

ANN을 활용한 유역유출 변화에 따른 합천댐 저수지 수질영향 분석

조부건·정우석*·이종문**·김영도

명지대학교 토목환경공학과
*한국농어촌공사 농어촌연구원
**국립환경과학원 유역총량연구과

Analysis of Water Quality Impact of Hapcheon Dam Reservoir According to Changes in Watershed Runoff Using ANN

Bu Geon Jo·Woo Suk Jung*·Jong Moon Lee**·Young Do Kim

Dept. of Civil & Environmental Engineering, Myongji University
**Korea Rural Community Corporation Rural Research Institute*

***Division of Watershed and total load Management research, National Institute of Environmental Research*
(Received : 30 October 2019, Revised : 2 August 2021, Accepted : 3 February 2022)

요약

기후변화는 예측할 수 없는 변동성이 매우 커지고 있다. 이로 인해 생태계, 인류의 생활, 수문학적 순환 등 다양한 시스템에 변화를 가져오고 있다. 특히 최근 예측할 수 없는 기후변화로 인해 극한가뭄 및 집중호우가 자주 발생하며 그로 인해 1차적 재해가 아닌 침수, 퇴사로 인한 수질오염을 유발하는 복합적인 수자원재해가 발생하고 있다. 유역모델로 SWAT를 이용하여 장래 유출량 및 오염부하량을 분석하고 기후시나리오는 기상청 표준 시나리오(HadGEM3-RA)의 RCP4.5 기후시나리오를 정상성 분위사상법을 적용하여 분석하였다. 기후시나리오와 유역모델의 연계모형으로 유출량 및 오염부하량 분석을 수행하였고 연계모형의 적용 및 검증과 기후변화에 따른 미래 수질 변화 분석 결과를 최종적으로 제시하였다. 본 연구에서는 인공신경망을 이용하여 기후변화 시나리오를 모의하여 저수지 수질모형인 W2모형을 통한 댐 저수지의 변화와 인공신경망에서의 수온과 탁도의 결과를 비교하였다. 본 연구의 결과로 신경망모형의 장점인 비선형성 및 간편성을 기후변화를 적용한 합천댐 저수지에서의 수온과 탁도 예측에 적용 가능성을 제시하고자 한다.

핵심용어 : 기후변화, 합천댐, W2, 인공신경망

Abstract

Climate change is becoming increasingly unpredictable. This has led to changes in various systems such as ecosystems, human life and hydrological cycles. In particular, the recent unpredictable climate change frequently causes extreme droughts and torrential rains, resulting in complex water resources disasters that cause water pollution due to inundation and retirement rather than primary disasters. SWAT was used as a watershed model to analyze future runoff and pollutant loads. The climate scenario analyzed the RCP4.5 climate scenario of the Meteorological Agency standard scenario (HadGEM3-RA) using the normal quantitative mapping method. Runoff and pollutant load analysis were performed by linkage simulation of climate scenario and watershed model. Finally, the results of application and verification of linkage model and analysis of future water quality change due to climate change were presented. In this study, we simulated climate change scenarios using artificial neural networks, analyzed changes in water temperature and turbidity, and compared the results of dams with artificial neural network results through W2 model, a reservoir water quality model. The results of this study suggest the possibility of applying the nonlinearity and simplicity of neural network model to Hapcheon dam water quality prediction using climate change.

Key words : Climate change, Hapcheon Dam, W2, Artificial Neural Network

*To whom correspondence should be addressed.
Dept. of Civil & Environmental Engineering, Myongji University
E-mail: ydkim@mju.ac.kr

- Bu Geon Jo Dept. of Civil & Environmental Engineering, Myongji University / Ph.D Course (bugeon0929@naver.com)
- Woo Suk Jung Korea Rural Community Corporation Rural Research Institute / Researcher (wsjung@ekr.or.kr)
- Jong Moon Lee Division of Watershed and total load Management research, National Institute of Environmental Research / Researcher (leejm0909@korea.kr)
- Young Do Kim Dept. of Civil & Environmental Engineering, Myongji University / Professor (ydkim@mju.ac.kr)

1. 서 론

지구온난화와 기후변화는 현재 전 세계적으로 중요한 이슈 중의 하나로 대부분의 국가에서 지구가 직면한 가장 큰 위협 중 하나임에 동의하고 있다. 현재 기후변화는 예측할 수 없는 변동성이 매우 커지고 있어 생태계의 형성, 생물학적인 성장과정, 인류의 생활, 수문학적 순환 등 다양한 시스템에 변화를 가져오고 있으며, 기후변화에 따른 영향과 사회적 시스템 파괴에 따른 위해성을 사전에 차단하기 위하여 온실가스 배출저감 정책 등 국가적 차원의 전략적 대응에 목표를 두고 많은 연구가 진행되고 있다(Mora et al., 2013). 우리나라도 강수량, 지하수, 증발산량 및 토양수분 등 수환경과 관련된 물순환 체계의 불안정으로 인해 최근 35년간 집중호우가 2배 이상 증가하고 계절 간 강수 불균형이 심화되었으며(환경부, 2008b) 이러한 변화는 수문체계에 막대한 영향을 끼치게 되므로 미래 강수량 및 하천유량, 수질 등에 대한 불확실성은 유역의 환경변화 예측을 어렵게 하여 기존 수자원 관리와 계획 시스템에 변화를 가져올 것이다(장재호와 안종호, 2012). 이러한 기후변화현상의 특성을 분석하고 정량화하는 것은 그 원인을 규명하고 검증하는 것 뿐만 아니라 적응 대책과 완화 정책을 전략적으로 수립하기 위해 근본적으로 매우 중요하다(Deser et al., 2012). 국내 저수지에서는 여름에 집중되는 강우에 의해 토사가 저수지로 유입, 장기간 머무르게 되면서 탁수의 밀도류가 형성되는데 이는 저수지의 수리와 수질 특성에 많은 영향을 끼친다(정세웅 등, 2007). 따라서 다목적 댐에서의 기후변화의 영향에 의한 취약성을 분석하고 수질전망이 필요하다. 분석방법으로는 물리모형과 인공신경망의 결과를 비교하였다. 인공신경망은 환경분야에 많이 적용되어지고 있는 데이터마이닝 방법이다. Jeong et al. (2002)는 충주호에서 Ph, DO, BOD의 수질특성을 신경망 이론을 이용해 수질값을 예측하였고, Kim et al. (2013)은 신경망 모형을 활용하여 대청호 내의 단기조류예측 모형을 연구하였다. Kim et al. (2015)은 수질에 영향을 미치는 기상 및 수질인자를 고려하여 신경망 모형을 구축하여 상관관계의 분석을 통하여 예측 정확도가 높은 수질인자에 대한 예측 모형을 구축하여 적용성을 검토하였다. 이처럼 인공신경망을 이용한 다양한 연구사례에서 단기 예측에 연구는 있으나 장기 예측에 대한 연구는 많지 않다. 장기예측의 정확도가 떨어지는 부분은 물리 모형과 비교하여 정확성을 비교하고자 한다. 기후시나리오는 RCP 기반의 기후변화 표준 및 앙상블시나리오하에서 상세화전망을 이용하여 하류하천에서의 수질전망을 수행하였고 연구대상 유역인 합천댐 유역을 대상으로 기후시나리오 생산을 위하여 지역기후모형(RCM)의 분석 및 인공신경망 기법을 적용한 상세화를 통하여 예측인자에 대한 모의결과로부터 미래 기상자료를 구축하였다. 유역모형을 선정하여 미래 기후변화에 따른 유역의 장기유역유출과 장기오염부하를 분석하여 분석한 결과를 CE-QUAL-W2 모형에 댐 방류량을 적용하여 미래 수질 변화 분석하였다. 인공신경망을 활용한 합천댐 저수지의 미래 수질변화를 비교 분석하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구에서의 분석구간은 Fig. 1과 같이 합천댐 유역의 기후변화에 따른 유출량을 고려하였으며 합천 댐 상류 구간으로 유역모형과 저수지 모형을 구축하여 분석하였다.

미래 시나리오를 적용하여 기후전망을 하기 위하여 기상청 표준시나리오(HadGEM3-RA)는 영국 기상청 해들리센터의 전지구 대기-해양 결합모델인 HadGEM2-AO에 기초하여 생산된 자료인 HadGEM3-RA자료를 사용하였다. 기상청 산하 기후변화정보센터(Climatic Change Information Center; CCIC)로부터 한반도 RCP 4.5 자료(12.5km)를 제공받았으며 (Table 1), 기후변화정보센터에서는 자체적으로 한반도 전망자료(12.5km), 남한상세 전망자료(1km), 기후극한지수, 행정구역별 자료 등 다양한 형태의 자료를 제공하고 있지만 영국에서 개발된 단일모델 자료만을 사용하고 있다는 단점이 있다.

