

CGCM의 미래 기후 정보를 이용한 기후변화가 낙동강 유역 유황에 미치는 영향분석

김문성 · 고익환* · 김상단†

부경대학교 환경시스템공학부

*한국수자원공사 수자원연구소

An Analysis of the Effect of Climate Change on Nakdong River Flow Condition using CGCM's Future Climate Information

Munsung Keem · Ikwhan Ko* · Sangdan Kim†

Department of Environmental System Engineering, Pukyong National University

*Water Research Center, Korea Water Resources Corporation

(Received 20 June 2009, Revised 10 September 2009, Accepted 17 September 2009)

Abstract

For the assessment of climate change impacts on river flow condition, CGCM 3.1 T63 is selected as future climate information. The projections come from CGCM used to simulate the GHG emission scenario known as A2. Air temperature and precipitation information from the GCM simulations are converted to regional scale data using the statistical downscaling method known as MSPG. Downscaled climate data from GCM are then used as the input data for the modified TANK model to generate regional runoff estimates for 44 river locations in Nakdong river basin. Climate change is expected to reduce the reliability of water supplies in the period of 2021~2030. In the period of 2051~2060, stream flow is expected to be reduced in spring season and increased in summer season. However, it should be noted that there are a lot of uncertainties in such multiple-step analysis used to convert climate information from GCM-based future climate projections into hydrologic information.

keywords : Climate change, Climate projection downscaling, Nakdong river basin, Stream flow, Precipitation

1. 서론

물환경 자원의 계획과 관리에 종사하는 전문가에게 직면한 도전과제들 중 하나는 물환경 자원의 계획과 관리의 의사결정과정에서 어떻게 기후변화의 영향을 고려할 것인가 일 것이다. 기온 상승과 강수패턴의 변화로 야기되는 미래 하천유량의 불확실성은 하천유량의 자연적인 변동성에 덧붙여져 문제를 더욱 복잡하게 만들고 있다(California Climate Change Center, 2009). 1,300만 이상의 낙동강 유역 주민들은 결과적으로 4개의 다목적 댐으로부터 직접적으로 또는 간접적으로 필요한 용수를 공급받고 있다. 직접적으로는 댐 으로부터 직접 취수한 물을 공급받기도 하며, 하류지역의 경우 갈수기 시에는 댐 방류량으로부터 공급된 본류의 유량으로부터 취수한 물을 공급받기도 한다. 낙동강수계관리 위원회(2007)에 따르면 낙동강 유역 하류의 경우 갈수기 시에 상류 댐으로부터 방류된 수량이 전체 본류 유량의 60% 이상인 것으로 보고되고 있다.

낙동강 유역의 이와 같은 물환경 자원의 현황을 고려할 때, 기후변화에 따른 물환경 자원의 영향을 살펴보기 위해

서는 상류 주요 4개댐(안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐)의 기후변화에 따른 유입량 변화와 낙동강 본류 유량의 변화에 대한 분석이 수행되어야 할 것이다. 일반적으로 물환경 자원에 대한 기후변화의 영향을 분석할 때 가장 중요한 것은 미래의 기후정보를 어떻게 확보할 수 있을 것인가 일 것이다. 현재까지의 세계적인 추세는 이에 대한 해답을 GCMs (General Circulation Models)에서 찾고자 하고 있다. 그러나 GCMs는 지구를 보통 3°내외의 격자단위로 나누어 모의를 하고 있으며, 한반도 전체가 서너 개의 격자로 표현되기 때문에, 물환경 자원에 대한 계획 수립 시 일상적으로 접하고 있는 유역의 공간적 범위와는 많은 차이가 있어 이의 직접적인 사용이 곤란하다는 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점을 극복하고자 GCMs의 결과를 공간적으로 축소하기 위한 지역 상세화기법(downscaling)이 전 세계적으로 많은 연구자들에 의해 개발되어 왔으며(Giorgi and Mearns, 1991; Wilby and Wigley, 1997), 본 연구에서 적용한 다지점 일강수 발생기(Multi-Site daily Precipitation Generator, MSPG) 또한 통계학적 지역 상세화기법 중의 하나라고 할 수 있다(김문성 등, 2008).

이러한 지역 상세화기법을 기반으로 세계 각국은 자국의 물환경 자원에 대한 기후변화의 영향을 다양한 각도로 분석하고 있으며(Jha et al., 2006; Najjar, 1999; Rosenberg et

† To whom correspondence should be addressed.

skim@pknu.ac.kr

al., 2003; Stone et al., 2003; Stonefelt et al., 2000; Varanou et al., 2002), 국내에서도 기후변화와 관련된 연구가 최근 활발히 진행되고 있다(경민수 등, 2009; 김병식 등, 2004; 김보경과 김병식, 2009; 김용태 등, 2004; 신사철, 2000; 안소라 등, 2008; 안재현 등, 2001a, 2001b; 오재호와 홍성길, 1995; 이용준 등, 2008a, 2008b; 임은순 등, 2006; 임혁진 등, 2006; 황준식 등, 2007). 그러나 국내의 경우 적절한 지역 상세화기법으로부터 도출된 자료를 확보하는데 어려움이 있어서 보다 다양한 연구가 이루어지고 있지는 못한 실정이다. 또한 GCMs으로부터 지역 상세화기법으로 도출된 지역기후 상세자료들을 확보하였다 할지라도 도출된 미래기후자료들 사이의 공간적인 상관성(특히, 강수의 경우)이 올바르게 재현되고 있지 못하기 때문에 기후자료의 공간적 상관성이 매우 중요한 의미를 가지게 되는 대유역 단위에서 물환경 자원의 기후변화에 대한 영향평가가 이루어지지 못하고, 기후자료의 공간적 균질성이 상대적으로 중요한 의미를 갖지 않는 소유역 단위에서의 영향평가가 수행되어 오고 있는 실정이다. 그러나 상기 언급한 바와 같이 우리나라 물환경 자원의 관리 및 이용 특성을 고려할 때, 한강, 낙동강, 금강과 같은 대형하천의 본류유량에 대한 기후변화의 영향을 살펴보지 못한다면 근본적인 적응대책의 수립에 한계를 가질 수밖에 없을 것이다.

이에 본 연구에서는 캐나다에서 개발된 CGCM을 김문성 등(2008)에 의해 개발된 MSPG에 의해 지역 상세화 시킨 기후자료를 바탕으로 기후변화가 낙동강 본류 하천유량에 미치는 영향에 대하여 분석을 실시하고자 한다. 본 연구에서 주요하게 사용된 모형의 목록과 이를 통한 분석절차를 정리하면 아래와 같다.

