

기후변화 영향평가를 위한 월 물수지모형의 적용성 검토

Application of Monthly Water Balance Models for the Climate Change Impact Assessment

황준식* / 정대일** / 이재경*** / 김영오****

Hwang, Jun Shik / Jeong, Dae Il / Lee, Jae-Kyoung / Kim, Young-Oh

Abstract

This study attempted to determine a suitable hydrologic model for assessing the impact of climate change on water resources, and to assess the accuracy of streamflow scenarios simulated by the selected hydrologic model using the meteorological scenarios of the Seoul National University Regional Climate Model (SNURCM). Comparison of four water balance models and two daily conceptual rainfall-runoff models for the simulation capability of the Daecheong Dam inflow indicated that the *abcd* model performs the best among the tested water balance models and performs as well as SSARR that is popular as a daily rainfall-runoff model in Korea. Parameters of the *abcd* model were then estimated for 12 ungauged subbasins of the Geum River by the regionalization method. The model parameters were first calibrated at nine multi-purpose dams and were then regionalized using catchment characteristics for another four multi-purpose dams, which were assumed to be ungauged sites. The model efficiency (ME) coefficients of the simulated inflows for these four dams were at least 87%. The MEs of the hindcasted meteorological rainfall scenarios of the 12 subbasins of the Geum River were more than 60%. Moreover, the ME of the Daecheong Dam inflow simulated by the *abcd* model using the SNURCM rainfall scenarios was more than 80%. Therefore, this research concluded that the *abcd* model coupled with the SNU-RCM meteorological scenarios can be used for impact assessment studies of climate change on water resources.

keywords : Climate change, monthly rainfall-runoff models, SNURCM, regionalization, water balance models

요 지

본 연구는 기후변화에 따른 수자원 영향평가를 위해 적합한 수문모형을 선택하고 지역기후모형인 SNURCM에서 생성한 모의기상자료로 유출량을 생성하여 모의정확성을 평가하였다. 4개의 월 물수지모형과 두개의 일 유출모형을

* (주)EPS 솔루션 부설기술연구소 대리

Assistant manager, ESP Solution Technical Institute, Gyeonggi-do, Korea
(e-mail: dsjun301@snu.ac.kr)

** 서울대학교 공학연구소 선임연구원

Researcher, Engineering Research Institute, Seoul National Univ., Seoul, Korea
(e-mail: jung922@snu.ac.kr)

*** 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

Ph. D Student, School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National Univ., Seoul, Korea
(e-mail: myroom1@snu.ac.kr)

**** 교신저자, 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수

Assistant Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National Univ., Seoul, Korea
(e-mail: yokim05@snu.ac.kr)

이용하여 대청댐 상류유역의 유입량 모의능력을 비교한 결과 *abcd*모형이 월 물수지모형 중에서는 가장 뛰어났고, 국내에서 널리 사용되고 있는 일 유출모형인 SSARR와 비슷한 모의정확성을 보였다. 다음으로 *abcd*모형을 금강유역의 12개 소유역에 적용하기 위하여 매개변수 지역화기법을 사용하였다. 9개의 다목적댐에서 구한 매개변수를 미계측유역으로 가정한 4개 다목적댐에 대하여 지역화기법으로 매개변수를 추정하여 유출량을 모의한 결과 모든 지역에서 효율성계수가 최소 87% 이상으로 모의능력이 우수하였다. 마지막으로 금강유역 12개 소유역의 SNURCM 모의강수를 실측강수와 비교한 결과 모든 소유역에서의 효율성계수는 60% 이상이었으며, SNURCM 모의강수자료를 *abcd*모형에 입력하여 생성한 모의유출량을 대청댐 실측유입량과 비교한 결과 효율성계수가 80% 이상으로 기후변화 연구에 활용 가능성을 확인하였다.

핵심용어 : 기후변화, 물수지모형, 월 유출모의, 지역화기법, SNURCM

1. 서론

지구온난화로 인한 강수량, 증발량, 온도 등의 변화는 유역의 물순환 시스템에 큰 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다. 실제로 최근 지구촌의 가장 큰 이슈라 할 수 있는 자연재해는 대부분 홍수 또는 가뭄이었고, 이로 인한 인명 및 재산피해는 말할 수 없을 정도로 컸다. 따라서 이러한 기후변화에 따른 영향을 국가 수자원계획에 반영시키기 위해서는 유역의 미래 유출량에 대한 정량적인 예측이 선행되어야 하며, 이에 따른 수자원시스템의 영향평가에 대한 연구가 필요한 시점이다.

최근 기후변화 연구와 관련하여 수십 년 앞을 내다보는 장기모의 및 수자원 영향평가를 하기 위하여 수문모형 중 시간간격이 월 단위 이상인 물수지모형이 사용되고 있다. 최초의 물수지모형은 1940년대에 Thornthwaite에 의하여 제안되었으며, 1955년에 Thornthwaite and Mather에 의해서 재조명되었다. 초기 물수지모형의 목적은 계절과 지형적 패턴에 따른 관개수량 및 토양수분을 계산하기 위하여 사용되었다(Alley, 1984). 그 후 유출량, 호수의 수위, 지하수의 깊이에 대한 예측, 기후와 식생의 변화에 따른 수문학적 영향을 살피기 위해서도 사용되었다(Dunne and Leopold, 1978). 1981년에는 Thomas가 4 변수 *abcd*모형을 제안하였으며, 1984년에는 Alley에 의하여 이러한 물수지모형들이 비교되었다. 1990년대 이후에는 더 많은 월 물수지모형들이 개발되었는데, Xiong and Guo(1999)는 2 변수 월 물수지모형의 적용성을 검토하였으며, Guo et al.(2002)은 Xiong and Guo(1999)가 검토한 물수지모형을 중국전역에 적용하여 기후변화에 따른 유량변화를 연구하였다. Gleick(1986)은 수자원의 기후변화 영향분석을 위해 다양한 모형들을 비교한 결과 물수지모형이 다른 모형들 보다 유연하며, 사용하기 쉽

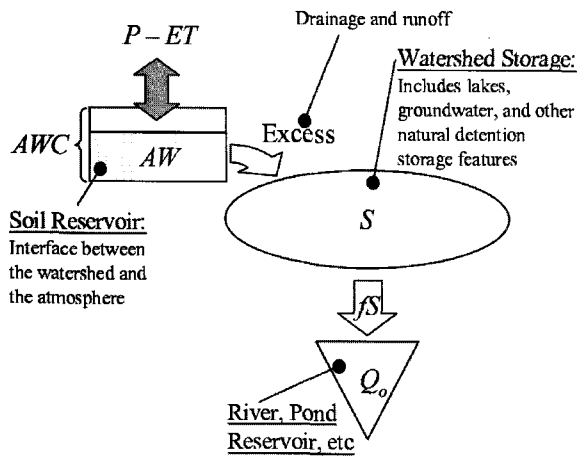
고, 정확성도 높다고 결론지었다. 또한 Arnell(1992)은 기후변화 연구시 물리적 모형을 사용할 경우의 문제점을 2가지로 설명하였다. 첫째로 물리적 모형은 모형의 입력자료로 높은 해상도의 기후자료가 필요하고, 둘째로 모형의 매개변수가 많기 때문에 기후변화 연구시 결과값의 불확실성이 높아진다고 지적하였다.

