

환경인자를 이용한 산지계류의 계절별 수온변화 예측^{1a}

남수연^{2†} · 장수진^{3†} · 김석우⁴ · 이윤태⁵ · 전근우^{6*}

Estimated Headwater Stream Temperature Using Environmental Factors with Seasonal Variations in a Forested Catchment^{1a}

Sooyoun Nam^{2†}, Su-Jin Jang^{3†}, Suk-Woo Kim⁴, Youn-Tae Lee⁵, Kun-Woo Chun^{6*}

요약

이 연구는 강원대학교 학술림 내의 산지계류를 대상으로 2년간(2017~2018)의 현지 모니터링에 기초하여 수온과 강우, 유량 및 기온 등 환경인자간의 관계를 분석하고, 계절별 산지계류의 수온변화 예측기법에 대하여 검토하였다. 동절기를 제외한 봄, 여름 및 가을철로 구분하여 단계적 다중선형회귀분석을 실시하였으며, 계절별 산지계류의 수온변화에 미치는 환경인자의 영향을 분석하였다. 그 결과, 산지계류의 일평균 수온은 봄철 6.9~17.7℃로 기온과 유의적 관계를 나타내었고, 여름철 12.2~26.3℃로 기온, 유량과 유의적 관계를 나타냈으며, 가을철 3.6~19.3℃로 기온 및 유량과 유의적 관계를 나타내는 등 계절별로 산지계류의 수온에 미치는 영향인자는 다르게 나타났다. 다중선형회귀식은 봄철 $(0.553 \times \text{기온}) + (0.086 \times \text{유량}) + 4.145 (R^2=0.505; p<0.01)$, 여름철 $(0.756 \times \text{기온}) + (-0.072 \times \text{유량}) + 2.670 (R^2=0.510; p<0.01)$, 가을철 $(0.738 \times \text{기온}) + (0.028 \times \text{강우}) + 2.660 (R^2=0.844; p<0.01)$ 이었다. 도출된 모든 회귀식의 결정계수(R^2)는 기온만으로 예측한 경우보다 높게 나타났고, 봄철에서 가을철로 갈수록 증가하였다. 향후 정밀도 높은 산지계류의 수온변화 예측을 위해서는 지속적인 현지 모니터링과 함께 시·공간적 데이터의 확보가 중요하다고 판단된다.

주요어: 기온, 강우량, 유량, 단계적 다중선형회귀분석

ABSTRACT

To estimate headwater stream temperature with seasonal variations, we analyzed precipitation, runoff and air temperature in experimental forest of Kangwon National University, Gangwon-do (2017~2018 years). The daily mean value of headwater stream temperature for spring was 6.9~17.7℃ and correlated with air temperature, that for summer and fall were 12.2~26.3℃ and 3.6~19.3℃, correlated with air temperature and runoff. Based on seasonal variations, we applied for stepwise multiple linear regression analyses to estimate

1 접수 2019년 10월 19일, 수정 (1차: 2019년 12월 13일), 게재확정 2019년 12월 20일

Received 19 October 2019; Revised (1st: 13 December 2019); Accepted 20 December 2019

2 강원대학교 산림과학연구소 박사연구원 Inst. of Forest Science, Kangwon National Univ., Chuncheon 24341, Korea (sysayks@gmail.com)

3 강원대학교 산림과학연구소 박사연구원 Inst. of Forest Science, Kangwon National Univ., Chuncheon 24341, Korea (sujinjang@kangwon.ac.kr)

4 강원대학교 산림과학부 교수 Div. of Forest Science, Kangwon National Univ., Chuncheon 24341, Korea (kimsw@kangwon.ac.kr)

5 강원대학교 산림과학연구소 박사연구원 Inst. of Forest Science, Kangwon National Univ., Chuncheon 24341, Korea (ytlcc8511@gmail.com)

6 강원대학교 산림과학부 교수 Div. of Forest Science, Kangwon National Univ., Chuncheon 24341, Korea (kwchun@kangwon.ac.kr)

a 이 논문은 산림청(한국임업진흥원)에서 지원하는 연구비(2014109C10-1920-AA02) 및 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단에서 지원하는 연구비(No. NRF-2017R1C1B5076781)에 의하여 연구되었음.

