

기후인자의 변화에 따른 대청댐유역의 유출민감도 모의평가 - 4th IPCC 보고서의 결과를 기준으로 -

Sensitivity Assessment on Daecheong Dam Basin Streamflows According to the Change of Climate Components - Based on the 4th IPCC Report -

정 상 만* / 서 형 덕** / 김 형 수*** / 한 규 하****

Jeong, Sang Man / Seo, Hyeong Deok / Kim, Hung Soo / Han, Kyu Ha

Abstract

Climate change and global warming are prevalent all over the world in this century and many researchers including hydrologists have studied on the climate change. This study also studied the impact of climate change on streamflows of a basin in Korea. The SWAT model was used to assess the impacts of potential future climate change on the streamflows of the Daecheong Dam Basin. Calibration and validation of SWAT were performed on a monthly basis for the year of 1982-1995 and 1996-2005, respectively. The impact of seven 15-year(1988-2002) scenarios were then analyzed for comparing it to the baseline scenario. Among them, scenario 1 was set to show the result of doubling CO₂, scenario 2-6 were set to show the results of temperature and precipitation change, and scenario 7 was set to show the result of the combination of climatologic components. A doubling of atmospheric CO₂ concentration is predicted to result in an maximum monthly flow increase of 11 percent. Non-linear impacts were predicted among precipitation change scenarios of -42, -17, 17, and 42 percent, which resulted in average annual flow changes in Daecheong Dam Basin of -55, -24, 25, and 64 percent. The changes in streamflow indicate that the Daecheong Dam Basin is very sensitive to potential future climate changes and that these changes could stimulate the increased period or severity of flood or drought events.

keywords : Climate change, SWAT, Streamflow, Daecheong Dam

* 국립공주대학교 공과대학 건설환경공학부 교수
Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Budae-dong, Cheonan-si, Chungnam-do, 330-717, Korea.
(e-mail: smjeong@kongju.ac.kr)

** 국립공주대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정
Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Budae-dong, Cheonan-si, Chungnam-do, 330-717, Korea.
(e-mail: hdseo@kongju.ac.kr)

*** 인하대학교 공과대학 사회기반시스템공학부 부교수
Associate Professor, Department of Civil and Environmental System Engineering, Inha University, Yonghyeon-dong, Nam-gu, Incheon, 402-751, Korea.
(e-mail: sookim@inha.ac.kr)

**** 교신저자, 현대건설(주) 사원
Staff, HyunDai Engineering and Construction Co., Ltd., Gye-dong, Jongno-gu, Seoul, 110-801, Korea
(e-mail: khhan@kongju.ac.kr)

요 지

기후변화와 지구온난화현상은 지구 전체에 걸쳐 분명하게 나타나고 있으며 그에 따라 발생할 수 있는 수문 변화에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 본 연구에서는 기후변화에 따른 유역 유출의 민감도를 평가하기 위하여 SWAT 모형을 이용하였으며 대청댐유역에 적용하였다. 모형의 보정은 1982-1995년의 월평균 하천유량을 이용하였고 1996-2005년의 자료를 이용하여 검증하였다. 기후변화에 따른 수문 변동을 정량적으로 분석하기 위하여 1988-2002년을 기준시나리오 기간으로 설정하였으며 이산화탄소 농도, 기온, 강수의 변화에 따른 총 7개의 시나리오를 구성하였다. 7개의 시나리오 중 배증 이산화탄소와 기온의 5.4°C 증가를 반영하는 시나리오는 연평균 4~5%의 하천유량 증가를 예측하였고, 강수량의 변화를 반영하는 시나리오는 -42, -17, 17, 42%의 변화에 따라 -55, -24, 25, 64%의 비선형적인 하천유량 증감이 예측되었다. 기후인자의 변화를 복합적으로 반영하고 있는 시나리오에서는 평균 12%(봄, 여름, 가을)와 63%(겨울)의 하천유량 변화를 예측하였다. 또한 유행분석 결과 대청댐유역의 유출은 기후변화에 매우 민감한 것으로 나타났으며, 이러한 기후변화는 가뭄과 홍수의 심도와 발생기간에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

핵심용어 : 기후변화, SWAT, 유출, 대청댐

1. 서 론

기후변화와 지구온난화현상은 지구 전체에 걸쳐 분명하게 나타나고 있으며 그에 따라 발생할 수 있는 수문 변화에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 최근에는 지구의 평균기온이 배증 이산화탄소(double CO_2)의 영향으로 1.4°C에서 6.9°C정도 상승할 것이라고 Christensen *et al.*(2007)은 지적하였다. 유출을 비롯한 수문현상에 큰 영향을 미치는 기후인자는 강수, 기온, 이산화탄소의 농도 등이 있다. 강수는 지역적인 분포가 불확실하지만 전 세계적으로 증가가 예상되고 있으며 특히 고위도 지방으로 갈수록 강수의 증가현상은 뚜렷이 나타나고 있다(Christensen *et al.*, 2007). 현재 나타나고 있는 혹은 미래에 나타나게 될 기후변화를 예측하기 위해서 세계적으로 많은 기후모형과 유역에 맞는 축소기법이 연구·활용되고 있다. 대륙적 규모의 기후모형인 GCM(Global Circulation Model)의 한계를 극복하기 위하여 물리적 기반의 AGCMs(High and Variable Resolution Atmospheric General Circulation Models), AOGCMs(Atmosphere-Ocean General Circulation Models) 그리고 RCM(Regional Climate Model) 또는 통계학적 축소(statistical downscaling)기법 등 여러 가지 방법이 사용되고 있다.

현재 기후변화에 따라 발생할 수 있는 수문변화에 대한 우리나라의 연구는 기상학자, 혹은 수문기상학자들이 연구한 기후모형의 결과를 수문학자, 혹은 수문기상학자가 수문모형에 적용하여 대상 유역에 어떠한 수문변화가 미래에 발생하게 될지를 예측하는 방법이 주로 사용되고 있다(김병식 등, 2004; 김선영 등, 2003; 김

웅태 등, 2004; 안재현 등, 2001a; 안재현 등, 2001b; 이길성 등, 2006; 정일원 등, 2006). 하지만 기후모형의 결과는 입력되는 경계조건, 사용되는 기후모형의 종류 또는 연구자에 따라 다르게 나타나고 있어 실제로 어느 결과를 실무나 연구에 이용해야 할지는 판단하기 어려운 실정이다. 따라서 기후모형으로 예측되는 여러 기후인자의 변화를 한 번에 적용하기 전에 강수, 기온과 같은 주요 기후인자의 변화에 따라 유출을 비롯한 수문현상이 미래에 어떻게 변하게 될 것인지 특정 유역에 대한 민감도를 평가하는 일은 매우 근본적이고 중요하다고 할 수 있다.