기후변화 자료는 기상청 표준 시나리오(HadGEM3-RA)의 RCP4.5 시나리오를 적용하였다(Table 2). 수집된 기후변화자료가 갖는 강우자료의 계통적인 오차를 보정하기 위하여 정상성 분위사상법을 적용하였으며, 미래 시나리오의 지역오차보정은 일반적인 분위사상법을 통하여 확률분포가 왜곡되어 구간에 따라 과소 또는 과대 추정되는 단점을 개선하기 위한 비정상성 분위사상법을 적용하였다. 비정상성 분위사상법의 장점은 계통적인 오차만을 보정하는 일반적인 분위사상법과는 달리 계통적인 오차를 보정하고 동시에 확률분포의 통계분포모수에 경향성을 부여함으로써 기존 원시자료가 갖고 있는 경향성을 그대로 유지할 수 있도록 하는 것이다. 기준 시나리오

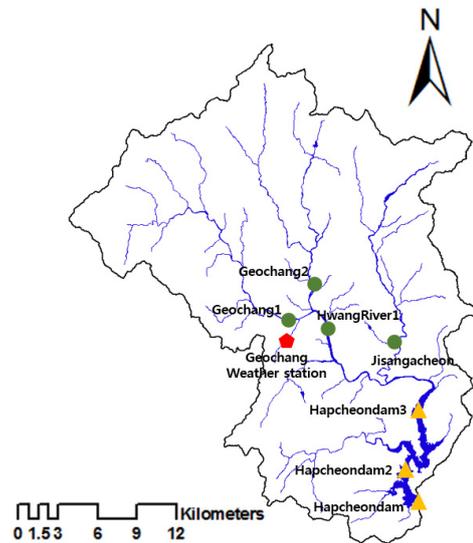


Fig. 1. Location of study Area.

Table 1. Information on a specific climate scenario applied or adopted in this study

Modeling Center	Model	Institution
KMA	HadGEM3-RA	Korea Meteorological Administration

Table 2. Overview of RCP Scenarios

RCP scenarios	
RCP 4.5	Stabilization without overshoot pathway to 4.5 W/m ² at stabilization after 2100

Table 3. Statistical parameter of each rain gauge station under RCP 4.5 scenario(HadGEM3-RA)

Parameter	Yeongju	Mungyeong	Uiseong	Uljin	Thiessen Average
Mean [mm]	119.7	118.0	90.1	96.8	105.7
Standard Deviation [mm]	135.8	134.3	108.2	101.6	109.9

검증과 마찬가지로 미래 시나리오 역시 모든 기법은 관측소별로 수행되었으며 여름철의 특성을 재고하기 위하여 홍수기(6~9월)와 비홍수기(1~5월, 10~12월)로 구분하여 비정상성 분위사상법을 적용하였다. 상주보 상류유역의 통계분포모수인 기준시나리오 기간 월강우의 평균과 표준편차는 2006~2013년 기간은 각각 100.0mm, 110.2mm이고, 1981~2000년 기간은 각각 93.8mm, 95.7mm이다. HadGEM3-RA의 RCP 4.5 시나리오 80년(2021~2100년) 월강우의 평균은 105.7mm, 표준편차는 109.9mm이며, 20개 GCM의 베이지안 앙상블 강우의 RCP 4.5 시나리오의 80년 월강우의 평균은 100.3mm, 표준편차는 78.4mm로 기준 시나리오에 비하여 월강우의 평균량이 증가하는 결과를 확인하였다(Table 3.)

2.1 장기유역유출모형(SWAT)

SWAT 모형은 준 분포형 장기-강수유출모형으로서 유역의 서로 다른 표면특성을 반영할 수 있도록 소유역으로 나누고 소유역내에서 공간적으로 단일한 토양 특성과 토지이용을 가진 수문학적 반응단위(Hydrologic Response Unit, HRU)로 세분한다. 그리고 물과 유사의 이동, 작물의 성장, 영양물질 순환 등을 모의하기 위하여 유역내의 기상, 토양특성, 지형, 식생과 토지관리 방법 등을 입력 자료로 이용한다. 유역의 수문에 대한 모의는 유출, 유사, 영양물질의 이동을 정확히 예측하기 위하여 크게 수문 순환의 토지부분과 수문순환의 물 혹은 추적부분으로 나누어지며 이는 다시 수문 모형, 토양유실모형, 영양물질 모형, 하도추적 모형의 4가지로 구분할 수 있다(Yoo et. al., 2005). 수문 모형은 각 HRU에서 모형화의 근간이 되는 물수지 방정식에 근거하여 일단위로 강수량, 침투량, 증발산량과 SCS 방법을 적용하여 지표면 유출량을 산정한다. 또한, 토양침식 및 퇴적에 따른 유사량은 수정범용토양손실공식(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE)을 적용하여 추정한다. 그리고 주하천으로의 유입량을 우선 결정된 후 하도추적 모형에서는 홍수량과 하천망과 하천 및 하상에서의 유사이송을 산정한다.

SWAT 모형에서의 입력자료는 지형입력자료로서 DEM, 토양도, 토지이용도를 필요로 한다. 입력된 지형자료로부터 수문 반응단위(HRU)를 생성하며 토양과 토지이용에 따른 속성값을 부여한다.

과거 모델링 수행을 통해 우리나라 토양의 토양층 개수, 토양층별 깊이, 토양층의 유효수분량, 포화수리전도도 등의 물리적 속성값을 구축하였으며, 토지이용에 따른 SWAT에서 요구하는 CN, USLE factor 등을 구축하였다.

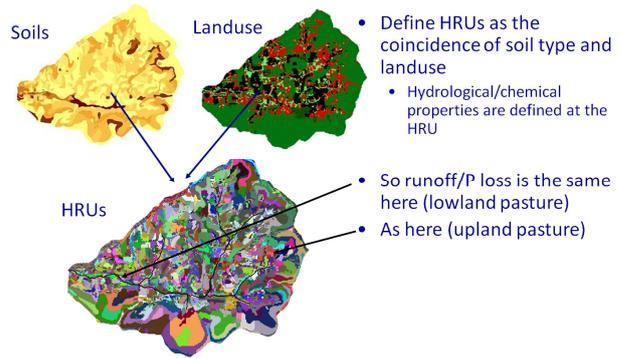


Fig. 2. Hydrologic response units(HRU) concept.

수질모의를 위한 대상유역에 대한 환경부 환경기초시설자료를 수집하여 SWAT 모델에 점오염(point source)으로 입력한다.

장기유출과 수질부하량을 모의하기 위해 낙동강 주요 지류에 대한 수질 관측 자료를 수집하였다. 수집된 자료는 환경부 오염총량제 수질측정망에서 관측하고 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr>)에서 제공하는 8일 간격의 자료이다. 하지만 8일 간격의 관측자료로는 일단위로 모의되는 SWAT 모형의 수질부하량 결과를 평가하기엔 무리가 있기 때문에 8일 간격의 자료를 일 단위 자료로 보간하는 방법을 제시 하였다.

2.2 저수지 수질모형(CE-QUAL-W2)

본 연구에서는 RCP 기반의 기후변화 표준 및 앙상블 시나리오하에서의 일단위 상세화전망을 위하여 미래 시나리오 HadGEM3-RA RCP 4.5 시나리오를 적용하여 저수지에서의 미래 수질영향을 분석하였다. W2 모형의 주요 입력 자료는 저수지 지형 및 단면자료와 상류와 하류의 유량 및 수질 경계 조건, 기상자료, 수온자료, 초기조건 등이 있다. W2 모델은 모의대상 수질항목이 국내 호소수질 측정망 자료와 다소 차이가 있으며, 유기물의 존재 형태에 따라 난분해성 용존상 유기물(R-DOM), 분해성 용존상 유기물(L-DOM), 난분해성 입자상 유기물(R-POM), 분해성 입자상 유기물(L-POM)에 대한 상세한 입력 자료를 요구한다.

