

유출모형이 기후변화 수자원 영향평가에 미치는 영향 분석

Hydrological Model Response to Climate Change Impact Assessments on Water Resources

정 일 원* / 이 병 주** / 전 태 현*** / 배 덕 효****

Jung, Il Won / Lee, Byong Ju / Jun, Tae Hyun / Bae, Deg Hyo

Abstract

This study investigates differences in hydrological responses to the climatic scenarios resulting from the use of different three hydrological models, PRMS, SLURP, and SWAT. First, the capability of the three models in simulating the present climate water balance components is evaluated at Andong-dam watershed. And then, the results of the models in simulating the impact using hypothetical climate change scenarios are analyzed and compared. The results show that three models have similar capabilities in simulating observed data. However, greater differences in the model results occur when the models are used to simulate the hydrological impact under hypothetical climate change. According as temperature change grows, the differences between model results is increasing because of differences of the evapotranspiration estimation methods. The results suggest that technique that consider the uncertainty by using different hydrological models will be needed when climate change impact assessment on water resources.

keywords : climate change, hydrological models, model comparison, hydrological impacts assessment

요 지

본 연구에서는 PRMS, SLURP, SWAT 모형을 이용하여 유출모형에 따라 수자원의 기후변화 영향평가 결과에서 발생할 수 있는 차이를 평가하였다. 이를 위해 먼저 각 모형을 안동댐유역에 적용하여 관측자료에 대한 모의능력을 비교하였다. 그 다음 기온과 강수 변화를 가정한 합성시나리오 상황에서 각 모형별 모의결과를 비교하였다. 분석결과 세 모형은 관측기간에 대해서는 관측유량에 근접한 모의를 하였다. 그러나 강수와 기온의 변화를 고려하였을 경우에는 유출량의 변화량 모의에서 각 모형별로 상이한 결과를 보였다. 특히 기온이 크게 증가할 경우 모형별 결과차가 증가하는 것으로 분석되었는데, 이것은 각 모델에서 이용하는 증발산량 추정방법의 차이가 가장 크게 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 따라서 이러한 불확실성을 고려한 수자원 영향평가 방법이 필요할 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 기후변화, 수문모형, 모형비교, 기후변화 영향평가

* 세종대학교 토목환경공학과 BK21 박사후과정

Post Doctor, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea
(e-mail: bobilwon@paran.com)

** 세종대학교 토목환경공학과 박사과정

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

*** 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

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

**** 세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 교수

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

1. 서론

기후변화는 지구의 수문순환에 광범위한 영향을 미칠 뿐만 아니라 지역적인 수자원의 수요 및 공급에도 영향을 미칠 것으로 알려져 있다(IPCC, 2007). 이러한 기후변화에 따른 수자원의 영향을 평가하는 대표적인 방법 중의 하나는 기후변화 시나리오와 유출모형을 이용하는 것이다(Xu and Singh, 2004). 이 방법은 기후변화 시나리오의 선정, 전지구기후모델(Global Climate Model, 이하 GCM)을 이용한 기후모의, 수자원 영향평가를 위한 GCM 자료의 상세화(downscaling), 영향평가를 위한 유출모형의 적용 등의 단계로 이루어진다. 이때 각 단계에서는 미래에 대한 예측의 부정확성, 적용 모형의 구조나 가정사항 등으로 인해 불확실성이 발생하게 된다. 이러한 불확실성은 기후변화에 따른 수자원의 영향을 신뢰성 있게 평가하는데 있어 방해요인으로 작용하게 된다. 따라서 각 단계에서 발생하는 불확실성의 원인을 평가하고 정량화하는 것이 필요하며, 더 나아가 이러한 불확실성을 최소화하기 위한 노력이 요구된다.

지금까지 대부분의 연구는 주로 GCM에서 생산된 저해상도의 결과를 수자원 영향평가에 적합한 지역스케일의 기후시나리오로 상세화하는 과정에서 발생하는 문제에 초점이 맞춰져 있었다(Arnell, 1995; Pandey *et al.*, 2000; Fowler *et al.*, 2007). 이로 인해 상대적으로 상세화된 시나리오 결과를 이용하여 유출모형으로 수자원 영향을 평가하는 과정에서 발생하는 불확실성에 대한 연구는 극히 일부 연구만이 수행되었다. Boorman and Sefton (1997)의 연구는 두 개의 개념적 유출모형을 이용하여 수자원 영향평가에서 나타날 수 있는 수문학적 반응을 최초로 분석하였다는 점에서 의미가 있다. 이 연구에서는 관측자료 기간에 대해서는 두 모형이 유사한 모의 결과를 보였으나, 동일한 기후시나리오에 대해서는 유출분석 결과에서 상당한 차이를 보였다고 제시하였다. Jiang *et al.* (2007)도 중국의 Dongjiang 유역에서 6개의 월유출모형을 이용하여 유사한 연구를 수행하였는데, Boorman and Sefton (1997)의 결과와 동일한 결론을 도출하였다. 이 연구에서는 모형별 토양수분을 모의하는 알고리즘의 차이에서 이러한 모형별 결과의 차이가 발생한다고 분석하였다.

현재 기후변화에 따른 수자원의 영향평가 연구에는 평가 목적에 따라 다양한 모형들이 적용되고 있다. 국내에서도 여러 모형들이 수자원측면의 기후변화 연구에 적용되어 왔다. 대표적 사례로 신사철(2000)은 개념적 모형인 Tank 모형을, 김병식 등(2004)은 SLURP 모형

을, 황준식 등(2007)은 월물수지모형을, 배덕효 등(2007)은 PRMS 모형을 적용하였다. 기존의 대부분의 연구들에서는 하나의 모형을 선정한 다음 단순히 상세화된 기후변화 시나리오를 적용하여 유출량의 변화만을 평가해 왔다. 이로 인해 모형의 적용에 따라 발생할 수 있는 영향평가 결과의 불확실성에 대한 연구는 전무하였다.

