

## 비선형 유역습윤지수를 이용한 평갈수기 유출모의개선

현석훈\* · 강부식\*\* · 김진겸\*\*\*

Hyun, Sukhoon\* , Kang, Boosik\*\* , Kim, Jin-Gyeom\*\*\*

### Improvement of Mid-and Low-flow Estimation Using Variable Nonlinear Catchment Wetness Index

#### ABSTRACT

The effective rainfall is calculated considering the soil moisture. It utilizes observed data directly in order to incorporate the soil moisture into the rainfall-runoff model, or it calculates indirectly within the model. The rainfall-runoff model, IHACRES, used in this study computes the catchment wetness index (CWI) first varying with temperature and utilize it for estimating precipitation loss. The nonlinear relationship between the CWI and the effective rainfall in the Hapcheondam watershed was derived and utilized for the long-term runoff calculation. The effects of variable and constant CWI during calibration and validation were suggested by flow regime. The results show the variable CWI is generally more effective than the constant CWI. The  $R^2$  during high flow period shows relatively higher than the ones during normal or low flow period, but the difference between cases of the variable and constant CWI was insignificant. The results indicates that the high flow is relatively less sensitive to the evaporation and soil moisture associated with temperature. On the other hand, the variable CWI gives more desirable results during normal and low flow periods which means that it is crucial to incorporate evaporation and soil moisture depending on temperature into long-term continuous runoff simulation. The NSE tends to decrease during high flow period with high variability which could be natural because NSE index is largely influenced by outliers of underlying variable. Nevertheless overall NSE shows satisfactory range higher than 0.9. The utilization of variable CWI during normal and low flow period would improve the computation of long-term rainfall-runoff simulation.

**Key words** : Catchment wetness index, Nonlinearity, Long-term runoff estimation, IHACRES model

#### 초록

강우-유출 모의 과정에서 유효강우는 토양수분을 고려하여 산정되며, 이러한 토양수분을 강우-유출 모형에 반영하기 위해서는 직접 관측된 자료를 활용하거나, 모형 내부에서 간접적으로 산정한다. 본 연구에서 사용한 강우-유출 모형은 유역의 기온에 따른 유역습윤지수(Catchment Wetness Index, CWI)를 산정하고, CWI와 강수량의 조합을 통해 산정되는 토양수분지수(Soil Moisture Index, SMI)를 직접 활용하여 유효강우 및 유출량을 계산하는 IHACRES 모형을 사용하여 연구를 수행했다. 합천댐 유역을 대상으로 CWI와 유효강우 간의 관계가 장기 유출 산정에 미치는 영향에 대해 연구한 결과, CWI와 유효강우는 비선형적인 관계를 가짐을 확인하였으며 이러한 비선형 관계는 장기 유출 모의에 있어 홍수기 보다 비홍수기에서 더 많은 영향을 미침을 확인하였다. CWI가 장기 유출에 미치는 영향을 자세히 분석하고자, 보정기간(2002~2004년)과 검정기간(2005~2007년)으로 나누어 가변 CWI와 일정 CWI 조건하에서 유황에 따른 유출모의 성능을 분석하였다. 분석결과 전반적으로 가변 CWI의 결과가 일정 CWI의 결과에 비하여 우수하게 나타났다. 풍수기에서 결정계수는 평수기나 갈수기에 비하여 높은 값을 보이고 있으나 가변 CWI와 일정 CWI간에 차이는 크지 않았다. 이는 강수량이 많은 시기의 유출의 경우 기온에 따른 증발 및 토양수분에 대한 민감도가 상대적으로 작다는 것을 의미한다. 반면, 풍수기에 비해 유출량이 적은 평수기와 갈수기에서는 가변 CWI의 평가지표가 더 우수한 결과를 보이

\* (주)이산 수자원부 사원 (ISAN Corporation · 2941@isg.kr)

\*\* 종신회원 · 교신저자 · 단국대학교 토목환경공학과 교수 (Corresponding Author · Dankook University · bskang@dankook.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 박사수료 (Dankook University · jg\_kim@dankook.ac.kr)

Received November 20, 2015/ revised December 22, 2015/ accepted July 1, 2016

고 있어, 평갈수량을 포함한 장기유출모의시 기온을 고려한 증발과 이에따른 토양수분의 고려가 유출량 산정에 상당한 영향을 미침을 확인할 수 있다. NSE의 경우 풍수기가 평갈수기보다 다소 떨어지는 경향을 볼 수 있으나 NSE가 이상치의 영향을 크게 받는 지표이므로 유량 절대값이 큰 풍수기에서는 당연한 결과라 볼 수 있으며, 그럼에도 전체적으로는 0.9이상의 양호한 수치를 보여주고 있다. 풍수기에는 기온에 따른 CWI가 크게 영향을 미치지 못하지만, 유출량이 적은 평·갈수기에서 CWI의 활용이 장기 유출 모의 정확도를 개선할 수 있을 것이라 사료된다.

**검색어** : 유역습윤지수, 비선형성, 장기 유출, IHACRES 모형

## 1. 서론

강우-유출 해석에 있어서 강우에 대한 정확한 손실량의 산정과 이에 따른 유효강우의 산정은 매우 중요하면서도 어려운 과정이다. 이유는 침투손실의 산정은 토양수분에 대한 정확한 이해와 모니터링이 필요한데 관련된 가용자료가 매우 제한적이기 때문이다(Jung, 2007). 토양수분을 강우-유출모형에 반영하기 위해서는 직접 관측 자료를 활용하거나, 수문기상항목을 활용하여 토양수분상태를 간접적으로 산정하는 모듈이 모형내부에 포함되어 있어야 한다. 토양수분의 관측은 과거에는 토양수분센서를 이용하여 이루어졌지만 최근에는 원격위성 등의 장비를 활용하여 직접적으로 토양수분 자료를 취득하는 시도가 점차 활발해지고 있다. 하지만 여전히 현업에서 활용되기에는 제한적이라 할 수 있다.

