

전지구 수문해석 모형의 국내 적용성 평가

The Application Assessment of Global Hydrologic Analysis Models on South Korea

손경환* / 이종대** / 배덕효***

Son, Kyung Hwan / Lee, Jong Dae / Bae, Deg Hyo

Abstract

The objective of this study is to evaluate the application of Land Surface Model (LSM) and global spatial and weather data. After selecting the appropriate LSM, we evaluated the calculation ability of the model for dam basins. Based on the global meteorological and topography data, the accuracy of runoff results were analysed to assess the uncertainty of global data. Period analysis was performed to suggest the global data utilization. The model results by using local data are within the acceptable range reflecting the local complex meteorological and topographical characteristics. Although the accuracy of the simulated results from global data is not good by the uncertainty of meteorological data, it indicated that the accuracy can be improved with increasing duration of runoff analysis over 10 days.

Keywords : land surface model, global data, uncertainty assessment, period analysis

요 지

본 연구의 목적은 전지구 수문해석도구인 지표수문해석모형과 전지구 자료의 적용성을 평가하는데 있다. 이에 적정 지표수문해석모형을 선정하고 관측 댐 상류 유역을 대상으로 모형의 모의 능력을 평가하였다. 전지구 자료는 전 세계를 대상으로 제공되는 기상 및 지형 자료를 이용하였으며, 전지구 자료의 불확실성을 평가하기 위해 자료별 생성되는 유출 결과의 정확도를 분석하였다. 또한 기간별 유출분석을 수행하여 전지구 자료의 활용방안을 마련하였다. 국내 자료를 기반으로 모형의 모의 능력을 분석한 결과 국내의 복잡한 기상 및 지형학적 특성에 대해서 신뢰성 높은 유출모의가 가능한 것으로 확인되었다. 전지구 자료에 대한 모의 결과는 기상정보의 불확실성으로 인해 일단위 유출해석은 다소 부정확한 것으로 나타났으나, 기간별 분석에서는 단위 기간이 증가함에 따라 유출 결과의 정확도가 향상되었으며, 10일 단위 이상의 유출분석이 적절한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 지표수문해석모형, 전지구 자료, 불확실성 평가, 기간별 분석

* 세종대학교 토목환경공학과 박사과정 (e-mail: skhdr@paran.com)

Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

** (주) 건화 수자원부 사원 (e-mail: junyupp@gmail.com)

Water Resource Dept, Kunhwa Corporation, Seoul 702-22, Korea

*** 세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 교수 (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

Prof. Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

1. 서론

기후변화는 우리나라만의 문제가 아니라 국제적으로 공동 대처해야 하는 과제이다. 정부간 기후변화 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 4차 보고서에 따르면 지난 세기동안 전 세계적으로 평균기온은 1900년 이후 약 0.76 °C 상승하였으며, 지역별로 강수 패턴이 변화한 것으로 보고되었다. 가뭄과 홍수와 같은 극치사상의 발생빈도를 증가시킨다고 할 수 있으며, 실제로 미국에서는 2005년 허리케인 ‘카트리나’에 의해 1,800명 이상의 사망자와 120만명이 넘는 이재민이 발생하였고, 유럽에서는 2003년 8월 열파에 의해서 2만명 이상의 사망자가 발생하였다. 또한 국내에서는 2002년 태풍 ‘루사’ 및 2003년 태풍 ‘매미’에 의해 많은 인명과 재산 손실을 초래하였으며, 2009년 태백시 가뭄으로 인해 수개월 동안 급수 중단이라는 최악의 상황을 겪은바 있다. 이처럼 기후변화는 국지적이 아닌 전지구적인 형태로 발생한다고 볼 수 있으며, 이로 인한 국내 수자원의 영향을 분석하기 위해서는 인접한 국가들과의 연계분석을 수행하는 것이 필요하다.

통상 국외 지역과 연계한 수문해석을 위해서는 지표수문해석모형(Land Surface Model, LSM)과 전지구 자료(global data)가 요구된다. 여기서 지표수문해석모형이란 전지구를 대상으로 수문해석이 가능한 물리적 기반의 분포형 모형을 뜻하며, 전지구 자료는 국외 각 주요 기관에서 국가별 기상정보의 교류와 보다 전문화된 위성영상 기술을 토대로 전 세계를 대상으로 제공하는 기상 및 지형정보를 의미한다. 현재 국외에서는 이러한 지표수문해석모형 및 전지구 자료를 활용하여 다양한 연구를 수행하고 있다. Chen et al. (2002)은 전 세계 17,000개의 기상관측소로부터 약 50년 월 강수량 자료를 수집하고 2.5° 격자별 강수정보로 재구성하여 전 세계 강수 현황을 분석한 바 있다. Fan et al. (2004)은 전 세계 월 강수 및 기온 정보를 지표수문모형의 입력자료로 적용하여 토양수분량을 산정

하였으며, Haddeland et al. (2006)은 미국의 Colorado 유역과 아시아의 Mekong강 유역을 대상으로 전지구 자료와 지표수문해석모형을 연계하여 물수지 및 에너지 수지를 모의한 바 있다. 또한 Xie et al. (2007)은 전 지구 토양 및 토지피복자료를 지표수문해석모형의 입력 자료로 전환한 후 지역화 과정을 거쳐 중국 전역에 대한 유출해석을 수행한 바 있다.

이처럼 국외의 경우 전지구 수문해석을 통해 전 세계를 대상으로 다양한 수문성분을 생산하고 있는 것을 알 수 있다. 국내의 경우 다양한 유출모형의 도입으로 국내 유역별 물순환 거동에 대해서는 적절히 분석하였으나(정일원 등 2007; 배덕효 등, 2008), 전지구 수문해석에 대한 필요인식 부족과 지표수문해석모형의 개발 및 도입의 어려움, 전지구 기상 및 지형자료 구축의 한계 등의 문제로 전지구 및 인접국가에 대한 평가는 여전히 미흡한 상황이다. 따라서 향후 국외지역과 연계한 수문해석을 위해서는 우선적으로 지표수문해석모형의 모의 능력과 전지구 자료의 가용범위를 파악하는 것이 필요하며, 이에 본 연구에서는 우리나라를 대상으로 지표수문해석모형과 전지구 자료의 적용성을 평가하고자 한다.

2. 연구수행방법

지표수문해석모형은 중규모 이상(mesoscale)의 격자에 대한 유출의 시·공간적인 변동성 분석이 가능하여 기후모델과의 직접적인 연계와 대유역 및 전지구 수문해석에 주로 활용된다. 현재 국내에서는 이를 활용한 사례가 없기 때문에 모형 이론 및 모의 방법에 대한 전반적인 검토가 필요하다. 또한 전 세계를 대상으로 제공되는 기상 및 지형자료의 경우 그 특성상 국내 자료와 다소 차이가 있을 수 있으며, 자료에 대한 검토가 국내에선 아직 미흡한 실정이라 이에 대한 검토 역시 필요하다. 통상 타 국가에 대한 수문해석을 수행한다고 하면 그 나라에서 직접 생산되는 양질의 자료를 구축하는 것이 우선이겠으나, 이