† co-first author

* 교신저자 Corresponding author: kwchun@kangwon.ac.kr

headwater stream temperature with seasonal variations. The equations were headwater stream temperature(WT)_{spring}=(0.553×Air temperature)+(0.086×Runoff)+4.145 ($R^2=0.505$; $p<0.01$), WT _{summer}=(0.756×Air temperature)+(-0.072×Runoff)+2.670 ($R^2=0.510$; $p<0.01$), and WT _{fall}=(0.738×Air temperature)+(0.028×Precipitation)+2.660 ($R^2=0.844$; $p<0.01$). The coefficient of determination (R^2) was greater than when it was estimated by air temperature in all seasons and progressively increased from spring to winter. Therefore, we indicated difference on estimated magnitude of stepwise multiple linear regression, due to effects on headwater stream temperature of different environmental factors with seasonal variations. Furthermore, temporal factors with spatial characteristics (e.g., river versus headwater stream) could be recommended for estimating headwater stream temperature.

KEY WORDS: AIR TEMPERATURE, PRECIPITATION, RUNOFF, STEPWISE MULTIPLE LINEAR REGRESSION

서론

화석연료의 사용과 개발로 인하여 지구의 연평균 기온은 지난 수십 년 동안 증가하는 추세를 보이고 있으며(IPCC, 2001), 우리나라에서도 장기적인 기온의 증가 경향이 나타나고 있다(Ha *et al.*, 2004; Cho *et al.*, 2007). 이러한 기후변화 현상은 집중호우와 가뭄이라는 극한 기상현상을 야기하며, 이에 따라 수자원의 이용과 관리, 환경 유지에 큰 어려움을 초래할 수 있다(Chang *et al.*, 2009; Kim and Jain, 2011). 특히, 우리나라는 전국토의 63.5%가 산림으로 피복되어 있고(Korea Forest Service, 2019), 산림 내를 흐르는 산지계류는 우리나라 전체 수계연장의 80% 이상(Kim and Han, 2008)을 차지하기 때문에 산림유역의 수자원 공급 및 관리 부분에 있어 이러한 환경문제를 더욱 중요하게 인식해야 한다(Jun *et al.*, 2007).

많은 선행연구에서도 장기적인 기후변화는 기온, 강우 및 증발산 등에 영향을 미칠 수 있으며, 산림유역 내 생태계 및 물순환 구조에도 변화를 발생시킬 수 있다고 보고하고 있다(Asselman *et al.*, 2003; Cho *et al.*, 2007; Jun *et al.*, 2007; Nam *et al.*, 2019). 특히, 산림유역 내 산지계류의 수온변화는 수생태계 내 수생생물의 종변화뿐만 아니라(Stockle *et al.*, 1992; Stefan and Sinokrot, 1993), 수중에서 생화학적인 반응을 일으켜 수환경에 영향을 미치고 있다(Beschta *et al.*, 1987; Eaton and Scheller, 1996). 이러한 일련의 현상들은 산지계류의 수중생태계뿐만 아니라 수변환경에도 교란 요인으로 작용할 수 있다고 판단된다.

따라서 수생태계 및 수환경의 유지에 관여하는 수온의 중요성을 인식하고 산지계류의 수온에 영향을 주는 환경인자에 대하여 파악하고 있으며, 이의 영향을 평가하기 위한 연구가 실시되고 있다(Sinokrot and Stefan 1993; Poole and Berman 2001). 예를 들면, Lane *et al.*(2007)은 환경인자 중 기온이

수온과 밀접한 관련이 있음을 보고하였다. Nam *et al.*(2019)은 기온변화(2.0~29.9℃)가 산지계류의 수온변화(7.0~23.5℃)에 미치는 영향을 파악하였고, Subehi *et al.*(2010)은 강우사상 동안 기온이 감소함에 따라 수온이 감소하였다는 연구결과를 보고한 바 있다. 또한, Constantz(1998)의 연구에서는 여름철 유량의 감소로 인해 산지계류의 수온이 증가한 것을 설명하였고, 이외에도 수온, 기온 및 태양복사 등의 환경인자가 수온변화에 영향을 미치고 있다는 Tague *et al.*(2007)의 연구결과가 있다.