본 연구의 목적은 크게 3가지로 구분된다. 첫째로 월 유출량을 계산하고자 할 때 일반적으로 간단한 월 물수지모형을 사용할 수 있는가를 연구했다. 이를 위해 대표적인 물수지모형들 4개를 서로 비교함은 물론 국내에서 널리 사용되고 있는 2개의 일 강우-유출모형과도 비교하였다. 둘째로 물수지모형을 미계측유역을 포함한 전국에 쉽게 적용될 수 있음을 보이고자 연구하였다. 이를 위해 지역화기법으로 매개변수를 추정하고 유출량을 계산하여 모의능력을 검증하였다. 본 연구의 궁극적인 목적은 기후변화에 따른 수자원 영향평가를 위해 물수지모형으로 월 유출량 변화를 예측하는데 있다. 이와 유사한 연구는 국내에서도 한국건설기술연구원(1997), 안재현 등(2001), 김병식 등(2004)이 있으나 물수지모형의 사용은 처음이다. 이를 위해 환경부가 주관하는 '차세대 핵심 환경기술개발 사업'의 '기후 변화에 의한 물순환의 예측 및 영향 평가(환경부, 2004)'에서 개발한 SNURCM(Seoul National University Regional Climate Model)으로 10 km × 10 km 해상도의 모의기상자료의 정확성을 검증한 후 물수지모형에 입력하여 유출량을 모의하였다.

2. 물수지모형

2.1 개요

물수지모형은 Fig 1과 같이 토양 속에 함유된 수분이 강수와 증발에 의하여 보충되거나 감소되고 난 잔여량이 지표면으로 유출된 후 유역의 저류장치(호수, 지



Notation : AWC = Available Water Capacity
 AW = Available Soil Water
 P = Precipitation
 PET = Potential Evapotranspiration

Fig 1. Concept of Water Balance Models
 (<http://aben.cals.cornell.edu>)

하수, 자연적 저류물)에 의하여 일정시간 지체되었다가 유역의 최종유출로 나타나는 현상을 몇 개의 매개변수와 간단한 식으로 표현한 개념적인 모형을 말한다.

물수지모형은 크게 SMS(Soil Moisture Storage)모형(예, Xiong모형)과 SMS(Soil Moisture Storage) & WSS(WaterShed Storage)모형(예, Thornthwaite and Mather, *abcd*, GR2M모형)으로 나눌 수 있다. SMS모형은 유역의 유출현상(직접유출, 기저유출)은 전적으로 토양수분저류(soil moisture storage)에 의한 현상으로 표현되며, 유출량 산정부분에서 저류에 관한 매개변수 또는 식들이 존재하지 않는다. 반면 WSS 부분이 추가된 SMS & WSS모형은 토양에 저류된 물이 유출되어 유역에 저류(watershed storage)된 후 최종유출이 일어나는 기본개념을 가지고 있다.

2.2 모형의 구조

2.2.1 Thornthwaite & Mather 모형

Thornthwaite & Mather(이하 T&M)모형(Thornthwaite and Mather, 1955)은 1955년에 개발된 최초의 물수지모형이다. T&M모형의 특징은 토양수분보유능(soil moisture capacity)이 완전히 포화될 때까지는 어떠한 유출현상도 일어나지 않는다는 가정에 있다. 이 가정으로 인하여 토양수분량(S_t)은 아래와 같은 2개의 식으로 나누어진다.

$$S_t = \min\{S_{t-1} + P_t - PE_t, SC\} \quad P_t > PE_t \quad (1)$$

$$S_t = S_{t-1} \exp[-(PE_t - P_t)/SC] \quad P_t < PE_t \quad (2)$$

여기서 S_t 는 t 월말의 토양수분량, P_t 는 t 월의 강수량, PE_t 는 t 월의 잠재증발산량, 그리고 SC 는 토양수분보유능을 의미한다.

Eqs (1) and (2)에서 구한 S_t 값은 유출량을 구하기 위하여 아래의 잉여수량(water surplus) 식에 대입되며, 여기서 ΔQ_t 는 t 월의 잉여수량(water surplus)을 의미한다.

$$\Delta Q_t = (P_t - PE_t) + S_{t-1} - SC \quad S_t \geq SC \quad (3)$$

$$\Delta Q_t = 0 \quad S_t < SC$$

마지막으로 지하수와 토양 속에 남아 있는 잉여수량(λ)으로 지하수량 G_t 와 총 유출량 R_t 를 계산한다.

$$G_t = \lambda(G_{t-1} + \Delta Q_t) \quad (4)$$

$$R_t = (1 - \lambda)(G_{t-1} + \Delta Q_t) \quad (5)$$

2.2.2 *abcd*모형

*abcd*모형(Thomas, 1981)은 1981년 Thomas에 의하여 제시된 후 물수지모형으로 가장 많이 사용하고 있으며, 수자원분야에서 다양한 연구에 사용되어왔다. EPA(2002)는 미국의 Boston지역에 대하여 기후변화에 따른 급수(water supply)와 수질(water quality)변화에 관한 연구에 유출모형으로 *abcd*모형을 사용하였다. Sankarasubramanian and Vogel(2002)은 미국 전체의 연 수문현상을 모의하기 위하여 *abcd*모형을 사용하였으며, Westphal et al.(2003)은 Massachusetts 지역에 저수지운영을 위하여 유출량 산정시 7일 단위의 *abcd*모형으로 유출량을 산정하였다. Kirshen et al.(2005)은 기후변화에 따른 중국의 급수량과 비용의 변화를 알아보기 위하여 유출모형으로 *abcd*모형을 사용하였다. 국내에서는 김원석 등(1991)이 매개변수 지역화 연구를 위해 *abcd*모형을 적용한 사례가 있다.