2007년 보고된 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 네 번째 보고서(Christensen *et al.*, 2007)에서 아시아지역 중 우리나라가 포함된 동아시아 지역의 기온이 3~4°C 상승하고, 강수량은 변동폭이 -4~9%로 매우 커짐에 따라 호우와 가뭄의 극한 현상 발생가능성이 높아지는 것으로 전망하였다. 본 연구에서는 A1B 시나리오를 바탕으로 분석한 PCMDI(Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison)의 결과를 이용하여 총 7개의 시나리오를 구성하였다. 각 시나리오는 이산화탄소 농도, 기온, 강수의 변화를 각각 혹은 함께 나타내고 있으며 시나리오 1은 배증된 이산화탄소 농도를, 시나리오 2~6은 2080년에서 2099년 사이에 예측되고 있는 최대 변화값(maximum)을 나타내며, 시나리오 7은 같은 기간에 예측되고 있는 중간 변화값(mean)을 나타내도록 구성하였다. 각 기후인자의 변화에 따른 유출의 민감도를 평가하기 위하여 준분포형 장기 유출모형인 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)(Neitsch *et al.*,

2002)모형을 대청댐유역에 적용하여 그 영향을 평가하고자 한다.

2. SWAT 모형을 이용한 유출 모의

2.1 SWAT 모형

SWAT모형은 1990년대 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold에 의해 개발되었고 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 수문현상을 모의하기위한 물리적 기반의 준분포형 모형으로 유역에 대한 물리적 특성이 반영되며, 모의를 위해서 전체유역을 수개의 소유역으로 구분함으로써 높은 공간적 해상도로 모의가 가능하다. SWAT은 수문반응의 최소 단위로 토지이용과 토양특성 및 소유역을 기준으로 생성되는 HRU(Hydrological Response Unit)를 사용한다. 또한 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적의 네 가지 부모형(sub-model)으로 구분되며 수문부모형은 지표면 유출, 차단, 중간유출(측방유출), 침투, 기저유출, 수로손실, 증발산 등으로 구성되어 있다. 모형내의 물수지방정식에 기초한 수문순환의 과정은 다음 Eq. (1)과 같이 이루어진다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서, SW_t : 최종일의 토양수분량(mm)

SW_0 : i 일의 초기토양수분량(mm)

t : 시간(days), R_{day} 는 i 일의 강수량(mm)

Q_{surf} : i 일의 지표면 유출량(mm)

E_a : i 일의 증발산량(mm)

w_{seep} : i 일의 토양층 바닥(soil profile bottom)에서 침투 및 침투되는 총량(mm)

Q_{gw} : i 의 회귀수량(mm)

본 연구에서는 강우로 인한 지표유출과 침투의 분리는 SCS CN법을 사용하였고 잠재증발산은 Penman-

Monteith 방정식, 하도추적은 Muskingum 추적방법을 사용하였다.

2.2 대상유역 및 입력자료

대청댐 상류유역은 전체 금강유역의 약 45%를 차지하고 있으며 두개의 다목적댐인 대청댐과 용담댐이 위치하고 있고 각각 1980년, 2001년에 건설되었다. 본 연구는 기후변화에 따른 장기유출 특성의 변화에 대한 평가가 주목적이고, 이용 가능한 자료의 보유연수를 고려하여 용담댐은 존재하지 않는 것으로 가정하였다. 대청댐의 유역면적은 용담댐의 유역면적을 포함하여 약 4,179 km^2 이고 연평균 유입량은 95.6 cms(총 $2,450 \times 10^6 m^3$)에 달하며 연간용수공급량(생공용수, 관개용수, 유지용수 포함)이 약 $1,649 \times 10^6 m^3$ 이다.

대청댐 상류유역에는 수자원단위지도상에 용담댐, 용담댐하류, 무주남대천, 영동천, 초강, 보청천, 대청댐상류, 대청댐 유역 등의 8개 중권역으로 이루어져 있다. 대상유역내의 금강본류에는 옥천, 이원, 영동, 제원, 수통, 용담 수위관측소가 운영되고 있으며 본 연구의 적용 기간을 고려하여 자료의 보유연수가 충족되는 옥천, 수통, 용담 수위관측소와 유역 최하류단에 위치한 대청댐의 유입량을 모형의 유출량 검·보정에 이용하였다. Fig. 1은 대청댐 상류유역의 유출 모식도를 나타내고 있다.

SWAT 모형의 적용을 위해 필요한 입력자료는 지형자료, 지형자료와 연결되는 속성자료, 기상 및 유역관리와 관련된 자료 등 크게 3가지로 구분할 수 있다. 지형자료로는 수치고도 모형(Digital Elevation Model, DEM), 토지이용도, 토양도를 사용하며, 수치고도 모형과 토지이용도는 랜드셋(landsat) 위성영상을 통해 수치지형도와 혼합하여 구축된 국가 수자원관리 종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)의 자료를 이용하였다. 토지이용도의 해당 연도는 기준시나리오 기간(1988~2002년)에 포함되는 1995년의 토지이용상태를 이용하였으며 모의기간동안 토지이용의 변화는 고려하지 않았다. Fig. 2는 본 연구에 적용된 대청댐유역의 17개의 강