사용된 모형의 목록:

- 기후모형의 적용: CGCM 3.1 T63 A2 기후변화 시나리오(www.cccma.ec.gc.ca)
- 지역상세화 기법: MSPG(김문성 등, 2008)
- 강우-유출모형: 수정 TANK 모형(김재철과 김상단, 2007)

분석절차:

- CGCM3.1T63-MSPG를 이용한 현재 강수량 재현 검증
- 강우-유출모형의 보정 및 검증
- 모의된 현재기후자료를 이용한 하천유량과 관측된 현재기후자료로부터 도출된 하천유량과의 비교 검증
- 미래기후조건에서의 강수량 및 실제증발산량 모의
- 미래 강수량 및 실제증발산량 조건에서의 하천유출량 모의

2. 연구방법

2.1. GCM

본 연구에서 사용된 GCM은 Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis(2008)의 세 번째 GCM인 CGCM3로서 이전에 개발된 CGCM2에서 적용된 것과 같은 동일한 해양관련 프로세스를 이용하지만, 보다 확연하게 개선된 대기관련 프로세스가 적용된다. CGCM3.1 버전은 두 가지 해상도에서 실행되는데, T47은 지표면의 경우 경위도 $3.75^\circ \times$

3.75° 의 수평적 해상도와 수직적으로는 31개 층으로 구성되어 있으며 해양의 경우 경위도 $1.85^\circ \times 1.85^\circ$ 의 수평적 해상도와 수직적으로는 29개 층으로 구성되어있는 반면에, 본 연구에 적용된 T63은 지표면의 경우 경위도 $2.81^\circ \times 2.81^\circ$ 의 수평적 해상도와 수직적으로는 31개 층으로 구성되어있으며 해양의 경우 경위도 $1.4^\circ \times 0.94^\circ$ 의 수평적 해상도로 구성되어있다. CGCM3의 한반도 예측결과를 살펴보면, A2

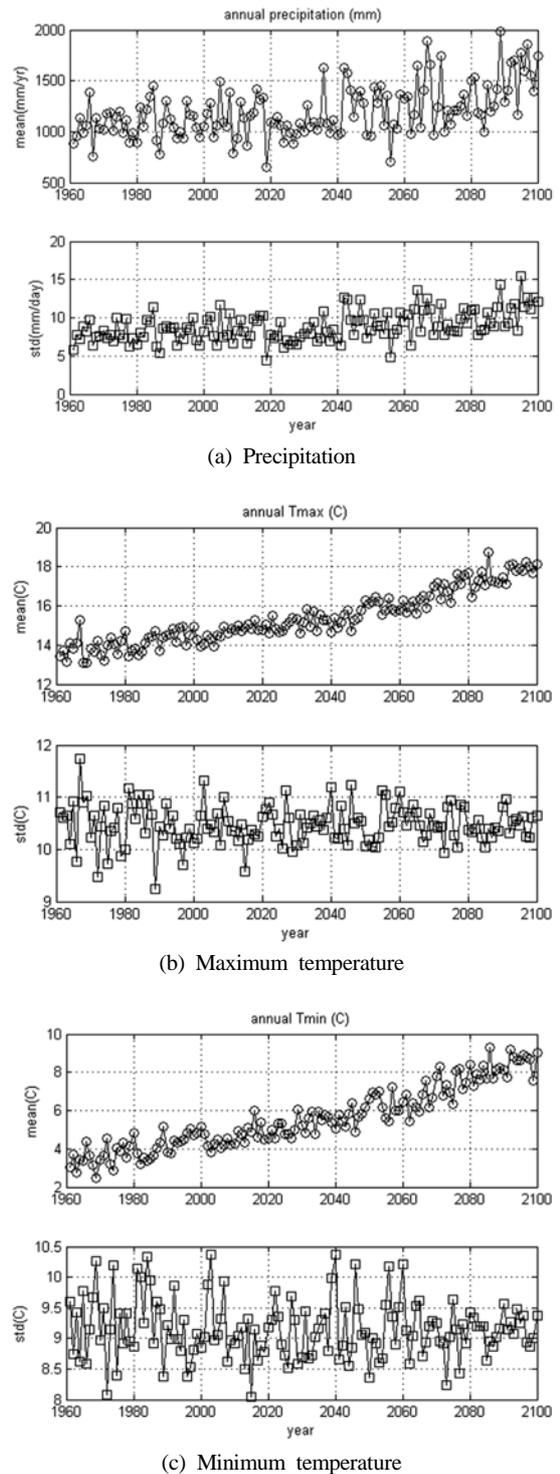


Fig. 1. Yearly precipitation and temperature projection from CGCM3.1 T63 A2 scenario.

시나리오의 경우 일 최대 기온은 21세기 말에 약 4°C 정도 상승하고 일 최소 기온은 약 3.5°C 정도 상승하는 것으로 예측되고 있으며 연 강수 총량의 경우에는 30% 이상 상승할 것으로 예측되고 있다(Fig. 1).

CGCM3에 의해 예측된 강수량의 신뢰성을 검토하기 위하여 CGCM3에 의해 모의된 현재(1981~2000년) 강수량 모의 값과 낙동강 유역 평균 강수량과의 비교를 수행한 결과 우리나라에서 이 기간 발생한 주요 가뭄사상인 1994~1995년의 가뭄을 제대로 모의하고 있지 못함을 확인하였으며, 연강우량의 전반적인 추세 또한 적절하게 재현하고 있지 못함을 알 수 있다(Fig. 2).

2.2. 지역 상세화 기법

본 연구에서 적용한 지역상세화 기법은 김문성 등(2008)에 의해 개발된 다지점 일 강수 발생모형(Multi-Site Precipitation Generator, MSPG)으로 기후변화 시나리오에 따른 공간적인 강수장을 보다 현실성 있게 모의하면서도 계산에 걸리는 부하가 비교적 작아 적용성을 높일 수 있는 장점을 가지고 있다. 보다 상세한 사항은 김문성 등(2008)을 참조할 수 있다. 기상청 산하 낙동강 유역의 19개 지점 강수 관측망 자료를 MSPG에 적용하여 모의한 결과, 강수량, 무강수일 확률 등은 매우 우수하게 현재의 강수장을 잘 나타내고 있으나, 표준편차는 다소 과다하게 모의되고 있으며, 공간적 상관관계는 현재의 강수장과 비교할 때 지점들 사이의 상관성이 다소 적게 모의되고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 3).

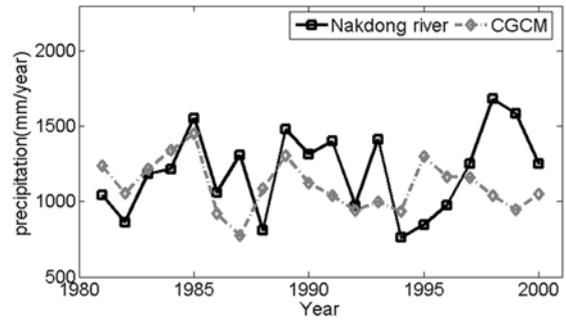


Fig. 2. Comparison of historical and GCM-based yearly precipitation for the Nakdong river basin for 1981~2000.

