

Research Paper

고빈도 자료기반 유입 수온 예측모델 개발 및 기후변화에 따른 대청호 성층강도 변화 예측

한종수* · 김성진* · 김동민* · 이사우* · 황상철** · 김지원** · 정세웅*

충북대학교 환경공학과*, 한국수자원공사**

Development of High-frequency Data-based Inflow Water Temperature Prediction Model and Prediction of Changes in Stratification Strength of Daecheong Reservoir Due to Climate Change

Jongsu Han* · Sungjin Kim* · Dongmin Kim* · Sawoo Lee* · Sangchul Hwang** · Jiwon Kim** · Sewoong Chung*

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University*
Korea Water Resources Corporation (K-water)**

요약: 댐 저수지 수온성층은 수직혼합을 억제하여 저층의 빈산소층 형성과 퇴적물 영양염류 용출을 일으키는 원인이므로 미래 기후변화에 따른 저수지 성층구조의 변화는 수질 및 수생태 관리 측면에서 매우 중요하다. 본 연구의 목적은 대청댐 저수지를 대상으로 고빈도 자료기반의 통계적 저수지 유입 수온 예측 모델을 개발하고, RCP(Representative Concentration Pathways) 기후변화 시나리오를 고려한 미래 유입 수온변화와 대청호 성층구조의 변화를 예측하는 데 있다. 대청호 유입 수온 예측을 위해 개발한 Random Forest 회귀 예측모델(NSE 0.97, RMSE 1.86°C, MAPE 9.45%)은 실측 수온의 통계량과 변동성을 적절히 재현하였다. 지역 기후 모델(HadGEM3-RA)로 예측된 RCP 시나리오별 미래 기상자료를 Random Forest 모델에 입력하여 유입 수온을 예측하고 3차원 저수지 수리 모델을 이용하여 기후변화에 따른 대청호의 미래(2018~2037, 2038~2057, 2058~2077, 2078~2097) 수온성층 구조 변화를 예측하였다. 예측 결과, 미래 기후 시나리오별로 대기 온도와 저수지 유입 수온의 증가속도는 각각 0.14~0.48°C/10year와 0.21~0.43°C/10year의 범위로써 지속적으로 증가하였다. 계절별 분석 결과, RCP 2.6 시나리오의 봄과 겨울철을 제외한 모든 시나리오에서 유입 수온은 증가 경향이 통계적으로 유의하였으며, 탄소저감 노력이 약한 기후 시나리오로 갈수록 수온의 증가속도가 빨랐다. 저수지 표층 수온의 증가속도는 0.04~0.38°C/10year 범위였으며, 모든 시나리오에서 성층화 기간이 점진적으로 증가되었다. 특히 RCP 8.5 시나리오 적용 시 성층일수는 약 24일 증가하는 것으로 전망되었다. 연구 결과는 기후변화가 호소의 성층강도를 강화

First Author: Jongsu Han, Tel: +82-43-261-3370, E-mail: jsmking9637@naver.com, ORCID: 0000-0002-2253-6274

Corresponding Author: Sewoong Chung, Tel: +82-43-261-3370, E-mail: chung@chungbuk.ac.kr, ORCID: 0000-0002-8596-4970

Co-Authors: Sungjin Kim, Tel: +82-43-261-3370, E-mail: znssungjin2@naver.com, ORCID: 0000-0002-4722-7240

Dongmin Kim, Tel: +82-43-261-3370, E-mail: kdm2527@naver.com, ORCID: 0000-0002-5428-0819

Sawoo Lee, Tel: +82-43-261-3370, E-mail: lee2776719@naver.com, ORCID: 0000-0000-0001-5357-9499

Sangchul Hwang, Tel: +82-42-629-4300, E-mail: hsch@kwater.or.kr, ORCID: 0000-0002-3939-1294

Jiwon Kim, Tel: +82-42-629-4301, E-mail: kyure@kwater.or.kr, ORCID: 0000-0001-5076-7232

Received: 31 August, 2021. Revised: 20 October, 2021. Accepted: 21 October, 2021.

하고 성층형성 기간을 장기화한다는 선행연구 결과와 일치하며, 수온성층의 장기화는 저층 빈산소층 확대, 퇴적물-수체간 영양염류 용출량 증가, 수체 내 조류 우점종의 변화 등 수생태계 변화를 유발할 수 있음을 시사한다.

주요어: 기후변화, 하천 수온 예측, 저수지 수온성층, AEM3D, Random Forest

Abstract: Since the thermal stratification in a reservoir inhibits the vertical mixing of the upper and lower layers and causes the formation of a hypoxia layer and the enhancement of nutrients release from the sediment, changes in the stratification structure of the reservoir according to future climate change are very important in terms of water quality and aquatic ecology management. This study was aimed to develop a data-driven inflow water temperature prediction model for Daecheong Reservoir (DR), and to predict future inflow water temperature and the stratification structure of DR considering future climate scenarios of Representative Concentration Pathways (RCP). The random forest (RF) regression model (NSE 0.97, RMSE 1.86°C, MAPE 9.45%) developed to predict the inflow temperature of DR adequately reproduced the statistics and variability of the observed water temperature. Future meteorological data for each RCP scenario predicted by the regional climate model (HadGEM3-RA) was input into RF model to predict the inflow water temperature, and a three-dimensional hydrodynamic model (AEM3D) was used to predict the change in the future (2018~2037, 2038~2057, 2058~2077, 2078~2097) stratification structure of DR due to climate change. As a result, the rates of increase in air temperature and inflow water temperature was 0.14~0.48°C/10year and 0.21~0.41°C/10year, respectively. As a result of seasonal analysis, in all scenarios except spring and winter in the RCP 2.6, the increase in inflow water temperature was statistically significant, and the increase rate was higher as the carbon reduction effort was weaker. The increase rate of the surface water temperature of the reservoir was in the range of 0.04~0.38°C/10year, and the stratification period was gradually increased in all scenarios. In particular, when the RCP 8.5 scenario is applied, the number of stratification days is expected to increase by about 24 days. These results were consistent with the results of previous studies that climate change strengthens the stratification intensity of lakes and reservoirs and prolonged the stratification period, and suggested that prolonged water temperature stratification could cause changes in the aquatic ecosystem, such as spatial expansion of the low-oxygen layer, an increase in sediment nutrient release, and changed in the dominant species of algae in the water body.

Keywords: Climate change, River water temperature prediction, Reservoir stratification, AEM3D, Random Forest

I. 서론

댐은 용수 공급, 홍수조절, 수력발전, 레크리에이션 등 다양한 경제적 편익을 제공하는 중요한 수리 구조물이다. 전 세계적으로 대댐(Large dam)은 60,000여 개가 건설되었으며, 현재 계획 중이거나 건설 중인 댐도 3,700여 개에 이르며, 대 하천 중 댐 없이 자유롭게 흐르는 하천은 37%에 불과할 정도이다(www.

nationalgeographic.com). 우리나라에서도 강수량의 대부분이 6~9월에 집중되고 있어 수자원의 이용률을 높이기 위해 다양한 규모의 댐을 건설하여 운영하고 있다(Kim 2003). 국내의 댐 현황은 다목적댐(20), 발전 전용 댐(15), 용수 전용 댐(54), 하구 답수호(12), 농업용 댐(17,401) 등 17,523개소가 있다(K-water 2020).

그러나, 댐 건설로 형성된 저수지는 흐르는 하천

환경과 달리 정체 수역을 형성하므로 영양염류의 축적과 녹조 현상과 같은 부영양화 문제를 야기하므로 상수원의 지속 가능한 활용을 위해서는 저수지의 수질과 생태계를 보호하여 양질의 수원을 유지하는 것이 중요하다. 국내 인공저수지의 대부분은 수심이 깊고 온대 기후대의 영향으로 여름철에는 높은 복사에너지와 대기 온도에 의해 저수지 상층부의 수온이 상승하여 표층과 저층 사이의 수온 차이로 인해 뚜렷한 수온성층이 형성되며(Yoon & Chung 2012), 이로 인해 심수층은 빈산소층을 형성하고 퇴적층에서의 영양염류와 온실가스인 메탄의 용출을 유발한다(Ford et al. 2002; Kankaala et al. 2013; Deemer et al. 2016; Park et al. 2021). 저층에 축적된 무기 영양염은 바람에 의한 수직혼합이 강하게 일어나거나 대기 기온 하강에 따른 전도 현상이 발생하는 시기에 표수층으로 공급되어 조류 성장의 원인으로 작용하며(Combs et al. 2010), 이러한 수체의 물리적인 혼합특성 및 물질 순환은 식물플랑크톤의 과잉성장을 비롯한 수생태계에 영향을 미칠 수 있다(Paerl & Paul 2012). 특히, 높은 수온과 성층강도가 강한 안정된 수체에서 우점하는 남조류의 과잉 증식은 심미적 문제와 더불어 냄새, 독소 물질과 같은 대사물질을 생성하여 먹는 물 공급에 심각한 악영향을 초래할 수 있고(Watson 2004; You et al. 2013) 생태계와 사람의 건강 및 물 공급 시스템의 안정성과 운영비용에 부정적인 영향을 초래할 수 있다.

한편, 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 5차 평가보고서(AR5)에 따르면 지난 30년간 지구 온난화로 인하여 지구의 온도는 약 0.85℃ 상승하였으며 21세기 말 지구 평균표면 온도는 0.3~4.8℃ 상승할 것이라고 전망하였다(IPCC 2014). 기후변화는 일부 지역에서의 호우 및 가뭄의 발생을 가중시켜 강수 패턴의 변화를 야기하고(Huntington et al. 2006) 주요 용수공급원인 대형 댐 저수지 수생태계에 직접적인 영향을 미칠 수 있다(Fang & Stefan 2009). 특히 이상기후에 따른 대기 온도의 증가는 저수지 수온의 상승을 초래하여 수온성층을 강화시키고(Firoozi & Bavani 2020) 성층화 기간의 증가와 같은 수체 내

수문학적 주기의 변화를 가져올 것으로 예상되며(Nijssen & Lettenmaier 2004), 결빙 기간을 단축하는 등 변화를 가져와 어류와 식물성플랑크톤 등의 서식환경과 상호작용에 영향을 미치게 된다(Blenckner et al. 2002). 따라서 미래 기후변화에 따른 하천과 저수지 수온 변화 예측은 수질 및 수생태 관리 측면에서 매우 중요하다.

이상기후에 따른 미래 하천 수온 변화의 전망을 위해 Gooseff et al.(2005)는 미국의 Lower Madison River를 대상으로 전지구 기후 모델(GCM)을 통해 제공받은 기상변수를 적용하여 하천 수온 모델을 개발한 후 미래 기후변화에 따른 수생태에 미칠 영향을 정량화하였다. 연구 결과, 미래 기온 상승에 따른 하천 수온이 21℃ 이상인 기간이 약 14~19% 증가할 것으로 예측되었으며, 이는 brown trout(브라운 송어) 서식환경을 훼손하는 중요한 요인임을 우려하였다. Jeong et al.(2013)은 캐나다 퀘벡 남부에 위치한 Quelle River 유역을 대상으로 다중회귀모델(MLR) 인공신경망 기법(ANN)을 이용하여 일 단위 수온예측 모델을 개발하였으며, 입력변수 간의 비선형 관계를 고려하는 ANN 모델이 선형모델인 MLR 모델에 비해 극치 값에 대한 과소평가 경향이 적었으며 하절기 수온이 적절하게 재현되었다. 또한 기후예측의 불확실성을 고려하기 위해 다양한 GCM 모델의 시나리오 해석을 통해 수생태계에 미치는 영향의 불확실성을 정량화해야 된다고 제안하였다. Modiri-Gharehveran et al. (2014)은 이란에 위치한 Ladtian 댐을 대상으로 기후변화가 저수지 수온과 성층구조에 미치는 영향을 분석하기 위해 대기기온-수온 회귀식을 이용하여 미래 유입수온을 예측하고, CE-QUAL-W2 모델로 저수지 수온을 예측한 결과, 기후변화로 저수지 수온성층 형성 시기가 빨라지고 성층기간은 증가하는 것으로 나타났다.

국내에서도 Shon et al.(2010)은 낙동강 유역 전반에 걸쳐 기후변화로 인한 수온과 유량의 영향을 분석하기 위해 SWAT 유역 모델과 캐나다 전지구 기후 모델(CT47) 및 지역상세화 모델(CSMK)을 활용하여 기온과 유량 변동성을 분석한 결과, 낙동강 유역 중 강우의 증가율이 높은 지점에서 기온 및 유량은 증가하

였으며 기후변화는 호소의 수온상승과 유량변화에 큰 영향을 줄 것이라고 평가되었다. Yoon et al.(2014)은 SRES A1B 시나리오 기반의 기후변화 전망자료를 ANN 기법으로 다운 스케일링한 후, SWAT 모델의 경계조건으로 사용하여 주암호 유역의 수문변화를 예측하고, CE-QUAL-W2 모델을 통해 저수지 수온과 성층구조 변화를 예측하였다. 예측 결과, 미래 주암댐 유입량은 과거(1991~2010년) 대비 전망기간(2071~2100년)에 약 35% 증가하였고 저수지 표층 수온과 심층 수온은 2011년 대비 2.2℃, 2.1℃ 증가하는 것으로 전망되었다. Lee et al.(2016)은 금강수계에 위치한 용담저수지를 대상으로 향후 60년에 대하여 수온변화를 전망하기 위해 지역 기후 모델(HadGEM3-RA)의 미래 기상자료를 HSPF 유역 모델에 적용하여 모의한 결과, 계절적으로 겨울철과 봄철에 수온이 증가하고 여름철에 다소 감소하는 모의 결과를 통해 수온의 증가는 수체 내 용존산소의 감소 등의 하천의 수질 및 생태계 환경에 영향을 줄 수 있음을 시사한 바 있다. Yoon et al.(2019)은 국내 소양댐을 대상으로 소양강댐의 장기간의 수온 및 저수지 내 수온변화 및 성층구조를 예측하기 위해 RCP 4.5 시나리오에 대한 HadGEM2-AO모델의 예측 기상자료와 SWAT모델을 이용하여 예측한 결과, 성층강도 심화 및 소멸시점이 점점 늦어지는 추세를 통해 성층 형성 기간이 길어지는 경향을 확인하였다. 이러한 결과를 통해 특정 조류종의 최적성장 온도범위를 고려하여 남조류 출현시기와 강도의 변화를 야기할 가능성을 시사하였다.

