

## 유역 물수지 모의를 위한 개념적인 토양수분모형: 모형 보정에 필요한 수문성분 분석

A Conceptual Soil Water Model of Catchment Water Balance:  
Which Hydrologic Components are Needed to Calibrate the Model?

최대규\* · 양정석\*\* · 정건희\*\*\* · 김상단\*\*\*\*

Choi, Daegyoo · Yang, Jeong-Seok · Chung, Gunhui · Kim, Sangdan

### Abstract

In this study a conceptual soil water model is proposed to simulate water balance at catchment scale. The model is based on the sequential separation of daily precipitation into surface runoff, wetting, vaporization, and percolation. The proposed model is calibrated by using three observation sets: empirically estimated annual vaporization, monthly wetting estimated by NRCS-CN method, and both of them. The model performance is evaluated to understand which hydrologic components for calibrating the model are needed. It is shown that both of annual vaporization and monthly wetting are indispensable hydrologic components to simulate reasonably precipitation partitioning.

**Keywords :** annual water balance, hydrologic component, precipitation partitioning, soil water

### 요 지

본 연구에서는 유역 물수지 모의를 위한 개념적인 토양수분모형이 제안된다. 모형은 지표면에 떨어지는 강수량이 지표면 유출, 습윤, 기화, 침투 등으로 분할되는 과정을 모의한다. 경험식으로 추정된 연별 기화량, NRCS-CN 방법으로 추정된 월별 습윤량 및 이 두 가지가 모두 주어진 경우를 구분하여 모형의 매개변수가 각각 추정되어 모형의 성능을 평가한다. 연별 기화량과 월별 습윤량 자료 모두가 모형 보정에 적용될 경우만이 보다 합리적인 강수분할이 모의될 수 있음이 분석된다.

**핵심용어 :** 연 물수지, 수문성분, 강수분할, 토양수분

### 1. 서 론

유역 단위에서의 물수지는 기후, 지형, 토양, 식생 등 여러 가지 인자들에 의해 결정된다. 수문학자들의 주요한 역할 중 하나는 유역 물수지에 영향을 미치는 이러한 인자들의 상호작용을 보다 잘 이해하는 것이 될 것이다. 특히 대부분의 유역이 미계측 상태로 남아 있을 수밖에 없는 현실을 고려할 때, 하천 유출량 자료가 없는 유역에서 이용할 수 있는 최소한의 자료만으로 기후-토양-식생 사이의 상호작용을 설명할 수 있는 물수지 모형을 개발하는 것은 수문학 분야에서 매우 중요한 연구 주제 중 하나가 되어왔다(Potter *et al.*, 2005). 이에 본 연구에서는 기후-토양-식생에 관한 최소한의 프로세스를 반영하여 유역 물수지를 모의할 수 있는 개념적인 토양수분모형을 제안하고자 하였다. 또한 하천 유출량 자료가 물수지 모형의 보정에 이용될 수 없는 상황

서 간접적으로 획득 가능한 자료를 이용하여 모형을 보정함으로써 제안된 모형이 미계측 유역의 물수지를 어느 정도 제대로 모의할 수 있는지를 살펴보고자 하였다. 이와 같은 연구가 필요한 이유는 유출 자료에 의존하지 않으면서도 유역의 물수지를 적절하게 모의할 수 있는 구조를 가진 모형을 개발하여 추후 대다수의 계측되지 않은 유역의 물수지를 평가할 필요가 있기 때문이다.

본 연구에서 살펴보게 되는 간접적으로 획득 가능한 자료는 크게 두 가지로 구성된다. 첫 번째 자료는 월별 습윤량(wetting) 또는 침투량으로서 NRCS-CN 방법 등을 적용할 경우 유역의 토지이용상태에 관한 정보 및 토양특성에 관한 정보만으로 강수량으로부터 유역의 토양층 안으로 습윤되는 물의 양을 추정하는 것이 가능하다. 두 번째 자료는 연별 기화량(vaporization) 또는 실제 증발산량이다. 유출 자료가 있는 지점들의 자료를 이용하여 강수량에서 유출량을 제외

\*부경대학교 환경공학과 박사과정 (E-mail : aidhim@pknu.ac.kr)

\*\*정희원 · 국민대학교 건설시스템공학부 부교수 · 공학박사 (E-mail : jyang@kookmin.ac.kr)

\*\*\*정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원 · 공학박사 (E-mail : gunhui@kict.re.kr)

\*\*\*\*정희원 · 교신저자 · 부경대학교 환경공학과 부교수 · 공학박사 (E-mail : skim@pknu.ac.kr)

한 실제 기화량 자료를 구성한 후, 이와 같이 산출된 실제 기화량 자료와 기상자료를 이용하여 산출된 잠재증발산량 또는 최대 기화량 자료 및 강수량 자료 사이의 경험적인 관계 공식을 구성하여 예측되지 않은 유역의 연별 실제 기화량 자료를 추정할 수 있다(Budyko, 1974; Zhang *et al.*, 2004). 본 연구에서는 이러한 자료들을 이용하여 제안된 모형을 보정할 경우 연별 및 월별 수문성분들을 어느 정도까지 합리적인 수준에서 모의할 수 있는지를 살펴보고자 하였다.

본 연구에서 제안되는 개념적인 토양수분 물수지 모형은 대기로부터 강수 및 기화 요구량에 의하여 추진됨과 동시에 토양 및 식생 특성을 반영한 토양수분 지배방정식을 푸는 것이라 할 수 있는데, 지표면 근처의 토양수분은 강수, 유출, 기화, 습윤 및 지하수위의 변동을 연결하는 자연 상태 수문순환계의 구성성분이 된다. 토양수분은 강수의 토양습윤과정을 통하여 토양 공극이 수분으로 채워짐에 따라 증가하게 되며, 기화 및 더 깊은 토양층으로의 침투 등으로 인하여 감소된다. 이 때, 습윤된 물을 저장하고 이를 다시 대기로 기화시킬 수 있는 유역의 능력은 주로 식생에 의해서 제어되며, 유역 물수지의 변동성에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(한수희와 김상단, 2009; Troch *et al.*, 2009). 이와 같이 토양수분은 기후-토양-식생을 연결하는 매우 중요한 수문순환성분이 됨에 따라(Yoo *et al.*, 2006), 유역에서의 수문순환모의를 위하여 토양수분 관측 자료의 확충 및 토양수분 동역학에 관한 단순한 모형으로부터 복잡한 모형까지 관련 연구가 다양하게 수행되어지고 있다(Noy Meir, 1973; Stephenson, 1990; Easterling *et al.*, 2000; Allen and Ingram, 2002; Milly *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2008; 한수희 등, 2009; Kim *et al.*, 2011).

모형화의 관점에서 보면, 토양수분 동역학을 구성하는 다양한 지구물리학적 프로세스들의 연계작용과 각각의 프로세스가 가지고 있는 고도의 비선형성, 수문 및 생태환경 자체의 시공간적 변동성 때문에 적용 목적에 따라 다양한 정확도 수준에서의 단순화 가정이 필요하게 된다(Clark *et al.*, 2001; Porporato and Rodriguez-Iturbe, 2002). 본 연구에서는 유역 단위에서의 월 단위 또는 연 단위 수준에서 강수의 수문학적 분할과정(습윤, 기화, 침투 등)을 모의할 수 있는 개념적인 토양수분 물수지 모형을 개발하고자 하였다. 강수의 분할 과정, 즉 자연 유역의 지표면에 떨어진 강수는 우선 토양을 습윤하게 하다가(wetting) 토양이 포화 상태가 될 경우 지표면 유출의 형태로 하천으로 이송되는 반면에, 토양에 스며든 물은 기후 및 식생의 요구량에 의해 기화과정(vaporization)을 거침과 동시에 더 깊은 토양층으로 침투하여(percolation) 추후 지표하 유출의 형태로 하천으로 유출되는데 착안하여 제안된 모형은 이러한 강수 분할 과정을 보다 직관적으로 모의할 수 있는 구조를 갖도록 하는데 주안점을 두고 개발되었다. 이 때, 차단(interception) 및 지면저류(surface depression)는 모형 구조에 포함시키지 않았다.

