

Research Paper

## 기온 변화에 따른 팔당호 수온 영향 및 이력현상

유순주 · 임종권 · 이보미

국립환경과학원 한강물환경연구소

### Effect of Air Temperature Changes on Water Temperature and Hysteresis Phenomenon in Lake Paldang

Soonju Yu · Jongkwon Im · Bomi Lee

Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

**요약:** 국내 최대 상수원인 팔당호를 대상으로 기온과 수온의 변화를 살펴보고 장기간 기온과 수온의 연속 자료를 활용하여 이력 현상을 살펴보았다. 계절 Mann-Kendall을 적용한 팔당호 인근 양평의 기온 변화 추세는 지난 47년간(1973~2019) 증가(0.048 °C/yr)에 비하여 최근 27년간(1993~2019) 기온의 증가(0.060 °C/yr)가 컸다. 팔당호와 유입 하천에서 수온은 기온과의 상관성이 높으나( $R > 0.9$ ,  $p < 0.005$ ) 호소인 팔당댐 앞 지점에서의 수온은 하천 수온 상승에 비하여 느리고 기온 하강기에 들어서 수온이 서서히 감소하였고 수심 평균 수온도 상승기와 하강기 모두 호소 표층보다 변화가 더디게 나타났다. 이는 호소가 하천보다 수체 규모 면에서 크고 체류시간이 길기 때문에 열에너지를 흡수하고 감소하는데 시간이 걸리는 수온의 이력 현상이 크게 작용하는 것으로 판단된다.

**주요어:** 기후변화, 팔당호, 계절 맨-켄달, 맨-켄달, 수온이력

**Abstract:** Long-term continuous data were used to investigate changes in air and water temperature and temperature hysteresis at Lake Paldang, the largest source of drinking water in South Korea. Based on the temperatures at Yangpyeong, near Lake Paldang, using a seasonal Mann-Kendall test, the rate of change of increase in temperature over the last 27 years (0.060°C/yr, 1993-2019) was higher than that of during 47 years (0.048°C/yr, 1973-2019). The air and water temperatures in Lake Paldang and its influent rivers had a high correlation ( $R > 0.9$ ,  $p < 0.005$ ); however, the water temperature increased at rate slower than the river water temperature, and the water temperature decreased slowly as the air temperature fell. The depth-averaged water temperature also changed more slowly than the surface water of the lake both when the air temperature was high and when it was low. This is likely because the lake has a larger area and a longer heat retention time than rivers, resulting in a greater hysteresis of water temperature at lake.

**Keywords:** climate change, Paldang Lake, seasonal Mann-Kendall, Mann-Kendall, water temperature hysteresis

First Author & Corresponding Author: Soonju Yu, Tel: +82-31-770-7201, E-mail: ysu1221@korea.kr, ORCID: 0000-0001-9265-1123

Co-Authors: Jongkwon Im, Tel: +82-31-770-7240, E-mail: limjkk80@korea.kr, ORCID: 0000-0003-3994-5127

Bomi Lee, Tel: +82-31-770-7254, E-mail: leebm87@korea.kr, ORCID: 0000-0002-1134-6889

Received: 17 July, 2020. Revised: 17 September, 2020. Accepted: 21 September, 2020.

## I. 서론

산업화 이후 온난화는 전 지구적으로 진행되고 있으며 지구 표면은 1850년 이후 최근까지 지속적으로 더워지고 있다. 전 지구적 관점에서 육지와 해양을 포함한 지구 표면의 평균 온도는 1880년에서 2012년 사이에 0.85 °C 증가하였다. 1880년에서 1900년의 기간과 2003년에서 2012년의 기간 동안 온도 편차(Temperature anomaly)의 총 증가 폭은 0.78 °C로 평가되어, 최근 온도의 증가가 가속되고 있다(IPCC, 2013). 우리나라도 1973년 이후 2016년의 기온이 가장 높았고, 2015년이 세 번째, 2017년은 일곱 번째로 기록되어, 최근 온난화가 더욱 심해지고 있다(NIMS, 2018). 1912년부터 관측된 6개 지점(서울, 인천, 강릉, 대구, 목포, 부산)의 106년간(1912~2017년) 연평균 기온은 0.18°C/10년으로 상승하였고 과거 30년(1912~1941년)에 비하여 최근 30년(1988~2017년)의 연평균 기온이 1.4°C 더 높게 상승하여 점차 기온 상승률이 증가하고 있다(NIMS, 2018).

기온 변화는 수온에 직접적인 영향을 미치며 수온 변화는 국지 기상 변화뿐 아니라 하천 생태계 및 수질에 영향을 미친다(Stefan & Sinokrot 1993; Stockle et al. 1992). 수온이 변화하면 변화된 환경에 적응하기 위해 수생식물의 종류가 바뀌거나 어종이 변화되기도 하며 수 중에서 생화학적 반응을 지배하는 수질 반응에도 영향을 준다(Carter et al. 1999; IPCC 2001). 수온은 수생태계에 중요한 영향 인자일 뿐 아니라, 수체에서 일어나는 물질 반응 속도, 용존산소 농도, 그리고 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤의 계절적 발생 특성에 직·간접적으로 영향을 준다(Shin et al. 2014). 수온의 증가는 주로 여름철에 발생하는 성층 현상을 더욱 가중시키고(Boyce et al. 2010; Moran et al. 2011), 물의 수직 이동을 제한하여 심수층의 용존산소를 감소시키거나 남조류 성장에 유리한 조건을 만들 수 있다(Pearl & Paul 2012). Cha et al.(2013)은 미래로 갈수록 대청호의 경우 수온 성층 시기가 빨라지며 장기화하고 여름철 성층 강도가 강화되는 것으로 보고하였다.

수온은 복사열, 복사열의 장애물에 의한 차단 정도,

유역에서 유출되는 하천수 및 지하수의 온도, 수면에서의 열 교환 등 여러 가지 요인에 따라 영향을 받기도 하며 계절적으로는 여름철이 겨울철보다 증발로 인한 잠열 손실이 크며, 우기 이후의 지하수 유입이나 봄철의 용설 유입으로 다른 형태의 기온-수온 관계를 형성할 수 있다(Stefan & Preud' home 1993; Stephan & Sinokrot 1993). 물이 공기에 비해 비열이 크다는 물리적 특성으로 태양의 복사열을 흡수하여 기온이 올라가도 물의 온도는 서서히 올라가며 반대로 기온이 떨어져도 수온은 서서히 내려가는 지체 현상을 보인다. 지체 현상은 수체의 규모에 따라 다르게 나타나는데 호소와 같이 수심이 깊고 체류 시간이 길면 수온의 지체 현상이 더 커지며 기온과 수온과의 관계도 수온 상승 시기와 수온 하강 시기에 따라 달라진다(An & Lee 2013). 따라서 기온과 수온의 관계 해석 시 온도 상승기(rising limb: 이른 봄에서 여름철로 이동하는 온도 증가 시기)와 온도 하강기(falling limb: 늦여름에서 겨울철로 이동하는 온도 감소 시기)에 따른 계절적 이력 현상(Hysteresis)을 고려하여야 한다.