Beven and Kirkby (1979)는 습윤지수의 개념을 도입하여 토양수분의 부족정도를 표현하려 하였다. 이후로, Jakeman and Hornberger (1993)는 습윤지수의 개념을 이용하여 토양수분지수를 산정하고 유효강우를 추정하는 모형을 개발하였고, 이어 Croke and Andrew (2004)는 토양수분지수 산정에 증발산량을 활용하는 모듈을 제시하였다. 국내의 연구 사례로, Hwang et al. (2006)은 가뭄을 감시하기 위한 가뭄지수가 물순환의 고려 없이 기후적인 조건만을 이용한다는 단점을 극복하기 위해 토양수분지수를 산정하고자 하였다. SWAT (Soil and Water Assessment Tools)모형을 이용해 토양수(soil water)를 모의하고, 이로부터 계산된 토양수분결핍을 근거로 토양수분지수 산정하여 가뭄분석을 실시하였다. Jung (2007)은 우리나라의 유역특성에 적합한 유출수 및 토양수분 변화를 알 수 없어, 유효강우 산정 및 홍수량 예측 등에 문제가 되기 때문에 DAWAST모형(Kim, 1992)을 이용하여 일별 토양수분량을 추정하였으며, 토양수분의 상태에 따른 지표수 유출량과 지하수 함양량을 추정하는 모형을 개발하였다. 국내에서는 토양수분에 대한 지속적이고 안정적인 지상 관측자료가 매우 제한적인 실정이기 때문에, 최근의 연구는 대부분 실제 토양수분 데이터를 위성 등의 장비를 통해 취득하고 이를 이용하여 유효강우 산정 및 유출을 모의하는 연구가 주로 이뤄지고 있다. Kim and Park (2011)은 MODIS 위성자료를 통해 가용자료를 수집하고 신경망 모형을 활용하여 토양수분자료 생성 모형을 개발하였다. Srivastava

et al. (2014)은 MODIS, EXMWWF 위성으로 토양수분 및 데이터를 수집하고 PDM (Moore, 1985), SMD 모형(Calder et al., 1983)을 활용하여 유출을 모의하였다.

본 연구에서는 토양수분의 상태에 따른 유출율의 함수인 토양수분지수(SMI; Soil Moisture Index)를 추정하는 개념적인 강우-유출 모형을 통해, 유역습윤지수(CWI; Catchment Wetness Index)와 유효강우간의 관계가 장기 유출량 산정에 어떠한 영향을 미치는지 연구해보자 한다. 연구에 사용된 모형은 호주에서 개발된 개념적 모형인 IHACRES (Identification of unit Hydrographs And Component flow from Rainfall, Evaporation and Streamflow) 모형을 사용하였다(Jakeman and Hornberger, 1993). 일반적으로 장기 강우-유출 모의를 위한 대표적인 모형은 집중형 모형인 Tank 모형(Sugawara, 1961)과 준분포형 모형인 SWAT (Arnold et al., 1993)모형 등이 사용되고 있다. 장기 강우-유출 모형은 팬증발량을 이용하거나 Penman-Montetith 방법 등 증발산 모형을 이용해 실제 증발산량 또는 잠재 증발산량을 산정하여 토양수분의 상태를 모의하고 이를 통해 유효강우를 산정한다. IHACRES 모형은 유역의 기온에 따른 CWI를 산정하고 강수량과의 조합을 통하여 산정한 SMI를 이용하여 유효우량을 산정하고 있다. 개념적 모형이므로 입력 자료의 수가 적고 계산시간이 빠르다는 장점을 갖고 있다. 본 연구에서는 합천댐 유역을 대상으로 개념적 집체형 모형인 IHACRES 모형을 통하여 홍수기와 비홍수기에서의 CWI변화를 살펴보고, SMI의 활용이 평·갈수기 장기 유출량 산정의 정확도개선에 기여하는 부분을 알아보고자 한다.

## 2. 방법론

### 2.1 토양수분을 고려한 유효강우산정

대표적인 장기 강우-유출모형의 증발산 및 토양수분을 모의하는 방법은 모형에 따라 다소간의 차이는 있지만 대체로 잠재 증발산량을 이용하여 토양 수분의 상태를 모의하고 있다. Tank모형이나 SWAT모형에서는 팬증발량을 직접이용하거나 Penman-Monteith, Priestley-Taylor, Hargreaves모형을 이용하여 잠재 증발산량을 산정한다(Neitsch and Arnold, 2001). PRMS (Precipitation-Runoff Model System) 모형(Leavesley et al., 1983)이나 HSPF

모형(USEPA, 2000)은 실제증발을 계산하기도 하는데, 앞선 모형들과 마찬가지로 일단위 팬증발량 또는 Hamon (Hamon, 1961), Jensen-Haise 증발산 모형(Jensen and Haise, 1963)을 이용하여 계산된 잠재증발산량을 이용하여 실제 증발산량을 산정하거나, 토양수분으로부터 실제증발량을 산정한다(Leavesley et al., 1983). SSARR (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation)모형은 SMI (Soil Moisture Index), ETI (Evapotranspiration Index), BII (Baseflow Infiltration Index) 등 24개 이상의 매개변수를 시행착오법에 의해 최적값을 찾도록 되어 있다. 이들은 대부분 잠재증발량 혹은 실제증발량을 산정하고 있지만 실제 유효강우산정은 AMC에 따른 CN값을 통하여 이루어지고 있어 토양수분을 유효강우산정에 직접 활용하는 모형은 매우 드물다.

CWI와 SMI를 유효강우산정에 직접 활용하는 대표적인 모형으로 IHACRES 모형을 들 수 있다. 이 모형은 호주에서 개발된 집중형 강우-유출 모의 프로그램으로 유역의 정확한 기온을 통하여 CWI를 결정하고 이로부터 유효강우 및 유출량을 산정한다. IHACRES 모형은 SMI와 유효강우간의 비선형관계를 활용하는 비선형모듈과 유효강우를 유출량으로 변환시키는 선형모듈로 구성되어있다.

### 2.2 CWI를 활용한 유출량산정

IHACRES 모형에서의 비선형 손실 모듈은 기후, 토양 및 토지이용을 고려하여 SMI의 변화를 나타내고, 이의 변화를 통해 유효강우를 계산한다. 비선형 손실모듈의 유효강우 산정 절차는 다음과 같다.

$$\tau_w(t_k) = \tau_w^0 \exp(0.062f(t_m - t_k)) \quad (1)$$

여기서,  $\tau_w$ 는 유역습윤지수(Catchment Wetness Index, non-dimension)이며,  $\tau_w^0$ 는 기준습윤지수(Reference Wetness Index, non-dimension),  $f$ 는 온도조정계수(Temperature Modulate Factor, non-dimension),  $t_m$ 은 기준온도(Reference Temperature, °C),  $t_k$ 는 일평균기온(Daily Mean Temperature, °C)이다.

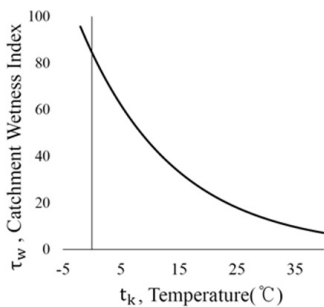


Fig. 1. Relationship between  $\tau_w$  and  $t_k$

IHACRES 모형을 구동하기 위해 요구되는 입력 매개변수는 온도변화의 영향정도를 결정하는  $f$ (온도조정계수)와 증발율의 초기값을 나타내는  $\tau_w^0$ (기준습윤지수)이며, 두 매개변수는 관측강우, 기온, 관측 유출량을 기반으로 최적 값을 추정하게 되며 무차원 단위를 갖는다. 유역에 맞는 매개변수를 선정하면 Eq. (1)에 의해 무차원 단위의  $\tau_w$ (유역습윤지수)가 계산된다.  $\tau_w$ 는 무강우 기간 동안  $S_k$ (토양수분지수)를 감소시키는 역할을 한다.  $t_k$ 는 일평균기온을 나타내며,  $t_m$ 은 기준온도로 관측기간 중 기록된 최고 기온보다 높은 기온이라 정의할 수 있다. CWI는 다음과 같이 기온에 반비례한 관계를 나타낸다(Fig. 1).