2.3. 강우-유출 모형

본 연구에서 적용한 강우-유출모형은 김재철과 김상단(2007)에 의해 개발된 수정 TANK 모형으로 기존의 TANK 모형에 하도추적기능을 추가하여 대유역의 유출모의에 적용이 용이한 장점을 가지고 있다. 보다 상세한 사항은 김재철과 김상단(2007)을 참조할 수 있다. 낙동강 유역을 총 44개 소유역으로 분할하여(Fig. 4) 오염총량관리 단위유역 말단부에서 2004년부터 8일 간격으로 측정된 유량자료와 상류 4개 댐(안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐)의 유입량 및 방류량 자료, 소유역별 취수량 및 방류량 자료, 19개 기상청 관측소의 강수 및 기온자료 등을 이용하여 수정 TANK 모형의 매개변수를 추정하였다(Fig. 5). 참고로 본 연구에서는 수정 TANK 모형에 실제증발산량을 직접 입력하기보다는 Penman 방법을

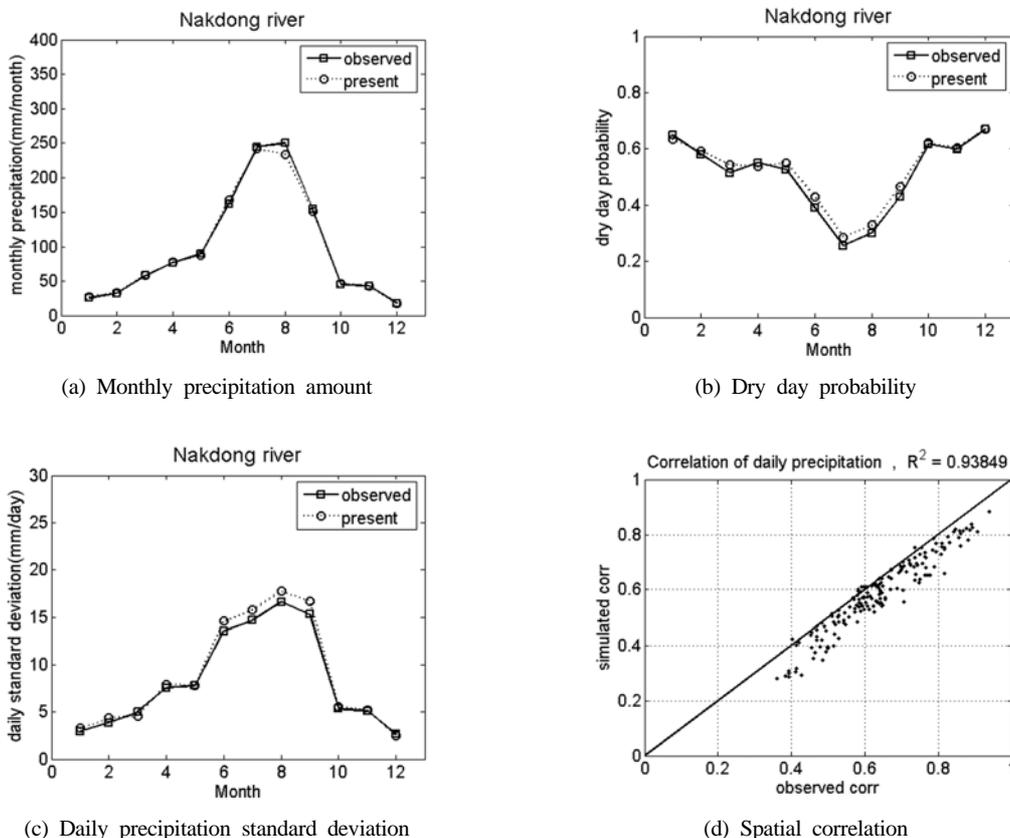


Fig. 3. Comparison of historical and MSPG monthly precipitation.

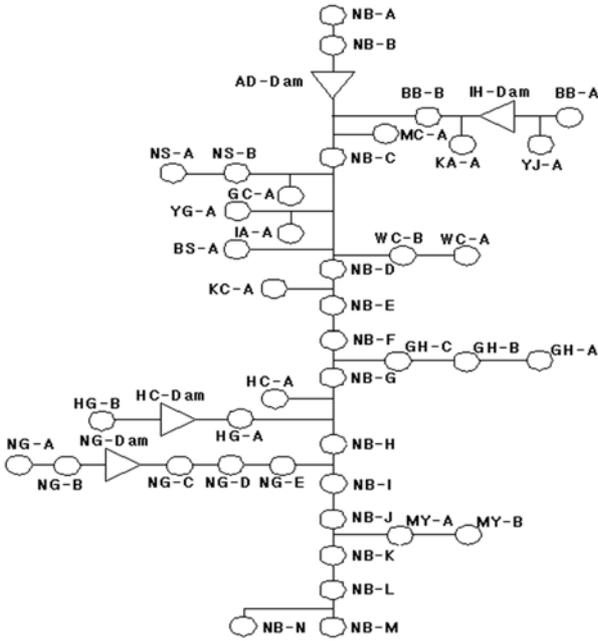


Fig. 4. Subdivision of Nakdong rive basin for modified TANK model.

통하여 일별 잠재증발산량(PET)을 추정된 후, 아래와 같은 식 (1)~(5)를 통하여 유역 내 실제증발산량을 추정하고자 하였다. 이는 일반적으로 보면 물수지법에 의하여 유역의 실제증발산량을 산정한 방법이라 볼 수 있다.

$$E_1(t) = (1 - e^{-\alpha h_1(t-1)}) \cdot PET(t) \tag{1}$$

$$E_2(t) = (1 - e^{-\alpha h_2(t-1)}) \cdot (PET(t) - E_1(t)) \tag{2}$$

$$E_3(t) = (1 - e^{-\alpha h_3(t-1)}) \cdot (PET(t) - E_1(t) - E_2(t)) \tag{3}$$

$$E_4(t) = (1 - e^{-\alpha h_4(t-1)}) \cdot (PET(t) - E_1(t) - E_2(t) - E_3(t)) \tag{4}$$

$$AET(t) = E_1(t) + E_2(t) + E_3(t) + E_4(t) \tag{5}$$

여기서, $PET(t)$ 는 t 일의 잠재증발산량(mm/day), α 는 모

형 매개변수, $h_i(t)$ 는 t 일의 i 번째 TANK의 깊이(mm), E_i 는 t 일의 i 번째 TANK의 실제증발산량(mm/day), $AET(t)$ 는 t 일의 실제증발산량(mm/day)이다.