기후변화가 하천과 저수지 수온에 미치는 영향에 대해 현재까지 진행된 연구의 한계점은 하천 수온 측정 자료의 부족으로 인한 유입수 수온 예측의 불확실성과 미래 기후예측의 불확실성으로 구분될 수 있다. 후자인 기후예측의 불확실성은 다양한 GCM 모델과 기후 시나리오를 반영한 앙상블 예측 기법으로 불확실성을 정량화하고 있지만, 전자인 유입수온 예측 모델의 신뢰도는 고빈도 수온 센서를 이용한 데이터 확보가 중요하다. 기후변화가 수자원에 미치는 영향에 대한 예측 결과의 신뢰성과 활용성을 증대시키기 위해서는 이러한 예측 불확실성을 최소화하는 노력이

필요하다(IPCC 2001). 최근 급속히 발전하고 있는 자료기반 모델링 기법은 하천 수온 예측에도 활발히 활용되고 있으며(Lu & Ma 2020; Quan et al., 2020), 자료기반모델을 통해 예측 오차를 최소화하여 수온의 자연적 변동성을 효과적으로 재현한 후 미래 기후 시나리오에 따른 수온의 변화를 전망하는 연구는 해외에서 일부 연구되었다(Jeong et al., 2013). 하지만 국내에서는 하천 수온 실측자료의 부족으로 인해 기후변화에 따른 댐 저수지 수온 및 수질예측 연구에서 하천 수온의 변화를 적절히 고려한 사례는 매우 드물다. 하천의 수온은 저수지 열수지와 유입수의 밀도류 거동, 그리고 수질 반응속도에 영향을 미치는 중요한 요인이므로 미래 기후변화에 따른 저수지 수온 및 수온 성층 구조 변화 예측을 위해서는 신뢰도 높은 예측 모델 개발이 필요하다.

따라서 본 연구의 목적은 대청댐 저수지를 대상으로 고해상도 실측자료 기반의 통계적 하천 수온 예측모델을 개발하고, 기후예측의 불확실성을 고려하기 위해 다양한 RCP 시나리오에 대하여 대청호의 미래 유입 수온 변화와 성층구조의 변화를 예측하는 데 있다. 대청호 유입 수온 예측 모델은 유입지점에서 실측한 수온과 기상 관측 자료를 기반으로 Random Forest(RF) 회귀 예측 방법을 적용하였으며, RCP 시나리오별로 전망된 기상자료와 예측된 유입 수온자료를 활용하여 미래 기후변화에 따른 저수지 수체 내 수온과 성층 구조의 변화를 예측하였다. 연구 결과는 국내 하천과 댐 저수지의 수온 예측 모델링 기술로 활용될 수 있으며, 기후변화에 따른 수질 및 수생태 적응 관리를 위한 정책 개발에 활용 가능하다.

II. 연구방법

1. 연구대상지역

본 연구의 대상 지역인 대청호는 금강 수계에 위치한 저수지로서 금강하구로부터 약 150 km 지점에 위치하고 있으며(Figure 1), 1981년에 용수공급, 홍수 조절 및 수력발전 등 다목적으로 건설되었다. 총 유역면적은 3,204 km²로써 금강 수계 전체의 32.4%를

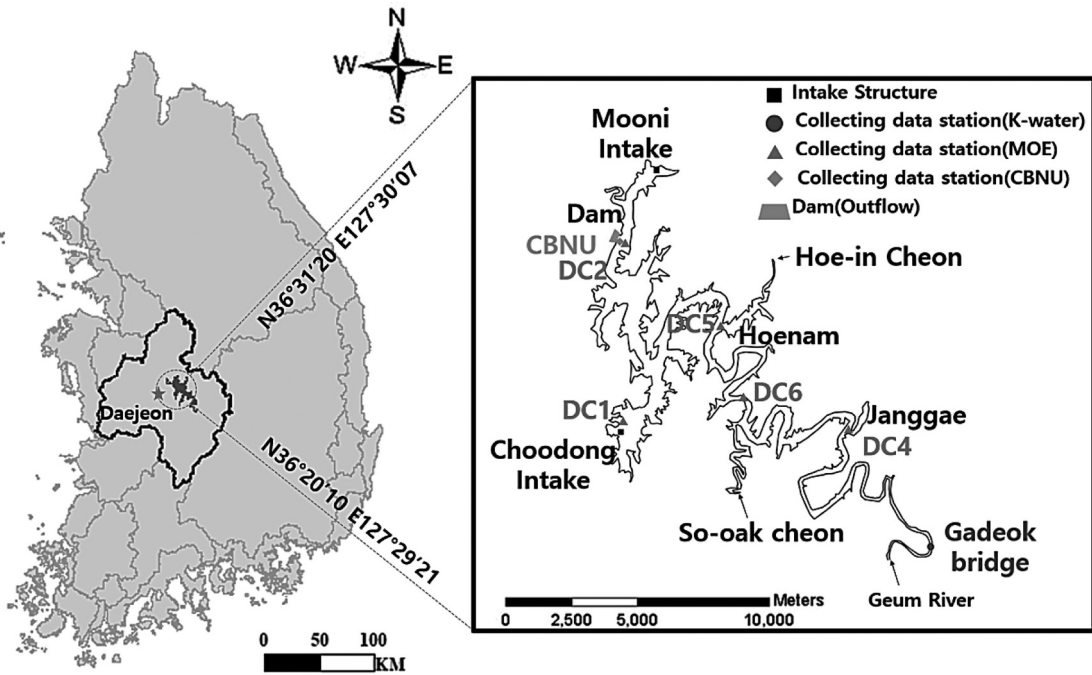


Figure 1. Locations of the study area, national water quality monitoring stations (MOE) and water temperature monitoring stations by K-water and Chungbuk National University (CBNU).

점유하고 총 저수용량은 1,490백만 m^3 , 유효 저수용량은 790백만 m^3 에 해당한다. 대청 다목적 댐은 대전시를 포함한 충청지역과 전북지역 등 1개의 광역시와 4개의 시·도, 11개의 군·구를 포함하여 인근 지역의 최대 상수원으로 연간 용수 공급량은 $1,649 \times 10^6 m^3$ 으로 이 중 79%가 생활·공업용수로 이용되고 있다 (K-water 2007). 금강 본류 및 서화천(옥천천), 회인천 주원천, 품곡천 등의 지류 하천이 유입되며 호내 취수의 목적으로 추동과 문의에 2개의 취수탑과 댐의 발전 방류구(EL. 52 m)와 홍수 시 유량 조절을 위해 본 댐 여수로와 비상 여수로가 설치되어 있다.

대청호의 수질은 대체적으로 상수원수 II급수 수준을 유지하고 있지만, 여름철 온도 차이로 인해 형성되는 강한 성층화는 저층의 빈상소상태를 유발하고, 매년 여름철마다 반복적인 남조류의 출현 증가 (National Institute of Environmental Research 2003; Chung et al. 2014; Park et al. 2016; Yang et al. 2021)와 같은 수질 및 수생태 문제가 발생하고 있다. 따라서 미래 기후변화에 따른 유역의 기상수문

의 변화와 저수지 수온상승에 대응한 적응형 수질관리 방안 마련이 중요하다.

K-water는 호내 정기적인 수질조사를 목적으로 대청댐 내 환경부 수질측정망 지점에서 연중 월간 측정 및 홍수기 주간측정을 하고 있다(Figure 1). 댐 유입수 수온은 K-water가 금강 본류인 가덕교에 설치한 수온 센서를 이용하여 10분 단위로 측정된 자료를 사용하였으며, 댐 앞지점의 수심별 수온은 충북대학교 정세웅 교수 연구실에서 설치한 수온계 체인(0~38 m)의 10분 단위 연속 측정 자료와 댐 운영관리를 위해 K-water에서 측정된 자료를 수집하여 저수지 모델의 수온 예측 성능을 평가하였다.

2. 유입하천 수온예측모델

1) 입력자료

하천 수온예측모델의 입력변수는 선행연구들을 참고하여 유량과 기상자료를 고려하였다. 저수지 상류 경계 지점의 유량자료(Q)는 2008년 1월 1일부터 2017년 12월 31일까지 K-water의 물 정보 포털(www.

water.nier.go.kr)에서 제공하는 공개자료를 수집하여 사용하였다. 기상자료의 경우 기상 정보 개방 포털(www.data.kma.go.kr) 중 대청댐에서 남서쪽으로 9.25 km 떨어진 대전 종합기상관측소(AWS)에서 측정한 대기기온(Atr, °C), 풍속(Uw, m/s), 이슬점온도(DT, °C), 상대습도(RelH, %), 대기압(ATM, hPa), 일사량(Sola, W/m²), 운량(Cloud) 자료를 수집하였다. 유입하천 수온(Wtr, °C) 자료는 K-water에서 댐 운영관리를 위해 자체적으로 운영 중인 가덕교지점의 10분 단위 자동측정 자료를 제공받아 사용하였다.

2) 하천 수온 예측모델

하천 수온 예측모델은 저수지 상류 유입부 경계조건인 수온자료를 생산하기 위한 것으로 적은 입력변수를 활용하여 신속하게 예측이 가능한 머신러닝 기법인 RF 모델을 선정하였다. RF 모델은 다수의 결정나무(Decision tree)들을 학습하는 앙상블 학습 기법이며, 주어진 데이터를 이용하여 구성된 여러 개의 결정 나무로 모델을 학습시킨다. 학습과정에서 계층구조로 이루어진 노드(node)와 에지(edge)들의 집합인 결정 나무를 무작위 추출 방법을 통해 복잡한 문제를 간단한 문제들로 이루어진 계층구조로 나누어 분류는 투표(voting), 회귀는 평균(average)으로 결과를 출력한다(Breiman, 2001). 수집된 데이터에 대하여 탐색적 데이터 분석(Exploratory Data Analysis, EDA)을 통해 결측값 처리 및 이상치 제거 등과 같은 전처리 작업과정을 수행 후 RF 모델에 적용하였다. 모델개발 중 과적합을 방지하기 위해 k-fold 교차검정(Cross validation)을 3회 반복하여 실시하였으며, 모델개발은 R의 random forest package (Breiman & Cutler, 2015)를 사용하였다. 모델의 목표변수의 값을 예측하기 위한 의사결정 나무 모형의 최대 개수(ntree)는 Breiman & Cutler(2015)이 제안한 초깃값인 500으로 설정하였고, 의사결정 나무의 각 마디에서 분할 시 선택하는 변수의 수(mtry)는 Liaw & Wiener(2002) 방법에 따라 모의한 결과 mtry가 3개인 모델에서 실측값과 모의 값의 결정계수 R²값이 0.89로 가장 높은 예측 성능을 보여 최종적으로 3개로 결정하였다.

유입 수온 예측 모델은 2008년부터 2016년까지의 유량자료와 기상자료를 독립변수로 그리고 실측 수온 자료를 종속변수로 구성하여 지도학습으로 훈련하였으며, 2017년 실측 자료를 모델의 테스트 데이터 셋으로 예측 성능을 평가하였다.

최소의 독립변수로 최적의 예측성능을 갖는 RF 모델(Parsimonious RF model)을 개발하기 위해 Q, Atr, Uw, DT, RelH, ATM, Sola, Cloud의 모든 자료를 독립변수로 하고, 실측 하천 수온(Wtr, °C)을 일 단위로 평균하여 종속변수로 사용하여 데이터 셋을 구성한 뒤 중요도가 낮은 변수를 제거해가는 방법인 RFE(Recursive Feature Elimination) 기법을 사용하였다. RFE 방법을 적용하여 얻은 수온예측모델은 RFE-RF로 명명하였으며, 최종적으로 선정된 입력변수는 Q, Atr, Sola, DT, RelH이었다. 그러나, RFE-RF 모델은 입력변수 중 유량이 포함되어 있어 미래 기후변화 시나리오 적용을 위해 저수지 유입량과 방류량 자료를 생산해야 하는 어려움이 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 지역 기후 모델에서 제공받을 수 있는 기상변수인 Atr, Sola, RelH, ATM만으로 구성된 훈련모델인 RA-RF 모델을 동일한 방법으로 개발하여 RFE-RF 모델의 예측 성과와 비교한 후 미래 유입 수온 예측에 적용하였다.

기존의 선행연구에서는 주로 미래 수온을 예측하기 위해 유역 모델을 통해 모의된 미래 댐 유입유량과 전 지구적 기후 모델을 통해 제공받은 미래 기상자료들을 활용하여 예측하였지만, 본 연구에서는 유입하천의 미래 유입 수온을 전망하기 위해 지역 기후 모델을 통해 각각의 시나리오별(RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5)로 예측된 기상변수(Atr, Sola, RelH, ATM)를 각각의 데이터셋으로 구분한 뒤 기상변수만으로 예측 가능한 RA-RF 모델에 적용하여 각 시나리오별 일 단위 수온을 예측하여 미래 수온의 변동 특성을 분석하였다.