이와 같이 산정된 시간  $k$ 의 기온에 대한 CWI ( $\tau_w(t_k)$ )를 통해 토양수분량( $\phi_k$ , Soil Moisture Content)을 Eq. (2)를 통해 계산할 수 있다.

$$\phi_k = r_k + \left(1 - \frac{1}{\tau_w(t_k)}\right) \phi_{k-1} \quad (2)$$

여기서,  $\phi_k$ 는 토양수분량(Soil Moisture Content, mm),  $r_k$ 는 관측강우량(Observed Rainfall, mm),  $\phi_{k-1}$ 는 선행 토양수분량(Precedent Modulate Soil Moisture Content, mm)이다.  $\phi_k$ (토양수분량)는  $k$ 시간의 관측 강우량( $r_k$ )과 선행 토양수분량( $\phi_{k-1}$ )을 고려한 값으로 토양의 수분정도를 나타내며, mm 단위의 값을 갖는다.

$$W_k = \left(1 - \frac{1}{\tau_w(t_k)}\right) \quad (3)$$

여기서,  $W_k$ 는 유역습윤율(Catchment Wetness Rate, non-dimension)로서 선행 토양수분량의 영향을 결정하며, 기온이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 따라서 기온에 따른 증발 손실을 고려하는 인지임을 알 수 있으며, 무차원 단위로 항상 0-1사이의 값을 갖는다(Eq. (3)). 기온에 따른 유역습윤율은 다음과 같다(Fig. 2).

앞서 산정한 토양수분량( $\phi_k$ )을 통해 유효강우의 체적과 관측유

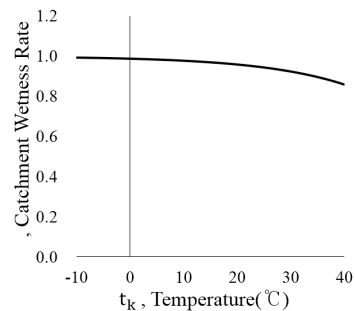


Fig. 2. Relationship between  $W_k$  and  $t_k$

량의 체적을 동일하게 해주는 체적저류상수( $C$ )를 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다(Eq. (4)).

$$C = \frac{\sum Q_o}{\sum (r_k \times \phi_k)} \quad (4)$$

여기서,  $C$ 는 체적저류상수(Volumetric Storage Coefficient, 1/mm),  $Q_o$ 는 관측유량(Observed Discharge, mm),  $r_k$ 는 관측강우량(Observed Rainfall, mm)이며,  $C$ 는 강우량과 토양수분량의 곱의 합과 관측유량의 합의 비로 나타낼 수 있으며, 1/mm 단위를 갖는다(Eq. (4)). 산정된 체적저류상수( $C$ )와 토양수분량( $\phi_k$ )의 곱은 토양수분지수( $S_k$ , non-dimension)이며, Eq. (5)로 풀어서 나타낼 수 있다.

$$S_k = Cr_k + W_k S_{k-1} \quad (5)$$

여기서,  $W_k$ 는 유역습윤율이다.

유효강우( $u_k$ , mm)는 SMI와 현재의 강우량을 고려하여 다음 식에 의해 계산된다(Eq. (6)).

$$r_k \times S_k = u_k \quad (6)$$

선형모들은 앞서 산정한 유효강우를 유출량으로 산정하는 모듈로써, 전달함수(Transfer Function)의 형태로 이루어져 있으며 선형저수지 이론과 단위도 이론이 결합된 형태이다(Jakeman and Hornberger, 1993)(Eq. (7)).

$$y_k = \beta u_k - \alpha y_{k-1} \quad (7)$$

여기서,  $y_k$ 는 유출량(Streamflow, CMS),  $\alpha$ 는 선행유출량의 저류효과를 고려한 매개변수,  $\beta$ 는 단위도 이론을 적용하기 위한 매개변수이다. 이와 같은 전체적인 IHACRES 모형의 유출량 산정 절차는 다음과 같은 흐름도로 이루어져 있다(Fig. 3).

### 3. 합천댐유역 장기유출 산정

#### 3.1 적용대상 유역 및 자료구축

본 연구의 대상유역은 경상남도 합천군에 위치한 합천댐 유역(928.9 km<sup>2</sup>)으로 선정하였다. 검토정을 위한 강우자료는 국가수자원관중합정보 홈페이지(www.wamis.go.kr)에서 제공하는 북상, 청연, 용양, 가북, 지산, 거창1 관측소의 자료를 사용하였다. 강우 자료를 모형 내에 적용시키기 위해 유역의 평균 강우량이 필요하므로 2002~2007년의 각 관측소 별 일 단위 강우량을 티센법을 적용하여 평균 강우량을 산정하였다. 또한, 본 연구의 매개변수 보정을 위해 한국수자원공사(www.kwater.or.kr)에서 제공하는 2002~2007년의 합천댐의 일 단위 유입량을 적용했다. 비선형 강우 손실 고려를 위해 필요한 기온 자료로 거창관측소의 일 단위 평균기온을 사용하여 2002~2007년의 장기 유출량을 산정하였다.

#### 3.2 토양수분지수(SMI)분석

앞서 언급한대로 토양수분지수( $S_k$ )는 토양의 수분 정도를 나타내는 지표로 시간 k의 강우량( $r_k$ )과 선행 SMI ( $S_{k-1}$ ) 및 기온에 따른 유역습윤율( $W_k$ )로 부터 산정된다. 즉, 기온이 증가할 경우 CWI는 감소하므로 선행 SMI의 영향이 감소되며, 강우량이 SMI

