

〈2009 SWAT-KOREA 컨퍼런스 특별호 논문〉

기후변화가 충주댐 유역의 하천수질에 미치는  
영향평가를 위한 유역 모델링

Watershed Modeling for Assessing Climate Change Impact on Stream Water  
Quality of Chungju Dam Watershed

박종윤\* / 박민지\*\* / 안소라\*\*\* / 김성준\*\*\*\*

Park, Jong Yoon / Park, Min Ji / Ahn, So Ra / Kim, Seong Joon

Abstract

This study is to assess the future potential impact of climate change on stream water quality for a 6,581.1 km<sup>2</sup> dam watershed using SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model. The ECHAM5-OM climate data of IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) A2, A1B, and B1 emission scenarios were adopted and the future data (2007-2099) were corrected using 30 years (1977-2006, baseline period) weather data and downscaled by Change Factor (CF) method. After model calibration and validation using 6 years (1998-2003) observed daily streamflow and monthly water quality (SS, T-N, and T-P) data, the future (2020s, 2050s and 2080s) hydrological behavior and stream water quality were projected.

**Keywords** : Climate change; Downscaling; ECHAM5-OM, Nonpoint source; SWAT; Watershed modeling

요 지

본 연구에서는 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하여 미래 기후변화가 충주댐 유역(6,585.1 km<sup>2</sup>)의 하천수질에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 미래 기상자료는 IPCC에서 제공하는 A2, A1B, B1 배출시나리오를 포함하는 ECHAM5-OM 모형의 결과를 과거 30년(1977-2006, baseline period) 기후자료를 바탕으로 편이보정(bias correction)과 Change Factor Method로 Downscaling 하였다. 6년(1998-2003) 동안의 일별 유출량 및 월별 수질(SS, T-N, T-P) 자료를 이용하여 모형의 보정 및 검증을 실시한 후, Downscaling된 ECHAM5-OM의 A2, A1B, B1 시나리오에 대해 2020s, 2050s, 2080s로 대별되는 미래의 수문학적 거동 변화 및

\* 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 박사과정  
Ph. D Candidate, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea  
\*\* 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 박사수료  
Ph. D Candidate, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea  
\*\*\* 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 석사  
Master, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea  
\*\*\*\* 교신저자, 건국대학교 생명환경과학대학 사회환경시스템공학과 교수  
Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea  
(e-mail: kimsj@konkuk.ac.kr)

하천수질 변화를 전망하였다.

**핵심용어** : 기후변화, 상세화기법, 비점오염원, 유역 모델링, ECHAM5-OM, SWAT

## 1. 서 론

2007년 2월 2일 유엔(United Nations, UN) 정부간 기후변화위원회(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 기후변화에 관한 종합 보고서를 6년 만에 발표해 지구 온난화는 인간이 초래한 것이라고 강력히 지적하고 금세기 안에 지구표면 온도가 섭씨 1.8~4.0도 상승할 것이라고 전망하였으며 이러한 기후변화가 앞으로 더 심한 폭우와 해빙, 가뭄, 폭염, 그리고 해수면 상승이 있을 것이라고 경고하였다(IPCC, 2007). 우리나라는 이와 같은 기후변화 상태에서 가장 기온상승이 높은 지역으로 예측되어 2100년에는 아열대 기후로 변화할 것으로 예측되었다. 이러한 지구온난화에 의한 미래 기온의 상승과 강수량의 패턴변화는 증발산이나 토양수분 등의 변화로 이어져 궁극적으로는 물 순환의 변화를 초래하며 유출량 변화로 이어지게 된다(안재현 등, 2001; 유철상과 이동률, 2000). 뿐만 아니라 유역의 유출특성변화는 비점오염원에 의한 오염물질의 거동에 변화를 가져올 것으로 예상되며 그로인한 하천 및 호소 수질, 수생태계에 직접적인 영향을 미칠 것으로 전망된다(박중윤, 2009).

기후변화로 인한 수자원의 영향을 분석하는 방법으로는 크게 과거 관측 자료를 이용해 변화 경향을 분석하는 방법, 기후모형을 이용하는 방법, 그리고 기후모형과 결정론적 수문모형을 이용하는 방법으로 나눌 수 있는데, 대부분의 연구에서는 기후모형에서 생산되는 기후자료를 수문모형에 입력하여 수자원의 영향을 평가하는 방법을 사용하고 있다(배덕효와 정일원, 2005). 하지만 일반적으로 기후수치모형인 전지구기후모형(GCMs; General Circulation Models)은 모형의 종류가 매우 다양할 뿐만 아니라 모형의 특성과 해상도, 사용된 입력 자료에 따라 모의결과가 상이하게 나올 수 있다. 따라서 GCMs 모의결과를 지역규모에 적용하기 위해서는 유역스케일의 고해상도 자료 생성을 위한 상세화기법(Downscaling)이 필수적으로 수행되어야 한다(Zhang *et al.*, 2007).

기후변화에 따른 수자원 영향평가에 관한 연구는 1990년대 이후로 기후변화가 물 순환에 미치는 영향에 관한연구가 활발히 진행되었으며, 최근에는 기후변화의 정량적인 예측을 통한 대처방안에 관한 연구들이 활발히 수행되고 있다(안소라 등, 2008). 국내에서는 안재현

등(2001)이 기후변화가 수문환경에 미치는 영향 분석을 목적으로 CO<sub>2</sub> 증가 시나리오에 따른 GCM 모의 결과를 이용하여 대청댐 유역의 유출량 변화를 각각 NWS-PC모형과 물수지 모형을 이용하여 분석하였으며, 배덕효 등(2007)과 정일원 등(2007)은 유역스케일의 신뢰성 높은 기후시나리오를 생산하고, 국내 기후모의에 대한 적용성을 평가하여, PRMS 모형을 이용한 미래 수자원의 변동성을 분석한바 있다. 박근애(2008)는 4개의 GCMs (CGCM2, MIROC3.2 hires, ECHAM5-OM, HadCM3)과 SLURP 수문모형을 결합하여 미래 기후변화가 유역 수문 및 농업용 저수지의 거동에 미치는 영향을 분석한바 있다. 반면, 국외에서는 수문학적 영향평가 뿐만 아니라 하천수질 변화를 전망하고 평가하는 연구들이 활발히 진행되어 왔다. 특히, 유럽연합(European Union)은 CHES (Climate, Hydrochemistry and Economics of Surface-water System) 프로젝트의 일환으로 유럽의 다른 몇몇 유역에 기후변화 시나리오를 적용하여 수질 영향평가를 위한 기법을 제시하고 SWAT 모형과 QUESTOR 모형 등을 이용하여 미래 기후변화가 수문-수질에 미치는 영향을 분석하였다. 그 중 Varanou *et al.* (2002)은 3개의 GCM 자료로부터 Downscaling 기법에 의한 9개의 기후변화 시나리오를 작성하여 하천유출량 및 유사량 등의 수질변화를 분석하였다. Bouraoui *et al.* (2002)은 영국 Yorkshire 지방에 위치한 Ouse River 유역에 서로 다른 6개의 기후변화 시나리오를 작성하고 SWAT 모형에 적용한 결과, 기후변화에 따른 T-N (Total Nitrogen), T-P (Total Phosphorus) 오염부하량이 6%에서 27%까지, 5에서 34%까지 각각 증가한다고 밝힌바 있으며, Bouraoui *et al.* (2004)의 연구결과에서는 기후변화에 따른 년 평균 영양물질 오염부하량과 겨울철 유출량은 증가하며, 적설면적은 감소한다고 분석하였다. 또한 Nearing *et al.* (2005)은 SWAT 모형과 6개의 다른 모형으로부터 유출과 토양 유실량을 추정, 비교분석한바 있다.

