

# SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화가 충주댐 유역의 수문학적 거동 및 하천수질에 미치는 영향 평가

## Assessment of Future Climate Change Impacts on Hydrological Behavior and Stream Water Quality using SWAT Model

박종윤\*, 박민지\*\*, 안소라\*\*\*, 박근애\*\*\*\*, 김성준\*\*\*\*\*

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

### 요 지

본 연구에서는 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하여 미래 기후변화가 댐 유역의 하천수질에 미치는 영향을 분석하였다. 충주댐 상류유역(6,585.1km<sup>2</sup>)에 대해 민감도 분석을 통해 최적의 유출 및 유사관련 매개변수를 선정하였으며, 충주호 유입하천 상류 2개 지점/영월1, 영월2)과 유역 출구점을 대상으로 일별 유출량 및 월별 수질자료를 바탕으로 모형의 보정(1998-2000) 및 검증(2001-2003)을 실시하였다. 미래 기후자료는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제공하는 SRES/Special Report on Emission Scenarios) A2, A1B, B1 기후변화시나리오의 MIROC3.2 hires와 ECHAM5-OM 모델의 결과 값을 이용하였다. 먼저 과거 30년 기후자료(1977-2006, baseline)를 바탕으로 각 모델별 20C3M(20th Century Climate Coupled Model)의 모의 결과 값을 이용하여 강수와 온도를 보정한 뒤 Change Factor(CF) Method로 Downscaling 하였으며, 미래 기후변화 시나리오는 2020s, 2050s, 2080s의 세 기간으로 나누어 각각 분석하였다. 기후변화 시나리오 적용에 따른 SWAT 모의결과로부터 기후변화가 수문학적 거동 및 하천수질에 미치는 영향을 평가하였다.

**핵심용어** : 기후변화, GCM, Downscaling, 비점오염원, 수질모델링, SWAT

### 1. 서 론

2007년 2월 2일 UN(United Nations) 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 지구 온난화에 의한 미래 기온의 상승과 강수량의 패턴변화는 증발산이나 토양수분 등의 변화로 이어

\* 정회원 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정·E-mail : bellyon@konkuk.ac.kr  
\*\* 정회원 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정·E-mail : imag@konkuk.ac.kr  
\*\*\* 정회원 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사·E-mail : ahnsora@konkuk.ac.kr  
\*\*\*\* 정회원 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사후연구원·E-mail : dolpin2000@konkuk.ac.kr  
\*\*\*\*\* 정회원 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수·E-mail : kimsj@konkuk.ac.kr

저 궁극적으로는 물 순환의 변화를 초래하며 유출량 변화로 이어지게 된다(안재현 등, 2001; 유철상과 이동률, 2000). 지금까지 국내에서 미래 기후변화에 따른 수자원 영향평가는 주로 강우유출해석에 의한 수문학적 영향 및 사회·경제적 영향평가에 치중되어왔다. 반면, 하천 및 호소 수질, 수생태계, 식생변화 등과 같은 환경적 영향평가에 대한 연구는 국외에 비해 아직 미비한 실정이다(박종윤, 2009). 이에 본 연구에서는 충주댐 유역을 대상으로 미래 기후변화에 따른 하천유역의 유출특성 변화를 정량적으로 규명하여 미래 댐 유입량 변화에 따른 이수 및 치수대책 뿐만 아니라 그로인한 하천의 수질변화를 전망하여 효율적인 유역환경관리와 미래 기후변화로 인해 야기될 수 있는 여러 상황에 능동적으로 대처할 수 있는 토대를 마련하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 대상유역

본 연구에서는 충주호를 포함하는 충주댐 상류유역을 대상유역으로 선정하였다(Fig. 1). 유역면적은 6,585.1km<sup>2</sup>이며, 유역평균표고는 609.1m, 유역평균경사는 36.9%로 국내 북동부 산악지역에 위치해있다. 논과 밭이 유역면적의 2.8%와 8.8%를 차지하며 산림면적은 5,573.1km<sup>2</sup>으로서 유역면적의 84.6%를 차지하고 있다. 연평균 강수량은 1,359.5mm, 평균온도는 9.4℃ 이다.