*abcd*모형은 W_t 와 Y_t 라는 2가지 상태변수로 정의된다. W_t 는 가용수량(available water)을 의미하며, Eq. (6)과 같이 정의된다.

$$W_t = P_t + S_{t-1} \quad (6)$$

여기서 P_t 는 t 기간 동안 내린 강수량을 의미하며, S_{t-1} 은 t 월초의 토양수분량을 나타낸다. 기회증발산량(evapotranspiration opportunity) Y_t 는 유역에서 증발산

량으로 사라지는 물로 Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_t = E_t + S_t \quad (7)$$

여기서 E_t 는 t 기간 동안의 실제 증발산량을 나타내며, S_t 는 t 월말의 토양수분량을 의미한다. 기회증발산량 Y_t 는 가용수량 W_t 의 비선형함수로 가정되어지며 Eq. (8)과 같이 정의된다.

$$Y_t(W_t) = \frac{W_t + b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{W_t + b}{2a}\right)^2 - \frac{W_t b}{a}} \quad (8)$$

여기서 첫 번째 매개변수 a 는 토양이 완전히 포화되어 있을 경우 유출이 일어나는 경향을 나타내며, 두 번째 매개변수 b 는 증발산량과 토양수분량 합의 상위 한계치를 의미한다.

$abcd$ 모형과 T&M모형은 물수지모형에서 가장 중요한 부분인 토양수분 저류를 구하는 부분에 약간의 차이점이 있다. 즉 T&M모형의 경우 토양수분저류를 구하기 위하여 지난달의 토양수분저류와 이번달의 강수량을 사용하는 반면, $abcd$ 모형은 이번달의 기회증발산량과 잠재증발산량을 사용하여 토양수분량을 Eq. (9)와 같이 구한다.

$$S_t = Y_t \exp(-PE_t/b) \quad (9)$$

여기서 S_t 는 t 월말 토양수분량 값이며, PE_t 는 t 월의 잠재증발산량을 나타낸다.

$abcd$ 모형에서 유출량은 가용수량(available water)과 기회증발산량(evapotranspiration opportunity), 토양수분의 변화량을 나타내는 c 와 d 를 사용하여 구하게 되며, Eq. (10) 및 (11)과 같다.

$$R_t = (1-c)(W_t - Y_t) + dG_t \quad (10)$$

$$G_t = [c(W_t - Y_t) + G + t - 1]/(1+d) \quad (11)$$

2.2.3 GR2M모형

GR2M모형은 Makhoulf and Michel(1994)이 프랑스의 91개 유역에 대하여 적용성을 검토한 모형으로서 이 모형의 가장 큰 특징은 토양수분저류의 물이 유출에 관여하지 않는다는 점이다. GR2M모형의 토양수분저류를 구하는 식은 다음과 같다.

$$S_{2,t} = [S_{1,t} + SC \tanh \frac{LP_t}{SC}] / [1 + (S_{1,t} \tanh \frac{LP_t}{SC} / SC)] \quad (12)$$

$$S_{1,t+1} = S_{2,t} [1 - \tanh \frac{LPE_t}{SC}] / [1 + (1 - \frac{S_{2,t}}{SC}) \tanh \frac{LPE_t}{SC}] \quad (13)$$

여기서 LP_t 는 손실이 일어난 후의 강우량, LPE_t 는 손실이 일어난 후의 잠재증발산량, $S_{1,t}$ 는 t 월초의 토양수분저류, $S_{2,t}$ 는 t 월말의 토양수분저류를 나타낸다.

Eqs. (12) and (13)을 이용하여 토양수분저류를 구한 다음 초과강우량 EP_t 를 구하고, 마지막으로 지하수량과 총 유출량을 계산하며, 이를 요약하면 Eqs. (14)~(18)과 같다.

$$EP_t = LP_t + S_t - S_{t-1} \quad (14)$$

$$G_t = G_t + (4/5)EP_t \quad (15)$$

$$BR_t = X_1 S_t \quad (16)$$

$$G_{t+1} = G_t + BR_t \quad (17)$$

$$R_t = (EP_t/5) + BR_t \quad (18)$$

여기서 BR_t 는 기저유출(base runoff)이고, X_1 는 유역저류(watershed storage)에 의한 지체현상을 나타내는 매개변수이다.

2.2.4 Xiong모형

Xiong모형은 1999년 중국의 Hanjiang 유역에 적용한 모형으로서 앞의 3개 모형과 비교할 때 구조가 가장 간단한 모형이라 할 수 있다. Xiong모형의 가장 큰 특징은 기존의 물수지모형은 토양수분보유능을 매개변수로 사용하였으나, 본 모형에서는 포장수량(field capacity)을 매개변수로 사용한다는 점이다. 또한 앞에서 살펴본 물수지모형들은 유출을 기저유출과 직접유출 부분으로 나누어 계산을 하였으나, 본 모형은 기저유출이 유역의 총 유출량을 나타낸다고 가정하며 다음과 같은 식들로 구성된다.

$$R_t = S_t \tanh[S_t/FC] \quad (19)$$

$$S_t = S_{t-1} + P_t - E_t \quad (20)$$

$$E_t = c \times PAE_t \tanh(P_t/PAE_t) \quad (21)$$

$$S_t = S_{t-1} + P_t - E_t - R_t \quad (22)$$

여기서 FC 는 포장수량이고, PAE_t 는 Pan 증발량이다.

3. 모형의 적용

3.1 대상유역

연구를 수행하기 위하여 선택한 대상유역은 금강유역(Fig. 2)으로서 9,915.09 km²의 면적을 가지고 있으며, 총 12개의 소유역으로 구분될 수 있다(과학기술부, 2004). 금강유역은 남한 중앙 북서측에 위치하며, 본류의 유로연장은 395.9 km, 유역평균폭 24.8 km, 유역형상계수 0.063인 남한 제3의 유역으로 남한면적의 약 1/10을 차지하고 있다. 금강수계 상류에는 용담댐이 있어 전수권과 댐 하류에 용수를 공급하고 있으며, 수계 중반에는 대청댐이 있어 대전·청주권의 용수공급과 홍수조절을 담당하고 있다. 수계내의 주요 제어지점으로는 용담과 대청댐 사이의 옥천, 대청댐 하류의 공주, 규암, 강경 등이 있으며, 규암에서는 부여로 용수를 공급하고 있다.

연평균 강우량은 1130.7 mm로서 전국 연평균 강우량 1,274.0 mm보다 적고, 월별 강우량을 보면 7월에 252.3 mm로 최대이고 12월이 25.4 mm로 최소를 보이고 있으며, 6월에서 9월 사이의 4개월 동안에 연강우량의 60% 이상이 집중적으로 내린다. 연평균 유출량은

6627×106 m³이고, 연 유출량 중 73%가 6월에서 9월에 집중되어있다(과학기술부, 2004).

금강유역은 ‘21세기 프론티어연구개발사업’인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 ‘실시간 물관리 운영 시스템 구축 기술개발’이 진행 중에 있어 본 연구에서 제안한 물수지모형과 비교 가능한 강우-유출모형이 존재한다. 또한 김영오 등(2000)과 김병식 등(2003)이 금강유역에 대한 기후변화 연구를 수행한 사례가 있어 연구결과와의 상호비교가 가능한 장점을 가지고 있다.