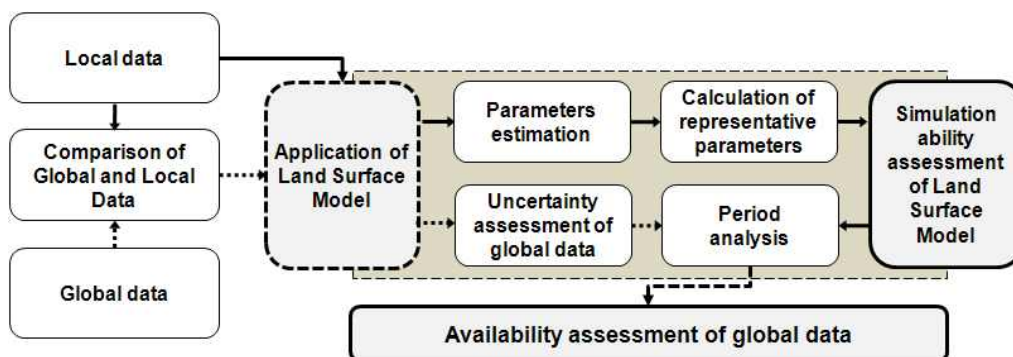


Fig. 1. Methodology for Application Assessment of Global Hydrologic Analysis Models

들 자료 구축은 많은 시간과 비용이 요구되기 때문에 상대적으로 어려움이 많다. 따라서 현재로서는 국외지역에 대한 수문해석에 있어 유일하게 활용 가능한 수단은 전지구 자료라 할 수 있다. 지표수문해석모형 및 전지구 자료에 대한 국내 적용성 평가 절차는 다음 Fig. 1과 같다.

우선 적정 지표수문해석모형을 선정하고 국내 기상 및 지형자료를 수집하여 모형의 입력 자료로 재구성 하였다. 매개변수 추정을 위해 국내 댐 상류유역을 선정하였으며, 계측 및 미계측 지역을 적절히 만족시킬 수 있는 매개변수 산정방법을 채택하였다. 이 과정에서 산정된 매개변수는 남한 전체에 대한 유출모의에 적용되며, 최종적으로 유출결과와 정확도 평가를 통해 모형의 모의 능력을 평가하였다. 그 후 전 세계를 대상으로 제공되는 기상 및 지형 자료를 수집하고 국내 자료와의 비교를 통해 자료의 품질을 검토하였다. 구축된 자료들은 모형에 적용되며, 자료의 신뢰성을 구체적으로 평가하기 위해 불확실성 평가와 기간별 분석 방법을 적용하였다. 불확실성 평가란 자료의 불확실성을 정량적으로 평가하기 위해 입력 자료별 유출 모형의 수문성분 민감도를 분석하는 방법이며, 본 연구에서는 국내 자료를 고정시킨 상태에서 전지구 자료들을 모형에 순차적으로 변경하여 입력 자료별 모의결과의 정확도에 따라 자료의 불확실성을 평가하였다. 또한 기간별 분석은 분석기간을 단위기간별로 증가시킴에 따라 발생하는 유출결과와 정확도를 평가하는 방법이며, 이를 토대로 전지구 자료에 대한 유출모의의 시 적용한계 및 적정 활용범위를 마련하였다.

3. 지표수문해석모형 적용 및 평가

3.1 VIC Model

본 연구에서는 전지구 수문해석에 있어 그 적용성이 검증된 VIC (Variable Infiltration Capacity)모형을 채택하였다. VIC 모형은 1994년 미국 University of Washington의 Dennis Lettenmaier 박사 연구팀에 의해 개발되었으며, 대기와 식생 그리고 토양의 상호작용 등의 수문과정을 기반으로 물과 에너지 플럭스 (Water and Energy Flux)를 모의하는 분포형 모형이다 (Liang et al, 1994). 모형은 크게 물수지 (Water Balance), 하도추적 (Channel routing), 에너지수지 (Energy Balance) 등으로 구성되어 있으며, 각 모듈은 독립적으로 수행된다. 모형에서 적용 가능한 격자의 범위는 1/8°~2° 정도로 다양한 공간분해능이 가능하며, 현재 국외에서는 대유역 또는 전 세계에 대한 수자원 분석시 주로 사용하고 있다. Liang et al. (1994)은 GCM에 VIC 모형을 연계하여 적용 가능성을 평가하였으며, Nijssen et al. (1997)은 대유역에 속하는

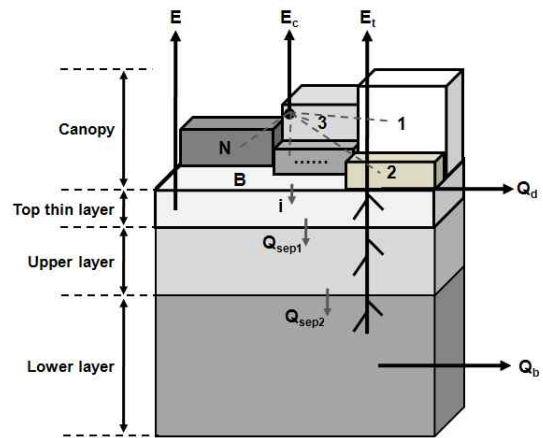


Fig. 2. Schematic of the Variable Infiltration Capacity Model for Water Balance Analysis

Colorado 강 (650,000 km²) 및 Mekong 강 (795,000 km²)에 대해 VIC 모형을 활용하여 유출거동을 모의하였다. 또한 Nijssen et al. (2001)은 전 세계를 2° × 2° 해상도로 기후모델에 의해 생산되는 기후 시나리오를 VIC 모형에 적용하여 격자별 미래 토양수분의 거동을 모의하였으며, Andreadis et al. (2005)는 VIC 모형을 이용하여 미국 대륙에 대한 가뭄영향평가를 수행한 바 있다.

다음 Fig. 2는 모형의 수문학적 거동 특성을 나타낸 것이다. 모형은 크게 차단층 (Canopy)과 3개의 토양층 (Soil Layer)으로 구분되며, 한 격자 내에서도 다양한 지형조건과 토양의 물리적 특성을 고려함으로써 Large-scale에 적합한 장주기 수문해석을 수행한다. 차단층에서는 동일 피복종류별 면적비를 고려하여 각 피복특성이 반영된 차단 및 증발 (E_e)을 모의하며, 보통 식생지대 (N) 및 나대지 (B)로 구분 된다. 토양층의 경우 깊이에 따라 최상부토층 (Top thin layer), 상부토층 (Upper layer), 하부토층 (Lower layer)으로 구분된다. 이 중 최상부토층은 침투 (i)에 직접적인 영향을 받는 지역이며, 토양수분의 변화에 가장 민감하다. 또한 중력식 배수를 통해 상부토층으로 침투량 (Q_{sep1})을 모의하며, 식생 및 나대지 지역의 여부에 따라 증산 (E_i) 및 증발 (E)모의가 결정된다. 상부토층에서는 최상부 토층과 더불어 강우시작 후 토양층의 포화여부에 따라 지표유출 (Q_d)이 모의되며, 증산 및 하부토층에 대한 침투량 (Q_{sep2})이 계산된다. 하부토층에서는 상부토층에서 유입된 침투량으로부터 증산과 기저유출 (Q_b)이 모의된다 (Liang et al, 1996).

3.1.1 가변침투능

VIC (Variable Infiltration Capacity)의 의미는 “가변침투능”으로서 격자로 유입되는 강우로부터 발생하는 침투량에 대해 토양이 허용할 수 있는 범위인 침투능을 산정

하여 지표유출과 침투량의 비율을 결정하는 방법이다. 산정방법은 토양에서 최대로 받을 수 있는 최대침투능 (I_m)과 현재의 토양수분량 (W_0)에 따른 포화면적비 (A_s)를 고려하여 현 토양 조건에 대한 침투능 (I)을 산정하는 방식이며, 관련 식은 다음과 같다.

$$I_m = (1 + b_i) \cdot W^{\max} \quad (1)$$

$$A_s = 1 - \left(1 - \frac{W_0}{W^{\max}}\right)^{\frac{b}{1+b}} \quad (2)$$

$$I = I_m [1 - (1 - A_s)^{1/b}] \quad (3)$$

여기서, I_m 은 최대침투능, b_i 는 침투형상계수, W^{\max} 는 최대토양수분함량 (mm), A_s 는 포화면적비, W_0 는 현재토양수분함량 (mm), I 는 현재토양수분함유량에 따른 침투능을 의미한다.