20세기 이후 GIS 및 RS 기술의 발전과 이러한 자료의 활용성이 증가됨에 따라 국내외 기후변화 연구에서 준분포형(semi-distributed) 모형의 적용이 활발해지고 있다(Limaye *et al.*, 2001; Jha *et al.*, 2006; Bae *et al.*, 2008). 그러나 아직까지 이러한 준분포형 유출모형의 적용으로 인해 기후변화 수자원 영향평가 결과에서 발생할 수 있는 문제에 관해서는 연구가 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기후변화 연구에 많이 적용되고 있는 준분포형 모형을 이용하여 기후변화 영향평가 결과에서 모형에 따라 어느 정도 차이가 발생하는지를 정량적으로 평가하고자 하였다. 이를 위해 우선 대표적인 준분포형 모형인 PRMS, SLURP, SWAT 모형을 선정하고, 각 모형을 안동댐유역에 구축하였다. 그 다음 기온과 강수 조건의 변화에 따라 각각의 유출모형 결과에서 발생하는 차이를 분석하였다. 본 연구에서는 기후변화에 따른 수자원 영향평가지 유출모형에 따라 발생하는 불확실성을 제시함으로써, 수자원 영향평가 결과에 대한 신뢰성을 판단하는데 있어 유용한 정보를 제공할 것으로 사료된다.

2. 방법론

2.1 대상유역 및 자료

본 연구의 대상유역인 안동댐유역은 낙동강 최상류에 위치해 있으며, 유역면적은 1590.72 km²이다(Fig. 1). 안동댐유역은 1977년부터 지금까지 약 30년 동안의 유입량자료를 보유하고 있으며, 자료의 신뢰성과 타당성이 높다고 알려져 있다(신사철, 2000). 본 연구에서는 유출모형의 매개변수 검·보정을 위해 총 29년(1977-2005년)간의 기상 및 댐유입량 자료를 수집하였다. 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr/>)에서는 안동댐유역에 대해 2001년까지의 유역평균강수량 자료와 해당 강우관측소의 정보를 제공하고 있다. 본 연구에서는 2001년 유역평균강수량 산정에 이용되었던 강우관측소의 자료를 2002-2005년 기간에 대해 수집하고 유역평균강수량을 계산하였다. 안동댐유역의 1977-2005년 동안의 연평균강수량은 1129.8 mm로 산정되었으며, 연평균강수량의 약 68%가 6-9월에 집중해서 내리는 것으로 나타났다. 연평균유입량은 1,030.9 백

만 $m^3/year$ 이고, 최대 연유입량은 1,967.5 백만 $m^3/year$ (2003년), 최소 연유입량은 479.2 백만 $m^3/year$ (1982년)이었다. 모형별 지형학적 매개변수를 추정하기 위해 DEM, 토지피복도, 임상도, 정밀도양도 자료를 수집하고 이용하였다.

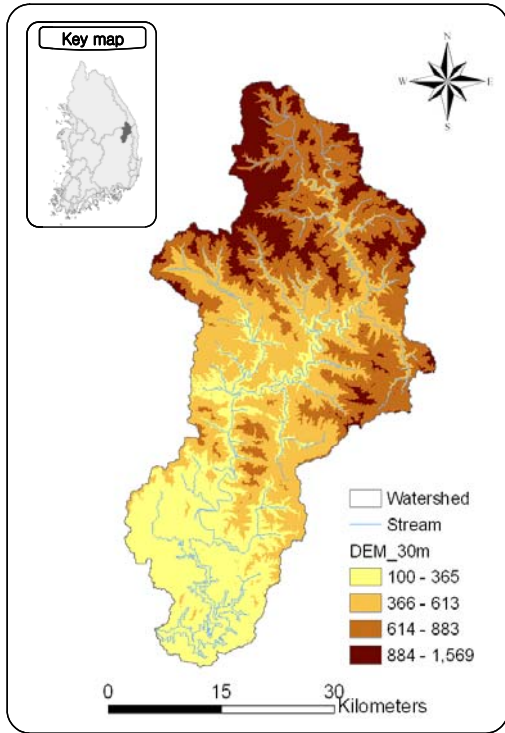


Fig. 1. Study Area

2.2 유출모형

가. PRMS (Precipitation Runoff Modeling System)

PRMS(Leavesley *et al.*, 1983)는 미국 USGS(U.S. Geological Survey)에서 개발한 모형으로 결정론적(deterministic) 모형이다. 1996년도에 개발된 MMS(Modular Modeling System) 버전은 다양한 수자원문제를 다룰 수 있도록 각 기능들이 모듈화되어 있어 사용자가 필요한 기능은 모듈을 추가하여 모형을 구축할 수 있도록 설계되어 있다. PRMS 모형은 유역을 경사, 경사향, 고도, 식생분포, 토양타입, 강우분포 등의 지형학적 특성이 균질한 소유역으로 나누어 소유역별 유역변수를 산정한 다음 소유역별 유출해석을 실행하여 각 소유역별 수문학적 반응의 합을 유역의 총유역 반응으로 계산한다. 이러한 소유역을 수문응답단위(Hydrologic Response Unit, 이하 HRU)라 하며, PRMS 모형은 HRU별로 유출분석을 수행하고 전체유역에 대한 총합을 유역의 유출량으로 모의한다. 지금까지 PRMS 모형은 세계적으로 다양한 유역의 기후변화 영향평가에 적용되었다(Burlando and Rosso, 2002; Dagnachew *et*

al., 2003; Bae *et al.*, 2008). 또한, 이 모형은 국내 유역에서도 적용성이 높은 것으로 알려져 있다(정일원과 배덕호, 2005).

나. SLURP (Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes)

SLURP(Kite *et al.*, 1994)는 SSARR 모형과 같은 복잡한 모형의 대안으로서 중규모 유역에 적용하기 위해 1975년에 개발되었으며, 그 이후 12차례에 걸쳐 개선되어 왔다. 초기에는 집중형 SLURP(Simple Lumped Reservoir Parametric) 모형으로 개발되었으나 이후 준분포형 모형으로 개선되었다. 이 모형은 준분포형 모형이지만 분포형 모형으로도 사용이 가능하다. SLURP 모형은 적용유역면적에 제한이 없는 모형으로, 유역면적이 $250 km^2$ (Sabourin, 1996), $7,500 \sim 35,000 km^2$ (Kite, 1993), $1.8 \times 10^6 km^2$ (Kite *et al.*, 1994) 등의 유역에 적용되었다. SLURP 모형은 대상유역을 ASA(Aggregated Simulation Area)라 불리는 수문학적 유출특성이 동질한 유역으로 구분하여 유출을 모의한다. 지금까지 다양한 유역에서 기후변화 연구(Kite and Haberland, 1999)에 적용되었으며, 국내에서도 김병식 등(2004)과 임혁진 등(2005)이 소양강댐과 용담댐유역을 대상으로 기후변화 연구에 이용하였다.

다. SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

SWAT(Arnold *et al.*, 1993)은 미국 농무성에서 개발된 준분포형 모형으로 장기간의 연속적인 모의유량을 생성하기 위해 인위적인 토지이용 상태나 수문환경 변화에 따라 유출과 유사는 물론 영양물질의 거동에 이르기까지 유역의 복합적인 수자원 문제를 평가할 수 있는 모형이다. SWAT 모형은 기상, 토양형태, 토지이용, 토지피복, 지형 및 지질자료 등의 자료를 이용하여 시간적인 해석은 물론 공간적인 수문성분의 모의도 가능하다. 이 모형은 분석대상유역을 소유역으로 구분하고, 각 소유역에 대해 동일한 토양형태와 토지피복을 갖는 HRU별로 유출량을 모의한다. SWAT 모형도 다양한 기후변화 연구(Jha *et al.*, 2006)에 적용되어 왔으며, 국내 여러 연구(김남원 등, 2006; 신현석 등, 2007)에도 적용되어 국내 유역에서의 적용성을 검증받았다.

2.3 유출모형별 기후변화 영향평가에 미치는 영향 분석 방법

본 연구에서는 선정된 3개 모형을 이용하여 모형선정에 따라서 수자원의 기후변화 영향평가 결과에서 발생할 수 있는 차이를 정량적으로 비교분석하고자 하였다. 이를 위해 연구수행단계는 크게 두 가지로 구분하

Table 1. Comparison of Characteristics of the Three Models

Model	Evapo-transpiration	Snowmelt	No. of soil zones	Runoff components	Routing
PRMS	Hamon	energy balance method	2	surface flow, subsurface flow, groundwater	None
SLURP	Penman-Monteith	degree-day method	2	surface flow, Interflow, groundwater	Muskingum
SWAT	Penman-Monteith	modified degree-day method	1~6	surface flow, subsurface flow, groundwater	Muskingum

였다.

먼저 관측자료 기간에 대해 3개 모형별 유출모의 능력을 분석하였다. 본 연구에서는 입력자료에 따른 영향을 제거하기 위해 유역평균 강수량과 기상자료를 산정하여 적용하였다. 또한, 모형별 매개변수의 초기치 영향을 최소화하기 위해 2년의 예비모의기간을 적용하였으며, 분석에서는 이 기간을 제외하였다. Table 1은 본 연구에서 적용한 각 모형의 구조적 특징을 제시한 것이다.

그 다음 기후변화상황에서의 모형의 수문거동을 분석하기 위해 합성시나리오를 이용하였다. 합성시나리오는 안동댐유역의 강수와 기온 자료를 기반으로 강수는 ±10%와 ±20%의 4가지 경우, 기온은 0°C, 1°C, 3°C, 5°C의 4가지 변화를 고려하여 총 16개 시나리오를 구축하였다. 모의기간은 총 32년으로 설정하였으며, 모의시점의 2년 동안은 예비모의기간으로 분석에서 제외하였다.

3. 적용 및 결과

3.1 유출모형 매개변수 검·보정

본 연구에서는 각 모형의 최적 매개변수를 추정하기 위해 전체 자료기간을 보정기간(1996-2005년)과 검정기간(1977-1995년)으로 구분하였다. 보정기간에 대해서는 관측유량자료에 근접하도록 매개변수를 추정하였으며, 검정기간에 대해서는 추정된 매개변수의 적합도를 평가하였다. 준분포형 모형은 수치표고모델, 토지피복도, 토양도 등의 GIS 자료를 이용하여 많은 지형학적 매개변수를 객관적으로 결정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지형자료를 이용하여 추정 가능한 매개변수는 추정하고, 추정이 어려운 일부 매개변수에 대해서만 보정하였다.

Table 2는 안동댐 유역에 대한 모형별 모의결과의 통계치를 제시한 것이다. Table 2에 제시된 바와 같이 세 모형 모두 보정 및 검정기간에 대해 관측유량에 높은 적합성을 나타내었다. Fig. 2는 2001-2005년 기간에

대해 일유출량 모의결과와 관측유량을 변환유량(transformed flow)으로 표시한 것이다. Hogue et al.(2000)은 계절별 유출량의 변화가 큰 유역의 유량자료를 도시할 경우 저수 및 고수유량을 동시에 잘 관측할 수 있게 하기 위해 변환유량(Eq. (1))을 이용한 방법을 제시하였다(정일원 등, 2007). Fig. 2에서 보는 바와 같이 세 모형 모두 고수 및 저수유출량 모의에서 관측치에 근접하게 모의하는 것을 볼 수 있다. Fig. 3은 전체자료기간에 대한 월평균유출량을 도시한 것이다. 월별 평균유출량에서도 관측치에 근접하게 모의하는 것으로 나타났다. 결과적으로 세 모형 모두 관측자료기간에 대해 안동댐유역의 관측유량을 잘 모의하는 것으로 판단되었다.

$$Q_{trans}(t) = [(Q(t) + 1)^\lambda - 1] / \lambda, \quad \lambda = 0.3 \quad (1)$$

여기서 $Q(t)$ 와 $Q_{trans}(t)$ 는 t 시간의 유량과 변환유량, λ 는 변환계수를 나타낸다.

3.2 기온과 강수변화에 따른 모형별 연평균 결과 비교

본 연구에서는 유출모형에 따라 수자원 영향평가에서 나타날 수 있는 불확실성을 평가하기 위해 기온은 0°C, 1°C, 3°C, 5°C 변화에 대해 분석하였으며, 강수량은 ±10%, ±20%의 변화에 대해 분석하였다.