전술한 바와 같이 제안된 모형은 유출 자료가 없는 지역에서의 월 단위 수준의 물수지를 살펴볼 목적이므로, 유역 물수지에 영향을 미치는 최소한의 필수적인 토양-기후-식생 프로세스를 반영하여 모형의 지배방정식을 구성하였다. 모형 매개변수는 세 가지 경우에 대하여 추정되는데, 첫 번째 경

우는 경험적으로 산출된 연별 증발산량 자료만을 이용하여 모형 매개변수를 추정하는 것이다. 두 번째 경우는 NRCS-CN 방법으로 산출된 월별 습윤량 자료만을 이용하여 모형의 매개변수를 추정하는 것이며, 세 번째 경우는 이 두 가지 수문성분을 모두 이용하여 모형의 매개변수를 추정하는 것이다. 보정에 사용된 수문성분에 따라서 모형이 실제 강수의 분할 정도를 어느 정도 재현하는지를 평가하여 궁극적으로는 하천 유량이 예측되지 유역의 물수지 분석 시 적용 가능성을 살펴보고자 하였다.

대상 유역은 비교적 양질의 하천 유입량 자료가 확보되어 있는 낙동강 유역 주요 4개댐(안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐) 상류 유역으로 결정하였다. 모형 보정에 적용된 자료 기간은 4개 유역 모두 2000년부터 2009년까지 10년간으로 고정하여 자료보유기간에 따른 차이를 제거하고자 하였다.

## 2. 개념적인 토양수분 물수지 모형

본 연구에서 적용한 개념적인 토양수분 물수지 모형은 아래와 같은 물수지 동역학 지배방정식에 기초하고 있으며, Fig. 1에 나타난 바와 같은 강수 분할 과정(wetting, vaporization, percolation)을 보다 직관적으로 모의할 수 있는 구조를 갖도록 하였다.

$$nZ_r \frac{ds}{dt} = W(P, s) - V(s) - K(s) \quad (1)$$

여기서  $nZ_r$ 은 유효 토양깊이로서, 여러 연구자를 통하여  $n$ 은 토양의 공극비,  $Z_r$ 은 지표면 근처 식생뿌리가 존재하는 토양층의 두께로 개념화되어 정의되어 왔다(Rodriguez-Iturbe and Porporato, 2004).  $W$ 는 강수량  $P$ 로부터 토양에 공급되는 물의 양, 즉 습윤량이며,  $V$ 은 토양 및 식생 조건에 따라서 토양에 있는 물이 대기 중으로의 손실되는 양, 즉 기화량이다.  $K$ 는 지표면 근처의 토양층으로부터 보다 깊은 토양층으로 손실되는 물의 양으로 궁극적으로는 지표하 유출에 기여하는 수문성분을 나타내고자 하였다.  $s$ 는 토양수분,  $t$ 는 시간으로 본 연구에서는 일 단위를 기준으로 하였다.

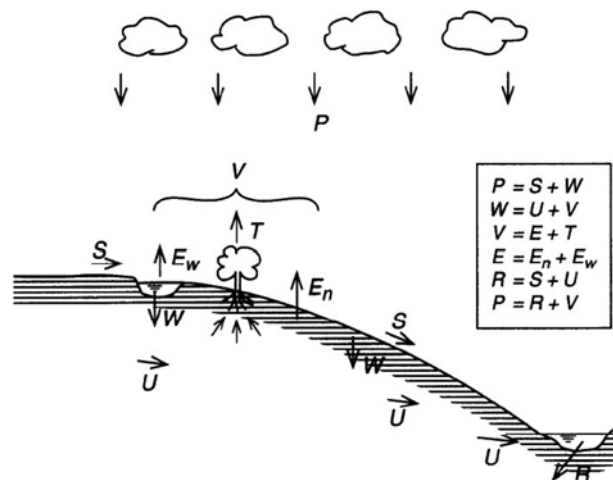


Fig. 1 Hydrologic partitioning (P: precipitation, S: surface runoff, W: wetting, U: subsurface runoff, V: vaporization, E: evaporation, T: transpiration,  $E_n$ : evaporation from bare soil surface,  $E_w$ : evaporation from water surface, R: runoff)

NRCS-CN 방법과 비슷하게 어떤 날  $t$ 일의 습윤량  $W_t$ 는 하루 전 날의 선행 토양수분  $s_{t-1}$ 과 해당 일의 강수량  $P_t$ 에 따라 아래와 같이 결정된다.

$$W(P, s) = P_t, \quad P_t \leq 0.2S_{M,t}$$

$$= P_t - \frac{(P_t - 0.2S_{M,t})^2}{P_t + 0.8S_{M,t}}, \quad \text{for otherwise} \quad (2)$$

또한, 습윤량은 어떤 시기의 최대잠재보유수량  $S_{M,t}$ 을 초과할 수 없으므로 아래 식과 같은 제약을 받는 것으로 구성하였다.

$$W(P, s) \leq S_{M,t} \quad (3)$$

여기서,

$$S_{M,t} = (1 - s_{t-1})nZ_r \quad (4)$$

따라서 우기일의 습윤량은 강수량  $P$  뿐만 아니라 유효토양깊이  $nZ_r$ 와 선행 토양수분의 양에 따라 달라지며, 건기일의 습윤량은 0이 된다. 이 때, 유효토양깊이  $nZ_r$ 는 유역의 토양 및 식생에 따라 다양한 값을 가질 수 있을 것이며, 또한 식생의 성장에 따른 계절적인 변동성을 가질 수 있도록 아래와 같이 구성하였다.

$$nZ_r(m) = \overline{nZ_r} + A_z \cos\left(\frac{2\pi}{12}m - \phi_z\right) \quad (5)$$

여기서  $m$ 은 월(month)로서 1월의 경우 1의 값을 가지며, 12월의 경우 12의 값을 갖는다. 유효토양깊이  $nZ_r$ 의 연평균 값은  $\overline{nZ_r}$ ,  $A_z$ 는 연 평균값으로부터 최대 및 최소 편차,  $\phi_z$ 는  $nZ_r$ 이 최대가 되는 월이 된다. 모형의 편의 상 본 연구에서는 유효토양깊이  $nZ_r$ 은 월 별 변화를 갖는 것으로 구성하였으나, 일 별 변화를 갖는 것으로 구성하는 것도 가능하다 할 수 있다.

기화량  $V$ 는 토양수분의 상태에 따라 아래와 같이 개념화하였다(한수희와 김상단, 2008).

$$V(s) = \frac{V_{\max} s}{s^*} \quad \text{for } s < s^*$$

$$= V_{\max} \quad \text{for } s > s^* \quad (6)$$

여기서,  $V_{\max}$ 는 최대 기화량으로 흔히 언급되는 잠재증발산량과 같은 개념으로 볼 수 있으며,  $s^*$ 는 토양수분 임계값이다. 즉, 기화량  $V$ 는 기상학적으로 요구되는 최대 기화량  $V_{\max}$ 과 유역의 식생에 따라 다른 값을 갖는 토양수분 임계값  $s^*$ 이라는 두 가지 매개변수의 함수로 표현될 수 있으며, 최대 기화량  $V_{\max}$ 과 토양수분 임계값  $s^*$  모두 계절성을 갖고 있으므로 기화량 또한 계절적인 변동성을 나타낸다고 볼 수 있다. 본 연구에서  $V_{\max}$ 는 인근 기상 관측소에서 관측된 기상자료로부터 상대적으로 손쉽게 계산할 수 있도록 Penman 방법으로 계산하여 적용하였으나, 기타 여러 가지 잠재증발산량 산정기법을 적용하는 것도 가능하다 하겠다. 토양수분 임계값  $s^*$ 의 계절성을 구현하기 위하여 유효토양깊이  $nZ_r$ 가 마찬가지로 cosine 함수를 이용하여 아래와 같이 구성하였다.

$$s^*(m) = \overline{s^*} + A_s \cos\left(\frac{2\pi}{12}m - \phi_s\right) \quad (7)$$