3.1.2 증발산

모형 내에서 잠재증발산량 (E_p)을 계산하는 방법은 Shuttleworth (1993)가 제시한 수정 Penman-Monteith 방법이 이용되며, 격자 내에서 발생하는 증발산량은 식생에서의 증발, 토양층 내에 식생뿌리로 부터의 증산, 그리고 나대지에서의 증발 등으로 구분된다. 따라서 이 3가지 결과의 총합을 통하여 각 격자에 대한 전체 실제증발산량이 산정된다.

우선 식생에서의 증발 (E_c)은 주로 피복층에서 강수의 차단을 통해 발생되며 산정공식은 다음과 같다.

$$E_c = \left(\frac{W_i}{W_{im}}\right)^{2/3} E_p \frac{r_w}{r_w + r_a} \quad (4)$$

여기서, W_i 는 피복층에서 차단된 수분의 총량 (mm), W_{im} 은 피복층에서 보유할 수 있는 총 보유수량 (mm), E_p 는 Penman-Monteith의 잠재증발산, r_a 는 식생과 공기의 수분함유량 차이로 인해 발생하는 식생구조저항 (s/m), r_w 는 공기역학저항 (s/m)을 나타낸다.

피복층에서 보유할 수 있는 최대수분차단량 (W_{im}) 산정방법은 Dickinson (1984)에 의해 제시된 방법을 적용하여 산정되며 다음과 같다.

$$W_{im} = K_L \times LAI \quad (5)$$

여기서, LAI 는 월별 잎면적지수, K_L 은 0.2 mm (Dickinson, 1984)를 나타낸다.

공기역학저항 (r_w)은 Monteith and Unsworth (1990)에 의해 제시된 방법을 적용하여 산정되며 다음과 같다.

$$r_w = \frac{1}{C_w u_z(z_2)} \quad (6)$$

여기서, z_2 는 풍속계 높이, u_z 는 z_2 높이에서의 풍속 (m/s), C_w 는 대기를 안정 상태로 가정한 경우의 수분이동계수로, Louis (1979)에 의해 제시된 방법을 적용하여 산정되며 다음과 같다.

$$C_w = 1.351 \times a^2 \times F_w \quad (7a)$$

$$a^2 = \frac{K^2}{\left[\ln\left(\frac{z_2 - d_0}{z_0}\right)\right]^2} \quad (7b)$$

여기서, a 는 항력계수, K 는 von Karman의 상수, d_0 는 풍속단면점의 영점 높이 (m), z_0 는 조도길이 (m), F_w 는 대류강도계수이다.

증산 (E_t)은 Blondin (1991)과 Ducoudre et al. (1993)의 혼합공식을 이용하여 산정되며 방법은 다음과 같다.

$$E_t = \left[1 - \left(\frac{W_i}{W_{im}}\right)^{2/3}\right] E_p \left(\frac{r_w}{r_w + r_0 + r_c}\right) \quad (8)$$

여기서, E_p 는 잠재증발산량 (mm), W_i 는 피복층에서 차단된 수분의 총량 (mm), W_{im} 은 피복층에서 보유할 수 있는 총 보유수량 (mm), r_w 는 공기역학저항 (s/m) r_0 는 식생구조저항 (s/m), r_c 는 식생피복저항 (s/m)을 나타내며, 산정방법은 다음과 같다.

$$r_c = \frac{r_{\min} g_{sm}}{LAI} \quad (9)$$

여기서, r_{\min} 는 최소식생피복저항 (s/m), LAI 는 월별 잎면적지수, g_{sm} 은 식생의 뿌리가 토양수분흡수 가능여부를 결정하는 토양수분장력인자이며, 다음과 같이 나타낸다.

$$g_{sm}^{-1} = 1, \quad W_j \geq W_j^\alpha \quad (10a)$$

$$g_{sm}^{-1} = \frac{W_j - W_j^w}{W_j^\alpha - W_j^w}, \quad W_j \leq W_j \leq W_j^\alpha \quad (10b)$$

$$g_{sm}^{-1} = 0, \quad W_j \leq W_j^\alpha \quad (10c)$$

여기서, W_j 는 각 토양층별 토양수분함량 (mm), W_j^α 은 토양층내 토양수분장력의 영향을 받지 않는 임계점, W_j^w 은 영구위조점을 나타낸다.

나대지에서의 증발은 토양 내에서 발생하는 증발을 모의하고자 함이며, 모형에서는 오직 최상부 토층에서만 고려되고 상부토층에서의 증발량은 0으로 가정한다. Francini and Pacciani (1991)가 제시한 나대지 증발량 (E) 산정 공식은 다음과 같다.

$$E = E_p \left\{ \int_0^{A_s} dA + \int_{A_s}^1 \frac{i_0}{i_m [1 - (1-A)^{1/b_i}]} dA \right\} \quad (11)$$

여기서, E_p 는 잠재증발산량(mm) i_m 은 최대침투능, b_i 는 침투형상계수, A_s 는 포화면적비, i_0 는 현재토양수분함량에 따른 침투능을 의미한다.

3.1.3 지표유출

VIC 모형은 시간에 따라 공간적으로 침투한 강우로 인해 생성되는 포화면적별 지표유출을 산정하는 모형이다. 따라서 유출 모의시 강우에 따른 침투능 (I_0)이 최대침투능 (I_{max})보다 작을 경우에는 현재 포화면적비 만큼의 유출이 발생하게 되고 최대침투능 보다 클 경우 격자 전체에 대해 유출을 발생시키며, 산정식은 다음과 같다.

$$Q_d = P + W_0 - W^{max} : I_0 + P \leq I_m \quad (12a)$$

$$Q_d = P + W_0 - W^{max} \left[1 - \left(1 - \frac{I_0 + P}{I_m} \right)^{1+b_i} \right] : I_0 + P \geq I_m \quad (12b)$$

여기서, Q_d 는 지표유출량(mm), P 는 강우(mm)를 나타낸다.

3.1.4 침투량 및 기저유출

상부토양층에서 하부토양층으로 이동하는 토양수분량을 침투량이라 하며, 이 양은 현재 토양수분량과 증발산량의 차이와 모형에서 허용하는 잔여토양수분량과의 관계에 의해 결정된다. 침투량(Q_{sep})은 Brooks and Corey (1964)에 의해 제시된 방법으로부터 산정되며, 관계식은 다음과 같다.

$$Q_{sep} = K_{sat} \left[\frac{W_0 - \theta_r}{W^{max} - \theta_r} \right]^{3 + \frac{2}{\lambda}} \quad (13)$$

여기서, K_{sat} 는 포화수리전도도(mm/d), λ 는 공극크기지수, θ_r 은 잔여토양수분량(mm)을 나타낸다.