각 모델의 예측 성능을 평가하기 위해 실측값과 모의값 간의 모델 효율성 계수(Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient, NSE)와 평균제곱오차의 평방근(Root Mean Square Error, RMSE), 평균절대백분비오차(Mean Absolute Percentage Error, MAPE)을 통계

Table 1. Statistical index used to evaluate the model accuracy

Statistical Index	Equation	Desired Value
Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_i]^2}{\sum_{i=1}^n [y_i - y_{avg}]^2}$	1
Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}$	0
Mean absolute Percentage Error	$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i \times 100 (\%)$	0

* \hat{y}_i = simulation, y_i = observation, y_{avg} = mean of observation, N = total number of observation

지표로 사용하였다(Table 1). NSE는 관측 데이터의 평균값으로 예측하는 것에 비해 모델을 사용함으로써 얻을 수 있는 예측 효율성을 평가하는 통계 지표로서 0은 평균값을 사용한 것과 같은 효율을 의미하며 1에 가까울수록 모델의 효율성이 우수하다고 판단한다. RMSE는 모의 값과 실측값의 제공오차로부터 평균오차의 제공근을 구한 것으로 0에 가까울수록 모의결과와 신뢰도가 높다고 볼 수 있으며, MAPE는 실측값과 모의 값의 차이의 절댓값을 실제 값으로 나누어 준 후, 이를 백분율로 나타낸 값으로 0에 가까울수록 신뢰도가 높다고 판단한다. 일반적으로 MAPE는 실측값이 0인 경우 계산을 할 수 없다는 단점이 있지만, 모의 값이 과대평가될 우려가 적어 모델의 재현성 평가에 활용된다.

3. 저수지 수온예측모델

1) 3차원 저수지모델

저수지 내 수온의 모의해석은 서호주 대학교 물 연구소(Center for Water Research)에서 개발된 ELCOM-CAEDYM 모델을 기반으로 개발된 3차원 수리-수질 동역학 모델인 AEM3D를 사용하였다(Hodges & Dallimore 2016). AEM3D는 수리·수질, 영양물질 및 조류 모델링을 포함하여 광범위하게 활용되고 있다(Hipsey et al. 2006; Lee & Kim 2019; Ryu & Chung 2020; An et al. 2020; Ulanczyk et al. 2021). 성층수체에서 밀도류 흐름을 적절히 재현하므로 수심이 깊고 복잡한 지형을 가진 호수와 저수지의 수온성층 해석에 적합하다(Imberger 2004;

Zamani et al. 2020).

AEM3D모델은 운동량방정식, 연속 방정식, 물질 이송-확산 방정식, 자유수면 방정식으로 구성되어 있다(Table 2). 운동량 방정식은 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS)방정식을 사용하고 수리해석은 Boussinesq 가정을 적용하고 정수압(Hydrostatic pressure)이론으로 수직 방향의 흐름을 해석한다. 내부파 영향과 수면경사에 따른 동수압 작용이 중요한 경우 비정수압 옵션(Non-Hydrostatic)을 사용하여 수직 방향 운동량 방정식에 포함할 수 있다. 수평 방향 유속의 순간 변동성분에 의한 난류영향 폐합식(Turbulent closure)은 수평와점성계수(Horizontal eddy-viscosity, ν_h)를 상용하며, 수직 방향에 대해서는 확산모델의 수직와점성계수(Vertical eddy-viscosity, ν_v)와 혼합층모델(Mixed-layer model)을 선택적으로 사용할 수 있다. 운동량 방정식은 2차 방정식 Euler-Lagrange 보간법을 사용하여 준 음해법을 통해 계산된다. 물질 이송-확산 방정식의 수평 방향 이송항은 ULTIMATE(Leonard, 1991)기법과 함께 3차 정확도를 갖는 QUICKEST 수치해석 방법을 사용하여 농도의 급격한 변화가 있는 영역에서의 해를 안정적으로 구한다. 여기서, $u, v, w = x, y, z$ 방향 유속(m/s), $p =$ 압력(N/m²), $f =$ 전향력계수($2\omega \sin \Phi$, ω 는 지구 자전 각속도, Φ 는 위도), $\eta =$ 수위(m), $\rho =$ 물의 밀도(kg/m³), $\rho_0 =$ 주변 밀도(kg/m³), $\rho' =$ 밀도 차(kg/m³), $g =$ 중력(m/sec²), $\nu_h =$ 와점성계수(m²/sec), $h =$ 수심(m, h_0 : bottom height), $c =$ 물질의 농도(mg/L), $\nu_b =$ 수평 방향 확산계수(Eddy

Table 2. Governing equations of AEM3D

Variable	Equation
Momentum equation (X-direction)	$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^{\eta} \rho' dz \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ v_h \frac{\partial u}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v_h \frac{\partial u}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ v_h \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + f_u$
Momentum equation (y-direction)	$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_z^{\eta} \rho' dz \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ v_h \frac{\partial v}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v_h \frac{\partial v}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ v_h \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + f_v$
Hydrostatic pressure assumption (Z-direction)	$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$
Continuity Equation	$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$
Heat Transport Equation	$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k_h \frac{\partial T}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k_h \frac{\partial T}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k_v \frac{\partial T}{\partial z} \right\} + S_c$
Free Surface Equation	$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{h_b}^{\eta} u dz \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_{h_b}^{\eta} v dz \right] = 0$

diffusivity, m²/sec), v_v = 수직 방향 확산계수(Eddy diffusivity, m²/sec), S_c = 물질의 생성 및 소멸항이다.

모델의 수치 격자는 「3차원 수리·수질 모델을 이용한 대청호 유기탄소 순환 및 물질 수지 해석」 연구(Ahn et al., 2020)에서 구축한 자료를 사용하였다. 모델의 수치 격자 구성을 위한 지형자료는 대청호 수치지형자료와 대청호 퇴사량 측정보고서(K-water, 2006)를 사용하였다. 수치격자는 종(x)방향과 횡(y)방향에 대하여 100×100 m, 수심(z)방향은 1 m씩 나

누어 총 187,628 cells 구성하였다. 모델에 사용한 지형자료의 신뢰도는 수치격자와 실측자료로부터 도출한 저수위-저수용량 곡선을 비교하여 검증하였고(Figure 2), 오차통계량은 NSE와 RMSE, MAPE를 통해 평가한 결과 NSE = 1.00, RMSE = 10.90 km³, MAPE = 0.07%로써 매우 높은 신뢰도를 나타냈다.

모델 보정 기간의 초기수위는 댐 수문자료를 바탕으로 2017년 1월 1일 실측 수위 EL. 72.43 m로 입력하였으며, 저수지 수문 초기조건은 댐 앞 지점에서 실측한 수심별 수온자료를 모든 격자에 적용하였다. 경

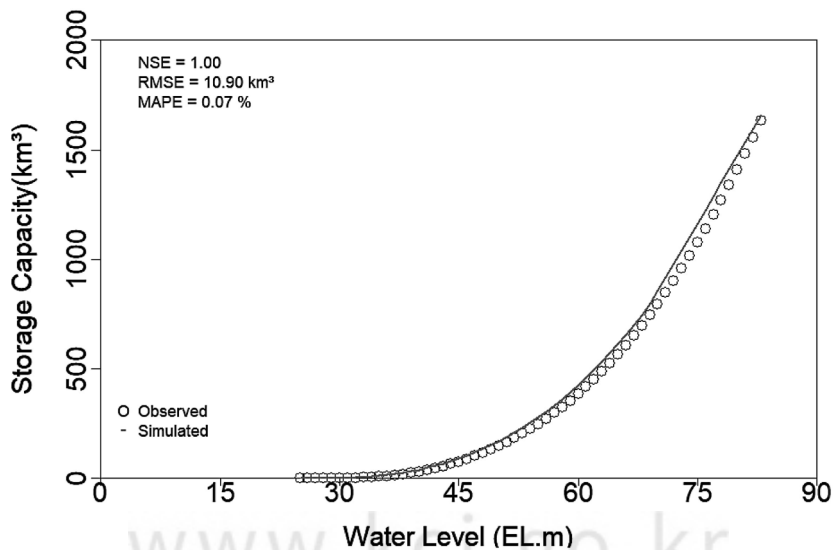
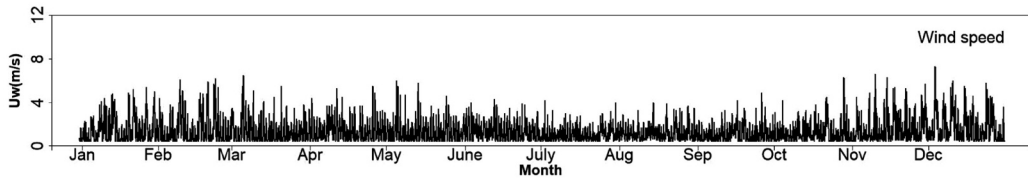


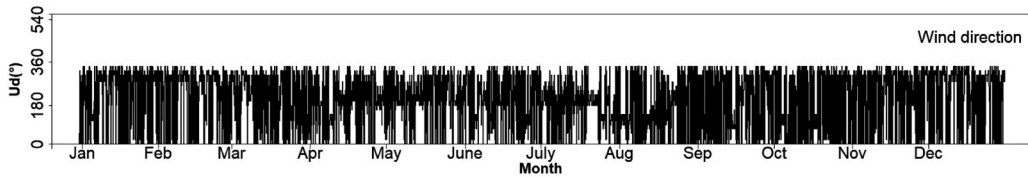
Figure 2. Comparison of simulated reservoir water level and capacity curve with observed one.

계조건인 기상 입력자료는 대전 기상대에서 측정된 자료를 수집하여 적용하였으며(Figure 3), 풍속은 평균 1.33 m/s(± 1.01), 풍향은 $211^\circ(\pm 117)$, 대기기온은 $12.9^\circ\text{C}(\pm 10.7)$, 습도 71%(± 23), 일사량은 189 W/m^2

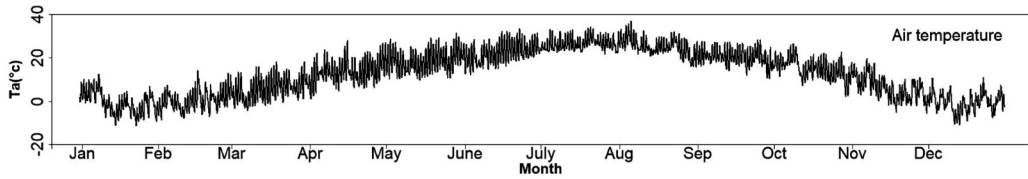
(± 278), 전운량은 0.4(± 0.4)의 범위를 나타냈다. 대청댐 지류 하천의 유입량은 댐 운영자료의 총 유입량을 지류별 유역 면적 비를 고려하여 산정하였다. 저수지 유입 수온은 2008년부터 2016년의 수온 및 기



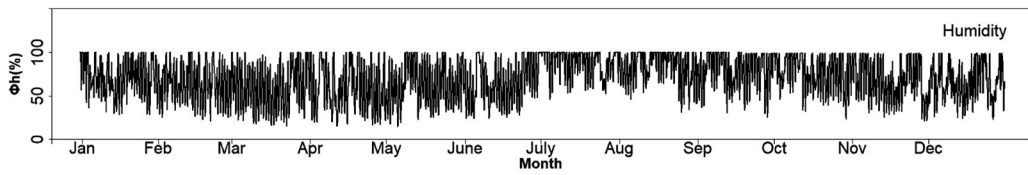
(a) Wind speed



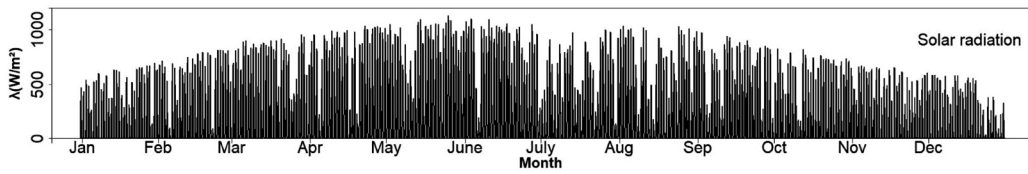
(b) Wind direction



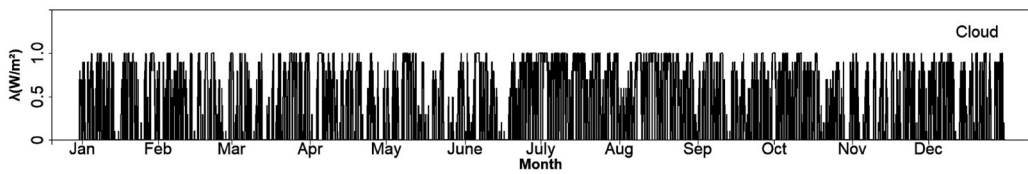
(c) Air temperature



(d) Humidity



(e) Solar radiation



(f) Cloud

Figure 3. Meteorological data used for AEM3D model calibration in Daecheong Reservoir (2017).

상변수 간의 관계를 학습시킨 Random Forest 모델을 통해 2017년 하천 수운을 일 단위로 생산하여 입력하였다.

2) 기후변화 시나리오

대청호 미래 유입 수온과 성층구조 변화 예측을 위한 기후 시나리오는 IPCC 5차 보고서에서 제시한 4개의 시나리오(RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5)를 적용하였다. RCP 2.6은 현재의 상황에서 즉시 온실가스 배출량을 저감시켰을 경우, RCP 4.5와 6.0은 온실가스 저감정책이 어느 정도 실현된 경우이며 RCP 8.5는 현재 추세대로 온실가스가 배출될 경우를 가정하는 시나리오이다. RCP 시나리오별 미래 기상자료는 기상청에서 HadGEM2-AO를 기반으로 개발한 지역 상세화 기후 모델(HadGEM3-RA)을 통해 예측된 미래 기상자료를 활용하였다(Korea Meteorological Administration, 2018).

본 연구의 미래 전망기간은 2017년 1월 1일~2100년 12월 31일이며, 대청호 미래 전망기간 동안의 수문사상은 2017년 유입, 유출량을 동일하게 입력하였다. 미래 기후변화에 따른 유역 유출량의 변동성이 유입 수온과 저수지 수온에 미치는 영향은 본 연구에서 개발한 유량 입력변수가 포함된 하천 수온 예측모델을 적용하여 예측이 가능하지만, 금번 연구에서는 포함하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 미래 기후변화에 따른 강수량과 유출량의 변화는 고려하지 않고 유입 수온과 기상 변화만을 고려한 예측 결과를 제시한다. 미래전망 시나리오의 경계조건은 기상청의 기후 정보 개방 포털(www.data.kma.go.kr)에서 제공하는 HadGEM3-RA를 통해 생산된 미래 전망 기상자료를 활용하였으며, 각각의 기후 시나리오에 대하여 17개 광역도시로 제공된 한반도(12.5 km) 기후변화 시나리오 중 대전광역시를 바탕으로 생산된 Uw,

Sola, RelH, ATM과 229개 기초지자체로 다운 스케일링된 남한 상세(1.0 km) 중 대전광역시 대덕구 기후변화 시나리오를 통해 생산된 일 평균기온 값을 수온예측모델에 적용하여 각 RCP 시나리오별 유입 수온을 예측한 후 모델의 경계조건으로 활용하여 대청호 미래수온을 전망하였다.