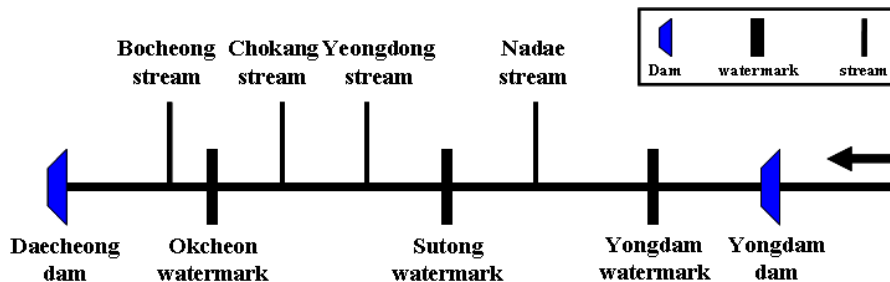


Fig. 1. Schematic Diagram of Streamflow on the Daecheong Dam Basin

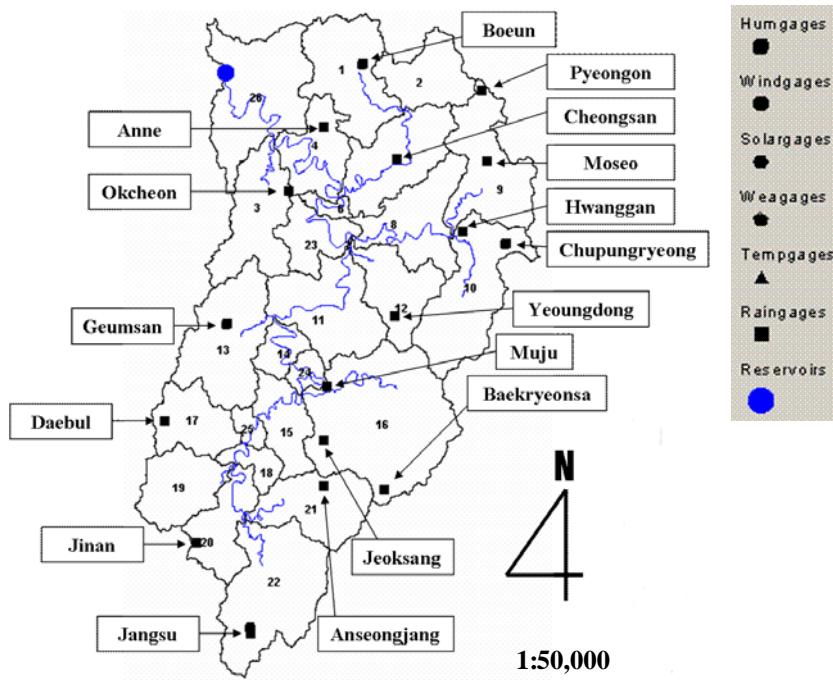


Fig. 2. Locations of Rainfall Stations in the Daecheong Dam Basin

우관측소 및 4개의 기상관측소 위치를 나타낸 그림으로 강우관측소 1개가 대표하는 면적은 약 245 km²로 유철상 등(2005)이 제시한 면적보다 약 3배정도 크지만 검토 단계에서 양호한 결과를 얻음으로써 17곳의 강우관측소로도 대청댐 유역의 강우자료가 대표성을 가질 수 있는 것으로 보인다.

2.3 모형의 평가함수

모형의 보정 및 검정 기간 동안의 결과를 평가하기 위하여 결정계수(coefficient of determination, R^2)와 Nash-Sutcliffe(Nash *et al.*, 1970) 효율계수(E_f)를 사용하였다. R^2 는 상관계수(correlation coefficient)의 제곱

으로 표현되며 관측유출량과 모의유출량에 대한 상관관계의 정도(strength of relationship)를 나타낼 수 있는 지표이고, E_f 는 관측유출량과 모의유출량을 함께 도시하였을 때 1:1 직선에 얼마나 근접하여 위치하는지를 나타내는 지표이다. R^2 와 E_f 는 Eq. (2), Eq. (3)과 같이 표현된다.

E_f 는 $-\infty$ 에서 1의 범위로 나타나게 되며, 만약 R^2 나 E_f 가 0보다 작거나 0에 근접하면 수행된 모의가 실제 현상에 대한 설명력이 적다는 것을 의미한다. 또한 E_f 가 0이면 모의값이 관측값의 평균에 근접하는 것이고, 1에 가까울수록 모의 결과가 실제 현상을 잘 표현하고 있다는 것을 의미한다.

$$R^2 = \left\{ \frac{n \left[\sum_{i=1}^n [Q_{Measured}(i) \cdot Q_{Predicted}(i)] \right] - \left[\sum_{i=1}^n Q_{Measured}(i) \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n Q_{Predicted}(i) \right]}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n [Q_{Measured}(i)]^2 - \left[\sum_{i=1}^n Q_{Measured}(i) \right]^2 \right] \cdot \left[n \sum_{i=1}^n [Q_{Predicted}(i)]^2 - \left[\sum_{i=1}^n Q_{Predicted}(i) \right]^2 \right}}} \right\}^2 \quad (2)$$

$$E_f = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Q_{Predicted}(i) - Q_{Measured}(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Q_{Measured}(i) - \bar{Q}_{Measured}]^2} \quad (3)$$

여기서, $Q_{Measured}(i)$: i 일에 관측된 유량

$Q_{Predicted}(i)$: i 일에 모의된 유량

$\bar{Q}_{Measured}$: 관측된 전체 유량의 평균, 그리고 n 은 자료의 총 개수

2.4 모형의 보정 및 검증

모형의 보정을 위하여 1981~1995년(모의 첫째인 1981년은 안정화 기간)의 월평균유출량자료를 이용하였으며 검증은 1995~2005년(모의 첫째인 1995년은 안정화 기간)의 월평균유출량자료를 이용하였다. 검증에 사용된 기간 중 2001년 이후에는 용담댐의 조절유량의 영향을 받아 자료의 일관성 측면에서 영향이 있을 수 있으나 자료의 검토결과 2001년 여름을 제외하고는 용담댐으로 인한 하천유량의 큰 변화는 나타나지 않았으므로 이를 선정하였다. 모의된 유출량을 보정하기 위하여 하천유출에 영향을 미치는 매개변수를 SWAT 자체에서 제공하는 Calibration Tool을 이용하여 CN값, 토양 증발보상계수(ESCO), 식생보상계수(EPCO), 각 토양층의 가용토양수분능(SOL_AWC) 등 8가지의 매개변수를 Table 1과 같이 조정하였다. Table 1에서 각 매개변수의 초기값은 SWAT모형에서 자동으로 생성되었으며 해당 매개변수가 가지는 물리적 한계를 벗어나지 않는 범위 내에서 조정하였다. Table 2에 요약한 바와 같이 대청댐 유입량, 옥천, 수통, 용담수위표 월평균 하천유량을 이용하여 보정한 결과 지점별 평균 결정계수(R^2)는 0.77이고, Nash-Sutcliffe 모의 효율(E_f)은 0.71로 나타나 구축된 모형이 금강 상류유역의 유출을 모의하는데 적합하다고 판단되었다. 모형의 검증은 보정단계에

서 조정된 매개변수를 변화시키지 않고 다른 기간에 그대로 적용함으로써 이루어졌다. 같은 매개변수를 적용하여 네 개 지점에 대한 검증결과 평균 결정계수는 0.86이고, Nash-Sutcliffe 모의 효율의 평균은 0.81로 나타났다. 일반적으로 보정결과가 검증결과보다 좋게 나타나지만 본 연구의 결과에서는 반대로 나타났다. 이는 SWAT가 모의기간동안의 월평균유출량을 비교적 정확하게 반영하고 있다는 것을 의미한다. Fig. 3과 Fig. 4는 검보정 지점 중 유역 출구점에 위치한 대청댐 유입량을 대표로 선정하여 관측유입량과 모의유입량의 회귀곡선을 도시한 그림으로 모의 결과의 합리성을 육안으로 확인할 수 있도록 하기위해 제시하였다.