3.2 입력자료의 선정

물수지모형의 주요 입력변수는 강우량과 잠재증발산량이다. 강우량은 Thiessen 면적평균강우량 방법으로 계산되어 한국수자원공사에서 발간한 다목적댐 운영 실무편람(한국수자원공사, 2004)에서 제공하고 있는 유역평균 강우량값을 사용하였다. 잠재증발량은 실측된 Pan 증발량을 사용하는 방법, Penman식, Thornthwaite식을 사용하는 방법 등이 있다. 일반적으로 주 단위 이하의 시간단위에서는 Penman방법을 사용하며, 월 단위 이상의 시간단위에서는 Thornthwaite방법을 사용하므로(Shuttleworth, 1993), 본 연구에서는 월 단위 잠재증발산량 산정시 Thornthwaite방법을 사용하였다. 실측된

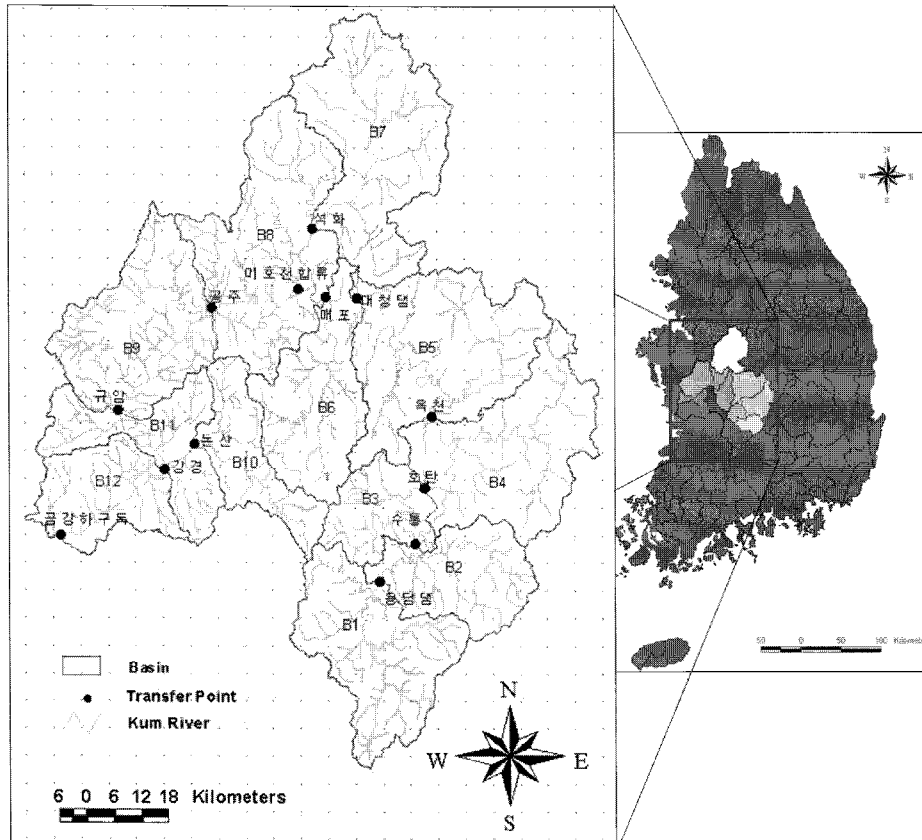


Fig. 2. Location of the Geum River Basin in Korea

Pan 증발량과 Thornthwaite방법을 사용하여 구한 잠재 증발산량을 다목적댐 상류유역의 유출량자료와 상관관계 분석한 결과 실측된 Pan 증발량을 사용한 경우 R^2 평균값은 7.30% 이었으며, Thornthwaite방법에서는 이보다 높은 35.40% 이었다. 따라서 Thornthwaite방법을 이용하여 잠재증발산량을 산정하고 이를 입력자료로 사용하는 것이 보다 정확한 유출량을 모의하는데 효과적일 것으로 판단된다.

3.3 강우-유출모형의 선정

앞에서 언급한 4개 물수지모형에 대하여 대청댐 유입량 자료를 사용하여 매개변수의 검정(calibration)을 실시한 후 금강유역에 이미 구축되어 사용 중인 SSARR(Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation Model) 및 TANK 모형과 비교하여 가장 우수한 모형을 선택하였다. Sorooshian and Gupta(1983)는 신뢰성 있는 매개변수 추정시 필요한 자료의 개수는 적어도 매개변수의 20배 이상이어야 하며, 자료의 질은 유역의 수문과정을 잘 반영할 수 있도록 변동성이 충분하고, 오차도 적어야 한다고 지적하였다. 본 연구에서는 최근자료를 기준으로 총 96개월(1993년 1월 ~ 2000년 12월)의 자료를 사용하였다. 자료기간 중 극심한 홍수기(1993년)와 가뭄(1994년)이 있었던 해를 모두 포함하는 전반기 5년(1993년 1월 ~ 1997년 12월)의 자료를 사용하여 모형의 매개변수를 추정하였으며, 나머지 3년은 모의정확성 검증을 위한 자료로 사용하였다. 물수지 모형의 매개변수는 2~4개로 많지 않으므로 본 연구에서는 시행착오법을 사용하여 오차의 평균이 최소가 되도록 매개변수를 추정하였다. 0~1 사이의 값을 가지는 매개변수는 0.01씩, 토양수분보유능을 나타내는 변수는 0에서 400까지 4씩 변화시키면서 각 물수지모형의 매개변수를 추정하였다. SSARR모형은 과학기술부가 주관하는 '21세기 프론티어연구개발사업'인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 '실시간 물관리 운영시스템 구축 기술개발(과학기술부, 2004)'에서 금강유역에 구축된 후 한국수자원공사에서 현재 사용 중인 우리나라의 대표적인 단위 강우-유출모형이다. TANK 모형은 일본의 Sugawara가 1961년 처음 개발 후 일본과 동남아 각국에서 널리 이용되고 있으며, 금강유역에는 자연유출량을 모의하기 위하여 사용하였다(건설교통부, 1998).