모델 격자구성은 횡강 분류와 주요 지류하천을 4개의 구획(Branch)으로 구분하여 흐름방향으로 91개의 요소(segment), 수심방향 1m 간격으로 84개의 수층(layer)으로 구성하였다(Fig. 3). 합천댐에서는 횡방향 물리 화학적 요소가 균일하여 2D모형을 사용하였다. W2 모형은 흐름방향으로 완전혼합을 가정하기 때문에 가지형의 우리나라 저수지 수체에 매우 적합하

고, 성층화 현상 및 밀도류 유동해석이 용이하다. 수리동력학 지배방정식에 저수지 바닥 경사각 고려, 입력자료의 선형보간(Interpolation) 기능, 사용자 편의 프로그램(GUI) 등 다양한 기능이 포함되어 있다. W2 모델의 수리해석은 수위, 압력, 수평방향 유속, 수심방향 유속, 물질의 농도, 밀도 등 6가지 변수를 연속방정식(식 1), x 방향 운동량 방정식(식 2), 정수압 방정식(식 3), 자유수면 방정식(식 4), 밀도상태방정식(식 5), 물질 수지방정식(식 6) 등 6개의 지배방정식을 사용하여 다양한 유한차분수치해석법(Finite Different Method : FDM)을 사용하여 푼다. 하천 구간에 대해 적용할 경우 x 방향 운동량 방정식과 정수압 방정식은 하상경사(channel slope)를 고려해 준다. 운동량과 정수압 및 자유수면 방정식을 포함하는 수리해석은 음해적 유한차분법(Implicit FDM)을 사용하고 물질 이송항은 ULIMATE-QUICKEST 법을 사용하여 해석함으로써 급격한 수온과 농도변화 모의에서 발생할 수 있는 수치확산과 수치진동 문제를 해결하였다. 또한 y 방향에 대해 평균화하기 때문에 x 방향 운동량 방정식은 횡방향에 대한 확산항을 가지게 되며, z 방향 운동량 방정식은 정수압 방정식으로 가정한다. 흐름에 의해 발생하는 난류의 응력항들은 Prand시의 혼합길이 이론(mixing length theory)에 의한 eddy viscosity를 사용하여 속도경사와 와점성 계수의 함수로 표현된다.

$$\frac{\partial Bu}{\partial x} + \frac{\partial Bw}{\partial z} = qB \tag{1}$$

$$\frac{\partial Bu}{\partial t} = -\frac{\partial(Buu)}{\partial x} - \frac{\partial(Bwu)}{\partial z} + Bg\sin\alpha + g\cos\alpha B \frac{\rho_\xi}{\rho} \frac{\partial \xi}{\partial x} - B \frac{g\cos\alpha}{\rho} \int_\xi^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{\tau_{wx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(BA_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(BA_z \frac{\partial U}{\partial z} \right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \cos\alpha \tag{3}$$

$$\frac{\partial B\xi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_\xi^H uBdz - \int_\xi^H qBdz \tag{4}$$

$$\rho = f(C_{SS}, C_{TDS}, T) \tag{5}$$

$$\frac{\partial BC}{\partial t} = -\frac{\partial(BuC)}{\partial x} - \frac{\partial(BwC)}{\partial z} + Bq_s + \frac{\partial}{\partial x} \left(BE_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(BE_z \frac{\partial U}{\partial z} \right) \tag{6}$$

여기서, B = 저수지 폭(m), u = x방향 유속(m/s), w = z방향 유속(m/s), q = 측방 유입량(m³/sec), α = 하천경사, P = 압력(N/m²), ρ = 밀도(kg/m³), τ = 전단응력(m³/sec²), A = 와점성계수(m²/sec), H = 수심(m), ξ = 자유수면 위치(m), C = 물질의 농도(mg/L), CTDS = 총용존부유물농도(mg/L), T = 수온(°C), E = 와확산계수(m²/sec)이다.

지형자료의 신뢰도 평가를 위해 모의저수용량과 수위-저수용량곡선식으로부터 산정된 저수용량을 비교한 결과 AME는 절대평균오차값으로 7.112 백만m³, RMSE는 10.351 백만 m³, R²는 0.9997로 나타나 신뢰도가 높은 것으로 판단된다.

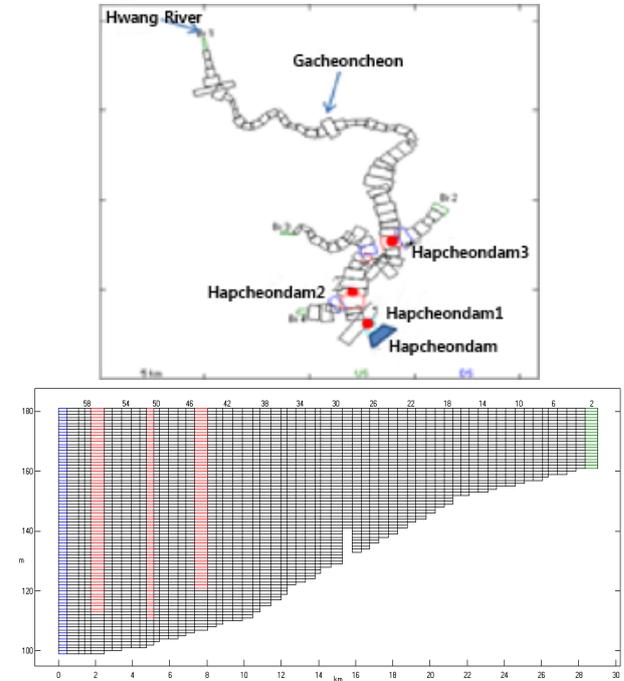


Fig. 3. Cross-section grid construction of horizontal and vertical in Hapcheon Dam.

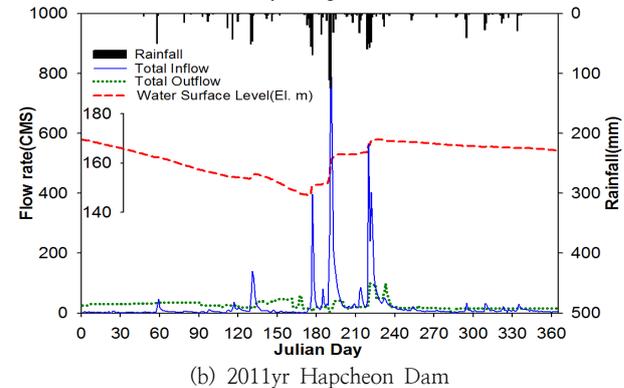
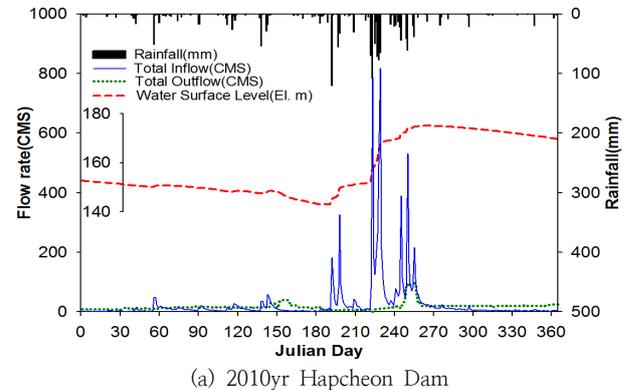


Fig. 4. Hapcheon Dam operation data in calibration and validation period.

초기조건으로는 보정년도는 2010년 1월 1일 ~ 2010년 12월 31일, 검증년도는 2011년 1월 1일 ~ 2011년 12월 31일로 선정된 후 모델을 구축하여 물수지, 수온성층, SS 및 부영양화 해석에 대하여 매개변수 보정을 수행하였다. 초기 수온 조건은 2010년 1월에 거창1 지점에서 측정된 수심별 수온 측정자료를 활용하여 모의시작시점의 초기 수온인 10.5°C로 설정하였다. Fig. 3에 합천댐의 수질 관측지점을 나타내었다.

유량 경계조건은 한국수자원공사에서 댐 수문자료에서 수집한 2010, 2011년 합천댐 운영자료로부터 강우, 유입량, 유출량, 댐수위 자료를 구성하였다.

유입수 수온 경계조건인 경우 합천댐 유입부에서 실측된 일별 수온자료가 없어 거창1 지점과 거창2 지점의 2010년 실측 유량과 수온 및 거창기상대의 기온자료를 바탕으로 회귀분석을 통해 산정하였다. 유입수의 SS 농도는 거창1 지점과 거창2 지점의 2010년에 실측된 유량과 SS 농도의 상관관계를 사용하여 산정하였다.

기상자료는 합천댐과 가장 인접한 거창기상대의 보정 및 검증년도 2010, 2011년 자료를 수집하여 사용하였다.

2.3 인공신경망(Artificial Neural Network)

인공신경망은 통계적 상세화 기법중의 하나로 인간의 두뇌를 구성하고 있는 기본단위인 뉴런(Neuron)의 인식과정을 수학적 모형으로 일반화시키기 위해 개발된 병렬정보처리 시스템이다. 인공신경망은 신경망의 계층구조에 따라 단층신경망과, 다층신경망으로 구분되는데 일반적으로 하나 이상의 은닉층을 가지고 있는 다층신경망이 많이 사용되어진다. 인공신경망모형은 입력뉴런, 은닉뉴런의 수, 학습할 케이스의 수가 학습성과에 중요한 영향을 미친다. 이는 은닉뉴런의 수가 많아지면 출력값과 목표값 사이의 오차를 계산하는 과정이 복잡해지고, 계산시간도 더 많이 소비하기 때문이다.