3. 기후변화 시나리오의 구성

기후변화의 형태는 크게 이산화탄소(혹은 다른 온실가스)의 배출부분과 그에 따른 기후인자의 반응부분으로 생각해 볼 수 있다. 이산화탄소의 배출부분은 특정 시점의 대기중에 존재하는 온실가스의 농도를 반영하게 되고, 기후인자의 반응부분은 이산화탄소의 농도가 변화함에 따라 발생하는 여러 가지 기후인자의 변화를 반영하게 된다. 본 연구에서는 기준시나리오(baseline scenario)를 설정한 후 기후인자를 변화시킨 시나리오를 적용하여 그 변화를 평가하였다.

Table 1. Parameter Calibration of SWAT Model for the Daecheong Dam Basin

Parameter	Symbol	Initial Estimates	Calibrated Values	Input
Curve Number for moisture condition II	CN2	-	-5%	Management(.mgt)
Soil evaporation compensation factor	ESCO	0.0	0.2	HRU General(.hru)
Plant uptake compensation factor	EPCO	1.0	1.0	HRU General(.hru)
Soil available water capacity(mm)	SOL_AWC	-	0.04	Soil(.sol)
Groundwater revap coefficient	GW_REVAP	0.02	-30%	Groundwater(.gw)
Groundwater delay time(day)	GW_DELAY	31	31	Groundwater(.gw)
Threshold depth for baseflow to occur(mm)	GWQMN	0	2,000	Groundwater(.gw)
Base alpha factor(day)	ALPHA_BF	0.048	20%	Groundwater(.gw)

Table 2. Statistical Results of the Calibration and Validation Period

Division	Calibration(1982-1995)		Validation(1996-2005)	
	R^2	E_f	R^2	E_f
Daecheong Dam inflow	0.83	0.81	0.92	0.88
Okcheon streamflow	0.71	0.73	0.87	0.76
Sutong streamflow	0.73	0.61	0.77	0.75
Yongdam streamflow	0.80	0.77	0.88	0.86

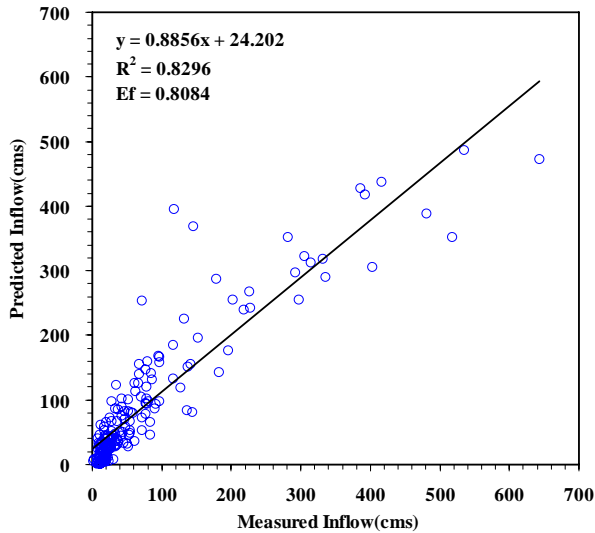


Fig. 3. Plot of Predicted Versus Measured Monthly the Daecheong Dam Inflows for the 14-year Calibration Period(1982~1995)

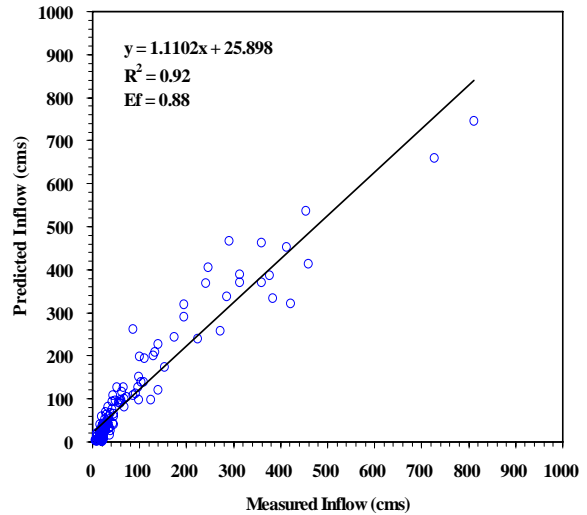


Fig. 4. Plot of Predicted Versus Measured Monthly the Daecheong Dam Inflows for the 10-year Validation Period(1996~2005)

3.1 기준시나리오 선정

현재의 기후상태를 반영하는 기준시나리오는 기후변화를 적용한 시나리오를 적용하기 전에 모의하게 된다. 각각의 기후인자에 변화를 준 시나리오는 기후인자들의 변화를 제외하고는 기준시나리오와 같은 조건에서 모의하게 되며 각각의 시나리오에 대한 영향(변화)을 비교할 수 있는 기준이 된다. 여기서 기준시나리오의 기간 및 시기에 따라 기후인자들의 변동성이 다르기 때문에 모의된 결과는 기준시나리오로 설정된 기간에 따라 달라질 수 있다(Jha *et al.*, 2006). Arnell *et al.*(1996)은 기후변화에 따른 수문학적 영향을 분석한 과거의 연구들을 조사한 결과 1951년부터 1980년 동안의 30년 기간이 수문학적 영향을 분석하는데 가장 많이 사용되었다는 것을 발표한 바 있다. 본 연구에서는 대청댐 유입량을 비롯한 대청댐 유역의 유출 변화를 분석하는 것이 주목적이기 때문에 대청댐의 건설 완료시기를 고려하여 현재의 기후상태를 반영하는 기준시나리오를 Fig. 5와 같이 1988년부터 2002년까지의 15개년으로 설정하였다. Fig. 6은 15개년의 기준시나리오 기간에 대한 월평균 강수량 및 기온을 나타낸 것으로 6, 7, 8월의 강수량과 기온이 가장 높게 나타나는 것을 알 수 있다. Table. 3은 기준시나리오에 대한 대청댐 상류유역의 수문성분을 연도별로 분석한 것이다. 그 결과 기준시나리오의 모의 기간인 1988년부터 2002년 동안 유출율의 경우 53~76%로 평균 64%의 유출율을 나타내었다. 통상 증발산량이 강수량 대비 40~50%임을 고려할 때 본 연구에서