모형의 다각적인 비교를 위해 검증기간을 건기(10월~6월)와 우기(7월~9월)로 나누어 모의정확성을 검토하였다. 검증지표로는 계통오차(systematic error)를 나타내는 Relative Bias(R-Bias), 무작위오차(random error)를 나타내는 Relative Root Variability(R-

$\sqrt{\text{Var}}$), 계통오차와 무작위오차(random error)를 함께 나타내는 Relative Root Mean Square Error (R-RMSE), 마지막으로 수문모형의 검증지표로 널리 적용된 바 있는 Nash and Sutcliffe(1970)의 효율성계수 (Model Efficiency 이하 ME)를 사용하였으며, 각 지표는 Eq. (23), Eq. (24), Eq. (25), Eq. (26)과 같다.

$$R-Bias = \frac{\bar{e}}{Q_{obs}} \quad (23)$$

$$R-\sqrt{Var} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}}{Q_{obs}} \quad (24)$$

$$R-SE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}}{Q_{obs}} \quad (25)$$

$$ME = \frac{F_0 - F}{F_0} \times 100(\%) \quad (26)$$

여기서 Q_{obs} 는 관측유출량, \bar{Q}_{obs} 는 평균 관측유출량, Q_{sim} 는 모의유출량, i 는 월, n 은 총 월수를 나타내며, e_i 는 관측유출량과 모의유출량의 오차를 의미하고, \bar{e} 는 오차의 평균을 나타낸다. 또한

$$F_0 = \sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - \bar{Q}_{obs})^2,$$

$$F = \sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - Q_{sim}(i))^2 \text{이다.}$$

Table 1의 검증결과를 살펴보면 *abcd*모형이 월 물수지모형 중에서는 가장 뛰어났고, Fig 3에서도 알 수 있듯이 일 유출모형 특히 가장 우수한 SSARR와 비교하여도 월 총량으로 평가하였을 경우 그리 정확성이 뒤지지 않음을 알 수 있어, 본 연구의 목적인 기후변화 영향 평가에 손색이 없음을 확인하였다. Table 1에서 흥미로운 사실은 SSARR의 경우 건기(dry period)의 정확성이 많이 떨어지고 있다는 점인데, 이는 일 유출모형의 특성상 홍수기의 첨두유출에 초점을 맞추어 매개변수 추정을 하였기 때문이 아닌가 추측된다.

3.4 *abcd*모형의 매개변수 지역화

*abcd*모형으로 금강 12개 소유역의 유출량을 모의하기 위해서는 각 소유역별 *abcd*모형의 매개변수 a, b, c, d 를 추정하여야 한다. 일반적으로는 대상유역의 유출량 자료를 사용하여 모형의 매개변수를 추정하지만, 금강

Table 1. Simulation Accuracy of Daily Rainfall-Runoff Models and Water Balance Models

(a) Total Period(1998. 1 ~ 2000. 12)

	ME(%)	R-RMSE (%)	R-√Var (%)	R-Bias (%)
TANK	85.22	59.33	58.33	(-) 12.31
SSARR	93.75	30.69	29.94	6.71
T&M	72.45	45.62	45.42	41.24
abcd	90.66	42.51	41.76	(-) 9.30
GR2M	77.23	69.41	68.56	(-) 11.39
Xiong	50.43	102.24	93.54	39.87

(b) Dry Period

	ME(%)	R-RMSE (%)	R-√Var (%)	R-Bias (%)
TANK	83.04	46.76	54.14	(-) 2.11
SSARR	67.49	47.72	47.51	4.55
T&M	31.41	75.74	84.01	67.33
abcd	90.15	49.35	48.95	(-) 2.57
GR2M	74.45	64.20	58.87	24.13
Xiong	5.16	101.08	114.09	37.89

(c) Wet Period

	ME(%)	R-RMSE (%)	R-√Var (%)	R-Bias (%)
TANK	85.37	46.54	30.82	(-) 9.22
SSARR	95.73	34.73	28.20	20.28
T&M	68.45	74.10	43.40	25.55
abcd	88.67	33.27	31.67	(-) 5.30
GR2M	64.54	69.38	47.10	(-) 18.24
Xiong	33.63	101.64	51.37	42.08

(Note: Bold characters represent the best performance among 6 models)

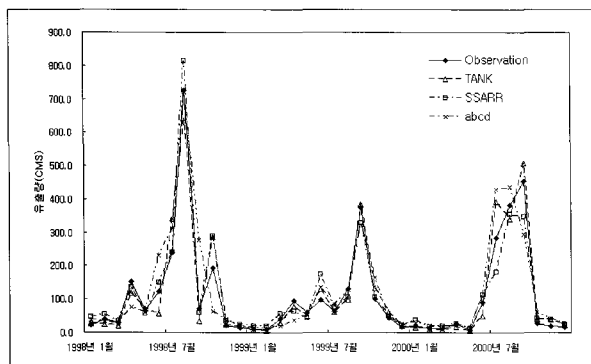


Fig. 3. Simulation Comparison of the Rainfall-Runoff Models

유역의 각 소유역에 대한 실측유출량 자료가 존재하지 않으므로 본 연구에서는 수문학적 지역화기법 (hydrological regionalization)을 사용하여 12개 소유역

에 대한 매개변수를 추정하였다. 수문학적 지역화기법은 국내·외에서 활발한 연구가 진행되었다. 이 중 abcd모형의 매개변수를 추정하기 위해서 지역화기법을 적용한 사례로는 Fernandez et al.(2000)이 regional calibration이라는 기법을 사용하여 abcd모형의 매개변수를 추정하였다. 또한 국내에서는 김원석 등(1991)이 20개 수위지점의 관측수위를 수위-유량 관계곡선식으로 환산한 월 유출량과 하천밀도, 유로연장 등의 지형인자를 사용하여 abcd모형의 매개변수별 회귀식을 구한 후 이 회귀식을 미계측지점으로 가정한 2개의 수위 관측소지점에 적용하여 월 유출량의 모의하고, 관측유량과 가지야마공식으로 모의한 유출량을 비교한 사례가 있다. 본 연구에서는 김원석 등(1991)이 사용한 수위-유량 관계곡선식으로 환산한 유량 대신, 자료의 신뢰성이 비교적 높은 것으로 알려진 다목적댐의 유입량을 사용하였다. 국내 13개 다목적댐 중 자료기간이 비교적 긴 9개의 지점의 유입량자료를 사용하여 abcd모형을 구축한 후 유역특성 자료를 사용하여 a, b, c, d 각각의 매개변수에 대하여 회귀식을 작성하였다. 이 회귀식을 사용하여 나머지 4개 지점의 abcd모형의 매개변수를 추정하여 타당성을 검증하였다. Fig. 4는 지역화기법을 이용한 abcd모형 구축의 전체적인 흐름도를 나타내며, 본 연구에서 사용된 다목적댐 자료현황을 Table 2에 정리하였다.