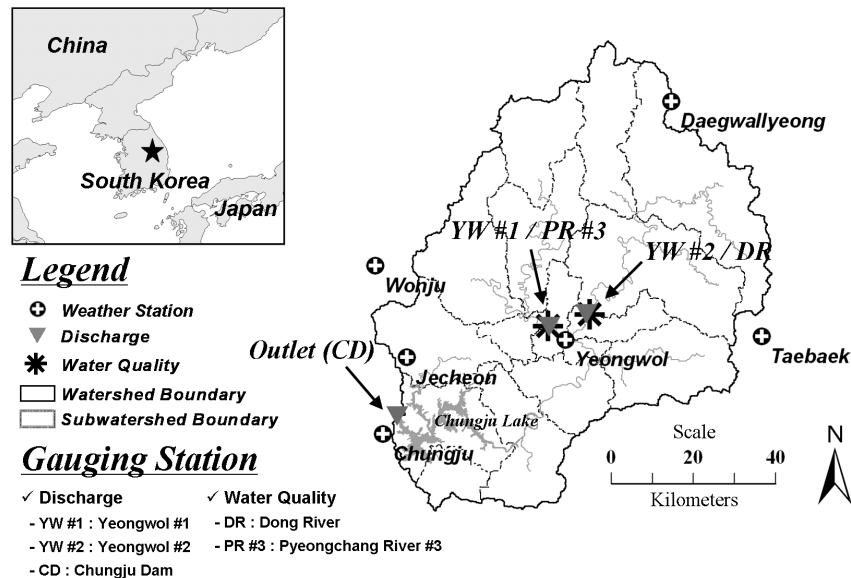


Fig. 1. Study area (Chungju dam watershed).

### 2.2 SWAT 모형의 적용

본 연구에서는 기후변화 시나리오 적용을 위해 수문-수질모의가 가능한 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)모형(Arnold et al., 1998)을 선정하고, LH-OAT (Latin Hypercube - One-factor-At-a-Time) 방법을 이용한 민감도 분석을 통해 보정을 실시하였다. Fig. 1의 유역 출구점(충주댐, CD)을 비롯한 영월1(YW#1), 영월2(YW#2) 지점의 일 유출량 자료를 이용하여 보정(1998~2000) 및 검증(2001~2003)을 실시하였으며, 수질항목(Sediment, T-N, T-P)에 대한 보정은 상류의 평창강3(PR#3), 동강(DR) 지점에 대해 환경부의 오염부하량 자료를 이용하여 보정하였다.

## 2.3 기후변화 시나리오 작성

본 연구에서는 IPCC AR4(Fourth Assessment Report)에서 제시하고 있는 24개의 GCMs(General Circulation Models) 중 일본 NIES(National Institute for Environmental Studies)에서 개발한 MIROC3.2 hires 모형과 독일 MPII-M(Max Planck Institute for Meteorology)에서 개발한 ECHAM5-OM 모형을 선정하였다. GCM 모의결과로부터 기후변화에 의한 영향평가를 위해서는 지구스케일의 자료를 유역스케일로 상세화하는 작업이 필수적으로 수행되어야 한다. 본 연구에서 유역규모의 기후변화 시나리오를 작성하기 위한 Downscaling 방법은 Alcamo 등(1997)이 사용했던 오차보정(Bias Correction)방법을 이용하여 통계적인 유사성을 가지도록 보정한 후, CF Method를 이용하여 강수량, 온도, 상대습도, 풍속 등의 6개 기상인자에 대하여 A2, A1B, B1 시나리오별 결과 값을 2020s(2010-2039), 2050s(2040-2069), 2080s(2070-2099)로 구분하고 2000년을 기준년(Baseline)으로 선정하여 유역규모의 일 기상자료를 구축하였다. Table 1은 Downscaling 결과에 따른 계절별 온도와 강수의 변화를 나타낸 것이다.

Table 1. Changes in degree (°C) / percent (%) for future seasonal temperature and precipitation by CF /change factor) statistical downscaling method