구축된 모형의 결과는 25~59%를 보여 타당성 있는 결과라고 할 수 있다. 또한 Fig. 7은 기준시나리오기간 동안의 대청댐 월평균 관측유입량과 SWAT 모의 유입량을 비교한 그림으로 본 연구에서는 모의된 유입량을 기준으로 기후변화에 따른 유출의 변화를 평가하였다.

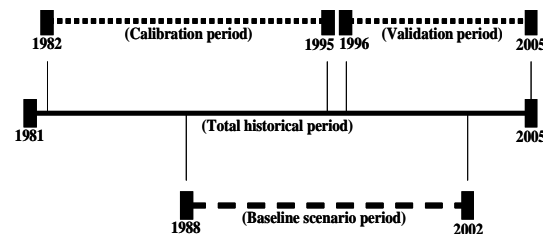


Fig. 5. Schematic Diagram of the Calibration, Validation, and Scenario Baseline Period

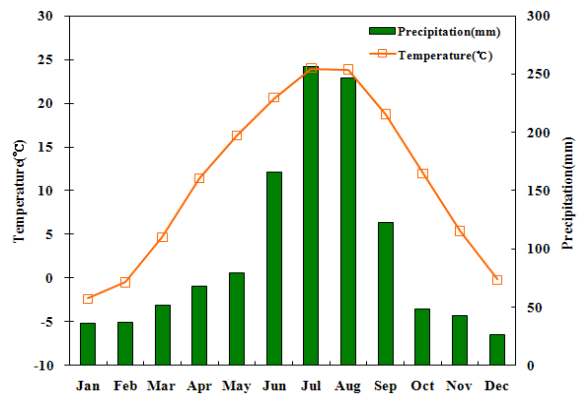


Fig. 6. Average Monthly Temperature and Precipitation for the Scenario Baseline

Table 3. Yearly Based Hydrologic Components for the Scenario Baseline

Year	Precipitation(mm)	Surface runoff(mm)	Evapotranspiration(mm)	Surface runoff(%)
1988	687	362	408	53
1989	1338	794	510	59
1990	1227	821	320	67
1991	1164	794	317	68
1992	974	551	473	57
1993	1345	837	483	62
1994	712	419	283	59
1995	965	661	277	68
1996	1154	702	477	61
1997	1288	804	479	62
1998	1650	1250	324	76
1999	1286	929	322	72
2000	1414	950	508	67
2001	890	476	459	54
2002	1369	981	290	72
Average	1164	755	396	64

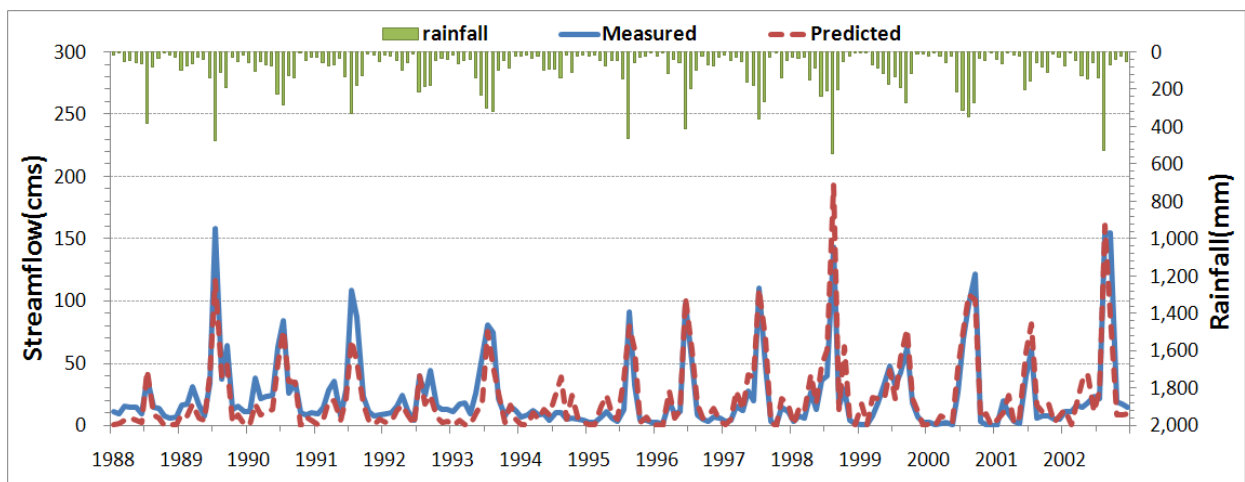


Fig. 7. Comparison of Measured Versus Predicted Monthly Inflows of the Daechong Dam During the 15-year Scenario Baseline Period(1988~2002)

3.2 기후변화 시나리오 구성

기후변화는 크게 이산화탄소(혹은 다른 온실가스)의 배출부분과 그에 따른 기후인자의 반응부분으로 생각해 볼 수 있다. 이산화탄소의 배출부분은 특정 시점의 대기중에 존재하는 온실가스의 농도를 반영하게 되고, 기후인자의 반응부분은 이산화탄소의 농도가 변화함에 따라 발생하는 여러 가지 기후현상의 변화를 반영하게 된다. 이러한 변화는 SWAT 모형에서 각각 또는 함께 모의할 수 있으며, 대기중의 이산화탄소 농도의 증가는 식물성장에 영향을 주게 되어 유역 유출량, 증발산량, 토양함수량 등에 영향을 미치게 된다. 또한 기후의 변

화에 따라 가장 큰 변화를 보이는 기후인자인 강수량과 기온은 유역 유출량, 증발산량, 토양함수량 뿐만 아니라 지하수량, 적설 및 융설량에도 영향을 주게 된다.