지금까지 국내에서 미래 기후변화에 따른 수자원 영향평가는 주로 장기유출해석에 의한 수문학적 영향평가 및 사회·경제적 영향평가에 치중되어왔다. 하지만 미래 기후변화에 따른 강우패턴의 변화 및 기온의 증가는 증발산량의 증가로 인한 하천의 건천화 문제나 수온 상승으로 인한 하천수질 악화, 비점오염원 유출특성 변화

등의 문제를 발생시킬 수 있다. 이에 본 연구에서는 유역 모델링을 통해 유역의 수문학적 영향평가와 더불어 미래 기후변화가 하천수질에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 이를 위해, 충주댐 유역을 대상으로 GCM의 모의결과로부터 Downscaling을 통해 미래 기상자료를 구축하고 수문-수질 모의가 가능한 유역모형을 선정하여 미래 기후변화에 따른 유역의 수문학적 거동 변화를 전망하고 각 수문요소 변화에 따른 비점오염원 유출특성이 하천수질에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 대상유역 및 자료구축

본 연구에서는 충주호를 포함하는 충주댐 상류유역을 대상유역으로 선정하였다(Fig. 1). 충주댐 유역의 유역면적은 6,585.1 km<sup>2</sup>이며, 유역평균표고는 609.1 m, 유역평균경사는 36.9 %로 국내 북동부 산악지역에 위치해 있으며 산림면적은 5,573.1 km<sup>2</sup>으로서 유역면적의 84.6 %에 이른다. 행정구역상으로는 강원도, 충청북도, 경상북도가 각각 69.9, 28.4, 1.7 %를 차지하고 있다. 충주댐 유역은 지난 수 십년 동안 벌채, 개간 등에 의한 산림의 변화, 도시개발, 단지 및 주거지 조성, 논 경지정리, 밭 개간 등에 의한 토지이용의 변화, 논내 비닐하우스 재배 등에 의한 물이용 형태의 변화 등 꾸준한 변화가 지속되어 왔다. 이로 인한 비점오염원의 증가와 기후변화에 따른 수문순환체계의 변화는 충주댐 유역의 치수대책 및 하천정비계획뿐만 아니라 충주호의 수질에 직접적인 영향을 미칠 것으로 판단된다.

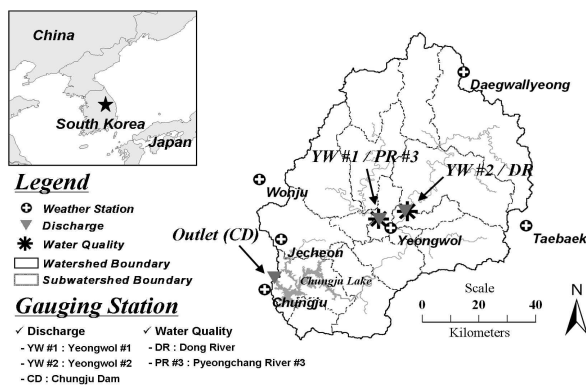


Fig. 1. The Chungju Dam Watershed, and Weather Stations, Discharge and Stream Water Quality Gauging Stations

유역 모형의 지형입력자료로서 본 연구에서는 NGIS (National Geographic Information System)의 1/5,000 수치지도로부터 검수과정을 거쳐 격자크기 100 m의

DEM (Digital Elevation Model)을 제작하였다. 토지이용도는 2000년 4월 Landsat TM 위성영상으로부터 감독분류 방법 중 각 분류항목의 평균과 공분산을 이용하는 최대우도방법(Maximum Likelihood Classification)을 적용하여 총 7개의 토지이용항목(수역, 도심지, 나지, 초지, 논, 밭, 산림)으로 분류하였다. 또한 산림이 대부분(84.6 %)인 충주댐 유역의 산림 특성을 정확하게 반영하기 위하여 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) / AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) Sensor의 Data를 통하여 계산된 정규화식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 자료로부터 산림을 침엽수림, 활엽수림, 혼효림으로 재분류하였다. 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1/25,000 정밀토양도를 이용하여 미국 NRCS (The U.S. Natural Resource Conservation Service formerly the Soil Conservation Service) 토양분류 기준(Soil Survey Staff, 1996)에 따른 수문학적 토양그룹(Hydrologic Soil Group) A, B, C, D로 분류하였다. 토양층의 개수 및 토양층별 깊이 등은 농업과학기술원의 자료를 사용하여 구축하였으며 토양층의 유효수분량, 포화수리전도도 등의 물리적 값들은 Saxton *et al.* (1986)의 결과를 토대로 SWAT에서 요구하는 형식의 토양 속성값(usersoil.dbf)을 부여하였다(박중윤 등, 2008).

충주댐 유역의 관측소 현황은 대관령, 원주, 영월, 제천, 충주, 태백 총 6개의 기상관측소가 위치해 있으며 1977년부터 2006년까지의 30년 치 일별 강우량, 온도, 풍속, 태양복사량 및 상대습도 자료를 기상청으로부터 제공받아 모형의 기상입력 자료로 사용하였다. 또한 유역내 환경기초시설자료를 이용하여 점오염원 자료로 활용하였으며, 모형의 적용성 평가를 위해 Fig. 1과 같이 5개의 수문·수질 관측 지점을 선정하여 각각의 항목에 대한 모형의 보정 및 검증은 실시하였다. 먼저 유출량 자료는 충주댐(CD) 지점 및 남한강과 동강의 합류지점인 영월1(YW #1) 지점, 남한강 상류의 영월2(YW #2) 지점에 대하여 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System, WAMIS)에서 제공하는 일별 유출량 자료를 사용하였으며, 수질자료는 평창강3(PR #3), 동강(DR) 지점에 대하여 월 1회 측정하는 부유물질(Suspended Solids, SS) 및 총인(Total Phosphorus, T-P), 총질소(Total Nitrogen, T-N) 농도 자료의 채수일자를 획득하여 부하량으로 환산하였다.

마지막으로 본 연구에서는 IPCC AR4 (Fourth Assessment Report)에서 제시하고 있는 23개의 GCM 중에서 독일기상연구소 (Max-Planck-Institute for

Meteorology)에서 개발한 ECHAM5-OM 모형의 결과 값을 사용하였다. ECHAM5-OM의 격자크기는 1.9°×1.9°(320 km × 160 km)이며, SRES 배출시나리오는 A2, A1B, B1 시나리오를 포함한다. 여기서, A2는 “Warming High”, A1B는 “Warming Middle”, B1은 “Warming Low” 시나리오로 간단히 설명될 수 있다.

## 2.2 유역모형(SWAT)의 개요

수문·수질모의를 위한 유역모형으로 미국 농무성(United States Department of Agriculture, USDA) 농업연구소(Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 SWAT 모형을 선정하였다. SWAT 모형은 물리적 기반의 준 분포형 장기 강우-유출 모형으로서, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위해 개발된 모형으로 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적의 4가지 부모모형으로 구성되어 있다(Arnold *et al.*, 1998). 이 중 수문 부모모형에서는 토양과 토지이용조건에 의해 결정되는 수문반응단위(Hydrologic Response Unit, HRU)로 SCS (Soil Conservation Service) 유출곡선법(Curve Number, CN)과 Green & Ampt 침투법을 이용하여 지표유출량을 산정하며, 측방유출량은 동역학적 저류모형(Kinematic Storage Model)을 이용한다. 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산한다. 잠재증발산량을 산정하기 위하여 Hargreaves 방법, Priestley-Taylor 방법과 Penman-Monteith 방법을 제공하며, 작물과 토양의 증발산을 분리하여 모의하기 위해 Ritchie 방법을 이용한다.