Scenario	Baseline	MIROC3.2 hires		ECHAM5-OM		
	°C / mm	A1B	B1	A2	A1B	B1
<b>Spring (March - May)</b>						
2020s		+ 1.0/+ 43.9	+ 0.9/+ 57.8	+ 0.5/+ 47.9	+ 0.3/+ 62.7	- 0.1/+ 60.3
2050s	9.7/132.4	+ 2.4/+ 58.0	+ 2.0/+ 60.2	+ 1.7/+ 69.5	+ 2.0/+ 60.4	+ 1.0/+ 53.4
2080s		+ 3.6/+ 82.7	+ 2.5/+ 69.4	+ 3.4/+ 69.0	+ 3.1/+ 58.7	+ 2.4/+ 81.8
<b>Summer (June - August)</b>						
2020s		+ 1.4/+ 11.1	+ 1.5/+ 15.0	- 0.1/- 14.8	- 0.1/- 10.6	+ 0.1/- 14.6
2050s	23.0/664.2	+ 3.0/+ 19.7	+ 2.3/+ 16.4	+ 0.9/- 7.1	+ 1.8/- 6.6	+ 0.9/+ 0.3
2080s		+ 4.3/+ 25.9	+ 3.1/+ 15.0	+ 2.6/- 13.4	+ 2.6/- 0.7	+ 1.6/- 13.1
<b>Autumn (September - November)</b>						
2020s		+ 2.3/- 16.2	+ 2.3/- 11.0	+ 1.7/- 35.0	+ 1.8/- 33.1	+ 1.8/- 44.2
2050s	11.2/343.8	+ 3.9/- 0.4	+ 3.2/+ 0.1	+ 3.2/- 33.3	+ 3.5/- 33.3	+ 2.9/- 31.5
2080s		+ 5.3/+ 14.4	+ 4.2/- 8.0	+ 5.2/- 23.8	+ 4.9/- 41.0	+ 3.8/- 38.3
<b>Winter (December - February)</b>						
2020s		+ 2.9/+ 161.6	+ 2.8/+ 132.2	+ 1.1/+ 131.9	+ 0.8/+ 151.6	+ 1.0/+ 161.1
2050s	- 3.3/43.3	+ 4.8/+ 138.8	+ 4.2/+ 141.0	+ 2.6/+ 187.7	+ 3.3/+ 126.7	+ 1.9/+ 182.2
2080s		+ 6.1/+ 154.3	+ 5.0/+ 116.0	+ 4.8/+ 174.1	+ 4.6/+ 178.8	+ 3.3/+ 192.9
<b>Annual (January - December)</b>						
2020s		+ 1.9/+ 12.9	+ 1.9/+ 17.1	+ 0.8/- 7.4	+ 0.7/- 2.0	+ 0.7/- 7.4
2050s	10.2/1183.6	+ 3.5/+ 23.1	+ 2.9/+ 21.8	+ 2.1/+ 2.0	+ 2.7/- 1.1	+ 1.7/+ 4.5
2080s		+ 4.8/+ 34.4	+ 3.7/+ 18.7	+ 4.0/+ 0.8	+ 3.8/+ 1.7	+ 2.8/- 1.0

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 수문학적 거동 변화

본 연구에서는 SWAT 모형의 적용성을 평가한 후, 기후변화에 따른 충주댐 유역의 수문학적 거동 변화 양상을 파악하기 위해 각 시나리오별 강수, 증발산, 지표유출, 지표하유출, 지하수유출,

유출량에 대한 변화를 분석하였다. 먼저, 물 순환과정의 구성요소 중 가장 중요한 증발산량의 변화는 온도 상승에 따라 MIROC3.2 hires와 ECHAM5-OM 시나리오에서 모두 증가하는 경향을 나타냈으며 기준년(2000)과 비교했을 때, 최대 23.1% 까지 증가하는 것으로 분석되었다. 지표유출량의 변화는 수문-수질해석에 중요한 변수로서 MIROC3.2 hires 시나리오의 지표유출량은 2020s, 2050s, 2080s로 가면서 최대 47.7% 증가하였으나, ECHAM5-OM은 전체적으로 지표유출량이 14.0%~34.3% 감소하는 것으로 나타났다. 지표하유출과 지하수유출은 두 GCM 모두 증가추세를 보이는 것으로 분석되었다. 한편, 유출량은 MIROC3.2 hires 시나리오에서 11.8%~39.8%의 증가를 나타낸 반면, ECHAM5-OM 시나리오에서는 3.2%~19.6%의 감소를 보이는 것으로 분석되었다.

### 3.2 하천수질 변화

수문학적 거동변화에 따른 하천수질의 변화는 유사량 및 영양물질 오염부하량에 대하여 분석을 실시하였다(Fig. 2). 지표유출량 변화에 따른 연간 유사량의 변화는 두 GCM에서 -61.2% ~ +27.3%의 변화를 보였으며, 봄과 겨울의 유사량이 증가하는 반면, 가을에는 감소하는 것으로 분석되었다. T-N(Total Nitrogen), T-P(Total Phosphorus) 오염부하량 역시 계절별 변화 추세는 같았으며, 연간 오염부하 배출량은 각각 -15.4% ~ +87.3%와 -48.4% ~ +19.6%의 변화를 보였다. 특히, 직접유출에 의해 정의되는 우기와 건기에 대한 비점오염물질의 유출거동 분석결과를 보면, 지표유출량은 증가하였으나 홍수기 유량 감소에 따른 침투유출량의 감소로 인해 우기의 유사량은 약간의 증가와 감소 경향을 보였으며, 그에 기인하여 T-P 부하량 또한 같은 변화를 나타냈다. 반면, T-N 부하량은 지하수유출 증가에 따라 평균 50% 이상 증가하는 것으로 분석되었다.