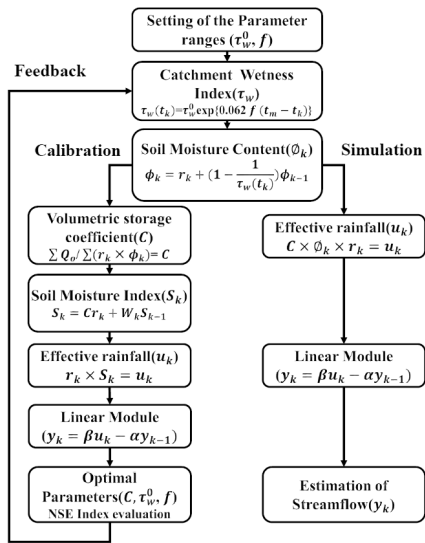


Fig. 3. Procedure of Computing Streamflow in IHACRES Model



Fig. 4. Outline of Study Area

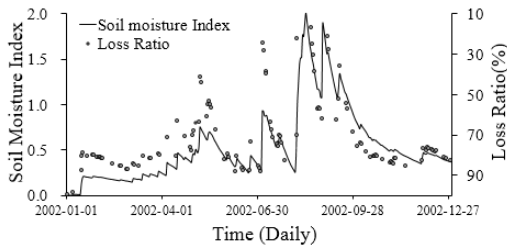


Fig. 5. Daily Co-variation of Soil Moisture Index and Loss Ratio

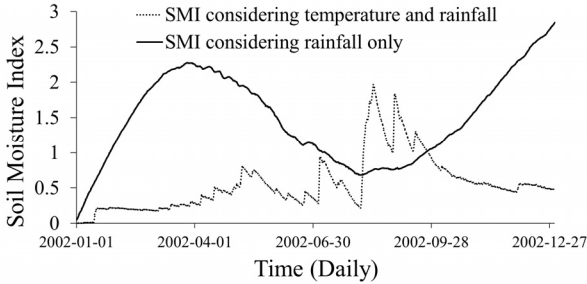


Fig. 6. Variation of Changing of Soil Moisture Index Considering Temperature

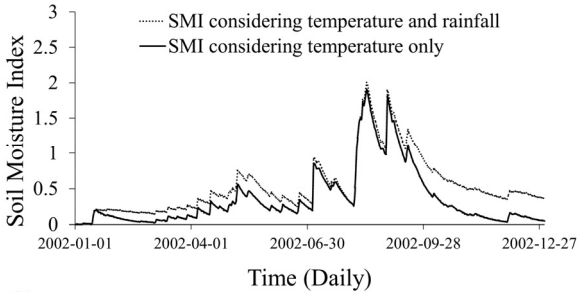


Fig. 7. Variation of Soil Moisture Index with or without Consideration Of Rainfall

산정에 큰 영향을 미친다. SMI는 유효강우를 산정하는데 직접적으로 이용되는 값으로써, SMI에 비례하여 유효강우가 증가하도록 되어있다(Eq. (6)). SMI와 강우의 손실률과의 관계는 Fig. 5를 통해 확인해 보았다. Fig. 5를 통해 여름철에 높은 SMI값이 나타남을 확인하였으며, 유효강우가 크게 산정됨에 따라 손실률은 감소하고 있음을 알 수 있다.

다음으로 강우량과 기온이 손실률을 결정하는 SMI에 각각 얼마나 영향을 미치는지 분석하였다. Fig. 6에서는 2002년 합천댐 유역의 일 강우량을 일정하게 모의하고, 기온의 변화만 고려한 결과를 나타냈다. 기온의 영향만 고려한 결과,  $R^2$ 는 0.08로 기온과 강우를 모두 고려한 SMI의 변화와 큰 차이를 나타내어 민감도가 적은 인자임을 확인했다. 단, 기온은 높은 여름철에 토양의 수분이 적어지는 자연현상과 같은 계절별 사이클을 고려함을 알 수 있었다.

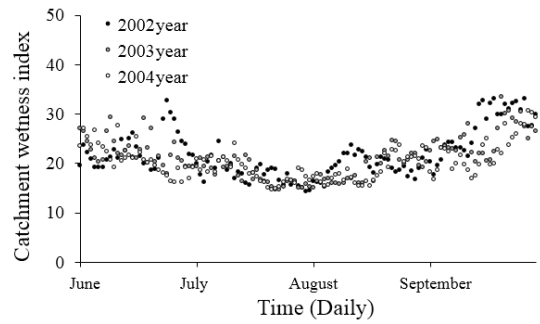


Fig. 8. Variation of Catchment Wetness Index during Flood Season (June - September)

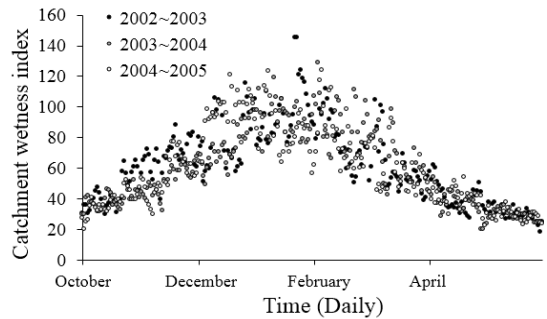


Fig. 9. Variation of Catchment Wetness Index during Non-Flood Season (October - April Next Year)

Fig. 7에서는 같은 대상지역의 일 평균 기온을 일정하게 모의하고, 강우량의 변화만 고려한 결과를 나타냈다. 연구 결과,  $R^2$ 는 0.87로 기온과 강우를 모두 고려한 SMI와 매우 유사했다. 이를 통해 SMI산정에는 강우량이 가장 민감한 인자임을 알 수 있다.

IHACRES 모형 내에서 유효강우 산정은 기온에 따른 CWI를 홍수기(6~9월)와 비홍수기(1~5월, 10~12월)로 나누어 산정하였다. Fig. 8은 합천댐 유역의 2002~2004년의 홍수기 CWI로써, 약 15~30 사이의 비교적 일정한 범위 내에서의 작은 결과 값을 도출하였다. Fig. 9는 홍수기와 동일한 유역과 기간의 비홍수기 CWI로서 약 20~140 사이의 결과 폭이 큰 값을 도출했다. 홍수기에는 CWI가 작은 값을 보이지만 유효강우는 크게 산정되며, 비홍수기에는 CWI가 큰 값을 나타내고 유효강우가 작게 산정되는 비선형적 관계를 갖는다.

### 3.3 비선형성을 고려한 장기 유출량 산정

IHACRES 모형 내에서의 SMI는 관측 강우량과 선형적인 관계임을 확인할 수 있었다. 따라서 SMI에 비례하는 유효강우 역시 관측강우량에 선형적인 관계임을 알 수 있다. 본 연구에서는 기온을 고려한 CWI와 유효강우간의 비선형적 관계가 장기 유출 산정에 어떠한 영향을 미치는지 확인해 보고자 한다.