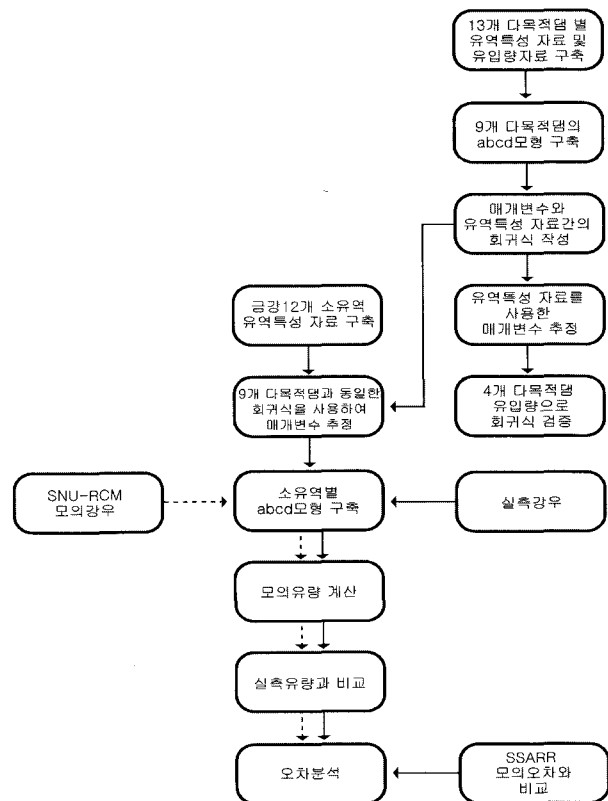


Fig. 4. Flow Chart of the abcd Model Application

Table 2. Available Data Lengths of Multipurpose Dam Inflows

대 권역	댐 명	자료기간 및 이용지점
한 강	충 주	1986년 1월 ~ 2004년 12월
	*횡 성	2001년 1월 ~ 2004년 12월
	소양강	1974년 1월 ~ 2004년 12월
낙동강	안 동	1977년 1월 ~ 2004년 12월
	임 하	1993년 1월 ~ 2004년 12월
	합 천	1989년 1월 ~ 2004년 12월
	*남 강	2000년 1월 ~ 2004년 12월
	*밀 양	2002년 1월 ~ 2004년 12월
금 강	*용 담	2002년 1월 ~ 2004년 12월
	대 청	1981년 1월 ~ 2004년 12월
금강서해	보 령	1998년 1월 ~ 2004년 12월
만경,동진	부 안	1997년 1월 ~ 2004년 12월
섬진강	섬진강	1976년 1월 ~ 2004년 12월

(Note: * represents verification sites)

매개변수 지역화기법을 위해 9개 다목적댐의 실측유출량 자료로 구한 *abcd*모형의 매개변수(Table 4)와 유역특성인자를 사용하여 회귀식을 작성하였다. 본 연구에서 고려한 유역특성인자는 총 13개로 Table 4와 같다. 유역특성인자의 선택은 Merz and Bloschl(2004)이 제안한 인자 중 국내에서 자료취득과 적용가능성이 있는 인자를 선택하였다. 9개 다목적댐의 *abcd*모형의 매개변수와 유역특성인자를 사용하여 stepwise regression으로 Table 5와 같이 회귀식을 구하였다. *c*의 회귀식을 보면

R^2 가 다른 3개의 매개변수에 비해 상당히 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 본 연구에서 고려한 13개의 유역특성인자만으로 매개변수 *c*의 회귀식을 구성하기에는 다소 부족하다는 것을 의미하며, 향후 연구에서는 이를 보완할 수 있는 지역특성인자에 대한 조사가 추가되어야 할 것을 제안한다. 다음으로 실측유입량 자료길이 비교 적 짧았던 나머지 4개 다목적댐(횡성, 남강, 밀양, 용담댐)에 동일한 회귀식으로 *a, b, c, d*를 구하여 Table 6에 제시하였다. 검증결과(Table 7) 횡성, 밀양, 용담댐의 ME는 90% 이상, 남강댐의 ME는 87%로 대체로 모의 능력이 우수하였다.

Table 3. Estimated Parameters of the *abcd* Model for Multipurpose Dams Using At-site Data

대 권역	댐 명	매개변수			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
한 강	충 주	0.86	236	0.01	0.71
	소양강	0.82	236	0.01	0.48
낙동강	안 동	0.95	232	0.25	0.57
	임 하	0.97	268	0.01	0.51
	합 천	0.97	688	0.05	0.01
금 강	대 청	0.95	276	0.12	0.51
금강서해	보 령	0.87	324	0.01	0.22
만경,동진	부 안	0.97	172	0.15	0.59
섬진강	섬진강	0.97	364	0.07	0.01

Table 4. Basin Characteristics of Multipurpose Dams

대 권역	댐명	유역면적 (km ²)	유역년평균강우 (mm)	유역년평균잡채증발산량 (mm)	유역평균고도 (m)	유역평균경사 (°)	하천도 (km ² /km ²)	월 최대강우량 (mm)	월 최대잡채증발산량 (mm)	유로연장 (km)	평균온도 (°C)	총하천길이 (km)	유역기복비 (km/km)	지질형태 (km)
한강	충주댐	6648.0	1220.6	632.96	476.1	43.5	1.8	629.9	144.28	445.2	11.2	11794.8	1320.0	45.1
	횡성댐	209.0	1445.2	640.63	436.5	41.1	1.2	548.4	126.97	32.3	11.0	245.7	1106.0	12.9
	소양강댐	2703.0	1199.6	622.99	387.7	46.9	1.4	770.7	141.32	235.9	11.0	3914.4	1709.6	69.5
낙동강	안동댐	1584.0	1147.9	636.25	549.3	41.9	3.3	786.8	148.48	170.1	11.1	5381.9	1472.5	65.8
	임하댐	1361.0	1072.8	643.05	388.4	40.3	2.9	672.4	148.48	131.7	11.8	4000.6	1065.0	78.2
	합천댐	925.0	1377.9	670.26	504.6	34.9	3.6	800.7	154.29	63.1	12.8	3352.6	1362.0	56.4
	남강댐	2285.0	1787.0	690.72	426.3	35.4	3.0	866.1	137.71	110.8	13.1	6866.6	1872.7	60.2
	밀양댐	95.4	2049.2	688.70	548.9	48.7	1.9	524.2	137.71	82.5	13.1	2565.0	1130.7	0.0
금강	용담댐	930.0	1699.5	689.91	432.5	37.6	2.7	748.0	131.48	59.7	12.5	2546.0	1190.0	88.8
	대청댐	4134.0	1202.6	672.59	158.8	33.5	3.2	593.0	156.66	444.9	12.5	13231.7	1575.0	60.8
금강서해	보령댐	163.6	1460.6	686.56	195.0	36.9	1.7	754.9	131.58	0.0	12.5	268.7	575.0	100.0
만경,동진	부안댐	59.0	1468.9	707.15	142.7	43.3	3.0	680.8	138.52	0.0	13.1	168.9	375.0	0.0
섬진강	섬진강댐	763.0	1310.3	685.84	359.4	32.8	1.7	767.9	158.37	89.8	10.9	1308.0	975.1	75.0