수온 관련 선행 연구는 호소의 경우 수온 분포 및 성층화를 설명하기 위한 모델 적용 연구(Kim et al. 2001; Na et al. 2002; Chung et al. 2015)와 기후 변화에 따른 장기적인 수온과 성층화 영향을 예측하는 연구(Cha et al. 2013, Yun et al. 2020) 등 많은 연구가 있으나 수체 내 수온이 중심이었다. 하지만 Han(2010)은 1989년부터 2009년까지 전국 하천과 호소에서의 기온과 수온 관계는 호소가 하천에 비하여 민감하지 않은 것으로 분석하였고 An et al.(2013)은 하천에서 기온 상승기와 하강기에 따라 수온의 이력 현상을 구분하여 관측지점에 따라 그 강도가 다를 수 있으며 기온의 영향을 받으나 하천과 관계가 다를 수 있으며 기온의 상승과 하강에 따른 호소 수온의 영향을 살펴보는 것이 호소 수온 분포와 성층을 이해하는데 필요하다.

팔당호는 대한민국 인구의 절반을 차지하는 2,600만명의 단일 상수원으로 한국 최대 규모이므로 수질 보전과 수생태계 건강성 확보가 매우 중요한 호소이다.

팔당호 유역도 기후 변화에 따라 기온이 상승하고 있는데 인근 양평기상관측소 자료를 기준으로 평년(1981~2010년) 평균 기온이 11.5℃였으나 2000년에서 2015년까지 평균 기온은 11.9℃로 0.4℃ 증가하였다(HRERC 2018). 더욱이 2018년에는 최고 기온이 40℃를 보이면서 팔당호 수온도 최고 30℃를 기록하기도 하였으며 최근 2010년대 들어서 연평균 기온, 일 최고 기온 등이 높은 경향을 보이고 있다(Yu et al. 2018). 따라서 수온은 수질과 수생태계의 기본적인 영향 요소이므로 기온 변화와 그에 따른 수온의 변화를 지속적으로 평가할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 국내 최대 상수원인 팔당호를 대상으로 계절 맨-켄달(Seasonal Mann-Kendall) 방법을 적용하여 장기간의 기온 및 수온 변화와 함께 기온 상승과 하강에 따른 수온과의 관계성을 규명하고자 하였다.

## II. 연구내용 및 방법

### 1. 맨-켄달과 계절 맨-켄달 분석

기온 자료는 팔당호에 가장 인접한 양평기상관측소의 1973년부터 2019년까지 일 평균 기온을 이용하였다(KMA, 2020). 기온의 장기 변동 추세를 월 평균 기온으로 계절 맨-켄달 방법을 적용하였다. 팔당호 수온의 변동 추세를 물환경정보시스템(MOE 2020)에서 제공하는 1993년부터 2019년까지 팔당댐앞 지점의 월 평균값을 이용하여 계절 맨-켄달 방법으로 통계 분석하였다. 2004년부터 관측되기 시작한 수심별 수온은 동절기 결빙으로 인한 결측이 많아 증가율을 산정하지 않았다. 계절 맨-켄달 방법은 관측치들 사이의 상대적인 크기를 계산하는 비모수 통계방법(Non-parametric statistical method)으로 각 계절에 대해 켄달 검정을 독립적으로 시행한 후 각 결과들

의 가중합을 구하여 켄달 통계 추정치 S를 도출하여 계절성을 배제하는 방법이다(Hirsch et al. 1982; Lettenmaier et al. 1991; Chang 2010). 신뢰도 95%를 기준으로 p value가 0.05 미만이면 통계적 경향성이 있는 것을 의미하며, 켄달의 통계치(S)가 양의 값이면 증가, 음의 값이면 감소 추세를 나타낸다. 계절에 따른 기온 및 수온 변화는 봄(3월~5월), 여름(6월~8월), 가을(9월~11월), 겨울(12월~다음해 2월)의 각 계절 기온과 계절 수온 평균값을 구하여 맨-켄달 방법을 적용하여 시계열 분석을 하였다. 계절 맨-켄달법 및 맨-켄달 방법에 따른 경향성을 파악하기 위해 월 평균값과 계절 평균값으로 계절 Sen's slope 및 Sen's slope(Sen 1968; Hirsch et al. 1982; Yu et al. 1993; Choi et al. 2008)를 산정하였다.

### 2. 연속 기온과 수온 측정 및 관계 분석

팔당호 유입 하천과 호소에서 연속 측정 자료를 토대로 기온과 수온의 관계를 살펴보기 위하여 하천은 연속적으로 수온을 측정하는 남한강(양평 측정소), 북한강(가평 측정소), 경안천(경안천 측정소)에 설치된 수질자동측정소 자료를 각각 이용하였다(MOE, 2020). 측정소별 수온 측정 위치는 Figure 1과 같다. 최근 설치된 양평 측정소를 기준으로 2015년부터 2019년까지 5분 단위 측정자료를 일 평균 수온으로 환산하여 사용하였으며 자료의 전처리에는 공개하기 전에 이상치에 대한 선별과 확정을 검토하였기 때문에 별도로 하지 않았다. 호소 내 연속 수온은 팔당댐앞에서 실시간 측정 장비를 설치하여 2016년 5월 13일부터 6월 16일, 2018년 4월 5일부터 7월 3일, 2019년 4월부터 12월까지 측정하였다(Figure 2). 수온계(HOBO Water Temp Pro onset, MA, USA)는 수심 1 m 간격에서 10 분마다 수온을 측정하였고, 일 평균 수온은 표층 수온과 수심 평균 수온으로 구분하여 산

Table 1. Real time water quality monitoring stations located in the main streams of Lake Paldang

Station (abbr.)	Location	Starting date
Yanpyeong (YP)	1520, Gyeonggang-ro, Okcheon-myeon, Yangpyeong-gun Gyeonggi-do	2014.12
Gapyeong (GP)	1539, Bukhangang-ro, Cheongpyeong-myeon, Gapyeong-gun Gyeonggi-do	2010.04
Gyeongancheon (GA)	969, Sansu-ro, Toechon-myeon, Gwangju-si Gyeonggi-do	2005.11

정하였다.

팔당호 유입 하천과 호소에서 연속 기온 및 수온 자료를 토대로 2015~2019년 10일 간격으로 매년 기온이 하강하는 시기를 비교하였다. 기온이 하강하는 시

기를 기준으로 상승기와 하강기로 구분하여 Pearson 상관분석을 실시한 후 회귀분석을 통하여 관계를 살펴보았다. 본 연구에서 통계 분석은 R 프로그램(ver. 3. 6. 1)을 이용하였다.