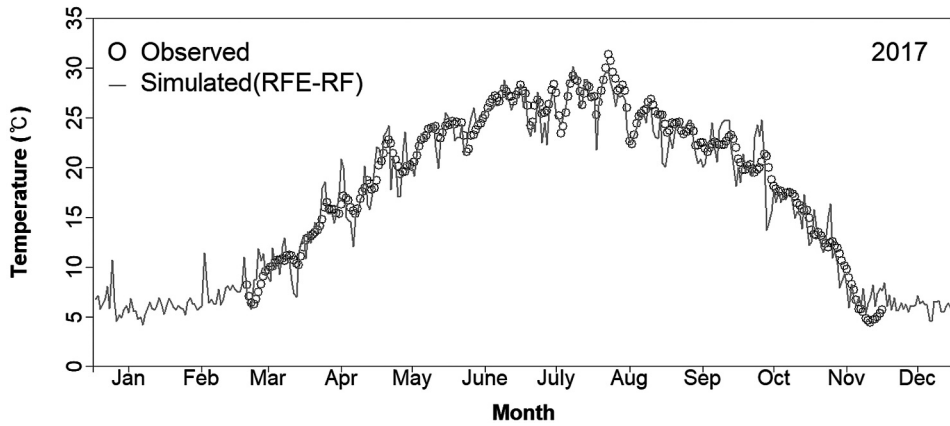
III. 결과 및 고찰

1. 유입하천 수온예측모델의 성능비교

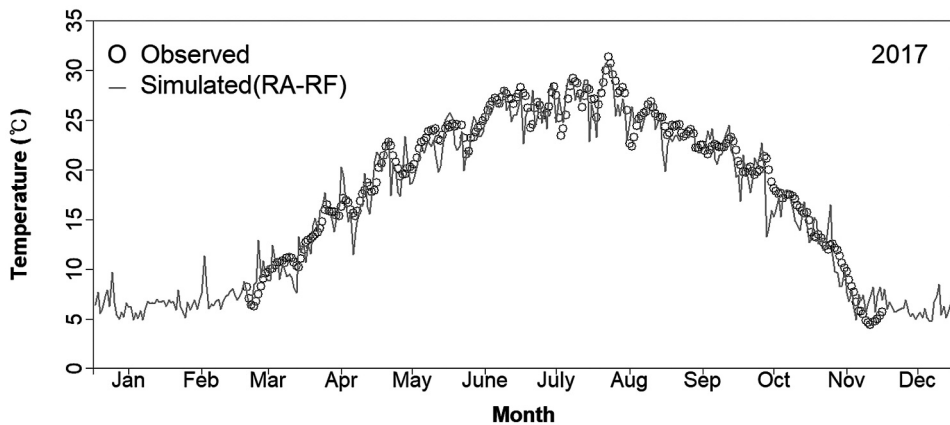
RFE 기법을 통해 추출된 최소 변수를 활용하여 개발한 RFE-RF 모델과 지역 기후 모델에서 제공하는 변수를 통해 개발한 RA-RF 모델의 성능을 Table 3에 비교, 제시하였다. RFE-RF 모델의 예측 성능과 오차는 NSE 0.97, RMSE 1.82°C, MAPE 9.15%이었으며, RA-RF 모델은 각각 0.97, 1.86°C, 9.45%로 나타났다. RA-RF 수온예측모델은 비록 실측값과 상대 오차는 약간 높게 예측되었지만, 모델의 효율성 측면에서 RFE-RF 모델과 동일한 성능을 보였으며, 연중 수온의 시계열 변동성을 적절히 재현하며 우수한 예측성능을 보이고 있다(Figure 4). 기존의 저수지 유입 수온 경계조건 생산을 위해 활용되었던 다중회귀모델 및 로지스틱 모델은 대체로 우수한 예측성능을 나타냈지만(Machey & Berrie 1991; Caissie et al, 2004; 정세웅 & 오정국 2006; 이용곤 등 2006), 입력변수 간의 선형관계를 기반으로 개발되어 영향 변수간 비선형 관계를 고려하지 못하고 강우 시 유출량이 증가하는 경우에 일어나는 급격한 수온 강하 현상을 재현하는 데 한계가 있었다. 일반적으로 통계적 수온 예측모델은 물리적 모델과 달리 수체 내에서 작용하는 물리적 기작을 명시적으로 반영하지 못하지만, 입력변수 간의 비선형 관계를 유의미하게 반영(Jeong et al, 2013)하고, 하천 지형자료와 같은 데이터 부족

Table 3. Input variables used to develop random forest models and comparison of prediction performance

Model	Variable	Statistical Index		
		NSE	RMSE (°C)	MAPE (%)
RFE-RF	Q, Atr, DT, Sola, RelH	0.97	1.82	9.15
RA-RF	Atr, Uw, Sola, RelH, ATM	0.97	1.86	9.45



(a) RFE-RF model



(b) RA-RF model

Figure 4. Comparison of observed inflow temperature with simulated ones using (a) RFE-RF model and (b) RA-RF model.

의 한계점을 극복할 수 있는 효율적인 모델로 인정된다(Liu et al, 2012). 본 연구에서 개발한 RA-RF 모델도 유량자료 없이 기상자료만을 이용하여도 댐 유입 수온의 예측 성능이 높아 미래 기후변화에 따른 저수지의 수온성층 구조 변화를 예측하기에 충분하다고 판단되었다.

2. AEM3D 모델 보정결과

저수지 수리 모델의 보정은 저수위와 댐 앞 지점의 수심별 수온을 비교하였다. 2017년 1월 1일부터 12월 31일까지 실측 수위와 AEM3D 모의 수위의 시계열 변화를 비교한 결과, NSE는 0.99로써 모델의 효율성이 매우 높게 평가되었으며, 예측 오차도 RMSE는

0.21m, MAPE는 0.23%로써 대상 저수지의 수위변화를 적절히 재현하였다(Figure 5).

저수지 수온과 성층구조의 정확한 재현성은 본 연구에서 매우 중요한 선결조건이며 유입수의 밀도류 거동과 물질의 이송·확산에 영향을 미치는 중요한 요인이다(Fischer et al, 1979). AEM3D로 모의한 수심별 수온과 실측한 수심별 수온자료를 비교하여 Figure 6에 제시하였으며, 모델은 대청호의 계절별 수온성층 구조 변화를 적절히 재현하는 것으로 평가되었다. 모델의 수온예측 효율성을 나타내는 NSE는 0.50~0.97의 범위를 보이며 계절별로 약간 차이는 있으나 대부분의 기간에 높은 예측 성능을 보였다. 수온예측 오차도 RMSE가 1.01~2.09°C, MAPE는

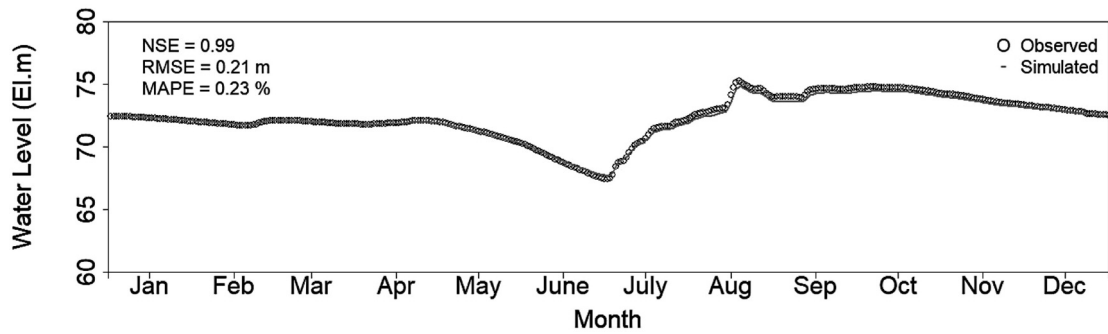


Figure 5. Comparison of observed and simulated water surface elevation (2017).

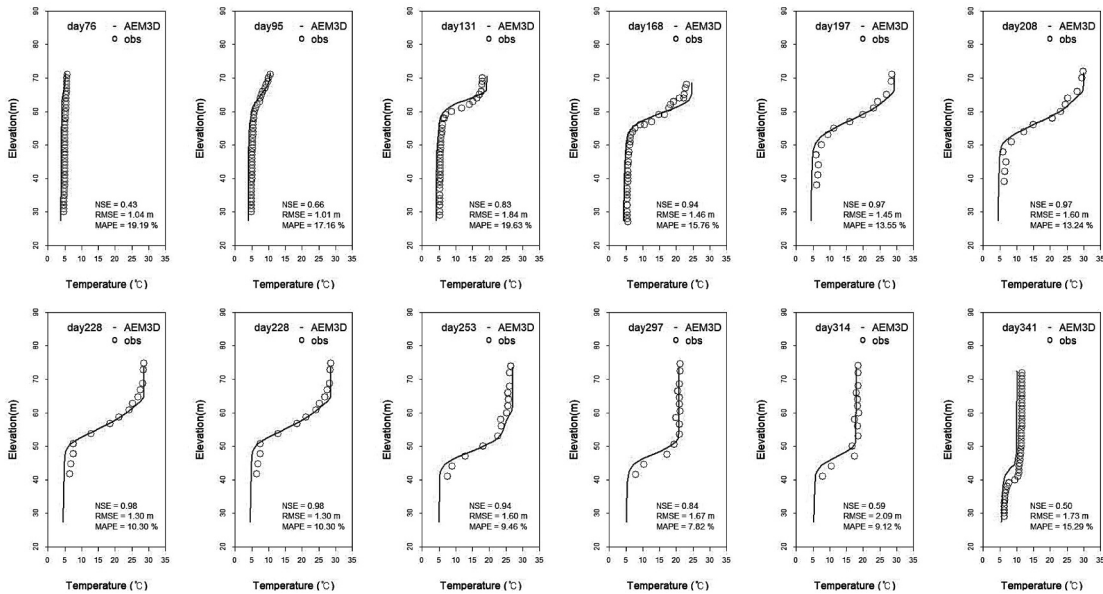


Figure 6. Comparison of observed and simulated water temperature profile (2017).

Table 4. Calibrated model parameter values for water temperature

Keyword	Description	unit	This study
SEDIMENT_REFLECTIVITY	light reflectance in sediment	-	0.9
SURF_HEAT_TRANSF_COEFF	light absorption rate between atmosphere and water surface	-	0.004
MEAN_ALBEDO	mean albedo of the water	-	0.08
MIXING_COEFF_CN	wind stirring coefficient	-	1.33
MIXING_COEFF_CC	convective coefficient	-	0.2
DEFAULT_PAR_EXTINCTION	light extinction coefficient for PAR	/m	0.4
DEFAULT_NIR_EXTINCTION	light extinction coefficient for NIR	/m	1.0
DEFAULT_UVA_EXTINCTION	light extinction coefficient for UVA	/m	1.0
DEFAULT_UVB_EXTINCTION	light extinction coefficient for UVB	/m	2.5

7.82~19.63% 범위를 보여 모델은 적절히 보정된 것으로 판단하였다.

AEM3D 모델의 수온해석은 열역학적 이론을 근거한 물리적 모델이다. 물에 의한 태양의 단파 복사 에너지의 광소멸계수(K_w)는 근적외선(Near Infrared Radiation, NIR), 광합성에 유용한 PAR(Photosynthetically Active Radiation), 자외선 A(UVA)와 자외선 B(UVB)로 구분하여 입력된다. 본 연구에서 수온 보정에 사용된 주요 매개변수를 Table 4에 제시하였다. 보정에 사용된 매개변수는 「3차원 수리·수질 모델을 이용한 대청호 유기탄소 순환 및 물질 수지 해

석」 연구(Ahn et al, 2020)에서 적용된 매개변수를 참조하였다.

3. 유입하천의 미래 수온변화 전망

대청댐 유역의 대기기온과 대청호 유입 수온의 시계열 경향성을 분석하기 위하여 과거 실측자료(2008~2016년)와 미래 전망기간(2017~2100년) 동안의 예측 결과를 Figure 7과 Table 5에 비교하여 제시하였다. 과거기간의 평균 대기기온은 13.5°C이며 RCP 시나리오별(RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5)로 예측된 2100년 연평균 대기기온은 각각 14.6°C,

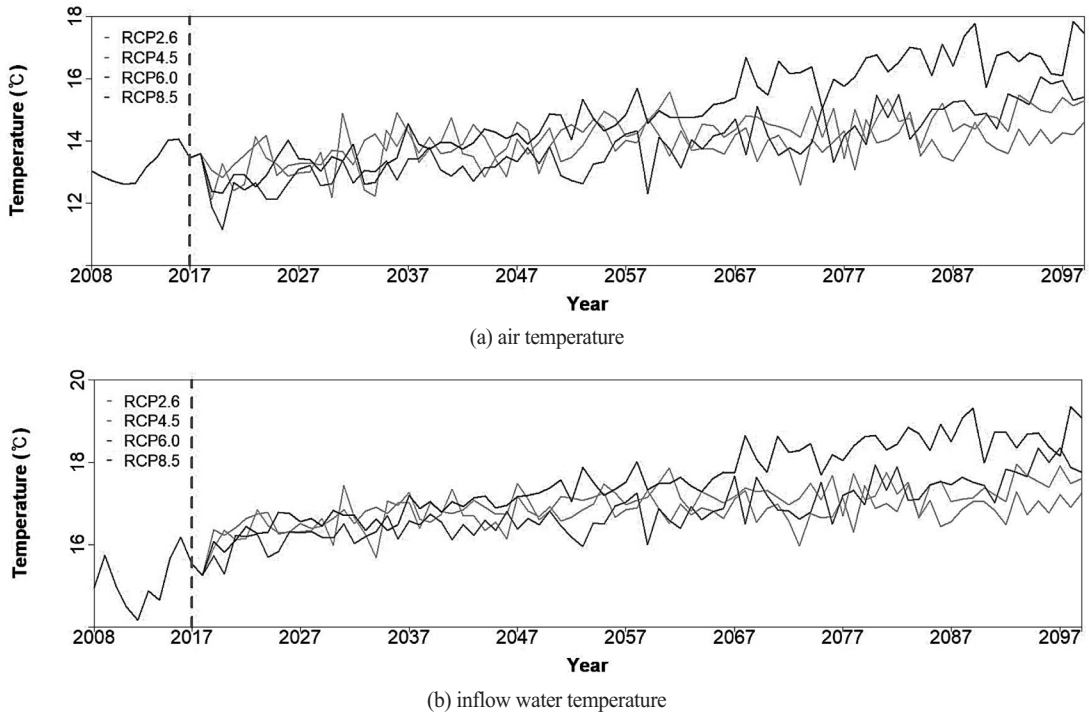


Figure 7. Future air and inflow water temperature projection results.