SWAT 모형에서 강우와 유출에 의한 침식은 수정 범용토양유실공식(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE) (Williams, 1975)에 의해 계산된다. MUSLE는 Wischmeier and Smith (1965, 1978)에 의해 개발된 범용토양유실공식(USLE : Universal Soil Loss Equation)의 수정버전이다. USLE에서는 강우에너지의 함수로서, 평균 연간 총 침식량을 예측하는 반면, MUSLE에서는 강우에너지 인자가 유출인자로 대체된다. 이로서 유사량 예측을 개선하고, 운송비가 불필요하게 되며, 각각의 호우사상에 대하여 적용이 가능해진다. 영양물질 추적을 위해 SWAT에서 사용되는 하천 내 동역학은 QUAL2E (Brown and Barnwell, 1987)로부터 채택되었다. 이는 하천 내 용해되거나 유사에 부착된 영양물질을 추적한다. 토양입자에 붙어 있는 영양물질은 주수로로 통해 지표면 유출로 이동되며,

이러한 질소와 인은 HRU에서의 유사량과 관계가 있기 때문에 유사량의 변화는 영양물질 부하량에 영향을 미칠 것이다(Neitsch *et al.*, 2001).

## 2.3 편이보정 및 상세화기법

기후변화에 의한 영향을 잘 묘사하기 위해서는 더 나은 해상도를 위한 상세화기법이 필수적으로 수행되어야 한다. 또한 기후 모델이 현재 기후를 잘 묘사(Simulation)할 수 없다면 미래 기후를 전망한 것에 대해 확신할 수 없기 때문에(Viner and Mayer, 1994) 기후모델의 결과물을 연구에 사용할 때에는 신뢰성을 높이기 위하여 기후 모델 결과를 현재 관측된 자료와 비교하여 확인하는 과정이 필요하다(Carter *et al.*, 1999). 따라서 본 연구에서는 유역규모의 기후변화 시나리오를 작성하기 위한 Downscaling 방법을 편이보정(Bias Correction)방법과 Change Factor (CF) Method를 이용하여 두 단계로 나누어 수행하였다.

먼저, 과거 각 기상관측소의 30년(1977~2006, Baseline) 기상자료와 ECHAM5-OM 20세기 모의결과인 20C3M (20th Century Climate Coupled Model)의 1977년~2006년의 온도와 강수량을 비교하여 Alcamo 등(1997)이 사용했던 편이보정(Bias Correction)방법을 이용하여 온도와 강수에 대해 Eq. (1)과 Eq. (2)를 이용하여 통계적인 유사성을 가지도록 보정을 실시하였다. 먼저 온도는,

$$T'_{GCMfut} = T_{meas} + (\overline{T_{GCMfut}} - \overline{T_{GCMhis}}) \quad (1)$$

여기서,  $T'_{GCMfut}$ 는 보정된 미래의 온도,  $T_{meas}$ 는 과거 30년 기준기간 동안 관측된 온도,  $\overline{T_{GCMfut}}$ 는 GCM에서 모의된 미래 온도의 평균,  $\overline{T_{GCMhis}}$ 는 과거 기준기간 동안의 GCM에서 모의된 온도의 평균을 말한다. 강수량의 경우,

$$P'_{GCMfut} = P_{meas} \times (\overline{P_{GCMfut}} / \overline{P_{GCMhis}}) \quad (2)$$

여기서,  $P'_{GCMfut}$ 는 보정된 미래의 강수량,  $P_{meas}$ 는 과거 30년 기준기간 동안 관측된 강수량,  $\overline{P_{GCMfut}}$ 는 GCM에서 모의된 미래 강수량의 평균,  $\overline{P_{GCMhis}}$ 는 과거 기준기간 동안의 GCM에서 모의된 강수량의 평균을 말한다.

이후, 유역규모의 기후변화 시나리오를 작성하기 위한 downscaling 방법으로 1차적으로 편이보정된 GCM 모의 값에 CF Method를 이용하여 관측소별로 downscaling 하였다. 이 기법은 현재 기후의 공간패턴

이 미래에는 변화가 없다고 가정하고, 특정 년도를 기준으로 비교할 수 있는 장점을 가지며 기후변화 영향평가에 대한 많은 연구에 적용되어 왔다(Diaz-nieto and Wilby, 2005; Wilby and Harris, 2006; 박근애, 2008; 안소라 등, 2009). 기상관측소별로 강수량, 온도, 상대습도, 풍속의 6개 기상인자에 대하여 기준기간이 되는 과거 30년(1977-2006) 동안의 월 평균값을 준비하고, 미래 기상자료로 2개 GCM에 대한 A2, A1B, B1 시나리오별 결과 값을 2030s(2016-2045), 2060s(2046-2075), 2090s(2071-2100) 로 구분하여 각각의 30년 월 평균값을 구축하였다. 그 후 과거 30년 평균값에 대한 월 변화율과 미래 30년 평균값의 월 변화율간의 차이 값 분석(Difference analysis)을 하고 기준년을 평수년으로 대변되는 보정년도인 2000년으로 선정하여 기상관측소별 일 자료에 매월의 변화율을 각각 반영하여 유역규모의 일 기상자료로 재구축하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 유역모형의 보정 및 검증

충주댐 유역과 같이 대규모 유역의 경우, 유역 최말단 출구점의 실측자료를 바탕으로 유역전체를 대표할 수 있는 매개변수를 선정하기엔 무리가 있기 때문에 본 연구에서는 소유역별, HRU별 매개변수 조정에 따른 다지점(Multi-site) 보정을 실시하였다.

모형의 보정과 검증은 실측자료의 양과 질이 충분한 1998년~2000년, 2001년~2003년 각각 3개년으로 설정

하여 Fig. 1의 각 보정 지점별 관측자료를 이용하여 보정하였다. 보정방법은 LH-OAT (Latin Hypercube - One-factor-At-a-Time) 민감도 분석을 통해 선정된 매개변수를 이용하여 실시하였으며, 보정결과에 따른 모형의 적합성과 상관성을 판단하기 위한 목적함수로는 결정계수(Determination Coefficient,  $R^2$ )와 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE), 상대평균절대오차(Relative Mean Absolute Error, RMAE), 모형의 효율성 검증은 Nash and Sutcliffe (1970)가 제안한 모형효율성계수(NSE)를 사용하였다.

먼저, 유출량에 대한 SWAT 모형의 보정과 검증은 공간적으로 최상류부터 순차적으로 실시하였다. 충주댐 유역의 상류지점인 영월1(YW #1)지점과 영월2(YW #2)지점에 대하여 먼저 보정한 후, 유역 출구지점(CD)에 대하여 보정을 실시하였다. 그 결과는 Table 1과 같으며, 영월1지점의 모의결과가 가뭄년인 2000년을 제외하고 과대평가된 반면, 영월2지점에서는 과소평가 되었다. 유역 출구지점에 대한 보정결과는 상류(YW #1, YW #2)의 모형 오차가 다소 개선되었으며, 갈수기 유출패턴이 상당부분 개선되었다. 유출량에 대한 모형의 검보정 후, 수질항목별 보정을 실시하였다. 보정방법은 민감도 분석에 따른 유사 및 영양물질관련 매개변수를 선정하고, 상류의 유출보정지점인 영월1, 영월2와 동일한 지점으로 평창강3(PR #3), 동강(DR) 지점에 대하여 Sediment, T-N, T-P 순으로 보정하였다. SWAT 모형에서 영양물질은 유사량의 이동과 유출에 의해 영향을 받기 때문에 유사량의 보정이 선행되어야 한다. 한편,