Fig. 4는 기온변화와 강수량 변화에 따른 모형별 연평균유출량의 변화를 나타낸 것이다. 기온의 변화없이 강수량이 ±20% 증감할 경우 유출량은 세 모형에서 모두 약 ±30% 정도의 변화율을 보였다. Fig. 5는 강수량과 기온변화에 따른 각 모형별 연평균 유출량의 변화를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기온변화가 적은 경우에는 강수변화에 대해서 모형별 유출량의 변화에서 유사한 결과를 보였다. 그러나 기온 증가가 커질수록 모형별 결과에서 차이가 증가하는 것으로 나타났다. 특히 기온이 5°C 증가할 경우 PRMS 모형은

Table 2. Statistical Results of Three Models for Each Periods

Period		PRMS	SLURP	SWAT
Calibration	CORR-C	0.87	0.80	0.90
	RMSE(mm/day)	2.29	2.87	3.04
	ME	0.75	0.61	0.78
	VE(%)	-1.91	0.14	-3.61
Verification	CORR-C	0.84	0.80	0.85
	RMSE(mm/day)	2.50	2.74	2.32
	ME	0.69	0.63	0.72
	VE(%)	-6.16	-6.54	-9.48
Total	CORR-C	0.85	0.80	0.87
	RMSE(mm/day)	2.41	2.80	2.59
	ME	0.72	0.62	0.75
	VE(%)	-4.35	-3.69	-7.16

Correlation coefficient (CORR) = $SS_{os} / \sqrt{SS_o \times SS_s}$, $SS_{os} = \sum(O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})$, $SS_o = \sum(O_i - \bar{O})^2$, $SS_s = \sum(S_i - \bar{S})^2$

Root mean square error (RMSE) = $\sqrt{\sum(O_i - S_i)^2 / n}$, where n is a number of data.

Nash-Sutcliffe efficiency (ME) = $[\sum(O_i - \bar{O})^2 - \sum(O_i - S_i)^2] / \sum(O_i - \bar{O})^2$

Percent error in volume (VE) = $100 \times (\sum S_i - \sum O_i) / \sum O_i$
 where O is observed flow and S is simulated flow.

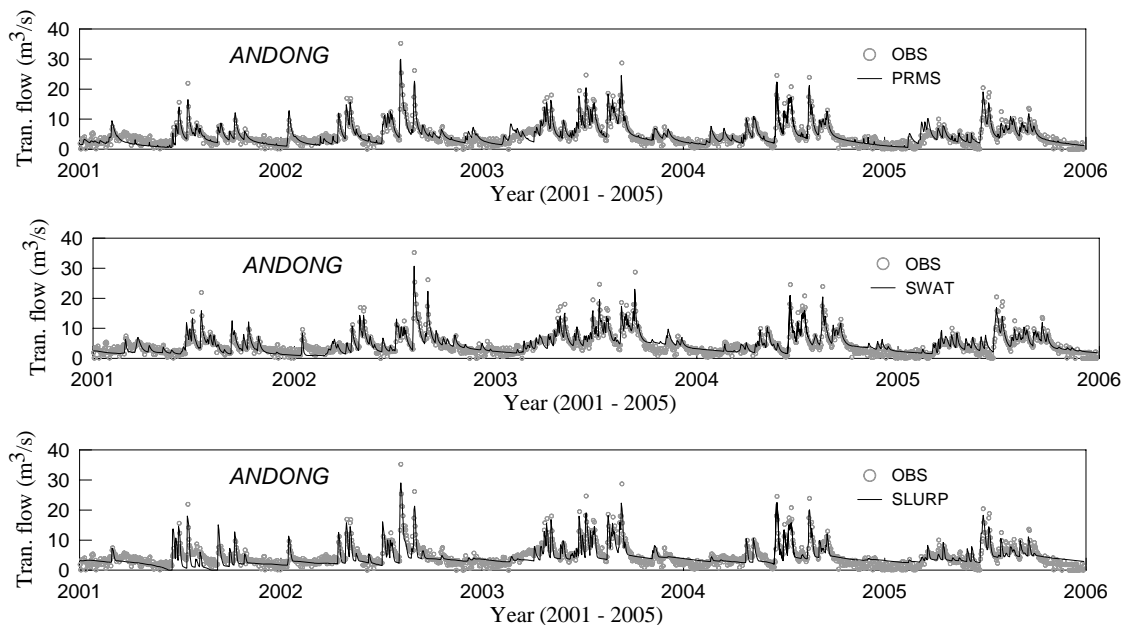


Fig. 2. Observed and Simulated Discharges for Each Models

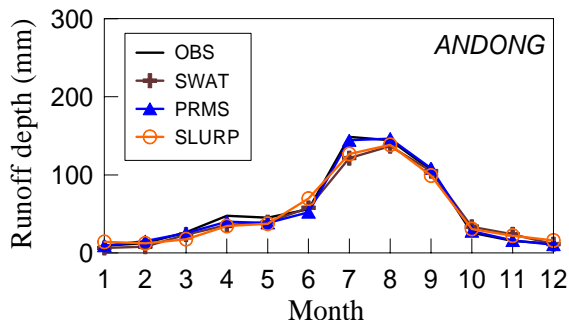


Fig. 3. Comparison of Monthly Mean Discharges for Each Models

SWAT, SLURP 모형 결과에 비해 약 10% 정도 연평균유량을 적게 모의하는 특징을 보였다. 또한, PRMS 모형 결과는 강수량과 기온이 증가할 경우에는 다른 모형들에 비해 유출량의 증가폭이 작았으며, 강수량이 감소하고 기온이 증가할 경우에는 다른 모형들에 비해 큰 감소를 나타내었다. 이로 인해 Fig. 4에서 보는 바와 같이 강수량이 +10% 변화하고, 기온이 5°C 증가된 상황에서 SWAT과 SLURP는 연평균유출량이 증가(+8~+9%)될 것으로 모의한 반면, PRMS 모형은 감소(-5%)할 것으로 모의하였다. 이 결과는 어떠한 모형을 적용

하는가에 따라 기후변화 영향평가지 연평균유출량의 변동성 평가에서 상이한 결과가 나타날 수도 있음을 보여 주고 있다.

Fig. 6은 강수량 변화시 기온 증가에 따른 실제증발산량의 변화량을 도시한 것이다. 기온이 증가함에 따라 모형별 증발산량의 변화 차이가 증가하는 것으로 나타났다. 특히 PRMS 모형의 증발산량 변화는 다른 모형에 비해 기온에 매우 민감하였으며, SLURP와 SWAT는 동일한 방법을 이용함에 따라 유사한 거동을 보였다. 본 연구에서는 SLURP 모형과 SWAT 모형의 잠재 증발산량 산정방법으로는 Penman-Monteith 방법 (Allen *et al.*, 1989)을 적용하였으며, PRMS 모형은 Hamon 방법(Hamon, 1961)을 적용하였다(Table 1). 동일한 잠재증발산량 산정방법을 적용한 SLURP와 SWAT는 모의결과가 유사하였으나 다른 방법을 적용한 PRMS 모형의 경우 큰 차이를 보였다. 이것은 유출 모형의 증발산량 산정방법에 따라서 기후변화로 인한 유출량의 변화를 평가할 경우 결과에서 큰 차이가 발생할 수도 있음을 보여준다.