기저유출은 Arno model (Francini and Pacciani, 1991)의 개념을 적용하고 있으며, 적용방식은 하부토층의 현재 토양수분량과 상부토양층으로부터의 침투량(Q_{sep})을 더한 값(W_2)이 현토양의 최대토양수분량(W_s^{max})보다 적을 경우 선형 관계로부터 큰 경우 비선형 관계로부터 모의된다. 기저유출 산정방법은 다음과 같다.

$$d_1 = D_{s_{max}} \cdot \frac{D_s}{W_s \cdot W^{max}} \quad (14a)$$

$$d_2 = \frac{W_2 - W_s \cdot W^{max}}{1 - W_s \cdot W^{max}} \quad (14b)$$

$$Q_b = \begin{cases} d_1 \cdot W_2 & : W_2 \leq W_s \cdot W^{max} \\ d_1 \cdot W_2 + d_2 (W_2 - W_s \cdot W^{max}) & : W_2 \geq W_s \cdot W^{max} \end{cases} \quad (14c)$$

여기서, d_1 은 선형저류상수, d_2 는 비선형저류상수, Q_b 는 기저유출(mm), W_2 는 하부토층의 현토양수분함량(mm), W^{max} 는 하부토층의 최대토양수분함량(mm), W_s 는 비선형기저유출이 발생하는 지점에서의 최대토양수분의 비, D_s 는 비선형기저유출이 발생하는 최대유속의 비, $D_{s_{max}}$ 는 기저유출의 최대속도(mm/d)를 나타낸다.

3.2 입력자료 구축

본 연구에서는 남한 전역을 대상으로 지표수문해석모형인 VIC 모형을 구축하고자 하며, 이에 국내에서 제공되는 입력 자료를 수집하였다. 지형자료의 경우 국립지리정보원의 DEM, 국가수자원관리종합정보시스템 (<http://www.wamis.go.kr> 이하 WAMIS)의 토지피복도, 농업과학기술원의 정밀토양도를 이용하였으며, 기상자료(강수, 최고·최저기온, 평균풍속)는 남한 전체 20년 이상의 장기간의 관측치가 존재하는 58개 기상관측소의 자료를 수집하였다. 강수자료의 경우 기상청과 건설교통부 산하 홍수통제소에서 관할하고 있는 총 517개소의 우량관측소 중 20년 이상의 장기간 자료를 보유한 관측소를 선별하였으며, 채택된 관측소는 255개소이다. 수집된 자료들은 모형에서 요구하는 적정 해상도인 1/8°(약 12.5km)로 전환하여야 하며 (Liang, 2004), 본 연구에서는 남한 전체를 1/8°의 해상도로 구분하여 총 591개의 격자를 생성한 후 각 수집된 지형 및 기상정보들을 격자에 맞게 재구성하였다.

3.3 모의능력 평가

유출모형의 모의 능력을 평가하기 위해서는 대상 지역에 대한 적정 매개변수를 산정하고 그에 따른 유출결과의 정확도 평가가 이루어져야 한다. 본 연구에서의 관측유량 자료는 국내 유역에서 장기적인 관측이 이루어지고 있으며, 자료의 신뢰성이 비교적 높은 지점들 중 유역면적이 상이한 8개 댐 상류 유역을 선정하였다. 적용 유역의 위치는 Fig. 3과 같으며, 권역별로는 한강권역에서 3개(충주댐, 소양강댐, 괴산댐) 낙동강권역에서 3개(임하댐, 안동댐, 합천댐), 금강권역에서 1개(대청댐), 섬진강권역에서 1개(섬진강댐)이다. 선정된 대상유역으로부터 남한전체를 대표할 수 있는 매개변수를 산정하기 위해서는 산정된 매개변수의 적절성을 평가해야 하며, 본 연구에서는 8개 대상유역 중 5개 유역(괴산, 임하, 안동, 합천, 섬진강댐)을 계측유역으로, 3개 유역(소양, 충주, 대청댐)을 미계측 유역으로 가정하여 계측유역으로부터 산정된 매개변수를 미계측 유역에 전이하였을 경우 유출모의 결과의 정확도

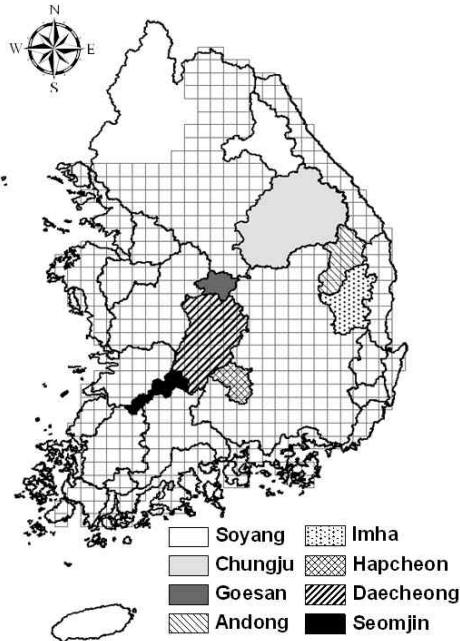


Fig. 3. Study Area

분석을 수행하였다.

산정해야 할 매개변수는 Table 1에 제시된 바와 같이 총 5개로 구분되며, 주로 침투, 지하수 및 증발산량 산정에 활용된다. 계측유역에 대한 매개변수 추정 방법은 5개 댐 유역을 대상으로 전체자료기간을 보정 및 검증기간으로 구분한 다음, 보정기간에 대해서는 관측치와 비교하여 매개변수들을 보정하고 검증기간에서는 보정기간의 매개변수를 그대로 적용하여 관측치에 대한 적합성을 검토하였다.

Table 2는 각 댐별 보정 및 검증기간에 대한 통계치를 나타낸 것이다. 보정에서는 모든 유역에서 상관계수 (CORR_C) 0.85 이상, 모형효율성계수 (ME) 0.71 이상, 평균제곱오차 (RMSE) 3.90 mm/d 이하, 유출용적오차 (VE)도 전체유역에서 4.77% 이하로 나타나 관측치에 대해 높은 적합도를 보인 것으로 나타났다. 검증 결과의 경우 전체 유역에서 상관계수가 0.84 이상으로 높은 적합도를 보였으며, 괴산댐 및 합천댐의 경우 유출용적오차가 -9.00%, 6.40%로 비교적 낮게 산정되었으나, 임하댐과 안동댐 그

Table 1. VIC Model Parameters

Parameter	Unit	Description	Range
b_infiltr	-	Variable infiltration curve parameter (binfiltr)	$10^{-5} \sim 0.4$
Ds	Fraction	Fraction of Dsmax where non-linear baseflow begins	0.001 ~ 1.0
Ds_max	mm/day	Maximum velocity of baseflow	1 ~ 40
Ws	Fraction	Fraction of maximum soil moisture where non-linear baseflow occurs	0.5 ~ 0.9
Root_Depth	m	Root zone thickness	0.0 ~ 1.5

Table 2. Statistics for the Simulated Runoff for Each Dam Site

No.	Dam Site		CORR_C (-)	RMSE (mm/d)	ME (-)	VE (%)
D1	Goesan	Cal (1996~2004)	0.85	3.55	0.71	4.77
		Ver (1986~1995)	0.87	3.22	0.74	-8.78
D2	Andong	Cal (1996~2004)	0.87	3.34	0.75	-0.31
		Ver (1986~1995)	0.84	2.48	0.71	-4.37
D3	Imha	Cal (1999~2004)	0.86	3.90	0.73	-4.11
		Ver (1993~1998)	0.86	2.58	0.73	1.78
D4	Hapcheon	Cal (1997~2004)	0.87	3.58	0.75	-2.87
		Ver (1989~1996)	0.84	2.29	0.70	6.40
D5	Seomjin	Cal (1996~2004)	0.87	3.69	0.75	4.17
		Ver (1986~1995)	0.86	3.33	0.74	3.05

Percent error in Volume (VE) = $100 \times (\sum s_i - \sum o_i) / \sum o_i$, Root mean square error (RMSE) = $\sqrt{\sum (o_i - s_i)^2 / n}$, n is a number of data
 Nash-Sutcliffe efficiency (ME) = $[\sum (o_i - \bar{o})^2 - \sum (o_i - s_i)^2] / \sum (o_i - \bar{o})^2$
 Correlation coefficient (CORR-C) = $ss_{os} / \sqrt{ss_o \times ss_s}$, $ss_{os} = \sum (o_i - \bar{o})(s_i - \bar{s})$, $ss_o = \sum (o_i - \bar{o})^2$, $ss_s = \sum (s_i - \bar{s})^2$
 O is observed flow and S is simulated flow.

