

기후변화 시나리오별 한강유역의 수계별 수온상승 가능성

김민희^{1a,*} · 이정희^{1b} · 성경희^{1c} · 임철수^{1d} · 황원재^{2a} · 현승훈^{2b}

¹환경부 한강유역환경청 측정분석과 · ²고려대학교 환경생태공학과

Potential Impacts of Climate Change on Water Temperature of the Streams in Han-River Basin

Minhee Kim^{1a,*} · Junghee Lee^{1b} · Kyounghee Sung^{1c} · Cheolsoo Lim^{1d} · Wonjae Hwang^{2a} · Seunghun Hyun^{2b}

¹Hanriver Basin Environmental office, Ministry of Environment

²Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University

(Received 16 November 2021, Revised 15 December 2021, Accepted 21 December 2021)

Abstract

Climate change has increased the average air temperature. Rising air temperature are absorbed by water bodies, leading to increasing water temperature. Increased water temperature will cause eutrophication and excess algal growth, which will reduce water quality. In this study, long-term trends of air and water temperatures in the Han-river basin over the period of 1997-2020 were discussed to assess the impacts of climate change. Future (~2100s) levels of air temperature were predicted based on the climate change scenarios (Representative concentration pathway (RCP) 2.6, 4.5, 6.0, and 8.5). The results showed that air and water temperatures rose at an average rate of $0.027^{\circ}\text{C year}^{-1}$ and $0.038^{\circ}\text{C year}^{-1}$ respectively, over the past 24 years (1997 to 2020). Future air temperatures under RCP 2.6, 4.5, 6.0, and 8.5 increased up to 0.32°C , 1.18°C , 2.14°C , and 3.51°C , respectively. An increasing water temperature could dissolve more minerals from the surrounding rock and will therefore have a higher electrical conductivity. It is the opposite when considering a gas, such as oxygen, dissolved in the water. Water temperature also governs the kinds of organisms that can live in rivers and lakes. Fish, insects, zooplankton, phytoplankton, and other aquatic species all have a preferred temperature range. As temperatures get too far above or below this preferred range, the number of individuals of the species decreases until finally there are none. Therefore, changes of water temperature that are induced by climate change have important implications on water supplies, water quality, and aquatic ecosystems of a watershed.

Key words : Climate change, Future air temperature, Han-River basin, Water quality, Water temperature

^{1a} Corresponding author, 환경연구사(Researcher), (Ph.D.), minhee910@korea.kr, https://orcid.org/0000-0003-3988-2787

^{1b} 환경연구사(Researcher), jhl97@korea.kr, https://orcid.org/0000-0002-6855-4013

^{1c} 환경연구사(Researcher), yamacco9@korea.kr, https://orcid.org/0000-0002-8883-6034

^{1d} 공업연구관(Research Officer), (Ph.D.), lcs6713@korea.kr, https://orcid.org/0000-0001-5870-3268

^{2a} 연구교수(Research professor), (Ph.D.), hwj0145@korea.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-9537-9601

^{2b} 정교수(Professor), (Ph.D.), soilhyun@korea.ac.kr, https://orcid.org/0000-0001-8806-5834

1. Introduction

과거 100년간 한반도 기온은 세계 기온증가를 대비 2.3배인 약 1.7°C 상승하였고, 강수일수는 최근 50년간 감소되었으며, 호우 발생빈도는 반대로 증가하여 전 세계에서 기후변화가 가장 뚜렷한 지역으로 분류되었다. 이와 같은 기후변화의 영향에 따라 미래 2100년의 한반도 기후는 아열대 기후로 변화될 것으로 예측되고 있다(IPCC, 2007; Jung, Bae et al., 2011). 2020년 한국기후변화 평가보고서(ME, 2020)에 따르면, 지난 40년간 연평균 기온은 1980년대 12.2°C, 1990년대 12.6°C, 2000년대 12.8°C, 2010년대 13.0°C로 기온상승이 점차 가속화되고 있는 것으로 확인하였다(견고한 동의). 특히, 2000년대 이후 저온현상의 강도는 강해지고(제한적 동의) 있으며, 2010년대 중반 이후에는 봄철 이상고온 현상의 빈도와 강도는 증가되고(견고한 동의), 극한고온의 빈도 또한 빠르게 증가(증간적 동의)되고 있는 것으로 추측되고 있다(ME, 2020)(Table 1).

기후변화에 따른 기온상승은 유역 내 수체의 수온과 증발량, 유량 및 강우 유출률을 변화시켜 수질에 직·간접적인 영향을 미치게 된다(Murdoch et al., 2000; Yi et al., 2016). IPCC의 기후변화와 물에 관한 기술보고서에 따르면, 수자원은 기후변화에 매우 취약하기 때문에, 수생태계에 광범위한 영향을 미칠 것으로 예측하고 있다(IPCC, 2013). 특히, 기온의 상승은 수온상승에 직접적인 영향을 미치며, 이로 인해 화학적 및 생화학적 반응속도가 증가되어 플랑크톤의 성장률을 높여 조류증식이 확대되고, 부영양화 등의 수질문제를 일으키게 될 것이다(Fang and Stefan, 2009; Jung, Kim et al., 2011; Murdoch et al., 2000; Shin et al., 2014). 뿐만 아니라, 수체의 물리적 혼합특성이 변화되어 물질순환에 영향을 미치기도 할 것이다. 특히, 표층의 수온상승은 호소 내 성층현상을 더욱 강화시켜 물의 수직이동을 제한하고, 이로 인해 심층수의 용존산소는 감소되고, 탄소, 질소, 인 등의 영양물질 순환이 저감될 것이다(Ahn and Han, 2010; Boyce et al., 2010; Carter et al., 1999; Han et al., 2010; IPCC, 2001; Murdoch et al., 2000; Pearl and Paul, 2012; Stefan and Sinokrot, 1993; Stockle et al., 1992).

국내에서는 기후변화에 따른 물관리를 위해 한국판 그린뉴딜, 기후변화 대응 물관리, 2050년 탄소중립 달성 등과 같은 정책을 통해 깨끗하고 안전한 물관리 체계 구축, 기후변화 대응 수자원 관리 체계 구축 및 취약성 평가, 시나리오를 기반으로 한 유역 내 물관리의 필요성을 제안하고 있다(MOEF,

2020; ME, 2020). 하지만, 국내의 기후변화에 의한 물관리 연구는 미래 기상, 강우·가뭄·홍수, 하천유량, 등의 양적인 분야에 집중되어 왔으며, 수질 및 수생태의 변화와 취약성평가 분야는 상대적으로 미흡한 실정이다. 또한 국소적 및 지역적 기온상승의 차이는 유역별 수질과 수·생태계 변화에 새로운 패턴을 야기함에도 이에 대한 자료 및 연구가 부족한 실정이다. 특히, 한강수계는 하천 표류수를 직접 취수하여 상수원으로 이용하기 때문에 수질변화에 취약하여 수질관리에 필요한 사회적 요구가 증가하고 있는 유역이다. 따라서 극한가뭄 및 홍수, 수온변화 등을 포함한 장래 기후변화에 따른 수질변화의 취약성을 평가하여 다변화하는 기후환경과 유역환경에 필요한 지속가능한 수질관리 체계를 구축할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 i) 국외 기후변화에 의한 수질변화 연구 사례, 관계성과 취약성 평가방법 등의 연구동향을 파악하여, 국내 환경에 적합한 기후영향평가기법 적용의 가능성을 제시하고, ii) 한강유역을 대상으로 관측된 대기기온 및 수온변화를 통해 과거와 현재의 정량적 기후변화와 상관성을 제시하며, 이를 기초로 iii) 미래 기후변화 시나리오 모형을 통해 한강유역의 4대수계(남한강, 북한강, 한강, 안성천)의 기온상승을 예측하고자 한다. iv) 마지막으로 유역의 기후변화에 의해 예측될 수 있는 수환경을 이론적으로 고찰하고자 한다.