대부분 산지계류의 수온변화에 대한 영향인자 분석 및 예측에 관한 연구는 국외에서 이루어지고 있고, 국내에서는 시·공간적으로 제한적이며 장기적인 관측자료가 부족하기 때문에, 신뢰성 있는 자료의 양을 확보하지 못하고 있다는 한계점을 갖고 있다. 특히 산지계류는 산지사면과 인접하고 있어 기온뿐만 아니라 강극수역에서의 지중수 유입(Kobayashi *et al.*, 1999), 주변 계안림의 울폐도나 임상(Moore *et al.*, 2005) 등 다양한 인자들이 수온변화에 영향을 미칠 것으로 추측된다. 그러나 이러한 산지계류의 수온변화에 미치는 다양한 인자의 영향에 대한 검토는 충분히 이루어지지 못하고 있다.

기존의 선행연구에서도 수온 예측에 있어서 그 대상이 되는 산지계류의 환경적 특성을 고려해야 한다고 기술하고 있다(e.g., Subehi *et al.*, 2010; Nam *et al.*, 2019). 따라서 이 연구에서는 계절변화에 따른 강우, 유량 및 기온의 환경인자를 적용하여 수온변화에 미치는 영향을 파악하고, 이를 토대로 예측기법을 제시하는 것을 목적으로 하였다.

연구방법

1. 연구대상지

연구대상지는 강원도 홍천군 북방면 북방리 산61-1번지에 위치한 강원대학교 학술림 내 소유역(N 37°47'50.86", E 127°50'49.26")이다. 유역면적은 23.4ha이며, 고도는 335~658m이다(Figure 1). 산지계류는 상시 유수가 있으며, 차수는 1차수, 계안의 폭은 0.6m, 계상물매는 0.24m/m, 계상은 대부분 호박돌과 자갈로 구성되어 있다. 계류형태는 직류와 곡류가 복합적으로 나타나고 있다. 이 유역의 산림면적은 1/5,000 임상도 기준 24.3ha(100%)였으며, 목본식생의 수관점유면적이 71% 이상(밭)에 해당하는 울폐도가 높은 지역이다. 또한, 임상은 침엽수 29%, 낙엽활엽수 71%로 구성된 혼효림으로 주요 수종은 참나무류, 잣나무, 일본잎갈나무, 물푸레나무, 층층나무 및 소나무이다.

2. 현지 모니터링 및 분석방법

현지 모니터링은 산지계류의 유량 부족 및 동결로 인하여 겨울철과 이른 봄철(12~3월)은 제외하고 2017년과 2018년 모두 4월 20일부터 11월 3일까지 2년간 실시하였다. 이 논문에서는 선행연구(e.g., Sinokrot and Stefan 1993; Poole and Berman 2001; Lane *et al.*, 2007; An and Lee, 2013)의 리뷰를 통하여 산지계류의 수온변화에 영향을 미치는 환경인자로 강우량, 유량, 수온 및 기온을 선정하였다.

산지계류의 수온, 유량 및 강우량의 측정시간은 동일하게 하였고, 수온은 다항목수질측정장치(YSI 6600)를 이용하여 1

시간 간격으로 측정하여 일평균값을 산출하였다. 유량은 파살플룸에 설치된 막대식 수위계(TruTrack WT-HR 1000)에서 1시간 간격으로 측정된 수위데이터와 이를 토대로 관측지점에서 얻어진 수위-유량 관계식에 이용하여 산출하였다(Figure 1). 강우량과 기온은 산지계류의 수온 측정지점에서 1.4km 거리에 위치한 산림청 산악기상관측망 연엽산 관측소의 시간별 관측 자료를 이용하여 일우량 및 일평균값을 산출하였다.

