

CE-QUAL-W2를 이용한 충주호의 기후변화에 따른 탁수 및 부영양화 영향평가

Evaluation of Future Turbidity Water and Eutrophication in Chungju Lake by Climate Change Using CE-QUAL-W2

안 소 라* / 하 림** / 윤 성 완*** / 김 성 준****

Ahn, So Ra / Ha, Rim / Yoon, Sung Wan / Kim, Seong Joon

Abstract

This study is to evaluate the future climate change impact on turbidity water and eutrophication for Chungju Lake by using CE-QUAL-W2 reservoir water quality model coupled with SWAT watershed model. The SWAT was calibrated and validated using 11 years (2000~2010) daily streamflow data at three locations and monthly stream water quality data at two locations. The CE-QUAL-W2 was calibrated and validated for 2 years (2008 and 2010) water temperature, suspended solid, total nitrogen, total phosphorus, and Chl-a. For the future assessment, the SWAT results were used as boundary conditions for CE-QUAL-W2 model run. To evaluate the future water quality variation in reservoir, the climate data predicted by MM5 RCM (Regional Climate Model) of Special Report on Emissions Scenarios (SRES) A1B for three periods (2013~2040, 2041~2070 and 2071~2100) were downscaled by Artificial Neural Networks method to consider Typhoon effect. The RCM temperature and precipitation outputs and historical records were used to generate pollutants loading from the watershed. By the future temperature increase, the lake water temperature showed 0.5°C increase in shallow depth while -0.9°C in deep depth. The future annual maximum sediment concentration into the lake from the watershed showed 17% increase in wet years. The future lake residence time above 10 mg/L suspended solids (SS) showed increases of 6 and 17 days in wet and dry years respectively comparing with normal year. The SS occupying rate of the lake also showed increases of 24% and 26% in both wet and dry year respectively. In summary, the future lake turbidity showed longer lasting with high concentration comparing with present behavior. Under the future lake environment by the watershed and within lake, the future maximum Chl-a concentration showed increases of 19 % in wet year and 3% in dry year respectively.

Keywords : CE-QUAL-W2, climate change, lake water quality, turbidity water, eutrophication

요 지

본 연구에서는 충주댐을 대상으로 유역모델인 SWAT과 저수지모델인 CE-QUAL-W2를 연계 적용하여 기후변화에

* 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (e-mail: ahnsora@konkuk.ac.kr)

Doctoral Student, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

** 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사수료 (e-mail: rim486@konkuk.ac.kr)

Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

*** 충북대학교 환경공학과 박사 후 연구원 (e-mail: mswhdqud@hanmail.net)

Post Doctor, Dept. of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

**** 교신저자, 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수 (e-mail: kimsj@konkuk.ac.kr, Tel: 02-450-3749)

Corresponding Author; Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

따라 저수지로 유입되는 하천의 유량 및 탁수발생량을 모의하고, 저수지내의 탁수변화 및 부영양화 영향평가를 통한 저수지 수환경 변화를 전망하였다. 먼저 SWAT을 적용하여 강우시 저수지 유입하천의 유량 및 수질을 모의하여 모델의 재현성을 검토하였으며, 모형의 보정(2000~2005)과 검증(2006~2010) 결과 모델 예측값과 실측값이 적절하게 일치하는 것으로 나타났다. SWAT의 결과를 CE-QUAL-W2의 하천유량 및 유입수 수질 경계조건 입력 자료로 활용하고, 보정(2010년)과 검증(2008년)을 통하여 저수지 내 시간에 따른 물수지, 수온 변화, 부유물질(SS), T-N, T-P 및 부영양화(Chl-a) 양상 등을 분석하고 모델의 재현성을 검토하였다. 이후 기후변화 시나리오 적용에 따른 저수지 내 수환경 변화를 모의하기 위한 기후변화 자료로 IPCC AR4 GCM (ECHO-G)을 고해상도 지역기후시나리오로 개선시킨 RCM (MM5)의 A1B 시나리오를 다시 태풍사상을 고려한 인공신경망 기법에 의해 상세화하여 이용하였다. 기후변화 시나리오에 따른 기온증가의 영향으로 미래로 갈수록 상층수온은 증가하는 반면 심층수온은 감소하는 경향을 보였다. SS 최고유입농도는 평수년에 비해 풍수년에 17%, 갈수년에 0.2% 가량 증가하는 것으로 나타났다. 호소내 SS 10mg/L 이상 점유일수는 평수년에 비해 풍수년이 6일, 갈수년이 17일 증가하였고, 점유율 역시 풍수년에 24%, 갈수년에 26% 가량 증가하는 것으로 분석되었다. 미래로 갈수록 기후변화가 충주댐 탁수 장기화에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. Chl-a의 최고농도는 평수년에 비해 풍수년에 19%, 갈수년에 3% 가량 조류의 농도가 증가되는 것으로 나타나 조류의 영향이 커지는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : CE-QUAL-W2, 기후변화, 호소수질, 탁수, 부영양화

1. 서 론

우리나라의 연간 물 이용량은 약 337억³m³이며, 이중 약 177억³m³ (53%)은 댐을 통해 이용하고 있다. 이처럼 중요한 용수공급원인 댐은 자연하천의 흐름에 변화를 주며 하천의 유희와 생태계 서식환경에 가장 많은 영향을 미치는 수리구조물로서 정체수역을 형성하여 물의 체류시간을 길게 하고 부영양화 및 조류의 과잉 성장을 유발한다(Jung et al., 2008; Kim and Chung, 2011). 최근 기후변화로 인한 기온상승 및 집중강우에 의한 홍수발생 증가로 인해 탁수의 장기화 현상 및 조류의 이상증식에 따른 부영양화 현상은 더욱 빈번히 발생되고 있어 생태계에 악영향을 미치고 있다. 따라서 댐의 지속가능한 이용과 저수지 수질 및 생태계에 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 기후변화에 의한 유역 및 저수지 수질변화를 예측하고 적절한 대응책을 강구해야 한다.

현재 국내에서 많이 사용되고 있는 CE-QUAL-W2 모형은 저수지 수체의 2차원 횡방향 평균 수리 및 수질해석 모형이다. 저수지의 폭이 좁고 길며 수심이 깊은 우리나라 저수지 수체에 매우 적합한 모형이다. 특히 저수지 성층화 현상과 밀도류 해석이 뛰어나며, 하천과 저수지의 연계모의가 가능해져 점차 그 활용도가 증가되고 있는 추세이다(Chung et al., 2007). 그동안 CE-QUAL-W2 모형을 이용하여 국내 댐을 대상으로 수질모델링을 수행한 연구는 다수 진행되어왔다. 호소 내 수온분포 변화 및 탁수 거동 변화를 예측한 연구로 소양호(Kim et al., 2001), 대청호(Chung, 2004; Chung et al., 2005, Chung et al., 2007),

임하호(Yi et al., 2005), 용담호(Kim and Chung, 2011) 등을 대상으로 한 다양한 연구들이 진행된 바 있으며, 부영양화 현상을 모의한 연구는 대청호(Chung et al., 2007), 충주호(Ahn et al., 2013)를 대상으로 한 연구가 진행된 바 있다. 국외에서도 CE-QUAL-W2 모형을 이용하여 저수지내의 수온 및 수질모델링에 관한 연구(Ostfeld and Salomons, 2005; Kuo et al., 2006; Norton and Bradford, 2009; Deus et al., 2013; Martin et al., 2013)가 활발히 진행되어 왔다.

또한 본 연구에서와 같이 유역모형과 저수지모형을 연계하여 모델링을 시도한 연구도 있다. Debele et al. (2006)은 유역모형인 SWAT과 저수지모형인 CE-QUAL-W2를 선정하여 두 모형의 연계과정을 제안하고, Cedar Creek 유역과 Cedar Creek 저수지에서 수질항목들의 상호작용을 분석하였다. Yi et al. (2008)은 용담호 유역을 대상으로 강우시 저수지로 유입하는 탁수를 HSPF 모형을 이용하여 예측한 후, CE-QUAL-W2 모형에 적용하여 특정 강우시 저수지에 발생할 수 있는 탁수 현상을 예측하였다. 더 나아가 Park et al. (2013)은 유역모형은 SWAT과 저수지모형인 WASP을 연계하여 충주호 유역에 적용하고, A1B 기후변화 시나리오를 이용하여 미래 기후변화가 하천유역 및 호소 수질에 미치는 영향을 평가한 바 있다. 이처럼 현재까지 많은 연구들이 이루어지고 있지만, 대부분의 연구들이 저수지 수질 모형을 이용하여 저수지내 수질현상을 예측하는 연구이며, 저수지로 유입되는 유역의 본류 및 지류하천과 저수지 수체의 수질현상을 연계하여 모델링하거나 기후변화 시나리오를 적용하여 미래 저수

지 수질을 예측하는 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 충주호 유역을 대상으로 유역모형인 SWAT과 저수지모형인 CE-QUAL-W2를 이용하여 기후변화에 따른 하천 및 호소의 수질에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 기후변화 적용을 위해 RCM(MM5)의 AIB 시나리오를 상세화 하여 SWAT 모형에 적용하여 하천유역의 미래 유량 및 수질변화를 전망하고, SWAT의 결과를 CE-QUAL-W2의 입력 자료로 활용하여 기후변화에 따른 호소 내 수온, 탁수변화 및 부영양화 영향평가를 통한 저수지 수환경 변화를 전망하고자 한다.