2. Materials and Methods

2.1 Research site

한강유역은 북위 36°30′~38°5′, 동경 126°24′~129°02′의 한반도 중앙부에 위치하며, 남한 제1의 하천으로서 수지상(Dendritic)과 선형(Fanshape)이 혼합된 복합상(Multiple type)의 하천형상의 유역으로 전 국토면적의 약 23% 차지하며, 유역면적 34,473 km²(임진강유역 8,118 km² 및 북한지역 8,455 km² 포함), 유로연장 481.7 km, 유역 평균폭 55.8 km, 유역형상 계수 0.119를 갖는다. 유역 내 수계는 북한강과 남한강 수계, 한강분류로 나뉘지며, 북한강의 유역면적은 10,834 km², 간척유로 연장은 317.5 km로서, 단발령에서 발원하여 남서류하면서 소양강, 홍천강 등 지천을 합한 후 양수리에서 남한강과 합류되어진다. 남한강은 유역면적이 12,514 km², 간척유로 연장은 375 km로서 강원도 태백시 고목나무 샘에서 발원하여 남서류하다가 충주 부근에서 북서로 전류한 후 북한강과 합류된다(Fig. 1).

Table 1. Reliability evaluation (level of agreement) classification of climate change (ME, 2020)

Agreement	Reliability evaluation
Strong agreement	When there is a certain number of papers in a related field and there is no contradiction between them, or when there is an expert's consent
Intermediate agreement	When the number of papers is constant but it is difficult to judge the evidence based on a minority opinion or when a small number of experts have different opinions
Limited agreement	When the number of papers is very small or it is difficult to judge the reliability of the papers due to differences of opinion among experts or the contents of the papers



Fig. 1. Han-gang river Basin and locations of the monitored watershed sites. Four streams (Namhan-gang, Bukhan-gang, Han-gang, and Anseong-cheon) were obtained within Han-gang river Basin.

2.2 Collection of air and water temperature data

한강유역의 주요 수계인 북한강, 남한강, 한강, 안성천의 수질측정망 433지점을 대상으로 1997부터 2020년까지 24년 동안 측정된 수온자료를 수집하였다(NIER, 2021). 또한 같은 기간 동안 서울·경기지역의 기상 관측된 월평균 기온자료(KMA, 2021b)를 통해, 수계별에 따른 장기간 수온과 기온변화를 확인하고 상승률을 비교하였다.

2.3 Future climate scenario

미래 80년(예측구간, 2021~2100년)까지의 한강유역 수계별 월 평균 기온예측은 수계별 행정구역을 기반으로 기후변화 시나리오(Representative Concentration Pathways; RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5)별로 예측하였다(KMA, 2021a). 한강 유역의 행정구역은 한강 수계는 36개, 남한강 수계는 18개, 북한강 수계는 8개, 안성천 수계는 8개 총 70개 시군구이며, 이를 대상으로 시나리오별 월평균과 연평균 기온을 산출하였다. 여기서, RCP 2.5 시나리오는 지금부터 즉시 온실가스 감축 수행하여 2100년의 CO₂ 농도가 420 ppm이 될 경우를 의미하며, RCP 4.5는 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되어 CO₂ 농도가 540 ppm이 될 경우, RCP 6.0은 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현하여 CO₂ 농도가 670 ppm이 될 경우, RCP 8.5는 현재 추세대로 온실가스를 배출하여 CO₂ 농도가 940 ppm이 될 경우의 시나리오이다. 각 RCP 시나리오는 기상청에서 제공하

는 한반도 상세지역기후변화 예측모델이며, 12.5 km 공간해상도의 한반도 시나리오를 바탕으로 통계적 상세화 기법을 적용하여 1 km 격자로 예측된 시나리오이다. 400년 제어적분 RCP 4종을 이용한 한반도 시나리오 4종(RegCM (Giorgi et al., 2012), SNURCM (Kang et al., 2005), GRIMs (Juang et al., 1997), WRF (Skamarock et al., 2005))을 각각 통계적으로 상세화된 시나리오이다.

3. Results and Discussion

3.1 Overseas research on water quality change by climate change

국외에서의 기후변화와 유역의 수질변화 연구는 국가기후와 유역환경에 적합한 미래 기후예측 시나리오와 수질평가 모형 등의 개발하여 기후변화에 따른 수문-수질의 변화를 평가하고, 미래의 수질을 예측하고 취약성 평가하고 있다.

미국에서는 Minnesota주 36개 하천을 대상으로 관측된 대기의 기온과 수온 간의 선형회귀분석, Canadian Climate Center General Circulation Model (CCC/GCM)을 분석하여 기온상승에 따른 수온 변화를 예측하였다. 그 결과, 미래 CO₂ 농도가 2배 증가한다면, 4~10월의 기온은 4.3°C 상승, 수온은 4.1°C 상승될 것으로 예측하였다(Pilgrim et al., 1998). 영국에서는 Yorkshire 지방에 위치한 Ouse River 유역을 대상으로 6가지

기후변화 시나리오와 Strength, Weakness, Opportunity, Threat (SWAT) 모형을 적용하고, 모델 예측 신뢰도를 높이기 위해 Monte-Carlo 기법을 사용하여 불확실성을 평가하고, 미래 기후변화에 따른 유역변화를 예측하였다. 그 결과, 모든 기후 시나리오에서 증발산이 증가하는 것으로 예측되었고, 유역 내 TN의 오염 부하량은 6%에서 27%까지, TP의 오염 부하량은 5%에서 34%까지 증가될 것으로 예측하였다(Bouraoui et al., 2002). 이후, Morrill et al. (2005)은 미국과 유럽의 주요하천 43개를 대상으로 기온과 수온자료의 선형과 비선형 관계를 분석하고, Special Report on Emission Scenarios 3 (SRES3) 시나리오 분석으로 미래 기후의 변동성을 평가하였다. 그 결과, 기온 1°C 상승은 0.6~0.8°C의 수온을 상승시킬 것으로 예측하였고, 선형관계보다 비선형 모델에 의한 기온-수온 관계성을 설명하기에 적합한 것으로 제안하였다. 또한, 용존산소가 낮은 지역에서는 여름철 기온상승으로 인해 용존산소 농도가 더욱 낮은 범위로 떨어지게 될 것이며, 이로 인해 수생생물의 생존에 위협이 될 것으로 평가하였다. Stefan and Preud'homme (2007)은 미국 중부의 미시시피 강 유역에서 11개 하천의 수온과 기온 사이의 선형적 관계성을 제시하였다. 그 결과, 일(daily) 단위 수온에 대해 $T_w(\text{수온}, ^\circ\text{C}) = 5.0 + 0.75 \times T_a(\text{기온}, ^\circ\text{C})$, 주(weekly) 단위 수온은 $T_w = 2.9 + 0.86 \times T_a$ 의 상관성이 있는 것으로 나타났다. 일과 주 단위에 따라 관계성이 다소 변하며, 수심 및 폭 등 하천 규모에 따라 수온과 기온의 지체 현상이 수 시간에서 수 일 범위에서 발생하는 것으로 예측하였다. Komatsu et al. (2007)은 일본의 Shimajigawa 유역을 대상으로 단일 General Circulation Model (GCM) 모형과 A2 기후변화 시나리오를 적용하여 기후변화에 따른 수생태계 및 수온, 용존산소, 영양물질과 같은 변수에 미치는 장기적 영향을 분석하였다. 과거 10여 년간(1991~2001년)의 관측 자료를 근거로 미래(2091~2100년)의 수온과 수질을 예측한 결과, 2090년대의 평균 표층 수온은 1990년대 대비 3.4°C 상승되며, 열 성층기간을 증가시켜 수온약층이 강화될 것으로 예측하였다. 이로 인해, 호기성 분해가 증가되어 수체 내 산소의 소비량이 증가될 것이다. 또한 저산소 현상에 따라 퇴적물에서의 인 용출이 촉진되어 심층에서의 인의 농도와 양이 증가될 것으로 전망하였다. 혐기 조건의 퇴적물에서 인의 용출은 수직 확산으로 인해 표층으로 이동될 것이며, 이로 인해 식물성 플랑크톤의 성장을 유발될 가능성을 제시하였다. 유럽연합(European Union)에서는 Climate, Hydrochemistry and Economics of Surface-Water System (CHESS)에서는 프로젝트의 일환으로 유럽의 몇몇 유역을 대상으로 기후변화 시나리오를 적용하여 수질영향평가 기법을 제시하였고, SWAT과 QUESTOR 등을 이용하여 미래 기후변화로 인한 수문-수질에 미치는 영향을 예측하였다(Park et al., 2009). Fang and Stefan (2009)은 미국의 기후변화에 민감한 영향을 받을 것으로 예상되는 209개의 호수를 대상으로 27개의 유형으로 분류하고, 1차원의 호수 수질 모델인 one-dimensional year-round lake water quality model (MINLAKE96)을 적용하여 수온, 용존산소, 얼음 및 눈 덮음을 시뮬레이션하였다. 그 결과 이산화탄소가 증가하여 2배가 되는 기후조건에서는 연평균 기온