분석된 데이터는 겨울철을 제외한 봄(4~5월), 여름(6~8월) 및 가을(9~11월)로 구분하여 계절별로 강우량, 유량 및 기온이 산지계류의 수온변화에 미치는 영향을 통계적으로 해석하였다. 통계분석은 Statistical Package for Social Sciences (SPSS) version 19를 이용하여 상관분석 및 단계적 다중선형회귀분석을 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 계절변화에 따른 산지계류의 강우량, 유량, 기온 및 수온변화

2017년 및 2018년 4월 20일~11월 3일 동안 관측지점의 강우량, 유량, 기온 및 수온의 시계열 변화를 나타낸 결과는 Figure 2와 같다. 관측기간 중의 일우량은 0.0~145.6mm, 일유량은 0.05~42.1mm, 일평균 기온은 1.4~29.5°C, 일평균 수온은 3.6~26.3°C의 범위로 나타났다(Figure 2(a), (b), (c), (d), and (e)). 수온이 높게 나타난 6~8월은 계절적 영향에 의한 기온의 영향이 크지만, 집중호우 및 가뭄이 반복되면서 표면유출, 중간유출 및 지하수유출로 인하여 산지사면으로부터

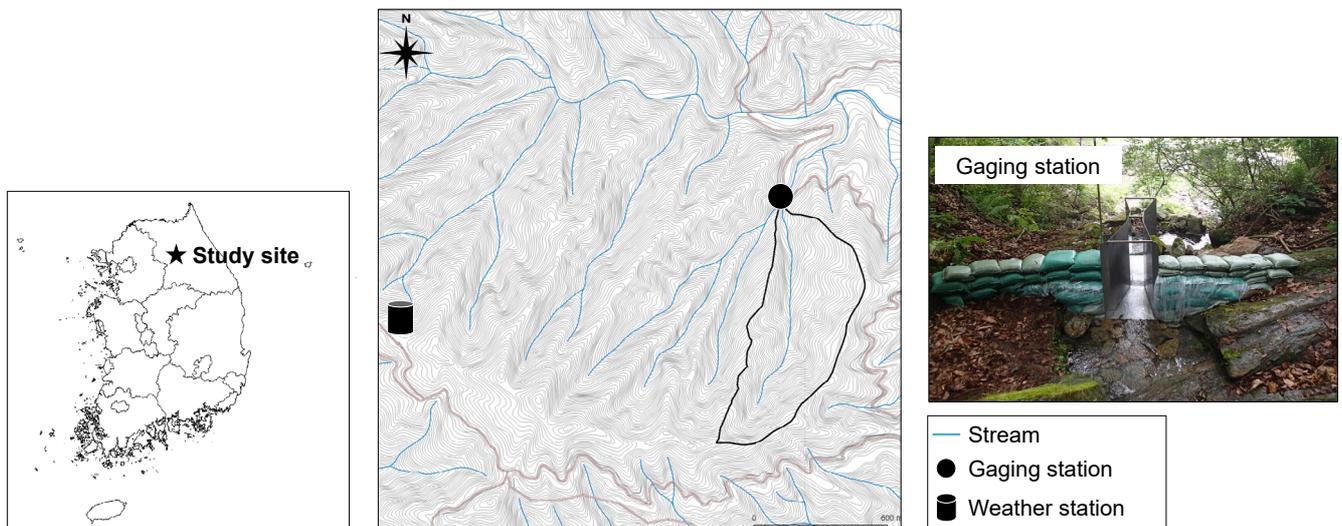


Figure 1. Location and topography of headwater stream within a study catchment.

터 유입된 유출량의 증감에 따라 산지계류 수온의 증감에도 일부 영향을 주었을 것으로 판단된다(Park and Lee, 2000; Moore, 2006).