본 연구에서는 StatSoft사의 STATISTICA 7 프로그램을 활용하여 인공신경망을 구축하였다. 수온과 탁도를 예측하기 위하여 사용된 인공신경망은 다층 신경망구조로 모델링 하였으며, 학습방법으로는 역전파알고리즘(backpropagation algorithm)을 사용하였다. 역전파알고리즘은 일반적으로 인공신경망 모형의 학습을 위하여 많이 사용되는 기법이다. 출력값과 목표값 사이의 오차를 이용하여 가중치를 계산하는 방법으로 미분 가능한 활성화함수를 사용하여 경사하강법을 통하여 오차함수의 최소값을 찾아 가중치의 크기를 결정하는 방법이다.(Rojas, 1996). 본 연구에서는 합천댐 저수지 수질관측소와 거창기상대의 자료를 활용하여 인공신경망 모형을 구축하였다. 2005년부터 2015년까지의 측정자료를 활용하여 수온과 SS에 대하여 모형을 구축하였으며 2016년~2018년 측정값과 비교하여 모형을 검증하였다. 모형구축에는 거창 기상대 기온과 합천댐 저수지의 수온을 예측하였다. 입력자료는 저수지 수온 측정일과 동일한 날짜의 기온자료와 월평균 기온을 입력값으로 선정하여 합천댐 저수지 수질을 예측하였으며 SS의 예측은 일강수량(t), t-3, t-5, t-7을 입력값으로 선정하여 SS의 변화를 예측하였다.

3. 연구 결과

3.1 SWAT 검토정

SWAT 모형의 보정 및 검증을 위해 유출량에 대한 보정 및 검증을 실시하였다. 유출모의를 위해 모의기간을 설정하고, 모형의 안정화를 위해 구동초기 2년을 안정화기간(Warm-up period)으로 설정하였다. 모의옵션으로 지표유출은 SCS 유출곡선법, 증발산량 산정은 Penman-Monteith 방법, 하도추적은 Muskingum 방법을 이용하였다.

모형의 보정방법은 유출총량 및 지표유출과 기저유출을 기준으로 침투유량과 감소곡선 형태에 영향을 미치는 매개변수를 선정하여 시행착오법으로 보정을 수행하였다. 보정 및 검증 결과에 따른 모형의 적합성과 상관성을 판단하기 위한 목적함수로서 결정계수(R²)와 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 사용하였으며, 모형의 효율성 검증은 Nash and Sutcliffe(1970)가 제안한 모형효율성계수(NSE)를 사용하였다. Corr, R², NSE의 경우 1으로 갈수록, RMSE의 경우, 0으로 갈수록 상관성이 높다. Green 등(2006)은 R²가 0.5 이상이고 NSE가 0.4 이상, Chung et al. (1999)은 R²가 0.5 이상, Ramanarayanan et al. (1997)과 Santhi et al. (2001a, 2001b)은 R²가 0.6 이상이고 NSE가 0.5 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의한다고 제안한 바 있다. 결정계수는 모의값과 관측값이 일치할 때 1의 값을 가지며 -1에서 1까지의 범위를 갖는다.

$$R^2 = \frac{\left(\sum_t (Q_o^t - \bar{Q}_o)(Q_s^t - \bar{Q}_s) \right)^2}{\sum_i (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2 \sum_i (Q_s^t - \bar{Q}_s)^2} \quad (7)$$

또한, 오차분석을 위해 사용된 RMSE(root mean square error)는 0에서 ∞의 범위를 가지며, RMSE에 대한 수식은 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (Q_s^t - Q_o^t)^2}{n}} \quad (8)$$

NSE(Nash-Sutcliffe)는 모형의 효율성을 판단하는 지수로 다음의 식으로 나타낸다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_t (Q_o^t - Q_s^t)^2}{\sum_t (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (9)$$

여기서, n은 데이터의 개수, Q_o^t는 시간 t에서의 관측값, Q_s^t은 시간 t에서의 모의값, \bar{Q}_o 는 관측값의 평균, \bar{Q}_s 는 모의값의 평균을 의미한다.

Fig. 5는 합천댐의 검·보정 분석결과로 상관성 분석결과 Corr. 은 0.66과 0.82, R²는 0.43와 0.67로 각각 분석되었으며,

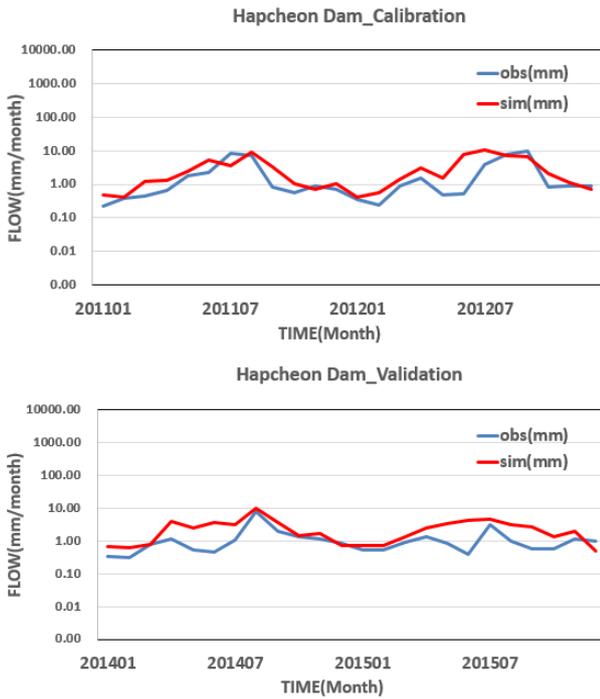


Fig. 5. Calibration and Validation of Flow.

RMSE는 3.62과 2.44, NSE는 0.49와 0.22로 상관성을 띄는 결과를 나타냈다. SWAT 모형의 수질 보정의 경우 강우 시 데이터가 부족하기 때문에 보정 값이 낮게 나타난다. 이 점을 보완하기 위해 MOS 방법을 선택하여 수질 검·보정을 수행하여 상관성 분석을 수행하였다. 합천댐 유역의 수질항목별 검·보정 그래프는 Fig. 6과 같다. MOS(Model Output Statistics)

Table 4. Result of Flow and Water quality calibration and validation

	Flow Station	Period	
		Calibration	Validation
Flow	Hapcheon Dam	2011~2012	2014~2015
Water Quality	Hapcheon Dam 1	2011~2012	2013~2015

방법은 환경부에서 관측하는 8일 간격의 수질농도 관측자료와 SWAT에서 모의된 유량을 이용하여 유량-부하량 회귀식을 구성하고 Perfect Prognosis와 마찬가지로 SWAT에서 모의되는 일단위 유량을 이용하여 보간하는 방법이다. MOS를 적용하여 SS, T-N, T-P 수질항목에 대해 보정을 하였다. 상관성 분석결과, 관측값과 모의값의 차이가 나타나지만 수질항목별 상관성을 분석하였을 때 전체적으로 만족하는 결과를 보이고 있다(Table 4.).

3.2 기후시나리오 결과

Table 5, 6은 장기유출 전망과 장기오염부하 전망에 대하여 분석하였다. 합천댐의 HadGEM3-RA RCP 4.5의 분석결과로서, Baseline을 기준으로 2100년으로 갈수록 유출량이 증가하는 결과를 나타낸다. 기후시나리오별 분석결과, RCP 4.5는 Baseline에 12,034 m³/sec에서 2100년에 12,524 m³/sec로 미래 유출량이 증가하는 경향을 나타낸다. 수질 항목에서 SS와 T-N의 경우 Baseline을 기준으로 2100년으로 갈수록 증가하는 경향을 나타내며 T-P는 감소하는 추세를 보이고 있다.

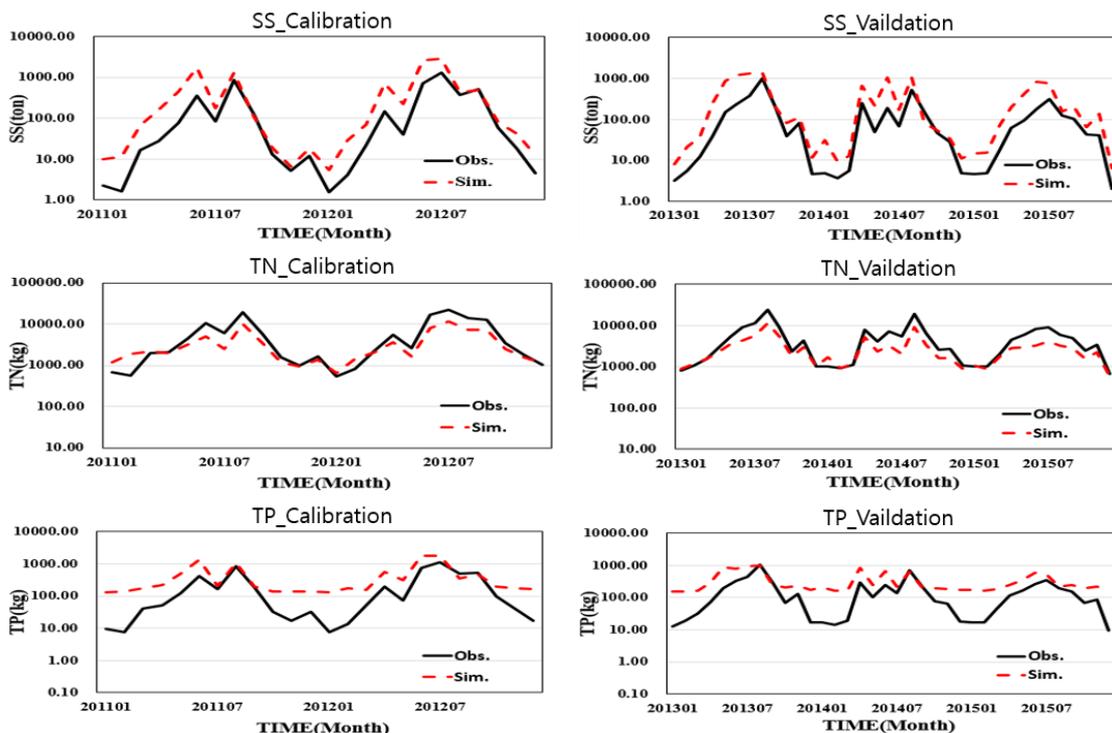


Fig. 6. Calibration and Validation of water quality.