여기서  $m$ 은 월(month)이며, 토양수분 임계값  $s^*$ 의 연평균

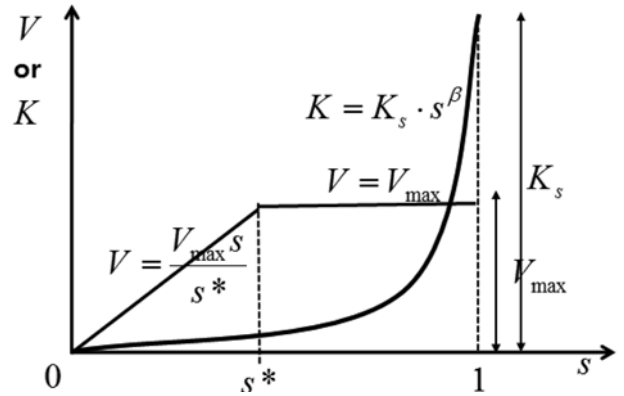


Fig. 2 Vaporization and percolated loss with respect to soil water

값은  $\overline{s^*}$ ,  $A_s$ 는 연 평균값으로부터 최대 및 최소 편차,  $\phi_s$ 는  $s^*$ 가 최대가 되는 월이 된다. 모형의 편의 상 토양수분 임계값  $s^*$  또한 유효 토양깊이  $nZ_r$ 과 같이 월 별 변화를 갖는 것으로 구성하였다.

깊은 토양층으로의 손실량  $K$ 은 아래와 같이 모의된다.

$$K(s) = K_s \cdot s^\beta \quad (8)$$

여기서,  $K_s$ 는 포화투수계수를 의미하며,  $\beta$ 는 토양수분에 따른 손실지수이다. 포화투수계수  $K_s$  및 손실지수  $\beta$ 는 토양의 고유한 특성으로 볼 수 있을 것이며, 토양 특성은 다른 매개변수들과 비교할 때 상대적으로 계절성이 크지 않을 것이라고 판단하여 깊은 토양층으로의 손실량  $K$ 를 표현하기 위한 식의 구조는 연중 일정한 것으로 구성하였다. 기화량  $V$ 와 깊은 토양층으로의 손실량  $K$ 을 도시하면 Fig. 2와 같다.

### 3. 모형 보정 자료의 구축

#### 3.1 연별 기화량의 경험적 산출

연 기화량을 추정하기 위하여 다양한 기후 및 토양 조건을 대상으로 수많은 경험공식들이 개발되어왔다(Pike, 1964; Budyko, 1974; Fu, 1981; Zhang *et al.*, 2004). 이들 연구들을 살펴보면 대체로 모두 비슷한 형태의 식의 구조를 가지고 있으며, 주로 실제 기화량과 강수량 사이의 비를 최대 기화량과 강수량 사이의 비의 함수로 표현하고 있음을 살펴볼 수 있다. 이에 본 연구에서도 이들 연구들을 참고하여 아래 식과 같은 2변수 함수를 구성하여 실제 기화량을 산출하고자 하였다.

$$\frac{\bar{V}}{\bar{P}} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{1}{a} - \frac{\bar{V}_{\max}}{\bar{P}}\right)^b\right] \quad (9)$$

여기서  $\bar{V}$ 는 연 실제 기화량(mm/yr),  $\bar{P}$ 는 연 강수량(mm/yr),  $\bar{V}_{\max}$ 는 연 최대 기화량(mm/yr)이다. 식 (9)의 매개변수  $a$ 와  $b$ 는 관측 자료를 이용하여 산출하게 된다.

식 (9)을 이용하여 연 기화량을 산출하기 위해 필요한 기상자료는 연 강수량, 연 유출량, 연 최대 기화량 자료가 필요하다. 본 연구에서 유역평균 강수량 및 유출량(정확히는 댐 유입량) 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)에서 제공하는 2000년부터 2009년까지의 관측 자료를 이용하였다. “관측된” 유역별 연별 실제 기화량 자료는 관측된

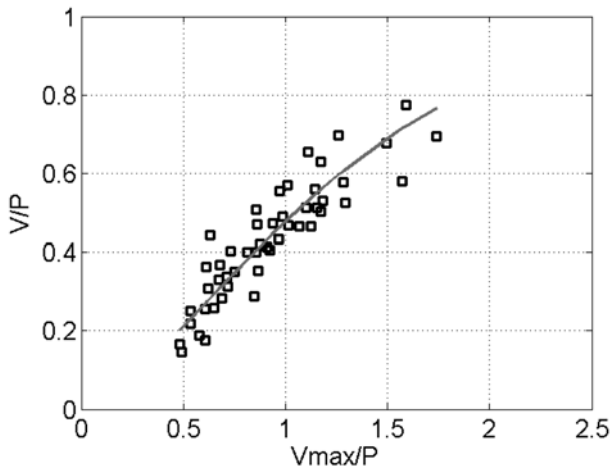


Fig. 3 Empirical curve for estimating vaporization (□: observed data, -: modeled data)

강수량 자료에서 관측된 유입량 자료 사이의 차이를 이용하여 산출하였다.

최대 기화량 자료는 Penman 방법을 이용하여 산출하였는데, 이를 위해 필요한 일별 기상자료는 평균기온, 풍속, 상대습도, 일조시간, 일사량 등이다. 본 연구에서는 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐 각각의 유역에 영향을 미치는 기상청 기상관측소 지점 자료를 이용하여 각 지점별 일별 최대 기화량을 계산한 후, 이를 티센 평균하여 공간평균 최대 기화량 자료를 구성하였다. 이를 다시 연별로 합산하여 연별 최대 기화량 자료를 산출하였다.

본 연구에서는 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐 상류 4개 유역의 10년간 자료를 이용하였으므로 식 (9)의 매개변수  $a$ 와  $b$ 를 추정하기 위한 관측 자료의 수는 모두 40개가 된다. 유전자 알고리즘을 적용하여 평방근최소자승오차의 합이 최소가 되도록 매개변수  $a$ 와  $b$ 를 추정하였으며 그 결과 아래와 같은 경험 공식을 도출할 수 있었다. 참고로 매개변수 추정에 이용된 유전자 알고리즘은 Matlab의 “ga.m” 내부 함수를 이용하였으며, 특별한 제약조건을 적용하지 않은 상태에서 모든 조건을 default 상태에 놓고 실행하였다.

$$\frac{\bar{V}}{\bar{P}} = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{1}{1.3476} \frac{\bar{V}_{\max}}{\bar{P}} \right)^{1.4569} \right] \quad (10)$$

여기서 연 기화량, 연 강수량, 연 최대 기화량의 단위는 모두 mm/yr이다. Fig. 3에 식 (10)에 의해 산출된 Budyko 건조지수(=연 최대 기화량/연 강수량)에 따른 연 기화량/연 강수량의 비를 실선으로, 관측 자료를 □로 표기하여 비교 도시하였다.

### 3.2 NRCS-CN 방법을 이용한 월별 습윤량 산출

NRCS(Natural Resources Conservation Service)의 유효우량 산정 또는 초과 강우량 산정방법은 총 강우량에서 직접유출에 기여하는 부분으로 차단, 지면저류, 증발, 침투 등의 강우 손실분을 총 강우량에서 빼줌으로서 산정하게 된다 (Chow *et al.*, 1988). 따라서 총 강우량과 유효우량의 차이가 본 연구에서 의미하는 습윤량의 대부분이 될 것이다(정확히 말하자면 총 강우량과 유효우량의 차이는 습윤량 및 차단량과 지면저류량의 합). NRCS-CN 방법에 의해 유효우량 또는 직접유출량  $Q$ 을 산정하기 위한 기본 식은 아래와 같다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (11)$$

여기서  $S$ 는 유역의 최대잠재보유수량으로 단위를 mm로 사용할 경우 NRCS의 유출곡선번호 또는 유출곡선지수(runoff curve number, CN)와 아래와 같은 관계가 있다.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (12)$$

유출곡선번호는 유역의 토양도와 토지이용도를 이용하여 산출이 가능하며, 시기별 5일 선행강수량에 따라서 유출곡선번호의 조정을 시행해주게 된다. 보다 자세한 사항은 Chow *et al.*(1988)과 같은 대부분의 수문학 교과서를 참고할 수 있다.