2. 대상유역

본 연구의 대상유역은 충주호를 포함하는 충주댐 상류 유역으로 유역면적은 6,661.8 km²이다. 충주댐 유역의 평균표고는 609.1m, 유역 평균경사는 36.9%로 우리나라 북동부 산악지역에 위치해 있으며, 산림면적은 5,573.1 km²로서 유역면적의 84.6%에 이르는 산림유역이다. 행정구역상으로는 강원도, 충청북도, 경상북도가 각각 69.9%, 28.4%, 1.7%를 차지하고 있다. 주요 유입하천으로는 본류인 남한강, 지류인 제천천과 동달천이 합류되며, 연평균 강수량은 1,359.5mm이며, 평균기온은 9.4℃이다. 충주호는 한강유역의 홍수조절 및 한강유역의 용수난을 해결하기 위해 건설된 다목적댐 저수지로 1985년 10월에 완공되어 담수가 시작되었고, 최대저수용량은 2,750 10⁶m³, 저수

면적은 97 km², 총 길이는 75 km, 최대 수심은 83 m이다 (Ahn et al., 2013). 충주댐은 서울 수도권지역에 연간 33억 8,000만t의 각종 용수를 공급하는 중요한 공급원이다. Fig. 1에는 SWAT 유역모델링을 위한 충주댐유역의 기상, 수문, 수질관측소 현황과 CE-QUAL-W2 호소 수질모델링을 위한 충주호의 본류 및 지류 현황을 나타내었다.

3. 재료 및 방법

3.1 적용 모형의 개요

SWAT (Soil and Water Assessment Tool)은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준 분포형 모형이다. 이 모형은 물리적 기반의 준분포형 장기 강우-유출 모형으로서, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출의 영향을 예측하기 위해 개발되었으며 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표유출, 기저유출, 지하수, 토양수분 등에 대한 모의를 각 수문반응단위(HRUs, Hydrologic Response Units) 별로 계산할 수 있다(Arnold and Allen, 1996).

SWAT에서 일별 유출량은 SCS 방법을 통하여 산정하며, 잠재증발산량의 산정에는 Hagreaves 방법, Priestly-Taylor 방법, Penman-Monteith 방법을 이용한다. 강우와 유출에 의한 침식은 수정범용토양유실공식(MUSLE:

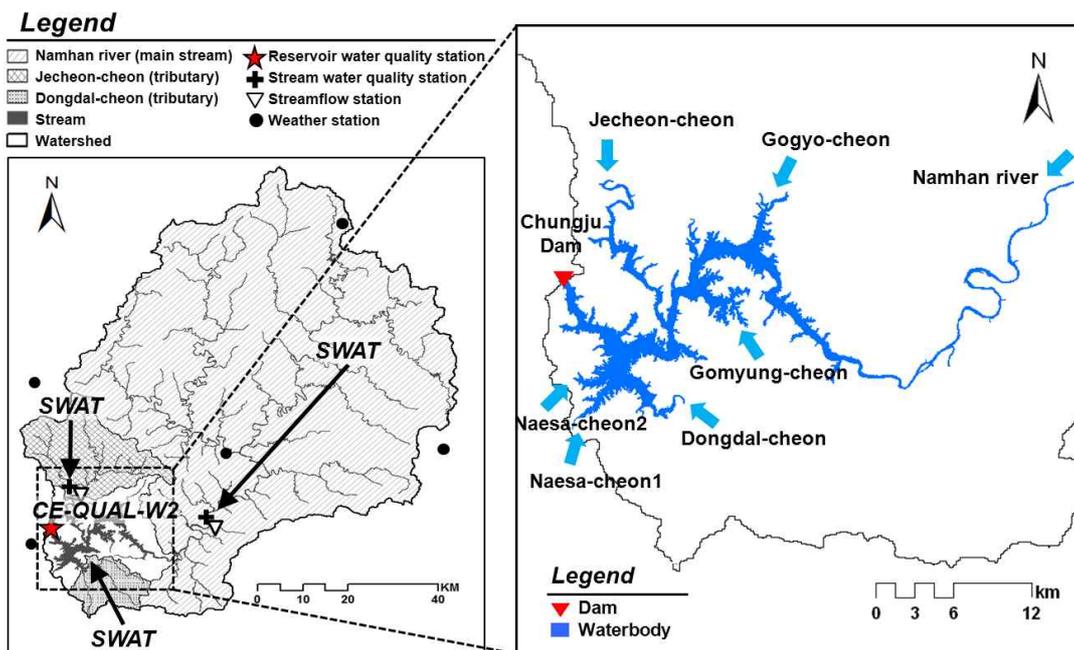


Fig. 1. Location of Chungju Lake and Its Watershed

Modified Universal Soil Loss Equation, Williams, 1975)에 의해 계산된다. MUSLE는 Wischmeier and Smith (1965; 1978)에 의해 개발된 범용토양유실공식(USLE: Universal Soil Loss Equation)의 수정버전이다. USLE에서는 강우 에너지의 함수로서, 평균 연간 총 침식량을 예측하는 반면, MUSLE에서는 강우에너지 인자가 유출인자로 대체된다. 영양물질 추적을 위해 SWAT에서 사용되는 하천 내 동역학은 QUAL2E (Brown and Barnwell, 1987)로부터 채택되었다. 이는 하천 내 용해되거나 유사에 부착된 영양물질을 추적하고 토양입자에 붙어 있는 영양물질은 주수로 통해 지표면 유출로 이송된다. 이러한 질소와 인은 HRU에서의 유사량과 관계가 있기 때문에 유사량의 변화는 영양물질 부하량에 영향을 미칠 것이다(Neitsch et al., 2001). SWAT에서 영양물질의 이동은 Fig. 2와 같다.

CE-QUAL-W2 모형은 미공병단(U.S Army Corps of Engineers)에서 1986년 개발된 2차원 횡방향 평균 수리 및 수질모형이다. 이 모형은 하천, 저수지, 하구 또는 이들이 결합된 시스템에 적용되어 왔으나, 폭 방향의 수질이 균일하다고 가정하므로 우리나라 대부분의 인공저수지와 같이 수심이 깊고 흐름방향에 비해 상대적으로 폭이 좁은 수체에 가장 적합하다고 알려져 있다. CE-QUAL-W2 모형은 저수지 수위변동, 흐름방향 및 수심방향의 유속분포, 수온 그리고 28가지 수질항목의 모의가 가능하며, 지류 유입, 점 및 비점오염원, 하류방류(Releases), 취수(Withdrawal) 등 다양한 유입 및 방류조건에 대한 모의 기능이 포함되어 있다. 그리고 하천과 저수지의 연계모의 기능, 수리동력학 지배방정식에 저수지 바닥 경사항 고려, 입력자료의 선형 보간(Interpolation) 기능, 사용자 편의 프로그램(GUI) 등 다양한 기능이 포함되어 있다. 현재 W2 모형은 미 육군 공병단(US Army Corps of Engineers), 미 개척국(USBR), 테네시 유역 관리청(TVA) 등 미국의 주요 저수지 관리 기관에서 댐 저수지의 수질관리를 위한 모형으로 광범위하게 활용되고 있다(Cole and Tillman, 2001).

CE-QUAL-W2의 수리해석은 자유수표고(η), 압력(P), 횡방향 유속(U), 종방향 유속(W), 구성성분 농도(Φ), 밀도(ρ) 등 6가지 변수에 대한 운동방정식, 연속방정식, 이류 확산방정식, 수표면 고도 방정식, 수압 방정식, 상태방정식의 6개의 지배방정식(Eqs. (1a)~(1f))을 사용하여 다양한 유한차분수치해석법을 사용하여 계산한다.

$$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial BP}{\partial x} + \frac{\partial (BA_x \frac{\partial U}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \quad (1a)$$

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB \quad (1b)$$

$$\frac{\partial U\Phi}{\partial t} + \frac{\partial UB\Phi}{\partial x} + \frac{\partial WB\Phi}{\partial z} - \frac{\partial (BD_x \frac{\partial \Phi}{\partial x})}{\partial x} - \frac{\partial (BD_z \frac{\partial \Phi}{\partial z})}{\partial z} = q_\Phi B + S_\Phi B \quad (1c)$$

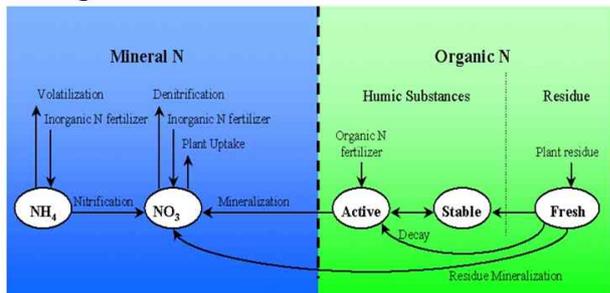
$$\frac{\partial B_\eta \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_n^h UB dz - \int_n^h qB dz \quad (1d)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g \quad (1e)$$

$$\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{ISS}) \quad (1f)$$

여기서, U 는 x 방향, W 는 z 방향으로 평균화된 유속($m \cdot s^{-1}$), ρ 는 밀도($kg \cdot m^{-3}$), A_x 는 x 방향 운동 확산계수($m^2 \cdot s^{-1}$), τ_x 는 수평방향 전단력($m^2 \cdot s^{-1}$), q 는 유입 또는 유출유량($m^3 \cdot s^{-1}$), η 는 자유수표면 위치(m), g 는 중력가속도($m \cdot s^{-2}$), B 는 수체의 폭(m), t 는 시간(sec), P 는 압력($N \cdot m^2$), Φ 는 물질농도($g \cdot m^{-3}$), D_x 는 x 방향의 확산 계수($m^2 \cdot s^{-1}$), S_Φ 는 반응에 의한 유입 또는 유출량($g \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$), h 는 총 수심(m)이다.