기후변화에 대한 영향평가는 IPCC(2001)에서 가정하고 있는 4가지의 시나리오(1996년에 IS92 시나리오를 변형한 A1, A2, B1, B2 시나리오)를 바탕으로 이루어지는 것이 보통이며 Table 4에 제시하였다.

기후변화 시나리오를 구성함에 있어 보통 A2 배출시나리오와 A1B 배출시나리오가 우리나라에 적합하다고 판단하였으나 A1B 배출시나리오가 A2 배출시나리오보다 기후변화의 변화정도를 크게 나타내어 이를 선정하였다. 선정된 기준 시나리오와 IPCC에서 2007년 발

Table 4. The Emissions Scenarios of the Special Report in Emissions Scenarios(SRES)

SRES	Feature	Scenario Family
A1	매우 빠른 경제성장, 세계인구는 21세기 중반에 가장 많고 이후 감소, 새롭고 효과적인 기술의 빠른 개발.	A1F1(fossil fuel intensive), A1T(predominantly non-fossil fuel), A1B(balanced)
A2	지속적인 인구증가를 유발하는 출생률 패턴의 매우 늦은 변화, 경제성장은 근본적으로 해당 지역에서 발생, 다른 시나리오에 비하여 경제성장과 기술의 변화가 점진적.	-
B1	A1 시나리오와 같은 인구변화, 서비스와 정보산업에 대한 빠른 경제구조의 변화, 자원효율적이고 깨끗한 기술의 개발, 사회·환경·경제의 지속가능성에 대한 세계적 해결, 사회적 평등향상, 기후에 대한 민감도 미미.	-
B2	사회·환경·경제의 지속가능성에 대한 지역적 해결, A2 시나리오보다 낮은 비율의 세계인구 증가, 중간정도의 경제성장, A1·B1 시나리오보다 덜 빠르지만 더 다양한 기술의 변화, 지역적 수준의 환경보호와 사회평등을 추구.	-

Table 5. Change of Climate Component Parameters for Monthly Based Seven Climate Scenarios

Scenario (Projected Year)	Climate Parameter	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Reference
1	CO ₂ (ppm)	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	-
2 (2080~2099)	Temperature(°C)	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	Christensen <i>et al.</i> (2007)
3 (2080~2099)	Precipitation(%)	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	
4 (2080~2099)	Precipitation(%)	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	
5 (2080~2099)	Precipitation(%)	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
6 (2080~2099)	Precipitation(%)	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	
7 (2080~2099)	CO ₂ (ppm)	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	
	Temperature(°C)	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	1.9	1.9	1.9	2.2	2.2	2.2	2.1	
	Precipitation(%)	-4	-4	0	0	0	-2	-2	-2	-13	-13	-13	-4	

표한 Christensen *et al.*(2007)의 연구결과를 바탕으로 Table 5와 같이 총 7개의 시나리오를 구성하였다. Christensen *et al.*(2007)은 A1B 배출시나리오(emission scenario)를 바탕으로 소대륙적 규모(sub-continental region)로 21개의 RCM 결과의 평균을 제시하고 있다.

본 연구에서 구성한 시나리오 1은 현재의 이산화탄소 농도를 330ppm으로 가정했을 때 보다 배증된 이산화탄소(double CO₂)를 반영하는 것으로 김웅태 등(2004)에 따르면 21세기가 지나기 전에 이산화탄소의 농도가 현재의 두 배가 되는 것은 피할 수 없으며 다만 그 시기가 언제가 되느냐 만이 다를 뿐이라고 지적한바 있다. 시나리오 1은 CO₂의 농도에 따른 식물성장에 대한 영향을 반영할 수 있는 시나리오로 SWAT의 물수지 방정식에서 잠재증발산량을 산정하는데 있어

Penman-Monteith 방정식을 사용하였고, 방정식 입력인자 중 식생피복저항을 계산하는데 CO₂가 입력되어 산정된다. 따라서, CO₂에 따른 지표유출의 기여도에 대한 증감을 반영해 줄 수 있다. 시나리오 2는 Christensen *et al.*(2007)이 동아시아 지역에 제시한 2080년에서 2099년에 예측되는 기온변화의 최대값(5.4°C)을 나타내고 있는 시나리오로, 기후변화의 영향을 평가하는 경우 온도는 정량적으로 고려하는 것이 일반적이다. 또한 기온의 상승은 현재 그리고 미래에 발생할 분명한 현상이기 때문에 기온의 하강부분은 고려하지 않았으며, 증가된 기온은 식물의 생산성과 증발산율에 직접적인 영향을 미치게 될 것이고 이것은 다시 대청담 상류의 지표 및 지표하 유출에 영향을 미치게 될 것이다. 강수 시나리오 3~6은 예측되는 강수량 변화 중 여름철에 예측되

는 최대값(17%)과 겨울철에 예측되는 최대값(42%)을 이용하여 설정하였다. 또한 강수는 그 변화가 불확실하기 때문에 증감을 모두 고려하여 시나리오를 설정하였다. 마지막으로 이산화탄소 농도, 강수, 기온의 복합적인 변화로 인한 영향을 평가하기 위하여 시나리오 7을 구성하였으며 Christensen *et al.*(2007)이 제시하고 있는 예측 범위의 중간값을 계절별로 적용하였다.

4. 모의결과 분석

대청댐 유역의 유출민감도는 기후인자를 변화시킨 시나리오를 적용한 후 기준시나리오와 비교함으로써 그 변화를 평가하였다. 먼저 SWAT 모형으로부터 산정된 물수지를 검토하여 적용성을 확인한 후 기후인자의 변화에 따른 대청댐 유역의 유출민감도를 평가하였다.

4.1 SWAT 모형의 적용에 따른 물수지 산정

기준시나리오와 7가지의 시나리오를 대상으로 1988~2002년의 기준시나리오 기간 동안 SWAT 모형을 이용하여 모의한 결과 Table 6과 같이 물수지가 계산되었다. 모의된 각 물수지 인자의 시나리오별 변화는 각 시나리오의 특성을 고려할 때 적절히 모의되고 있다고 판단되며 SWAT 모형이 대청댐 유역을 적절히 반영하고 있다고 사료된다.

4.2 기후인자의 변화에 따른 대청댐 유역의 유출민감도 평가

기후인자의 변화에 따른 시나리오 1~6의 결과를 15년 동안의 기준시나리오와 비교한 Table 7과 Fig. 8은 검토 대상인 월평균 대청댐 유입량, 옥천, 수통, 용담 수위표 지점의 유출량 중 유역 출구점에 위치한 대청댐 유입량의 변화 백분율을 도시하고 있다.