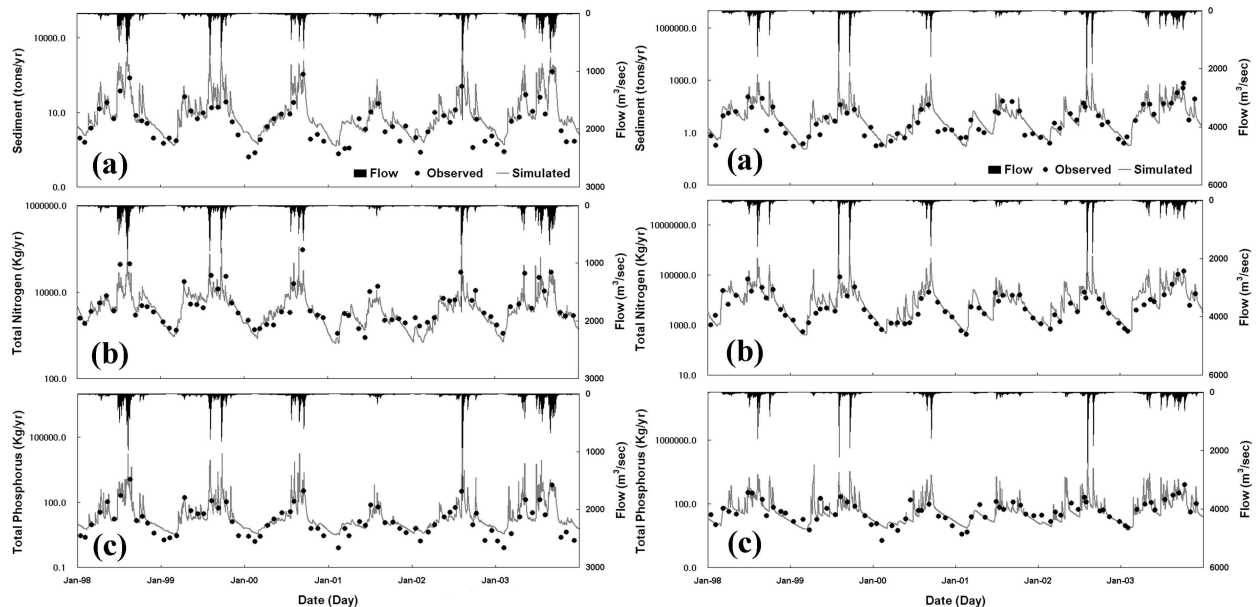


Fig. 2. Observed and SWAT Simulated Sediment (a), T-N (b), and T-P (c) Loads in the Changju Dam Watershed at PR #3 (left panels) and DR (right panels) for the Period 1998-2003

Table 1. Calibration and Validation Results of Discharge and NPS Loads at Three Calibration Points

Model Output		Evaluation Criteria	YW #1 / PR #3		YW #2 / DR		CD (Outlet)	
			Cal <sup>1</sup>	Val <sup>2</sup>	Cal <sup>1</sup>	Val <sup>2</sup>	Cal <sup>1</sup>	Val <sup>2</sup>
Discharge (mm/day)		RMSE	2.80	2.38	2.98	2.67	2.01	1.58
		RMAE	0.99	0.63	0.70	0.71	0.67	0.79
		R <sup>2</sup>	0.76	0.71	0.76	0.69	0.89	0.87
		NSE	0.73	0.68	0.64	0.58	0.81	0.79
NPS Loads	Sediment	R <sup>2</sup>	0.79	0.95	0.69	0.53	-	-
		NSE	0.59	0.85	0.87	0.62	-	-
	T-N	R <sup>2</sup>	0.70	0.78	0.81	0.94	-	-
		NSE	0.67	0.41	0.83	0.86	-	-
	T-P	R <sup>2</sup>	0.82	0.88	0.35	0.88	-	-
		NSE	0.50	0.89	0.64	0.75	-	-

<sup>1</sup>Cal: Calibration Period (1998 ~ 2000)  
<sup>2</sup>Val: Validation Period (2001 ~ 2003)

유출과 달리 유사 이동은 많은 복잡한 과정을 수반하고, 대부분 경험적인 해석에 의한 수식들에 의해 모의되고 있으며, 관측치에서 포함될 수 있는 오차가 매우 크기 때문에 정량적인 해석에 많은 어려움이 있다(김철겸 등, 2007).

Fig. 2는 평창강3과 동강지점에 대해 검보정기간 동안의 Sediment, T-N, T-P 부하량 각 항목별 실측치와 모의치를 비교한 것으로, 평창강3지점에 대한 수질항목별 결과를 살펴보면, 검보정기간 동안 총 71개의 실측자료에 대하여 Sediment, T-N, T-P 부하량의 모형효율(NSE)은 0.72, 0.54, 0.70으로 분석되었으며, R<sup>2</sup>는 각각 0.87, 0.74, 0.85의 상관성을 보였다. 동강지점의 총 72개의 실측자료에 대한 Sediment, T-N, T-P 보정결과는 NSE가 0.75, 0.85, 0.70, R<sup>2</sup>가 0.61, 0.88, 0.62의 상

관성을 보이는 것으로 분석되었다(Table 1). 특히, 평창강3지점의 질소 보정결과, 전체적인 변화패턴은 유사하나 통계치가 상대적으로 낮게 평가된 것은 질소가 질산화(Nitrification), 탈질화(Denitrification), 흡수와 침전과 같은 질소고정(Fixation) 등의 복잡한 과정을 통해 제거 또는 변환되기 때문에 이를 모형에서 적절히 표현하지 못한 것으로 판단된다. 이에 반해 인의 기작은 물에 쉽게 녹지 않고 토립자에 흡착되어 하천으로 흘러가므로 유출과 유사량에 대한 보정으로 비교적 신뢰할 수 있는 보정결과를 얻을 수 있었다.

### 3.2 미래 기후전망

Fig. 3은 EHCAM5-OM의 편이보정에 따른 각 배출시나리오별 온도와 강수에 대한 보정전후결과를 나타낸

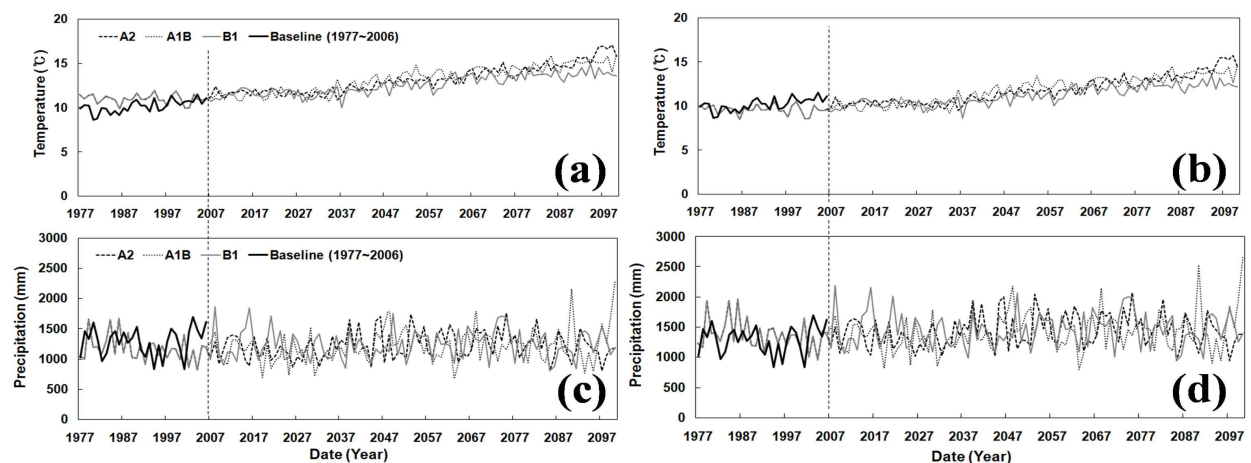


Fig. 3. Adjusted Temperature (tops) and Precipitation (bottoms) Data for ECHAM5-OM Using 30 Years (1977-2006) Historical Observed Data, Before (a, b) and After (c, d) Bias Correction