Table 5. Result of change in the future outflow(HadGEM3-RA)

Stream	HadGEM3-RA RCP 4.5(m ³ /sec)			
	Baseline (1981~2000)	2021-2040	2041-2070	2071-2100
Hapcheon Dam	12,034	12,072 (0.3 %)	12,696 (5.5 %)	12,524 (4.1 %)

Table 6. Result of change in the future SS, T-N, T-P

	HadGEM3-RA RCP 4.5(ton/day)			
	Baseline (1981~2000)	2021-2040	2041-2070	2071-2100
SS	149,393	141,345 (-5.4 %)	167,357 (12.0 %)	153,097 (2.5 %)
T-N	1,139.4	1,134.5 (-0.4 %)	1,217.9 (6.9 %)	1,218.7 (7.0 %)
T-P	127.3	116.9 (-8.2 %)	119.6 (-6.1 %)	109.1 (-14.3 %)

3.3 저수지 수질모형(W2) 검토정

W2 모형의 수치격자가 합천댐의 지형과 물수지를 잘 재현하는지 확인하기 위해 보정기간과 검증기간인의 실측수위와 모의수위를 비교하였다. 수심이 깊은 저수지의 수온성층 구조는 오염물질의 공간적 분포와 상하 수직혼합에 영향을 미치며, 궁극적으로는 입자상 물질의 침강속도, 수질반응 속도, 조류의 성장환경에도 영향을 미치므로 우선 검증되어야 할 요소이다. W2 모형의 수온 예측성능을 검증하기 위해 보정기간과 검증기간의 수심별 수온 모의값과 실측값을 비교하였다.

초기조건으로는 보정년도는 2010년 1월 1일 ~ 2010년 12월 31일, 검증년도는 2011년 1월 1일 ~ 2011년 12월 31일로 선정된 후 모형을 구축하여 물수지, 수온성층, SS 및 부영양화 해석에 대하여 매개변수 보정을 수행하였다. 초기 수온 조건은 2010년 1월에 거창1 지점에서 측정된 수심별 수온 측정자료를 활용하여 모의시작시점의 초기 수온인 10.5℃로 설정하였다.

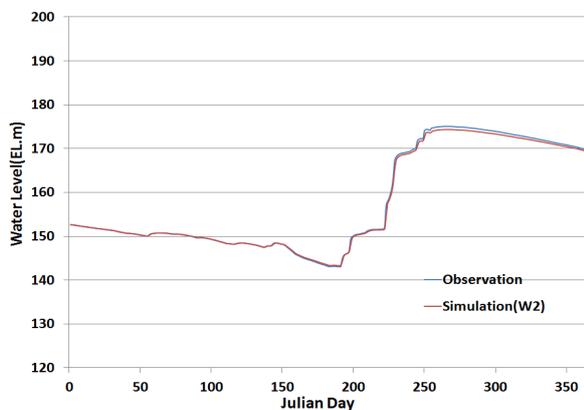
보정 및 검증에 사용한 수위 및 수질 자료는 수자원공사에서 제공하는 댐 운영 자료와 환경부 수질측정망 자료를 사용하였다.

물수지 비교 결과, 보정기간인 2010년의 AME는 0.275 m, RMSE는 0.411 m, R²는 0.9996로, 검증기간인 2011년의 AME는 절대평균오차로 0.265 m, RMSE는 0.336 m, R²는 0.999로 나타나 합천댐의 수치격자는 재현성이 높은 것으로 판단된다(Fig. 7, Table 7).

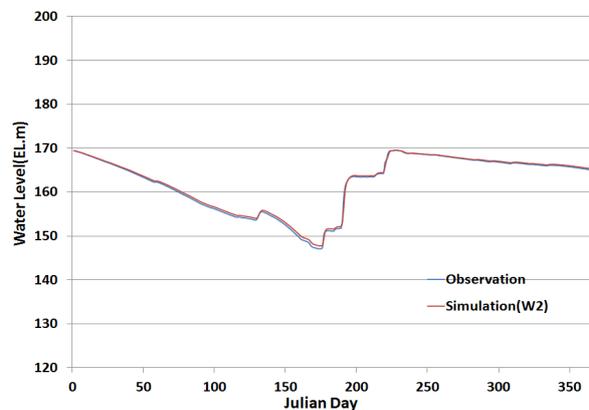
수온성층구조 모의결과 보정기간인 2010년의 수온 예측 오차는 AME 0.298 ~ 1.178 ℃, RMSE는 0.415 ~ 1.508 ℃, 검증기간인 2011년의 수온 예측 오차는 AME 0.267 ~ 0.787 ℃,

Table 7. Error assessment of reservoir water surface simulation result in Hapcheon Dam

	AME (m)	RMSE (m)	R ²	MAPE (%)
2010yr	0.275	0.411	0.9996	0.165
2011yr	0.265	0.336	0.9990	0.167

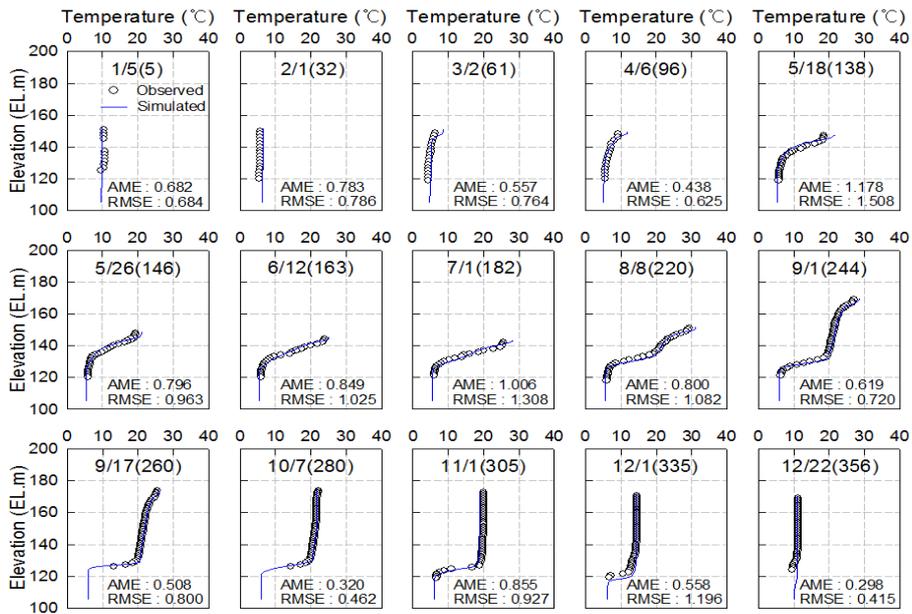


(a) 2010yr

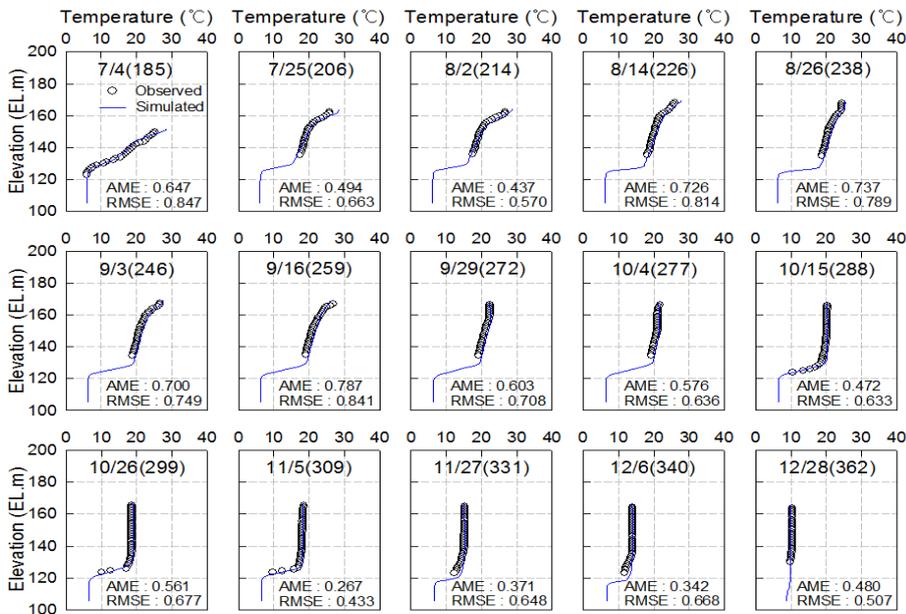


(b) 2011yr

Fig. 7. Comparison of observation and simulation in Hapcheon Dam(water surface).