Fig. 7은 기온 변화시 강수량 증가에 따른 실제증발산량의 변화량을 도시한 것이다. 기온이 증가함에 따라 SLURP 모형과 SWAT 모형도 실제 증발산량의 변화

에서 차이가 점차 커지는 것으로 나타났다. PRMS 모형은 강수량 증가에 대한 실제 증발산량의 변화율은 다른 모형의 변화율에 비해 완만하게 나타났으나, 동일한 강우증가율에서 기온 증가에 따른 변화율에서는 매우 민감한 것으로 나타났다. 결과적으로 적용 모형의 증발산량 산정 방법이 상이함으로 인해 모의된 증발산량과 유출량은 강수량과 기온의 변화에 대해 다른 거동을 보일 수도 있는 것으로 나타났다.

3.3 기온과 강수변화에 따른 모형별 월평균 결과 비교

본 연구에서는 강수량과 기온 변화에 따른 각 모형별 월평균 유출량과 실제 증발산량의 변화에 대해서도 분석하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 기온변화에 따라 강수량이 각각 +20% 증가와 -20% 감소 시나리오에 대한 모형별 모의결과를 제시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 월평균유출량의 변화에서는 연평균유출량 변화에 비해 모형별 차이가 큰 것으로 나타났다. 특히 갈수기인 12월, 1월, 2월에서는 모형별 결과에서 큰 차이를 보였다. 이것은 유출량이 적은 겨울철 기간의 변화량 분석에서는 모형별 결과 차이가 큼으로 인해 영향평가 결과의 불확실성이 커질 수 있다는 것을 보여준다. 이에

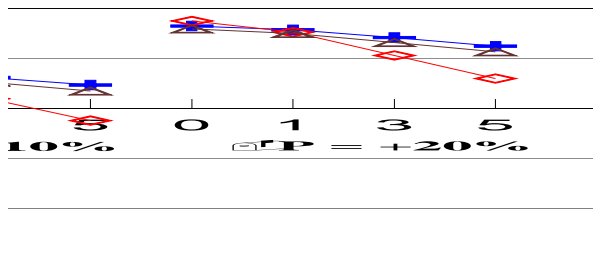


Fig. 4. Comparison of Mean Annual Changes in Runoff Response to Temperature Increases for a Given Precipitation Change

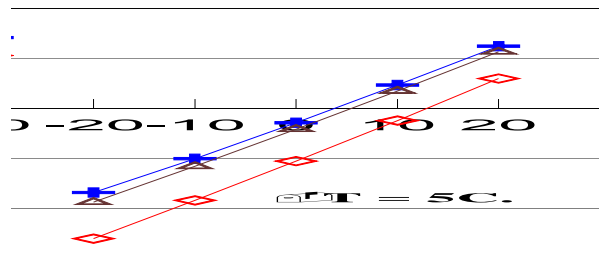


Fig. 5. Comparison of Mean Annual Changes in Runoff Response to Mean Annual Changes in Precipitation for a Given Temperature Change

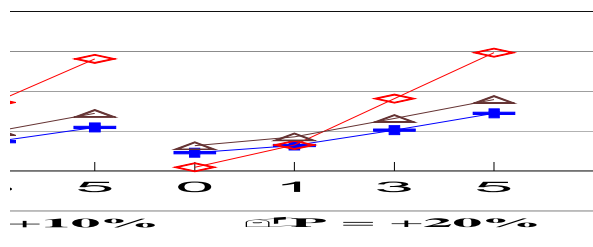


Fig. 6. Comparison of Mean Annual Changes in Evapotranspiration Response to Temperature Increases for a Given Precipitation Change

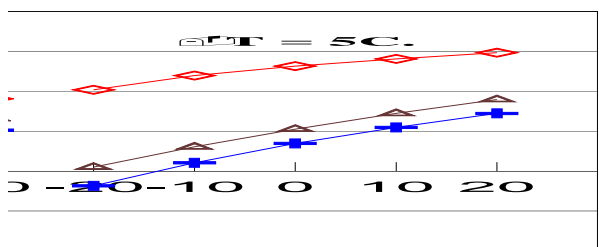


Fig. 7. Comparison of Mean Annual Changes in Evapotranspiration Response to Mean Annual Change in Precipitation for a Given Temperature Change