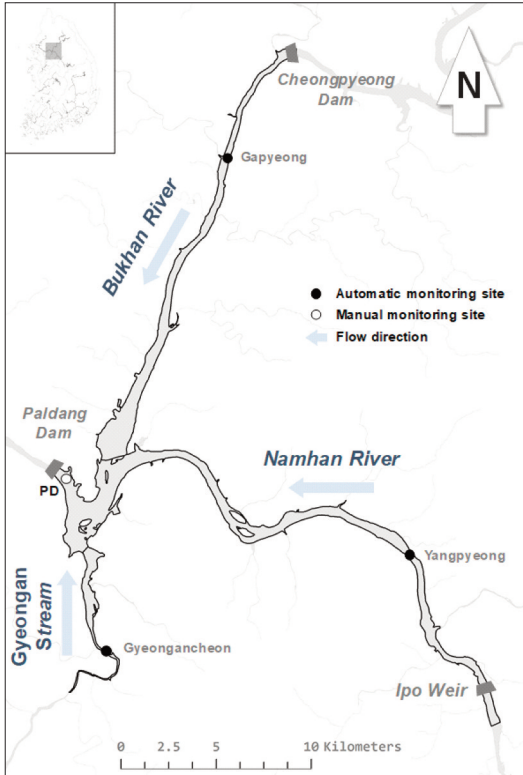


Figure 1. Location of real time water quality monitoring stations and major influent streams to Lake Paldang.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 팔당호 기온 및 수온 변화 경향성 분석

##### 1) 장기간 양평 기온 추이 분석

양평기상관측소 1973년부터 2019년까지 47년간 연 평균 기온을 살펴보면 Figure 3과 같다. 연 평균 기온은 1997년 이전에는 증감을 반복하였으나 이후부터 11℃를 지속적으로 넘어서 2014년부터는 12℃로 증가하였고, 2016년에는 13.0℃의 가장 높은 연 평균 기온을 보였다. 기온 증가에는 양평기상관측소가 위치한 양평 지역의 도시화가 영향을 줄 수 있다. Park et al.(2017)은 우리나라 기온 상승 중 도시화가 차지하는 비중이 지난 103년(1912~2014년) 동안 약 3~11%이나, 최근 42년(1973~2014년) 동안에 약 30~45%로 증가한 것으로 보고한 바 있어 수도권 인근 양평 지역도 도시화 영향이 기온 상승에 영향을 일부 미칠 것으로 사료된다. 우리나라 주요 6개 지점(서울, 강릉, 인천, 대구, 부산, 목포) 모두 연평균 기온이 상승하는 추세로 최근 30년(1988~2017년)의 연평균 기온이 14.0℃(NIMS, 2018)인데 비하여 양평군의 연평균 기온은 이보다 낮았다. 양평의 일 최저 기온과

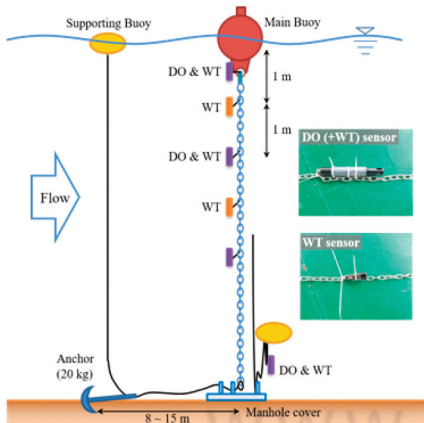


Figure 2. Conceptual diagram of automated real-time measurement equipment in water.

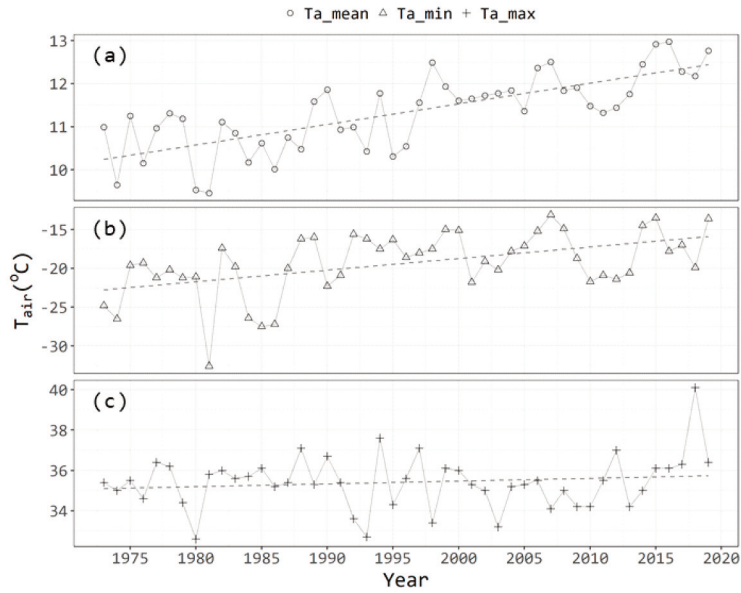


Figure 3. Annual average air temperature trend (a: mean, b: min, c: max) in Yangpyeong based on the data from Yangpyeong weather station (1973~2019).

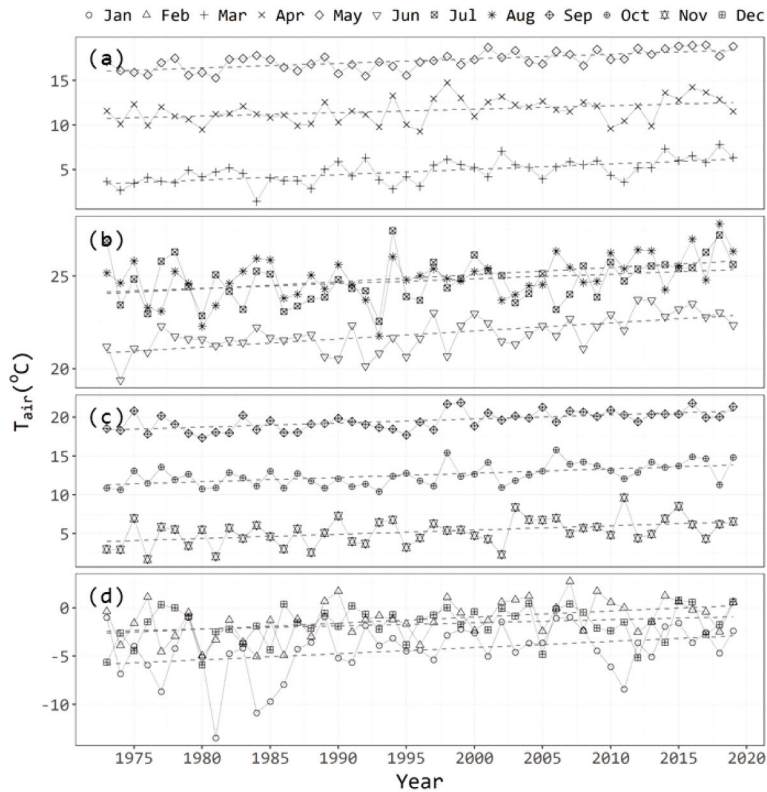


Figure 4. Seasonal comparison of monthly air temperature in Yangpyeong based on the data from Yangpyeong weather station (1973~2019), (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter. on the data from Yangpyeong weather station (1973~2019).

Table 2. The results of air temperature trend in Yangpyeong(1973-2019) using seasonal Mann-Kendall test and Mann-Kendall test

Air Temp.		Mean temp.		Lowest temp.		Highest temp.	
		S	Sen's slope	S	Sen's slope	S	Sen's slope
Year <sup>1)</sup>		4,232*	0.048*	4,015*	0.075*	1,450*	0.022
Season <sup>2)</sup>	Spring	518*	0.050*	-	-	-	-
	Summer	427*	0.038*	-	-	-	-
	Fall	489*	0.059*	-	-	-	-
	Winter	355*	0.055*	-	-	-	-

\* p &lt; 0.05

<sup>1)</sup> Seasonal Mann-Kendall test and seasonal Sen's slope<sup>2)</sup> Mann-Kendall test and Sen's slope

일 최고 기온도 증가하는 추세이며 최저 기온의 증가 폭이 다소 크게 보였다. 2018년 8월 1일에는 일 최고 기온이 40.1℃로 역대 최고였고 일 최저 기온은 2019년에 -13.6℃로 1973년 이후 2007년 -13.1℃ 다음으로 낮았다. 계절별로 봄(3월~5월)과 가을(9월~11월)에 월 평균 기온 차이를 보이며 7월과 8월에는 큰 차이를 보이지 않고, 겨울(12월~2월)에는 1월이 가장 낮은 기온 분포를 보인다(Figure 4).