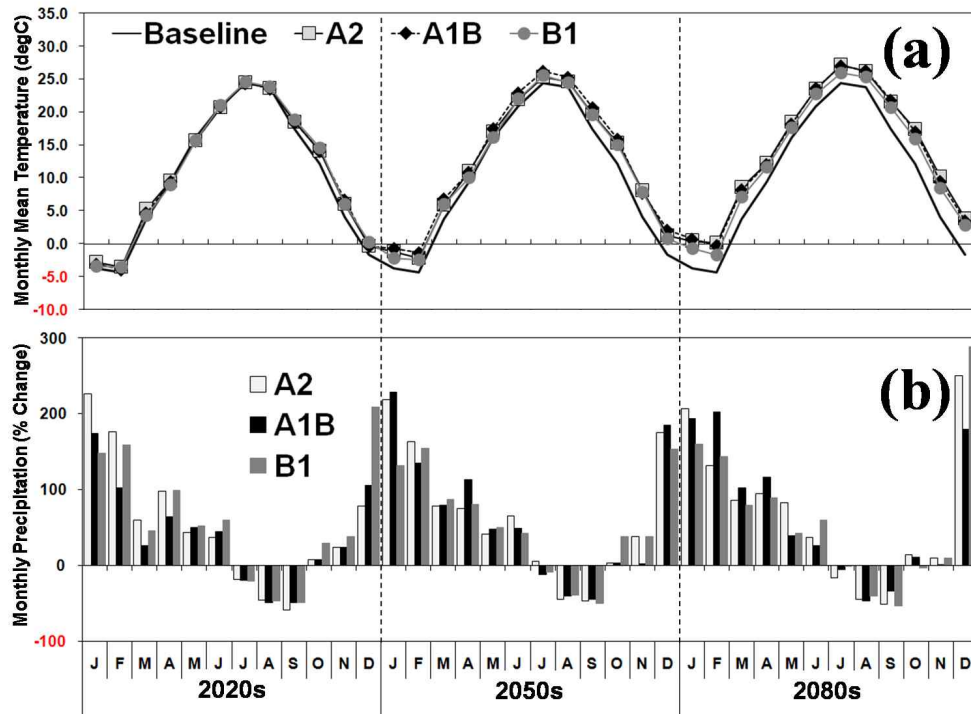


Fig. 4. Changes in Chungju Dam Watershed Monthly Temperature (a) and Precipitation (b) under Downscaled A2, A1B and B1 Emission Scenarios by the CF Method

Table 2. Changes in Degree and Percent for Future Seasonal Temperature and Precipitation by the CF Downscaling

Season	Temperature (°C)			Precipitation (%)		
	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1
Spring (March–May)						
2020s	+0.5	+0.3	-0.1	+62.7	+47.9	+60.3
2050s	+1.7	+2.0	+1.0	+60.4	+69.5	+53.4
2080s	+3.4	+3.1	+2.4	+58.7	+69.0	+81.8
Summer (June–August)						
2020s	-0.1	-0.1	+0.1	-10.6	-14.8	-14.6
2050s	+0.9	+1.8	+0.9	-6.6	-7.1	+0.3
2080s	+2.6	+2.6	+1.6	-0.7	-13.4	-13.1
Autumn (September–November)						
2020s	+1.7	+1.8	+1.8	-33.1	-35.0	-44.2
2050s	+3.2	+3.5	+2.9	-33.3	-33.3	-31.5
2080s	+5.2	+4.9	+3.8	-41.0	-23.8	-38.3
Winter (December–February)						
2020s	+1.1	+0.8	+1.0	+151.6	+131.9	+161.1
2050s	+2.6	+3.3	+1.9	+126.7	+187.7	+182.2
2080s	+4.8	+4.6	+3.3	+178.8	+174.1	+192.9
Annual (January–December)						
2020s	+0.8	+0.7	+0.7	-2.0	-7.4	-7.4
2050s	+2.1	+2.7	+1.7	-1.1	+2.0	+4.5
2080s	+4.0	+3.8	+2.8	+1.7	+0.8	-1.0

것으로 온도의 경우 30년 치 관측자료에 비해 과대 추정되어 Eq. (1)에 의한 보정계수를 각각 더해주었다. 반면, 강수는 과소 추정되어 오차비율만큼 Eq. (2)에 의해 각각 보정되었다. 온도에 대한 보정값은 A2, A1B, B1 시나리오에서 각각 -1.52, -1.39, -1.46 이었으며, 강수에 대한 보정값은 각각 1.15, 1.17, 1.16을 적용하였다.

Fig. 4는 CF Method로 Downscaling된 2020s, 2050s와 2080s의 매월 온도와 강수량의 변화를 나타낸 것이며, Table 2는 계절별 온도와 강수량의 변화를 나타낸 것이다. 먼저, 온도는 모든 계절에서 전반적으로 상승하였는데, 겨울철 온도가 가장 많이 상승하는 것으로 나타났다. 특히, 모든 배출시나리오에서의 온도는 미래로 가면서 꾸준히 상승하였는데, 계속되는 지구온난화로 인해 2080s의 평균온도는 최대 +4.0℃까지 상승하는 것으로 전망되었다. 한편, 강수량의 경우 -58.7%~+288.4%의 변화폭을 보였으며 대체적으로 봄, 겨울 강수량이 증가하였다. 하지만 8, 9월의 강수량 감소로 인해 여름과 가을 강수량은 오히려 감소하는 경향을 나타내었다.

### 3.3 기후변화에 따른 유역 모델링

#### 3.3.1 수문학적 거동 변화

SWAT 모형의 적용성을 평가한 후, ECHAM5-OM의 미래 기후변화 시나리오 적용에 따른 증추땀 유역의 증발산(evapotranspiration), 지표유출(surface runoff), 중간유출(subsurface lateral flow), 지하수유출(groundwater discharge) 및 총유출(streamflow/dam inflow)에 대한 수문요소별 변동성을 분석하여 그 결과를 Table 3에 정리하였다.

먼저, 연평균 증발산량의 변화는 온도 상승에 따라 기준년(2000)과 비교했을 때, 최대 16.8%까지 증가하는 것으로 분석되었다. 계절적으로는 봄과 여름의 증가가 비교적 크게 나타났으며, 2080s로 가면서 점차 증가하였다. 배출시나리오별 증발산량의 변화는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 분석되었다. 이처럼 온도변화에 따른 증발산량의 변화는 수문학적 변화뿐만 아니라 식물의 성장과정 등 생태계에 직접적인 영향을 미치며, 미래 가용 수자원의 양을 가늠할 수 있는 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 지표유출은 강우와 차