Table 1. Optimal Parameters for IHACRES Modeling in Hapcheon-dam Basin

Optimal Parameter	Reference Temperature	Temperature Modulation Factor	Reference Wetness Index	Volumetric Storage Coefficient
	29°C	1.0	14	0.0028

Table 2. Performance Indices between Modeling with Variable and Constant CWI

		$R^2$	RMSE (mm)	NSE
Calibration (2002~2004)	Variable CWI	0.901	2.68	0.90
	Constant CWI	0.892	2.81	0.89
Validation (2005~2007)	Variable CWI	0.905	1.91	0.90
	Constant CWI	0.870	2.24	0.84

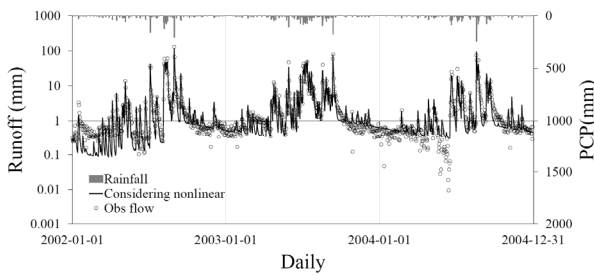


Fig. 10. Hydrograph from Modeling with Variable CWI (Calibration)

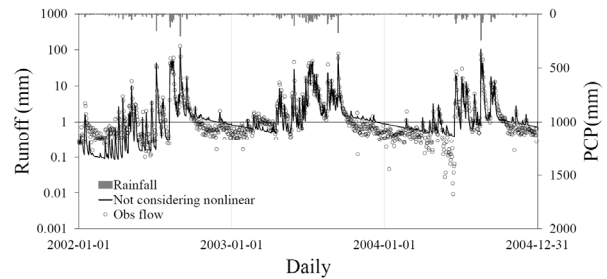


Fig. 11. Hydrograph from Modeling with Constant CWI (Calibration)

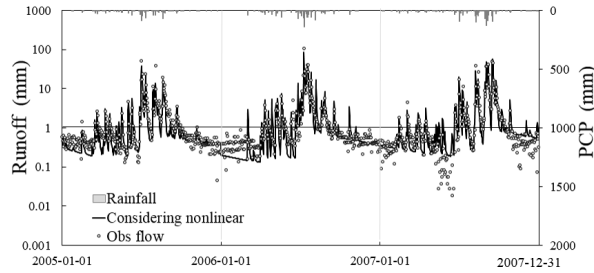


Fig. 12. Hydrograph from Modeling with Variable CWI (Validation)

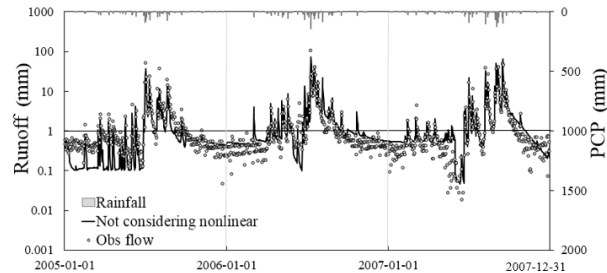


Fig. 13. Hydrograph from Modeling with Constant CWI (Validation)

따라서 유효강우의 비선형성을 야기하는 기온을 이용하여 비선형성이 작용하는 경우(variable CWI)와 작용하지 않는 경우(Constant CWI)의 유출량을 산정하여 비교해보았다. 합천댐 유역의 최적 매개변수는 Fig. 3의 보정과정을 거쳐 채택하였으며, 설정한 매개변수 범위 내에서 NSE (Nash-Sutcliffe model Efficiency coefficient) 지표가 0.901로 가장 높은 값을 갖는 매개변수를 선정하였다(Table 1). 선정된 매개변수를 활용하여 2002~2004년을 보정기간, 동일한 조건으로 2005~2007년을 검정기간으로 설정하여 장기 유출량을 산정하였다. IHACRES 모형을 이용한 두 조건의 장기 유출량은 실제 합천댐의 유출량과의 결정계수(R-Square), RMSE (Root Mean Square Error), NSE지표를 통해 평가했다 (Table 2).

연구 결과, 보정기간과 검정기간에서 CWI의 변화를 고려한

결과와 일정하게 설정한 두 조건에서 모두 적절한 수준의 모의 결과를 도출했다(Figs. 10~13). 실제로 두 조건에서 홍수기, 즉 강우량이 많은 기간에는 강우량에 절대적 영향을 받기 때문에 모의 결과가 유사하였다. 다만, 강우량이 적은 비홍수기의 경우, CWI를 일정하게 설정하여 산정한 유출량은 실제 관측유출량보다 다소 크게 모의 되는 결과를 나타내었다. 이는 IHACRES 모형이 유출량을 산정함에 있어 강우량이 절대적 영향을 미치지않지만, 기온에 의한 CWI를 고려치 않아 증발 손실의 영향을 무시하였기 때문에 유출량이 크게 산정되었다고 판단된다.

장기 유출 모의 결과, 홍수기의 유출량보다 비홍수기의 유출량 모의가 상대적으로 오차가 큼을 확인 할 수 있었다. 따라서 CWI의 변화를 고려한 경우, 고려치 않은 경우를 각각 유형분석을 통해 자세히 분석하고자 하였다. 분석기간은 보정기간(2002~2007년)

Table 3. Flow-Duration Analysis of Results of Modeling with Variable and Constant CWI

Cal / Val	Year	Flow-Duration		$R^2$	RMSE (CMS)	NSE
Calibration	2002	Variable CWI	High water flow	0.975	36.92	0.970
			Normal water flow	0.906	1.62	0.997
			Low water flow	0.843	2.11	0.994
		Constant CWI	High water flow	0.971	37.13	0.969
			Normal water flow	0.802	2.07	0.994
			Low water flow	0.821	2.20	0.994
	2003	Variable CWI	High water flow	0.965	29.06	0.971
			Normal water flow	0.995	1.76	0.994
			Low water flow	0.925	0.46	0.999
		Constant CWI	High water flow	0.967	36.05	0.956
			Normal water flow	0.962	2.56	0.988
			Low water flow	0.923	1.64	0.998
	2004	Variable CWI	High water flow	0.962	26.21	0.961
			Normal water flow	0.980	1.10	0.995
			Low water flow	0.990	1.93	0.995
Constant CWI		High water flow	0.958	34.89	0.931	
		Normal water flow	0.958	2.28	0.984	
		Low water flow	0.989	3.24	0.980	
Validation	2005	Variable CWI	High water flow	0.981	20.56	0.947
			Normal water flow	0.990	1.60	0.973
			Low water flow	0.877	0.70	0.998
		Constant CWI	High water flow	0.980	23.23	0.932
			Normal water flow	0.817	2.22	0.972
			Low water flow	0.833	2.21	0.973
	2006	Variable CWI	High water flow	0.973	28.49	0.962
			Normal water flow	0.975	0.98	0.998
			Low water flow	0.963	1.53	0.992
		Constant CWI	High water flow	0.960	37.35	0.935
			Normal water flow	0.969	2.05	0.978
			Low water flow	0.789	1.64	0.993
	2007	Variable CWI	High water flow	0.970	22.34	0.974
			Normal water flow	0.986	1.01	0.996
			Low water flow	0.980	1.24	0.998
Constant CWI		High water flow	0.961	24.49	0.968	
		Normal water flow	0.983	1.70	0.993	
		Low water flow	0.971	2.09	0.993	
Average	Calibration	Variable CWI	High water flow	0.967	30.73	0.967
			Normal water flow	0.960	1.49	0.995
			Low water flow	0.919	1.50	0.996
		Constant CWI	High water flow	0.965	36.02	0.952
			Normal water flow	0.907	2.30	0.989
			Low water flow	0.911	2.36	0.991
	Validation	Variable CWI	High water flow	0.975	23.80	0.961
			Normal water flow	0.984	1.20	0.989
			Low water flow	0.940	1.16	0.996
		Constant CWI	High water flow	0.967	28.36	0.945
			Normal water flow	0.923	1.99	0.981
			Low water flow	0.864	1.98	0.986