3. 연구결과

3.1. 현재조건 자연유량 모의결과

현재 많은 연구에서 미래 기후시나리오를 예측하기 위하여 GCMs의 기후 정보에 의존하고 있다. 하지만 GCM 역시 미래 기후 예측에 있어서 많은 불확실성을 내포하고 있으며 본 연구와 같이 GCM 기후 정보로부터 지역 상세화 기법을 통한 세부적인 기후시나리오를 도출하는 경우 그 불확실성이 가중된다고 할 수 있다. 특히 미래 유황의 경우 이러한 기후 요소의 변동뿐만 아니라 인간 활동 변화에 의한 인위적 요소 또한 영향을 미치기 때문에 불확실성이 더욱 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 현재 주어진 한계 내에서 미래 유황모의의 불확실성을 보다 감소시키고 기후변화의 영향으로 인한 잠재적 유황 변동성을 평가하기 위하여 자연유량 개념을 도입하여 분석을 실시하였다. 여기서 자연유량이란 현재 유역의 수문조건하에 다목적 댐의 방류량과 유역의 물이용을 배제하였을 때의 유량으로 정의된다(김재철과 김상단, 2007). 기후변화의 영향을 분석하기에 앞서 MSPG로부터 모의된 강수장과 관측 강수장을 상기 기술한 수정 TANK 모형에 입력하여 자연유량을 모의·비교하였으며 이로부터 MSPG 모의 강수장의 현재 낙동강 유량 재현에 대한 적절성을 판단하였다. 모의된 강수장으로부터 도출된 자연유량(present)과 관측된 강수장으로부터 도출된 자연유량(observed)을 월유량을 기준으로 비교한 결과 중 일부를 Fig. 6에 나타내었다. 월 유량 모의 결과 댐 유입량과 낙동강 본류 모두 양호하게 현재 유량을 재현하고 있는 것으로 나타남에 따라 유량의 계절성은 우수하게 재현되고 있는 것으로 분석되었다.

Fig. 7은 유황곡선의 비교결과를 나타내고 있다. 전체적으로는 현재의 유황을 잘 모의하는 것으로 나타났으나 풍수기 이상의 고유량 상태일 경우 관측 유황보다 다소 작게 모의되고 있으며, 저수기 이후 저유량 상태일 경우 관측

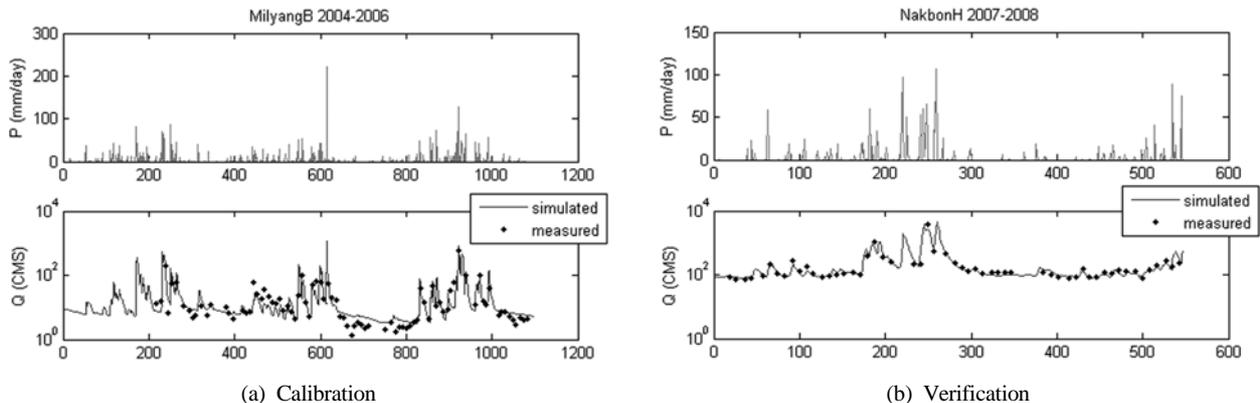
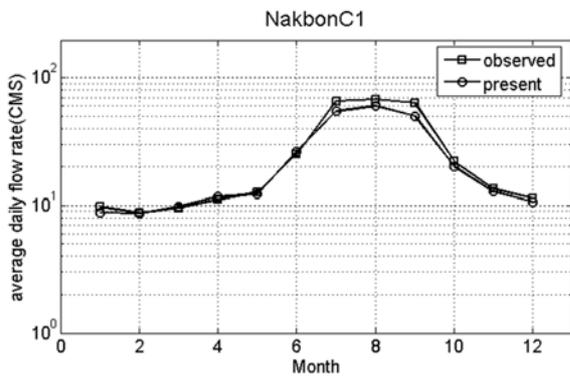
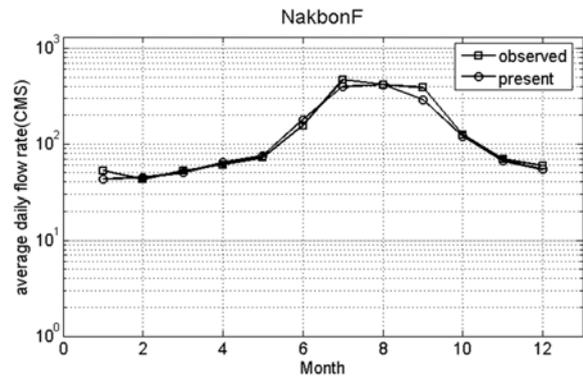


Fig. 5. Model parameters estimation.



(a) Andong Dam inflow



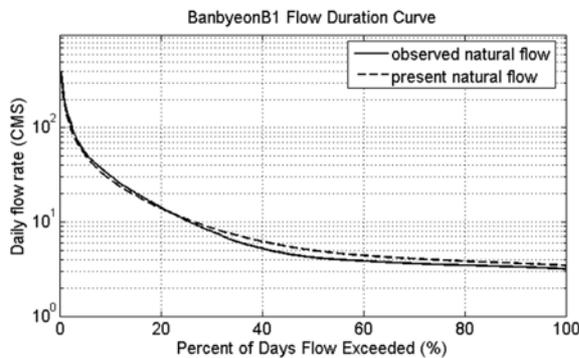
(b) Nakbon F

Fig. 6. Natural and GCM-based monthly flow for 1981~2000.

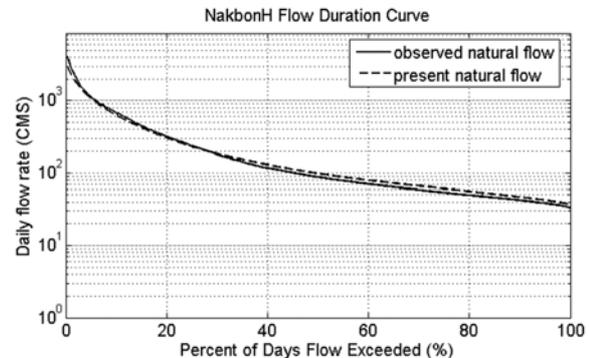
유황보다 다소 크게 모의되고 있음을 알 수 있었다. 이는 MSPG에 의해 모의된 강수장의 공간적 상관성이 완벽하게 현재의 강수장을 재현하고 있지 못하고 있기 때문이다. 따라서 하천유량이 매우 많은 홍수상황이나 하천유량이 매우 적은 가뭄상황에 대한 기후변화에 대한 영향평가를 위해서는 이러한 일정한 방향으로의 오차를 보정할 수 있는 기법 마련이 필요한 것으로 판단된다.