은 6.7°C 증가, 표면수온은 5.2°C까지 상승될 것으로 예상하였다. 또한 여름의 성층기간은 최대 67일까지 장기화되었지만, 얼음 존재하는 기간은 최대 90일까지 단축되고, 얼음두께는 최대 0.44 m까지 감소될 것으로 예상하였다. Whitehead et al. (2008)은 기후변화 시나리오를 기초로 미래의 강수량, 증발 및 온도 시계열과, 대상 하천인 Tamar, Lugg, Tame, Kennet, Tweed 및 Lambourn의 질산염, 암모니아, 총인, 용해성 인, 퇴적물, 수생식물과 작생식물의 변화를 예측하였다. 이후 Sahoo et al. (2011)은 미국의 캘리포니아주와 네바다주 경계에 위치한 Lake Tahoe을 대상으로 기후변화 시나리오 General Circulation Models (GCMs)을 적용하고, 기후변화에 따른 수체 내 물리적 과정의 영향을 조사하였다. 그 결과, 과거 38년(1970~2007년) 동안 호수의 수온은 년 간 0.013°C의 속도로 상승하였고, 미래 40년(2020~2040년) 수온 상승 또한 유사하게 예측되었다. 예측된 수온상승은 호수의 성층강도를 증가시켜, 수직 혼합주기가 2~3년에서 5년 이상으로 장기화될 것이며, 이로 인해 심층의 저산소 현상이 유발되어 영양염류의 용출이 증가될 것으로 제시하였다. Sahoo and Schladow (2014)은 Klamath Lake 지역 호수의 열역학적 물수지를 Dynamic Lake Model with Water Quality (DLM-WQ) 모델과 난류확산 전달 알고리즘을 통해 제시하였다. 그 결과 열과 물수지는 현열(11%)보다 증발열(35%)의 손실에 더 민감한 것으로 나타났으며, 과잉양의 호소에서 장기간의 성층현상의 발생으로 퇴적물 근처에서 저산소 현상에 유발되어 수생태계 문제를 일으킬 것으로 예측하였다. Xia et al. (2014)은 호수, 하천, 연안 석호 및 하구 등의 수역을 대상으로 기후변화의 영향과 예측 시나리오, 모의 모형을 검토하여 장기적 기후변화에 따른 수질에 미치는 영향을 파악하고, 오염원과 거동, 생화학반응, 오염물질의 생태학적 영향의 직간접적인 영향을 제시하였다. 특히, 기후변화 적용 모델 시뮬레이션, 장기생물지표 모니터링 등으로 기후변화에 따른 수질변화를 예측·평가할 수 있는 기법을 고찰하였다. Kraemer et al. (2015)은 전세계의 26개 호수를 대상으로 장기간(1970~2010년)에 걸쳐 관측된 수온자료를 통해 호수 성층화의 추이와 크기를 확인하였다. 그 결과, 수층이 깊은 호수와 평균 수온이 높은 호수는 성층화의 변화가 가장 클 것으로 예측하였고, 그 원인으로는 물의 밀도와 수온 사이의 비선형 관계와 호수의 형태가 성층현상의 큰 변수인 것일 것으로 제시하였다. Butcher et al. (2015)은 미국의 원형 호수 및 저수지 27개를 대상으로 기후변화의 잠재적 영향을 파악하였다. One-dimensional dynamic-thermal 시뮬레이션 모델인 Lake, Ice, Snow, and Sediment Simulator (LISSS)을 적용하여, 21세기 중반의 시나리오 분석으로 호수의 수온과 물리적 변화를 평가하였다. 그 결과, 표층수온은 기온변화의 77% 만큼 증가하는 것으로 나타났으며, 심층수온은 온도변화가 크지 않은 것으로(약 30% 증가)예측하였다. 이로 인해, 수지 표면의 빙결 기간을 단축하고 수온성층 강도가 증가될 것이며, 여름철 심층 저산소 현상이 심화되고 남조류 과잉 증식의 빈도가 증가될 것으로 전망하였다.

국의 기후변화에 따른 유역 수질연구의 연구사례에서 제시

한 바와 같이 기후변화 시나리오 기반으로 해당유역 및 호소의 특성에 적합한 수질평가모형과 시뮬레이션으로 수질변화를 예측하고 평가하였다. 주로 SWAT과 QUESTOR, CCC/GCM, Monte-Carlo 기법, GCM, One-dimensional year-round lake water quality model (MINLAKE96), LISSS 등을 이용하였고, 수문-수질을 복합적으로 고려한 모델 접목을 하여 적용하였다. 따라서 물 수요 증가와 기후변화의 불확실성의 증가되고 있기 때문에 지속 가능한 물 관리를 위해서는 국내 유역의 지역적/생태학적 특성을 고려한 기후변화 적용 모델 시뮬레이션과, 수문-수질을 고려한 기후변화 영향평가 기법을 적용되어야 할 것으로 판단된다.

3.2 Time trend of air and water temperature

기후변화에 따른 한강유역의 기온과 수온변화를 평가하기 위해, 과거 24년간(1997~2020년)의 연평균 기온(Air temp.)과 수온(Water temp.)의 시계열 분석과 온도 상승률을 비교하였다(Fig 2).

관측 24년 동안의 연평균 기온과 수온의 시계열 변화는 비슷한 경향으로 증감하였고, 기온과 수온은 모두 상승하였으며, 수온은 기온에 비해 평균 2°C(최고 3.8°C) 높은 것으로 관측되었다. 연평균 기온과 수온상승률은 0.027°C year⁻¹와 0.038°C year⁻¹였으며, 수온의 상승속도가 기온의 상승속도보

다 높은 것으로 나타났다. 특히, 과거 10년(2001~2010년)의 기온상승률은 0.016°C year⁻¹이지만, 최근 10년(2011~2020년)의 기온상승률은 0.019°C year⁻¹로 예측되어, 과거에 비해 최근의 기온상승 속도가 증가한 것으로 나타났다. 이와 비슷하게, 수온 또한 과거 10년의 비해 최근 10년의 수온상승률(0.201°C year⁻¹)이 급격하게 높아진 것으로 관측되었다(Fig. 2(A)). 과거 관측 24년 동안 조사 유역의 기온상승에 따른 수온변화량을 확인한 결과, 기온과 수온의 상관관계는(R²) 0.97 이상이며, 통계적 유의성(p)은 0.005 미만으로 직접적인 관계가 있는 것으로 나타났다. 즉, 대기기온 1°C 상승은 수온 0.796°C를 상승시키는 것으로 예측되었다(Fig. 2(B)). 이 결과는 선행연구(Han et al., 2010) 결과에서 제시한 기온 1°C 상승 시 수온이 0.6~0.8°C 상승한다는 사실과 비슷하였다. 따라서 기후변화에 따른 기온상승은 수온상승에 직접적인 영향을 미칠 수 있으며, 이로 인해 수체의 물리적, 화학적, 생물학적 변화에 일으킬 가능성이 매우 높다(Ahn and Han, 2010). 특히, 호소의 경우, 표층의 수온은 심층보다 대기 기온상승에 있어 2배 이상으로 상승될 것으로 예측되었고, 이로 인해 표층 빙결기간이 단축되어 수온 성층강도를 증가시킬 것이다(Butcher et al., 2015). 또한, 수온 상승은 물의 밀도(물의 평균밀도는 4°C일 때 최대)를 감소시키게 되어 부유성 토사 및 부유물의 침강속도를 높이게 되고, 이로 인해 수생태계에 부