과 검증기간(2005~2007년)으로 설정하였으며, 풍수기, 평수기, 갈수기로 구분하여 비선형성이 유출량 산정에 어떤 영향을 미치는지 확인했다. 각 년도 별 유형에 따른 분석결과는 Table 3에 정리된 바와 같다. 유형별 평가지표의 비교결과 전반적으로 가변 CWI의 결과가 일정 CWI의 결과에 비하여 우수하게 나타났다. 풍수기에서 결정계수는 평수기나 갈수기에 비하여 높은 값을 보이고 있으나 가변 CWI와 일정 CWI간에 차이는 크지 않았다. 이는 강수량이 많은 시기의 유출의 경우 기온에 따른 증발 및 토양수분에 대한 민감도가 상대적으로 작다는 것을 의미한다. 반면, 풍수기에 비해 유출량이 적은 평수기와 갈수기에서는 가변 CWI의 평가지표가 더 우수한 결과를 보이고 있어, 평갈수량을 포함한 장기유출모의시 기온을 고려한 증발과 이에따른 토양수분의 고려가 유출량 산정에 상당한 영향을 미침을 확인할 수 있다. NSE의 경우 풍수기가 평갈수기보다 다소 떨어지는 경향을 볼 수 있으나 NSE가 이상치의 영향을 크게 받는 지표이므로 유량 절대값이 큰 풍수기에서는

당연한 결과라 볼 수 있으며, 그럼에도 전체적으로는 0.9이상의 양호한 수치를 보여주고 있다.

### 3.4 SWAT모형과의 유출량 산정 결과 비교

본 연구에서 사용한 IHACRES 모형의 유출량 산정 결과를 대표적인 강우-유출 모형인 SWAT 모형의 유출 결과와 비교하였다. 물론 이러한 비교는 두 모형의 매개변수 보정에 크게 영향을 받을 수 있기에 완전히 객관적인 비교라 볼 수는 없을 것이다. SWAT은 지표유출뿐만아니라 영양물질 및 농업용 약품부하량을 산정하는 모형이며, 매우 방대한 모의과정 및 매개변수를 사용하고 있다. 지표유출의 경우 증발산과정은 물론 식생대에서의 물소비과정을 정교하게 모의하고 있는데, 실제 수많은 매개변수를 보정할 충분한 자료가 준비되어 있지 않을 경우 디폴트값의 사용은 오히려 모의결과의 정확도를 떨어뜨리는 방향으로 작용하기도 한다.

본 연구에서 SWAT 모형의 유출량 산정 결과는 동일한 유역인

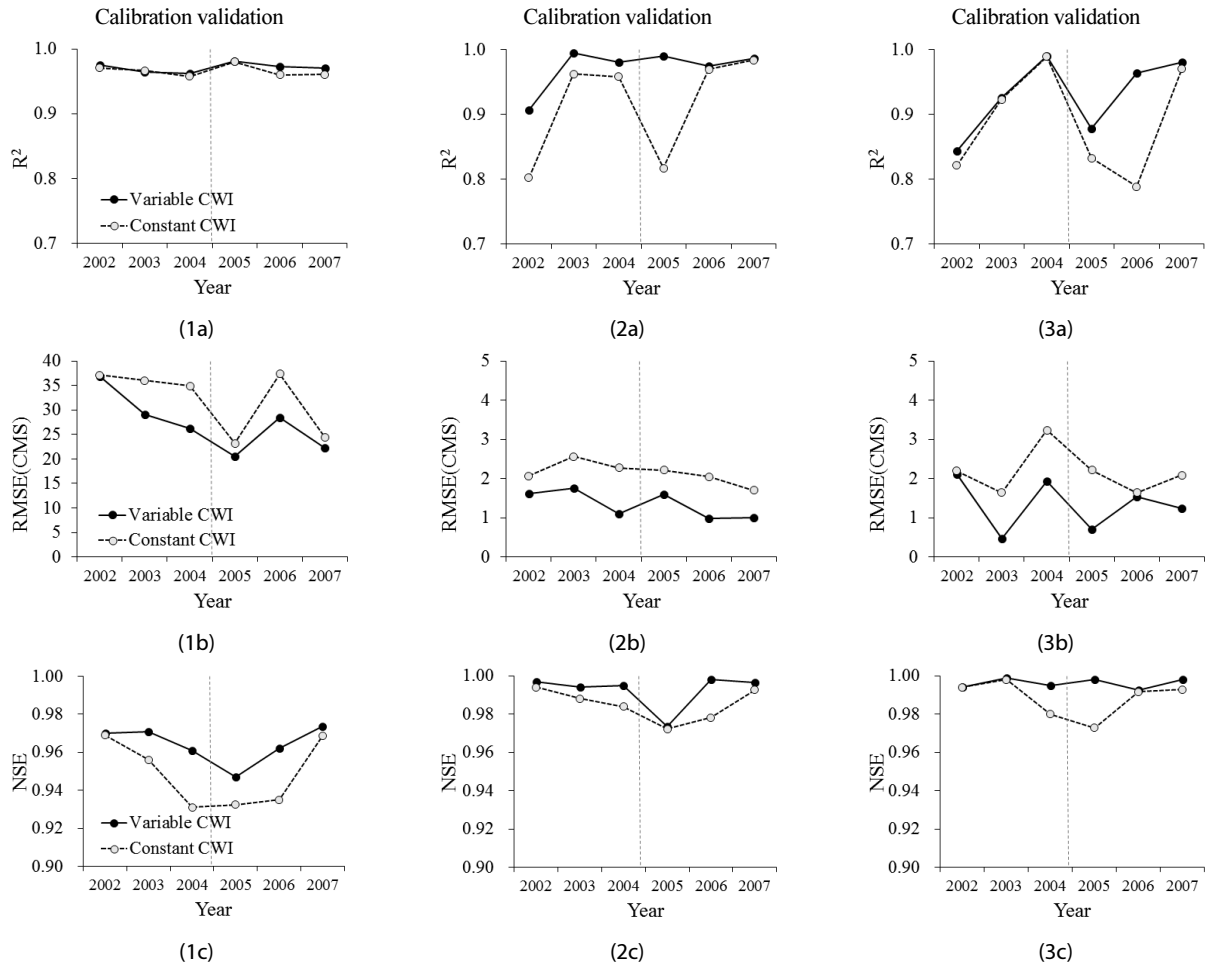


Fig. 14. Performance Evaluation by Flow Regimes and Modeling with Variable and Constant CWI (1=High Water, 2=Normal Water, 3=Low Water, a= $R^2$ , b=RMSE, C=NSE)