리고 섬진강 댐에서는 유출용적오차가 5.00% 이하, 평균제곱근오차가 3.33 mm/d 이하, 모형 효율성계수가 0.71 이상으로 보정기간과 유사한 정확도를 갖는 것으로 나타났다.

또한 미계측 유역에 대한 매개변수 전이를 위해 대표매개변수 산정 방법과 이병주 등 (2009)이 수행한 지역화 방법을 이용하였다. 지역화 방법 (Regionalization method)은 유역별 유역특성인자들을 토대로 두 개의 다변량 통계 기법인 주성분분석과 군집분석을 수행하여 매개변수를 지역적으로 분류하는 방법이며, 대표매개변수 산정 방법 (Representation method)은 추정된 여러 매개변수들을 기반으로 대상지역을 적절히 만족시킬 수 있도록 하나의 대표값을 찾는 방법이다. 방법별 모의 결과에 대한 정확도를 평가하기 위하여 소양, 충주, 대청댐을 미계측 유역으로 가정하여 유출모의를 수행하였다. 모의 기간은 소양, 충주의 경우 1986~2004년까지이며, 대청댐은 댐 상류에 위치한 용담댐의 효과를 배제하기 위해 용담댐의 준공년도 이전인 1986~2001년까지의 기간을 모의기간으로 적용하였다. 각 댐별 두 방법에 대한 통계분석 결과는 Table 3과 같다. 분석 결과 상관계수와 모형 효율성계수의 경우 차이가 미비하지만 평균제곱근오차에서 지역화의 경우

3.13~4.10 mm/d인 것에 비해 대표매개변수가 3.10~3.90 mm/d로 정확도가 더 높게 나타났으며, 유출용적오차에서도 소양강 댐을 제외한 나머지 댐에서 대표매개변수의 정확도가 지역화에 비해 높게 산정된 것으로 나타났다.

Fig. 4는 충주댐 유역을 대상으로 전체 모의기간 중 최근 5년의 기간에 대해 대표매개변수로부터 산정된 모의 유량을 관측유량과 비교하여 도시한 것이다. 그림에서 Y축은 장기유출에서 중요한 갈수기의 모의능력을 분석하기 위해 로그값으로 전환된 것이며, 아래엔 관측치와 계산치의 간차를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면, 여름철의 큰 홍수사상에서는 침투치에 대한 모의능력이 다소 떨어지는 것을 볼 수 있으나 전반적으로 기간에 따라 모의치가 관측치와 유사하게 거동하는 것을 확인할 수 있었으며, 나머지 2개 유역도 이와 유사한 것으로 확인되었다.

이에 본 연구에서는 대표매개변수를 활용하여 남한 전체에 대한 유출모의를 수행하였으며, 유출의 공간적인 거동을 검토하고자 격자별 1986년~2004년 기간 동안의 연평균 강수량 및 유출률을 산정하여 Fig. 5에 나타내었다. 유출률은 도시 및 인근지역의 경우 0.66~0.78 정도, 산지 및 기타지역에서는 0.45~0.65 정도에 위치한 것으로 확인

Table 3. Statistical Results for the Model Performance at Verification Sites

Dam Site		CORR_C (-)	RMSE (mm/d)	ME (-)	VE (%)	
D6	Soyang	Representation	0.89	3.36	0.79	-6.65
		Regionalization	0.89	3.42	0.78	0.92
D7	Chungju	Representation	0.83	3.90	0.69	3.31
		Regionalization	0.82	4.10	0.64	16.29
D8	Daecheong	Representation	0.83	3.10	0.68	7.96
		Regionalization	0.83	3.13	0.67	17.32

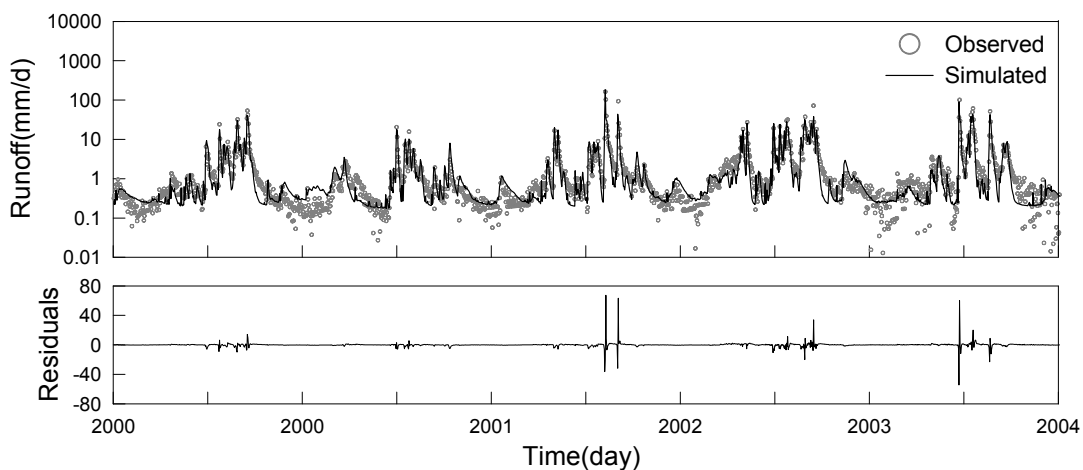
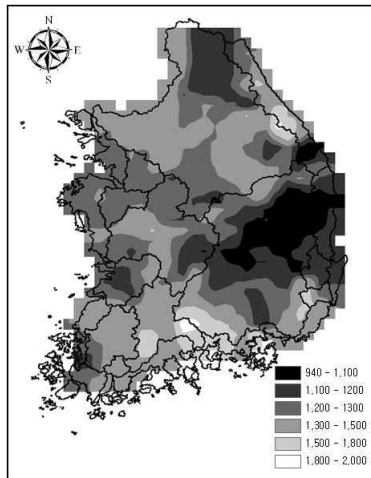
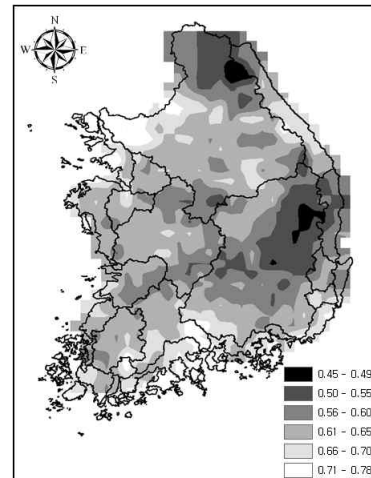


Fig. 4. Observed and Simulated Runoff at Chungju Dam Site



(a) Annual Precipitation



(b) Annual Runoff Rate

Fig. 5. The Results of Annual Precipitation and Runoff Rate on South Korea

Table 4. Comparison of Global and Local Soil Input Data

Input data	Features	
	Local data	Global data
Resolution (m)	100	1000
Soil layer (m)	Top 0.1 Upper 0.3 Lower Depending on the grid	Top 0.1 Upper 0.3 Lower 1.5
Saturated hydraulic conductivity (mm/d)	174~4318	211~1218
Field capacity	0.553~0.679	0.523~0.587
Wilting point	0.142~0.212	0.316~0.504

되었으며, 유출의 공간적인 패턴은 대체로 강수에 지배적인 것으로 나타났다.