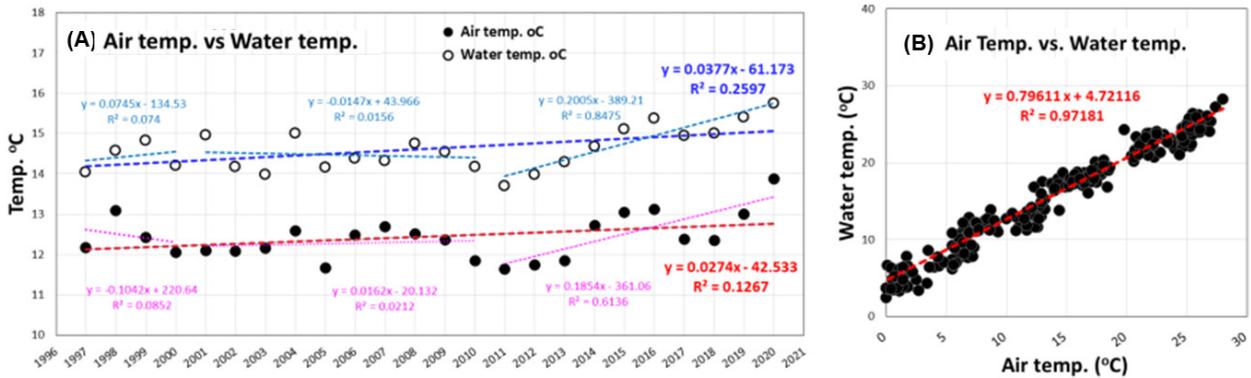


Fig. 2. (A) Change in the annual average air and water temperatures over the period 1997~2020; (B) The relationship between air and water temperatures.

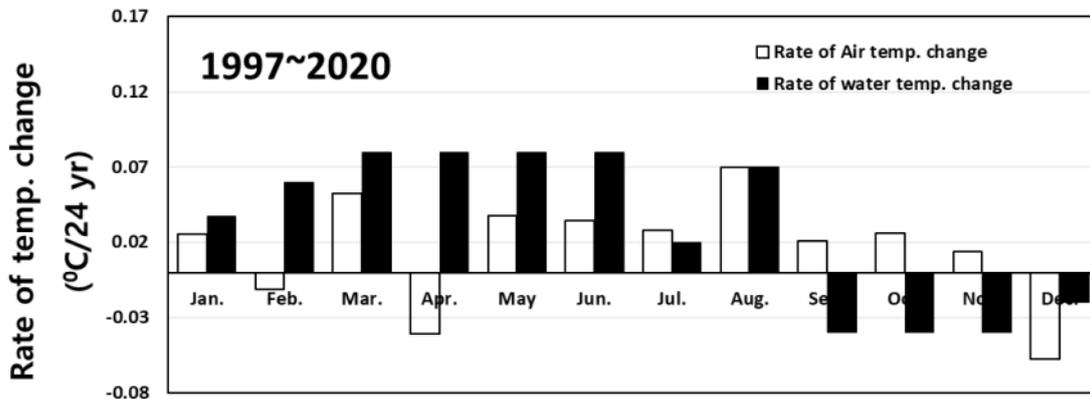


Fig. 3. Change rate of monthly average temperature over the past 24 years (1997 to 2020).

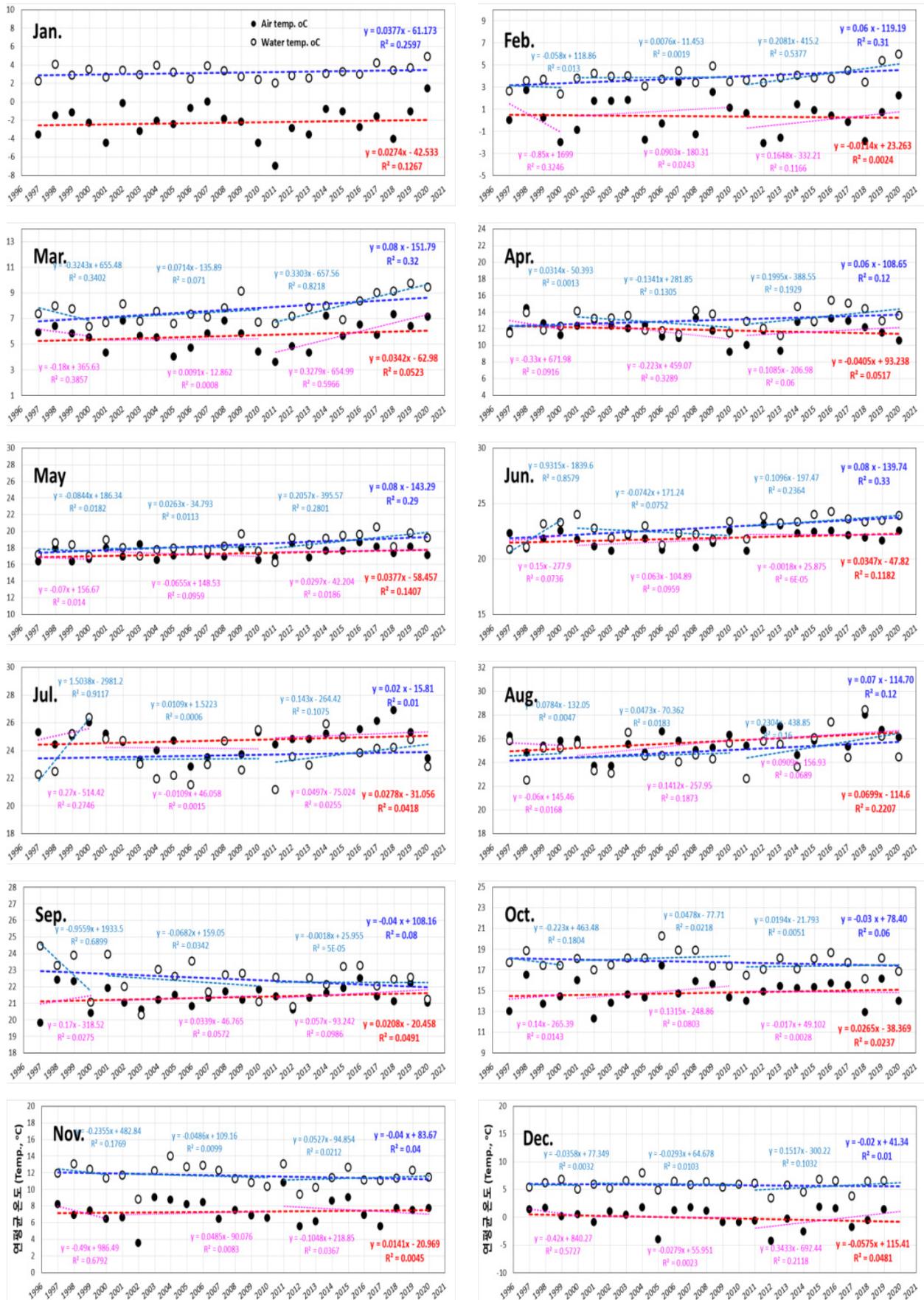


Fig. 4. Trend of monthly average air and water temperatures over the past 24 years (1997 to 2020).

정적 영향을 미칠 가능성이 있다(U. S. EPA, 2001). 마지막으로, 수체내의 화학적 반응에서 또한 수온상승에 따라 촉진하게 되는데, 물속 유기물의 분해속도가 촉진되어, 이산화탄소의 부분압을 증가시켜 탄소 배출량 또한 높아질 것이다(Park and Chung, 2018).