Nitrogen



Phosphorus

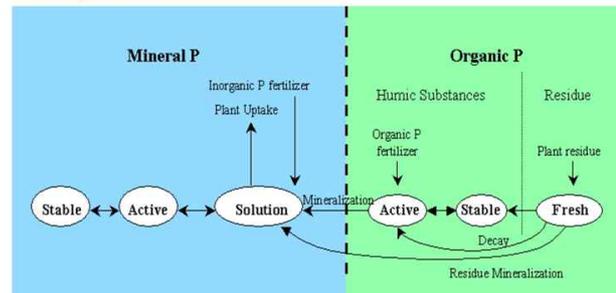


Fig. 2. Partitioning of Nitrogen and Phosphorus in SWAT

3.2 기후변화 시나리오 자료

3.2.1 기후변화 시나리오 및 Downscaling

국립기상연구소에서는 2002년 동아시아 주변의 기후변화 시나리오를 생산하고자 독일의 대기-해양 결합모델인 ECHO-G를 도입하고 이를 개선시켜 전지구 기후시나리오 자료를 생산하고, 이 자료를 경계 자료로 하여 미국의 MM5를 이용하여 130년(1971~2100)간의 고해상도 지역 기후시나리오(Regional Climate Model, RCM)를 생산하였다. 하지만 RCM의 기후변수들은 공간적 스케일의 상이성과 불확실성 때문에 수문학적 전망을 수행하기 위한 자료로 사용하기에는 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 AIB 시나리오인 27 km 해상도의 RCM 한반도 기후전망 자료를 기상청으로부터 제공받아 인공신경망 기법을 통하여 상세화한 자료를 이용하였다. 이 상세화(Downscaling)된 미래 기상자료는 단국대학교의 연구개발을 통해 제공받은 자료로서, 공간적 스케일의 상이성을 최소화하고자 강우관측소 지점 별로 인공신경망을 수행하는 다지점 인공신경망 기법을 적용하였으며, 강우뿐만 아니라 SWAT에 입력되는 다른 기상자료인 상대습도, 최고/최저온도에 대한 상세화도 수행하였다. 또한 한반도의 계절성을 반영하고 있지 못하는 RCM에 따른 신경망의 학습 성과를 제고시키고자 여름철 태풍사상에 대한 모의와 강우량 보정을 위해 Stochastic Typhoon Simulation 기법 및 Dynamic

Quantile Mapping 기법을 적용하였다.

미래 분석기간을 2030s (2011~2040), 2060s (2041~2070), 2090s (2071~2100)의 세 기간으로 설정하고 SWAT에 적용된 미래 기상자료의 추세분석을 실시한 결과 연평균 강수량은 미래로 갈수록 증가하는 경향을 보였으며, 2030s에는 13.9%, 2060s에는 24.2%, 2090s에는 37.8% 증가하는 것으로 전망되었다. 최저 온도와 최고 온도는 미래로 갈수록 상승하는 경향을 보였으며, 최저온도와 최고온도 각각 2030s에는 0.5°C, 0.3°C, 2060s에는 1.3°C, 1.2°C, 2090s에는 2.5°C, 2.2°C까지 상승하는 것으로 전망되었다. 연평균 상대습도의 경우에도 미래로 갈수록 증가하는 경향을 보였지만 증가율이 0.5~0.8% 정도로 큰 변화를 보이지는 않았다(Table 1). Fig. 3은 미래 기온, 강수, 상대습도의 변화를 월별로 나타낸 그림이다.

3.2.2 SWAT을 이용한 미래 유입량 및 수질 자료의 생성

SWAT 모형 구동을 위한 공간자료로 1:5,000 National Geographic Information System (NGIS) 수치지도를 사용하여 해상도 30×30 m의 Digital Elevation Model (DEM)을 구축하였다(Fig. 4(a)). 토지이용도는 2000년 4월 Landsat TM 위성영상을 이용하여 총 7개의 토지이용항목(수역, 주거지, 나지, 초지, 논, 밭, 산림)으로 분류한 뒤, NOAA/AVHRR 위성영상으로부터 계산된 정규화식생지

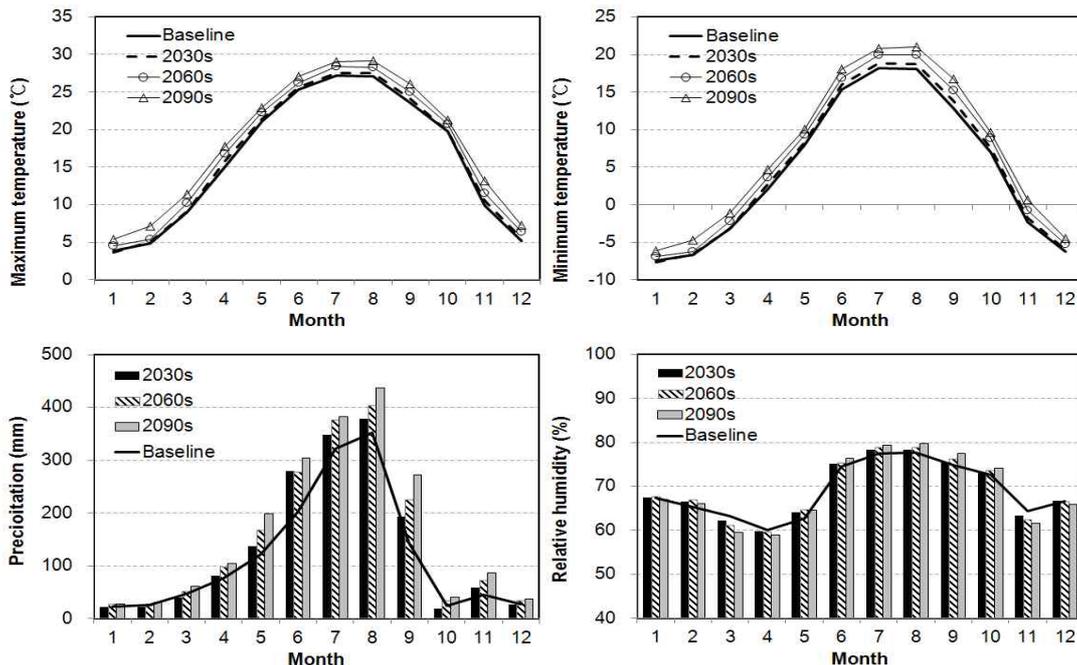


Fig. 3. The Future Temperature, Precipitation and Relative Humidity by Artificial Neural Networks Downscaling for RCM MM5

Table. 1. Change in Future Temperature, Precipitation and Relative Humidity Values Compared to the Baseline

Period	Baseline (1991~2010)		2030s (2011~2040)	2060s (2041~2070)	2090s (2071~2100)
	Obs.	Sim.			
Precipitation (mm)	1445.4	1449.7 (0.3%)*	1651.1 (13.9%)**	1800.3 (24.2%)**	1998.3 (37.8%)**
Max. temperature (°C)	15.5	15.6 (0.1°C)*	15.9 (0.4°C)**	16.8 (1.2°C)**	17.8 (2.2°C)**
Min. temperature (°C)	4.3	4.3 (0.0°C)*	4.8 (0.5°C)**	5.7 (1.4°C)**	6.8 (2.5°C)**
Relative humidity (%)	69.5	69.3 (-0.2%)*	69.6 (0.1%)**	69.7 (0.2%)**	69.8 (0.3%)**

* : Variation from Baseline (Obs.), **: Variation from Baseline (Sim.)

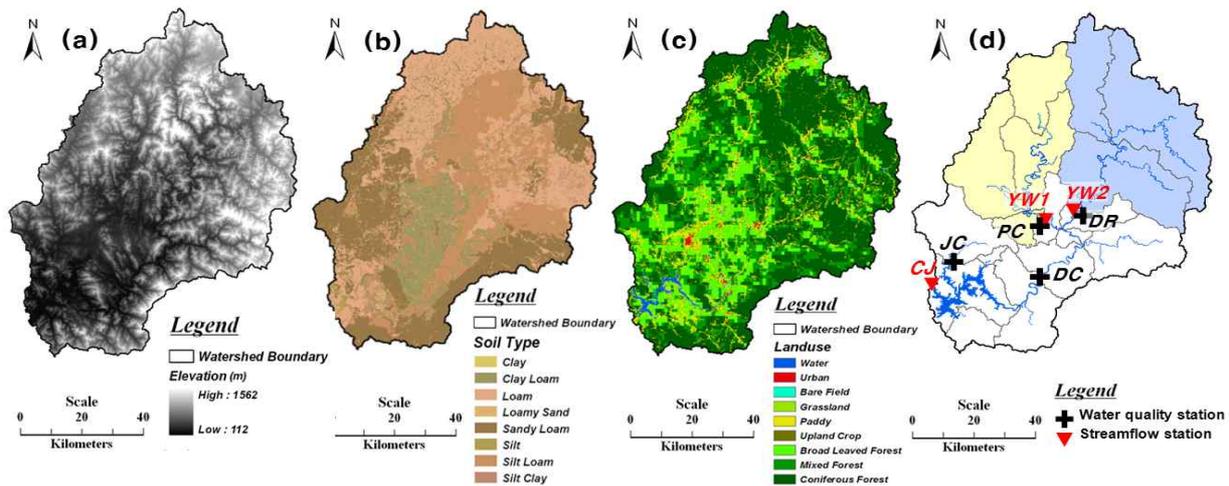


Fig. 4. GIS Data; (a) DEM (b) Landuse (c) Soil Properties and (d) Observation Station

수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 자료를 이용하여 산림을 활엽수림, 침엽수림, 혼효림으로 재분류하여 총 9개의 토지이용 항목으로 분류하여 이용하였다 (Fig. 4(b)). 충주댐 유역의 토지이용은 산림이 81.4%로 가장 많고 밭 10.3%, 논 2.0% 순으로 분석되었다. 토양도는 Fig. 4(c)와 같이 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 이용하였으며, 대표 토양종류는 식양토 45%, 사양토 40%이다.