(a) 2010yr



(b) 2011yr

Fig. 8. Comparison of observation and simulation water temperature in Hapcheon Dam.

Table 8. Error assessment of water temperature simulation result in Hapcheon Dam

	AME	RMSE
2010yr	0.683* ± 0.246** (1.178***/0.298****)	0.882* ± 0.307** (1.508***/0.415****)
2011yr	0.547* ± 0.156** (0.787***/0.267****)	0.679* ± 0.119** (0.847***/0.433****)

* average, ** standard deviation, *** maximum, **** minimum

RMSE는 0.433 ~ 0.847 °C로 나타나 비교적 실측값을 잘 반영하는 것으로 판단된다(Fig. 8, Table 8).

3.4 기후변화가 저수지 수환경에 미치는 영향 분석

Table 9에 미래 기후변화 시나리오 적용에 따른 합천댐 지점의 모의 대상년도 연평균 상층수온 결과를 나타내었다. 분석 기간은 2021년~2100년이며, 2021년~2040년은 FFS(Foreseeable Future Scenario), 2041년~2070년은 MFS(Mid-term Future Scenario), 2071년~2100년은 LFS(Long-term Future Scenario)로 3개 기간으로 구분하였다. HadGEM3-RA 기후 시나리오의 경우, FFS 기간에서 미래인 LFS 기간으로 갈수록 상층수온이 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 9는 HadGEM3-RA 시나리오에서 풍수년(10%)의 5~10월 간의 수온변화를 나타낸 그림으로 6월 초에 수온상승

Table 9. Comparison of upper water temperature (HadGEM3-RA)

		year	section	Min. (°C)	Max. (°C)	Ave. (°C)
HadGEM3-RA RCP 4.5	10% (Wet year)	2039	FFS	6.86	31.72	18.23
		2042	MFS	7.15	30.47	18.09
		2099	LFS	8.19	31.58	19.93
	50% (average water year)	2040	FFS	7.22	31.59	18.50
		2057	MFS	7.46	33.54	19.93
		2094	LFS	8.81	34.26	20.42
	90% (dry year)	2030	FFS	7.57	31.00	18.47
		2070	MFS	7.97	33.73	19.31
		2077	LFS	8.17	31.71	20.04

Table 10. Comparison of SS concentration (HadGEM3-RA)

		year	section	Min. (mg/l)	Max. (mg/l)	Ave. (mg/l)
HadGEM3-RA RCP 4.5	10% (Wet year)	2039	FFS	0.073	2.932	0.816
		2042	MFS	0.064	2.767	0.956
		2099	LFS	0.048	3.112	0.908
	50% (average water year)	2040	FFS	0.057	2.368	0.681
		2057	MFS	0.046	1.795	0.605
		2094	LFS	0.063	2.587	0.718
	90% (dry year)	2030	FFS	0.073	1.604	0.519
		2070	MFS	0.072	1.321	0.440
		2077	LFS	0.043	1.862	0.533

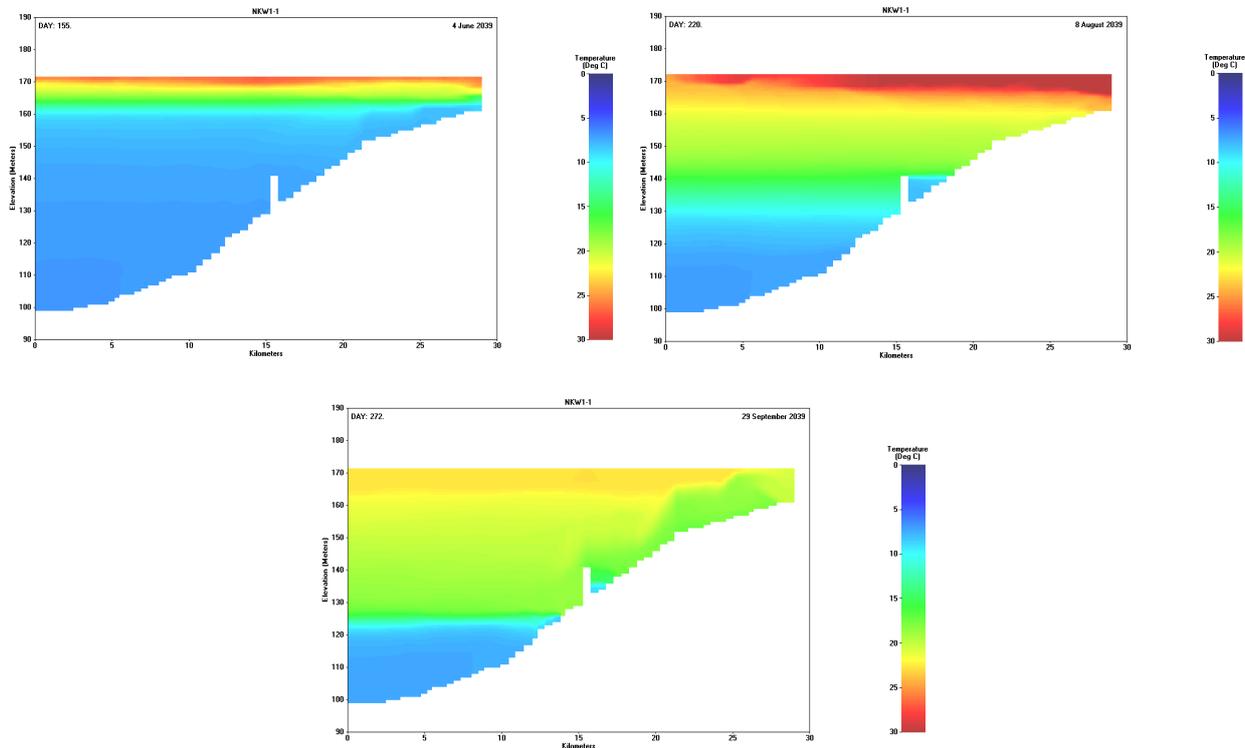


Fig. 9. Analysis of water temperature change in Hapcheon Dam Reservoir by HadGEM3-RA.

현상이 발생하여 8월 초에 수온약층이 강하게 형성되고 있다. 그리고 9월 말에 수온약층이 현상이 없어지는 결과를 보이고 있으며, 심층수온의 경우에는 큰 변동이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 10은 같은 시기에서 탁수유동 분석결과를 나타낸 그림으로 합천댐의 경우, 탁도 발생량이 댐 유입부에 5월초에 발생하여 머무르는 현상이 발생하며, 8월 초에 탁도가 크게 발생하여 10월 중순까지 중층에 머무르면서 서서히 약해지는 현상을