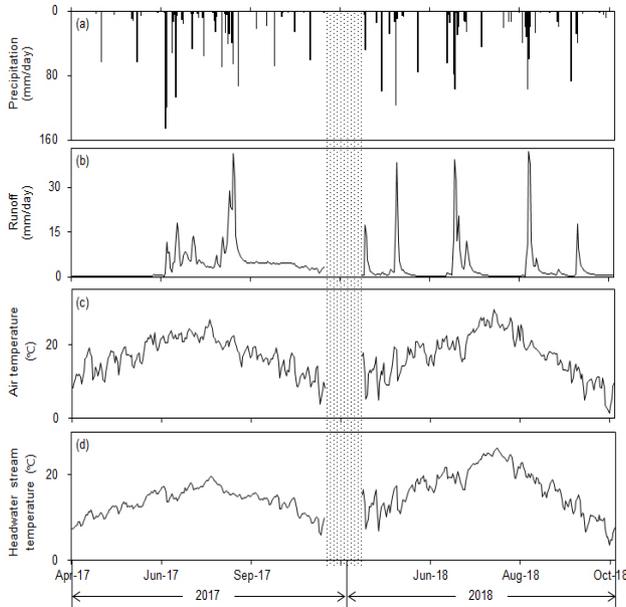


Figure 2. Time series of daily distribution for (a) precipitation, (b) runoff, (c) air temperature, and (d) headwater stream temperature based on one day values during monitoring period. The dotted areas indicate values excluded because of missing data during winter and early spring.

Table 1은 관측기간 동안 계절별 강우량, 유량, 기온 및 수온의 특성을 분석한 결과로 모든 인자들은 봄철과 가을철보다 여름철에 높게 나타났다. 특히, 기온-수온의 편차는 봄철(-3.8~8.0°C)과 가을철(-3.7~4.6°C)에 비해 여름철(-2.0~9.1°C)이 크게 나타났는데, 이와는 대조적으로 낙동강 중류의 구미 및 칠곡 인근에서 실시한 Park *et al.*(2016)의 연구에서는 기온-수온의 편차가 기온의 하강기(가을, 겨울)보다 기온의 상승기(봄, 여름)에서 작게 나타났다. 이는 산지계류가 지형적으로

산지사면에 인접하고 있어 울폐된 계안림의 영향을 받았기 때문에 기온변화에 따른 산지계류 수온변화의 민감도가 하천보다 낮아서 여름철 기온-수온의 편차가 크게 나타난 것으로 판단된다(e.g., Cho *et al.*, 2007; Isaak *et al.*, 2012).

산지계류 수온의 일교차는 가을철(15.7°C)이 봄철(10.8°C)과 여름철(14.1°C)에 비해 상대적으로 크게 나타났는데, 이는 연구대상지가 낙엽활엽수로 구성된 계안림의 영향이 작용한 것으로 판단된다. 특히, Nakamura and Dokai(1989)는 동일한 일사량 조건에서의 산지계류 수온의 일교차가 개엽기보다 낙엽기에서 상대적으로 크게 나타나고, Worrall(1993)과 Heide(2003)는 계절별 산지계류의 수온변화가 상록활엽수림 및 침엽수림보다 낙엽활엽수림에서 비교적 뚜렷하게 나타난다고 보고한 바 있다.

2. 계절변화에 따른 산지계류의 수온과 환경인자간의 상관관계 분석

계절별로 산지계류의 수온과 강우량, 유량 및 기온 등 환경인자와의 관계를 분석한 결과는 Table 2와 같다. 모든 계절에서 기온은 다른 환경인자에 비하여 산지계류의 수온과 비교적 높은 상관성(Pearson's $r=0.690\sim0.913$, $p<0.01$)을 나타내었다.

산지계류의 수온과 통계적 유의성을 보이는 환경인자를 계절별로 살펴보면, 봄철은 기온, 여름철은 유량 및 기온, 가을철은 유량 및 기온이었다. 비록 기온이 다른 환경인자들에 비하여 수온과의 상관성이 비교적 높게 나타났지만, 상관계수는 계절별로 다르게 나타났다. 이 연구에서는 현장조사를 통한 울폐도와 일사량의 측정은 이루어지지 않았지만, Table 2에서 가을철에 봄철과 여름철보다 상관계수가 높게 나타난 것은 가을철에 지면 또는 수면에 도달하는 태양복사에너지의 양이 많기 때문에 수온변화에 직접적으로 영향을 미친 것으로 판단된다(e.g., Moore *et al.*, 2005; Nam *et al.*, 2019). 또한, 낙엽기에 해당하는 가을철에 감소하는 낙엽활엽수의 울폐도 및 적은 유량이 산지계류에 도달하는 일사량을 증가시킨 것으로 판단된다(i.e., Chikita *et al.*, 2018; Dugdale *et al.*, 2018).