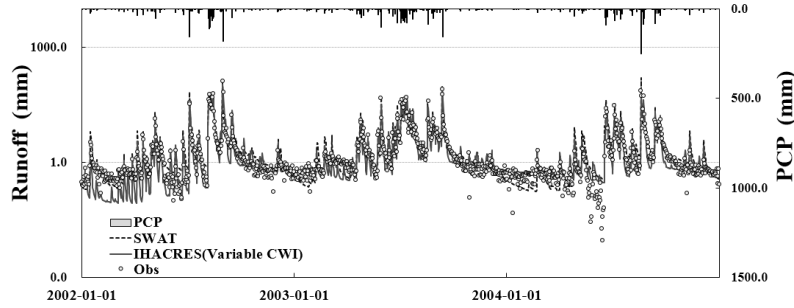


Fig. 15. Comparison of the Results from SWAT and IHACRES Model

Table 4. Performance Evaluation of SWAT and IHACRES Modeling

	$R^2$	RMSE (mm)	NSE
SWAT Model	0.736	4.81	0.69
IHACRES Model	0.901	2.68	0.90

합천댐 유역을 대상으로 한 기존 연구 결과를 사용하였다(Moon et al., 2012). 분석기간은 동일한 2002~2004년이며, IHACRES 모형의 Variable CWI 산정 결과와 비교하였다(Fig. 15). 또한, SWAT 모형과 IHACRES 모형으로 산정한 장기 유출량과 실제 합천댐의 유출량의 결정계수(R-Square), RMSE (Root Mean Square Error), NSE지표를 통해 평가하고 비교하였다(Table 4). 평가 지표를 비교해 본 결과, 합천댐의 2002~2004년 결과만을 놓고 비교하면 IHACRES 모형의 평가 지표가 SWAT 모형에 비해 모두 우수한 결과를 보이고 있었다. 물론 이 결과만을 놓고 IHACRES모형이 SWAT모형 보다 우수하다고 단언할 수 없지만, 지표유출모의만을 놓고 비교한다면 훨씬 적은 매개변수를 활용하는 가벼운 모형인 IHACRES모형이 SWAT모형과 비슷하거나 우수한 성과를 보인다는 것은 활용성 측면에서 의미를 부여할 수 있는 결과로 보여진다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 강우-유출 모형인 IHACRES 모형의 매개변수 분석 및 합천댐 유역을 대상으로 모형의 CWI가 장기 유출량에 미치는 영향을 확인하였다. 장기 유출 모의에 앞서 CWI와 유효강우 간의 관계를 이해하기 위해 IHACRES 모형의 유출량 산정 절차와 모형 내의 매개변수의 분석을 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 강우량과 기온이 토양수분지수(SMI) 산정에 미치는 영향에 대해 분석하기 위해, 2002년 합천댐 유역의 기온의 영향만 고려한 결과, 결정계수는 0.08로 기온과 강우를 모두 고려한

SMI의 변화와 큰 차이를 나타내어 민감도가 적은 인자임을 확인했다. 단, 기온은 높은 여름철에 토양의 수분이 적어지는 자연현상과 같은 계절별 사이클을 고려함을 알 수 있었다. 반면, 같은 대상지역의 일 평균 기온을 일정하게 모의한 결과, 결정계수는 0.87로 기온과 강우를 모두 고려한 SMI와 매우 유사했으며, SMI산정에는 강우량이 가장 민감한 인자임을 확인하였다.

- (2) 유역습윤지수(CWI)와 유효강우와의 관계를 확인하기 위해, 합천댐 유역의 2002~2004년의 CWI를 홍수기와 비홍수기로 나누어 분석하였다. 홍수기 CWI는 약 15~30 사이의 비교적 일정한 범위 내에서의 작은 결과 값을 도출하였으며, 홍수기와 동일한 유역과 기간의 비홍수기 CWI는 약 20~140 사이의 결과 폭이 큰 값을 도출했다. 이를 통해 홍수기에는 CWI가 작은 값을 보이지만 유효강우는 크게 산정되며, 비홍수기에는 CWI가 큰 값을 나타내고 유효강우가 작게 산정되는 비선형적 관계를 가짐을 확인할 수 있었다.
- (3) 합천댐 유역을 대상으로 CWI를 고려한 유효강우 산정이 장기 유출에 미치는 영향을 알아보기 위하여 두 조건으로 설정하여 보정기간(2002~2004년)과 검정기간(2005~2006년)으로 나누어 유출량을 산정하였다. 보정기간 CWI의 변화를 고려하여 산정한 결과(Variable CWI)는  $R^2$  0.901, RMSE (mm) 2.68, NSE 0.90이며, CWI를 일정하게 설정한 결과(Constant CWI)는  $R^2$  0.892, RMSE (mm) 2.81, NSE 0.89의 결과를 도출했다. 검정기간의 경우, Variable CWI의  $R^2$  0.905, RMSE (mm) 1.91, NSE 0.90이며, Constant CWI의  $R^2$  0.870, RMSE (mm) 2.24, NSE 0.84로, 두 조건 모두 적절한 수준의 결정계수, RMSE (mm), NSE 결과 값을 도출했다. 다만, 강우량이 많은

홍수기에는 두 조건에서의 유출량이 유사한 결과 값을 도출했지만, 강우량이 적은 비홍수기의 경우, CWI를 일정하게 설정하여 산정한 유출량은 실제 관측유량보다 다소 크게 모의 되는 결과를 나타내었다.