연 최대 일 유량 시계열의 비교 결과 상대적으로 유역면적이 작은 유역의 경우(Fig. 8(a)의 합천댐 유역)에는 현재

의 연 최대 일 유량 패턴을 잘 재현하고 있으나, 유역면적이 커질 수록 연 최대 일유량의 패턴을 재현하는데 역부족인 것으로 분석되었다. 이 또한 강수장의 지역상세화 과정에서 강수의 공간적인 상관성을 어느 정도까지 재현할 수 있는가의 문제로 귀결된다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 적용된 기법은 유역 면적이 작을 경우 일 최대 유량에 대한 영향 평가가 가능할 것으로 평가되나, 보다 정밀한 치수관련 영향평가를 위해서는 추가적인 기법이 도입될 필요가 있을 것으로 판단된다.

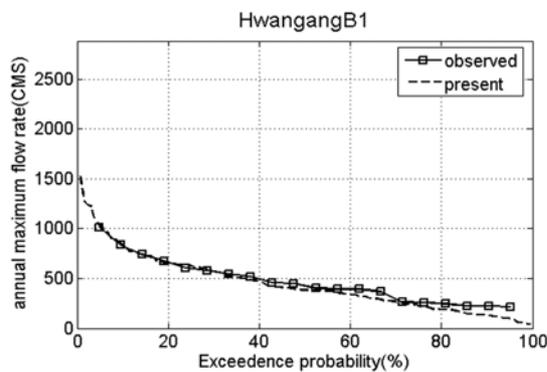


(a) Imha Dam inflow

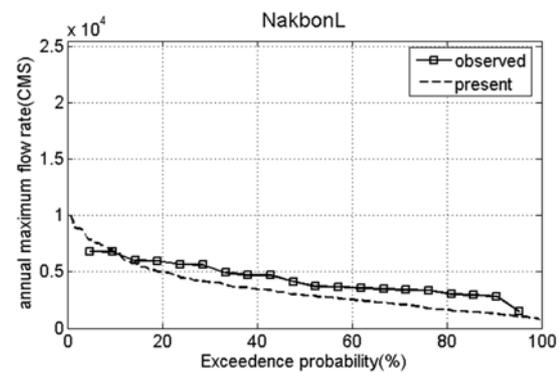


(b) Nakbon H

Fig. 7. Natural and GCM-based flow duration curve for 1981~2000.



(a) Habcheon Dam inflow



(b) Nakbon L

Fig. 8. Natural and GCM-based yearly maximum daily flow for 1981~2000.

3.2. 미래 수문기상자료 모의결과

본 연구에서는 CGCM3.1 T63의 A2 기후변화 시나리오를 적용하여 2021~2030년(future 1)과 2051~2060년(future 2)의 두 기간의 미래를 모의대상기간으로 설정하였다. 본 절에서는 상기 대상기간에 해당하는 GCM 미래 예측자료로부터 통계학적 축소기법인 MSPG를 이용하여 지점별 미래 일강수 시계열을 작성하였으며, 일 최대기온과 일 최소기온은 GCM 미래 예측자료에 근거하여 현재의 일 최대기온과 일 최소기온에 GCM에서 모의된 편차를 더하여 주는 방법으로 현재 월평균 값을 수정하여 사용하였다.

예측된 일 최대·최소 기온을 토대로 상대습도, 일조시간, 풍속은 현재와 동일함을 가정하여 Penman 방법을 통해 지점별 월평균 잠재증발산량을 산정한 후 식 (1)~(5)를 이용하여 실제증발산량을 산정하였다. 강수량과 실제증발산량 모의 결과 중 일부를 Fig. 9에 나타내었다. 여기서, present는 1981년부터 2000년까지의 현재기후자료, future1은 2021년부터 2030년까지의 미래기후자료, future2는 2051년부터 2060년까지의 미래기후자료이다.

월 강수량 모의 결과 2021~2030년의 경우 전반적으로 현재보다 적은 강수량을 보일 것으로 예측되었으며, 특히 여름철 강수량이 비교적 큰 폭으로 감소되는 것으로 예측되었다. 2051~2060년의 경우 봄철에는 현재보다 적은 강수량을, 여름철에는 현재보다 많은 강수량을 보일 것으로 나타났다. 특히, 2021~2030년의 경우 여름철 강수량의 표준편차가 현재보다 작게 나타나는 것으로 보아 여름철 강수

량의 감소패턴이 뚜렷해질 것으로 예상되며 2051~2060년의 경우 여름철 강수량의 변동성이 증가할 것으로 예측되어 집중 호우가 보다 더 빈번해질 가능성이 클 것으로 분석되었다. 월 실제증발산량 모의 결과, 2021~2030년과 2051~2060년 모두 기온 증가의 영향을 받아 현재보다 월평균 잠재증발산량은 증가하였으나, 유역 내의 실제 수분 공급량인 강수량의 변동에 영향을 받아 실제증발산량이 현재에 비하여 2021~2030년에는 다소 감소할 것으로, 2051~2060년에는 증가할 것으로 예측되었다.

3.3. 미래 하천유량 모의결과

앞 절에서 모의된 미래 수문기상자료를 수정 TANK모형의 입력 자료로 하여 2021~2030년과 2051~2060년에 대한 미래 하천유량모의를 실시하였으며, 이를 통하여 낙동강 유역의 물환경 자원에 대한 기후변화의 영향을 개략적으로 평가하고자 하였다. 먼저 전체적인 유량 변동성을 평가하기 위하여 모의된 일 단위 유량 자료를 바탕으로 월 평균 유량 및 유황 분석을 실시하였다. Fig. 10과 11은 이러한 분석결과 중 월 평균 유량 및 유황분석에 대한 결과를 각각 보여주고 있으며, Table 1과 Table 2에 4대 유황 모의결과와 TANK 모형의 오차 및 편차 수준을 나타내었다.