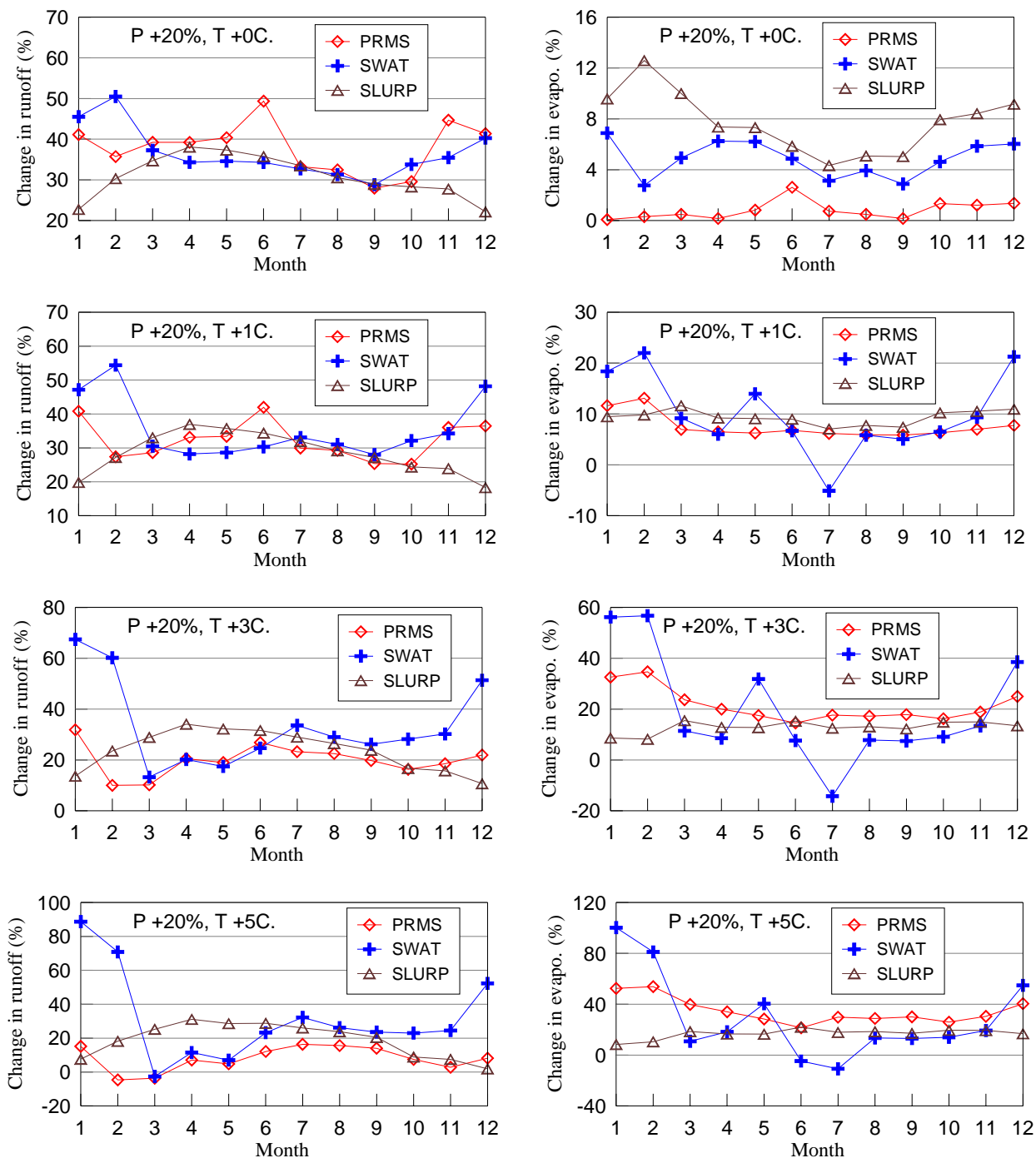


Fig. 8. Comparison of Mean Monthly Changes in Runoff Simulated by the Three Models for $\Delta P = +20\%$, $\Delta T = +1^\circ\text{C}$, $+3^\circ\text{C}$, $+5^\circ\text{C}$

비해 홍수기인 7월~9월의 경우에는 상대적으로 다른 기간에 비해 모형별 차이가 작았다. 12월, 1월, 2월의 경우에는 겨울철 기간으로 유출분석에서 용설이 중요한 부분으로 고려되게 된다. 따라서 모형별 용설모의 방법의 차이로 인해 겨울철 유출량 모의에서 차이가 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 기온이 3°C 까지 증가한 상황에서는 세 모형 모두 전체 월유출량의 변화에서 차

이가 있으나 유출량이 증가하는 경향은 동일하게 모의하였다. 그러나 기온이 5°C 증가한 상황에서는 2월과 3월 유출량처럼 모형에 따라서 경향이 반대로 나타날 수도 있음을 보여주고 있다. 강수량이 -20% 감소할 경우에는 모든 모형에서 동일한 감소경향을 보였다(Fig. 9). 그러나 기온변화가 커질수록 모형별 월별 변화량에서는 차이가 증가하는 것으로 나타났다. 특히 PRMS 모형의 경우 다른 두 모형에 비해 큰 감소를 보였다.

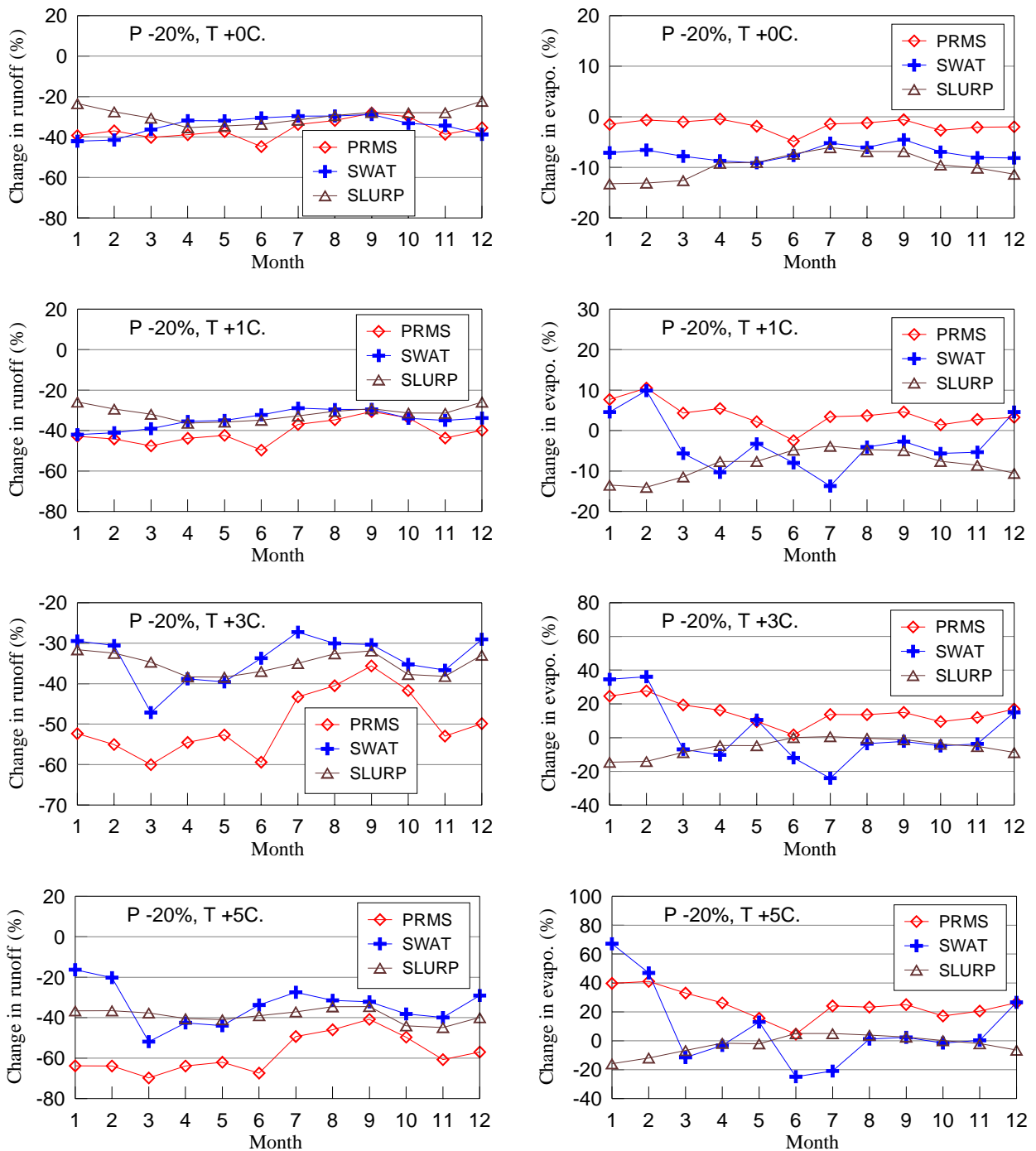


Fig. 9. Comparison of Mean Monthly Changes in Runoff Simulated by the Three Models for $\Delta P = -20\%$, $\Delta T = +1^\circ\text{C}$, $+3^\circ\text{C}$, $+5^\circ\text{C}$