Table 3. Summary of Future Projected Annual Hydrologic Components

Scenario		P	ET	SR	LAT	GW	ST
Baseline	2000	1155.1	407.2	419.2	35.5	232.5	691.2
A2	2020s	1069.7 (-7.4)	444.8 (+9.2)	273.7 (-34.7)	36.7 (+3.4)	246.8 (+6.2)	555.9 (-19.6)
	2050s	1206.7 (+4.5)	454.5 (+11.6)	360.5 (-14.0)	42.3 (+19.1)	267.4 (+15.0)	669.2 (-3.2)
	2080s	1143.5 (-1.0)	475.5 (+16.8)	275.2 (-34.3)	48.5 (+36.4)	263.5 (+13.3)	585.5 (-15.3)
A1B	2020s	1069.5 (-7.4)	441.9 (+8.5)	284.5 (-32.1)	36.9 (+3.9)	239.5 (+3.0)	560.1 (-19.0)
	2050s	1178.3 (+2.0)	458.1 (+12.5)	330.9 (-21.1)	43.8 (+23.4)	266.6 (+14.7)	640.2 (-7.4)
	2080s	1164.4 (+0.8)	473.0 (+16.2)	304.2 (-27.4)	47.0 (+32.3)	262.8 (+13.0)	612.6 (-11.4)
B1	2020s	1131.7 (-2.0)	447.5 (+9.9)	323.7 (-22.8)	36.7 (+3.3)	248.2 (+6.7)	607.1 (-12.2)
	2050s	1142.1 (-1.1)	453.0 (+11.2)	316.2 (-24.6)	39.3 (+10.6)	253.4 (+9.0)	607.6 (-12.1)
	2080s	1174.1 (+1.7)	467.1 (+14.7)	325.3 (-22.4)	43.6 (+22.8)	261.4 (+12.4)	629.0 (-9.0)

P: precipitation (mm), ET: evapotranspiration (mm), SR: surface runoff (mm), LAT: subsurface lateral flow (mm), GW: groundwater discharge (mm), ST: streamflow (mm)  
( ) : Percent of increase (+) or decrease (-) based on baseline (2000)



단, 증발산 그리고 유역의 지형학적 특성에 따라 크게 달라지는데 이는 비점오염원에 의한 하천수질에 직접적인 영향을 미치므로 지표유출량의 변화는 수문-수질해석에 중요한 변수이다. SWAT 모의결과 모든 배출시나리오에서 -34.3 %~-14.0 %의 감소하는 것으로 분석되었는데, 이러한 지표유출의 변화패턴은 강수량의 변화패턴과 비슷한 양상을 보이며 계절적으로 여름과 가을에 크게 감소하는 경향을 보였다. 기후변화에 따른 중간유출의 변화는 강우와 증발산량의 지배를 받으며, 토양속으로 용해된 오염물질을 운송한다. 본 연구에서 중간유출의 변화는 겨울과 봄의 증가가 크게 나타나면서 총 중간유출량이 3.3 %~36.4 % 증가하는 것으로 나타났다. 배출시나리오별 증가폭은 A2, A1B 시나리오에서 크게 나타났으며 B1 시나리오에서는 2020s, 2050s, 2080s 모두 약 22 % 정도의 증가를 보이는 것으로 분석되었다. 다음으로 기저유출의 변동성 파악을 위해 지하수유출에 대한 변화를 살펴보았다. 월별 변화를 살펴본 결과 1~7월까지의 지하수유출량은 증가하고 8~12월까지는 감소하는 경향을 보이며 3.0 %~15.0 % 증가하는 것으로 분석되었다.

충주댐과 같은 다목적댐의 경우 관개를 위한 농업용 저수지 등과 비교했을 때, 상대적으로 수자원 의존도가 크다. 때문에 미래 저수량 확보를 위한 물수지 변화 분석과 그에 따른 미래 댐 유입량의 예측 필요하다. 지금까지 위에서 살펴본 기후변화 시나리오 적용에 따른 충주댐 유역의 수문요소 변화는 결과적으로 댐 유입량의 변화로 이어지게 된다. Fig. 5는 ECHAM5-OM의 배출시나리오별 댐 유입량의 변화를 기준년과 비교한 것으로 강수량의 감소와 증발산량의 증가, 그에 따른 직접 유출량의 감소가 결과적으로 댐 유입량의 감소로 이어

진 것으로 분석되었다. 각 배출시나리오별 월별 댐 유입량의 변화를 살펴보면 8월(-46.9 %~-30.1 %), 9월(-59.5 %~-34.3 %)의 유입량 감소가 두드러지게 나타났다. 전체적인 변화패턴은 12월~7월의 증가, 8월~11월의 감소 추세가 계속되는 것으로 분석되었다. 계절별 변화 특성은 강수변화에 기인하여 봄, 겨울의 증가와 여름과 가을의 감소가 지배적이었다. 배출시나리오별 댐 유입량의 변화는 A2 시나리오 2020s, 2050s, 2080s에서 각각 -19.6 %, -3.2 %, -15.3 %, A1B 시나리오에서 -19.0 %, -7.4 %, -11.4 %, 마지막으로 B1 시나리오에서는 -12.2 %, -12.1 %, -9.0 %의 감소추세를 보였다.

한편, 우리나라의 경우 여름철 장마 등으로 인한 강우의 계절적 편중 특성으로 저수지 운영을 위한 관개, 홍수조절 등, 용수공급량의 변화 폭이 크다. 따라서 ECHAM5-OM의 기후변화 시나리오 적용에 따른 댐 유입량의 규모와 변동성을 파악하기 위해 유휴곡선을 작성하여 연중 95일, 185일, 275일, 355일 이상 지속되는 풍수량(Q95), 평수량(Q185), 저수량(Q275), 갈수량(Q355)에 대한 변화를 배출시나리오별로 비교 분석하였다(Table 4). 기준년인 2000년, 현재의 일별 댐 유입량 자료를 이용하여 작성된 유휴곡선으로부터 Q10(초과 확률 10 %)에 해당하는 홍수시 유량은 곡선 경사가 급한 형태를 나타내고 있어 홍수시의 유량이 매우 불안정하였으며, 갈수기 유휴역시 불안정한 것으로 분석되었다. 기후변화 시나리오 적용에 따른 유휴곡선의 변화 형태를 기준년과 비교했을 때, 홍수시 유량 및 풍수량의 큰 변화는 없었으나 평수량, 저수량, 갈수량이 증가하면서 다소 유휴이 안정되는 형태를 보였다. 하지만 특정 하천의 변동성을 단일년도의 자료만으로 파악하기

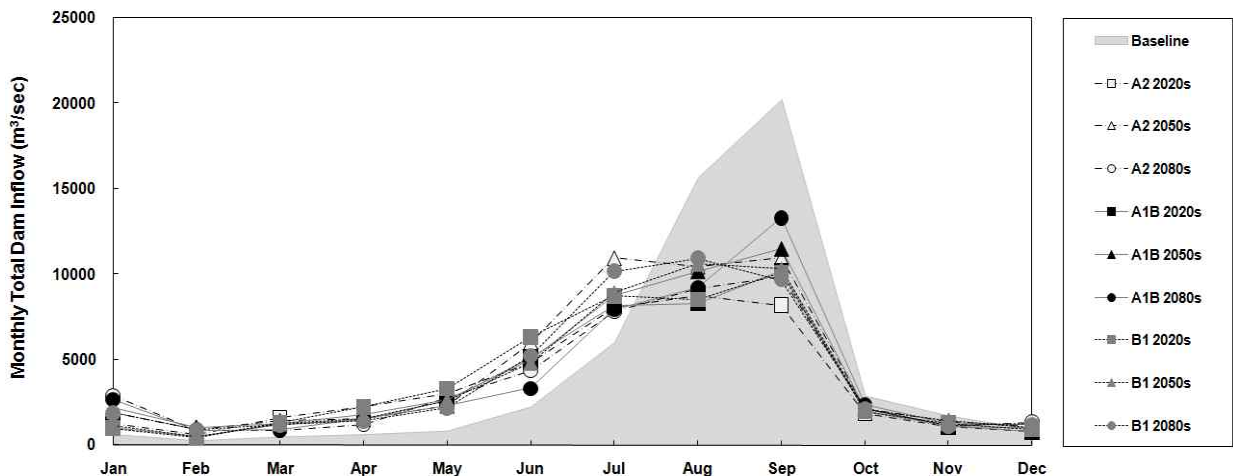


Fig. 5. Effect of Climate Change on Monthly Dam Inflow of the Chungju Lake under Downscaled A2, A1B and B1 Emission Scenarios in the 2020s, 2050s and 2080s