Table 5. Regional Regression Models for the abcd Model Parameters

매개변수	회귀식	R ²
a	$a = 0.248 + 0.068 \times \text{하천밀도} - 0.049 \times \text{평균온도} + 0.002 \times \text{평균증발}$	89.79
b	$b = -1099.76 + 1.096 \times \text{평균고도} - 20.601 \times \text{평균경사} - 87.736 \times \text{하천밀도} + 173.042 \times \text{평균온도}$	86.61
c	$c = -0.065 + 0.056 \times \text{하천밀도}$	33.45
d	$d = -3.995 + 0.048 \times \text{평균경사} + 0.000038 \times \text{하천길이} + 0.0035 \times \text{평균증발}$	84.74

Table 6. Estimated Parameters of the abcd Model at Verification Sites Using Regional Regression

	a	b	c	d
횡성댐	0.85	322.76	0.01	0.24
남강댐	0.95	646.34	0.10	0.39
밀양댐	0.87	601.92	0.04	0.86
용담댐	0.96	521.61	0.09	0.33

Table 7. Simulation Accuracy of the abcd Model at Verification Sites

	ME(%)	R-RMSE (%)	R-√Var (%)	R-Bias (%)
횡성댐	91.89	42.98	40.02	(-) 14.42
남강댐	87.58	51.05	50.87	5.88
밀양댐	93.00	40.45	39.82	(-) 1.03
용담댐	92.37	35.33	34.98	4.87

3.5 SNURCM 기상자료의 적용 가능성 검증

3.5.1 SNURCM 모의강수의 검증

‘기후 변화에 의한 물순환의 예측 및 영향 평가(환경부, 2004)’에서 개발된 SNURCM은 PSU/NCAR (Pennsylvania State University/ National Center for Atmospheric Research) 중규모 모형 MM5에 기초하고 상세한 지면모형(NCAR/Land Surface Model)이 접합된 지역기후모형으로, 비정역학 방정식계를 지배방정식으로 사용함으로써 동아시아의 복잡한 지형, 지면 특성을 효과적으로 반영할 수 있다. 또한 향후 수 km 이하의 고분해 지역기후 모의에 적합한 지역기후모형이며, 동지격자계(nested grid system)를 이용한 고해상도 지역기후모형으로, 역학적상세화(dynamical downscaling) 기법을 사용하고 있다. 적용에 앞서 SNURCM 모의강수의 정확성을 평가하기 위하여 격자형 강수량을 유역 평균강우로 변환한 후 이를 금강 12개 소유역의 유역 평균강우와 비교하였다. 12개 소유역로 ME, R-Bias, R-√Var 와 R-RMSE를 비교하였으며, 결과는 Table 8에 정리하였다. 소유역별로 편차가 있어 ME가 60%까지 낮아지는 경우가 있었으며, 전체적으로 실측강수보

다 작은 값을 가지는 것으로 나타났다. R-Bias, R-√Var 와 R-RMSE 값으로 판단한 결과 SNURCM은 계통오차 보다는 무작위오차가 지배적인 것으로 판단할 수 있었다.

Table 8. Simulation Accuracy of the SNURCM Model

소유역	ME(%)	R-RMSE (%)	R-√Var (%)	R-Bias (%)
B1	65.29	66.03	65.35	14.03
B2	67.23	58.15	57.75	2.18
B3	72.63	51.36	47.24	18.76
B4	78.21	43.33	42.56	0.30
B5	81.93	39.43	38.35	6.23
B6	70.87	52.42	47.03	23.36
B7	69.44	55.98	54.07	15.44
B8	73.11	51.33	50.69	10.01
B9	63.91	57.28	52.57	19.67
B10	87.44	34.41	33.34	10.33
B11	73.77	47.87	39.74	25.19
B12	80.97	42.23	38.12	18.34

3.5.2 SNURCM 기상자료를 이용한 유출량모의

SNURCM 모의강수와 증발산량을 사용하여 대청댐 상류유역의 유입량을 모의하였다. 대청댐 상류유역의 유입량을 모의하기 위하여 금강유역 총 12개 소유역 중 대청댐 상류유역에 포함되는 B1소유역부터 B5소유역의 유출량을 abcd모형으로 각각 모의한 후 5개 소유역들의 유출량을 합산하였다. Table 9는 실측기상자료와 SNURCM 모의기상자료를 abcd모형에 입력하여 생성한 모의유량을 실측유량과 비교한 것이다. Table 9를 보면 SNURCM 기상자료를 사용할 경우 입력오차로 인하여 유출량모의의 전체적인 정확도가 떨어지고 있으며 특히 Bias에서 나빠지는 것을 알 수 있어 SNURCM 모의자료의 Bias 조정에 관한 개선이 필요함을 알 수 있었다. 그러나 유출량모의에 있어 ME가 80% 이상인 것을 볼 때 본 연구의 목적인 기후변화 연구로는 충분히 가치가 있는 것으로 사료된다.

Table 9. Simulation Accuracies of abcd Using the Observed and the SNURCM-simulated Meteorology (1993. 1 ~ 1994. 12)

유량모형	입력자료	ME(%)	R-RMSE(%)	R-√Var(%)	R-Bias(%)
abcd	실 측 (강수, PET)	90.58	45.12	43.87	(-) 5.23
	SNURCM (강수, PET)	82.48	46.75	39.02	(-) 28.27

(Note: PET = evapotranspiration)

4. 결론 및 향후연구

본 연구는 기후변화 영향평가를 위한 수문모형을 선택함과 동시에 SNURCM 기상자료의 적용성에 대하여 검토하였다. 먼저 기후변화 영향평가를 위한 최적의 모형을 선택하기 위하여 총 4개의 물수지모형(T&M, abcd, GR2M, Xiong)과 일 유출모형인 SSARR, TANK 모형을 대청댐유역에 대하여 유출모의 능력을 비교 검증하였다. 비교결과 abcd모형이 물수지모형 중에서는 가장 우수하였고, 월 유출량만을 비교할 경우 일 유출모형과도 비슷한 모의정확성을 보이고 있어 본 연구의 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

abcd모형의 매개변수 지역화를 위해 9개 다목적댐에서 추정된 매개변수와 유역특성인자를 이용하여 회귀식을 작성하고, 미계측지역으로 가정한 횡성댐, 남강댐, 밀양댐, 용담댐의 매개변수를 계산한 후 모의정확성을 검증한 효율성계수에 있어 상당히 뛰어난 결과를 보였다. abcd모형의 매개변수 지역화의 적용가능성을 검증하였다. 따라서 작성된 회귀식을 이용하여 금강유역 12개 소유역의 유출량을 모의할 수 있도록 abcd모형을 구축하였다.