결과적으로 강수량 감소와 기온증가에 따라 월평균 실제증발산량은 모형에 따라 변화량에서 차이가 큰 것으로 나타났다. 특징적인 것은 동일한 증발산량 산정방법을 적용한 SLURP 모형과 SWAT 모형에서도 월별 실제증발산량의 변화량에서는 차이를 보였다는 것이다. 이것은 모형의 용설이나 토양수분 등을 모의하는 알고리즘의 차이로 인한 것으로 판단된다.

4. 토 의

본 연구에서는 세 개의 준분포형 모형을 안동댐유역에 적용하여 기온과 강수 변화에 따른 모형별 결과를 비교하였다. 세 모형 모두 관측 강수량과 기상자료를 이용한 유출모의에서는 관측유량에 유사하게 모의하는 것으로 나타났다. 그러나 강수량과 기온의 변화를 고려할 경우 세 모형의 결과에서 상당한 차이가 발생하였다. 이러한 결과는 기존의 Boorman and Sefton(1997)

과 Jiang et al.(2007) 결과와 동일하였다. 특히 본 연구 결과에서는 강수량이 +10% 증가하고, 기온이 5°C 증가할 경우 적용모형에 따라서는 연평균 유출량이 증감이 반대로 제시할 수도 있음을 보였다. 이것은 월별 유출량에서도 유사한 결과가 나타났다. IPCC 보고서(IPCC, 2007)에서는 2100년경 기온이 최대 +6.4°C까지 증가할 것으로 전망하였는데, 이러한 상황에 대한 수자원 영향 평가를 수행할 경우 적용 유출모형에 따라서 영향평가 결과에는 상당한 불확실성이 발생할 것으로 판단된다. 따라서 영향평가에서 발생할 수 있는 불확실성의 영향을 확인하고, 최소화하기 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서 분석한 결과 모형별 결과의 차이는 모형별 잠재 및 실제 증발산량을 산정하는 방법의 차이로 인해 발생하는 것으로 나타났다. 특히 PRMS 모형에서 이용된 Hamon 방법은 다른 두 모형에서 이용한 Penman-Monteith 방법에 비해 기온변화에 민감도가 큰 것으로 나타났다. Penman-Monteith 방법은 잠재증발산량을 산정하기 위해 기온, 풍속, 상대습도, 태양복사량 또는 일조시간 등의 자료를 이용하는 데 비해, Hamon 방법은 기온자료만을 이용하여 잠재증발산량을 산정한다. 이로 인해 Hamon 방법이 Penman-Monteith 방법에 비해 기온변화에 민감한 것으로 사료된다. 동일한 잠재증발산량 산정방법을 적용한 SLURP와 SWAT 모형도 실제증발산량 변화에서는 다소 차이를 보였는데, 이것은 모형의 유출 물리과정과 토양층의 구성 등의 차이 때문으로 판단된다.

지금까지 다양한 유역 증발산량을 산정하는 방법들이 제시되었으나 아직까지 명확한 방법론이 제시되지 않은 상황이다. 또한, 온실가스의 변화를 고려하여 유역의 증발산량의 변화를 신뢰성 있게 모의하는 방법에 관한 연구도 미진한 실정이다. 따라서 지금의 기술수준에서는 어떠한 증발산량 산정방법이 기후변화 영향평가에 적합하다고 제시할 수 없는 실정이다. 또한, 어떤 모형을 적용하는 것이 유리한가라는 방법도 명확하지 않다. 이러한 문제는 기상분야의 기후모델을 이용한 기후전망에서도 제기되었다. 재현실험에서 관측값에 근접한 모의를 한 기후모델이 미래 기후변화 전망에서는 다른 모델에 비해 가장 큰 변화를 모의하기도 하였다(IPCC, 2001). 따라서 기상분야에서는 다양한 기후모델 결과를 앙상블(ensemble) 기법을 적용하여 기후를 전망하고 있다(Giorgi and Mearns, 2002). 수자원 영향평가에서도 이러한 불확실성을 줄이기 위해서는 다양한 유출모형을 적용하여 기후변화 영향을 평가하는 Multi-model ensemble 기법 등의 활용이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 유출모형에 따라서 기후변화 수자원 영향평가 결과에서 나타나는 차이를 분석하고자 하였다. 이를 위해 준분포형 모형인 PRMS, SLURP, SWAT 모형을 안동댐유역에 적용하여 매개변수를 검·보정하였다. 그 다음 이들 세 모형에 강수(±10%, ±20%)와 기온 변화(0°C, 1°C, 3°C, 5°C)를 고려한 합성 시나리오를 적용하여 유출 모의 결과를 비교하였다. 본 연구의 주요결과는 다음과 같다.

- 1) 세 모형 모두 관측자료를 이용한 분석에서는 관측값에 근접한 모의능력을 나타내었다. 결과적으로 관측자료기간에 대해서는 세 모형 모두 유사한 모의결과를 보였다.
- 2) 기온 변화가 없이 강수량만 변화할 경우에는 세 모형은 유사한 결과를 모의하였다. 그러나 기온 변화를 고려함에 따라 모형별 유출모의 결과에서 차이가 발생하였다.
- 3) 강수량이 +10% 증가하고, 기온이 5°C 증가할 경우 연평균유출량 모의에서 PRMS 모형은 감소할 것으로 모의한 반면, 나머지 두 모형은 증가할 것으로 모의하였다. 따라서 기온 증가가 큰 상황에서는 어떠한 모형을 적용하는가에 따라 연평균유출량의 증감에서 상이한 결과가 나타날 수 있음을 보여주었다.
- 4) 모형별 연평균유출량 결과의 차이는 증발산량을 산정하는 방법에 따른 영향이 가장 큰 것으로 분석되었다. 특히 PRMS 모형에서 적용되는 Hamon 방법은 기온변화에 대해 민감도가 Penman-Monteith 방법에 비해 큰 것으로 분석되었다.
- 5) 월평균유출량 모의에서는 연평균유출량에 비해 모형에 따라 차이가 큰 것으로 나타났다. 특히 유출량이 적은 12-2월 기간에서는 모형별 결과에서 가장 큰 차이를 보였으며, 상대적으로 유량이 큰 7-9월 기간에서는 차이가 적게 나타났다.