3.3 Change of seasonal water temperature

한강유역을 대상으로 계절별 변화를 파악하기 위해 1997년부터 2020년의 관측기간을 봄(3~4월), 여름(5~8월), 가을(9~10월), 겨울(11~2월)로 구분하여, 월별 연평균 기온과 수온을 비교 분석하였다(Fig. 3). 또한 연평균 기온 및 수온 상승률($^{\circ}\text{C year}^{-1}$)의 월별 추이를 분석하여 24년간의 기온상승률에 미치는 계절을 확인하였다(Fig. 4).

봄(3~4월)의 대기기온과 수온은 상승과 하강을 반복하며 꾸준히 증가되었다. 3월의 수온은 대기의 평균 기온에 비해 약 2.2°C 높았으며, 4월은 1.2°C 높게 관측되어 수온과 기온의 온도차는 감소되었다. 또한, 3월의 경우, 관측기간 동안 가장 높은 수온상승률($0.08^{\circ}\text{C year}^{-1}$)을 나타냈으며, 특히, 3월 기온상승($0.33^{\circ}\text{C year}^{-1}$)과 수온상승($0.33^{\circ}\text{C year}^{-1}$)은 최근 10년(2010~2020년)간 급격하게 증가하여, 다른 월에 비해 가장 높은 온도 상승률로 관측되었다. 4월은 1997년대 이후 수온상승은 기온상승에 비해 상승 속도가 가장 크게 차이나는 것으로 관측되었다(수온 상승률, $0.06^{\circ}\text{C year}^{-1}$, 기온상승률, $-0.04^{\circ}\text{C year}^{-1}$). 이와 같은 봄철 기온 및 수온상승은 저수지, 댐과 같은 정체 수역에서 수생태계의 1차 생산성을 높일 수 있으며, 식물플랑크톤의 성장 속도에 영향을 미칠 것이다. 또한 늦봄과 초여름에 우점하는 녹조류의 출현 시기가 일찍 발현할 것이며, 우점시기도 장기화 될 가능성이 있을 것이다(Yun et al., 2019).

여름(5~8월)의 기간 동안의 기온과 수온은 뚜렷하게 증가되는 추세로 나타났으며 특히, 1997년대 이후 5월과 6월의 수온상승($0.08^{\circ}\text{C year}^{-1}$)은 기온상승($0.04^{\circ}\text{C year}^{-1}$)에 비해 온도상승률이 두드러지게 증가하였다. 또한, 8월 연평균 수온이 2016년에 최고치를 기록한 데 이어, 2010년대에 걸쳐 매해 역대 기록을 경신하였다. 2018년의 8월 수온은 역대 두 번째로 기록되었고, 8월 연평균 수온이 다섯 번째로 가장 높았던 년이 2016년, 2018년, 2019년에 집중적으로 나타나, 기후변화에 의한 여름철의 수온 증가는 뚜렷해지는 것으로 관측되었다. 이는 극한 기온의 고온 현상 빈도가 1990년대 중반 이후, 특히 2010년대 중반 이후로 빠르게 증가한 것과 비슷한 결과이다. 수온과 대기 기온의 온도차는 5월과 6월에 1.7°C 과 0.3°C 으로 기온에 비해 수온이 높은 반면, 7월과 8월의 수온은 기온에 비해 각 0.4°C , 1.4°C 낮아지면서 온도차가 역전되었다. 따라서 여름철 수온의 지속적 상승으로 인해 수온과 체류시간에 민감한 남조류는 출현 빈도와 번성 강도가 뚜렷해질 것으로 사료된다(Elliott, 2010). 호소수의 경우 고온의 여름이 길어지면서 성층화 기간도 또한 장기화 지속되어 수체의 물리적 안정화 시간도 길어지며, 이에 따라 남조류 출현이 지속될 가능성이 커지게 될 것이다. 특히, 남조류인 *Microcystis* sp.는 25°C 이상에서 $10,000 \text{ cells mL}^{-1}$ 을

초과하며, 28°C 이상에서는 현저히 증가하는 수화현상이 나타나는 것으로 알려져 있다(Paerl and Paul, 2012). 따라서, 여름철에 상승된 수온과 긴 체류시간 존재하는 유역에서는 *Microcystis* sp.의 번성이 가속화될 것으로 예상된다(Yu et al., 2014). 뿐만 아니라, *Microcystis* sp.는 사멸 시 맛·냄새 물질 및 독소물질을 유발하기 때문에 정수 처리효율과 먹는 물 수질에 영향을 미칠 것이다(Park, 2007). 마지막으로 여름철의 수온이 높아지게 되면 BOD 농도가 증가될 것으로 보고되었다(Han et al., 2010).

가을(9~10월) 기간의 기온과 수온 변화는 봄과 여름철과 다른 경향으로, 대기 기온은 상승하지만 수온은 감소하는 것(i.e., 음의 추세로 반전)으로 관측되었다(9월 수온 감소율 $-0.04^{\circ}\text{C year}^{-1}$, 10월 수온 감소율 $-0.03^{\circ}\text{C year}^{-1}$). 9월과 10월의 연평균 수온은 대기 기온보다 0.62°C 과 2.77°C 높은 것으로 나타났으며, 여름철 대기의 기온이 수온보다 높은 현상이 다시 역전되어 수온이 대기의 기온보다 높아지기 시작하였다.

겨울(11~2월) 기간의 연평균 수온은 가을철 음의 추세로 반전된 이후로 12월까지 감소되는 경향을 나타냈다. 특히, 수온감소율은 11월과 12월에 가장 두드러지게 관측되었다(11월 기온 감소율 $-0.04^{\circ}\text{C year}^{-1}$, 12월 수온 감소율 $-0.02^{\circ}\text{C year}^{-1}$). 수온과 기온의 연평균 온도차는 타 계절에 비해 큰 것으로 나타났으며, 수온은 대기 기온에 비해 11월 4.21°C , 12월 5.47°C , 1월 5.44°C , 2월 3.81°C 높은 것으로 관측되어, 12월과 1월이 일년 중 가장 큰 온도차를 나타냈다. 가을과 겨울철의 수온이 하강함에 따라 저수온기에 우점하는 규조류인 *Stephanodiscus hantzschii*, *Synedra* 등은 출현 시기가 빨라지고, 개체 수는 증가될 것으로 예측되며, 이로 인해 정수처리 공정의 여과지 폐색으로 정수장 운영 장애를 초래할 것으로 사료된다(Kim et al., 2014; Son et al., 2018).

3.4 Prediction of temperature change in the Han-River Basin by future climate scenario

인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실 가스 농도를 기준으로 예측되는 미래 기후 변화 시나리오 RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5별로 미래 80년(~2100s)의 한강유역(Fig. 5)과 유역내 수계별(한강, 북한강, 남한강, 안성천) 연평균 기온변화 예측하였다(Fig. 6).