본 연구에서는 일 단위 강수량을 기준으로 하여 NRCS-CN 방법을 적용하여 해당 유역의 월별 직접유출량을 계산하였다. 유역별 월별 직접유출량을 산출하는 과정은 아래와 같다.

1) 각 유역별(안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐 상류 유역)로 평균 CN값을 국가수자원종합정보시스템(www.wamis.go.kr)을 통하여 획득

2) 어떤 날 강수가 있을 경우 해당 시기(성수기 또는 비성수기로서, 본 연구에서는 6~9월을 성수기로 간주)별로 정해진 기준 5일 선행강수량에 따라 CN값을 조정하여 일별 유효우량 시계열을 산출

3) 이를 월별로 합산하여 월별 직접유출량 시계열 산출

이와 같은 방법으로 산출될 월별 직접유출량을 바탕으로 연평균 직접유출량을 계산한 결과를 Table 1에 각 유역의 CN값 및 연평균 강수량, 기화량(여기서 기화량은 강수량-유출량으로 계산) 자료와 함께 정리하였다. 이 때, 자료기간은 2000년부터 2009년까지 10년이며, 기화량과 직접유출량, 유출량 밑의 괄호는 연평균 강수량에 대한 해당 수문성분들의 백분율을 의미한다. CN값의 경우 AMC-II를 기준으로 산출된 값으로 국가수자원종합정보시스템(www.wamis.go.kr)에서 제공하고 있는 값을 그대로 적용하였는데 합천댐 상류 유역

Table 1. Mean annual precipitation, vaporization, surface runoff and runoff

(unit: mm)

|              | CN | Precipitation | Vaporization      | Surface runoff    | runoff              |
|--------------|----|---------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| Andong dam   | 75 | 1,235.2       | 554.6<br>(44.9 %) | 282.4<br>(22.9 %) | 680.6<br>(55.1 %)   |
| Imha dam     | 74 | 1,036.9       | 479.3<br>(46.2 %) | 195.7<br>(18.9 %) | 557.6<br>(53.8 %)   |
| Hapcheon dam | 80 | 1,334.9       | 562.2<br>(42.1 %) | 463.9<br>(34.8 %) | 772.7<br>(57.9 %)   |
| Namgang dan  | 75 | 1,562.1       | 490.6<br>(31.4 %) | 499.3<br>(32.0 %) | 1,071.5<br>(68.6 %) |

이 다소 높은 CN값을 보이고 있으며, 나머지 세 개 댐 상류 유역의 경우 비슷한 CN값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 연 평균 강수량의 경우 남강댐 상류 유역의 가장 큰 값을 나타내고 있으며, 가장 적은 강수량이 내리는 임하댐과 비교할 경우 500 mm 이상 차이가 있음을 살펴볼 수 있다. 직접 유출량의 경우 CN값이 가장 높은 합천댐 상류 유역이 강수량 중 직접유출이 차지하는 비율이 가장 높게 나타났다. 남강댐 상류 유역의 경우 안동댐 상류 유역과 임하댐 상류 유역과 비슷한 CN값을 가짐에도 불구하고 상대적으로 높은 유출율을 보이고 있는데 이는 강수량 자체가 두 유역과 비교할 때 매우 많으며, 성수기의 강우 집중도 및 AMC 조건에 기인하는 것으로 판단되었다.

#### 4. 결과 및 토의

제안된 토양수분 물수지 모형은 수문기상학적인 입력 자료로 일 강수량과 일 최대 기화량을 필요로 하게 된다. 일 강수량의 경우 국기수자원종합정보시스템(www.wamis.go.kr)에서 제공하는 각 유역별 공간평균 강수량을 사용하였으며, 일 최대 기화량의 경우에는 각 유역별 인근 기상청 기상관측소에서 일 최대·최소 기온, 상대습도, 풍속, 일사량, 일조시간 등의 자료로부터 Penman 방법을 이용하여 산출한 후 이를 티센가중평균하여 산출하였다.

제안된 모형을 위한 유역의 토양 및 식생 관련 입력변수들로는 포화투수계수  $K_s$ , 손실지수  $\beta$ , 유효토양깊이  $nZ_r$ , 토양수분 임계값  $s^*$ 가 있는데, 2장에서 살펴본 바와 같이 유효토양깊이  $nZ_r$ 과 토양수분 임계값  $s^*$ 의 경우 계절성을 고려하기 위하여 각각 세 개의 매개변수로 구성되어 있다(식 (5)와 (7) 참조). 따라서 추정해야 할 매개변수의 수는 총 8개 ( $K_s, \beta, \overline{nZ_r}, A_z, \phi_z, \overline{s^*}, A_s, \phi_s$ )가 된다.

상기 매개변수들을 추정하기 위해서 본 연구에서는 최적화 기법 중 하나인 유전자 알고리즘을 이용하였으며, 아래와 같은 세 가지 목적함수를 각각 적용하여 이를 최소화시키는

매개변수 조합을 찾도록 하였다.

$$f_1 = \sqrt{\frac{1}{N_y} \sum_{y=1}^{N_y} (V_{c_y} - V_{o_y})^2} \quad (13)$$

$$f_2 = \sqrt{\frac{1}{N_m} \sum_{m=1}^{N_m} (Q_{c_m} - Q_{o_m})^2} \quad (14)$$

$$f_3 = \frac{N_y f_1}{N_y} + \frac{N_m f_2}{N_m} \quad (15)$$

$$\sum_{y=1}^{N_y} V_{o_y} \quad \sum_{m=1}^{N_m} Q_{o_m}$$

여기서  $N_y$ 와  $N_m$ 는 매개변수 추정에 적용된 관측 자료의 년 및 월 수(본 연구의 경우  $N_y$ 는 10년, 은 120개월),  $V_{c_y}$ 와  $V_{o_y}$ 는 각각 모형을 통하여 계산된 연 기화량과 식 (10)을 통하여 산출한 연 기화량,  $Q_{c_m}$ 과  $Q_{o_m}$ 은 각각 모형을 통하여 계산된 월 직접유출량과 NRCS-CN 방법을 통하여 산출된 월 직접 유출량을 의미한다.

첫 번째 목적함수  $f_1$ 을 적용한 이유는 식 (10)과 같은 경험적인 방법으로 산출된 연 기화량 자료만을 이용하여 제안된 토양수분 물수지 모형의 매개변수를 추정할 경우에 어느 정도 주요 수문성분들을 재현할 수 있을 것인지를 살펴보기 위한 것이었으며, 두 번째 목적함수  $f_2$ 를 적용한 이유는 NRCS-CN 방법 등을 이용하여 유역의 월 직접유출량 자료만을 이용하여 제안된 모형의 매개변수를 추정할 경우에 주요 수문성분들의 재현 정도를 파악하기 위함이다. 마찬가지로 이유로 목적함수  $f_3$ 의 경우에는 이 둘 두 가지 자료를 모두 적용하여 모형 매개변수를 추정하였을 때 기대할 수 있는 모형의 성능을 알아보기 위하여 적용되었다. 각각의 목적함수를 적용하여 모형의 매개변수를 추정한 결과를 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4에서 v로 표시된 점선은 목적함수  $f_1$ 을 이용하여 추정된 매개변수 결과를 의미하며, ○로 표시된 실선은 목적함수  $f_2$ 를 이용하여 추정된 매개변수 결과, □로 표시된 실선은 목적함수  $f_3$ 를 이용하여 추정된 매개변수 결과를 각각 나타낸다.