기후변화가 점점 가속화될 것으로 예상됨에 따라 이로 인한 피해를 최소화하기 위해서는, 신뢰성 있는 영향평가를 통해 대응책을 마련하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 수자원 영향평가 결과의 불확실성을 명확히 하고, 이를 최소화하기 위한 연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다. 특히 수자원 영향평가를 위한 명확한 증발산량 산정방법이나 유출모형이 제시되지 않은 현 시점에서는 다양한 모형을 적용하여 결과에서 나타나는 불확실성을 통계적으로 제시하는 Multi-model ensemble 기법의 적용이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(1-9-3)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- 김남원, 이병주, 이정은 (2006). "SWAT 모형을 이용한 충주댐 유역의 용설영향 평가." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제10호, pp. 833-844.
- 김병식, 김형수, 서병하, 김남원 (2004). "기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제2호, pp. 185-193.
- 배덕효, 정일원, 이병주 (2007). "A2 시나리오에 따른 국내 수자원의 변동성 전망." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제12호, pp. 921-930.
- 신사철 (2000). "기후변화 시나리오에 의한 하천 유황의 해석." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제5호, pp. 623-634.
- 신현식, 강두기, 김상단 (2007). "낙동강유역 SWAT 모형 구축 및 물수지 시나리오에 따른 유황분석." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 251-263.
- 임혁진, 권형중, 배덕효, 김성준 (2006). "CA-Markov 기법을 이용한 기후변화에 따른 소양강댐 유역의 수문분석." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제5호, pp. 453-466.
- 정일원, 배덕효 (2005). "국내유역에서의 PRMS 모형의 적용성에 관한 연구." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제9호, pp. 713-725.
- 정일원, 배덕효, 임은순 (2007). "수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(II): 유역별 유출시나리오 구축." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 205-214.
- 황준식, 정대일, 이재경, 김영오 (2007). "기후변화 영향평가를 위한 월 물수지모형의 적용성 검토." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제2권, pp. 147-158.
- Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L., and Burman, R.D. (1989). "Operational estimates of evapotranspiration." *Agronomy Journal*. Vol. 81, pp. 650-662.
- Arnell, N.W. (1995). *Scenarios for hydrological climate change impact studies*. In: Oliver, H.R., and Oliver, S.A. (Eds.), *The Role of Water and the Hydrological Cycle in Global Change*. Springer, Berlin, pp. 389-408.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bemhardt, G. (1993). "A comprehensive surface-groundwater flow model," *Journal of Hydrology*, Vol. 142, pp. 47-69.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Chang, H. (2008). "Potential changes in Korean water resources estimated by high-resolution climate simulation," *Climate Research*, Vol. 35, pp. 213-226.
- Boorman, D.B., and Sefton, C.E. (1997). "Recognizing the uncertainty in the quantification of the effects of climate change on hydrological response." *Climatic Change*, Vol. 35, pp. 415-434.
- Burlando, P., and Rosso, R. (2002). "Effects of transient climate change on basin hydrology. 2. Impacts on runoff variability in the Arno River, central Italy." *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 1177-1199.
- Dagnachew, L., Christine, V.C., and Francoise, G. (2003). "Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in tropical Africa : Case study south central Ethiopia," *Journal of Hydrology*, Vol. 275, pp. 67-85.
- Fowler, H.J., Blenkinsop, S., and Tebaldi, C. (2007) "Review linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling," *International Journal of Climatology*, Vol. 27, pp. 1547-1578.
- Giorgi, F., and Mearns, L.O. (2002). "Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the Reliability Ensemble Average (REA) method," *Journal of Climate*, Vol. 15, pp. 1141-1158.
- Hamon, W.R. (1961). "Estimating potential evapotranspiration", *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 87, No. HY3, pp. 107-120.
- Hogue, T.S., Sorooshian, S., Gupta, V.K., Holz, A., and Braatz, D. (2000). "A multistep automatic calibration scheme for river forecasting models", *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 1, pp. 524-542.
- IPCC (2001). *Climate change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Contribution of*

- Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- IPCC (2007). *Climate change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- 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*, Vol. 42, No. 4, pp. 997-1016.
- Jiang, T., Chen, Y.D., Xu, C., Chen, X., Chen, X., and Singh, V.P. (2007) "Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China," *Journal of Hydrology*, Vol. 336, pp. 316-333.
- Kite, G.W. (1993). "Application of a land class hydrological model to climatic change," *Water Resources Research*, Vol. 29., No. 7, pp. 2377-2384.
- Kite, G.W., and Haberlant, U. (1999). "Atmospheric model data for macroscale hydrology," *Journal of Hydrology*, Vol. 217, pp. 303-313.
- Kite, G.W., Dalton, A., and Dion, K. (1994). "Simulation of streamflow in a macroscale watershed using general circulation model data," *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 5, pp. 1547-1559.
- Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M., and Saindon, L.G. (1983). *Precipitation-Runoff Modeling System, User's manual*, Water-Resources Investigations, pp. 83-4238.
- Limaye, A.S., Boyington, T.M., Cruise, J.F., Bulusu, A., and Brown, E. (2001). "Macroscale hydrologic modeling for regional climate assessment studies in the Southeastern United States," *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 37, No. 3, pp. 709-722.
- Pandey, G.R., Gayan, D.R., Dettinger, M.D., and Georgakakos, K.P. (2000). "A hybrid orographic plus statistical model for downscaling daily precipitation in Northern California," *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 1, pp. 491-506.
- Sabourin, J.F. (1996). "Implementation of a distributed hydrologic model: Using SLURP on the Carp watershed." CCRS, Ottawa., 43pp.
- Xu, C.Y., and Singh, V.P. (2004). "Review on regional water resources assessment under stationary and changing climate." *Water Resources Management*, Vol. 18, No. 6, pp. 591-612.

(논문번호:08-47/접수:2008.04.02/심사완료:2008.07.07)