지금부터 즉시 온실가스 감축을 수행하였을 경우(RCP 2.6) 미래(2021~2100년) 한강유역의 연평균기온은 최대 0.32°C 증가, 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되었을 경우(RCP 4.5)는 최대 1.18°C 증가, 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현(RCP 6.0)되었을 경우 최대 2.14°C 증가, 현재 추세대로 온실가스가 배출(RCP 8.5)될 경우, 3.51°C 증가되는 것으로 예측되었다(Table 2). 따라서 한강유역에서의 기온상승은 온실가스 감축수행 여부에 따라 3°C 이상의 온도차이가 있는 것으로 나타났다(Fig. 5). 기온 상승률은 RCP 2.6 시나리오에서 $0.0042 \sim 0.0044^{\circ}\text{C year}^{-1}$, RCP 4.5 시나리오에서 $0.0249 \sim 0.0271^{\circ}\text{C year}^{-1}$, RCP 6.0 시나리오에서 $0.0388 \sim 0.0410^{\circ}\text{C year}^{-1}$, RCP 8.5 시나리오에서 $0.0575 \sim 0.0597^{\circ}\text{C year}^{-1}$ 의 속도로 상승될 것으로 예측하였다. 또한 예측기간(2021~2100

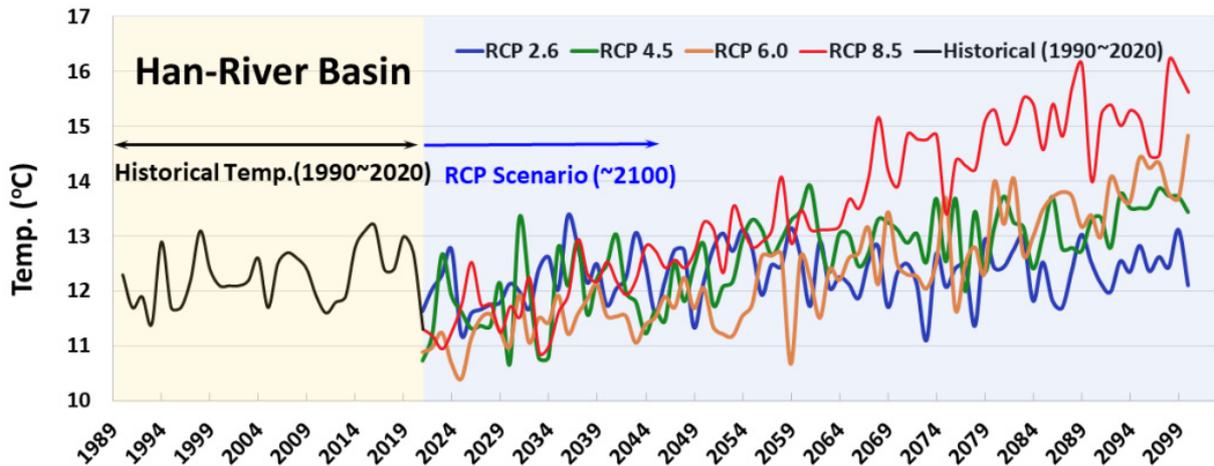


Fig. 5. Time series of air temperature under each of the extended RCP scenarios for RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, and RCP 8.5. Historical air temperature (black) covers the period 1997-2020, and the RCPs and extended RCPs are continued from 2021 and 2100. Time series of the annual global mean surface air temperature for RCP 2.6 (blue), RCP 4.5 (green), RCP 6.0 (orange), and RCP 8.5 (red).

Table 2. Predicted air temperatures for the period of 2021 ~2100, for four scenarios driven by CO₂ alone

Scenarios	Description	CO ₂ conc. (2100)	yearly air temp. (2100s)
RCP2.6	Instantaneous greenhouse gas reduction	420 ppm	+ 0.32°C
RCP4.5	Substantial achievement of greenhouse gas reduction policy	540 ppm	+ 1.18°C
RCP6.0	Fair achievement of greenhouse gas reduction policy	670 ppm	+ 2.14°C
RCP8.5	Greenhouse gas emission as current trend	940 ppm	+ 3.51°C

년) 동안 수계별의 예측 기온은 모든 시나리오에서 한강 수계, 안성천 수계, 남한강 수계, 북한강 수계 순으로 기온이 낮을 것으로 예상되었다(Fig. 6). 하지만, 각 수계별 기온상승률을 비교하면, 북한강수계의 기온상승률은 최소(RCP 2.6) 0.0044°C year⁻¹, 최대(RCP 8.5) 0.0597°C year⁻¹로 해당 수계에서 가장 상승속도가 높게 나타났다. 반면에, 안성천수계의 기온상승률은 최소(RCP 2.6) 0.0042°C year⁻¹, 최대(RCP 8.5) 0.0575°C year⁻¹로 가장 낮게 상승하는 것으로 예측되었다. 그러므로 기후변화에 따른 기온상승에 민감한 수계는 북한강 수계인 것이므로 이에 대한 유역관리가 필요할 것으로 사료된다.

3.5 Future water quality in the Han River Basin

기후변화 시나리오 예측결과, 한강유역의 미래(2020~2100년) 기온은 상승될 것으로 나타났다. 이와 같은 대기 기온의 상승은 수온상승에 직접적인 영향을 미칠 것이다. 더불어 수온상승으로 인한 수질은 민감하게 반응하게 될 것이며, 용존산소(Dissolved oxygen)의 경우 가장 큰 영향을 받게 될 것이다. 공기 중 산소의 용해도는 온도와 음의 상관관계를 갖기 때문에, 수온이 증가할수록 용존산소 농도는 감소된다. 따라서 여름철의 고온현상에 따른 높은 수온에서는 용존산소농도가 점점 감소하게 될 것이며, 겨울철 저온 현상으로 인한 낮은 수온에서 높은 산소용해도로 용존산소농도가 높아질 것이다. 수체 내의 용존산소의 감소는 호기성 환경에서 호흡하는

생물에게 치명적인 영향을 줄 것이며, 하천 및 호소 바닥을 혐기성 상태로 만들어 퇴적물에 존재하는 금속염과 오염물질을 쉽게 용출시키게 된다. 호소 및 정체수역에서는 여름철 고온현상에 따라 성층 현상이 강화되어, 물의 수직 이동이 제한적이게 되어, 즉 수직 혼합주기가 길어져 심층 내 빈 산소(Hypoxia) 현상으로 영양염류 용출이 증가 될 가능성이 있다(Boyce et al., 2010; Sahoo et al., 2011). 영양염류(TN, TP)농도 또한 수온변화에 민감한 것으로 보고되고 있다. Bouraoui et al. (2002)과 Bouraoui et al. (2004)은 기후변화 시나리오에 SWAT 모형을 적용하여 기후변화에 따른 유역 내 TN와 TP의 오염 부하량을 예측한 결과, 기후변화에 의하여 TN은 6%에서 27%까지, TP는 5%에서 34%까지 증가할 것이며, 겨울철 유출량이 여름철에 비해 증가할 것으로 예측하였다.

기후변화에 따른 한강유역의 관측된 월별(계절별) 기온변화(1~8월: 수온상승, 9~12월: 수온하강)는 수생태계에 증식, 서식, 대사활동에 영향을 미치게 된다. 봄과 여름철 수온의 지속적인 상승은 고수온기에 증식하는 *Anabaena* sp., *Microcystis* sp. 등의 남조류 번성 시기가 빨라질 것이며, 대량 증식과 우점기간에 길어질 것이다(Yun et al., 2019). 특히 남조류의 일부 종은 Geosmin과 2-MIB(2-methyl isoborneol) 등의 맛·냄새 물질과 Microcystins 등의 독소물질을 발생시켜 수질의 안정성과 정수처리공정장에 등을 발생시킬 것이다(Chapra et al., 2017; Elliott, 2010). 호소의 경우에는 표층수온의 상승으로 성층화 기간이 연장되어 수체가 안정되면서