기온 변화의 경향성에 대한 통계적 방법은 맨-켄달 방법과 계절 맨-켄달 방법이 주로 적용되며(KEI 2009), 수질 평가에 있어서도 자주 사용되는 방법이다(Chang 2010; Choi et al. 2008; Kim et al. 2020). 계절 맨-켄달 방법을 적용하여 1973년부터 2019년까지 47년간 월 평균 기온과 일 최저 기온, 일 최고 기온의 연간 변화 추이를 살펴본 결과 Table 2와 같다. 모두 통계적으로 유의성 있게(p < 0.05) 양(S)의 값으로 나타나 기온이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 경향성 유무와 함께 경향의 정도를 계절 Sen's slope로 보면 기온의 증가 통계량은 0.048℃/yr이고, 일 최저 기온은 0.075, 최고 기온은 0.022로 일 최저 기온의 상승 폭이 크게 나타났다. Park et al.(2017)은 남한지역의 기온이 1912~2014년(103년)에 1.90℃, 1954~2014년(61년)에 1.35℃, 1973~2014년(42년)에 0.99℃가 증가하여 이는 지구적 기온 경향보다 1.4~2.6배 높다고 하였다. 이를 연간 증가율로 추정하면 각각 0.018℃, 0.022℃, 0.023℃이고, NIMS(2018)도 지난 106년간(1912~2017)의 우리나라 연평균 기온 변화량이 0.018℃/10년이라 하여 양평 지

역은 이보다 높은 증가 폭을 보였다. 1973~2002년 서울, 대전, 부산, 대구, 광주 지역의 기온 증가에 도시화 기여율이 39.6~56.2%(Oh et al. 2004)라는 것을 고려할 때 팔당호 인근도 기온 증가에 도시화의 영향이 있을 수 있다. 예를 들어 도시화의 주요 지표로 인구 증가율을 보면 팔당 유역 7개 시군 특별대책지역 인구가 1990년에 400,267명에서 2017년 998,680명으로 28년간 2.5배 증가하였고, 더 가까운 I권역의 경우 191,041명에서 608,445명으로 3.2배 증가(MOE 2018)한 것으로 나타나 도시화가 급속히 진행되었음을 알 수 있다.

연도별 계절 평균 기온을 구하여 맨-켄달 방법을 적용한 결과 사계절 모두 통계적 유의성이 있게 기온이 증가하는 것으로 나타났다. Sen's slope는 봄(3월~5월)에 0.050, 여름(6월~8월) 0.038, 가을(9월~11월) 0.059, 겨울(12월~2월)에 0.055로 여름의 증가율이 상대적으로 낮았다. NIMS(2018)에 따르면 강릉, 서울, 인천, 대구, 부산, 목포 등 6개 도시에서 106년(1912~2017년)동안 계절별 기온 상승은 겨울(+0.25℃/10년)과 봄(+0.024℃/10년)이 가장 뚜렷하였는데 최근 10년(2008~2017년)에는 봄, 여름 가을이 주도한다고 보고하였다. 기온 변화는 지역별 시기에 따라, 지리적, 환경적 여건 변화에 따라 차이가 있을 것으로 판단된다.

## 2) 팔당호 기온과 수온의 경향성 비교

물환경정보시스템(MOE, 2020)에서 제공하는 팔당댐앞 지점의 수온은 1994년부터 측정되었으나 측

정 주기와 측정 위치가 변화하였다. 측정 주기는 1992년부터 1993년까지 격월이었고 1994년부터 2003년까지 매월, 2004년 이후에는 매주로 기온과 달리 주간에 측정된 불연속적인 관측값이다. 측정 위치도 2003년까지는 표층, 2004년부터 수심별로 5개의 층에서 측정되었다. 또한 대부분 1월과 2월에 결빙되기 때문에 이 시기의 수온은 수변에서 측정된 값이다.

연도별로 계절 평균 기온과 표층 및 수심 평균 수온을 비교하면 Figure 5와 같다. 봄에는 기온과 표층 수온, 수심 평균 수온이 거의 비슷하나 최근에 들어 점차 차이를 보이고, 여름에는 기온과 표층 수온이 연도별로 약간의 차이를 보이나 대략 비슷한 수준에서 변화하고 있으며, 수심 평균 수온은 이보다 낮은 온도이다. 가을에 들어서면서 기온이 떨어지는데 표층

과 수심 평균 수온은 유사하게 기온보다 높게 유지되고 있다. 겨울에는 기온에 비하여 수온이 높고 수심 평균 수온 온도가 이보다 더 높게 유지되었다. 수심 별로 표층과 수심 평균 수온의 차이가 있는 수온 층화 현상은 주로 여름과 겨울에 일어나고 있다. Na et al. (2002)은 1998년을 대상으로 모델을 이용한 계절별 수온 분포 결과 초여름과 겨울에 수온 성층이 형성되나 그 발달 정도가 미미하다고 한 반면, Son et al. (2020)은 최근 2013년부터 2018년까지 팔당호 수온 차이에 따른 열적 층화(성층)를 분석한 결과 여름에 열적 층화가 강화되어 안정되었고, 열적 층화의 가장 큰 요인이 기온이고 다음으로 강수량, 방류량 및 체류시간으로 보고하였다. 최근의 기온 상승은 팔당호 수온 변화에 따른 성층 현상에도 영향을 과거와 다르게 해석될 수 있다.

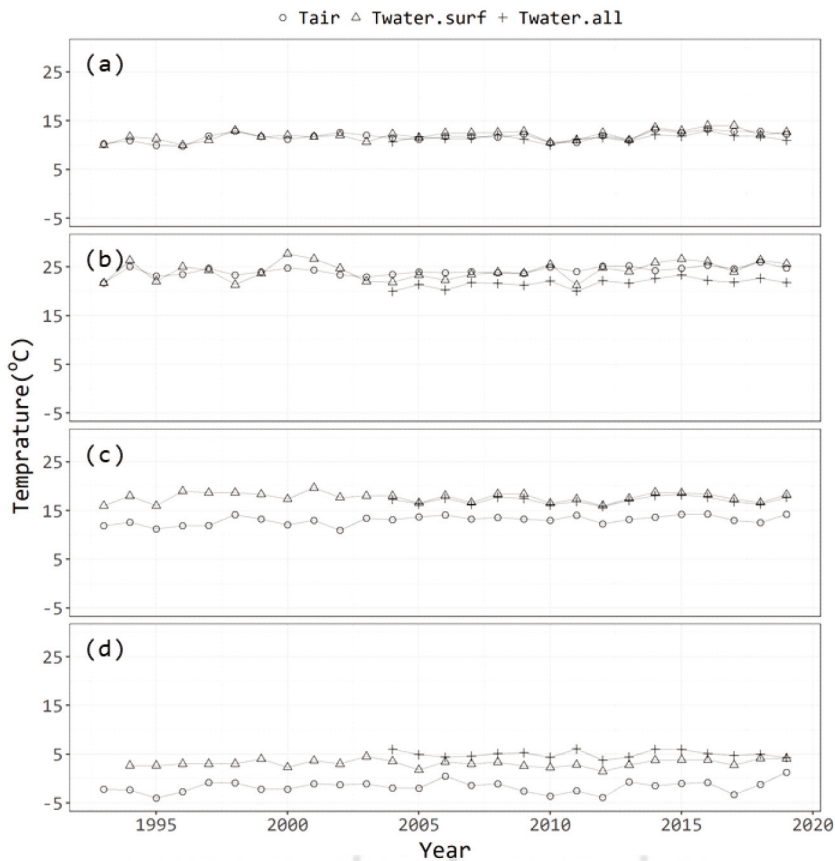


Figure 5. Seasonal average temperature of air and water(surface and depth average) in Lake Paldang (a) spring, (b) summer, (c) fall, (d) winter.