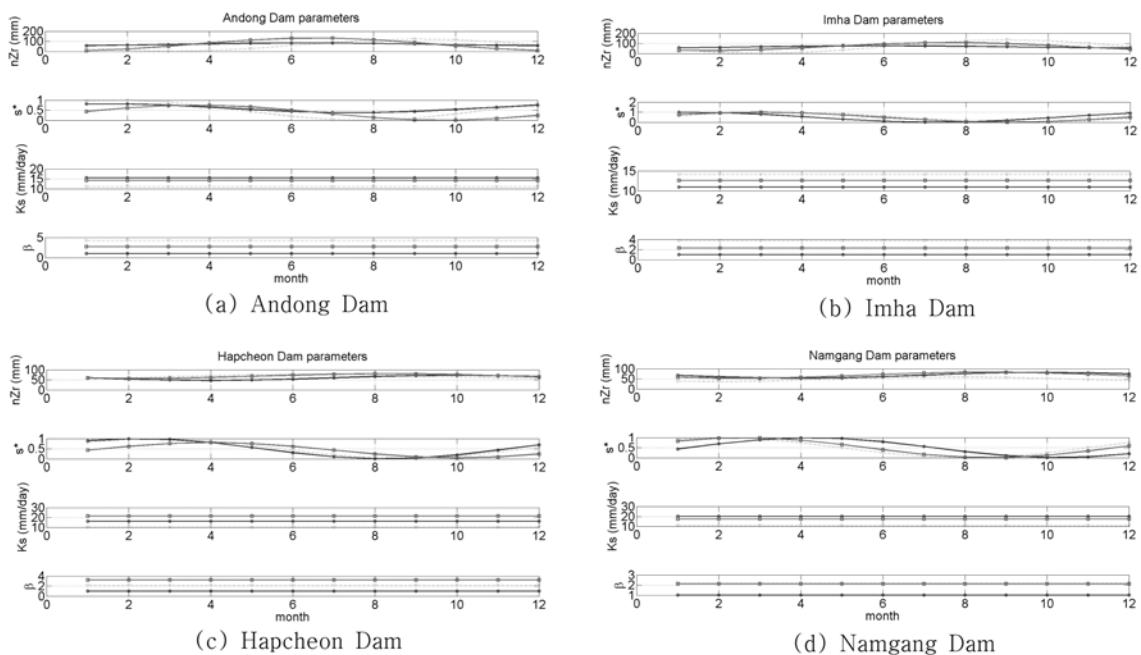


Fig. 4 Parameter estimation (v: only using annual vaporization, ○: only using monthly direct runoff, □: using both data)

유효토양깊이  $nZ_r$ 의 경우 안동댐 및 임하댐 상류 유역의 경우 여름철에 최대 150 mm 정도로 추정되었으며, 합천댐 및 남강댐 상류 유역의 경우 여름철에 최대 80 mm 정도의 값을 갖는 것으로 추정되었다. 이에 따라 토양의 수분 저류 능력은 낙동강 상류 두 개 댐 상류 유역이 하류 두 개 댐 상류 유역보다 약 2배 정도 높게 추정되었음을 살펴볼 수 있다.

토양수분 임계값  $s^*$ 의 경우 대체로 겨울철에 최대값을 갖는 것으로 추정되었다. 4개 댐 상류 유역 모두 토양수분 임계값  $s^*$ 의 최댓값이 1에 가까운 값으로 추정되었는데, 이는 겨울철에는 같은 토양수분 상태일 경우 여름철 보다 상대적으로 기화되는 양이 적은 방향으로 모형 매개변수가 추정되었음을 의미하는 것이다. 이는 실제 물리적인 프로세스와도 잘 일치하는 결과라고 할 수 있을 것이다. 즉, 성수기에는 식생의 증산작용이 활발해짐에 따라 비성수기와 비교할 때 같은 토양수분 상태에서도 기화되는 양이 상대적으로 많을 개연성이 높기 때문이다.

유역의 포화투수계수  $K_s$ 는 유역별 적용 목적함수별로 차이  $\beta$ 는 있으나 대체로 15 mm/day 내외로 추정되었으며, 손실지수는 1에서 4 사이의 값을 갖는 것으로 추정되었음을 살펴볼 수 있다.

Fig. 5는 각각의 목적함수를 이용하여 추정된 매개변수를 이용하여 산출된 유역별 직접유출량의 월별 평균값을 보여주고 있다. 여기서 obs는 관측된 직접 유출량의 월별 평균값으로 본 연구에서 관측된 직접 유출량은 NRCS-CN 방법으로 산출한 직접 유출량을 의미한다. 목적함수를 구성하는

수문성분을 살펴볼 경우 충분히 기대할 수 있듯이, 목적함수  $f_2$ 와  $f_3$ 을 이용하여 매개변수를 추정할 결과가 관측된 값을 보다 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 목적함수  $f_1$ 을 이용하여 매개변수를 추정할 경우, 즉 연 기화량 자료만을 이용하여 토양수분 모형의 매개변수를 추정할 경우 합천댐 및 남강댐 상류 유역과 같이 월별 직접 유출량을 대체적 양호하게 추정하는 유역도 있는 반면에, 안동댐 및 임하댐 상류 유역과 같이 봄철 직접 유출량을 과대 추정하는 유역이 발생할 수도 있음을 살펴볼 수 있다.

Fig. 6은 각각의 목적함수를 적용하여 추정된 매개변수에 따라 산출된 유역별 총 유출량의 월별 평균값을 보여주고 있다. 목적함수를 구성하는 수문성분을 살펴볼 경우 충분히 기대할 수 있듯이, 목적함수  $f_1$ 과  $f_3$ 을 이용하여 매개변수를 추정할 결과가 관측된 값을 보다 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 목적함수  $f_2$ 을 이용하여 매개변수를 추정할 경우, 즉 월 직접 유출량 자료만을 이용하여 제안된 토양수분 물수지 모형의 매개변수를 추정할 경우 적용된 모든 유역에서 유출량이 과대 추정되고 있으며, 특히 봄철 유출량의 과대 추정 경향이 뚜렷하게 나타나고 있음을 살펴볼 수 있다.

Fig. 7은 각각의 목적함수를 적용하여 추정된 매개변수에 따라 산출된 유역별 총 유출량을 연별로 도시한 결과를 보여주고 있다. Fig. 6에서 이미 살펴본 바와 같이 월 직접 유출량 자료만을 이용하여 제안된 토양수분 물수지 모형의 매개변수를 추정할 경우 대체로 유출량이 과대 추정되고 있으며, 경험적으로 추정된 연 기화량 자료를 이용하거나, 또는 이러한 자료와 지형 특성 자료를 이용하여 추정된 월 직

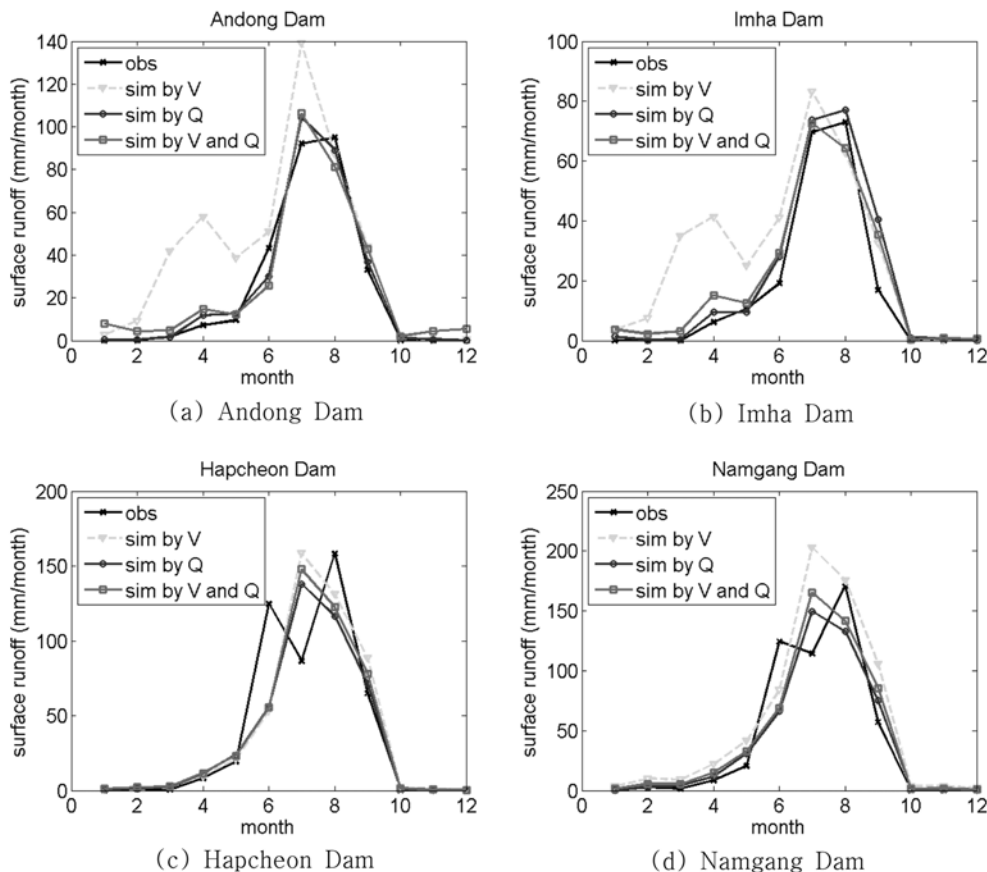


Fig. 5 Monthly surface runoff comparison among observed data and simulated data which are calibrated by only using annual vaporization, only using monthly direct runoff and by using both data, respectively