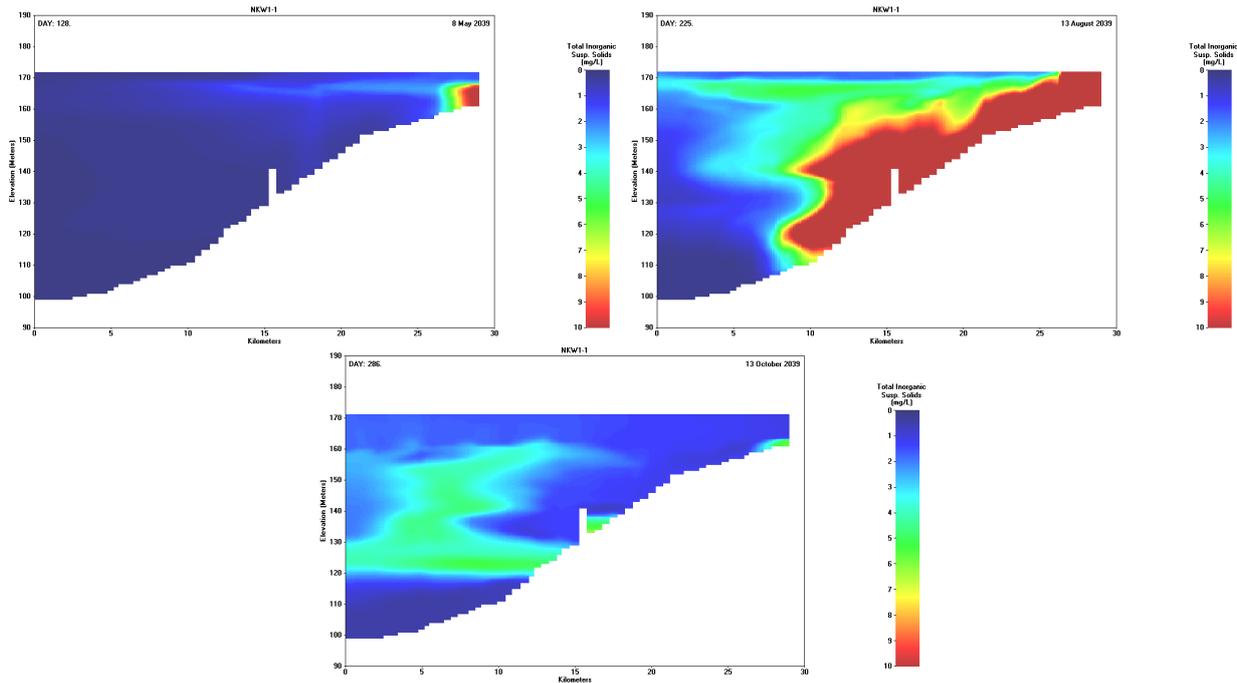


Fig. 10. Analysis of Turbidity by HadGEM3-RA(Hapcheon Dam).

보이고 있다. 댐체까지 SS가 유입되지 않아 전체적으로 SS 변화가 크게 나타나지 않았다. Table 10의 SS 농도 분석결과, HadGEM3-RA RCP 4.5 변화가 크지 않아 수온과 달리 기후 시나리오의 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

3.5 인공신경망 검증

수온과 SS에 대하여 인공신경망을 구축하여 검증하였다.

2016~2018년 합천댐 저수지 관측값과 비교하여 정확도 검증을 실시하였다. 2005년~2015년 측정값을 활용하여 구축한 인공신경망 모형에 2016년~2018년 측정값을 입력값으로 활용하여 예측하여 실제값과 비교 검증하였다(Fig. 11). 모형의 구축의 검증은 RMSE, R^2 , NSE를 활용하여 정확성을 검증하였다.

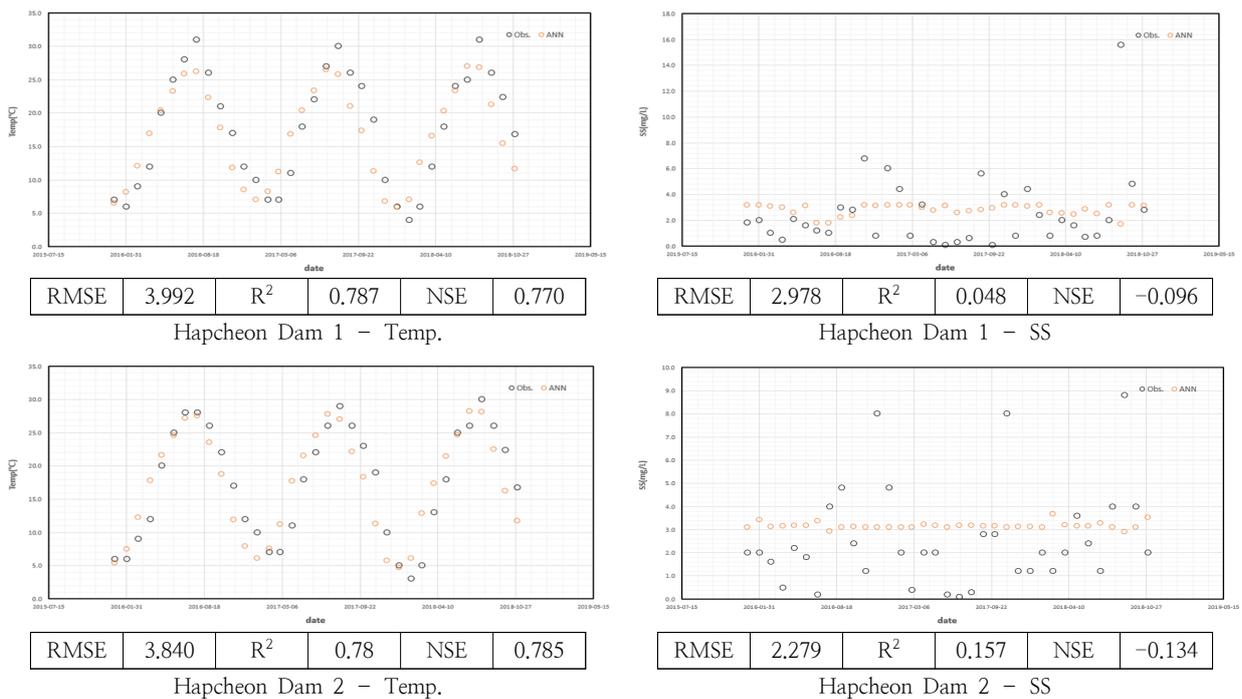


Fig. 11. Comparison of observation and simulation water temperature(ANN).

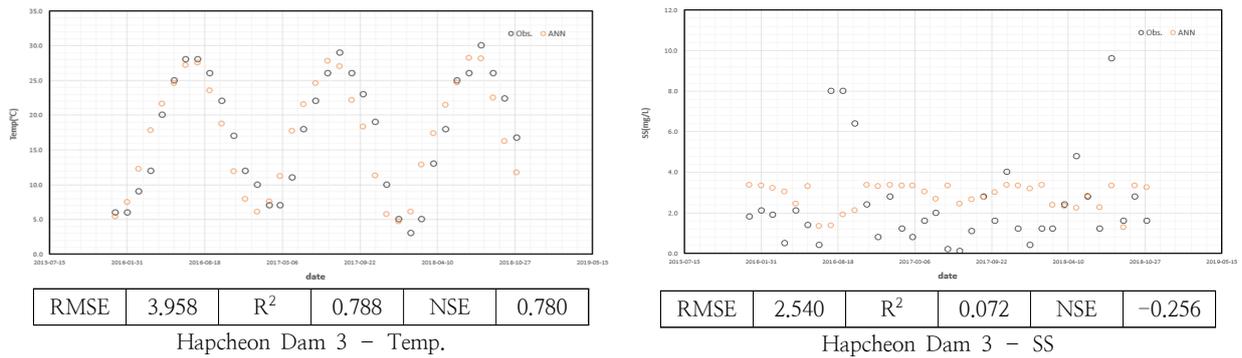


Fig. 11. Comparison of observation and simulation water temperature(ANN) (Continued).

3.6 인공지능망을 기후변화가 저수지 수환경에 미치는 영향 분석

검증된 모형에 기후시나리오를 적용하여 미래 수환경 변화를 분석하였으며 적용한 기후시나리오는 거창 기상대 시나리

오를 활용하여 일 단위 기온과 수온을 월평균, 월 최대값, 월 최소값을 적용하여 저수지 미래 수온 변화를 분석하였다. SS의 예측은 기후시나리오의 강우량은 누적강우를 예측하기 어려워 월 평균 강우량과 월 누적 강우량을 적용하여 예측하였다. 예측 결과는 다음과 같다(Table 11, 12).

Table 11. Comparison of upper water temperature (ANN)

		year	section	Min. (°C)	Max. (°C)	Ave. (°C)
Hapcheon Dam 1	10% (Wet year)	2039	FFS	13.38	29.75	21.25
		2042	MFS	14.25	29.90	20.77
		2099	LFS	14.28	30.89	22.67
	50% (average water year)	2040	FFS	14.78	29.90	21.41
		2057	MFS	14.24	31.55	22.48
		2094	LFS	13.71	33.49	23.19
	90% (dry year)	2030	FFS	13.99	29.60	21.40
		2070	MFS	13.97	32.36	21.90
		2077	LFS	14.59	31.03	22.67
HadGEM3-RA RCP 4.5	10% (Wet year)	2039	FFS	14.40	30.62	22.56
		2042	MFS	15.46	30.56	22.06
		2099	LFS	15.49	31.45	23.95
	50% (average water year)	2040	FFS	16.10	30.68	22.71
		2057	MFS	15.51	31.98	23.76
		2094	LFS	14.82	33.75	24.42
	90% (dry year)	2030	FFS	15.15	30.36	22.67
		2070	MFS	15.14	32.75	23.16
		2077	LFS	15.86	31.57	23.95
HadGEM3-RA RCP 4.5	10% (Wet year)	2039	FFS	15.86	31.00	23.52
		2042	MFS	16.94	30.84	23.02
		2099	LFS	16.96	31.76	24.79
	50% (average water year)	2040	FFS	17.61	31.03	23.62
		2057	MFS	17.09	32.28	24.61
		2094	LFS	16.38	34.17	25.27
	90% (dry year)	2030	FFS	16.67	30.67	23.55
		2070	MFS	16.66	33.11	24.06
		2077	LFS	17.28	31.88	24.79