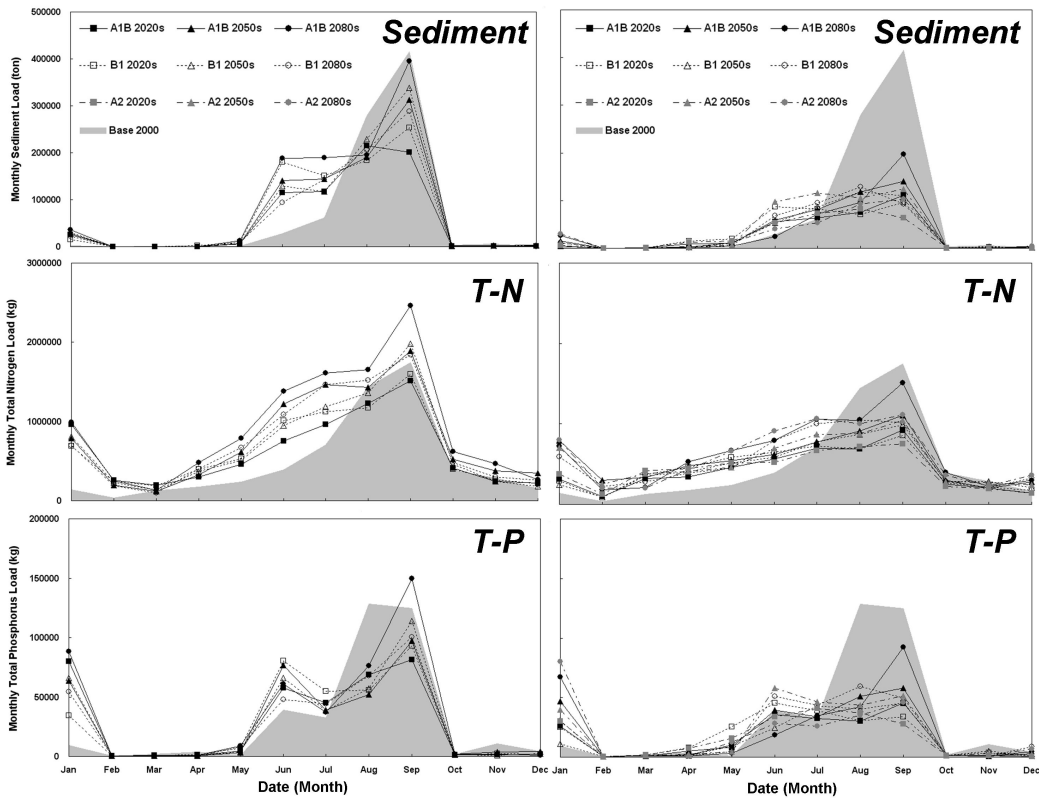


Fig. 2. Effects of climate change on monthly sediment, T-N and T-P loads from MIROC3.2 hires (left panels) and ECHAM5-OM (right panels).

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서 적용한 MIROC3.2 hires와 ECHAM5-OM의 기후변화 시나리오는 현재를 기준으로 온도는 증가하나 강수량은 각각 증가와 감소의 형태를 보였다. MIROC3.2 hires의 강수량 증가에 따른 댐 유입량의 증가는 댐운영 및 관리를 위한 장기적 측면에서의 대응방안을 검토할 필요가 있으며, 비점오염원에 의한 호소 유입하천의 수질 악화로 인한 호소수질 및 비점오염원 관리를 위한 관리방안이 마련되어야 할 것이다. 또한, ECHAM5-OM의 강수량 감소에 따른 댐 유입량의 감소는 이수 및 치수관점에서 심각한 물부족 문제를 발생시킬 수 있을 것으로 전망된다.

한편, 기후변화 시나리오는 여러 가지 요인에 의한 많은 불확실성을 내포하고 있어 그에 따른 모의결과의 불확실성은 더욱 커지게 마련이다. 또한 토지이용 및 식생변화 등의 유역환경변화를 고려하지 않았기 때문에 본 연구의 결과를 절대적 판단기준으로 적용하기에는 무리가 있다. 하지만 본 연구를 통해 미래 온도와 강수의 변화, 그에 따른 수문요소 및 비점오염물질의 유출특성 변화를 파악하고 그 평가기법을 제시함으로써 미래 수자원의 변동성을 전망해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 : 2-2-3, 50%)에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

1. 박종윤(2009). SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화가 수문학적 거동 및 하천수질에 미치는 영향 평가, 석사학위논문, 건국대학교.
2. 안재현, 유철상, 윤용남(2001). GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석. 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, pp. 335-345.
3. 유철상, 이동률(2000). 기후변화와 수자원: 국내의 연구동향. 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제33권 3호, pp. 42-47.
4. 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.
5. 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, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.
6. IPCC(2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis, IPCC Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.