이 연구의 결과와 유사하였던 Espi'rito-Santo *et al.*(2009)

Table 1. Summary table for daily distribution by monitoring data during each seasonal changes

	Spring	Summer	Fall
Precipitation (mm)	0.0~118.0	0.0~145.6	0.0~87.5
Runoff (mm)	0.09~38.3	0.05~42.1	0.14~17.7
Air temperature (°C)	4.9~19.5	13.8~29.5	1.4~19.8
Headwater stream temperature (°C)	6.9~17.7	12.2~26.3	3.6~19.3

Note: Monitoring data indicates range from minimum and maximum daily values during spring, summer, and fall.

의 연구에서는 계절별로 산지계류의 수온변화에 각각 미치는 영향인자가 다르다고 보고하였다. 즉, Table 2에서 여름철의 유량과 수온이 부의 상관관계를 나타낸 것은 여름철의 유량에 강우가 큰 비중을 차지하기 때문에 여름철에 기온이 높게 나타 나더라도 수온이 낮아진 것으로 판단된다(Hockey *et al.* 1982; Meier *et al.* 2003). 그러나 가을철에 유량과 수온이 정의 상관 관계를 보인 것은 이 시기의 유출은 강우보다는 토양수나 지하 수의 유입에 의존한 중간유출과 기저유출이 더 큰 비중을 차지 하기 때문으로 판단된다(Stefan and Preud'home, 1993; Stefan and Sinokrot, 1993; Webb and Walling, 1993).

산지계류 수온-기온의 관계를 봄철, 여름철 및 가을철로 구분한 결과는 Figure 3과 같다. 모든 계절 동안 산지계류의 수온 은 기온이 증가함에 따라 증가하는 경향이 나타났지만, 기온기는 여름철(0.763) > 가을철(0.736) > 봄철(0.526)의 순서로 다르게 경향을 보였다. 이는 봄철은 하강한 기온이 점차 상승하고, 여름철은 기온이 더 상승하거나 상승한 기온이 유지되며, 가을철은 상승한 기온이 점차 하강하는 등 계절별 기온-수온의

관계변화가 영향을 미친 것으로 판단된다(An and Lee, 2013; Nam *et al.*, 2019).

한편, 산지계류 수온-기온의 산포도 차이는 가을철이 봄철과 여름철에 비하여 작게 나타났다(Figure 3(a), (b), and (c)). 이는 가을철(낙엽기)에 율폐도가 감소하여 태양복사에너지가 수면에 직접적으로 도달하기 때문에, 기온변화에 따른 수온변 화가 즉각적으로 반응한 것으로 판단된다. 이와 같은 결과로서 가을철 산지계류의 수온이 기온과 높은 상관성(결정계수(R^2): 0.834)을 나타내었다.

선행연구에 따르면 하천의 수온-기온의 선형관계식의 결정 계수(R^2)는 0.835~0.911(e.g., An and Lee, 2013)로서, Figure 3의 결정계수(R^2) 0.476~0.834보다 높게 나타났는데, 이는 조사대상지가 산림유역 내 산지계류로서 바람, 온도, 습도 및 강수량 등 산림 미기상 요소(e.g., Lee *et al.*, 2015)가 산지 계류의 수온에 영향을 미치고 있다고 판단된다. 따라서 이 연구에서는 기존의 선행연구와 다르게 미기상 요소와 관련된 환경 인자들을 산지계류의 계절별 수온변화 예측에 적용하였다.

Table 2. Summary of correlation analysis between headwater stream temperature and environmental factors

	Spring	Summer	Fall
Precipitation	0.120	-0.128	0.088
	$p=0.275$	$p=0.084$	$p=0.322$
Runoff	0.023	-0.187	0.336
	$p=0.838$	$p=0.011$	$p<0.01$
Air temperature	0.690	0.696	0.913
	$p<0.01$	$p<0.01$	$p<0.01$

Note: Correlation is significant at $p<0.01$ and <0.05 levels as bold type using a Pearson's Product-Moment Correlation.