충주댐 유역의 기상관측소는 대관령, 원주, 충주, 영월, 제천, 태백 총 6개 관측소가 위치해 있으며, 모형의 구동을 위해 과거 13년(1998~2010)의 강수량(mm), 최저, 최고온도(°C), 풍속(m/sec), 상대습도(%), 일사량(MJ/m²)의 자료를 기상청으로부터 제공받아 모형의 기상입력 자료로 사용하였다. 유출량 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System, WAMIS)에서 제공하는 일별 유출량 자료를 사용하였으며, 남한강과 동강의 합류지점인 영월1(YW1) 지점(2000~2010), 남한강 상류의 영월2(YW2) 지점(2000~2006)에 대하여 자료를 구축하였다. 충주댐(CJ) 지점의 댐 유입량 자료(2000

~2010)는 한국수자원공사에서 제공하는 일별 댐 수문자료를 이용하였다. 수질자료는 평창강3(PC), 동강(DR), 덕천(DC), 제천천3(JC) 지점에 대하여 유출량과 동일한 기간(2000~2010)의 자료를 환경부 물환경정보시스템(Water Information System, WIS)에서 월 1회 측정하여 제공하는 SS, TN, TP, DO, BOD, Chl-a 농도자료의 채수일자를 획득하여 부하량으로 환산하여 구축하였다. (Fig. 4(d))에는 3개의 수문 관측지점과 4개의 수질 관측 지점을 나타내었다.

SWAT 모형의 보정과 검증기간은 2000~2005년, 2006~2010년으로 각각 설정하였고, 모형의 적용성 평가를 위하여 유출량에 대하여 결정계수(R²) 및 모형효율계수(Model Efficiency, ME)를 사용하였다. 유출량의 보정은 충주댐 유역의 상류지점인 영월1 지점과 영월2 지점에 대하여 먼저 보정한 후, 유역 출구지점의 댐 유입량에 대하여 보정을 실시하였다. 유출량 검·보정 결과 상류의 영월1과 영월2 지점에 대한 연 평균 일 유출량의 ME는 0.69과 0.64, R²는 0.76과 0.75로 각각 분석되었으며, 충주댐 출구지점의 ME는 0.77, R²는 0.82로 비교적 모의치가 실측치의 경

향을 잘 따르는 것으로 분석되었다. 수질 검·보정 결과는 sediment, T-N, T-P의 수질항목별로 평창강3(PC) 지점은 R^2 가 각각 0.55, 0.88, 0.59로 분석되었고, 동강(DR) 지점은 R^2 가 0.54, 0.80, 0.60, 제천천(JC) 지점은 R^2 가 0.55, 0.78, 0.57로 분석되었다. 마지막 덕천(DC)지점의 R^2 는 0.52, 0.72, 0.56으로 분석되었다. Fig. 5는 충주댐(CJ) 지점의 유출량 및 덕천(DC) 지점의 sediment, T-N, T-P의 검·보정 결과를 나타낸 그림이다.

Fig. 6에는 충주댐 유역의 기후변화에 따른 월별 댐유입량, sediment, T-N, T-P 및 각각의 월별 변화율을 나타내었다. 미래 강우특성 변화에 따라 가을철 댐유입량의 증가가 두드러지게 나타났다. 현재(Baseline)를 기준으로 먼 미래(2071~2100)로 갈수록 년 댐유입 총량은 증가 추세를 보이며, 6, 9월의 증가가 큰 것으로 전망되었다. 미래 댐유입 총량은 현재를 기준으로 2011~2040에 +24.8%,

2041~2070에 +37.7%, 2071~2100에 +56.8% 증가하는 것으로 전망되었다. sediment는 특히, 현재(Baseline)를 기준으로 여름철 증가가 두드러지게 나타났다. 미래 sediment는 현재를 기준으로 2011~2040에 +62.8%, 2041~2070에 +88.2%, 2071~2100에 +126.5% 증가하는 것으로 전망되었다. T-N의 경우 현재(Baseline)를 기준으로 먼 미래(2071~2100)의 여름철 증가가 두드러지게 나타났다. 미래 총질소의 오염부하량은 현재를 기준으로 2011~2040에 +10.9%, 2041~2070에 +36.0%, 2071~2100에 +52.4% 증가하는 것으로 전망되었다. T-P는 현재(Baseline)를 기준으로 먼 미래(2071~2100)의 겨울과 봄철 증가가 두드러지게 나타났으며, 7월의 오염 부하량은 -18.5%까지 감소하는 것으로 분석되었다. 미래 총인의 오염부하량은 현재를 기준으로 2011~2040에 +7.1%, 2041~2070에 +27.2%, 2071~2100에 +25.2% 증가하는 것으로 전망되었다.

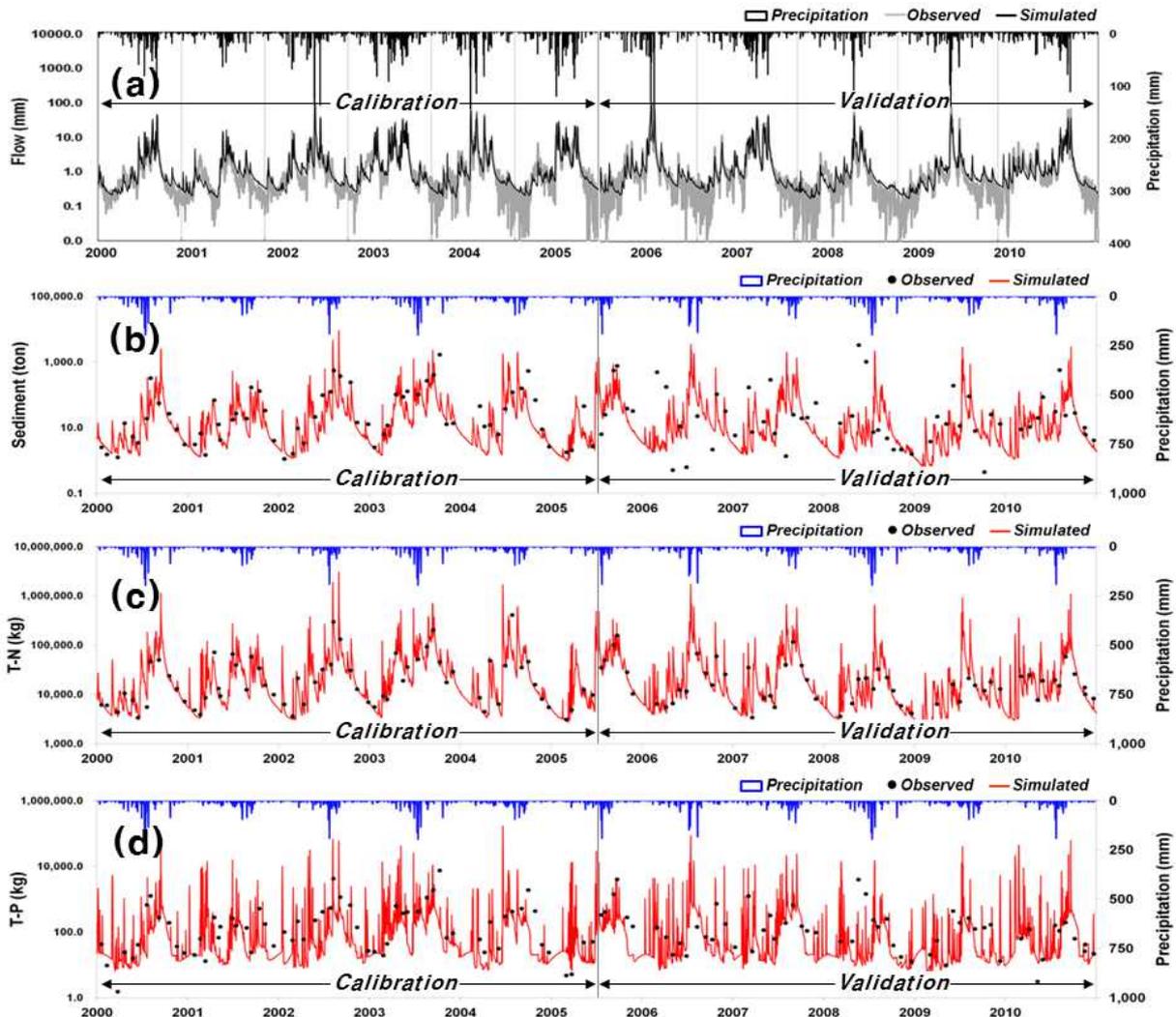


Fig. 5. The SWAT Calibration and Validation Results; (a) Streamflow (b) Sediment (c) T-N and (d) T-P