Table 4. Computation of Flow Duration Statistics

Scenario	Daily dam inflow (m <sup>3</sup> /sec)				CRR <sup>1</sup>	CFD <sup>2</sup>	
	Q95	Q185	Q275	Q355			
Baseline (2000)	102.0	34.1	19.6	8.7	503	93	
A2	2020s	101.2	60.6	33.5	18.5	84	46
	2050s	101.8	58.3	38.7	27.4	82	36
	2080s	107.1	58.1	33.8	23.6	93	34
A1B	2020s	96.1	54.1	31.3	15.2	147	56
	2050s	106.8	61.4	37.2	28.1	88	35
	2080s	98.6	62.7	33.8	23.3	124	31
B1	2020s	106.4	60.5	32.1	14.5	149	62
	2050s	103.2	58.4	33.8	15.8	131	61
	2080s	101.5	56.8	34.9	25.8	68	42

<sup>1</sup>CRR: Coefficient of River Regime  
<sup>2</sup>CFD: Coefficient of Flow Duration

에는 다소 무리가 있다고 판단되어 하상계수 (Coefficient of River Regime, CRR)와 유황계수 (Coefficient of Flow Duration, CFD)를 산정하여 유황의 변동성을 파악하였다. 먼저, 기준년인 2000년의 하상계수는 502.7로 국내의 주요 하천의 평균 하상계수(한국수자원공사 ‘다목적댐 운영 실무편람’참고, 2003)에 비해 매우 큰 것으로 분석되었다. 기후변화 시나리오 적용에 따른 하상계수를 살펴보면, 80~100 정도로 우리나라의 하상계수가 100~300 사이에 있다는 점을 고려했을 때, 유황이 크게 안정되는 것으로 분석되었다. 그러나 하상계수는 이상갈수 또는 이상홍수에 의해 그 값이 매우 크게 변화하기 때문에 오랜 기간 동안의 평균값을 사용하는 것이 보통이므로 위 연구결과에 의한 유황 특성을 그대로 반영하기에는 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 홍수시유량(Q10)과 갈수시유량(Q355)의 비로 정의되는 유황계수를 산정하여 유황의 변동성을 재검토 하였다. 그 결과, 현재의 유황계수가 93에서 31~62로 유황이 비교적 안정되는 것으로 분석되었다.

### 3.3.2 하천수질 변화

미래 기후변화에 따른 충주댐유역의 수문학적 거동 분석 결과를 토대로 기후변화가 하천수질에 미치는 영향을 분석하기 위해 유사량과 영양물질에 대한 오염부하량의 변동성을 분석하였다(Table 5). 한편, 본 연구에서는 USLE 인자의 변화가 없다고 가정하였기 때문에 SWAT 모형에서 MUSLE 공식에 의한 유사량 산정은 유출함수에 의해 결정된다.

Fig. 6은 기후변화 시나리오 적용에 따른 월별 유사량 및 T-N, T-P 오염부하량의 변화를 나타낸 것으로,

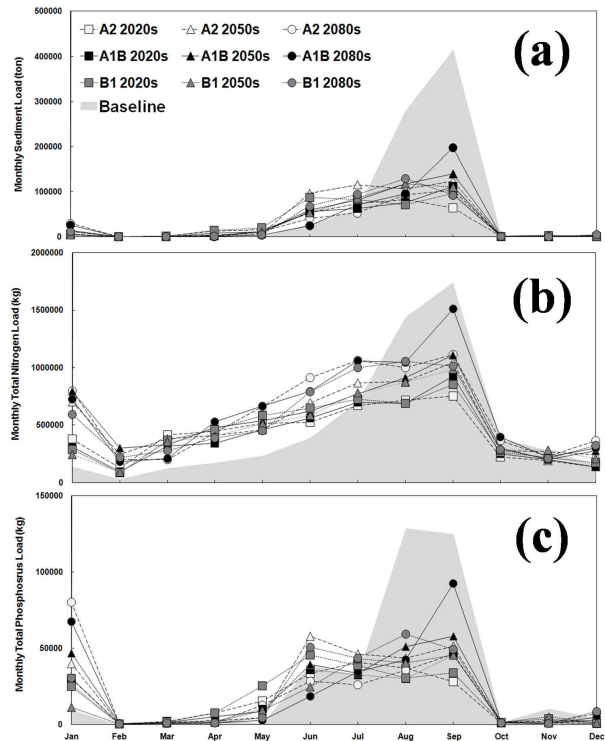


Fig. 6. Effects of Climate Change on Monthly Sediment (a), T-N (b) and T-P (c) Loads under Downscaled A2, A1B and B1 Emission Scenarios from ECHAM5-OM in the 2020s, 2050s and 2080s

먼저 유사량 모의결과를 살펴보면, 댐 유입량 변화 추세(Fig. 5)와 비슷한 패턴으로 8, 9월의 유사량이 크게 감소하였으며, 6, 7월에 다소 증가하는 경향을 보였다. 그로인해 겨울과 봄의 유사량이 증가하는 반면 여름과 가을에 감소하는 것으로 나타났는데 이는 수문요소별

분석에 따른 지표유출량의 감소(Table 3)에 기인하여 A2 2020s에서 최대 -61.2 %까지 감소하는 것으로 분석되었다. 영양물질에 대한 분석결과, T-N 오염부하량의 월별 변화는 12월~7월의 증가와 8월~11월의 감소경향이 지배적이었다. 연 변화율은 2020s에서 -15.4 %~-8.9 %의 감소를 보이다가 2050s에서 -4.4 %~+9.4 %, 2080s에서 +10.5 %~+28.8 %로 점차 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 계절별 변화를 살펴보면, 유사량의 변화와 마찬가지로 겨울과 봄에 증가하고 여름과 가을에 감소하는 것으로 분석되었다. 이는 질소의 기작이 인과는 달리 중간유출을 통해 하천으로 흘러들어가기 때문에 중간유출의 증가(Table 3)가 결과적으로 T-N 오염부하량의 증가에 영향을 미친 것으로 판단되어진다. 마지막으로 T-P 오염부하량의 월별 변화는 1월~5월까지 증가하는 경향을 보였으나 6월 이후 감소하는 것으로 나타났다. 계절별 변화 역시 겨울과 봄에 증가하였는데 특히, 1월의 증가폭이 상대적으로 크게 나타났다. 연 변화율은 -48.4 %(B1 2050s)~-25.1 %(A1B 2080s)로 나

타났는데, 이것은 유사량의 변화패턴과 유사한 경향을 보이는 것으로 인의 기작이 토립자에 흡착되어 하천으로 흘러가므로 지표유출과 유사에 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 비점원오염은 유출 오염이기 때문에 비점원오염을 관리하고 통제하기 위해서는 유출현상을 정확하게 이해해야 한다(최중대, 2006). 따라서 본 연구에서는 미래 기후변화에 따른 비점오염원의 유출특성을 파악하기 위해 강수유무에 의해 정의되는 우기(Wet day)와 건기(Dry day)의 유출 변화를 분석하였다. 여기서, 우기는 연중 직접유출(Direct runoff)이 발생하는 기간으로 정의하였다. Table 6은 기후변화에 따른 우기와 건기의 비점오염부하량의 변화율을 비교한 것으로 먼저, 유사량에 대한 우기와 건기의 변화를 살펴보았다. 모든 배출시나리오에서 지표유출량이 감소함에 따라 우기와 건기에서 -64.9 %~-41.1 %의 감소를 보이는 것으로 나타났다. T-N 오염부하량 변화를 보면, 우기의 T-N 변화율은 20% 내외의 증가와 감소를 나타냈으나, 2020s를