여기서 present의 경우 관측유량에 대한 오차수준을 나타내며, future1과 future2는 present에 대한 편차수준을 나타낸다. 낙동강 유역의 44개 단위유역 분석 결과 전반적으로 2021~2030년의 경우 봄철과 여름철의 월 평균 유량이 다소

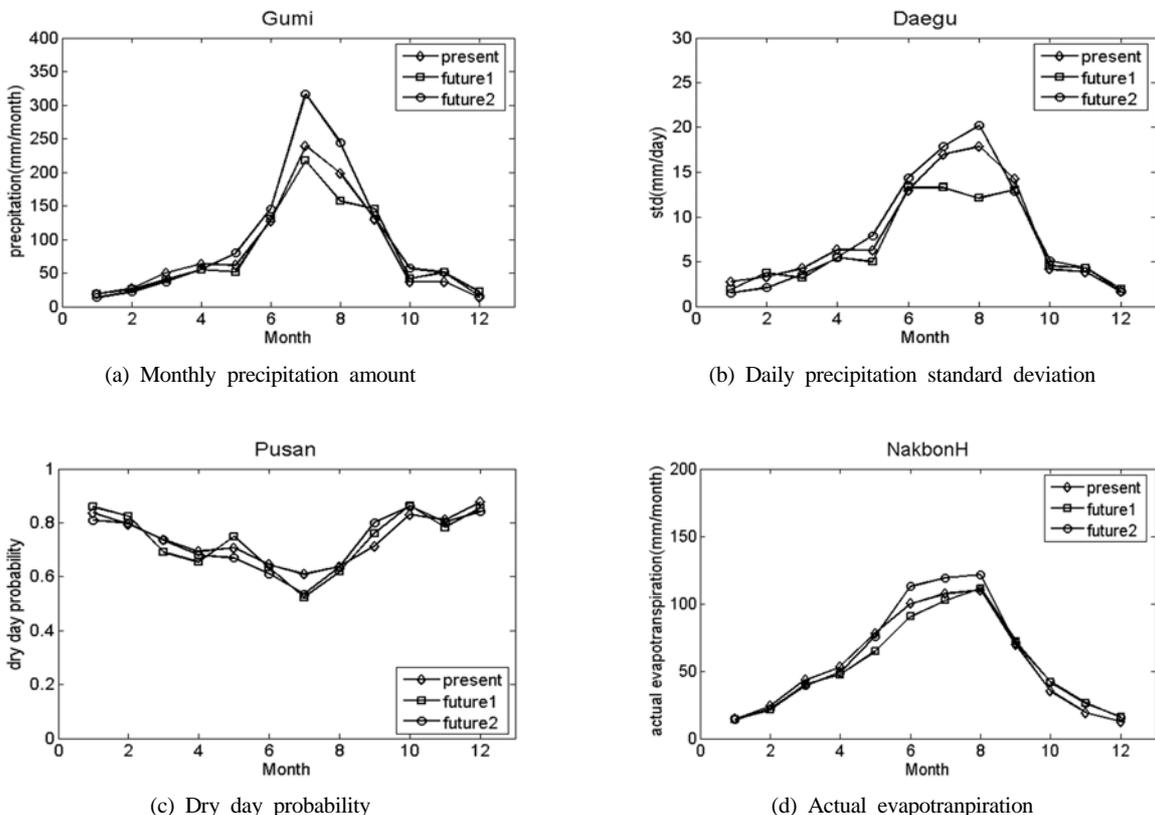


Fig. 9. Hydro-climatic variables based on future climate projection.

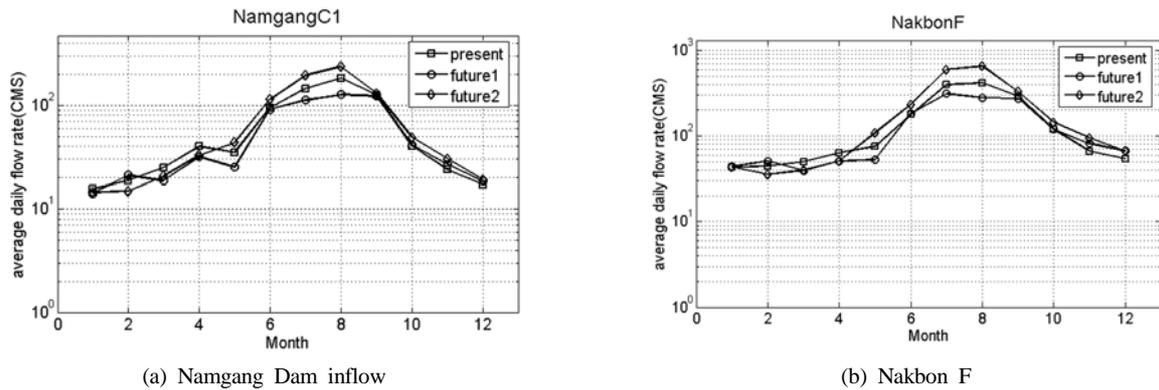


Fig. 10. Monthly river flow projections based on future climate information.

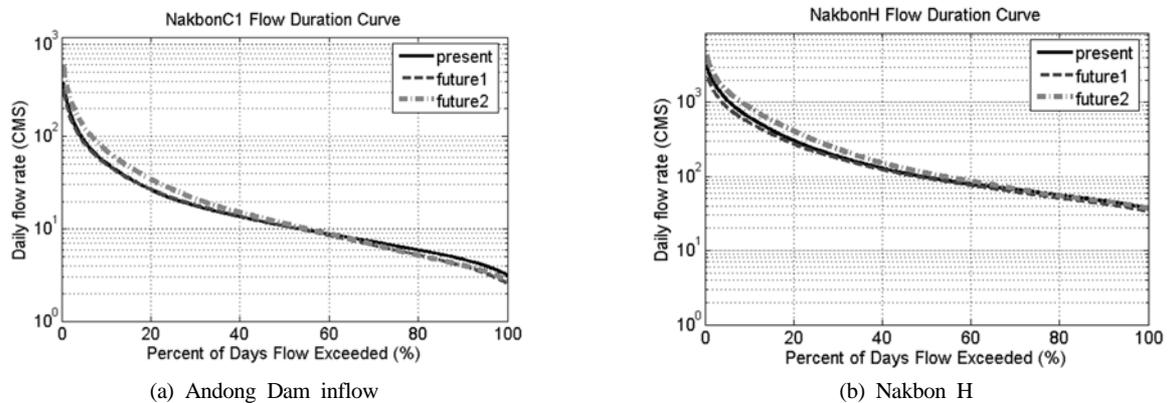


Fig. 11. Flow duration curve projections based on future climate information.