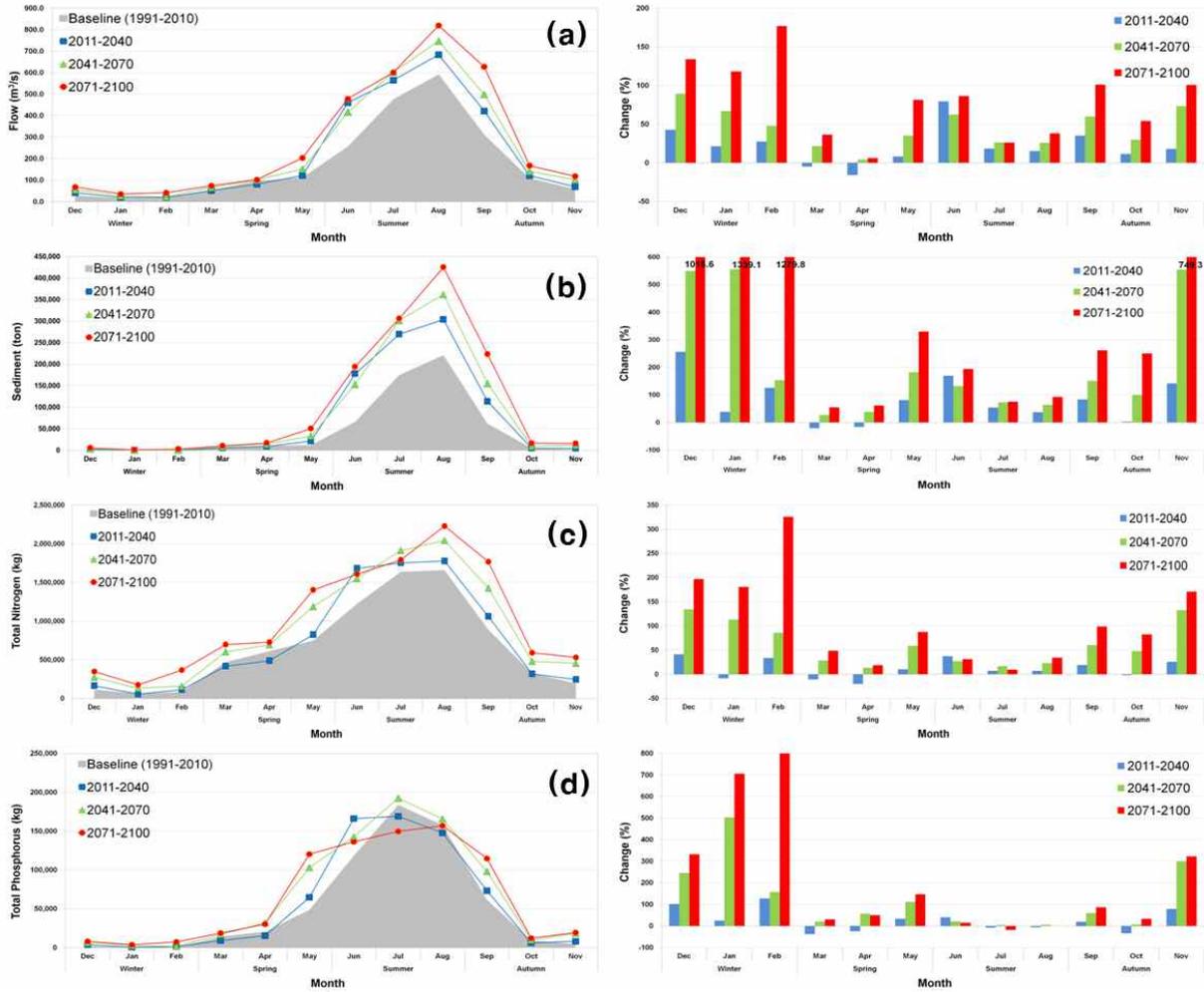


Fig. 6. Future Monthly Change in Streamflow and Water Quality Compared to the Baseline (1991~2010); (a) Streamflow (b) Sediment (c) T-N and (d) T-P

3.3 호소수질모델링(CE-QUAL-W2)을 위한 입력 자료 구성

3.3.1 지형자료, 기상자료, 호소 초기조건 및 하천 경계조건

충주호의 지형 및 단면자료 구축을 위하여 1:5000 수치지형도를 이용하여 유한차분 격자를 구성하였다. 남한강 본류와 주요 지천인 제천천 및 동달천을 고려하여 7개의 가지(branch)로 구분하였고, 남한강 본류(branch 1)와 유입 경계부(branch 2~7)로 구분하였다. 흐름방향으로는 댐 축으로부터 약 75km 상류지점까지 261개의 구획(segment), 수심방향으로는 1m 간격으로 83개의 수층(layer)으로 구성하였다.

CE-QUAL-W2의 입력 자료는 기상자료, 호소의 수온과 탁도 초기조건, 저수지 상류 및 하류하천의 유량과 수온,

수질 경계조건 등이 필요하다. 호소의 초기조건은 실측자료가 존재하는 2010년과 2008년에 대하여 댐 앞 지점에서 수심별로 실측된 수온 및 탁도 자료를 이용하였다. 기상자료는 같은 기간의 기온(°C), 이슬점온도(°C), 풍속(m/s), 풍향(phi), 운도(1/10) 자료를 수집하여 이용하였다.

하천 경계조건은 본류와 지류로 유입하는 유량(유입량, 방류량), 유입수 수온 및 수질 자료가 요구된다. 먼저 유량 경계조건으로 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 2010년과 2008년의 충주댐 운영 자료를 바탕으로 유입량과 방류량 자료를 구성하였으며, 유입수 수온 경계조건인 경우 충주댐 유입부에서 일별로 실측된 수온 자료가 없기 때문에 다중회귀분석을 통해 기온 및 이슬점온도, 유량을 사용하여 일별 수온을 예측하였다. 수질 경계조건은 부유물질(SS)의 경우 일별로 실측된 수질 자료가 없기 때문에 유량과 부유물질(SS) 부하량 관계로부

터 회귀식을 산정하여 자료를 보완하였고, 나머지 경계조건 수질항목인 질소 계열(NO_3 , NH_4), 인 계열($\text{PO}_4\text{-P}$), 조류(Chl-a), 용존산소(DO)의 경우에는 환경부 월간 측정망 자료를 입력하였다. CE-QUAL-W2 모형은 모의대상 수질항목이 국내 호소수질 측정망 자료와 다소 차이가 있어 난분해성 용존상 유기물(R-DOM), 분해성 용존상 유기물(L-DOM), 난분해성 입자상 유기물(R-POM), 분해성 입자상 유기물(L-POM)과 같은 상세한 입력 자료를 구축하기에 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 제한된 저수지 수질측정망 자료를 이용하여 망간법으로 측정된 화학적 산소 요구량(CODMn)과 총유기탄소(TOC)비를 이용하였다(Choi et al., 2000). 환경부 월간 수질 측정망 자료인 CODMn으로부터 TOM을 구한 후, 용존상 유기물(DOM)과 입자상 유기물(POM)을 구분하는데 DOM과 POM의 분율을 국내 하천과 호수의 실험결과(Kim et al., 1998)를 참조하여 각각 75%와 25%로 구분하였다. 이를 다시 미생물에 의해 쉽게 분해되는 유기물과 쉽게 분해되지 않는 난분해성 유기물로 분류하여야 하는데, Yoo et al. (2005)의 실험결과를 근거로 L-DOM(30%), R-DOM(70%), L-POM(30%), R-POM(70%)으로 구분하여 모형에 입력하였다.

본 연구의 목적은 유역모형인 SWAT과 저수지 모형인 CE-QUAL-W2를 연계 모의 하여 기후변화에 따른 탁수 및 부영양화를 모의하는 것이다. 이를 위해 CE-QUAL-W2의 검·보정 시 하천 경계조건 입력 자료인 유입량 및 수질자료를 SWAT의 검·보정된 모의결과를 이용하지 않고 유입하천의 실측 유입량 및 수질자료를 사용하였다. 그 이유는 SWAT 모형의 검·보정된 모의결과는 실측자료와 유사하게 모의했다 하더라도 완벽한 모의는 어려우며, 수질모의의 경우에는 그 불확실성이 더욱 커지게 되기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 유입하천의 실측자료를 입력 자료로 사용하여 CE-QUAL-W2를 보다 정확하게 검·보정하여 불확실성을 줄이고, 이후 미래 구동 시에는 SWAT의 미래 모의결과를 CE-QUAL-W2에 입력하여 기후변화를 평가하였다.

3.3.2 기후변화 시나리오에 따른 입력자료 구성

미래 기후변화 시나리오에 따른 저수지 내 수환경 변화를 모의하기 위해 SWAT의 미래 모의결과를 CE-QUAL-W2의 입력 자료로 사용하게 된다. Fig. 7은 SWAT의 모의결과와 CE-QUAL-W2의 입력자료 간 관계를 나타낸 그림으로, CE-QUAL-W2에서 필요로 하는 입력 자료의 대부분을 SWAT에서 제공하지만 유입수 수온 및 용존산

소(DO) 등의 미 제공인자에 대한 입력자료 구성방법이 필요하다.

먼저 기상자료 중 풍속, 풍향, 운도의 경우 미래 기후 전망자료가 없으므로 검·보정 시 사용한 기상자료를 이용하였고, 이슬점 온도의 경우 기후변화 상세화 자료에서 제공되는 상대습도로부터 Eq. (2)를 통해 산정하였다.

$$t_a - t_d \approx (14.55 + 0.114t_a)X + [(2.5 + 0.007t_a)X]^3 + (15.9 + 0.117t_a)X^{14} \quad (2)$$

$$X = 1.0 - \text{상대습도}/100$$

미래 하천 경계조건으로 유입량은 SWAT의 미래 유출량 결과를 이용하고, 미래 유입수온 경계조건은 SWAT의 유출량과 기후변화 상세화 자료에서 제공되는 기온, 이슬점온도를 이용하여 다중회귀분석을 통해 산정하였다. 미래 수질 경계조건인 경우 부유물질(SS), 질소 계열(NO_3 , NH_4), 인 계열($\text{PO}_4\text{-P}$), 조류(Chl-a)는 SWAT의 유출 부하량(ton)을 농도(mg/L)로 변환하여 사용하게 되고, 용존산소(DO)의 경우에는 SWAT의 결과가 너무 낮게 예측되는 경향이 있어 실측수온 및 DO 농도 자료를 수집한 후 실측수온으로부터 포화농도를 계산 후 분율을 가정하여 산정하였다(Eq. 3).

$$DO_{sat} = \exp \left(-139.3441 + \left(\frac{1.5757 \times 10^5}{T_w} \right) - \left(\frac{6.642 \times 10^7}{T_w^2} \right) + \left(\frac{1.2438 \times 10^{10}}{T_w^3} \right) - \left(\frac{8.622 \times 10^{11}}{T_w^4} \right) \right) \quad (3)$$

마지막으로 미래 유기물 그룹(L-DOM, R-DOM, L-POM, R-POM)은 Debele et al. (2008)이 Cedar Creek 저수지 유역에서 적용하였던 방법을 활용하여 입력 자료로 사용되는 유기물 그룹을 산정하였다. 이는 유기물 내 유기질소와 유기인의 화학양론비를 이용하여 유기물을 역