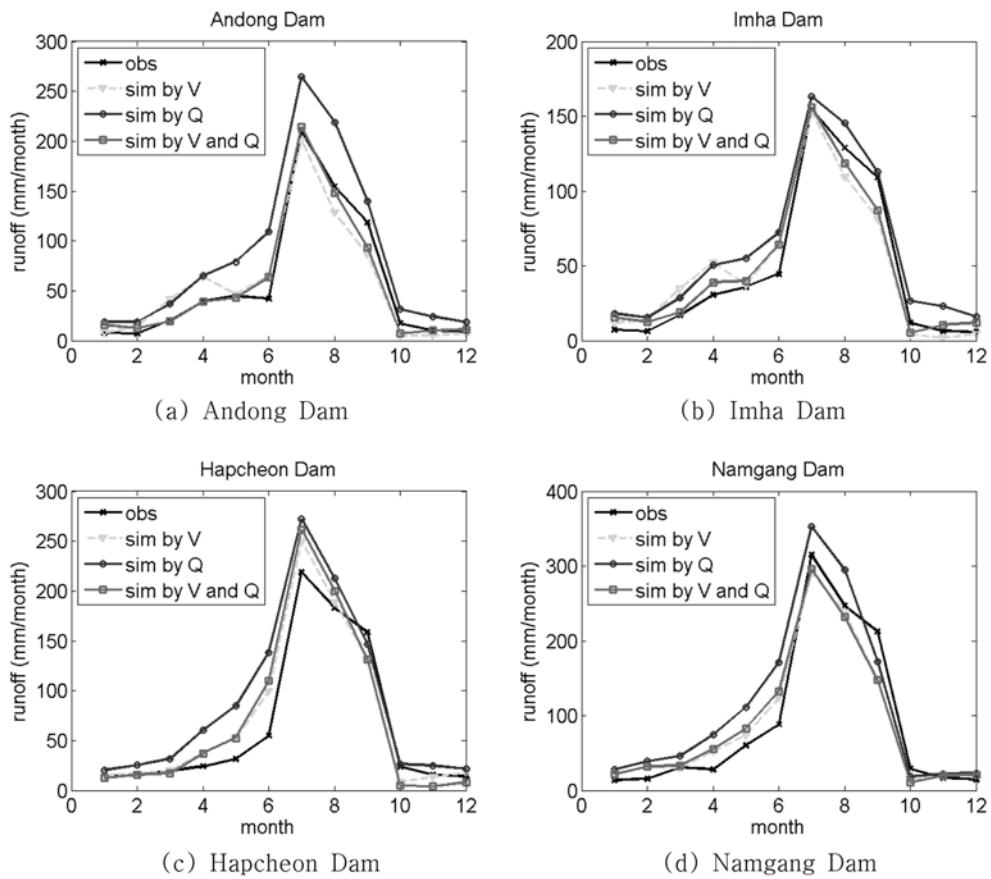


Fig. 6 Monthly runoff comparison among observed data and simulated data which are calibrated by only using annual vaporization, only using monthly direct runoff and by using both data, respectively

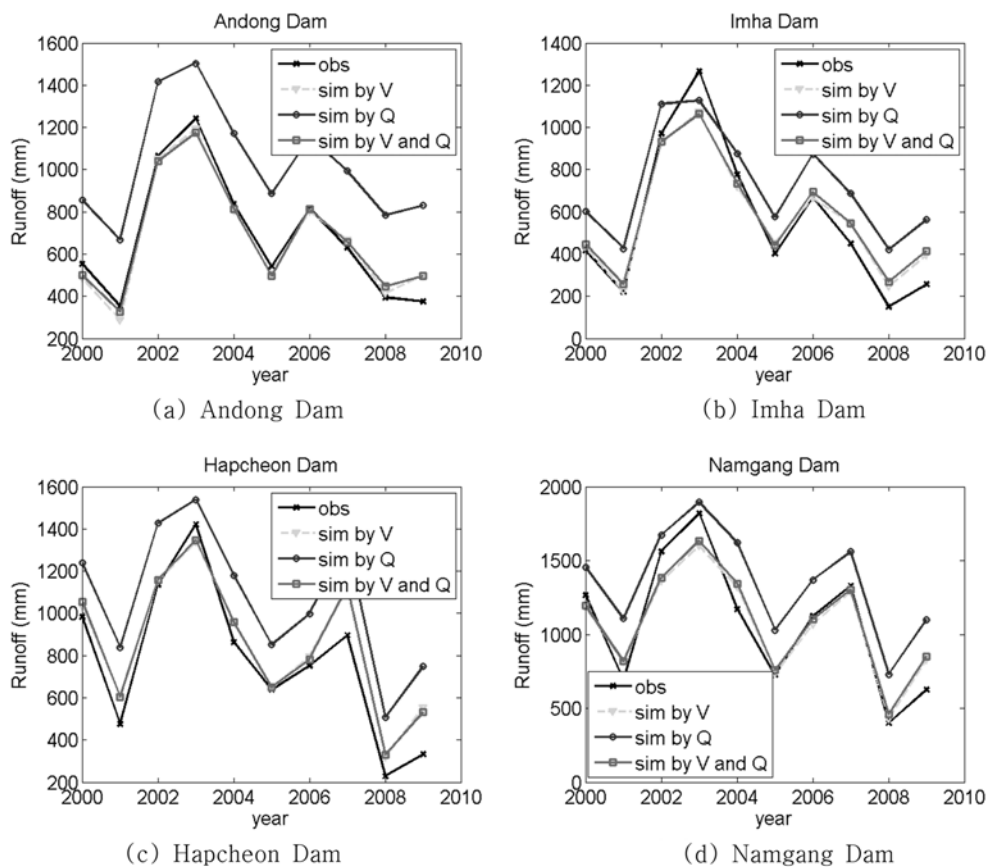


Fig. 7 Yearly runoff comparison among observed data and simulated data which are calibrated by only using annual vaporization, only using monthly direct runoff and by using both data

접 유출량 자료를 동시에 이용하여 모형의 매개변수를 추정할 경우에는 유출량의 연간 변동성을 비교적 우수하게 재현할 수 있음을 알 수 있다.