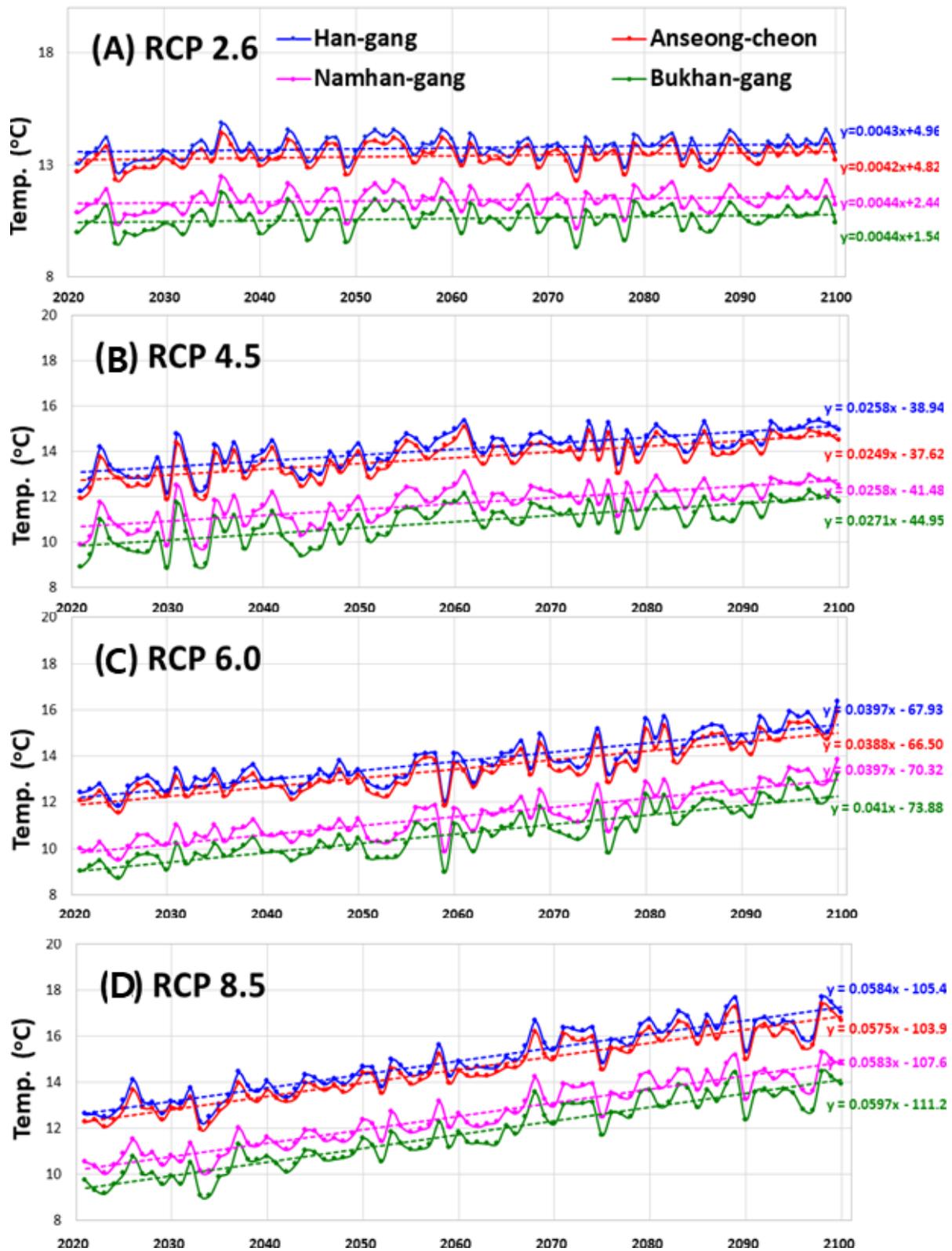


Fig. 6. Predicted air temperature under each of the extended RCP scenarios for (A) RCP 2.6, (B) RCP 4.5, (C) RCP 6.0, and (D) RCP 8.5 of the four streams (Han-gang (blue), Anseong-Cheon (red), Namhan-gang (pink), and Bukhan-gang (green)) obtained within the Han-river Basin.

남조류 증식과 우점 기간 또한 장기화될 것이다(Paerl and Paul, 2012). 뿐만 아니라, 겨울철 기온 하강에 따른 저수온기는 규조류(*Synedra* sp. 등)가 대량 증식하게 될 것이며, 이로 인해, 정수 공정에서 응집과 침전성이 저감되고, 공정 여과지를 단시간 내에 폐색시켜 공정장애를 줄 것이다(Kim et al., 2014). 박테리아의 대사활동, 미생물 및 기생충 번식 또한 조류 증식과 비슷하게 수온 상승에 따라 증가되어, 어류의 면역 체계를 약화시키고, 어병의 발생률을 높여 집단폐사 가능성이 커질 것이다(Klapper, 1991; Yun, 2016). 개체수가 적어 보호종으로 분류되어지는 어종도 대부분 수온에 민감하기 때문에 계절별 수온변화(겨울철 수온하강, 여름철 수온상승)에 따라 열 스트레스의 증가로 인해 개체의 종감소가 될 것으로 사료된다. 마지막으로 수온상승은 수생식물, 어류 등 수생태계의 물질대사와 호흡률을 가속화시켜 영양섭취와 배출, 동화작용이 증가되어 급격한 성장으로 인하여 빠른 사망을 일으키기도 한다(Lee et al., 2019; Theurer et al., 1984).

4. Conclusion

앞서 서술한 바와 같이, 한강유역은 과거 10년에 비해 최근 10년의 기온상승률이 높게 관측되어 기후변화가 점차 가속화되고 있는 것으로 나타났다. 또한 한강유역의 미래 기후변화 시나리오에 따른 미래 기온(2100년)상승을 예측한 결과, 현재 추세대로 온실가스가 배출될 경우, 최대 3.51°C 까지 증가될 것으로 예측되었다. 한강유역의 수계 중 북한강 수계는 가장 높게 기온이 상승할 것으로 예측되었으며, 안성천 수계는 가장 낮게 상승될 것으로 예측되었다. 한강유역의 여름철 고온 현상에 따라 수온은 상승되었고 이로 인해 수계의 용존산소 농도는 점점 감소하게 될 것이다. 하지만 겨울철 저온 현상에 따라 산소용해도가 증가되어 용존산소농도가 높아지게 될 것이다. 또한 여름철 기온 상승에 따른 고수온현상에 의해 봄과 여름철에 증식하는 남조류 번성 시기가 빨라질 것이며, 대량 증식과 우점기간에 길어질 것이다. 겨울철 기온 하강에 따른 저수온기는 규조류의 대량 증식을 유발시키고, 이로 인해, 정수 공정에서 응집과 침전성이 저감되고, 공정 여과지를 단시간 내에 폐색시켜 공정장애를 줄 것이다. 마지막으로 수온상승은 수생식물, 어류 등 수생태계의 물질대사와 호흡률을 가속화시켜 영양섭취와 배출, 동화작용이 증가되어 급격한 성장으로 인하여 빠른 사망을 일으키게 될 것이다. 이와 같은 기후변화에 따른 수질변화에 대응하기 위해서는 과거 관측 자료와 미래 기후변화 전망자료를 기초로 유역단위별 기후변화의 영향을 고찰하고 수질 취약성 및 불확실성을 평가하여, 기후변화 대응 유역관리 전략과 정책방향 제시가 필요할 것이다.

References

Ahn, J. H. and Han, D. H. (2010). Projected climate change impact on surface water temperature in Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 26(1), 133-139. [Korean Literature]

Bourroui, F., Galbiati, L., and Bidoglio, G. (2002). Climate change impacts on nutrient loads in the 22 Yorkshire Ouse catchment (UK), *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(2), 197-209.

Bourroui, F., Grizzetti, B., Granlund, K., Rekolainen, S., and Bidoglio, G. (2004). Impact of climate change on the water cycle and nutrient losses in a finnish catchment, *Climatic Change*, 66, 109-126.

Boyce, D. G., Lewis, M. R., and Worm, B. (2010). Global phytoplankton decline over the past century, *Nature*, 466(29), 591-596.

Butcher, J. B., Nover, D., Johnson, T. E., and lark, C. M. (2015). Sensitivity of lake thermal and mixing dynamics to climate change, *Climatic Change*, 129, 295-305.

Carter, T., Hulme, M., and Lal, M. (1999). *IPCC-TGCIAGuidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment*, version 1. IPCC, task group on scenarios for impact assessment.

Chapra, S. C., Boehlert, B., Fant, C., Jr. Bierman, V. J., Henderson, J., Mills, D., Mas, D. M. L., Rennels, L., Jantarasami, L., Martinich, J., Strzepek, K. M., and Paerl, H. W. (2017). Climate change impacts on harmful algal blooms in U.S. fresh waters: a screening-level assessment, *Environmental Science and Technology*, 51(16), 8933-8943.