배증된 이산화탄소 농도를 반영하는 시나리오 1에서

는 대청댐 유입량의 유량이 월별로 2~8%의 변화를 보이는 것으로 나타났으며, 특히 2월과 3월이 기준시나리오와 비교하였을 때 가장 큰 차이가 나타났다. 이러한 결과는 이산화탄소의 증가가 증산량을 감소시키고 이로 인하여 토양수분량이 증가하게 되어 유출량이 증가되기 때문이다. 하지만 우리나라는 하천유량의 계절별 변화가 크기 때문에 백분율 상으로는 2월과 3월이 차이가 크게 나타나지만 유출 총량의 변화 측면에서 보면 홍수기인 여름철이 가장 크게 변화될 것으로 판단된다. 시나리오 2에서는 봄(3, 4, 5월), 여름(6, 7, 8월), 가을(9, 10, 11월)에 월평균 유입량 및 유출량이 2~18% 정도 감소되지만 겨울(12, 1, 2월)에는 18%에서 최대 79%까지 크게 증가되는 것을 확인할 수 있다. 알프스지역과 같은 경우는 증가된 기온이 겨울철 용설량을 증가시키게 되어 하천유량과 댐의 유입량이 증가하게 된다. 여기서 기온의 증가로 인한 용설량의 증가는 월별 유출량의 변화가 크지 않은 지역에서 침투유량이 나타나는 시기를 여름철에서 늦봄으로 앞당길 수도 있을 것이다 (Jha *et al.*, 2006). 대청댐 유역을 비롯한 우리나라의 경우 계절별 유출량 차이가 크고 여름철 강우량이 크기 때문에 겨울철의 유출량이 현저히 증가된다 하더라도 알프스 지역과 같이 침투유량의 시기가 바뀌지는 않을 것이나 기후변화 시나리오에 따른 결과를 토대로 하면 유출변화에 대한 지속적인 감시와 대비가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 시나리오 3~6은 강수량의 선형적 변화에 따른 유출의 민감도를 평가할 수 있는 시나리오로, 기준시나리오와 비교한 백분율의 차이는 겨울철이 크게 나타나지만 총량의 변화는 역시 여름철이 가장 크고 가을, 봄 순으로 크게 예측된다. 따라서 기후변화로 인한 유출의 변화에서 강수량의 변화가 민감도에 가장 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Table 6. Change in Annual Average Water Balance for Scenario 1~6 Relative to the Baseline on the Daecheong Dam Basin

(unit : mm)

Hydrologic Balance Components	Scenario						
	Baseline	1	2	3	4	5	6
Precipitation	1190	1190	1190	690	988	1393	1690
Surface runoff	110	121	86	24	66	165	260
Snowfall	44	44	8	25	36	51	62
Snowmelt	44	44	8	25	36	51	62
ET	392	366	419	316	368	407	424
Groundwater & Lateral flow	688	703	685	350	554	821	1006

Table 7. Predicted Change Rate of the Daecheong Dam Monthly Inflows for the Six Climate Change Scenarios

Month	Baseline (cms)	Scenario (% change)					
		1	2	3	4	5	6
Jan	13	4	79	-62	-28	31	85
Feb	20	8	24	-61	-28	33	83
Mar	61	7	-18	-58	-25	26	66
Apr	66	5	-9	-54	-23	24	60
May	75	4	-7	-54	-23	24	61
Jun	103	3	-4	-53	-22	24	59
Jul	287	3	-2	-52	-22	22	56
Aug	249	2	-4	-52	-22	22	55
Sep	191	2	-4	-51	-21	22	54
Oct	67	2	-4	-52	-22	22	56
Nov	37	3	-4	-54	-23	25	63
Dec	23	4	18	-57	-24	26	66
Annual Avg.	99	4	5	-55	-24	25	64

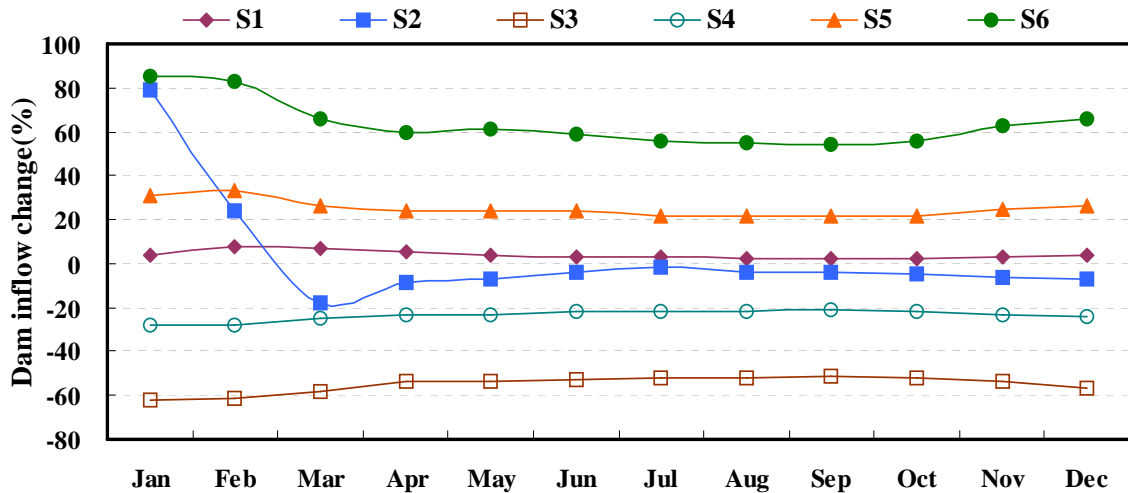


Fig. 8. Predicted Change Rate of the Daecheong Dam Monthly Inflows for the Six Climate Change Scenarios

Table 8. Change of the Dacheong Dam Inflow for Scenario 7

Division	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Avg.	
Baseline(cms)	13	20	61	66	75	103	287	249	191	67	37	23	99	
Scenario (% change)	7	89	50	6	12	15	13	13	12	12	12	14	40	24

4.3 기후인자의 복합적인 변화에 따른 대청댐 유역의 유출 변화 평가

이산화탄소 농도, 기온, 강수의 변화를 계절에 따라 복합적으로 반영하고 있는 시나리오 7에서는 Table 8

과 Fig. 9와 같이 겨울철(12, 1, 2월)의 변화율이 가장 큰 것으로 나타났으며 기준시나리오와 비교하여 1월에 최대 89% 정도 증가되는 것으로 모의되었다. 봄, 여름, 가을철에도 6~15%가 증가되는 것으로 나타난다.