앞서 언급하였듯이 Fig. 5~7의 결과는 모두 유역 출구에서의 유량 관측 자료를 제안된 토양수분 물수지 모형의 매개변수 추정 시에 사용하지 않은 경우로서 궁극적으로는 하천 유량이 계측되지 않은 유역의 물수지 분석 시 적용 가능성을 살펴본 것이다. 식 (10)을 이용하여 경험적으로 산출된 연별 기화량 자료만을 이용하여 제안된 모형의 매개변수를 추정하여 도출한 결과는 월 또는 연 유출은 비교적 우수하게 모의하고 있으나 유역의 습윤량 추정 시에는 문제점이 있는 것으로 판명되었다. 습윤량은 강수 발생 시에 토양 속으로 축적되는 물의 양으로 정의되는데, 이는 결국 식생이 이용할 수 있는 물의 최대량으로 간주될 수 있을 것이다. 유역 습윤량은 수문변화에 따른 식생의 반응을 살펴보는 데 매우 중요한 역할을 한다고 볼 때 (Horton, 1933; Beven, 2006; Troch *et al.*, 2009), 경험적으로 산출된 연별 기화량 추정 자료만을 이용하여 제안된 개념적 토양수분 모형의 매개변수를 추정할 경우 유량이 관측되지 않은 유역에 대한 월 또는 연별 유출 정도를 이해하는데 적용 가능할 것으로

판단되나 대기-토양-식생의 관계를 고려한 생태수문학적 연계 반응을 살펴보기에는 적절하지 않음을 알 수 있다. 이와는 반대로 NRCS-CN 방법으로 산출된 월별 습윤량 자료만을 이용하여 제안된 모형의 매개변수를 추정한 결과는 유역의 습윤량 자체는 비교적 우수하게 모의하고 있으나 월 또는 연 유출 추정 시에는 문제점이 있는 것으로 판단되었다. 낙동강 유역 4개 댐 상류 유역의 경우 대체적으로 월 또는 연 유출이 과대 추정되었는데, 이를 다시 말하면 기화량이 과소 추정되었음을 의미한다. 기화량은 토양 속에 축적된 물을 식생이 실제 이용한 양으로 간주될 수 있을 것이며 (Webb *et al.*, 1986; Zhang *et al.*, 2001; Huxman *et al.*, 2004), 따라서 유역 특성 자료에 기초한 유역의 월별 습윤량 추정 자료만을 이용하여 제안된 개념적 토양수분 물수지 모형의 매개변수를 추정할 경우 유량이 관측되지 않은 유역에 대한 월 또는 연별 습윤량을 살펴보는 데 적용 가능할 것으로 판단되나 대기-토양-식생의 관계를 고려한 생태수문학적 반응을 이해하려는 목적에서는 적절하지 않음을 살펴볼 수 있다. 결국 경험적으로 산출된 연별 기화량 추정 자료와 유역 특성 자료에 기초한 유역의 월별 습윤량 추정 자료가 동시에 제안된 개념적 토양수분 강수 분할 모형의 매개변수

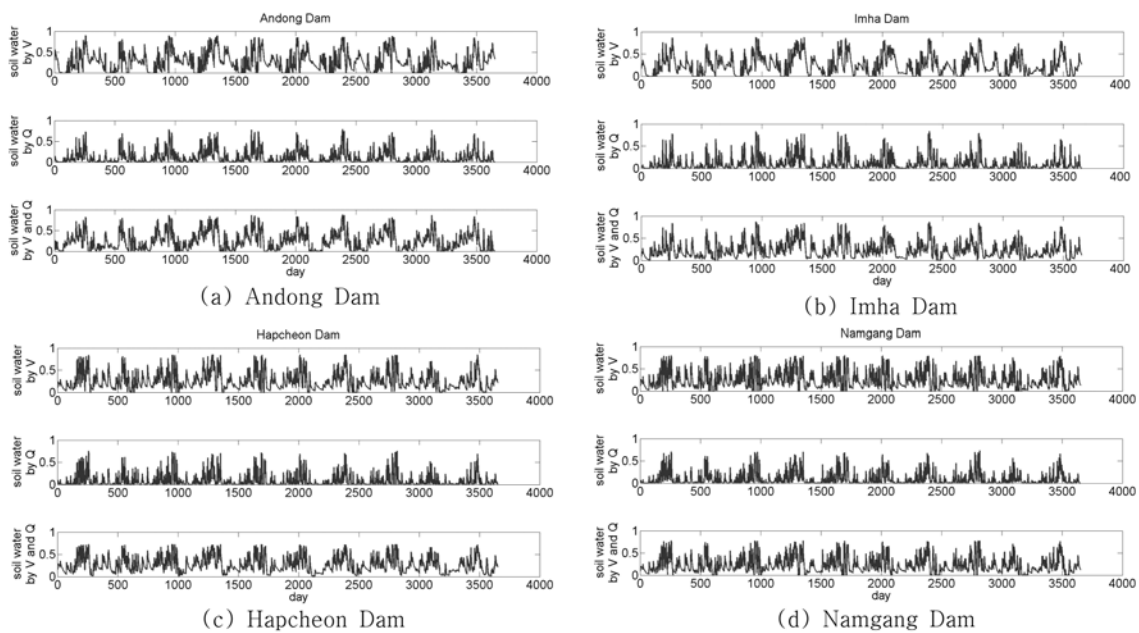


Fig. 8 Soil water simulation comparison among simulated data which are calibrated by only using annual vaporization, only using monthly direct runoff and by using both data, respectively

Table 2. Soil water statistics

| Watershed    | Statistics               | Simulated by annual vaporization | Simulated by monthly surface runoff | Simulated by both components |
|--------------|--------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| Andong dam   | Mean                     | 0.264                            | 0.104                               | 0.232                        |
|              | Coefficient of variation | 0.841                            | 1.364                               | 0.890                        |
| Imha dam     | Mean                     | 0.240                            | 0.101                               | 0.225                        |
|              | Coefficient of variation | 0.853                            | 1.434                               | 0.769                        |
| Hapcheon dam | Mean                     | 0.247                            | 0.079                               | 0.259                        |
|              | Coefficient of variation | 0.746                            | 1.653                               | 0.637                        |
| Namgang dam  | Mean                     | 0.242                            | 0.082                               | 0.218                        |
|              | Coefficient of variation | 0.756                            | 1.573                               | 0.759                        |



추정에 이용되어야 월 또는 연별 물수지 및 습윤량이 적절하게 모의되어 추후 미계측 유역의 물수지 분석 및 기후-토양-식생의 관계를 고려한 생태수문학적 연계작용을 분석할 때 적용될 수 있음을 살펴볼 수 있다.

Fig. 8은 상기 세 가지 자료 set을 이용하여 제안된 모형의 매개변수를 추정된 후 모의된 일별 토양수분 시계열을 보여주고 있다. 모의된 토양수분의 평균 및 분산을 기준으로 살펴보면 연 기화량과 월 습윤량을 동시에 이용하여 모형 매개변수를 추정하여 모의한 토양수분과 연 기화량만을 이용하여 제안된 모형 매개변수를 추정하여 모의한 토양수분이 서로 유사한 거동을 보이고 있는 반면에 월 습윤량만을 이용하여 제안된 모형의 매개변수를 추정하여 모의한 토양수분의 경우 다른 두 가지 경우와는 다소 다른 거동을 보이고 있음을 알 수 있다(Table 2 참조). 월 습윤량 자료를 제안된 모형의 매개변수 추정에 이용하였기 때문에 토양수분 모의에 보다 적절할 것으로 기대될 수도 있으나, 앞서 살펴본 바와 같이 기화량 모의에 있어서 문제점이 있음에 따라 토양수분 모의결과 패턴이 다른 두 가지 경우와 상이하게 모의되었음을 짐작하게 하는 부분이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 유출 관측이 되지 않은 유역의 물수지를 모의할 목적으로 기후-토양-식생에 관한 최소한의 프로세스를 반영한 개념적인 토양수분 물수지 모형을 제안하였다. 즉, 하천 유출량 자료가 제안된 토양수분 물수지 모형의 보정에 이용될 수 없는 상황에서 간접적으로 획득 가능한 자료를 이용하여 모형을 보정함으로써 제안된 모형이 유역 단위의 물수지를 어느 정도 제대로 모의할 수 있는 지를 살펴보고자 하였다.

본 연구에서 살펴본 간접적으로 획득 가능한 자료는 크게 두 가지로 구성하였는데, 첫 번째 자료는 월별 습윤량(wetting)으로서 NRCS-CN 방법을 이용하여 유역의 토지이용상태에 관한 정보 및 토양특성에 관한 정보만으로 강수량으로부터 유역의 토양층 안으로 습윤되는 물의 양을 추정하였다. 두 번째 자료는 연별 기화량(vaporization)이다. 유출 자료가 있는 지점들의 자료를 이용하여 강수량에서 유출량을 제외하여 실제 기화량 자료를 구성한 후, 이와 같은 산출된 실제 기화량 자료와 Penman 방법을 이용하여 기상자료로부터 계산한 최대 기화량 자료 및 강수량 자료 사이의 경험적인 관계 공식을 산출하여 계측되지 않은 유역의 연별 실제 기화량 자료를 추정하였다.