Table 5. Averaged air temperature and water temperature during the past period and those of ending year of future projection period for each RCP scenario, and their rising rate

Division	Past (°C)	Last projection year (°C)			
		RCP 2.6 (°C)	RCP 4.5 (°C)	RCP 6.0 (°C)	RCP 8.5 (°C)
Year	2008-2016	2100	2100	2100	2100
Air temperature	13.5	14.6	15.3	15.4	17.5
Rate of air temperature rise (°C/10 year)		0.14	0.22	0.23	0.48
Water temperature	15.5	17.3	17.6	17.8	19.1
Rate of water temperature rise (°C/10)		0.21	0.25	0.27	0.43

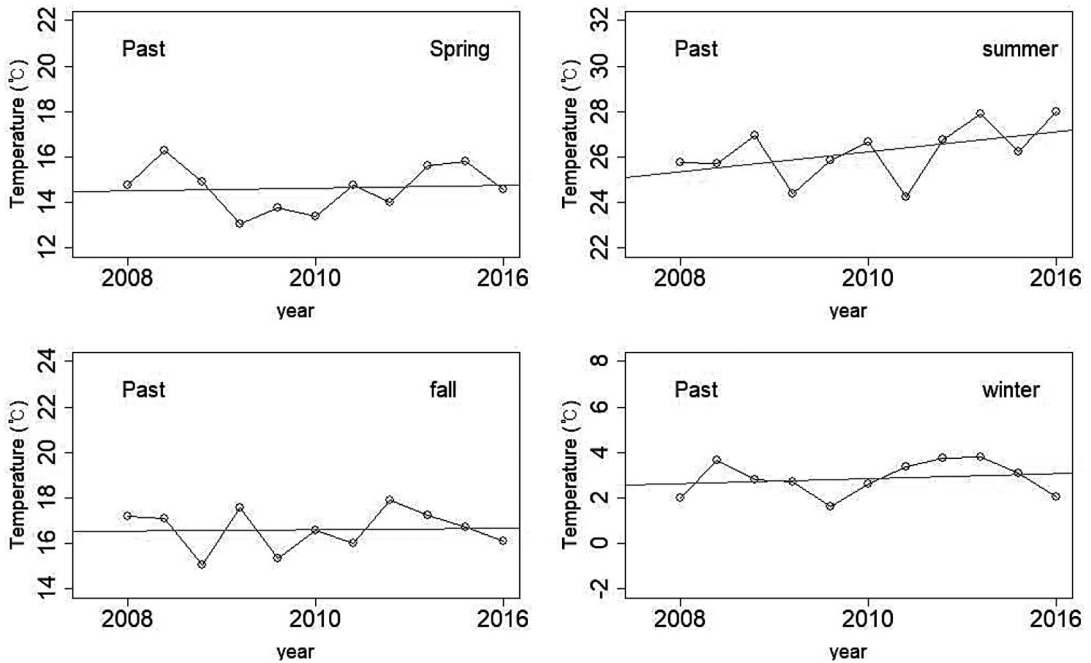
Table 6. Annual air temperature and inflow water temperature trend analysis

Scenario		Mann-Kendall Analysis		
		Slope	p-value	Trend
Air temperature	RCP 2.6	0.23	< 0.05	▲
	RCP 4.5	0.53		▲
	RCP 6.0	0.67		▲
	RCP 8.5	0.79		▲
Water temperature	RCP 2.6	0.26	< 0.05	▲
	RCP 4.5	0.57		▲
	RCP 6.0	0.69		▲
	RCP 8.5	0.81		▲

Table 7. Seasonal inflow water temperature trend analysis

Scenario		Mann-Kendall Analysis											
		Spring			Summer			Fall			Winter		
		Slope	p-value	Trend	Slope	p-value	Trend	Slope	p-value	Trend	Slope	p-value	Trend
Water Temperature	Past*	0.05	0.876	-	0.38	0.119	-	0.02	1.000	-	0.16	0.533	-
	RCP 2.6	0.12	0.115	-	0.20	<0.05	▲	0.25	< 0.05	▲	-0.01	0.904	-
	RCP 4.5	0.41	< 0.05	▲	0.38		▲	0.49		▲	0.25	< 0.05	▲
	RCP 6.0	0.55		▲	0.52		▲	0.64		▲	0.30		▲
	RCP 8.5	0.68		▲	0.70		▲	0.71		▲	0.41		▲

*Past : 2008~2016 year



(a) Past

Figure 8. Analysis of seasonal inflow water temperature trends (Past: 2008-2016).

15.3℃, 15.4℃, 17.5℃로써 모두 증가하였다. 대기 온이 상승속도는 RCP 2.6에서 0.21℃/10year, RCP 4.5에서 0.25℃/10year, RCP 6.0에서 0.27℃/10year RCP 8.5에서 0.43℃/10year이었다. 대청호 유입 수온의 경우, 과거기간의 평균 수온은 15.5℃였으며,

RCP 시나리오별 2100년 연평균 유입 수온은 17.3℃, 17.6℃, 17.8℃, 19.1℃로써 모두 증가하는 것으로 전망되었다. RCP 2.6 시나리오 적용 시 대기온과 유입 수온은 각각 과거에 비해 1.1℃, 1.8℃ 증가한 반면 RCP 8.5의 경우 4.0℃, 3.6℃으로 큰 폭으로 증

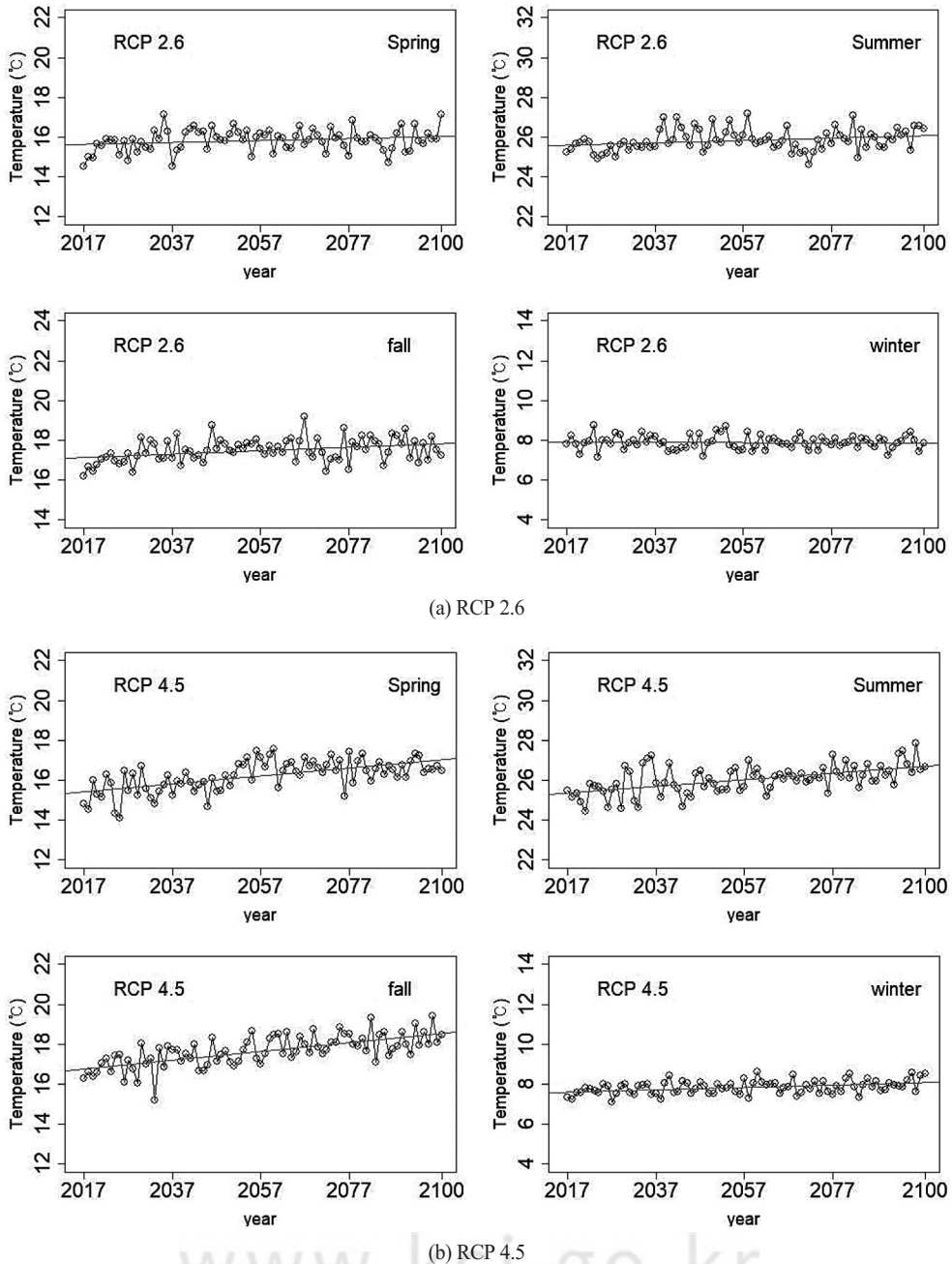


Figure 9. Analysis of seasonal inflow water temperature trends (RCP Scenario 2.6 and 4.5).

가하였다. 미래 전망기간 동안 저수지 유입 수온의 상승속도는 RCP 시나리오별로 각각 0.14℃/10year, 0.22℃/10year, 0.23℃/10year, 0.48℃/10year로 분석되었다. Mann-Kendall 추세분석 결과, 모든 시나리오에서 유입 수온의 상승추세는 p-value가 0.05

보다 작아 통계적으로 유의성을 보였으며(Table 6), 특히 온실가스 배출량 저감 노력에 반비례하여 대기 기온과 수온의 증가 경향성은 더 크게 나타났다.

수온의 계절별 변화를 분석하기 위하여 전체 모의 기간을 봄철(3~5월), 여름철(6~8월), 가을철(9~11월),

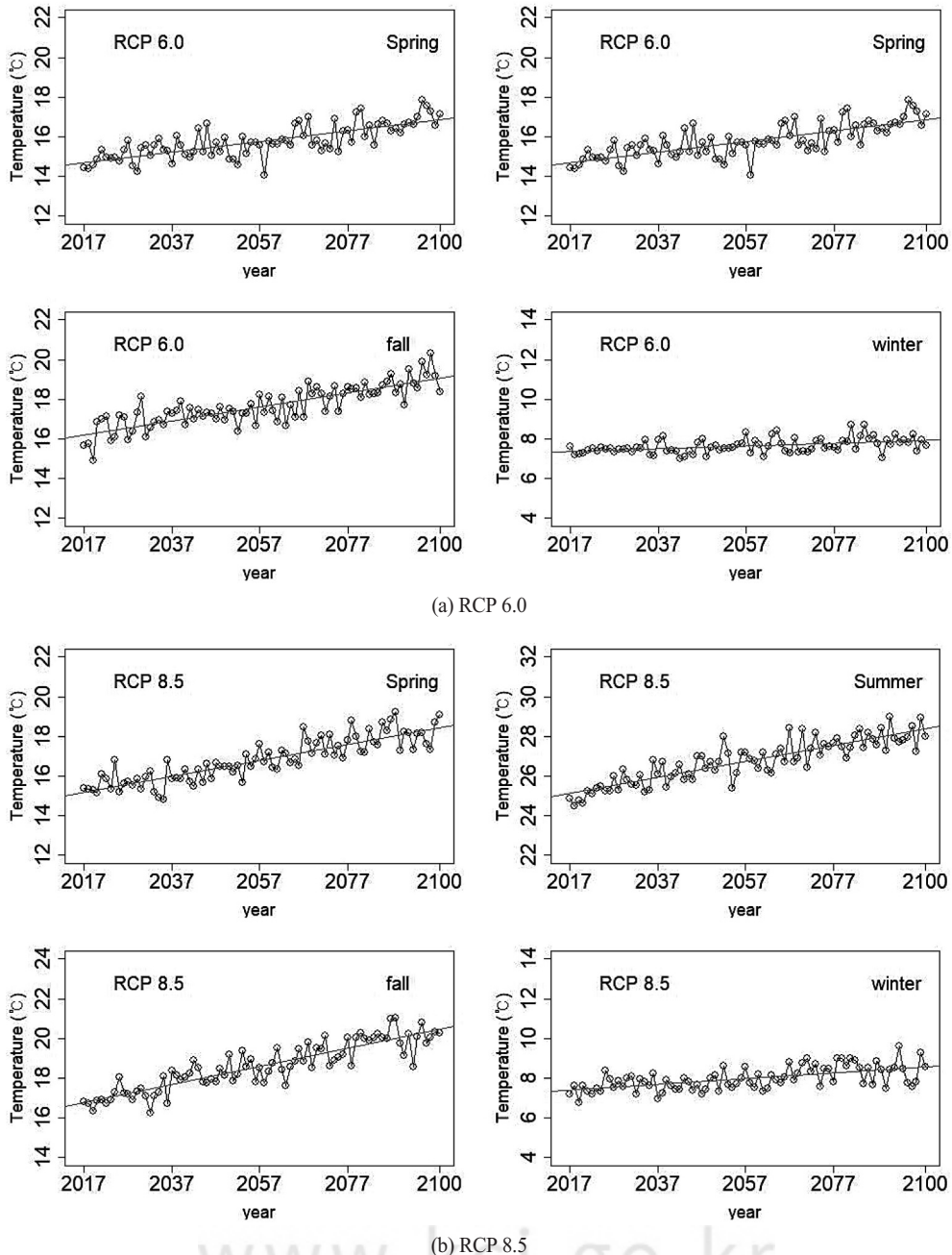


Figure 10. Analysis of seasonal inflow water temperature trends (RCP Scenario 6.0 and 8.5).