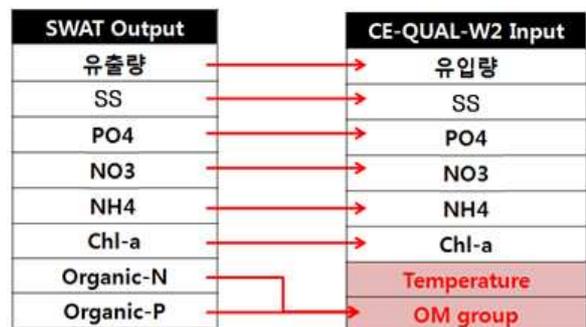


Fig. 7. Relations between SWAT Output and CE-QUAL-W2 Input

산정하는 방법이다. 일반적으로 우리나라 저수지에서 조류의 주요 제한인자는 인이므로 ORGN은 CE-QUAL-W2의 기본 값인 0.08로 가정한 후 SWAT의 모의 값인 Organic-N과 Organic-P를 이용하여 ORGP를 산정하였다. 그 후, Organic-P값과 ORGP를 적용하여 일 단위 유기물 농도를 산정하였다(Eq. 4). 산정된 유기물 농도를 다시 CE-QUAL-W2의 입력자료 형태인 L-DOM, R-DOM, L-POM, R-POM의 형태로 구분하였다.

$$\frac{ORGN}{ORGP} = \frac{\sum \text{organic-N}}{\sum \text{organic-P}} \Rightarrow OM = \frac{\text{organic-P}}{ORGP} \quad (4)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 CE-QUAL-W2 모형의 보정 및 검증

본 연구에서 모형의 보정 및 검증은 충주호를 대상으로 충주호의 부유물질 및 부영양화를 평가한 Ahn et al. (2013)의 연구결과 값을 사용하였다. 실측자료의 보유기간에 따라 모형의 보정(2010) 및 검증(2008) 기간을 2개년으로 결정하였다. CE-QUAL-W2의 저수지 수리해석과 수온예측, 조류와 영양염류, 무기물 모의와 관계되는 주요한 매개변수의 선택범위는 사용자 매뉴얼과 기존의 연구(kim et al., 1998; Chung et al., 2007; Cole et al., 1999; Cole et al., 2001)를 참고하여 결정하였으며, 보정방법은 관측값과 모의값이 최대한 일치할 때까지 시행착오법으로 수행하였다.

모의값과 실측값에 대한 비교는 통계 지표인 AME (Absolute Mean Error), RMSE (Root Mean Square Error)를 적용하였다. 충주호의 연직 수온모의 결과, 4월부터 수면부근 수온이 증가하기 시작하여 7월초부터는 성층현상이 발생되어 9월까지 유지된다. 10월초부터는 수면부근의 수온이 감소하기 시작하여 전도현상이 발생하고, 12월부터는 다시 안정화되는 것으로 나타났으며 비교적 실측값을 잘 반영하는 것으로 판단된다(Fig. 8(a)). 부유물질(SS)의 연직분포 모의결과, 보정년도인 2010년의 경우 9월에 내린 집중호우로 인해 9~10월 SS의 농도가 20 mg/L 가량 증가하다가 11월 침강한 후 점차 부유물질 층이 안정화되는 것으로 나타났다. 9월은 SS가 다소 과다모의 되었지만, 10월 모의된 SS의 농도는 실측치의 경향을 잘 반영하였다. 검증년도인 2008년의 경우 7월에 내린 집중호우로 인해 7월말 45 mg/L 가량의 SS가 유입되어 9월부터는 부유물질 층이 많이 안정화되었지만 12월까지 완전히 소멸되지 않는 것으로 나타났다. 부유물질이 최고치에 달한 7월말 호소의 EL.80~120 m 구간에 중층 밀도류를 형성하고 있는 SS분포와 최고 SS 발생수심은 실측자료와 비교적 잘 부합하였다(Fig. 8(b)). T-N의 모의결과는 2010년과 2008년에서 홍수기 이전 기간에서는 대체적으로 실측치를 잘 재현하지만, 홍수기 이후 실측값에 비해 과소추정 되었다. 이는 조류의 증식 및 탈질작용에 의한 질소의 감소현상이 모형에서 과다하게 반영된 것으로 보이며, 입자상 질소성분의 침강속도를 모형에서 제

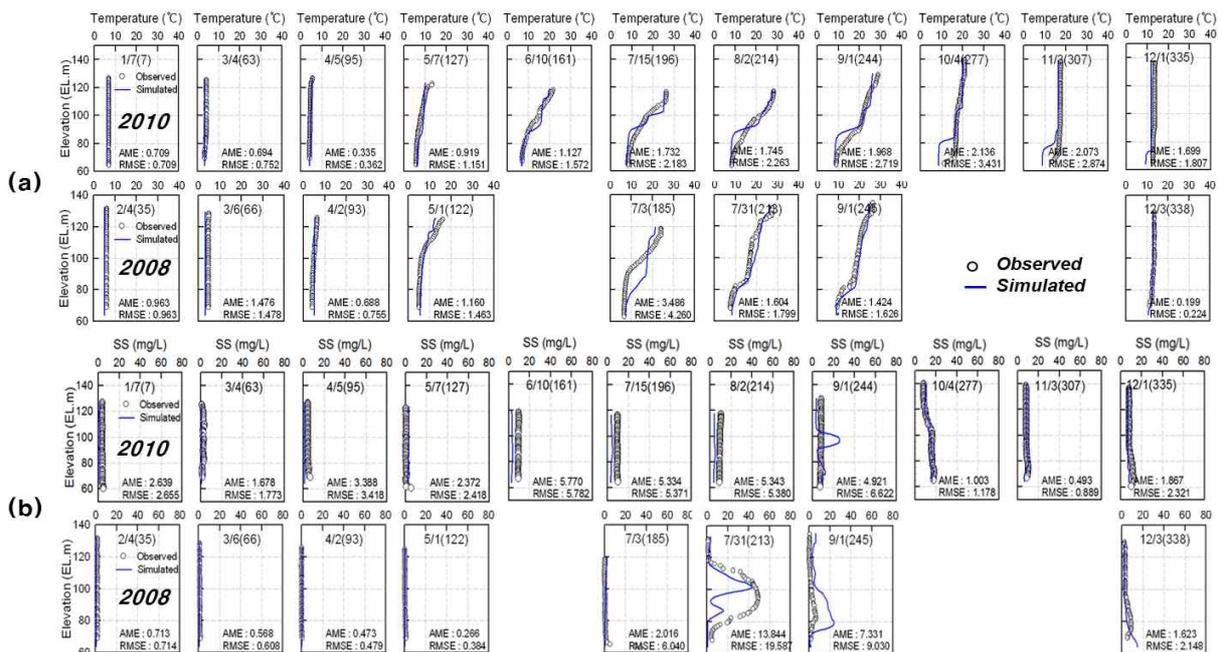


Fig. 8. The CE-QUAL-W2 Calibration (2010) and Validation (2008) Results; (a) Water Temperature (b) SS

대로 반영하지 못하기 때문으로 판단된다. T-P의 경우에도 2010년과 2008년 모두 비교적 인의 농도범위를 잘 반영하고 있으나, 9월 이후부터 모의값이 뚜렷하게 과대 산정되는 경향을 보였다. 이는 유입수 수질 경계조건으로 월간 측정 자료를 사용함으로써 인 계열 영양염류의 유입 특성을 정확히 반영해주시지 못했기 때문인 것으로 판단된다. Chl-a의 경우 2010년과 2008년에서 여름철 조류농도의 성장패턴은 실측값과 유사하게 반영하고 있으나, 2008년 8~9월에 과대평가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 오차원인으로 CE-QUAL-W2는 2차원 횡방향 평균 흐름으로 가정하여 호소의 폭 방향으로 평균하여 값은 값으로 모의하기 때문에 조류의 특성을 반영하지 못하기 때문으로 판단된다. Fig. 9에는 T-N, T-P, Chl-a의 모의결과를 나타내었다.

3.2 기후변화에 따른 수온, 탁수 및 부영양화 변화 전망

미래 기후변화에 따른 충주호 내 수환경 변화를 분석하기 위해 앞서 구축된 SWAT의 유출 및 수질에 대한 미래 모의결과를 CE-QUAL-W2의 입력 자료로 재구성하여 적용하고 기후변화에 의한 수온, 탁수변화 및 부영양화 영향을 평가하였다. 미래 분석을 위한 기간설정은 기후변화 시나리오 자료와 동일하게 2030s (2011~2040), 2060s (2041~2070), 2090s (2071~2100)의 세 기간으로 구분하였다. 또한 각 시나리오 기간별 SWAT의 유출량 모의결과로부터 연간 댐 유입량을 추출한 후 이를 바탕으로 발

생조과확률을 산정하고 10%(풍수년), 50%(평수년) 및 95%(갈수년)에 해당하는 극한 수문사상을 가지는 년도를 선택하여 분석하였다.

기후변화가 충주호의 수온변화에 미치는 영향을 분석하기 위해 연도별 상층과 심층의 수온을 비교하였고, 상층과 심층의 수온차가 5°C 이상 발생하는 기간을 기준으로 수온성층형성 기간에 미치는 영향을 평가하였다. 그 결과 미래 기온의 증가로 인해 미래로 갈수록 상층수온은 평균 0.5°C 증가하는 경향을 보이는 반면 심층수온은 평균 0.9°C 감소하는 경향을 보였다. 또한 상층수온의 증가로 인해 풍수년을 제외한 갈수년과 평수년에서 성층형성 기간이 증가하였고, 성층형성 시기는 갈수년에서 미래로 갈수록 빨라지는 것으로 나타났다(Table 2). 이러한 미래 심층수온의 증가로 인해 심층의 용존산소가 고갈되고 퇴적층의 영양염류 용출량이 증가하여 수질관리에 어려움이 야기될 것으로 예상된다.