(4) CWI가 장기 유출에 미치는 영향에 대해 자세히 분석하고자 Variable CWI와 Constant CWI 두 조건에서의 유헴분석을 실시하였다. 풍수기의 경우, 보정기간 Variable CWI의 결정계수는 0.967, RMSE (CMS) 30.73, NSE 0.967, Constant CWI의  $R^2$ 는 0.965, RMSE (CMS) 36.02, NSE 0.952이며, 검정기간 Variable CWI의  $R^2$ 는 0.975, RMSE (CMS) 23.80, NSE 0.961, Constant CWI의  $R^2$ 는 0.967, RMSE (CMS) 28.36, NSE 0.945로 두 조건에서 산정한 결과가 큰 차이를 보이지 않으며 두 조건에서 모두 우수한 결과를 나타냈다. 반면에 보정기간의 평수기에서는 Variable CWI의  $R^2$ 는 0.960, RMSE (CMS) 1.49, NSE 0.995, Constant CWI의  $R^2$ 는 0.907, RMSE (CMS) 2.03, NSE 0.989였으며, 갈수기에서는 Variable CWI의  $R^2$ 는 0.919, RMSE (CMS) 1.50, NSE 0.996, Constant CWI의  $R^2$ 는 0.911, RMSE (CMS) 2.36, NSE 0.991의 결과를 도출했다. 검정기간 또한, 평수기에서는 Variable CWI의  $R^2$ 는 0.984, RMSE (CMS) 1.20, NSE 0.989, Constant CWI의  $R^2$ 는 0.923, RMSE (CMS) 1.99, NSE 0.981였으며, 갈수기에서는 Variable CWI의  $R^2$ 는 0.940, RMSE (CMS) 1.16, NSE 0.996, Constant CWI의  $R^2$ 는 0.846, RMSE (CMS) 1.98, NSE 0.986으로, 기온에 의한 CWI의 변화를 고려한 지표가 보정기간과 검정기간에서 모두 우수한 결과를 보였다. 이는 CWI의 변화를 고려하지 않은 유출량의 경우, 증발 손실의 영향을 무시하였기 때문에 유출량이 크게 산정되었다고 판단된다.

(5) IHACRES모형의 활용성을 확인하기 위해 본 연구의 Variable CWI 산정 결과와 SWAT 모형의 유출량 산정 결과를 비교하였다. SWAT 모형 결과는 동일한 합천댐 유역과 분석기간(2002~2004년)을 대상으로 한 기존 연구 결과를 사용하였다(Moon et al., 2012). SWAT 모형과 IHACRES 모형으로 산정한 장기 유출량과 실제 합천댐의 유출량의  $R^2$  (R-Square), RMSE (Root Mean Square Error), NSE 평가 지표를 비교해 본 결과, SWAT모형의  $R^2$ 는 0.736, RMSE (CMS) 4.81, NSE 0.69이며, IHACRES모형은  $R^2$ 는 0.901, RMSE (CMS) 2.68, NSE 0.90의 결과를 도출했다. 합천댐의 2002~2004년 결과만을 놓고 비교하면 IHACRES 모형의 평가 지표가 SWAT 모형에 비해 모두 우수한 결과를 나타냈다. 이 결과만을 놓고 IHACRES모형이 SWAT모형 보다 우수하다고 단언할 수 없지만, 지표유출모의만을 놓고 비교한다면 훨씬 적은 매개변수

를 활용하는 가벼운 모형인 IHACRES모형이 SWAT모형과 비슷하거나 우수한 성과를 보인다는 것은 활용성 측면에서 의미를 부여할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구를 통해 IHACRES 모형의 기온에 따른 CWI를 고려한 강우 손실이 전체적인 유출량 산정에는 큰 영향을 미치지 못하지만 강우량이 적은 비홍수기 및 평수기, 갈수기에서 CWI의 활용이 장기 유출 모의 정확도를 개선할 수 있을 것이라 사료된다. 향후에는 더욱 많은 대상지역으로 연구를 수행하여 본 연구의 신뢰성을 높일 필요가 있으며, 미래 기후변화 시나리오의 기온과 강우자료를 이용하여 전망기간의 유헴변화를 확인하는데 활용될 수 있을 것이라 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(16AWMP-B079625-03)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Arnold, J. G., Allen, P. M. and Bernhardt, G. (1993). "A comprehensive surface-groundwater flow model." *Journal of Hydrology*, Vol. 142, pp. 47-69.
- Beven, K. J. and Kirkby, M. J. (1979). "A physically-based variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrology Science Bull*, Vol. 24, pp. 43-69.
- Calder, I. R., Harding, R. J. and Rosier, P. T. W. (1983). "An objective assessment of soil-moisture deficit models." *Journal of Hydrology*, Vol. 60, No. 1-4, pp. 329-355.
- Croke, B. F. W. and Andrew, F. (2004). "A catchment moisture deficit module for the IHACRES rainfall-runoff model." *Environmental Modeling & Software*, Vol. 19, pp. 1-5.
- Hamon, W. R. (1961). "Estimating potential evapotranspiration." *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 87, No. 3, pp. 107-120.
- Hwang, T. H., Kim, B. S., Kim, H. S. and Seoh, B. H. (2006). "The estimation of soil moisture index by SWAT model and drought monitoring." *Journal of Korean of Society Civil Engineers*, Vol. 26, pp. 345-354 (in Korean).
- Jakeman, A. J. and Hornberger, G. M. (1993). "How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model?" *Water Resource Research*, Vol. 29, No. 8, pp. 2637-2649.
- Jensen, M. E. and Haise, H. R. (1963). "Estimating evapotranspiration from solar radiation." *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division*, Vol. 89, pp. 15-41.
- Jung, J. H. (2007). An Estimation Model of Surface Runoff and Groundwater Recharge According to Moisture Content of the Watershed, Ph. D. dissertation, University of Kongju, Korea (in Korean).

- Kim, K. S. and Park, J. A. (2011). "A study on the neural network model for soil moisture estimation." *Korea Water Resources Association*, pp. 408 (in Korean)
- Kim, T. C. (1992). "Comprehensive management system for agricultural water resources." Institute of Agricultural Science, University of Chungnam (in Korean).
- Leavesley, G. H., Lichty, R. W., Troutman, B. M. and Saindon, L. G. (1983). Precipitation-Runoff modeling system; user's Manual, U.S. Geological Survey Water Resources Investigations 83-4238, pp. 1-207.
- Moon, S. J., Kim, J. J. and Kang, B. S. (2012). "Future dam inflow and water quality in hapcheon dam reservoir projected using downscaled RCM model output." KSCE 2012 Convention, pp. 581-584 (in Korean).
- Moore, R. J. (1985). "The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 30, No. 2, pp. 273-297.
- Neitsch, S. L. and Arnold, J. R. (2001). Soil and Water Assessment tool; Theoretical Documentation Version 2000, USDA ARS, Temple, Texas
- Srivastava, P. K., Han, D., Rico-Ramirez, M. A., O'Neill, P., Islam, T. and Gupta, M. (2014). "Assessment of SMOS soil moisture retrieval parameters using tau-omega algorithms for soil moisture deficit estimation." *Journal of Hydrology*, Vol. 519, pp. 574-587.
- Sugawara, M. (1961). "On the analysis of runoff structure about several Japanese rivers." *Japanese Journal of Geophysics*, Vol. 2, No. 4, pp. 1-76.
- USEPA (2000). Basins technical note 6 : Estimation hydrology and hydraulic parameters for HSPF, EPA-823-R-00-012, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, D.C.