겨울철(12~2월)로 추출하여 각 계절별 경향성을 분석하였다(Table 7, Figure 8, Figure 9, Figure 10). 계절별 경향성 분석 결과, 과거기간 동안 저수지 유입 수온은 관측 기간이 짧아 통계적으로 유의하지는 않았지만 모든 계절에서 증가 경향을 보였으며, 특히 여름철의 수온 증가 경향이 가장 크게 나타났다. 미래 전망 기간에 대한 계절별 유입 수온은 RCP 2.6 시나리오의 봄과 겨울철을 제외한 모든 시나리오에서 증가 경향이 통계적으로 유의하였으며, 탄소 저감 노력이 약한 시나리오로 갈수록 증가율이 높았다.

4. 대청호 미래 수온성층 변화 예측

HadGEM3-RA를 통해 생산된 대기기온을 포함한 기상자료(Atr, Uw, Sola, RelH, ATM)와 RA-RF 모델을 통해 예측된 유입 수온을 20년 단위로 4개의 기간(S1: 2018~2037year, S2: 2038~2057 year, S3: 2058~2077year, S4: 2078~2097year)으로 구분하여 대청호의 수온 변화를 분석하였다. 각 전망 기간별로 예측된 기상자료와 유입 수온 자료의 일별 평균값을 3차원 저수지 모델(AEM3D)의 경계조건으로 적용하였다. 예측 수온의 계절별 변동성을 확인하기 위해 계절별로 구분 후 과거기간(2008~2016년) 상층부 수온과 하층부 수온 및 상-하층 수온 차이 비교를 통해 수온 변화 추이를 분석하였다(Table 8). 저수지 상층의 대표온도는 수면으로부터 2m 아래 지점을 선정하였고, 하층의 대표온도는 바닥으로부터 2m 지점을 선정하였다.

대청호의 미래 시나리오별 대한 상층 평균 수온을 비교한 결과, RCP 2.6은 14~15.0℃, RCP 4.5는 14.4~15.7℃, RCP 6.0은 13.9~16.0℃, RCP 8.5는 14.4~17.4℃이며 하층부 수온은 RCP 8.5 시나리오만 소폭 증가하는 경향을 확인하였다(Table 8). 시나리오별 S1 기간 대비 S4 기간 수온 증가 속도는 RCP 2.6은 0.04℃/10year인 반면 RCP 8.5는 0.38℃/10year로 상층부 수온과 하층부 수온의 증가속도는 탄소 저감 노력과 반비례하여 점진적으로 증가하는 유입 수온 결과와 유사한 증가 경향을 나타냈다. 과거 기간 동안 계절별 상층과 하층 평균 수온에 대하여 비교한 결과(Table 9), 모든 시나리오에서 봄철 상층부 수온은 평균 11.1~12.4℃으로, 과거 평균값 대비 증가하는 경향을 보였다. 여름철 상층부 수온의 경우 RCP 8.5 시나리오를 제외한 시나리오에서는 변동성은 있었지만 유의미한 변동은 나타나지 않았으며, RCP 8.5 시나리오 적용 시 평균 0.9℃ 증가하는 경향이 나타났다. 가을-겨울철의 상층부 과거수온에 비해 감소되는 것으로 모의되었지만, 전망기간의 증가에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 저수지 하층부 수온의 경우 모든 RCP 시나리오에서 전망기간이 증가함에 따라 소폭 증가하는 추세를 확인할 수 있다.

한편 상-하층부 수온 차이 역시 모든 시나리오에서 전반적으로 증가하였으며, 특히 RCP 8.5 시나리오의 경우 각 계절별 상-하층 수온 차이는 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 기후변화에 따른 저수

Table 8. Predicted water temperature of upper and lower layers for each scenario

Scenario	Layer	Average projection period					Water temperature increase rate (°C/10year)
		S1*	S2	S3	S4		
RCP 2.6	Upper	14.7	15.1	14.9	15.0	0.04	
	Lower	4.7	4.8	4.6	4.7	0.00	
RCP 4.5	Upper	14.4	15.0	15.6	15.7	0.17	
	Lower	4.6	4.6	4.7	4.6	0.00	
RCP 6.0	Upper	13.9	14.5	15.1	16.0	0.26	
	Lower	4.6	4.6	4.7	4.8	0.02	
RCP 8.5	Upper	14.4	15.3	16.4	17.4	0.38	
	Lower	4.6	4.6	4.9	5.2	0.08	

*S1 : 2018~2037 year average, S2 : 2038~2057 year average, S3 : 2058~2077 average year, S4 : 2078~2097 year average

Table 9. Seasonal changes in water temperature in the upper and lower layers

Scenario	Spring			Summer			Fall			Winter			
	Upper (°C)	Lower (°C)	Diff. (°C)	Upper (°C)	Lower (°C)	Diff. (°C)	Upper (°C)	Lower (°C)	Diff. (°C)	Upper (°C)	Lower (°C)	Diff. (°C)	
Past*	10.2	4.8	5.4	25.8	6.1	19.7	22.9	6.9	16.0	8.5	6.3	2.2	
RCP 2.6	S1**	11.0 (▲0.8)	4.2 (▽0.6)	6.8	25.3 (▽0.5)	4.8 (▽1.3)	20.5	18.8 (▽4.1)	5.5 (▽1.4)	13.3	3.6 (▽4.4)	4.4 (▽1.9)	-0.9
	S2**	11.4 (▲1.2)	4.2 (▽0.6)	7.2	26.0 (▽0.2)	4.7 (▽1.4)	21.3	19.1 (▽3.8)	5.4 (▽1.5)	13.8	3.6 (▽4.4)	4.4 (▽1.9)	-0.7
	S3**	11.2 (▲1.0)	4.0 (▽0.8)	7.2	25.5 (▽0.3)	4.6 (▽1.5)	20.9	19.1 (▽3.8)	5.3 (▽1.6)	13.8	3.7 (▽4.3)	4.3 (▽2.0)	-0.6
	S4**	11.4 (▲1.2)	4.2 (▽0.6)	7.3	25.8 (0.0)	4.7 (▽1.4)	21.1	19.2 (▽3.7)	5.4 (▽1.5)	13.8	3.6 (▽4.4)	4.4 (▽1.9)	-0.8
	avg	11.3 (▲1.1)	4.1 (▽0.7)	7.1	25.7 (▽0.1)	4.7 (▽1.4)	20.9	19.1 (▽3.8)	5.4 (▽1.5)	13.6	3.6 (▽4.4)	4.4 (▽1.9)	-0.7
RCP 4.5	S1	10.8 (▲0.6)	4.0 (▽0.8)	6.8	25.0 (▽0.8)	4.6 (▽1.5)	20.4	18.1 (▽4.8)	5.3 (▽1.6)	12.9	3.2 (▽4.3)	4.3 (▽2.0)	-1.0
	S2	11.5 (▲1.3)	4.2 (▽0.6)	7.3	25.4 (▽0.4)	4.7 (▽1.4)	20.7	19.0 (▽3.9)	5.4 (▽1.5)	13.6	3.8 (▽4.3)	4.3 (▽2.0)	-0.5
	S3	12.3 (▲2.1)	4.2 (▽0.6)	8.1	26.1 (▽0.3)	4.8 (▽1.3)	21.3	19.7 (▽3.2)	5.4 (▽1.5)	14.3	4.1 (▽4.4)	4.4 (▽1.9)	-0.3
	S4	12.3 (▲2.1)	4.1 (▽0.7)	8.2	26.5 (▽0.7)	4.6 (▽1.5)	21.9	19.7 (▽3.2)	5.3 (▽1.6)	14.5	4.1 (▽4.3)	4.3 (▽2.0)	-0.2
	avg	11.7 (▲1.5)	4.1 (▽0.7)	7.6	25.8 (0.0)	4.7 (▽1.4)	21.1	19.2 (▽3.7)	5.3 (▽1.6)	13.8	3.8 (▽4.3)	4.3 (▽2.0)	-0.5
RCP 6.0	S1	10.2 (0.0)	4.1 (▽0.7)	6.1	24.6 (▽1.2)	4.7 (▽1.4)	19.9	17.9 (▽5.0)	5.4 (▽1.5)	12.5	2.6 (▽4.2)	4.2 (▽2.1)	-1.6
	S2	10.6 (▲0.4)	4.0 (▽0.8)	6.6	25.3 (▽0.5)	4.7 (▽1.4)	20.7	18.8 (▽4.1)	5.3 (▽1.6)	13.4	3.1 (▽4.3)	4.3 (▽2.0)	-1.2
	S3	11.2 (▲1.2)	4.1 (▽0.7)	7.1	25.8 (0.0)	4.7 (▽1.4)	21.1	19.3 (▽3.6)	5.4 (▽1.5)	13.9	3.7 (▽4.4)	4.4 (▽1.9)	-0.6
	S4	12.4 (▲2.4)	4.2 (▽0.6)	8.2	26.8 (▽1.0)	4.8 (▽1.3)	21.9	20.1 (▽2.8)	5.6 (▽1.3)	14.5	4.4 (▽4.4)	4.4 (▽1.9)	0.0
	avg	11.1 (▲0.9)	4.1 (▽0.7)	7.0	25.6 (▽0.2)	4.7 (▽1.4)	20.9	19.0 (▽3.9)	5.4 (▽1.5)	13.6	3.5 (▽4.3)	4.3 (▽2.0)	-0.9
RCP 8.5	S1	11.0 (▲0.8)	4.0 (▽0.8)	7.0	25.9 (▽0.1)	4.6 (▽1.5)	20.3	18.5 (▽4.4)	5.3 (▽1.6)	13.1	3.2 (▽4.3)	4.3 (▽2.0)	-1.1
	S2	11.6 (▲1.4)	4.1 (▽0.7)	7.5	26.3 (▽0.5)	4.7 (▽1.4)	21.5	19.6 (▽3.3)	5.4 (▽1.5)	14.2	3.6 (▽4.3)	4.3 (▽2.0)	-0.7
	S3	13.1 (▲2.9)	4.2 (▽0.6)	8.8	27.4 (▽1.6)	4.8 (▽1.3)	22.5	20.4 (▽2.5)	5.9 (▽1.0)	14.5	4.7 (▽4.5)	4.5 (▽1.8)	0.1
	S4	14.0 (▲3.8)	4.2 (▽0.6)	9.8	28.3 (▽2.5)	5.0 (▽1.1)	23.3	21.7 (▽1.2)	6.6 (▽0.3)	15.1	5.5 (▽4.9)	4.9 (▽1.4)	0.6
	avg	12.4 (▲2.2)	4.1 (▽0.7)	8.3	26.7 (▽0.9)	4.8 (▽1.3)	21.9	20.0 (▽2.9)	5.8 (▽1.1)	14.2	4.2 (▽4.5)	4.5 (▽1.8)	-0.3

*Past : 2008~2016 year

**S1 : 2018~2037 year average, S2 : 2038~2057 year average, S3 : 2058~2077 average year, S4 : 2078~2097 year average

Table 10. Comparison of the number of stratification day for each scenario

Scenario		Solar	Air Temperature	Inflow Temperature	Initial Formation day	Last Fomation day	Stratification period
RCP 2.6	S1**	192.2 (±87.0)*	13.5 (±9.7)	16.6 (±7.4)	2037-04-10	2037-11-24	229 day
	S2**	195.4 (±87.8)	14.0 (±10.0)	16.9 (±7.6)	2057-04-06	2057-11-26	235 day
	S3**	192.2 (±86.5)	13.9 (±9.8)	16.8 (±7.5)	2077-04-08	2077-12-28	235 day
	S4**	194.2 (±86.7)	14.0 (±10.0)	16.9 (±7.6)	2079-04-10	2079-11-27	232 day
RCP 4.5	S1	197.6 (±87.4)	13.2 (±10.0)	16.5 (±7.5)	2037-04-08	2037-11-22	229 day
	S2	192.5 (±87.6)	13.8 (±9.7)	16.8 (±7.5)	2057-04-08	2057-11-29	236 day
	S3	191.6 (±88.0)	14.5 (±9.8)	17.2 (±7.7)	2077-04-05	2077-11-30	240 day
	S4	194.3 (±87.3)	14.7 (±10.0)	17.4 (±7.8)	2079-04-05	2079-12-01	241 day
RCP 6.0	S1	192.9 (±87.0)	12.6 (±10.0)	16.1 (±7.4)	2037-04-10	2037-11-21	226 day
	S2	193.4 (±87.1)	13.9 (±10.0)	16.5 (±7.5)	2057-04-10	2057-11-27	232 day
	S3	195.1 (±87.8)	15.1 (±10.0)	16.9 (±7.6)	2077-04-07	2077-11-28	236 day
	S4	194.5 (±87.6)	15.0 (±10.0)	17.6 (±7.9)	2079-04-02	2079-12-02	245 day
RCP 8.5	S1	194.8 (±87.2)	13.2 (±9.9)	16.5 (±7.5)	2037-04-09	2037-11-24	230 day
	S2	197.5 (±88.2)	14.3 (±10.2)	17.2 (±7.8)	2057-04-08	2057-11-30	237 day
	S3	194.8 (±88.3)	15.5 (±10.1)	17.9 (±8.0)	2077-04-03	2077-12-01	243 day
	S4	194.6 (±88.4)	16.3 (±10.1)	18.6 (±8.2)	2079-03-25	2079-12-03	254 day