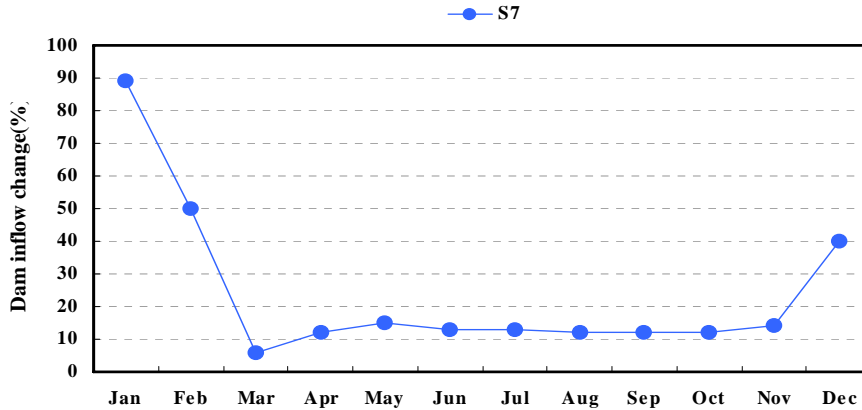


Fig. 9. Predicted Change Rate of the Daechong Dam Monthly Inflows for the Scenario 7

5. 결 론

SWAT모형을 적용하여 IPCC에서 2007년 발표한 Christensen *et al.*(2007)이 제시하고 있는 기후인자의 변화에 따라 총 7개의 시나리오를 구성하여 대청댐유역의 유출 민감도를 모의, 평가하였으며 이 과정에서 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기후변화를 고려한 유출 변동을 평가하는 과거 많은 연구들이 주로 기후모형의 예측 결과를 이용하여 기후인자의 복합적인 작용으로 인한 영향을 평가하고 있는데 반하여 본 연구에서는 이산화탄소 농도, 기온, 강수 각각의 변화에 따라 나타나게 되는 유출 변동의 민감도 평가를 시도하였으며 기후인자의 변화에 따라 대청댐 유역 유출의 변화가 매우 큰 것으로 평가되었다.
- 2) 기후인자의 변화에 따른 대청댐 유역의 유출민감도 평가에서는 강수량으로 인한 유출 변화가 이산화탄소 농도, 기온의 변화에 따른 유출의 변동성보다 상대적으로 크게 나타났다. 또한 강수의 변화를 선형적으로 증감(시나리오 3과 시나리오 6, 그리고 시나리오4와 시나리오 5)하여 SWAT 모형에 적용하였으나 그에 따른 유출의 변동은 선형적으로 나타나지 않았으며, 강수량이 증가하는 경우가 감소하는 경우보다 변동폭이 크게 나타나 대청댐 유역의 유출은 강수량의 증가에 민감하게 반응하는 것으로 판단된다. 특히 강수량의 증가가 작은 경우(시나리오 5)보다 큰 경우(시나리오 6)가 유출 민감도가 크게 나타나고 있는 것으로 분석되었다.
- 3) 기후인자의 복합적인 변화에 따른 대청댐 유역의

유출변화 평가에서는 백분율 상으로 겨울철이 봄, 여름, 가을철 보다 변화폭이 크게 나타날 것으로 예측되었으며, 이러한 현상은 유출현상의 계절적 변화를 발생시킬 수 있음을 암시하고 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국립공주대학교에서 주관하는 친환경 도시방재기술 개발사업의 일환으로 완성되었으며 연구와 관련된 세심한 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김병식, 김형수, 서병하, 김남원 (2004). “기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제2호, pp. 185-193.
- 김선영, 김병식, 김형수, 서병하 (2003). “WGEN 모형과 2변수 물수지 모형을 이용한 기후변화 영향분석.” **한국수자원학회 '03 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 747-750.
- 김웅태, 이동률, 유철상 (2004). “기후변화에 따른 대청댐 유역의 유출 영향 분석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제4호, pp. 305-314.
- 안재현, 유철상, 윤용남 (2001a). “GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, pp. 335-345.
- 안재현, 윤용남, 유철상 (2001b). “지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여: 2. 물수지 모형을 이용한 대청댐 상류 유역 수문환경의 변화 분석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제5호, pp.

- 511-519.
- 유철상, 김경준, 김남원 (2005). "SWAT 모형의 적용을 위한 적정 강우계밀도의 추정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제5호, pp. 415-425.
- 이길성, 정은성, 신문주 (2006). "기후, 지하수 취수 및 토지이용 변화의 건기 총유출량에 대한 영향." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제11호, pp. 923-934.
- 정일원, 구보영, 배덕효 (2006). "A2 시나리오를 활용한 5대강수계 유출변동성 분석." **한국수자원학회 2006년도 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1501-1505.
- Arnell, N.W., C. Liu, R. Compagnucci, L. da Cunha, K. Hanaki, C. Howe, G. Mailu, I. Shiklomanov, and E. Stakhiv. (2001). *Hydrology and Water Resources(Chap. 4 in Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability)*. Cambridge University Press, pp.193-233.
- Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioac, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magana Rueda, L. Mearns, C.G. Menendez, J. Raisanen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton (2007). *Regional Climate Projections, In Climate Change 2007 : The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC)*. Cambridge University Press, pp. 852-860.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2001). *IPCC Special Report Emissions Scenarios (Summary for policymakers)*. Cambridge University Press, pp. 2-20.
- Jha, M., Arnold, J.G., Gassman, P.W., Giorgi, F., and Gu, R.R. (2006). "Climate Change Sensitivity Assessment on Upper Mississippi River Basin Streamflows Using SWAT." *Journal of the American Water Resources Association, AWRA*, Vol. 42, Issue 4, pp. 997-1016.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, Issue 3, pp. 282-290
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. (2002). *Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 2000 User Manual*." Grassland, Soil & Water Research Laboratory, Texas, USA.
- 국가 수자원관리 종합정보 시스템 홈페이지(Water Management Information System; WAMIS) <http://www.wamis.go.kr/> (2000).
- (논문번호:08-54/접수:2008.04.17/심사완료:2008.10.02)