Table 3. The results of air and water temperature in Lake Paldang (1993-2019) using seasonal Mann-Kendall test and Mann-Kendall test

Class	Air temp.		Surface temp.		Depth average temp. <sup>3)</sup>		
	S	Sen's slope	S	Sen's slope	S	Sen's slope	
Year <sup>1)</sup>	747*	0.060*	564*	0.033*	251*	-	
Season <sup>2)</sup>	Spring	126*	0.067*	149*	0.087*	25	0.047
	Summer	156*	0.067*	84	0.1	58*	0.115*
	Fall	126*	0.063*	-17	0	14	0.023
	Winter	54	0.033	69	0.029	-	-

\* p &lt; 0.05

<sup>1)</sup> Seasonal Mann-Kendall test and seasonal sen's slope<sup>2)</sup> Mann-Kendall test and sen's slope<sup>3)</sup> 2004-2019

수온 증가를 통계적으로 확인하기 위해 표층의 수온 변화는 1993년부터 2019년, 수심 평균 수온은 2004년부터 2019년까지 월 평균 수온을 계절 맨-켄달 방법에 따라 분석한 결과 Table 3과 같이 수온 증가가 뚜렷이 나타났다. 1993년부터 27년간 기온은 계절 Sen's slope로 볼 때 0.060℃/yr로 증가하여 지난 47년간 기온 증가(0.048℃/yr) 보다 높게 나타나 최근의 기온 증가 폭이 더 크고 봄, 여름 그리고 가을에 높게 나타났다. 표층 수온의 증가는 0.033℃/yr의 기울기로 기온 증가에 비하여 낮았다. 하지만 연도별 계절 평균 온도로 맨-켄달 방법에 의한 계절별 기온 증가는 전반적으로 봄, 여름 그리고 가을에 통계적으로 유의성을 갖는 0.063~0.067로, 45년간의 기온 증가 폭(0.038~0.059)보다 높았다. 표층 수온 증가 폭은 봄에만 통계적 유의성을 갖는 0.087의 높은 경향을 보이고, 2004년부터 수심 평균 수온은 여름에 0.115로 증가하여 봄에는 표층의 수온이 증가 폭이 크고, 여름에는 수심 평균 수온 증가가 큰 것으로 나타났다. 호소는 상류 하천의 수온과 유입량의 차이, 체류 시간 등 물리적 요소가 수체 열에너지의 전달 및 축적에 매우 큰 영향을 주며(Martin & McCutcheon 1999; Wetzel 2001), 팔당호는 시기에 따라 수온이 다른 남한강과 북한강의 유입으로 팔당호 내부에서 복잡한 혼합이 발생하기(NIER 2008; Kong 2019) 때문에 표층과 수심 평균 수온 변화 경향성이 단순하지 않을 것으로 판단된다. 여기서 이용된 수온 자료는 기온과 달리 일 주일에 한 번 주간에 측정하고 동

절기 결정되는 등의 불연속성이 있기 때문에 기온과 수온의 관계를 보다 정확하게 해석하기 위해서는 시공간적으로 연속 관측이 필요하다.

## 2. 팔당호 유입 하천과 호소에서 기온과 수온의 관계

### 1) 기온에 따른 수온 영향

기온 변화가 수온에 미치는 영향을 정확히 알아보기 위해서는 연속적으로 기온과 수온이 동시 측정된 자료로 비교하는 것이 중요하나 수질자동측정소에서 기온이 함께 측정되지 않기 때문에 팔당호 인근 양평 기상관측소의 기온 자료로 비교하였고 연속 수온 자료는 팔당호 유입 하천의 경우 남한강(양평 측정소), 북한강(가평 측정소), 경안천(경안천 측정소)의 일 평균 수온을 사용하였다. 측정소별 수온 측정 위치는 하천 구조와 시료 채취 및 유지 관리의 용이성에 따라 양평, 경안천은 수심 약 2 m 부근이고 가평 측정소는 수심 4 m에 있다.

기온과 팔당호 유입 하천과 호소의 일 평균 수온을 보면 Figure 6과 같이 수온은 기온에 비하여 완만한 변화를 보이고 있다. 대략 남한강(Tw(Yangpyeong))과 경안천(Tw(Gyeongan))의 수온은 기온이 낮아지는 9월부터 다음 해 2월까지 기온에 비하여 높고 3월부터 기온과 비슷한 수준으로 상승하고 있다. 북한강(Tw(Gapyeong))에서는 4월에서 5월부터 수온이 기온에 비하여 더디고 완만한 증가를 보이다가 기온이 가장 높아지는 8월에 들어서 기온과 비슷해진다. 북한강 가평측정소의 경우 상류 청평댐에서 증충 방류

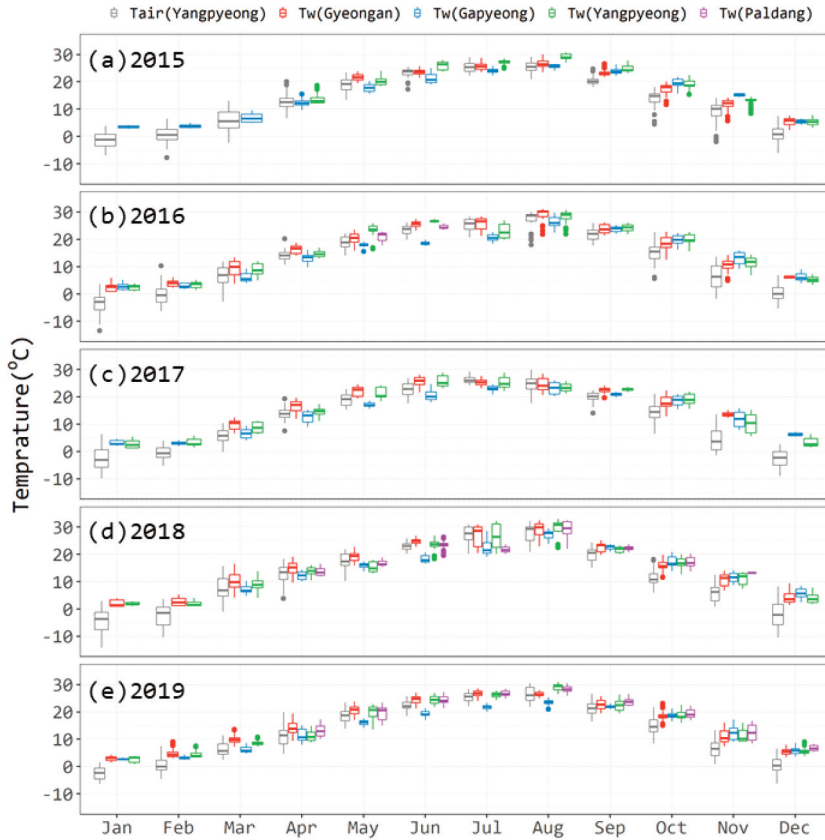


Figure 6. Air and water temperature variations in the main streams and in front of Dam in Lake Paldang.