*mean (±standard deviation)

**S1 : 2018~2037 year average, S2 : 2038~2057 year average, S3 : 2058~2077 average year, S4 : 2078~2097 year average

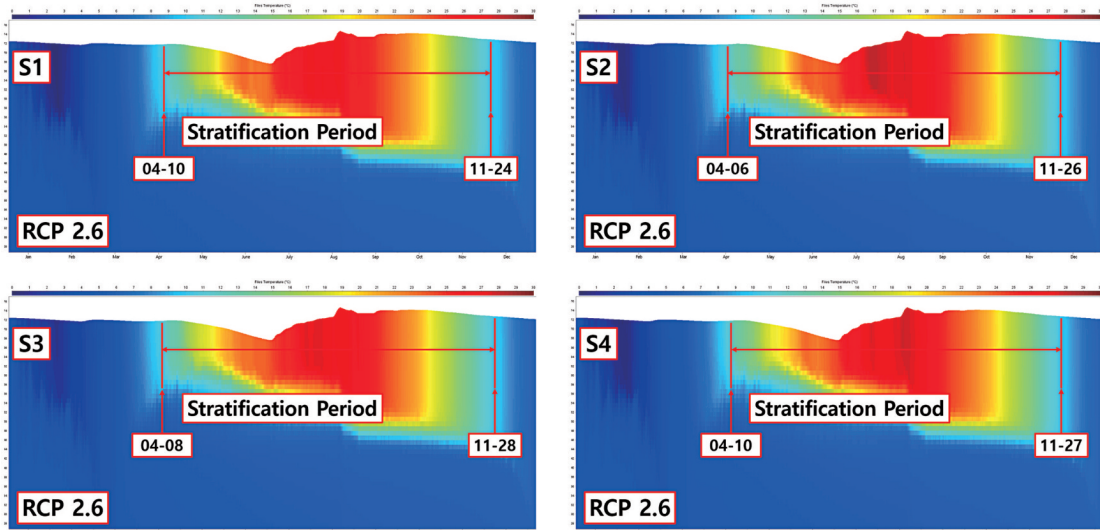
지의 수온성층 형성기간의 변화를 해석하기 위해 상층과 하층의 수온 차이가 5℃ 이상 발생하는 기간을 기준으로 분석하였다. 국외 선행연구에서 Stefan et al. (1996), Foley et al. (2012), Woolway et al. (2014)은 호수에서 수온성층 형성 기준을 표층과 심층의 온도 차가 1℃ 이상일 때를 문턱값으로 선택한 바 있으나, 이를 국내 저수지에 적용할 경우 성층형성 기간이 너무 길어지는 문제가 있다. 국내 충주호와 소양호의 선행연구에서는 수체의 안정도를 나타내는 Schmidt 지수가 300 J/m² 일 때 상-하층의 수온차이가 5℃인 것을 기준으로 성층화 기간을 산정한 바 있다(Yoon & Chung 2012; Yoon et al. 2020). 미래 전망기간 별 시나리오별 대청호의 수온성층 형성 일수를 분석한 결과, 약간의 변동은 있었으나 대부분의 시나리오에서 저수지의 수온성층 형성 시기는 빨라지고, 반면에 소멸 시점은 늦어지는 추세를 보였으며, 이에 따라 연중 수온성층 형성기간이 점진적으로 증가하는 경향을 나타냈다(Table 10, Figure 11, Figure 12). 특히 RCP 8.5 시나리오의 경우 S1기간 대비 S4 기간의 성층일수는 24일 증가하였다. 본 연

구 결과의 신뢰성을 검증하기 위해 선행연구사례와 비교해 본 결과, 성층현상 기간의 변화는 이상기후로 인한 지구 온난화의 영향이 Washington Lake 및 Tahoe lake를 포함한 북반구 지역에 위치한 호 내 성층형성 시작 시점을 앞당겼으며(Woolway et al. 2021), 이란의 Ladtian 댐 저수지에서도 유사한 결과를 보였다(Modiri Gharehveran et al. 2014). 국내의 연구사례에서도 기후변화는 충주호의 성층형성 시작 시점을 5일 정도 앞당겼으며(Yoon & Chung 2012) 및 소양호의 경우 수온성층 형성일 수가 213일에서 307일로 미래기간으로 갈수록 증가하는 추세를 나타내었다(Yoon et al. 2020).

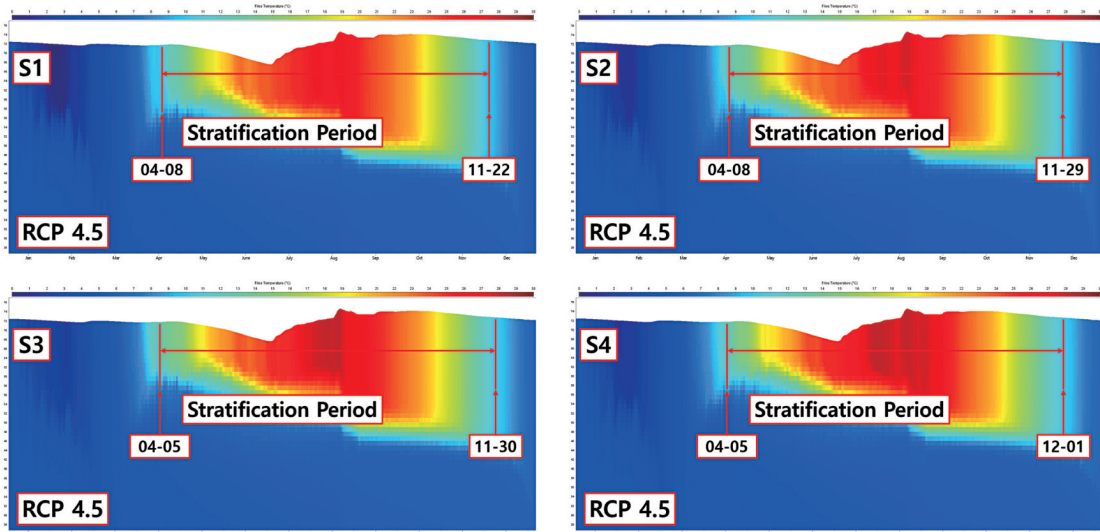
연구 결과를 나타난 대청호의 미래 수온 상승과 수온성층 강화는 수질과 수생태계 건강성 관리 측면에서 중요한 시사점을 제시한다. 최근 소양호에서는 수온성층이 강화되면서 수체의 완전 혼합시기가 느려지고 심지어 풍속이 약한 해에는 완전 혼합이 일어나지 않는 현상이 이미 관측되고 있다. 대청호에서 수온성층 형성 기간의 장기화는 심층부의 빈산소층을 공간적으로 확대시키고, 퇴적물-수체 간의 영양염류 용

출량을 증가시킬 수 있다. 또한 수체 내 식물플랑크톤 생태량과 조성 비율 변화(Edwards et al. 2016) 및 특정 어류 종의 서식지 변화를 야기할 수 있다(Chung et al. 2011; Kang et al. 2013). 댐 저수지 수온의 상승은 방류수 수온 상승으로 하류하천의 수생태계에도 영향을 미칠 수 있다. Hong et al.(2019)의 연구 결과에 의하면, 하천 수온의 상승은 금강, 만

경강, 용천천 일부에서만 출현하는 고유종인 감돌고기의 물리적인 서식처를 변화시킬 수 있다. 따라서 미래 기후변화에 따른 댐 저수지 수온 상승과 수온성층강화가 저수지와 하류하천의 수질과 수생태계에 미치는 영향을 과학적으로 예측하고 피해를 최소화할 수 있는 적응대책 마련이 필요하다.



(a) RCP 2.6



(b) RCP 4.5

Figure 11. Changes in water temperature profile and stratification formation period for RCP 2.6 and RCP 4.5 scenarios.

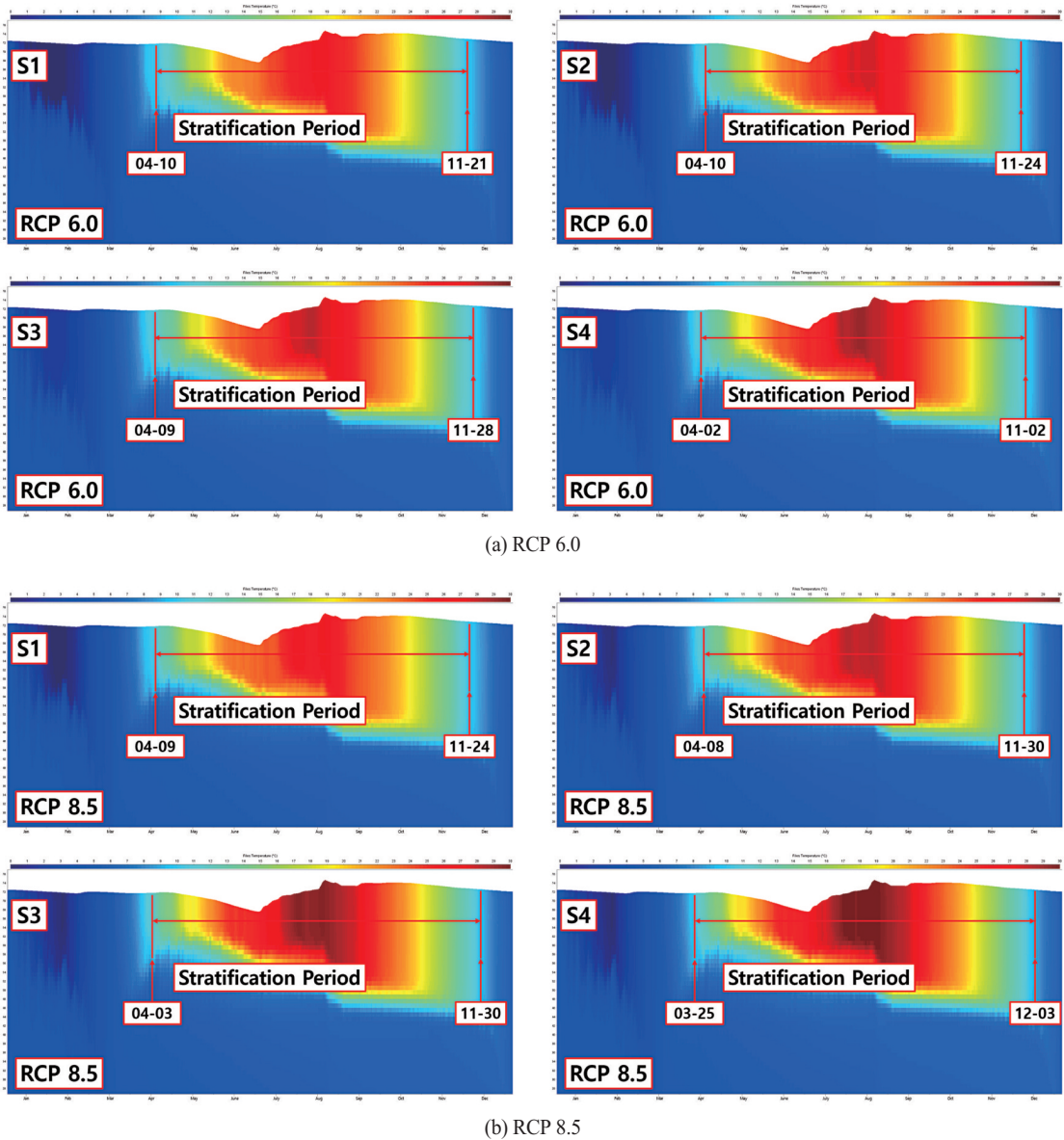


Figure 12. Changes in water temperature profile and stratification formation period for RCP 6.0 and RCP 8.5 scenarios.

IV. 결론

본 연구에서는 대청댐 저수지를 대상으로 고빈도 실측 자료기반의 유입수 수온 예측 모델을 개발하고, 탄소배출 대표경로별 기후변화 시나리오를 대상으로 유입 수온을 예측한 후 3차원 저수지 수리 모델에 적용하여 대청호의 수온성층 구조와 형성 기간의 변화를 예측하였다. 본 연구를 바탕으로 도출된 주요 결

론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 양상불 의사결정 나무 모델인 random forest에 RFE 기법을 적용하여 선정된 최소 입력변수(유량 포함)로 개발된 RFE-RF 모델과 지역 기후 모델(HadGEM3-RA)로부터 제공받을 수 있는 기상입력변수(기온, 풍속, 태양복사 에너지, 상대습도, 기압)만을 이용하여 개발한 RA-RF 모델의 예측성능을 비교한 결과, RA-RF 모델은

- RFE-RF 모델과 유사한 예측 성능(NSE 0.97, RMSE 1.86°C, MAPE 9.45%)을 나타냈으며, 유입 수온의 시계열 변동성을 적절히 재현하였다. 이러한 결과는 기상자료와 고빈도 수온 모니터링 자료를 확보하여 자료기반 수온 예측 모델을 개발한다면, 복잡한 유역 모델과 물리적 하천 수리 모델을 사용하지 않고도 댐 저수지 유입 수온을 신뢰도 있게 예측 가능하다는 것을 시사한다.
- 2) HadGEM3-RA로 예측된 미래 기상자료를 RA-RF 모델에 적용하여 2100년까지의 대청호의 유입하천 수온을 예측한 결과, 수온은 0.21~0.43°C/10year 속도로 지속적으로 증가하였다. 계절별로는 RCP 2.6 시나리오의 봄과 겨울철을 제외한 모든 시나리오에서 유입 수온의 증가 경향이 통계적으로 유의하였으며, 탄소저감 노력이 약한 시나리오로 갈수록 증가율이 높았다.
 - 3) 유입 수온을 20년 단위로 구분(S1, S2, S3, S4)하여 시나리오별 저수지 표층 수온의 증가 속도 분석 결과, S1 대비 S4의 표층 수온 증가속도는 RCP 2.6와 RCP 8.5에서 각각 0.04°C/10year와 0.38°C/10year로 나타나 유입 수온 예측결과와 같이 탄소저감노력이 미흡할수록 증가 속도가 빨랐다. 심층 수온은 RCP 2.6에서는 미미하였고 RCP 8.5에서는 0.08°C/10year으로 분석되었다.
 - 4) 저수지 상-하층 온도차이가 5°C 이상일 경우를 성층형성기준으로 평가하여 시나리오별 연간 성층일수를 비교한 결과, 시나리오별 전망 기간(S1, S2, S3, S4)에 따라 성층형성 시기가 앞당겨지고 기간도 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 연구 결과는 전 지구적 기후변화가 호소의 성층강도를 강화시키고 성층 형성기간을 장기화한다는 선행 연구 결과와 일치한다. 기후변화에 따른 수온성층 강화와 장기화는 저층에서의 빈산소층을 확대하고, 퇴적물-수체 간 영양염류 용출량을 증가시킬 뿐만 아니라 수체 내 식물플랑크톤과 어류 등의 우점종 변화를 야기할 수 있어 수질 및 수생태계 관리 측면에서 적절한 적응 대책이 필요함을 시사한다.