Table 1. Flow duration curve projection for Andong dam inflow (unit: m³/sec)

Flow	Obs	Present	Future 1	Future 2
Q095	21.36	20.43 (-4.34%)	20.81(1.87%)	25.21 (23.37%)
Q185	9.93	10.68 (7.57%)	10.58 (-0.94%)	11.29 (5.74%)
Q275	5.87	6.54 (11.32%)	5.83(-10.86%)	5.83 (-10.74%)
Q355	3.30	3.63 (10.06%)	2.98 (-18.02%)	3.18 (-12.28%)

Table 2. Flow duration curve projection for Nakbon H (unit: m³/sec)

Flow	Obs	Present	Future 1	Future 2
Q095	225.35	220.76 (-2.04%)	204.47 (-7.38%)	285.58 (29.36%)
Q185	85.71	96.01 (12.01%)	93.48 (-2.64%)	108.16 (12.66%)
Q275	53.36	60.55 (13.48%)	55.75 (-7.92%)	59.63 (-1.51%)
Q355	36.55	40.23 (10.05%)	36.18 (-10.05%)	39.99 (-0.58%)

감소할 것으로 예측되었으며, 유황의 경우에는 현재에 비하여 감소하는 것으로 나타났다. 단, 이 시기의 유황 감소 (-18% ~ +1%)는 본 연구의 모형 오차 수준(-4% ~ +23%)보다 낮다는 점에 비추어 보았을 때 이러한 결과의 신뢰성이 다소 낮은 것으로 판단된다. 2051~2060년의 경우 월 평균 유량은 봄철에는 감소하고 여름철 유량이 증가할 것으로 예측되었으며 유황 분석 결과 저 유황에서는 큰 유황 변동이 없으나 고 유황에서 뚜렷한 유황 증가를 보여 여름철 유황 증가를 예측할 수 있었다. 특히, 2051~2060년의 여름철 유황 증가(-12% ~ 32%)는 모형 오차 수준(-4% ~ +23%)과 비교하여 보았을 때에도 충분히 신뢰성을 지닌다고 판단된다.

본 연구에서는 평균 유량의 증감에 상관없이 최대 유출량의 변화를 알아보고자 대상 기간에 대하여 댐 상류유역의 연 최대 일유량을 분석하였다. 분석 결과 2021~2030년에는 월 평균 유량과 유량 변동성의 감소와 더불어 연 최대 일유량 또한 감소하는 것으로 나타났으며, 2051~2060년 기간 동안에는 전반적으로 유량의 양적 증가와 함께 연 최대 일유량이 매우 크게 증가될 것으로 예측되어(Fig. 12) 이로 인한 홍수 발생의 가능성이 높을 것으로 예상되었다. 그러나 아직까지 홍수에의 적용을 위한 기후모의정보의 사용은 불확실성이 매우 큰 것이 일반적인 사실이므로 때문에 이러한 결론에는 불확실성이 매우 클 것으로 판단된다.

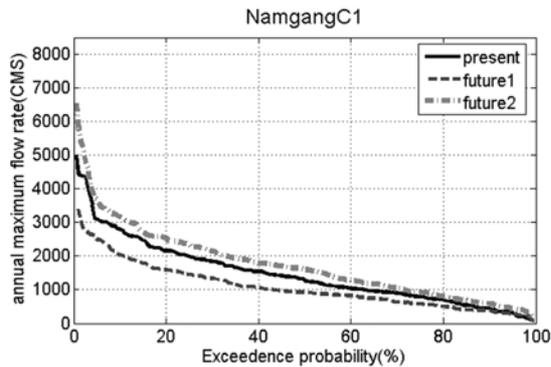


Fig. 12. Yearly maximum daily inflow projection for Namgang dam.

4. 결론

본 연구에서는 캐나다에서 개발된 CGCM 3.1 T63의 A2 기후변화 시나리오를 대상으로 한 미래기후정보를 MSPG에 의해 지역 상세화 시킨 기후자료로 변환한 후 수정 TANK 강우-유출모형에 적용시켜 기후변화가 낙동강 본류 하천유량에 미치는 영향에 대하여 분석을 실시하였다.

먼저 CGCM3.1T63-MSPG를 이용한 현재 강수장 재현 여부 및 수정 TANK 강우-유출모형의 보정 및 검증이 수행되었으며, 모의된 현재기후 강수자료를 이용한 하천유량과 관측된 강수자료로부터 도출된 하천유량과의 비교 검증을 통하여 적용된 지역상세화 기법인 MSPG의 적용성을 검토하였다. 이후 미래기후조건에서의 강수량 및 실제증발산량 모의결과로부터 미래 하천유출량 모의하여 물환경 자원에 대한 기후변화의 영향을 분석하였다.

MSPG의 현재 기후의 모의능력을 관측 강수 패턴 및 현재 자연유량의 재현 여부의 측면에서 검토한 결과, 월 평균 강수량과 무강수일 확률, 공간적 상관관계 등 현재의 강수장을 잘 재현하고 있었으며, 주요 댐 유입량과 낙동강 본류의 유량 또한 양호하게 현재의 유량상황을 재현할 수 있었음을 확인하였다.

CGCM A2 기후변화 시나리오를 적용하여 지역 상세화된 강수량 및 증발산량자료를 구축하여 낙동강 유역의 유행모의 결과, 2021~2030년의 경우 전반적으로 현재보다 강수량이 감소하는 것으로 예측되었으며, 특히 여름철 강수량의 감소가 상대적으로 클 것으로 예측되었다. 2051~2060년의 경우 강수량이 봄철에는 현재보다 감소할 것으로 나타났으며, 여름철에는 강수량이 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타나 집중 호우의 강도가 더욱 크게 될 가능성을 보여주었다.

낙동강 유역의 물환경 자원에 대한 기후변화의 영향을 분석한 결과, 기후변화로 인한 강수량의 변화와 유사한 경향이 유량에도 나타남을 확인할 수 있었으며, 이러한 강수량의 변화가 물환경 자원에 주요하게 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 2021~2030년의 경우 전체적으로 유량이 현재에 비하여 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 봄철과 여름철 유량이 감소하는 것으로 예측되었다. 2051~2060년의 경우 유량이 현재와 비교하여 감소하는 시기(봄철)와 유량이 증

가하는 시기(여름철)가 모두 있을 것으로 예측되었다. 또한 댐 상류 유역 연 최대 일유량 분석 결과, 2051~2060년에 연 최대 일유량이 매우 크게 증가될 것으로 예측되었으나 이러한 결론에는 불확실성이 매우 클 것으로 판단된다.