이상의 분석된 통계적 및 도시적 결과를 토대로 모형의 적용성을 검토한 결과 본 연구에서 산정된 유출결과의 정확도는 비교적 높다고 하겠으며, 국내 지역에 대한 모형의 적용성은 우수한 것으로 판단된다.

4. 전지구 자료의 불확실성 평가

4.1 자료수집 및 검토

본 연구에서는 전지구 자료의 불확실성을 평가하기 위해 국내를 대상으로 전지구 기상 및 지형자료를 구축하였다. 우선 DEM의 경우 미국지질조사국 (United States Geological Survey, USGS)에서 제공하는 30"×30" 간격의 자료를 이용하였으며 비교결과 국내자료와의 차이가 미비하였다. 토양자료는 5'×5' 해상도 기반의 국제연합 식량농업기구 (Food Agriculture Organization, FAO)의

자료를 이용하였다. FAO 토양자료는 국가별 토양층 깊이 에 따라 다양한 토양정보가 내제되어 있으며, 본 연구에서는 모형 적용을 위해 토양층을 3개의 구간으로 구분하고 각 깊이별 관련 토양정보를 구축하였다. 국내 자료의 경우 농업과학기술원에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도의 속성정보 (토양통별 토양층 개수, 입경분포 등)를 토대로 Neitsch et al. (2001)과 Saxton et al. (1986)의 결과를 이용하여 토양관련 변수들을 산정한 것이다. 본 연구에서는 두 자료로부터 산정된 각 변수들에 대한 비교 검토를 수행하였으며, Table 4는 검토된 토양정보 중에서도 모형의 유출해석에 민감도가 높은 토양변수를 나타낸 것이다. 국내 자료의 경우 토양내 장력수를 결정하는 임계 및 시들음점의 경계가 각각 0.533~0.679, 0.142~0.212, 토양의 배수능력을 고려하는 포화수리전도도의 값은 174~4318 mm/d 정도인 것으로 알 수 있었으나, 전지구의 경우 임계 및 시들음점의 경계가 0.523~0.587, 0.316~0.504, 포화수리전도도가 211~1218의 범위로 상대적으로 국내에 비

Table 5. Classification of Local and Global Land Cover Data with Area Ratio

Local Land Use			Global Land Use	
Cover Classification		Area Ratio (%)	Cover Classification	Area Ratio (%)
1	Water	1.48	Water	7.06
2	Urban and Built-Up	4.01	Evergreen Needleleaf Forest	15.09
3	Bare Ground	1.16	Evergreen Broadleaf Forest	-
4	Wetland	0.25	Deciduous Needleleaf Forest	-
5	Grassland	2.37	Deciduous Broadleaf Forest	16.48
6	Forest	65.83	Mixed Cover	5.61
7	Cropland	17.86	Woodland	22.62
8	Field	7.01	Wooded Grassland	14.46
9			Closed Shrubland	0.09
10			Open Shrubland	0.15
11			Grassland	2.78
12			Cropland	14.89
13			Bare Ground	-
14			Urban and Built-Up	0.75

해 범위가 작은 것을 확인할 수 있었다.

한편, 토지피복도는 전지구를 대상으로 1 km 간격의 토지피복도를 제공하는 UMD (University of Maryland) 의 Land cover 자료를 활용하였다. Table 5는 전지구 및 국내 피복도에 대한 면적비를 산정하여 동일 피복종류별로 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있듯이 면적비의 경우 동일한 피복에서도 각 자료별 차이가 있는 것을 알 수 있으며, 자료별 제공되는 전지구 토지피복의 경우 식생의 종류를 다양하게 분류한 것이 확인되었다. 전지구 피복종류별 면적비를 살펴보면, 삼림 (Woodland)이 22.62%로 가장 높으며, 활엽수림 (Deciduous Broadleaf Forest)이 16.48%, 상록수림 (Evergreen Needleleaf Forest)이 15.09%, 농경지 (Cropland)가 14.89% 등 순으로 주로 산지 및 작물에 대해 지배적인 것으로 나타났다. 이와 같이 수집된 지형 자료들은 앞서 국내 입력자료 구축 방법과 동일하게 1/8° 해상도에 맞게 가공하였다.

전지구 기상자료의 경우 국가기후자료센터 (National Climate Data Center, NCDC)에서 제공하는 자료를 활용하였다. 통상 각 국가별 기상관측소에서는 영국 그리니치 평균시를 기준으로 3시간마다 세계기상기구 (World Meteorological Organization, WMO)의 세계기상통신망 (Global Telecommunication System, GTS)센터로 기상 자료를 전송하며, NCDC에서 웹기반의 서비스로 전 세계를 대상으로 자료를 제공하고 있다. 그러나 이상의 자료는 각 국가별 관측소에서 이상치에 대한 보정을 거치지 않는 상태로 전송되기 때문에 이로 인한 오차는 감안해야 하는 실정이다. 본 연구에서는 우선 남한을 대상으로 20

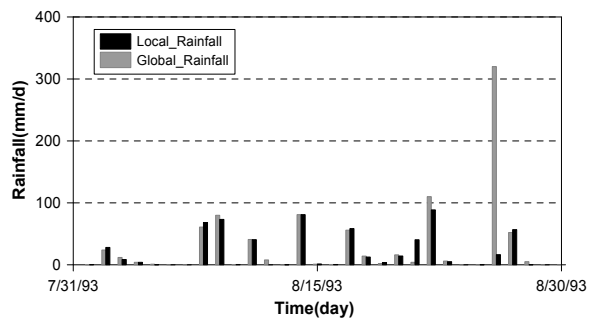


Fig. 6. Comparison of Global and Local Rainfall at Yeosu Station

년 이상의 자료가 구축된 관측소를 추출하였으며, 이상치 및 결측구간을 검토하였다. 가용한 관측소는 총 20개소, 활용가능 기간은 12년 (1993~2004년)으로 확인되었다. 또한 채택된 관측소별 결측율을 조사해본 결과 전체 자료기간 대비 결측율이 평균 4.80%로 비교적 낮게 나타났으나, 결측값 처리에 대해서는 이를 보정할 만큼의 관측소 밀도가 충분치 않아 0값으로 대체하였다. 추후 전지구 자료의 품질관리와 관련하여 적정 방법이 마련되어야 할 것으로 사료된다. 전지구 기상정보와 국내자료의 비교 결과 강수 자료에서 차이가 가장 큰 것으로 나타났으며, Fig. 6은 20개 관측소중 여수관측소의 경우를 예로써 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 비록 일별로 무강수에서는 일치하였으나 강수기간 동안의 양적인 차이는 상당히 높게 나타났으며, 이러한 차이는 전체 관측소별로 유사한 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 강수자료의 부정확성을 정량적으로 평가하고자 각 관측소별 두 자료에 대한 평균제곱근오차를

