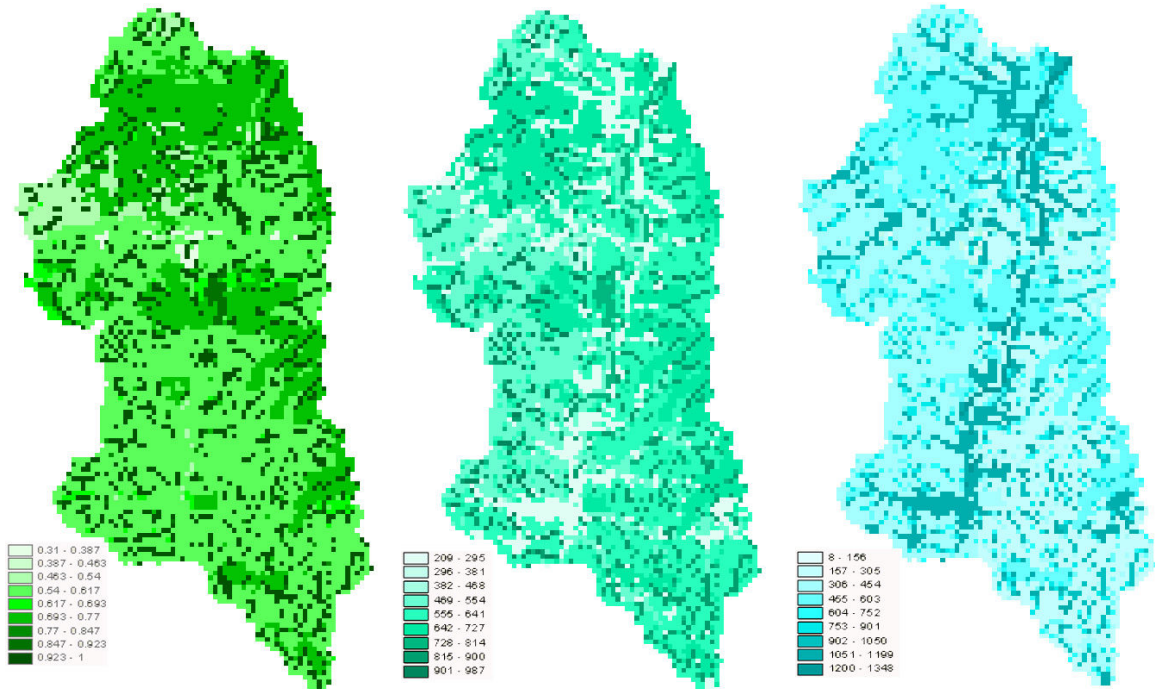


그림 3. 토양수분 모의 결과

그림 4는 WEP 모형에 의한 수문 요소의 해석결과로 (a)는 1991년 12월 31일 24:00시의 토양수분비율 분포, (b)는 1991년의 연간 증발산량 분포, (c) 1991년의 연간 지표면 유출량 분포이다.

그림 4(a)의 토양수분비율은 고도 및 표층 토양 종류에 따라 차이가 났다. 또한 (a)의 토양수분비율과 (b)의

증발산량이 높은 지점의 위치가 일치하는 것을 알 수 있다. 다만, 12월은 강수가 적은 갈수기로 토양함수율이 포화수분율의 80%이상으로 유지되기는 어려울 것으로 판단되며, 이 이상으로 모의된 격자에 대해서는 향후 매개변수 수정 등이 필요할 것으로 보인다. 현재까지의 분석 결과, 토양수분이 높게 모의된 격자는 지하수위가 비교적 지표에 가깝게 모의되었으며, 대수층 두께, 투수계수 등 지표하 관련 매개변수가 전체 수문 요소의 해석에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그림 4(c)의 연간 지표면 유출량은 토지이용이 도시지역인 격자를 중심으로 높은 값을 나타내고 있다.



(a) 토양수분비율  
(1991.12.31) (%)

(b) 연간 증발산량  
(1991) (mm/year)

(c) 연간 지표면 유출량  
(1991) (mm/year)

## 5. 결론

분포형 수문모형인 WEP 모형을 경안천 유역(유역면적: 575km<sup>2</sup>, 유로연장: 49.3km)에 적용하여 토양수분의 시공간분포를 모의하고 결과를 분석하였다. 지점별 토양수분 모의결과, 토양 매개변수의 최대, 최소값 내에서 적절히 모의됨을 확인하였으나, 관측값이 없어 실질적으로 타당한지 여부는 검증하지 못하였다. 토양수분비율, 연간 증발산량, 지표면 유출량 공간분포를 비교한 결과, 토양수분비율이 연간 증발산량 모의에 직접적인 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 일부 격자에서는 토양수분이 지나치게 높게 모의되었는데, 지하수위와 관련있는 것으로 보이며, 구축된 자료가 부족한 지하대수층에 대한 정보부족이 토양수분 계산에도 영향을 준 것으로 보인다.

본 연구는 WEP 모형의 토양수분 해석능력에 대한 시험적용에 그 의의가 있으며, 향후 토양 및 지표하 매개변수 정보가 충분히 갖추어지고, 토양수분 관측결과 있는 대상유역에 대한 적용이 요구된다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(과제번

호 2-6-2)에 의해 수행되었습니다.

WEP 모형의 적용에 있어서 기술지원을 한 일본 토목연구소와 Jia 박사에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 이가영, 김기훈, 오경준, 김상현(2005). "설마천 유역 범륜사사면의 토양수분 시공간 집중변화양상의 측정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제 38권, 제 5호, pp. 345-354
- 한국건설기술연구원(2005). **건강한 물순환체계구축을위한 유역진단기법 개발연구**. 한국건설기술연구원.
- 土木研究所(2002). WEP 모델 解説書. 土木研究所, pp. 3-22.