Elliott, J. A. (2010). The seasonal sensitivity of cyanobacteria and other phytoplankton to changes in flushing rate and water temperature, *Global Change Biology*, 16(2), 864-876.

Fang, X. and Stefan, H. G. (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(2), 2359-2370.

Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M. B., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G. T., Nair, V., Giuliani, G., Turuncoglu, U. U., Cozzini, S., Güttler, I., O'Brien, T. A., Tawfik, A. B., Shalaby, A., Zakey, A. S., Steiner, A. L., Stordal, F., Sloan, L. C., and Brankovic, C. (2012). RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains, *Climate Research*, 52, 7-29.

Han, K. Y., Kim, D. I., Hwangbo, H., and Jung, J. H. (2010). The effect of climate change on water quality, *Korea Water Resources Association Conference*, 938-942. [Korean Literature]

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). *Climate Change, 2001*, Intergovernmental Panel on Climate Change.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate Change, 2007*, Intergovernmental Panel on Climate Change.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Climate Change, 2013*, Intergovernmental Panel on Climate Change.

Juang, H. M. H., Hong, S. Y., and Kanamitsu, M. (1997). The NCEP regional spectral model: An update, *Bulletin of the*

- American Meteorological Society*, 78, 2125-2143.
- Jung, I. W., Bae, D. H., and Kim, G. (2011). Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea, *International Journal of Climatology*, 31(3), 359-370.
- Jung, J. H., Kim, D. I., Choi, H. G., and Han, K. Y. (2011). The effect of climate change on water quality analysis in a dam river basin, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 20(2), 107-121. [Korean Literature]
- Kang, H. S., Cha, D. H., and Lee, D. K. (2005). Evaluation of the mesoscale model/land surface model (MM5=LSM) coupled model for East Asian summer monsoon simulations, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D10105), 1-18.
- Kim, M. C., Kim, J. H., and Seo, G. T. (2014). Removal improvement in water treatment plant for occurrence of diatoms (*Synedra* sp.) in the Nakdong river, *Journal of Korean Society and Environmental Engineering*, 36(1), 29-34. [Korean Literature]
- Klapper, H. (1991). *Control of eutrophication in Inland waters*, Ellis Horwood Ltd., West Sussex, UK.
- Komatsu, E., Fukushima, T., and Harasawa, H. (2007). A modeling approach to forecast the effect of long-term climate change on lake water quality, *Ecological Modelling*, 209(4), 351-366.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2021a). *Climate Information Portal*, <http://www.climate.go.kr> (accessed Jun. 2021). [Korean Literature]
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2021b). *Open MET Data Portal*, <https://data.kma.go.kr> (accessed Jun. 2021). [Korean Literature]
- Kraemer, B. M., Aneville, O., Chandra, S., Dix, S., Kuusisto, E., Livingstone, D. M., Rimmer, A., Schadow, S. G., Silow, E., Sitoki, L. M., Tamatamah, R., Vadeboncoeur, Y., and McIntyre, P. (2015). Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change, *Geophysical Research Letters*, 42, 4981-4988.
- Lee, D. Y., Jun, B. H., and Noh, S. G. (2019). Development of rating curve using water temperature at vegetation shifted station, *Journal of Korea Water Resources Association*, 77-81. [Korean Literature]
- Ministry of Economy and Finance (MOEF). (2020). *Korea's green new deal*, Ministry of Economy and Finance. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2020). *Korean climate change assessment report*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Morrill, J. C., Bales, R. C., and Conklin, M. H. (2005). Estimating stream temperature from air temperature: implications for future water quality, *Journal of Environmental Engineering*, 131, 139-146.
- Murdoch, P. S., Baron, J. S., and Miller, T. L. (2000). Potential effects of climate change on surface-water quality in North America, *Journal of the American Water Resources Association*, 36, 347-366.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2021). *Water Environment Information System*, <http://water.nier.go.kr> (accessed Jun. 2021). [Korean Literature]
- Paerl, H. W. and Paul, V. J. (2012). Climate change: links to global expansion of harmful *Cyanobacteria*, *Water Research*, 46(5), 1349-1363.
- Park, H. K. (2007). Survey method relating freshwater phytoplankton for the management of water resources, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 29(6), 593-609. [Korean Literature]
- Park, H. S. and Chung, S. W. (2018). pCO₂ dynamics of stratified reservoir in temperate zone and CO₂ pulse emissions during turnover events, *Water*, 10(10), 1347.
- Park, J. Y., Park, M. J., Ahn, S. R., and Kim, S. J. (2009). Watershed modeling for assessing climate change impact on stream water quality of Chungju dam watershed, *Journal of Korea Water Resources Association*, 42(10), 877-889. [Korean Literature]
- Pilgrim, J. M., Fang, X., and Stefan, H. G. (1998). Stream temperature correlations with air temperatures in Minnesota: implications for climate warming, *Journal of the American Water Resources Association*, 34, 1109-1121.
- Sahoo, G. and Schladow, S. (2014). Estimation of heat and hydrologic budget of upper Klamath Lake Oregon, USA using updated DLM-WQ model, *European Water Resources Association (EWRA)*, 28(5), 1395-1414.
- Sahoo, G. B., Schladow, S. G., Reuter, J. E., and Coats, R. (2011). Effects of climate change on thermal properties of lakes and reservoirs, and possible implications, *Environmental Research and Risk Assessment*, 25, 445-456.
- Shin, C. M., Na, E. H., Kim, D. G., and Kim, K. (2014). Operational water temperature forecast for the Nakdong River Basin using HSPF watershed model, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(6), 673-682. [Korean Literature]
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., and Powers, J. G. (2005). *A description of the advanced research WRF version 2. (No. NCAR/TN-468+STR)*, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO., 100.
- Son, M., Chung, H. S., Park, C. H., Park, J. H., Lim, C., and Kim, K. (2018). The change of phytoplankton community structure and water quality in the Juksan weir of the Yeongsan river watershed, *Korean Journal of Environmental Biology*, 36(4), 591-600. [Korean Literature]
- Stefan, H. G. and Preud'homme, E. B. (2007). Stream temperature estimation from air temperature, *Journal of the American Water Resources Association*, 29(1), 27-45.
- Stefan, H. G. and Sinokrot, B. A. (1993). Projected global climate change impact on water temperatures in five north central US streams, *Climatic Change*, 24, 353-381.
- Stockle, C. O., Dyke, P. T., Williams, J. R., Jones, C. A., and Rosenberg, N. J. (1992). A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops: Part II-sensitivity analysis at three sites in the Midwestern USA, *Agricultural Systems*,

- 38, 239-256.
- Theurer, F. D., Voos, K. A., and Miller, W. J. (1984). *Instream water temperature model. In stream flow information paper 16*, Fish and Wildlife Service. FWS/OBS-85/15.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). (2001). *Temperature interaction*, EPA/600/3-89/037.
- Whitehead, P. G., Wade, A. J., and Butterfield, D. (2008). *Potential impacts of climate change on water quality in six UK rivers*, BHS 10th National Hydrology Symposium, Exeter.
- Xia, X. H., Wu, Q., Mou, X. L., and Lai, Y. J. (2014). Potential impacts of climate change on the water quality of different water bodies, *Journal of Environmental Informatics*, 25(2), 85-98.
- Yi, H. S., Kim, D. S., Hwang, M. H., and An, K. G. (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]
- Yu, J. J., Lee, H. J., Lee, K. L., Lyu, H. S., Whang, J. W., Shin, L. Y., and Chen, S. U. (2014). Relationship between distribution of the dominant phytoplankton species and water temperature in the Nakdong river, Korea, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 47(4), 247-257. [Korean Literature]
- Yun, J. J. (2016). *A study on climate change adaptation in the coastal area of Chungcheongnam-do*, ChungNam Institute. [Korean Literature]
- Yun, Y., Park, H., and Chung, S. (2019). Projection of water temperature and stratification strength with climate change in Soyanggang reservoir in South Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 35(3), 234-247. [Korean Literature]