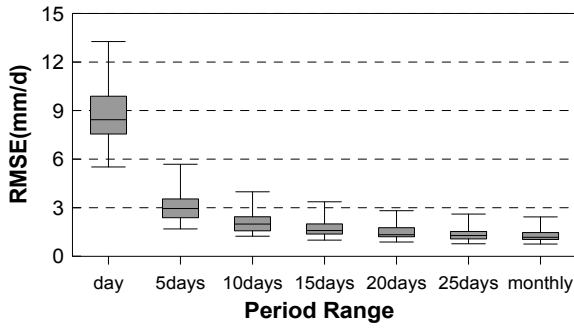


Fig. 7. Quantitative Analysis of Global Rainfall Data for Each Period

산정하였으며, 평가기간을 5일단위로 증가시켜 살펴보았다. 다음 Fig. 7은 강수량자료의 일치도 범위를 분석하고자 전체 관측소별, 기간별 강수량자료를 Box-Whisker 그래프로 도시한 것이다. 일단위 강수에 대한 분석결과 전체 관측소의 정확도가 5.31~13.26 mm/d로 낮게 산정된 반면 분석기간이 증가할수록 오차의 범위는 상당히 줄어드는 것으로 나타났으며, 최종 월별강수의 경우 값의 범위가 0.75~2.42 mm/d 정도로 일단위에 비해 높은 정확도를 얻을 수 있었다.

4.2 불확실성 평가

본 연구에서는 국내 자료를 고정시킨 상태에서 전지구 자료들을 순차적으로 변경하여 VIC 모형에 적용하였으며, 관측 댐 상류유역별 모의결과의 정확도에 따라 자료의 불확실성을 평가하였다. Fig. 8은 전지구 입력자료인 토양, 식생 및 기상자료를 모형에 적용하였을 경우 유출 결과에 대한 통계치를 나타낸 것이며, DEM 자료는 국내 자료와의 차이가 미비하여 분석에서 제외하였다. 그림에서 X축은 Table 1과 Table 2의 해당 유역번호를 의미한다. 국내 자료와의 해상도 및 속성정보의 차이로 인해 토지피복자료는 국내 자료에 비해 유출용적오차가 상대적으로

으로 감소하였고, 토양자료는 괴산, 합천, 대청댐에서의 모형효율성계수가 낮게 산정된 것을 알 수 있었으며, 이를 제외한 나머지 부분에서는 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. 그러나 기상자료의 경우 다른 결과에 비해 모든 통계분석 결과가 상당히 낮은 것으로 나타났는데, 이중 임해댐 유역에서 상관계수 0.52, 모형효율성계수 0.32, 평균계급근오차 5.27 mm/d로 전체 댐 지역들 중 정확도가 가장 낮은 것으로 확인되었다. 이는 활용된 전지구 기상관측소 개수의 부족에 의한 것으로 볼 수 있겠으나, 앞서 검토된 바와 같이 전지구 관측소별 제공되는 강수량자료의 불확실성이 주요 원인이라 하겠다. 따라서 전지구 자료들 중에서도 기상자료의 불확실성이 가장 높은 것으로 나타났다.

4.3 기간별 분석

본 연구에서는 전지구 자료를 활용한 유출분석에 있어 활용가능 범위를 구체적으로 제시하였다. 앞서 검토된 강수량자료의 정량적 분석결과에 착안하였으며, 전지구 자료에 대한 일단위 유출모의를 수행하고 분석기간을 마찬가지로 5일 단위로 증가시켜 최종 월별기간까지의 정확도를 평가하였다. Fig. 9는 8개 댐 유역에 대한 상관계수 및 모형효율성계수 결과를 단위 기간별로 나타낸 것이다. 우선 각 유출결과에 대한 적정 통계치 기준을 모형효율성계수 0.60, 상관계수 0.80으로 두었으며, 이상의 기준에 만족하지 못한 기간은 모의 시 부적절한 기간으로 지정하였다. 그 결과 일 단위는 총 6개, 5일 단위는 4개의 댐에서 기준을 만족시키지 못한 것으로 확인되었으며, 그 이상의 기간에서는 8개 댐유역 모두 기준이상의 결과가 나타남을 알 수 있었다. 이는 기간이 증가할수록 유출결과의 정확도가 향상되는 것으로 볼 수 있으며, 적정 분석기간은 10일 단위 이상이 적절하다고 판단된다.

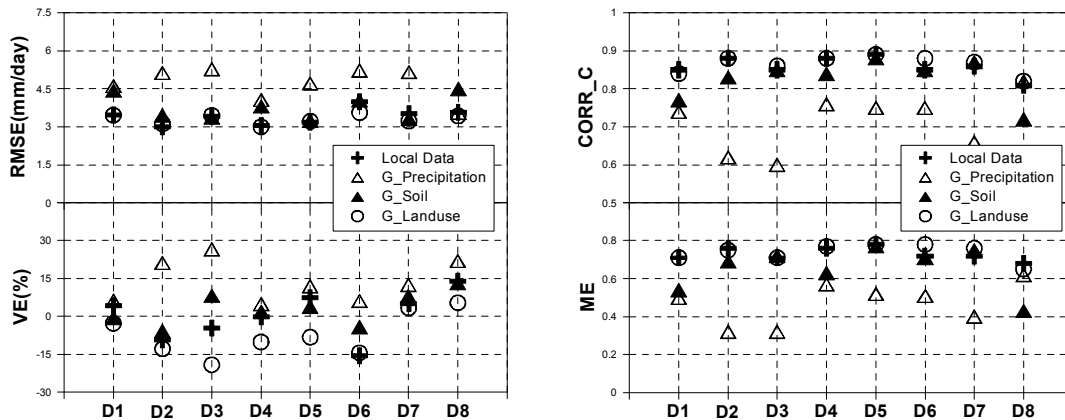


Fig. 8. Uncertainty Analysis of Global Data at Each Dam Site

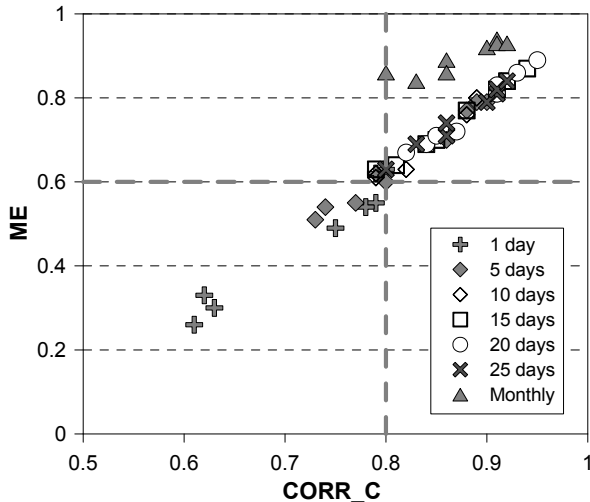


Fig. 9. Selection of Appropriate Runoff Analysis Period

5. 결론

본 연구에서는 지표수문해석모형인 VIC 모형을 선정하여 남한을 대상으로 모의 능력을 평가하였으며, 전지구 자료에 대한 유출모의를 수행하여 자료의 불확실성 및 가용여부를 평가하였다. 본 연구에서 도출된 주요 연구결과는 다음과 같다.