또한 부유물질(SS)은 물의 탁도를 유발시키는 원인으로 수생태계에 악영향을 초래하며, 충주호는 7월 장마와 9월 태풍의 영향으로 다량의 SS가 유입되어 충층밑도류를 형성하기 때문에 취수에 상당한 어려움이 있다. 미래 탁수 영향평가를 위해 하천수 수질 기준에 따른 유입수 SS 25mg/L 이상 유입일수를 분석한 결과 미래로 갈수록 증가하였고, 최고유입농도는 평수년에 비해 풍수년에 17%, 갈수년에 0.2% 가량 증가하는 것으로 나타났다. 호소내 SS 10mg/L 이상 점유일수는 평수년에 비해 풍수년이 6일, 갈수년이 17일 증가하였고, 점유율 역시 풍수년에

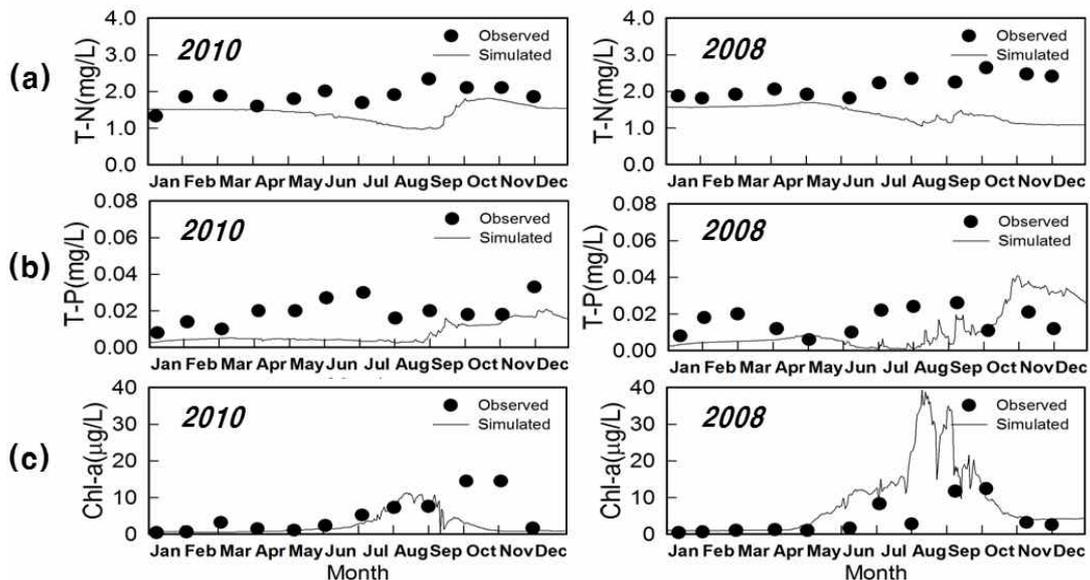


Fig. 9. The CE-QUAL-W2 Calibration (2010) and Validation (2008) Results; (a) T-N (b) T-P (c) Chl-a

24%, 갈수년에 26% 가량 증가하는 것으로 분석되었다. 방류수 SS 25mg/L 이상 방류일수는 풍수년에 가장 많았고, 최고방류농도는 풍수년에 53%, 갈수년에 4% 가량 증가하는 것으로 분석되었다(Table 3).

마지막으로 기후변화가 조류의 성장패턴에 미치는 영향 및 부영양화에 미치는 영향을 평가하기 위해 Chl-a의 농도변화를 분석하였다. 그 결과 Chl-a의 최고농도는 풍수년에 비해 풍수년에 19%, 갈수년에 3% 가량 조류의 농도가 증가되는 것으로 나타나 풍수년에 비해 풍수년과 갈수년에 조류의 영향이 커지는 것을 알 수 있었다(Table 3). Fig. 10(a)는 호소내 SS 10 mg/L 이상 점유율을 나타낸 것으로 풍수년<풍수년<갈수년 순으로 SS 점유기간이 길어지는 것을 볼 수 있으며, Fig. 10(b)는 저수지 방류수

의 월별 SS 농도를 나타낸 것으로 홍수기 하천수 수질 기준을 초과하는 SS 농도가 발생하며 특히 풍수년에 심각한 문제가 되는 것으로 분석되었다. Fig. 10(c)는 표층 Chl-a의 월별 농도변화를 나타낸 그림으로 마찬가지로 풍수년에 비해 풍수년과 갈수년에 조류의 영향이 커지는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 충주호 유역을 대상으로 유역모형인 SWAT과 저수지모형인 CE-QUAL-W2를 이용하여 기후변화에 따른 하천 및 호소의 수환경 변화를 평가 하였다. 미래 기후변화 자료로 RCM (MM5)의 A1B 시나리오

Table 2. Change in Future Water Temperature and Stratification

Period		Shallow water temperature (depth 5 m) (°C)			Deep water temperature (from the bottom 5 m) (°C)			Stratification	
		Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.	기간 (day)	시기
Average year	2020 (I)	2.1	26.2	15.4	2.9	10.5	7.1	219	4월 9일
	2047 (II)	2.7	26.6	16.0 (+0.6°C)	3.3	11.0	7.5 (+0.4°C)	209	4월 9일
	2077 (III)	3.0	27.1	16.1 (+0.7°C)	3.3	7.7	5.8 (-1.3°C)	235	4월 13일
Wet year	2027 (I)	2.9	27.4	15.4	3.4	12.6	8.9	190	4월 6일
	2058 (II)	2.8	27.2	15.5 (+0.1°C)	3.3	13.8	8.2 (-0.7°C)	187	4월 17일
	2095 (III)	4.0	27.7	16.4 (+1.0°C)	4.0	20.4	7.2 (-1.7°C)	141	4월 27일
Dry year	2021 (I)	2.2	26.7	15.3	3.0	10.3	7.7	196	5월 7일
	2048 (II)	2.6	27.4	15.4 (+0.1°C)	3.3	14.1	6.5 (-1.2°C)	206	4월 17일
	2073 (III)	3.0	27.4	16.0 (+0.7°C)	3.5	10.0	7.2 (-0.5°C)	212	4월 27일

Table 3. Change in Turbidity Water and Algae

Period		Inflow SS > 25 mg/L		In lake SS > 10 mg/L		Outflow SS > 25 mg/L		Chl-a	
		Max. (mg/L)	Avg. (mg/L)	Residence time (day)	Residence rate (%)	Max. (mg/L)	Ave. (mg/L)	Max. (µg/L)	Avg. (µg/L)
Average year	2020 (I)	362.8	44.1	147	18.4	45.6	18.2	14.1	3.3
	2047 (II)	370.3	50.5	152	20.3	38.6	14.4	23.7	3.3
	2077 (III)	348.1	67.2	182	22.3	48.8	17.4	16.2	3.6
Wet year	2027 (I)	419.3 (+13.5%)	47.6	143	24.8 (+25.8%)	97.8 (+53.4%)	16.2	41.3 (+65.9%)	4.9
	2058 (II)	477.7 (+22.5%)	43.4	170	22.9 (+11.4%)	63.2 (+38.9%)	18.6	33.6 (+29.5%)	4.0
	2095 (III)	412.1 (+15.5%)	50.7	186	35.0 (+36.3%)	145.8 (+66.5%)	22.3	11.7 (-38.5%)	2.3
Dry year	2021 (I)	353.4 (-2.7%)	42.0	168	26.0 (+29.2%)	36.3 (-25.6%)	14.2	42.2 (+66.6%)	6.5
	2048 (II)	358.2 (-3.4%)	37.1	177	24.5 (+17.1%)	52.6 (+26.6%)	17.0	12.9 (-83.7%)	2.7
	2073 (III)	373.0 (+6.7%)	47.5	208	33.6 (+33.6%)	50.2 (+2.8%)	15.7	22.1 (+26.7%)	3.9

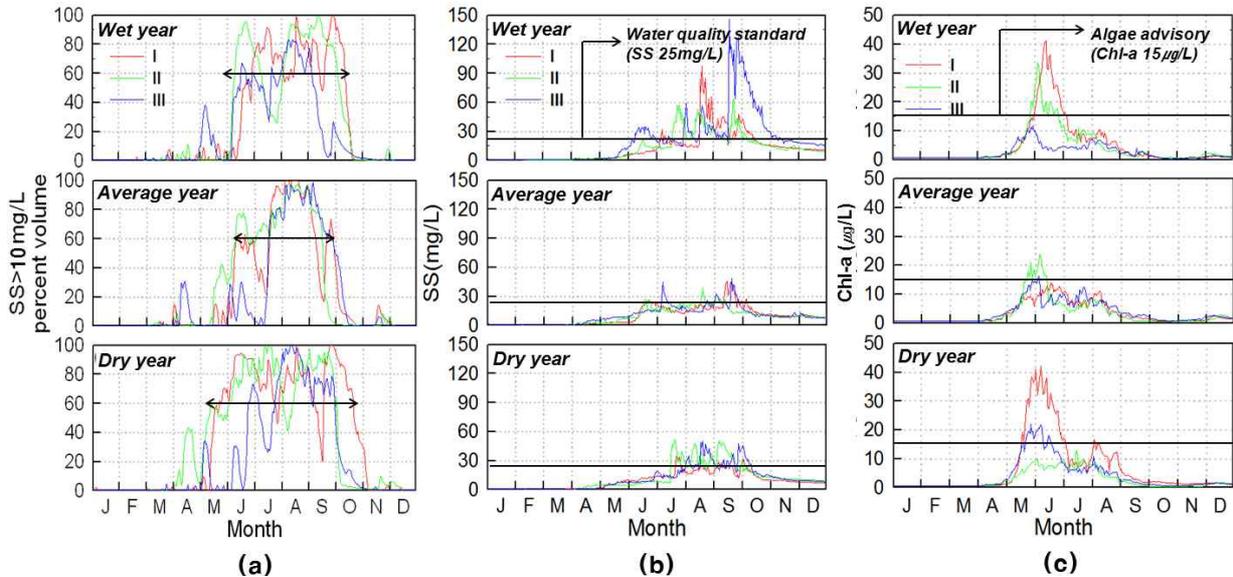


Fig. 10. Monthly Change in Turbidity Water and Algae (a) SS>10 mg/L Percent Volume in Lake (b) SS Concentration (c) Chl-a Concentration