마지막으로 SNURCM 모의기상자료의 적용가능성을 검토하였다. 먼저 수문모형의 가장 중요한 입력자료인 강수량자료에 대하여 SNURCM 자료와 실측강수량 자료를 대상유역인 금강 12개 소유역에 대하여 비교한 결과 대체적으로 모의강수가 실측강수보다 작은 값을 나타내고 있으나, 12개 모든 소유역의 효율성 계수가 60% 이상이었다. 실측유량 자료가 존재하는 대청댐유역에 SNURCM 기상자료와 실측자료를 사용하여 abcd모형으로 유입량을 모의한 결과, SNURCM 기상자료를 사용할 경우 입력오차로 인하여 모든 평가지표에 있어 정확도가 떨어지는 것을 확인할 수 있었으나, ME가 80% 이상인 것을 볼 때 기후변화 연구로는 충분히 가치가 있는 것으로 사료된다.

본 연구에서 구축한 abcd모형은 기후변화에 따른 유역단위의 수자원 영향평가 및 적응전략 수립을 위한 연구에 활용될 예정이다. 따라서 abcd모형의 최종목표는 SNURCM모형을 이용하여 생성된 고해상 기후변화 시나리오를 제공받아 대상유역의 유량변화 시나리오를 생성하는 것이라 할 수 있다. 생성된 유량변화 시나리오는 유역 내 물의 과부족 또는 가용한 물의 양을 정량적으로 평가하는 물수지 분석을 거쳐 기후변화에 따른 수자원시스템의 영향분석을 위해 사용될 것이며, 유량변화에 따른 대상유역의 다목적댐 운영률 도출에도 활용될 것이다. 이렇게 도출된 다목적댐 운영률을 현재의 운영률과 비교할 수 있다면, 기존의 기후변화 연구에서는 제시하지 못했던 보다 구체적인 적응전략이 수립될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국환경기술진흥원에서 주관하는 차세대 핵심환경기술개발사업의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 주관기관인 서울대학교 지구환경과학부의 이동규 교수님과 박사과정 차동현군에게도 연구지원에 감사드립니다. 마지막으로 일 유출모형과 월 물수지모형의 비교에 대한 귀중한 조언을 해주신 세종대학교 배덕호 교수님과 토론회 본 논문의 질을 향상시키는데 중요한 역할을 하였음을 밝힙니다.

참고 문헌

- 건설교통부 (1998). 기존댐 용수공급 능력조사(금강수계) 보고서.
- 건설교통부, 한국수자원공사 (2004). 유역통합 물관리를 위한 하천유출량 예측방안 연구 보고서.
- 과학기술부 (2004). 실시간 물관리 운영시스템 구축 기술개발.
- 김병식, 김형수, 서병하, 김남원 (2004). "기후변화가 용

- 담댐 유역의 유출에 미치는 영향." **한국수자원학회 논문집**, 제37권, 제2호, 한국수자원학회, pp. 185-193.
- 김병식, 김형수, 서병하, 김남원 (2003). "기후변화가 용담댐 유역에 미치는 영향." **대한토목학회 학술발표회 논문집(III)**. 대한토목학회, pp. 427-430.
- 김영오, 서용원 (2000). "선진국의 기후변화 연구동향(II): 수자원관리에 대한 영향을 중심으로." **한국수자원학회지**, 제33권, 제3호, 한국수자원학회, pp. 32-41.
- 김원석, 윤용남, 최영박 (1991). "Thomas 월 유출모형의 미계측 유역 적용에 관한 연구." **한국수문학회지**, 제24권, 제4호, 한국수문학회, pp. 85-91.
- 안재현, 유철상, 윤용남 (2001). "GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대형댐 유역의 수문환경 변화 분석." **한국수자원학회논문집**, 제34권, 제4호, 한국수자원학회, pp. 335-345.
- 한국수자원공사 (2004). **다목적댐 운영 실무편람**.
- 한국건설기술연구원 (1997). **월유출모형의 개발**.
- 환경부 (2004). **기후변화에 의한 물순환의 예측 및 영향 평가 최종보고서**.
- Alley, W.M. (1984). "On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting and aquifer recharge in monthly water balance models." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 8, pp. 1137-1149.
- Arnell, N.W. (1992). "Factors controlling the effects of climate change on river flow regimes in a humid temperate environment." *Journal of Hydrology*, Vol. 132, pp. 321-342.
- Dunne, T. and Leopold, L.B. (1978). *Water in Environmental Planning*, W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- Environmental Protection Agency (2002). *Infrastructure Systems, Services and Climate Change: Integrated Impacts and Response Strategies for the Boston Metropolitan Area*.
- Fernandez, W., Vogel, R.M., and Sankarasubramanian, A. (2000). "Regional calibration of a watershed model" *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 45, No. 5, pp. 689-707.
- Gleick, P.H. (1986). "Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes." *Journal of Hydrology*, Vol. 88, pp. 97-116.
- Guo, S., Wang, J., Xiong, L., Ying, A., and Li, D. (2002). "A macro-scale and semi-distributed monthly water balance model to predict climate change impacts in China." *Journal of Hydrology*, Vol. 268, pp. 1-15.
- Kirshen, P., McCluskey, M., Vogel, R.M., and Strzepek, K. (2005). "Global analysis of changes in water supply yields and costs under climate change: A case study in China." *Climatic Change*, Vol. 68, No. 3, pp. 303-330.
- Makhlouf, Z. and Michel, C. (1994). "A two-parameter monthly water balance model for French watersheds." *Journal of Hydrology*, Vol. 162, pp. 299-318.
- Merz, R. and Blöschl, G. (2004). "Regionalisation of catchment model parameters." *Journal of Hydrology*, Vol. 287, pp. 95-123.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- Sankarasubramanian, A. and Vogel, R.M. (2002). "Annual hydroclimatology of the United States." *Water Resources Research*, Vol. 38, No. 6, pp. 19(1)-19(12).
- Shuttleworth, W.J. (1993). "Chapter 4. Evaporation." *Handbook of Hydrology*, edited by D.R. Maidment, McGraw-Hill Book Inc., New York, pp. 4.14-4.21.
- Sorooshian, S. and Gupta, V.K. (1983). "Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: the question of parameter observability and uniqueness." *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 4, pp. 251-259.
- Thomas, H.A. (1981). *Improved Methods for National Water Assessment*. Report, WR15249270, U.S. Water Resource Council, Washington, D. C.
- Thorntwaite, C.W. and Mather, J.R. (1955). "The water balance." *Climatology Drexel Institute Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-104.
- Westphal, K.S., Vogel, R.M., Kirshen, P., and Chapra, S.C. (2003). "Decision support system for adaptive water supply management." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 129, No. 3, pp. 165-177.

Xiong, L. and Guo, S. (1999). "A two-parameter monthly water balance model and its application." *Journal of Hydrology*, Vol. 216, pp. 111-123.

(논문번호:05-106/접수:2005.07.20/심사완료:2007.01.18)