사사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호 : 2021003030004).

References

- An IK, Park HS, Chung SW, Ryu IG, Choi JK, Kim JW. 2020. Analysis of organic carbon cycle and mass balance in Daecheong reservoir using three-dimensional hydrodynamic and water quality model, *Journal of Korean Society on Water Environment* 36(4): 284-299. [Korean Literature]
- Blenckner T, Pettersson K, Padisak J. 2002. Lake plankton as a tracer to discover climate signals, *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen* 28(3): 1324-1327.
- Breiman L. 2001. Random forests, *Machine Learning* 45(1): 5-32.
- Breiman L. 2018. randomForest: Breiman and Cutler's Random Forests for Classification and Regression. R package version 4.6-12, Software available at URL: <https://cran.r-project.org/package=randomForest>, 0098-5589.
- Caissie D, El-Jabi N, Satish MG. 2001. Modelling of maximum daily water temperatures in a small stream using air temperatures, *Journal of Hydrology* 251(1-2): 14-28.
- Change IC. 2014. Mitigation of Climate Change, the Intergovernmental Panel on Climate Change; Vol. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Change, IPOC. 2001. Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability, Geneva,

- Suíça.
- Chung NM, Park BK, Kim KH. 2011. Potential Effect of Increased Water Temperature on Fish Habitats in Han River Watershed 27(3): 314-321. [Korean Literature]
- Chung SW, Imberger J, Hipsey MR, Lee HS. 2014. The influence of physical and physiological processes on the spatial heterogeneity of a *Microcystis* bloom in a stratified reservoir, *Ecological Modelling* 289: 133-149. [Korean Literature]
- Chung SW, Oh JK. 2006. River water Temperature Variations at Upstream of Daecheong Lake During Rainfall Events and Development of Prediction Models, *Journal of Korea Water Resources Association* 39(1): 79-88. [Korean Literature]
- Chung SW, Park JH, Kim Y. 2007. Application of CE-QUAL-W2 to Daecheong Reservoir for eutrophication simulation, *Journal of Korean Society on Water Environment* 23(1): 52-63. [Korean Literature]
- Chung SW. 2004. Density Flow Regime of Turbidity Current into a Stratified Reservoir and Vertical Two-dimensional Modeling. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 26(9): 970-978. [Korean Literature]
- Coats R, Reuter J, Dettinger M, Riverson J, Sahoo G, Schladow G, Costa-Cabral M. 2010. The effects of climate change on lake Tahoe in the 21st century: meteorology, hydrology, loading and lake response, Prepared for Jonathan Long Pacific Southwest Research Station, Tahoe Environmental Science Center, p. 291.
- Deemer BR, Harrison JA, Li S, Beaulieu JJ, DelSontro T, Barros N, Bezerra-Neto JF, Powers SM, dos Santos MA, Vonk JA. 2016. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis, *BioScience* 66(11): 949-964.
- Edwards KF, Thomas MK, Klausmeier CA, Litchman E. 2016. Phytoplankton growth and the interaction of light and temperature: A synthesis at the species and community level, *Limnology and Oceanography* 61(4): 1232-1244.
- Fang X, Stefan HG. 2009. Simulations of climate effects on water temperature, dissolved oxygen, and ice and snow covers in lakes of the contiguous US under past and future climate scenarios, *Limnology and Oceanography* 54(6-2): 2359-2370.
- Firoozi F, Roozbahani A, Bavani AM. 2020. Developing a framework for assessment of climate change impact on thermal stratification of dam reservoirs, *International Journal of Environmental Science and Technology* 17(4): 2295-2310.
- Fischer HB, List JE, Koh CR, Imberger J, Brooks NH. 1979. *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press.
- Ford PW, Boon PI, Lee K. 2002. Methane and oxygen dynamics in a shallow floodplain lake: the significance of periodic stratification, *Hydrobiologia* 485(1): 97-110.
- Gooseff MN, Strzepek K, Chapra SC. 2005. Modeling the potential effects of climate change on water temperature downstream of a shallow reservoir, *Lower Madison River, MT, Climatic Change* 68(3): 331-353.
- Hipsey MR, Gal G, Antenucci JP, Zohary T, Makler V, Imberger J. 2006. Lake Kinneret water quality management system.
- Hodges B, Dallimore C. 2016. *Aquatic ecosystem model: AEM3D v1.0 user manual*, Hydronumerics Pty Ltd.
- Hong II, Kim JS, Kim KH, Jeon HS. 2019.

- Assessment of Climate Change Impact on Flow Regime and Physical Habitat for Fish. [Korean Literature]
- Huntington TG. 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis, *Journal of Hydrology* 319(1-4): 83-95.
- Imberger J. 2004. A lake diagnostic system for managing lakes and reservoirs, *Water Resources Impact* 6(1): 7-11.
- Jeong DI, Daigle A, St-Hilaire A. 2013. Development of a stochastic water temperature model and projection of future water temperature and extreme events in the Ouelle River basin in Québec, Canada, *River Research and Applications* 29(7): 805-821. [Korean Literature]
- Jung IW, Bae DH, Kim G. 2011. Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea, *International Journal of Climatology* 31(3): 359-370. [Korean Literature]
- Kang HS, Part MY, Jang JH. 2013. Effect of Climate Change on Fish Habitat in the Nakdong River Watershed 46(1): 1-12. [Korean Literature]
- Kankaala P, Huotari J, Tulonen T, Ojala A. 2013. Lake-size dependent physical forcing drives carbon dioxide and methane effluxes from lakes in a boreal landscape, *Limnology and Oceanography* 58(6): 1915-1930.
- Korean Climate Data. 2018. Korean Peninsula Climate Change Prospect Analysis Report.
- K-water. 2006. Daecheong Dam sedimentation survey report.
- K-water. 2020. Dam operational handbook for practitioners.
- Kim JY. 2003. The evaluation of the eutrophication for the lakes by phosphorus loading, *The Korean Environmental Sciences Society* 12(7): 689-695. [Korean Literature]
- Kim JY. 2013. Climate Change Status and Prospects through the 5th IPCC Report, *The Science & Technology*, 76-79. [Korean Literature]
- Lee HS, Kim DS, Hwang MH, Ahn KG. Assessment of Runoff and Water temperature variations under RCP Climate Change Scenario in Yongdam dam watershed, South Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment* 32(2): 173-182. [Korean Literature]
- Lee SJ, Kim JW. 2019. Enhancement of Water Quality Prediction System for Scientific Management of Water Quality. *Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers Conference*, 220-220. [Korean Literature]
- Liaw A, Wiener M. 2002. Classification and regression by randomForest. *R News* 2(3): 18-22. [Korean Literature]
- Liu WC, Chen WB. 2012. Prediction of water temperature in a subtropical subalpine lake using an artificial neural network and three-dimensional circulation models, *Computers & Geosciences* 45: 13-25.
- Lu H, Ma X. 2020. Hybrid decision tree-based machine learning models for short-term water quality prediction, *Chemosphere* 249: 126169.
- Mackey AP, Berrie AD. 1991. The prediction of water temperatures in chalk streams from air temperatures, *Hydrobiologia* 210(3): 183-189.
- Modiri-Gharehveran M, Etemad-Shahidi A, Jabbari E. 2014. Effects of climate change on the thermal regime of a reservoir, In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* (Vol. 167,

- No. 10, pp. 601-611), Thomas Telford Ltd. National Geographic, National Geographic, www.nationalgeographic.com.
- National Institute of Environmental Research. 2003. Water quality survey of the Geum River system.
- Nijssen B, Lettenmaier DP. 2004. Effect of precipitation sampling error on simulated hydrological fluxes and states: Anticipating the Global Precipitation Measurement satellites, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D2).
- Paerl HW, Paul VJ. 2012. Climate change: links to global expansion of harmful cyanobacteria, *Water Research* 46(5): 1349-1363.
- Park HS, Chung SW, Kim SJ. 2021. Effect of buoyant turbulence and water quality factors on the CO₂ net atmospheric flux changes in a stratified reservoir, *Science of The Total Environment* 776; 145940. [Korean Literature]
- Park HS, Yoon SW, Chung SW, Hwang HS. 2016. Effect of Pollutants Control Measures in So-Oak Watershed on the Control of Algae Growth in Daecheong Reservoir, *Journal of Environmental Impact Assessment* 25(4): 248-260. [Korean Literature]
- Quan Q, Hao Z, Xifeng H, Jingchun L. 2020. Research on water temperature prediction based on improved support vector regression. *Neural Computing and Applications*, 1-10.
- Ryu IG, Yu SJ, Chung SW. 2020. Characterizing density flow regimes of three rivers with different physicochemical properties in a run-of-the-river reservoir, *Water* 12(3): 717. [Korean Literature]
- Shon TS, Lee SD, Kim SD, Shin HS. 2010. An Analysis of the Effect of Climate Change on Flow in Nakdong River Basin Using Watershed-Based Model, *Journal of Korea Water Resources Association* 43(10): 865-881. [Korean Literature]
- Stefan HG, Hondzo M, Fang X, Eaton JG, McCormick JH. 1996. Simulated long term temperature and dissolved oxygen characteristics of lakes in the north-central United States and associated fish habitat limits, *Limnology and Oceanography* 41(5): 1124-1135.
- Ułańczyk R, Łozowski B, Woźnica A, Absalon D, Kolada A. 2021. Water Quality and Ecosystem Modelling: Practical Application on Lakes and Reservoirs, *Quality of Water Resources in Poland*, 173-189.
- Watson SB. 2004. Aquatic taste and odor: a primary signal of drinking-water integrity, *Journal of Toxicology and Environmental Health Part A*, 67(20-22): 1779-1795.
- Woolway RI, Maberly SC, Jones ID, Feuchtmayr H. 2014. A novel method for estimating the onset of thermal stratification in lakes from surface water measurements, *Water Resources Research* 50(6): 5131-5140.
- Woolway RI, Sharma S, Weyhenmeyer GA, Debolskiy A, Golub M, Mercado-Bettin D, Perroud M, Stepanenko V, Tan Z, Grant L, Ladwig R, Mesman J, Moore TN, Shatwell T, Vanderkelen I, Austin JA, DeGasperis CL, Dokulil M, Fuente SL, Mackay EB, Schladow SG, Watanabe S, Marcé R, Pierson DC, Thiery W, Jennings E. 2021. Phenological shifts in lake stratification under climate change, *Nature Communications* 12(1): 1-11.
- Yang YM, Chae MH, Lee DH, Park YK, Seok KS. 2021. Assessment of Water Quality and Sediment Pollution in Gap Stream, *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology* 24(1): 13-25. [Korean Literature]
- Yi HS, Kim DS, Hwang MH, An KG. 2016.

- Assessment of Runoff and Water temperature variations under RCP Climate Change Scenario in Yongdam dam watershed, South Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment* 32(2): 173-182. [Korean Literature]
- Yi YK, Kang MG, Lee HS, Kim JY. 2006. Water Temperature Variation of a Stream Entering Soyang Reservoir, 1063-1067. [Korean Literature]
- Yoon SW, Park GY, Chung SW, Kang BS. 2014. Projection of the Climate Change Effects on the Vertical Thermal Structure of Juam Reservoir 30(5): 491-502. [Korean Literature]
- Yoon WY, Chung SW. 2012. Analyzing the effect of global warming on the thermal stratification in Chungju reservoir, *Journal of Korea Water Resources Association* 133-133. [Korean Literature]
- You KA, Byeon MS, Hwang SJ, Rhew DH. 2013. Growth Characteristics of Blue-green Algae (*Anabaena spiroides*) Causing Tastes and Odors in the North-Han River, *Korean Journal of Ecology and Environment* 46(1): 135-144. [Korean Literature]
- Yun YJ, Park HS, Chung SW, Kim YD, Ohn IS, Lee SR. 2020. Long-term Simulation and Uncertainty Quantification of Water Temperature in Soyanggang Reservoir due to Climate Change, *Journal of Korean Society on Water Environment* 36(1): 14-28. [Korean Literature]
- Yun YJ, Park HS, Chung SW. 2019. Long-term Simulation of Water Temperature in Soyanggang Reservoir in Response to RCP 4.5 Climate Scenario, *Journal of Korea Water Resources Association*, 265-265. [Korean Literature]
- Zamani B, Koch M. 2020. Comparison between two hydrodynamic models in simulating physical processes of a reservoir with complex morphology: Maroon Reservoir, *Water* 12(3): 814.