본 연구에서는 제안한 개념적인 토양수분 물수지 모형은 유역 단위에서의 월 단위 또는 연 단위 수준에서 강수의 수문학적 분할과정(습윤, 기화, 침투 등)을 모의하게 되는데, 강수의 분할 과정, 즉 자연 유역의 지표면에 떨어진 강수는 우선 토양을 습윤하게 하다가(wetting) 토양이 포화 상태일 경우 지표면 유출의 형태로 하천으로 이송되는 반면에, 토양에 스며든 물은 기후 및 식생의 요구량에 의해 기화과정(vaporization)을 거침과 동시에 더 깊은 토양층으로 침투하여(percolation) 추후 지표면 유출의 형태로 하천으로 유출되는데 착안하여, 제안된 모형은 이러한 강수 분할 과정을 보

다 직관적으로 모의할 수 있는 구조를 갖도록 하는데 주안점을 두고 개발되었다.

제안된 모형을 비교적 양질의 하천 유입량 자료가 확보되어 있는 낙동강 유역 주요 4개댐(안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐) 상류 유역을 대상으로 적용하여 산출한 결과는 다음과 같다.

1. 경험적으로 산출된 연별 기화량 자료만을 이용하여 제안된 모형의 매개변수를 추정하여 도출한 결과는 월 또는 연 유출은 비교적 우수하게 모의하였으나, 유역의 습윤량 추정 시에는 문제점이 있었다.
2. NRCS-CN 방법으로 산출된 월별 습윤량 자료만을 이용하여 제안된 모형의 매개변수를 추정한 결과는 유역의 습윤량 자체는 비교적 우수하게 모의하였으나, 유역의 기화량 추정 시에는 문제점이 있었다.
3. 경험적으로 산출된 연별 기화량 추정 자료와 유역 특성 자료에 기초한 유역의 월별 습윤량 추정 자료가 동시에 제안된 개념적 토양수분 물수지 모형의 매개변수 추정에 이용될 경우에는 유역의 습윤량 및 기화량이 적절하게 모의될 수 있었다.

습윤량은 식생이 이용할 수 있는 물의 최대량으로서, 이에 대한 올바른 추정은 수문변화에 따른 식생의 반응을 살펴보는 데 매우 중요한 역할을 하게 된다. 또한 기화량은 토양 속에 축적된 물을 식생이 실제 이용한 양으로서, 기화량 또한 식생과 유역 물수지를 연결하는 주요한 수문성분이라 할 수 있을 것이다. 따라서 Troch *et al.*(2009)에서 언급된 바와 같이 이 두 가지 수문성분에 대한 올바른 모의가 생태수문학적 모형화에 있어서 매우 중요한 시안이 될 것이다.

본 연구에서 제안한 개념적인 토양수분 물수지 모형은 강수의 분할 과정, 즉 강수 후 토양의 습윤 및 기화의 과정을 직접적으로 모의할 수 있도록 구성하였으며, 이를 유역에서 상대적으로 쉽게 얻을 수 있는 자료 등을 이용하여 매개변수를 추정함으로써 계측이 되지 않은 유역의 습윤량 및 기화량을 추정하는데 기여할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 “기후변화 감시예측 및 국가정책지원 강화사업”의 일환으로 2010년 기후과학연구관리단의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: RACS 2010-4006).

## 참고문헌

- 한수희, 김상단(2008) 토양수분과 식생의 물 압박에 대한 생태수문학적 해석: 추계학적 모형의 유도과 적용을 중심으로, **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제24권, pp. 99-106.
- 한수희, 김상단(2009) Cumulant 급수이론을 이용한 추계학적 토양 물수지 방정식의 확률 해, **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제25권, pp. 112-119.
- 한수희, 안재현, 김상단(2009) 토양수분의 추계학적 거동과 기후변화가 미치는 영향, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, pp. 433-443.
- Allen, M.R. and Ingram, W.J. (2002) Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, Vol. 419. pp. 224-

- Beven, K. (2006) Benchmark Papers in Storm Runoff Generation. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Budyko, M.I. (1974) Climate and life. Academic, San Diego, California, USA.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988) Applied Hydrology. McGraw-Hill.
- Clark, J.S., Carpenter, S.R., Barber, M., Collins, S., Dobson, A., Foley, J.A., and Lodge, D.M. (2001) Ecological forecasts: an emerging imperative. *Science*, Vol. 293, pp. 657-660.
- Easterling, D.R., Meehl, G.A., Parmesan, C., Changnon, S.A., Karl, T.R. and Mearns, L.O. (2000) Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, Vol. 289, pp. 2068-2074.
- Fu, B.P. (1981) On the calculation of the evaporation from land surface. *Sci. Atmos. Sin.*, Vol. 5, pp. 23-31.
- Horton, R.E. (1933) The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions of the American Geophysical Union*. Vol. 14, pp. 446-460.
- Huxman, T.E., Smith, M.D., Fay, P.A., Knapp, A.K., Shaw, M.R., Loik, M.E., Smith, S.D., Tissue, D.T., Zak, J.C., Weltzin, J.F., Pockman, W.T., Sala, O.E., Haddad, B.M., Harte, J., Koch, G. W., Schwinning, S., Small, E.E., and Williams, D.G. (2004) Convergence across biomes to a common rain use efficiency. *Nature*, Vol. 429, pp. 651-654.
- Kim, S., Han, S. and Kavvas, M.L. (2008) Analytical derivation of steady-state soil water probability density function coupled with simple stochastic point rainfall model, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 13, pp. 1069-1077.
- Kim, S., Han, S., and Kim, E. (2011) Stochastic modeling of soil water and plant water stress using cumulant expansion theory, *Ecohydrology*, 4, pp. 94-105.
- Milly, P.C.D., Wetherald, R.T., Dunne, K.A., and Delworth, T.L. (2002) Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, Vol. 415, pp. 514-517.
- Noy Meir, I. (1973) Desert ecosystems: environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 4, pp. 25-44.
- Pike, J.G. (1964) The estimation of annual runoff from meteorological data in a tropical climate. *Journal of Hydrology*, Vol. 2, pp. 116-123.
- Porporato, A. and Rodriguez-Iturbe, I. (2002) Ecohydrology: a challenging multidisciplinary research perspective. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 47, pp. 811-821.
- Potter, N.J., Zhang, L., Milly, P.C.D., McMahon, T.A., and Jekeman, A.J. (2005) Effects of rainfall seasonality and soil moisture capacity on mean annual water balance for Australia catchments, *Water Resource Researches*, Vol. 41, W06007, doi:10.1029/2004WR003697.
- Rodriguez-Iturbe, I. and Porporato, A. (2004) *Ecohydrology of Water-Controlled Ecosystems*. Cambridge University Press, New York.
- Stephenson, N.L. (1990) Climatic control of vegetation distribution: the role of the water-balance. *American Naturalist*, Vol. 135, pp. 649-670.
- Troch, P.A., Martinez, G.F., Pauwels, V.R.N., Durcik, M., Sivapalan, M., Harman, C., Brooks, P.D., Gupta, H. and Huxman, T. (2009) Climate and vegetation water use efficiency at catchment scales. *Hydrological Process*, Vol. 23, pp. 2409-2414.
- Webb, W., Szarek, S., Lauenroth, W., Kinerson, R., and Smith, M. (1986) Primary productivity and water use in native forest, grassland, and desert ecosystems. *Ecology*, Vol. 59, pp. 1239-1247.
- Yoo, C., Kim, S., and Kim, T.W. (2006) Assessment of drought vulnerability based on the soil moisture PDF. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 21, pp. 131-141.
- Zhang, L., Hickel, K., Dawes, W.R., Chiew, F.H.S., Western, A.W. and Briggs, P.R. (2004) A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Researches*, Vol. 40, W02502, doi:10.1029/2003WR002710.
- Zhang, L., Dawes, W.R. and Walker, G.R. (2001) Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, Vol. 37, pp. 701-708.

(접수일: 2010.8.26/심사일: 2010.10.4/심사완료일: 2011.3.23)