를 상세화한 뒤 SWAT 모형에 적용하여 하천유역의 미래 유량 및 수질변화를 전망하였고, 이후 SWAT의 결과를 CE-QUAL-W2의 입력 자료로 재구성 한 뒤 적용하여 기후변화에 따른 호소내 수온, 탁도변화 및 부영양화 영향을 평가하였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 기후변화 적용을 위한 미래 기상자료로 AIB 시나리오인 RCM 한반도 기후전망자료를 기상청으로부터 제공받아 인공신경망 기법을 통하여 상세화한 자료를 이용하였고, 미래 분석기간을 2030s(2011~2040), 2060s(2041~2070), 2090s(2071~2100)의 세 기간으로 나누어 분석하였으며, 강수량은 미래로 갈수록 증가하는 경향을 보였으며, 최저/최고 온도는 미래로 갈수록 상승하는 경향을 보였다.
- 2) SWAT 모형을 이용한 유역모델링을 위하여 충주댐 유입량 자료 및 항목별 수질자료(SS, TN, TP, DO, BOD, Chl-a)를 수집하여 모형의 검·보정을 수행하였고, 기후변화 시나리오를 적용하여 기후변화에 따른 하천 유량 및 수질변화를 분석하였으며, 그 결과 댐유입량, sediment, T-N, T-P 오염부하량은 미래에 증가하는 것으로 분석되었다.
- 3) CE-QUAL-W2 모형을 이용한 저수지모델링을 위하여 분류와 지류를 고려하여 저수지 지형단면을 구축하였고, 기상자료 및 호소 초기조건은 2010년, 2008년의 실측된 자료를 수집하였다. 하천 경계조건인 유입량 및 수질 자료(NO₃, NH₄, PO₄-P, Chl-a, DO, OM group) 또한 하천의 실측된 자료를 이용하였고,

유입수 수온과 탁도는 회귀식을 이용하여 구축한 뒤 수온, SS, T-N, T-P, Chl-a에 대하여 검·보정을 수행하였다. 그 결과 모의결과가 실측자료를 비교적 잘 모의하는 것으로 분석되었다.

- 4) 이후 CE-QUAL-W2 모형의 기후변화 적용을 위해 SWAT의 미래 모의결과를 CE-QUAL-W2의 입력 자료로 사용하였다. SWAT에서 제공해주는 CE-QUAL-W2의 입력 자료는 유입량, SS, NO₃, NH₄, PO₄-P, Chl-a, OM group이며, 미 제공인자인 유입수 수온은 회귀식을 이용하였으며, DO는 SWAT의 결과가 너무 낮게 예측되는 경향이 있어 실측수온을 이용하여 가정하여 산정하였다. 그 결과 미래에는 충주댐의 수온 성층화 및 탁도에 의한 중증밀도류 현상으로 인해 미래 호소의 수질에 악영향을 끼칠 것으로 전망되었다. 또한 기후변화로 인해 평수년에 비해 풍수년과 갈수년에 그 영향이 더 커지는 것으로 분석되었다.

현재 국내 다목적댐에서는 해마다 반복되는 탁도의 방류 및 녹조현상으로 인해 하천생태계가 파괴되고 상수원 오염 등의 피해가 발생되고 있으며, 정부는 많은 사업비를 투자하여 선택취수 시설을 설치하고 있다. 특히 충주댐은 서울 수도권지역에 연간 33억 8000만톤의 각종 용수를 공급하는 중요한 공급원으로 호소의 수질관리를 위한 장기적 측면에서의 대응방안이 마련되어야 할 것이다. 본 연구에서는 기후변화 영향평가에 있어 유역모형과 저수지 모형을 연계하는 과정에 있어 연계 가능한 자료와 새

로운 방법으로 구축해야 하는 자료를 파악하여 합리적인 연계방법을 제시하였다. 또한 본 연구에서 적용한 기후변화 시나리오 및 적용된 모형의 수문, 수질 모의결과는 많은 불확실성을 내포하고 있어 본 연구의 결과를 절대적 판단기준으로 적용하기에는 무리가 있지만, 본 연구를 통해 미래 하천-호소의 오염물질 변화를 파악하고 예측하는 방법론을 제시함으로써 유역의 수질오염총량관리 및 호소의 수질관리에 적극적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 ‘기후변화에 따른 댐저수지 수환경 취약성 평가 및 대응방안 수립’ (한국수자원공사) 과제 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Ahn, S.R., Kim, S.H., Yoon, S.W., and Kim, S.J. (2013). "Evaluation of suspended solids and eutrophication in Chungju Lake Using CE-QUAL-W2." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 11, pp. 1115-1128.
- Arnold, J.G., and Allen, P.M. (1996). "Estimating hydrologic budgets for three illinois watersheds." *Journal of Hydrology*, Vol. 176, No. 1, pp. 57-77.
- 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.
- Choi, K.S., Kim, B.C., Kim, H.B., and Sa, S.H. (2000). "Relationships between organic carbon and codmn in a deep reservoir, Lake Soyang, Korea." *Korean Journal of Limnology*, Vol. 33, No. 4, pp. 328-335.
- Chung, S.W. (2004). "Density flow regime of turbidity current into a stratified reservoir and vertical two-dimensional modeling." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 26, No. 9, pp. 970-978.
- Chung, S.W., Oh, J.K., and Ko, I.H. (2005). "Simulations of temporal and spatial distributions of rainfall-induced turbidity flow in a reservoir using CE-QUAL-W2." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 8, pp. 655-664.
- Chung, S.W., Park, J.H., Kim, Y.K., and Yoon, S.W. (2007). "Application of CE-QUAL-W2 to daecheong reservoir for eutrophication simulation." *Journal of Korean Society of Water Quality*, Vol. 23, No. 1, pp. 52-63.
- Cole, T.M., and Tillman, D.H. (1999). Water Quality Modeling of Lake Monroe Using CE-QUAL-W2, Miscellaneous Paper EL-99-1.
- Cole, T.M., and Tillman, D.H. (2001). *Water Quality Modeling of Allatoona and Wast Point Reservoir Using CE-QUAL-W2*, U.S. Army Corps of Engineers.
- Debele, B., Srinivasan, R., and Parlange, J.Y. (2006). "Coupling upland watershed and downstream water-body hydrodynamic and water quality models (SWAT and CE-QUAL-W2) for better water resources management in complex river basins." *Environmental Modeling & Assessment*, Vol. 13, pp. 135-153.
- Deus, R., Brito, D., Mateus, M., Kenov, I., Fornaro, A., Neves, R., and Alves, C.N. (2013). "Impact evaluation of a pisciculture in the Tucuruí reservoir (Pará, Brazil) using a two-dimensional water quality model." *Journal of Hydrology*, Vol. 487, pp. 1-12.
- Jung, Y.R., Chung S.W., Ryu, I.G., and Choi, J.K. (2008). "Two-dimensional hydrodynamic and water quality simulations for a coinjunctive system of Daecheong Reservoir and its downstream." *Journal of Korean Society of Water Quality*, Vol. 24, No. 5, pp. 581-591.
- Kim, B.C., Choi, K.S., Kim, C.G., Lee, Y.H., Kim, D.S., and Park, J.C. (1998). "The distribution of dissolved and particulate organic carbon in Lake Soyang." *Korean Journal of Limnology*, Vol. 31, No. 1, pp. 17-24.
- Kim, Y.H., Kim, B.C., Choi, K.S., and Seo, D.I. (2001). "Modeling of thermal stratification and transport of density flow in Soyang Reservoir using the 2-d hydrodynamic water quality model, CE-QUAL-W2." *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 15, No. 1, pp. 40-49.
- Kim, Y.K., and Chung, S.W. (2011). "Research paper : laterally-averaged two-dimensional hydrodynamic and turbidity modeling for the downstream of Yongdam Dam." *Journal of Korean Society of Water Quality*, Vol. 27, No. 5, pp. 710-718.

- Kuo, J.T., Lung, W.S., Yang, C.P., Liu, W.C., Yang, M.D., and Tang, T.S. (2006). "Eutrophication modelling of reservoirs in Taiwan." *Environmental Modeling & Software*, Vol. 21, pp. 829-844.
- Martin, N., McEachern, P., Yu, T., and Zhu, D.Z. (2013). "Model development for prediction and mitigation of dissolved oxygen sags in the Athabasca River, Canada." *Science of The Total Environment*, Vol. 443, pp. 403-412.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G. Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2001). "Soil and water assessment tool; the theoretical documentation." *U.S Agricultural Research Service*, pp. 340-367.
- Norton, G.E., and Bradford, A. (2009). "Comparison of two stream temperature models and evaluation of potential management alternatives for the Speed River, Southern Ontario." *Journal of Environmental Management*, Vol. 90, pp. 866-678.
- Ostfeld, A., and Salomons, S. (2005). "A hybrid genetic - instance based learning algorithm for CE-QUAL-W2 calibration." *Journal of Hydrology*, Vol. 310, pp. 122-142.
- Park, J.Y., Park, G.A., and Kim, S.J. (2013). "Assessment of future climate change impact on water quality of Chungju Lake, South Korea, using WASP Coupled with SWAT." *Journal of the American Water Resources Association*, DOI: 10.1111/jawr.12085 (Published online).
- 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.
- Yi, H.S., Jeong, S.A., Park, S.Y., and Lee, Y.S. (2008). "Modeling study of turbid water in the stratified reservoir using linkage of HSPF and CE-QUAL-W2." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 30, No. 1, pp. 69-78.
- Yi, Y.K., Kim, Y.D., Park, K.Y., and Kim, W.G. (2005). "Two dimensional numerical modeling of turbidity variation in Imha Reservoir." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 4B, pp. 257-266.
- Yoo, S.J., Kim C.S., Ha, S.Y., Hwang, J.Y., and Chae, M.H. (2005). "Analysis of natural organic matter (NOM) characteristics in the Geum River." *Journal of Korean Society of Water Quality*, Vol. 21, No. 2, pp. 125-131.

논문번호: 13-096	접수: 2013.12.03
수정일자: 2014.01.06	심사완료: 2014.01.06