와 수심 4 m 수온의 영향으로 수온의 상승 속도가 더딘 것으로 판단된다. 세 지점 모두 기온이 낮아지는 9월부터 수온이 기온보다 높은 온도를 유지하면서 서서히 낮아지고 있다. 반면 팔당댐앞 표층 수온은 2016년과 2019년 일부 시기에 남한강의 수온과 비슷하게 나타났다. 이 시기는 수온이 낮은 북한강과 수온이 높은 남한강이 팔당호에서 만나 수온 차에 의한 수온 밀도가 형성되며 팔당호 하류인 댐앞 지점 표층부에서는 비교적 수온 차로 인한 비등이 높은 남한강의 물이 차지하기 때문이다. 호소와 같이 수심이 깊고 수온이 다른 수체가 합류하는 팔당호는 수온 밀도류로 인한 수심별 수온 차이가 발생하여 성층을 형성하고 수체 혼합에도 영향을 미치므로 좀 더 정확한 해석을 위해서는 수심별 연속 자료 확보가 필요하다.

## 2) 하천과 호소에서 수온 이력 현상

수온은 기온에 직접적인 영향을 받으나 하천 또는 호소와 같이 수체 특성이 다르면 그 관계는 달라진다. 기온과 팔당호 유입 하천 및 팔당댐앞 수온과의 관계를 최근 2016년부터 2019년까지 10일 주기로 살펴보면 Figure 7과 같이 기온이 하강하기 시작하는 시기는 대략 8월 초중순부터이다. 물의 비열이 공기보다는 크다는 주된 물리적 특성에 따라 수온의 이력 현상으로 기온이 상승하는 시기(rising limb)와 하강하는 시기(falling limb)에 따라 기온과 수온과의 관계가 달라질 수 있다(An & Lee, 2013). 남한강 양평 지점(a)과 경안천(c)은 상승기와 하강기에 수온이 기온과 비슷하게 움직이는 반면, 북한강 청평댐 방류 지점인 가평 지점(b)에서는 하강기에 수온이 더디게 낮아지는 계절적 이력 현상을 보이고 있다. 양평과 경안천

지점의 수온은 수심 2 m 부근의 수온이고 가평 지점은 수심 4 m 정도의 수온임을 고려할 때 비교적 표층에 가까운 경안천과 양평 지점은 기온에 영향을 직접적으로 받으나 북한강 가평 지점(b)은 시기에 따른 북한강 자체의 낮은 수온과 청평댐 중층 방류 수온의 영향이 작용한 것으로 판단된다. 호소인 팔당댐앞(d) 표층 수온은 대체적으로 남한강 양평 지점 수온 변화와 유사한 것으로 나타났으나 4월부터 9월까지 상승기에 기온과 같은 수준으로 상승하다가 하강기에는 하천과 달리 뚜렷한 경향성을 보이고 있지 않다. 이 같이 기온 상승기와 하강기에 따라 기온과 수온의 관계는 달라지며 하천 규모 또는 호소에 따라 다를 수 있다. 기온과 수온 간에 관계가 있는지 알아보기 위하여 상승기와 하강기로 구분하여 기온과 수온과의 상관분석을 실시한 결과 Table 4와 같이 대부분 통계적 유의성이 ( $p < 0.005$ ) 있으며 상관계수가 0.9 이상으로 관계성

이 높다. 팔당호 표층 수온과의 관계는 2018년도 상관계수가 0.86으로 약간 낮으며, 하천보다 호소가 다소 낮은 경향을 보인다. 이들 관계식을 추론하기 위하여 회귀분석을 실시한 결과 Table 5와 같다. 하천 지점은 2016~2019년에 수온의 증가 기울기(a)가 경안천의 경우 상승기와 하강기가 0.81이고 남한강(양평 지점)도 0.79로 상승기와 하강기가 동일하였으나 하천 규모가 큰 남한강이 경안천에 비하여 약간 낮다. Stefan & Preud'homme(1993)은 미국 중부의 미시시피 강 유역에서 11개 하천을 대상을 수온과 기온 사이의 선형 관계를 분석하여 일 단위(daily) 수온에 대해서는  $T_w = 5.0 + 0.75 \times T_a$ , 주 단위(weekly) 수온에 대해서는  $T_w = 2.9 + 0.86 T_a$ 로 일 단위와 주 단위에 따라 관계성이 약간 변하며 또한 수심 및 폭 등 하천 규모에 따라서도 수온과 기온의 지체 현상(time lag)이 수 시간에서 수 일 범위에서 발생하고 하천 수심이 증

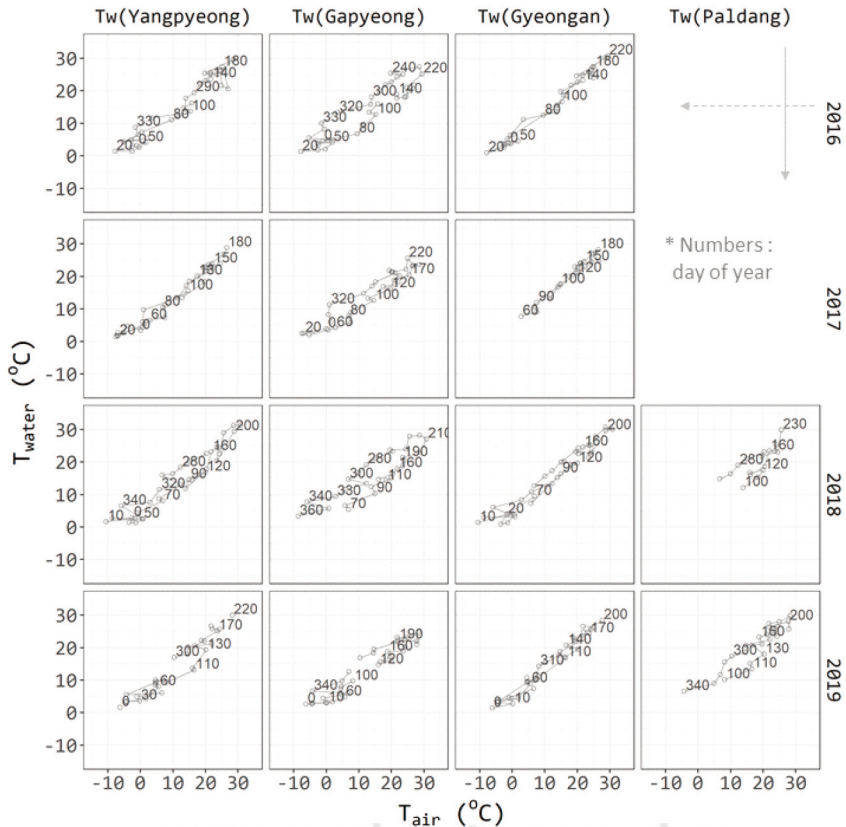


Figure 7. The comparison between air and surface water temperature and hysteresis in the main streams and Lake Paldang (surface water).