Table 12. Comparison of SS concentration (ANN)

		year	section	Min. (mg/l)	Max. (mg/l)	Ave. (mg/l)
Hapcheon Dam 1	10% (Wet year)	2039	FFS	-3.084	3.098	1.084
		2042	MFS	-2.484	2.984	1.120
		2099	LFS	-2.964	3.125	1.351
	50% (average water year)	2040	FFS	-1.432	3.061	1.473
		2057	MFS	-2.188	2.789	1.072
		2094	LFS	-1.370	3.124	1.405
	90% (dry year)	2030	FFS	-1.896	2.724	1.459
		2070	MFS	-2.339	2.904	1.548
		2077	LFS	-1.298	2.994	1.638
Hapcheon Dam 2	10% (Wet year)	2039	FFS	-2.374	3.408	1.339
		2042	MFS	-2.113	3.302	1.308
		2099	LFS	-2.319	3.434	1.617
	50% (average water year)	2040	FFS	-1.408	3.374	1.678
		2057	MFS	-1.956	3.110	1.286
		2094	LFS	-1.356	3.433	1.586
	90% (dry year)	2030	FFS	-1.768	3.044	1.662
		2070	MFS	-2.040	3.224	1.775
		2077	LFS	-1.293	3.312	1.849
Hapcheon Dam 3	10% (Wet year)	2039	FFS	-2.179	3.230	1.086
		2042	MFS	-1.896	3.046	1.059
		2099	LFS	-2.134	3.276	1.354
	50% (average water year)	2040	FFS	-1.159	3.169	1.398
		2057	MFS	-1.709	2.742	1.007
		2094	LFS	-1.112	3.274	1.324
	90% (dry year)	2030	FFS	-1.504	2.646	1.319
		2070	MFS	-1.807	2.918	1.444
		2077	LFS	-1.058	3.061	1.564

4. 결 론

기후변화는 전 세계적으로 중요한 문제로 지구가 직면한 가장 큰 위협중 하나에 동의하고 있다. 따라서 기후변화를 적용한 유역의 댐 저수지의 호소 수질 변화 분석을 수행하였다. 연구 대상유역인 합천댐 유역을 대상으로 SWAT 모델과 기후변화 시나리오를 적용하여 장기유역유출과 장기오염부하를 분석하여 W2 모형에 적용 미래 수질 변화를 분석하였다. 기후 시나리오는 기상청 표준 시나리오(HadGEM3-RA)의 RCP4.5 시나리오를 비정상성 분위사상법을 활용하여 분석하였다.

SWAT 모형의 보정 및 검증 상관성 분석결과, 관측값과 모의값의 차이가 나타나지만 수질항목별 상관성을 분석하였을 때 전체적으로 만족하는 결과를 보이고 있으며 W2 분석 결과 기후변화가 저수지 수환경에 미치는 영향 분석 결과 수온의 경우 HadGEM3-RA 기후시나리오의 경우, FFS 기간에서 미래인 LFS 기간으로 갈수록 상층수온이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 6월 초에 수온성층 현상이 발생하여 8월 초에 수온

약층이 강하게 형성되고 있다. 그리고 9월 말에 수온약층이 현상이 없어지는 결과를 보이고 있으며, 심층수온의 경우에는 큰 변동이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

탁도유동 분석결과 탁도 발생량이 댐 유입부에 5월초에 발생하여 머무르는 현상이 발생하며, 8월 초에 탁도가 크게 발생하여 10월 중순까지 중층에 머무르면서 서서히 약해지는 현상을 보이고 있다. 댐체까지 SS가 유입되지 않아 전체적으로 SS 변화가 크게 나타나지 않았다. 수온 인공신경망 분석 결과 최소값은 W2 분석결과에 비해 높게 나타났으며 최고값은 비슷한 결과를 나타냈다. 평균값은 최소값의 영향으로 W2에 비해 다소 높은 값을 보였는데 이는 최소값의 영향을 받은 것으로 판단된다.

SS 인공신경망 분석결과 W2 결과와 최소값, 최대값, 평균값에서 모두 차이를 나타냈다. 이는 인공신경망 모형의 재현성이 떨어져 나타난 결과로 판단된다. 인공신경망을 활용하여 기후 시나리오 적용결과를 분석하였는데 수온은 다른 모델과 비슷한 경향을 나타냈으며 SS는 결과에 차이가 나타났다. 이러한

결과는 SS가 수온에 비해 경향성이 떨어지며 인공신경망을 활용하여 재현하는데 적용성이 떨어진다고 판단된다. 수온과 같은 경향성이 나타나는 자료에 대해서는 인공신경망을 활용한 미래예측이 가능하다고 판단되며 물리모형에 비해 간단한 방법으로 미래 수환경 예측을 하는데 장점이 있다고 사료되며 인공신경망 모형의 구축에 있어 데이터의 확보와 재현성을 높이는 방법에 대하여 추가적으로 연구를 하여 수환경 미래예측에 도움이 될 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국연구재단의 연구비지원(NRF-2020R1F1A1076887)에 의해 수행되었습니다.

References

- Anandhi, A., Frei, A., Pierson, D.C., Schneiderman, E.M., Zion, M.S., Lounsbury, D. and Matonse, A.H. (2011) Examination of change factor methodologies for climate change impact assessment. *Water Resources Research*, 47(3), DOI: [10.1029/2010WR009104](https://doi.org/10.1029/2010WR009104)
- Bo Ram Kim, Boo Sik Kang. (2013). *Simulation of Water Temperature and Suspended Solid Stratification in Hapcheon Dam Reservoir using CE-QUAL-W2. Joint spring academic presentation(2000~), 2013(0), 209-210.*
- Cayan, D. R., E. P. Maurer, M. D. Dettinger, M. Tyree, and K. Hayhoe (2008) Climate change scenarios for the California region, *Climatic change*, 87(1), pp. 21-42, DOI: [10.1007/s10584-007-9377-6](https://doi.org/10.1007/s10584-007-9377-6)
- Cole, T. M. and D. H. Tillman 1999. Water Quality Modeling of Lake Monroe using CE-QUAL-W2, Miscellaneous Paper EL-99-1.
- Debele, B., Srinivasan, R., Parlange, J.-Y. 2008. "Coupling upland watershed and downstream waterbody hydrodynamic and water quality models(SWAT and CE-QUAL-W2) for better water resources management in complex river basins." *Environ Model Assess*, 13, pp.135-153. DOI: [10.1007/s10666-006-9075-1](https://doi.org/10.1007/s10666-006-9075-1)
- Gupta, V.K. and Waymire, E. (1990) Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 95(D3), pp. 1999-2009. DOI: [10.1029/JD095iD03p01999](https://doi.org/10.1029/JD095iD03p01999)
- Hayhoe, K., Cayan, D., Field, C. B., Frumhoff, P. C., Maurer, E. P., Miller, N. L., Verville, J. H. (2004) Emissions pathways, climate change, and impacts on California. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(34), pp. 12422-12427. DOI: [10.1073/pnas.0404500101](https://doi.org/10.1073/pnas.0404500101)
- Kim, Y.D., Kim, J.M. and Kang, B. 2016. Projection of runoff and sediment yield under coordinated climate change and urbanization scenarios in Doam Dam, *Journal of Water and Climate Change* (2017) 8 (2):235-253. DOI: [10.2166/wcc.2016.068](https://doi.org/10.2166/wcc.2016.068)
- Moron, V., Robertson, A. W., Ward, M. N., Ndiaye, O. (2008) Weather types and rainfall over Senegal. Part II: Downscaling of GCM simulations. *Journal of Climate*, 21(2), pp. 288-307. DOI: [10.1175/2007JCLI1624.1](https://doi.org/10.1175/2007JCLI1624.1)
10. Moon, S.J., Kim, J.J., Kang, B.S. 2013. Bias Correction for GCM Long-term Prediction using Nonstationary Quantile Mapping. *J. Korea Water Resources Association*, Vol46, No.8, pp.833-342. DOI: [10.3741/JKWRA.2013.46.8.833](https://doi.org/10.3741/JKWRA.2013.46.8.833)
- Se Woong Chung, Jae Ho Park, Yu Kyung Kim, Sung Wan Yoon. (2007). Research Paper : Application of CE-QUAL-W2 to Daechong Reservoir for Eutrophication Simulation. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 23(1), 52-63.
- Yoo, C., Kim, K., Kim, N.W. 2005. "Optimal Rain Gauge Density and Sub-basin Size for SWAT Model Application" *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol.38, No.5, pp.415-425. DOI: [10.3741/JKWRA.2005.38.5.415](https://doi.org/10.3741/JKWRA.2005.38.5.415)