그러나 본 연구에서 적용한 MSPG에 의해 모의된 강수장의 공간적 상관성이 현재의 강수장을 완벽하게 재현하지 못하기 때문에 유량모의의 경우 중복 오차가 발생할 수 있으며, 이로 인하여 고유량의 과소추정 및 저유량의 과대추정 경향이 나타난 점은 본 연구의 가장 큰 한계라고 볼 수 있을 것이다. 특히, 이러한 한계는 연 최대 일유량 시계열의 경우 보다 명백하게 나타나 유역면적이 커지면서 오차도 함께 커짐을 경험할 수 있었으며, 이에 따라 홍수에 대한 기후변화의 영향평가를 수행하기 위한 미래기후정보의 사용은 아직까지 불확실성이 매우 크다고 할 수 있을 것이다. 또 미래 기후변화는 기온과 강수량뿐만 아니라 모든 기후요소에 영향을 미치며 대기 중 CO2 농도증가와 함께 식물의 증산량에 또한 영향을 미치게 되어 강우-유출 특성의 변화를 야기시키므로, 보다 정확한 기후변화 모의를 위해서는 SWAT나 HSPF와 같은 물리적인 메커니즘을 상대적으로 잘 구현한 모델을 이용하여 다양한 요소를 고려하여야 한다. 하지만 본 연구의 경우, 주요 목적이 낙동강 본류에 대한 기후변화의 영향을 분석하고자 하였기 때문에 이러한 모형을 사용하여 낙동강 전체를 다루기에는 검토정 문제 등과 같은 여러 가지 문제로 인하여 다소 무리인 측면이 있다. 따라서 비교적 가볍고 관측자료에 대한 검토정이 용이한 수정 TANK모형을 이용하였으며, 때문에 기후변화의 여러 가지 영향 중에서 제한된 측면만을 고려한 한계점 역시 지니고 있다.

본 연구는 하나의 GCM을 하나의 지역상세화 기법에 적용시켜 미래기후정보를 산출한 후, 이를 다시 특정 강우-유출모형에 적용시켜 산출한 결과를 바탕으로 분석한 사항을 기술하고 있다. 즉, 본 연구의 결과에는 각자의 모형에 포함된 수많은 오차를 포함하고 있는 것 또한 주목해야 할 사실일 것이다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사 '2008년 1차(상반기) 물산업핵심분야 연구개발비 지원사업(기후변화에 따른 수자원영향평가 및 관리방안 수립)'의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 경민수, 이용원, 김형수, 김병식(2009). 기후변화가 서울지역의 기온 및 가뭄에 미치는 영향 평가. *대한토목학회논문집*, 29(2B), pp. 181-191.
- 김문성, 안재현, 신현석, 한수희, 김상단(2008). 다지점 일강수 발생모형: 낙동강유역 강수관측망에의 적용. *수질보전 한국물환경학회지*, 24(6), pp. 725-739.
- 김병식, 김형수, 서병하, 김남원(2004). 기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향. *한국수자원학회논문집*, 37(3),

- pp. 185-193.
- 김보경, 김병식(2009). B2 기후변화시나리오와 극한지수를 이용한 기후변화가 극한 강우 발생에 미치는 영향분석. *대한토목학회논문집*, **29**(1B), pp. 23-33.
- 김용태, 이동률, 유철상(2004). 기후변화에 따른 대청댐 유역의 유출 영향 분석. *한국수자원학회논문집*, **37**(4), pp. 305-314.
- 김재철, 김상단(2007). 오염총량관리 유량측정자료를 이용한 낙동강 유역 유황분석. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(3), pp. 332-338.
- 낙동강수계관리위원회(2007). 낙동강 물순환 특성조사 및 모의예측기법개발. 낙동강물환경연구소.
- 신사철(2000). 기후변화 시나리오에 의한 하천 유황의 해석. *한국수자원학회논문집*, **33**(5), pp. 623-634.
- 안소라, 이용준, 박근애, 김성준(2008). 미래토지이용 및 기후변화에 따른 하천유역의 유출특성 분석. *대한토목학회논문집*, **28**(2), pp. 215-224.
- 안재현, 유철상, 윤용남(2001a). GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석. *한국수자원학회논문집*, **34**(4), pp. 335-345.
- 안재현, 윤용남, 유철상(2001b). 지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여. *한국수자원학회논문집*, **34**(5), pp. 511-519.
- 오재호, 홍성길(1995). 대기중 CO₂ 증가에 따른 한반도 강수량 변화. *한국수자원학회논문집*, **28**(3), pp.143-157.
- 이용준, 박종윤, 박민지, 김성준(2008a). SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화 및 토지이용 변화에 따른 안성천 유역 수문-수질 변화 분석(I). *대한토목학회논문집*, **28**(6B), pp. 653-663.
- 이용준, 박종윤, 박민지, 김성준(2008b). SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화 및 토지이용 변화에 따른 안성천 유역 수문-수질 변화 분석(II). *대한토목학회논문집*, **28**(6B), pp. 665-673.
- 임은순, 권원태, 배덕효(2006). 수자원 영향평가에 활용 가능한 지역기후변화 시나리오 연구. *한국수자원학회논문집*, **39**(12), pp. 1043-1056.
- 임혁진, 권형중, 배덕효, 김성준(2006). CA-Markov 기법을 이용한 기후변화에 따른 소양강댐유역의 수문영향분석. *한국수자원학회논문집*, **39**(5), pp. 453-466.
- 황준식, 정대일, 이재경, 김영오(2007). 기후변화 영향평가를 위한 월 물수지모형의 적용성 검토. *한국수자원학회논문집*, **40**(2), pp. 147-158.
- California Climate Change Center (2009). Using future climate projections to support water resources decision making in California. California Department of Water Resources.
- Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (2008). <http://www.cccma.ec.gc.ca/>.
- Giorgi, F. and Mearns, L. O. (1991). Approaches to simulation of regional climate change: a review. *Reviews of Geophysics*, **29**, pp. 191-216.
- Jha, M., Arnold, J. G., Gassman, P. W., Giorgi, F., and Gu, R. (2006). Climate Change Sensitivity Assessment on Upper Mississippi River Basin Streamflows Using SWAT. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, **42**(4), pp. 997-1016.
- Najjar, R. G. (1999). The Water Balance of the Susquehanna River Basin and Its Response to Climate Change. *Journal of Hydrology*, **219**, pp. 7-19.
- Rosenberg, N. J., Brown, B. A., Izaurralde, R. C., and Thomson, A. M. (2003). Integrated assessment of Hadley Centre (HadCM2) climate change projections on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States. I. Climate change scenarios and impacts on irrigation water supply simulated with the HUMUS model. *Agricultural and Forest Meteorology*, **117**, pp. 73-96.
- Stone, M. C., Hotchkiss, R. H., and Mearns, L. O. (2003). Water yield responses to high and low spatial resolution climate change scenarios in the Missouri River Basin. *Geophysical Research Letters*, **30**(4), pp. 1186.
- Stonefelt, M. D., Fontaine, T. A., and Hotchkiss, R. H. (2000). Impacts of Climate Change on Water Yield in the Upper Wind River Basin. *Journal of the American Water Resources Association*, **36**(2), pp. 321-336.
- Varanou, E., Gkouvatou, E., Baltas, E., and Mimikou, M. (2002). Quantity and Quality Integrated Catchment Modeling under Climate Change with use of Soil and Water Assessment Tool Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, **7**(3), pp. 228-244.
- Wilby, R. L. and Wigley, T. M. L. (1997). Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, **21**, pp. 530-548.