Table 4. The correlation coefficients between air and water temperature according to rising limb and falling limb in the main stream and Lake Paldang

Year	GA		YP		GP		PD <sup>1)</sup>		PD <sup>2)</sup>	
	R	F	R	F	R	F	R	F	R	F
2016	0.98	0.97	0.93	0.95	0.95	0.95	-	-	-	-
2017	0.97	0.93	0.95	0.96	0.97	0.90	-	-	-	-
2018	0.97	0.98	0.93	0.97	0.93	0.97	0.86	0.94	-	-
2019	0.97	0.97	0.95	0.96	0.97	0.95	0.94	0.95	0.90	0.94
(2016~2019)	0.97	0.98	0.96	0.96	0.97	0.95	-	-	-	-

\*R: rising limb, F: falling limb

<sup>1)</sup> surface water temperature of PD, <sup>2)</sup> depth average water temperature of PD  
(p value < 0.005)

Table 5. The result of regression analysis between air and water temperature according to rising limb and falling limb in the main stream and Lake Paldang

year		GA		YP		GP		PD <sup>1)</sup>		PD <sup>2)</sup>	
		R	F	R	F	R	F	R	F	R	F
2016	a	0.87	0.85	0.77	0.81	0.62	0.71	-	-	-	-
	b	4.02	4.97	4.72	6.50	4.04	8.0	-	-	-	-
2017	a	0.83	0.66	0.84	0.77	0.69	0.58	-	-	-	-
	b	5.54	8.54	4.48	6.76	3.91	9.21	-	-	-	-
2018	a	0.78	0.81	0.78	0.84	0.74	0.71	0.72	0.72	-	-
	b	5.35	6.21	6.65	3.96	2.1	8.0	5.12	8.83	-	-
2019	a	0.84	0.84	0.84	0.81	0.67	0.67	0.93	0.77	0.73	0.64
	b	4.87	5.71	3.96	6.21	3.59	7.35	2.29	7.77	3.31	8.43
2016~2019	a	0.81	0.81	0.79	0.79	0.67	0.67	-	-	-	-
	b	5.15	6.02	4.51	6.56	3.75	8.03	-	-	-	-

\* a: slope, b: intercept, R: rising limb, F: falling limb

<sup>1)</sup> surface water temperature of PD, <sup>2)</sup> depth average water temperature of PD  
(p value < 0.005)

가할수록 증가한다고 보고하였다. 상류 호소의 영향을 받는 북한강(가평 지점)은 상승기와 하강기 0.67로 동일하여 기온과 수온과의 관계성은 유사하나 하천 지점보다는 낮고 상승기와 하강기의 절편값의 차이도 3.75과 8.03으로 크게 나타나 상류 대형 호소의 수온 이력현상의 영향이 반영된 것으로 판단된다.

호소인 팔당댐앞에서 기온과 수온과의 관계는 하천에 비하여 관측 시기가 제한적이어서 하천과 단순 비교하기는 어려우나 2019년만 보면 상승기(0.93)에 비하여 하강기(0.77)에 기울기가 감소하여 수온이 더디게 감소함을 알 수 있다. 수심 평균 수온은 각각 0.73, 0.64로 더 낮다. Figure 5와 같이 여름철 기온 상승으로 상승된 수온이 기온이 내려가는 가을(c)에

들어서도 더디게 떨어지고 있다. 따라서 호소는 수체 규모가 크고 하천보다 체류 시간이 길기 때문에 흡수한 열에너지를 더 많이 가지면서 이를 유지하는 수온 이력 현상이 더 크게 작용하여 호내 수온이 더욱 더디게 감소하여 여름철 기온 상승이 오래 지속될 경우 하강기에도 고수온이 지속될 수 있다. 여름철 수온이 높아지면 남조류는 수온과 체류 시간에 민감하며 수온이 높을수록, 체류 시간이 길수록 남조류 번성이 뚜렷해진다(Elliott, 2010). 표층 온도가 높아지는 시기에 성층화가 진행되기 시작하여 여름이 길어지면 성층화 기간도 연장되어 수체의 안정화 시간도 길어지는데 이는 남조류 출현을 지속시킬 수 있는 요인이 된다(Paerl & Paul, 2012). 낙동강 수계에서 대표적

남조류인 *Microcystis* sp.가 수온이 25℃ 이상에서 10,000 cells/mL를 초과하기 시작하여 28℃ 이상에서 현저히 증가하는 수화현상이 나타나(Yu et al. 2014) 한강 수계에서도 장기간의 기온 및 수온 상승이 성층화를 형성하는 조건과 남조류 번성과의 관계를 좀 더 심도 있게 연구할 필요가 있다.

#### IV. 결론

기후 변화로 인한 기온 증가는 수온 변화에 직접적인 영향을 주며 기온과 수온과의 관계는 다양한 환경적 요인에 영향을 받는다. 하천과 호소와 같이 수체의 규모가 다른 경우에 기온과 수온과의 관계는 다르게 나타나며 기온이 상승하는 시기와 하강하는 시기에 따라 서로 달라진다. 본 연구에서는 국내 최대 상수원인 팔당호를 대상으로 시계열 분석방법인 맨-켄달 방법과 계절 맨-켄달 방법을 적용하여 장기간 기온 및 수온의 증가를 확인하고 수온의 연속 자료를 활용하여 팔당호 유입 하천과 호소에서 기온과의 관계를 분석하고 각각의 이력 현상에 따른 수온의 증가 요인을 살펴보았다.

팔당호 유역에서 1973-2019년까지 47년간 기온은 계절 Sen's slope로 0.048℃/yr 증가하였고 1993~2019년까지 27년간 기온은 0.060℃/yr로 증가하여 최근의 기온 증가 폭이 더 컸다. 1993~2019년까지 팔당호 표층 수온은 0.033℃/yr로 증가하였으며 계절적으로 봄에 증가 폭이 크고 2004~2019년까지 수심 평균 수온은 여름에 크게 증가하였다.

팔당호 유입 하천인 남한강(양평측정소 지점), 북한강(가평측정소 지점), 경안천과 호소인 팔당댐앞 지점의 연속 측정된 수온과 기온 자료를 토대로 수온과의 상관분석 및 회귀분석을 실시한 결과 모두 상관계수 0.9 이상이고 통계적 유의성( $p < 0.005$ )이 있는 것으로 나타나 대부분 기온과의 상관성이 높았다. 2016년부터 2019년까지 기온과 수온과의 관계에서 기울기(a)는 평균적으로 경안천과 남한강, 북한강 모두 상승기와 하강기 모두 기온과 수온의 비가 동일하지만 하천 규모가 작고 체류 시간이 짧을수록 수온은 기온에 민감하며 그 변화가 매년 다른 관계성도 달

라질 수 있다. 호소인 팔당댐앞에서 기온과 수온과의 관계는 2019년의 경우 상승기에 비하여 하강기에 기울기가 0.93에서 0.77로 하강기에 수온이 더디게 감소하였고 수심 평균 수온과 관계에서는 각각 0.73에서 0.64로 기울기가 더 낮아졌다. 이는 하천에 비하여 호소는 수체 규모 면에서 크고 체류 시간이 길기 때문에 흡수한 열에너지를 더 많이 가지면서 이를 유지하는 수온 이력 현상이 더 크게 작용하여 여름철 기온 상승이 오래 지속될 경우 호소 전체에 수온 저하는 더욱 지체되어 하강기에도 고수온이 오래 지속될 수 있음을 보여준다.