- 1) VIC 모형의 모의 능력을 평가하고자 남한을 대상으로 지형 및 기상 자료를 활용하여 유출모의를 수행하였다. 이를 위해 남한전체를 $1/8^\circ$ 로 구분하였으며, 관측유량이 존재하는 8개의 댐 상류유역을 선정하여 매개변수 추정 및 대표매개변수 산정 후 결과의 정확도를 평가하였다. 통계분석 결과 유출용적오차와 평균제곱근오차는 각각 8.00%, 3.90 mm/d 이내, 상관계수와 모형효율성계수는 0.83, 0.68 이상으로 비교적 높은 결과가 나타났다. 대표매개변수, $1/8^\circ$ 격자의 적용 그리고 국내유역의 지형적 특성의 다양함을 감안할 경우 VIC 모형은 국내 유역에서도 적용성이 높은 모형으로 판단된다. 다만 대표매개변수 산정의 경우 8개 댐 지점에 대해서만 적용하였기 때문에 다양한 미세유역의 특성을 반영하기에는 무리가 있다고 판단된다. 향후 여러 계층유역을 추가하여 분석한다면 신뢰성 있는 매개변수 및 유출결과를 도출할 수 있을 것으로 전망된다.
- 2) 국내에 대한 전지구 기상 및 지형 자료를 수집하여 자료의 품질을 검토하였으며, 동일한 해상도와 대표매개변수를 토대로 자료의 성분들을 순차적으로 변화시켜 모의결과에 따른 자료의 불확실성을 평가하였다. 그 결과 유출결과의 정확도에 큰 영향을 미치

는 요소가 기상, 토양, 토지피복 등의 순으로 나타났다. 이상의 원인은 활용 가능한 전지구 기상관측소 개수의 부족과 강수의 불확실성으로 인한 것으로 판명되었다.

- 3) 마지막으로 전체 자료에 대한 일단위 유출모의를 수행하고 분석기간의 증가에 따른 유출결과의 정확도 평가를 통해 전지구 자료의 활용범위를 마련하였다. 평가 방법은 모형효율성계수 0.60 및 상관계수 0.80 이상인 기간을 만족시키는 유출기간을 선별하고, 전체 댐별로 산정된 결과를 도시하여 가용범위를 판단하였다. 분석 결과 전지구 자료를 활용한 유출분석을 수행하고자 한다면 기간을 적어도 10일 이상으로 구분하여 수행하는 것이 적절한 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 향후 동아시아와 같은 인접국가와의 연계분석 시 기초자료로 활용될 수 있다는 측면에서 가치가 있다고 하겠다. 다만, 기상 자료의 불확실성은 배제할 수 없는 사항이며, 이는 각 국가별 지속적인 협력을 통하여 자료의 신뢰성 확보에 많은 투자를 해야 할 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서 활용된 지표수문해석모형은 국외에서 개발된 모형으로써 유출모의에 있어 많은 제약이 따른다. 따라서 국내 실정을 적절히 반영할 수 있는 지표수문해석모형의 개발이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원의 2009 건설기술혁신사업인 ‘기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망’ 과제에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

- 배덕효, 정일원, 이병주 (2008). “A2 시나리오에 따른 국내 수자원의 변동성 전망.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제20권, 제12호, pp. 921-930
- 이병주, 정일원, 배덕효 (2009). “다변량 통계분석을 이용한 준분포형 유출모형 매개변수 지역화.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제2호, pp. 149-160
- 정일원, 배덕효, 임은순 (2007). “수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오생산 (II): 유역별 유출시나리오 구축.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp.205-214
- Andreadis, K.M., Clark, E.A., Wood, A.W., Hamlet, A.F., and Lettenmaier, D.P. (2005). “Twentieth-Century Drought in the Conterminous United States.” *Journal*

- of *Hydrometeorology*, Vol. 6, Issue 6, pp. 985-1001
- Blondin, C. (1991). "Parameterization of land-surface processes in numerical weather prediction." *Land Surface Evaporation: Measurements and Parameterization*, edited by Schmugge, T.J., Andre, J.C., Springer-Verlag, New York, pp. 31-54
- Brooks, R.H., and Corey, A.T. (1964). Hydraulic Properties of porous Media. hydrology Paper No 3, Colorado State University, Fort. Collins, p. 27
- Chen, M., Xie, P., and Janowiak, J.E. (2002). "Global Land Precipitation: 50-yr Monthly Analysis Based on Gauge Observations." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 3, Issue. 3, pp. 249-266
- Dickinson, R.E. (1984). "Modelling evapotranspiration for three-dimensional global climate models." *Climate processes and Climate Sensitivity*, edited by Hansen, J.E., Takahashi, T., geophys. monogr. ser., Vol. 29, AGU, Washington, D.C., pp. 58-72
- Ducoudre, N.I., Laval, K., and Perrier, A. (1993). "A new set of parameterizations of the hydrologic exchanges at the land-atmosphere interface within the LMD atmospheric general circulation model." *Journal of Climatology*, Vol. 6, pp. 248-273
- Fan, Y., and Van den Dool H. (2004). "The CPC global monthly soil moisture data set at $\frac{1}{2}$ degree resolution for 1948-present." *Journal of Geophysical Research*, 109:D10102, doi:1029/2003JD004345
- Francini, M., and Pacciani, M. (1991). "Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models." *Journal of Hydrology*, Vol. 122, pp. 161-219
- Haddeland, I., Lettenmaier, D.P., and Skaugen, T. (2006). "Effects of irrigation on the water and energy balances of the Colorado and Mekong river basins." *Journal of Hydrology*, Vol. 324, Issues. 1-4, pp. 210-223
- IPCC (2007). Climate Change 2007 : The Scientific Basis, Summary for Policy Makers. Cambridge University Press, Cambridge
- Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., and Burges, S.J. (1994). "A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, No. D7, pp. 14415-14428
- Liang, X., Wood, E.F., and Lettenmaier, D.P. (1996). "Surface Soil Moisture Parameterization of the VIC-2L Model : Evaluation and Modification." *Global and Planetary Change*, Vol. 13, Issues. 1-4, pp. 195-206
- Liang, X., Jianzhong, G., and Ruby Leung, L. (2004). "Assessment of the effects of spatial resolutions on daily water flux simulations." *Journal of Hydrology*, Vol. 298, Issues. 1-4, pp. 287-310.
- Louis, J. (1979). "A parameteric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere." *Boundary Layer Meteorology*, Vol. 17, pp. 187-202
- Montheith, J.L., and Unsworth, M.H. (1990). Principles of Environmental Physics, Chapman and Hall, New York, p. 291
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, and J.R. Williams. (2001). Soil and Water Assessment Tool-The theoretical documentation (Version 2000).
- Nijssen, B., Lettenmaier D.P., Liang, X., Suzanne, W., and Wetzel, F.W. (1997). "Streamflow simulation for continental-scale river basins." *Water Resource Research*, Vol. 33, Issue 4, pp. 711-724
- Nijssen, B., Schnur, R., and Lettenmaier, D.P. (2001). "Global Retrospective Estimation of Soil Moisture Using the Variable Infiltration Capacity Land Surface Model." *Journal of Climate*, Vol. 14, Issue. 8, 1790-1808
- Saxton, K.E., W.F. Rawls, J.S. Romberger, and R.I. Papendick. (1986). "Estimating generalized soil-water characteristics from texture." *Soil Sci. Soc. Amer. J.* Vol. 50, Issue. 4, pp. 1031-1036.
- Shuttleworth, W.J. (1993). Handbook of Hydrology, edited by Maidment D.R., McGraw-Hill, New York, pp. 4.1-4.53
- Xie, Z., Yuan, F., Duan, Q., Zheng, J., Liang, and M., Chen, F. (2007). "Regional Parameter Estimation of the VIC Land Surface Model : Methodology and Application to River Basins in China." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 8, Issue. 3, pp. 447-468

논문번호: 10-053	접수: 2010.07.02
수정일자: 2010.11.25/11.30	심사완료: 2010.11.30