Table 5. Percent Change in Annual NPS Loads

Scenario		NPS loads		
		Sediment	T-N	T-P
A2	2020s	-61.2	-14.2	-44.5
	2050s	-41.3	7.9	-28.8
	2080s	-57.6	23.2	-33.1
A1B	2020s	-59.1	-15.4	-47.6
	2050s	-45.4	9.4	-30.3
	2080s	-46.8	28.8	-25.1
B1	2020s	-52.3	-8.9	-39.9
	2050s	-51.2	-4.4	-48.4
	2080s	-48.8	10.5	-29.5

Table 6. Percent Change in NPS Loads for Wet and Dry Days

Scenario		Wet days (%)			Dry days (%)		
		Sediment	T-N	T-P	Sediment	T-N	T-P
A2	2020s	-61.2	-13.6	-44.9	-62.8	-8.5	-16.6
	2050s	-41.1	+8.2	-29.0	-57.1	+23.9	-4.9
	2080s	-57.6	+14.3	-33.7	-57.5	+70.2	+14.8
A1B	2020s	-59.1	-17.6	-48.1	-59.9	-1.8	-7.9
	2050s	-45.3	+7.5	-30.7	-52.2	+38.8	+0.7
	2080s	-46.7	+18.6	-25.7	-51.9	+79.3	+20.5
B1	2020s	-52.2	-6.0	-40.2	-64.9	-15.2	-20.6
	2050s	-51.1	-10.1	-49.1	-59.0	+22.3	+0.4
	2080s	-48.7	+6.0	-29.9	-56.0	+42.7	+4.9

제외한 모든 배출시나리오에서 +22.3%~+70.2%의 증가를 보였다. 마지막으로 T-P 오염부하량 변화는 전체적으로 우기와 건기 모두 감소하였다. 특히, 우기에서 -25.7%~-49.1%로 크게 감소하는 것으로 분석되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 유역 모델링을 통해 미래 기후변화가 충주댐 유역의 하천수질에 미치는 영향을 평가하고자 ECHAM5-OM 모형의 결과로부터 편이보정 및 Downscaling에 의한 미래 기상자료를 생산하고 SWAT 모형을 이용하여 미래 수문학적 거동 특성 및 댐 유입하천의 수질변화를 모델링 하였다.

본 연구에서 적용한 ECHAM5-OM의 기후변화 시나리오는 현재를 기준으로 온도는 증가하나 강수량은 감소의 형태를 보였다. 강수량 감소에 따른 댐 유입량의 감소는 이수 및 치수관점에서 심각한 물부족 문제를 발생시킬 수 있으며, 댐운영 및 관리를 위한 장기적 측면에서의 대응방안을 검토할 필요가 있다. 또한 토지이용 및 식생 변화 등에 의한 유역환경의 변화는 하천의 유출특성뿐만 아니라 비점오염원에 의한 하천 수질과 함께 호소 수질악화로 인한 수생태계 변화를 초래할 것으로 예측된다. 따라서 기후변화에 대한 적응 및 대응전략 수립을 위해서는 수자원의 변동성뿐만 아니라 하천 및 호소수질 변화를 예측하고 정량적인 분석을 통한 적절한 대응방안을 마련해야 할 것이다.

한편, GCMs 모의결과로부터 작성된 기후변화 시나리오는 여러 가지 요인에 의한 많은 불확실성을 내포하고 있어 그에 따른 유역모형 모의결과 불확실성은 더욱 커지게 마련이다. 게다가 많은 매개변수를 필요로 하는 유역모형에서 매개변수 조정에 따른 불확실성을 고려하지 않았기 때문에 본 연구의 결과를 절대적 판단 기준으로 적용하기에는 무리가 있다. 하지만 본 연구를 통해 미래 온도와 강수의 변화, 그에 따른 수문요소 및 비점오염물질의 유출특성 변화를 파악하고 유역 모델링을 통해 평가기법을 제시함으로써 미래 수자원의 변동성을 전망해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 2-2-3, 50%) 및 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2009-0080745, 50%)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

김철검, 이정은, 김남원 (2007). “충주댐 상류유역의 유사 발생에 대한 시공간적인 특성.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제40권, 제11호, pp. 887-898.

박근애 (2008). 미래 기후변화가 농업수자원에 미치는 영향 연구. 박사학위논문, 건국대학교, pp. 68-89.

박종윤 (2009). SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화가 수문학적 거동 및 하천수질에 미치는 영향 평가. 석사학위논문, 건국대학교, pp. 1-4.

박종윤, 이미선, 이용준, 김성준 (2008). “SWAT 모형을 이용한 미래 토지이용변화가 수문-수질에 미치는 영향 분석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제2B호, pp. 187-197.

배덕효, 정일원 (2005). “기후변화에 따른 수자원 영향 평가.” **방재정보**, 한국방재협회, 제21호, pp. 16-22.

배덕효, 정일원, 권원태 (2007). “수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(I): 유역별 기후시나리오 구축.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 191-204.

안소라, 박민지, 박근애, 김성준 (2009). “기후변화가 경안천 유역의 수문요소에 미치는 영향 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제1호, pp. 33-50.

안소라, 이용준, 박근애, 김성준 (2008). “미래토지이용 및 기후변화에 따른 하천유역의 유출특성 분석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제2B호, pp. 215-224.

안재현, 유철상, 윤용남 (2001). “GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, pp. 335-345.

유철상, 이동률 (2000). “기후변화와 수자원: 국내의 연구동향.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제3호, pp. 42-47.

정일원, 배덕효, 임은순 (2007). “수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(II): 유역별 기후시나리오 구축.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 205-214.

한국수자원공사 (2003). 다목적댐 운영실무편람.

Alcamo, J., Döll, P., Kaspar, F., and Siebert, S. (1997). *Global change and global scenarios of water use and availability: An application of WaterGAP1.0*. Report A9701, Center for Environmental Systems Research, University of

- Kassel, Germany.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of American Water Resources Association*, JAWRA, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.
- Brown, L.C., and Barnell, T.O. Jr. (1987). *The enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS documentation and user manual*. EPA document EPA/600/3-87/007, USEPA, Athens, GA.
- Carter, T.R., Hulme, M., and Lal, M. (1999). *IPCC-TGCI Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment*, version 1, IPCC, Task Group on Scenarios for Impact Assessment.
- Diaz-Nieto, J., and Wilby, R.L. (2005). A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods impacts on low flows in the River Thames. *Climatic Change*, Vol. 69, pp. 245-268.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007*. The Physical Science Basis, IPCC Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.E. (1970). River flow forecasting through conceptual models, Part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2001). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2000*. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., and Papendick, R.I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 50, No. 4, pp. 1031-1036.
- Soil Survey Staff (1996). *National Soil Survey Handbook*. title 430-VI, USDA Natural Resources Conservation Service, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Viner, D., and Mayer, L., (1994). *Climate Change Scenarios of Impact Studies in the UK*. Report, Contract No PECD 7/12/96, CRU, Norwich, University of East Anglia.
- Wilby, R.L., and Harris, I. (2006). A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames. *Water Resources Research*, Vol. 42, pp. 1-10.
- Williams, J.R. (1975). *Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor*. In present and prospective technology for predicting sediment yield and sources, ARS-S-40, USDA-ARS.
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1965). *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains*. Agriculture Handbook 282, USDA-ARS.
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Agriculture Handbook 282, USDA-ARS.
- Zhang, X., Srinivassan, R., and Hao, F. (2007). "Predicting Hydrologic response to climate change in the Luohe river basin using the SWAT model." *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, ASABE, Vol. 50, No. 3, pp. 901-910.

논문번호: 09-090	접수: 2009.07.27
수정일자: 2009.09.02	심사완료: 2009.09.02