결론적으로 수온의 이력 현상은 하천보다는 호소에서 크기 때문에 기온 증가로 인한 수온 증가는 장기간 지속될 수 있으며 이는 수질과 수생태 반응에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 보다 정확한 평가와 예측을 위해서는 기온과 수온의 연속적인 관측이 필요하며 수심별 공간적인 관측도 요구된다. 이를 바탕으로 기온 증가가 수온 상승에 미치는 영향과 호소 성층화와 유역환경 변화 등에 대한 영향을 보다 정확하게 해석할 수 있다.

#### 사사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2019-01-01-066).

#### References

- An JH, Lee KH. 2013. Correlation and hysteresis analysis of air-water temperature in four rivers: Preliminary study for water temperature prediction. *Journal of Environmental Policy*. 12(2): 17-32. [Korean Literature]
- Boyce DG, Lewis MR, Worm B. 2010. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature*. 466(29): 591-596.
- Chang SH. 2010. The assessment of water quality in Nam-Hangang Basin using statistics

- analysis - long term trend analysis of comprehensive water index. M.D. dissertation. Hanyang University, Seoul. [Korean Literature]
- Carter T, Hulme M, 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.
- Cha YC, Chung SW, Yoon SW. 2013. Forecasting the effect of global warming on the water temperature and thermal stratification in Daecheong reservoir. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 22(4): 329-343. [Korean Literature]
- Choi JH, Ha JH, Park SS. 2008. Estimation of the effect of water quality management policy in Paldang Lake. *Journal of Korean Society on Environmental Engineers*. 30(12): 1225-1230. [Korean Literature]
- Chung SW, Schladow SG. 2015. Three-dimensional numerical modeling of water temperature and internal waves in a large stratified lake. *Journal of Korean Society on Water Environment*. 31(4): 367-376. [Korean Literature]
- Elliott JA. 2010. The seasonal sensitivity of cyanobacteria and other phytoplankton to changes in flushing rate and water temperature. *Global Change Biology*. 16(2): 864-876.
- Han DH. 2010. Temporal and spatial analysis of water temperature and water quality assessment of streams and reservoirs in Korea. Ph.D. dissertation. University of Seoul, Seoul. [Korean Literature]
- Han-River Environment Research Center(HRERC), NIER. 2018. The environmental change in the watershed of Lake Paldang 2000-2015. [Korean Literature]
- Hirsch RM, Slack JR, Smith RA. 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*. 18(1): 107-121.
- IPCC. 2013. Climate change 2013; The Physical Science Basis. Summary for Policymakers, Technical summary and frequently asked questions. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- IPCC. 2001. Climate change 2001: the scientific basis. Cambridge University Press Cambridge, UK. p. 881.
- Kim JM, Jeong HG, Kim HR, Kim YS, Yang DS. 2020. A nonparametric trend analysis of water quality using water environment network data in Nakdong River. *Journal of Environment Impact Assessment*. 29(1): 61-77. [Korean Literature]
- Kim YH, Kim BC, Choi KS, Seo DI. 2001. Modelling of thermal stratification and transport of density flow in Soyang Reservoir using the 2-D hydrodynamic water quality model, CE-QUAL-W2. *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*. 15(1): 40-49. [Korean Literature]
- Korea Meteorological Administration (KMA). Weather Data Open Portal. [cited 2020 June]. Available from <https://data.kma.go.kr>
- Kong DS. 2019. Evaluating effect of density flow from upstream on vertical distribution of water quality at the Paldang Reservoir. *Journal of Korea Society of Water Environment*. 35(6): 557-566. [Korean Literature]
- Korea Environment Institute (KEI). 2009. Water Environment Management Strategy(I) : Response to climate change. [Korean Literature]
- Lettenmaier DP, Hooper ER, Wagoner C, Faris

- KB. 1991. Trends in stream quality in the continental United States, 1978-1987. *Water Resources Research*. 27(3): 327-339.
- Martin JL, McCutcheon SC. 1999. Hydrodynamics and transport for water quality modeling. CRC Press, Inc., New York, USA. 1-794.
- Ministry of Environment (MOE). 2020. Water Environment Information System (WEIS); [cited 2020 June]. Available from : <http://water.nier.go.kr>.
- Ministry of Environment (MOE). 2018. Environment report of Special Measures Area in Lake Paldang · Daecheong for water quality conservation. 11-1480000-000865-10. [Korean Literature]
- Morán XAG, López-Urrutia A, Calvo-Diaz A, Li WKW. 2010. Increasing importance of small phytoplankton in a warmer ocean. *Global Change Biology*. 16: 1137-1144.
- Na EH, Ahn KH, Park SS. 2002. A modeling study of seasonal overturn and vertical thermal profiles in the Paldang Lake. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*. 24(5): 901-910. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2008. Multidimensional analysis on material transport in lake Paldang (II). NIER NO. 2008-48-998. 1-128. [Korean Literature]
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS). 2018. Climate change of 100 years in Peninsula. 11-1360620-000132-01. [Korean Literature]
- Oh SN, Kim YH, Hyun MS. 2004. Impact of urbanization on climate change in Korea, 1973-2002. *Journal of the Korean Meteorological Society*. 40(6) 725-740. [Korean Literature]
- Paerl HW, Paul VJ. 2012. Climate change: links to global expansion of harmful cyanobacteria. *Water research*. 46(5): 1349-1363.
- Park BJ, Kim YH, Min SK, Kim MK, Choi YG, Boo KO, Shim SB. 2017. Long-term warming trends in Korea and contribution of urbanization : An updated assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 122, 10637-10654.
- Sen PK. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*. 63: 1379-1389.
- Shin CM, Na EH, Kim DG, 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]
- Son JY, Park JR, Noh HR, Yu SJ, Im JK. 2020. Seasonal characteristics of thermal and chemical stratification in Lake Paldang. *Journal of Korean Society on Water Environment*. 36(1): 1-13. [Korean Literature]
- Stefan HG, Preud'homme EB. 1993. Stream temperature estimation from air temperature. *Journal of the American Water Resources Association*. 29(1):27-45.
- Stefan HG, Sinokrot BA. 1993. Projected global climate change impact on water temperatures in five north central US streams. *Climatic Change*. 24: 353-381.
- Stockle CO, Dyke PT, Williams JR, Jones CA, Rosenberg NJ. 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.
- Wetzel RG. 2001. *Limnology: lake and river ecosystems*. Gulf professional publishing.
- Yu JJ, Lee HJ, Lee KL, Lyu HS, Whang JW, Shin LY, Chen SU. 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]
- Yu SJ, Lee EJ, Park MJ, Kim KS, Im JG, Ryu IG, Choi HJ, Byeon MS, Noh HR. 2018. Changes in the water environment based on the statistical data in the lake Paldang. *Journal of Korean Society on Water Environment*. 34(6): 688-702. [Korean Literature]
- Yu YS, Zou S, Whittemore D. 1993. Non-parametric trend analysis of water quality data of rivers in Kansas. *Journal of Hydrology*. 150: 61-80.
- 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]