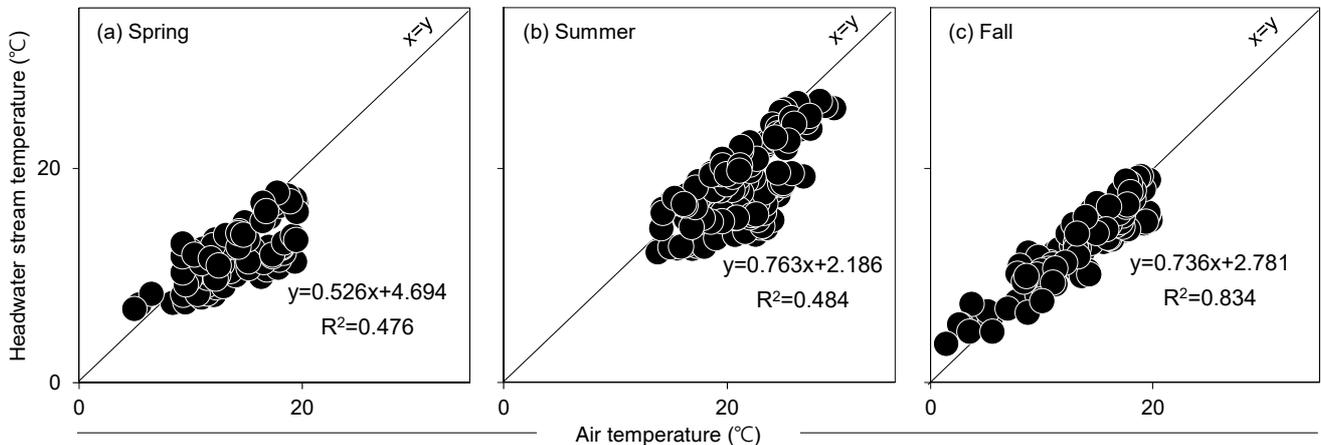


Figure 3. Relationship between air temperature and headwater stream temperature by mean values of daily during monitoring period, (a) spring (b) summer, and (c) fall.

3. 계절변화에 따른 산지계류의 수온 예측

비록 산지계류 수온-기온의 상관성은 다른 환경인자에 비하여 높았지만, 계절별 상관관계가 다르고 봄철과 여름철은 상관 계수가 낮게 나타났으므로 산지계류의 수온변화에는 다른 환경 인자가 복합적으로 작용했을 것으로 추측되었다(Table 2 and Figure 3). 따라서 계절별 수온변화의 예측모델의 정확도를 높이기 위해서는 기온뿐만 아니라 강우량 및 유량 등의 환경인자를 고려할 필요가 있다(i.e., Chikita *et al.*, 2018).

Table 3은 계절변화에 따른 산지계류의 수온 예측에 적합한 환경인자를 파악하고 예측모델을 도출하기 위하여 봄, 여름 및 가을철로 구분하여 기온뿐만 아니라 모든 환경인자를 반영하여 단계적 다중선형회귀분석을 실시하였다. 계절별 산지계류의 수온 예측을 위한 다중선형회귀식은 봄철 ($0.553 \times \text{기온} + 0.086 \times \text{유량} + 4.145$ ($R^2=0.505$; $p<0.01$))(Figure 4(a)), 여름철 ($0.756 \times \text{기온} + (-0.072) \times \text{유량} + 2.670$ ($R^2=0.510$; $p<0.01$))(Figure 4(b)), 가을철 ($0.738 \times \text{기온} + 0.028 \times \text{강우} + 2.660$ ($R^2=0.844$; $p<0.01$))(Figure 4(c))로 도출되었다. 결정계수(R^2)는 봄철(0.505) < 여름철(0.510) < 가을철(0.844)로서 가을철로 갈수록 증가하였

다. 특히, 도출된 회귀식은 계절별로 기온만으로 예측한 경우보다 결정계수(R^2)가 높게 나타났다(Figure 3 and Table 3).

예측된 산지계류의 수온을 검증하기 위해, 산출된 산지계류의 수온과의 차이를 Figure 5에 나타내었다. 관측기간 동안 예측된 산지계류의 일평균 수온은 봄철에는 $6.9 \sim 17.7^\circ\text{C}$ 로서, 산출된 일평균 수온 $7.0 \sim 16.3^\circ\text{C}$ 와는 $-3.5 \sim 3.7^\circ\text{C}$ 의 차이를 나타내었다. 여름철의 일평균 수온은 $12.2 \sim 26.3^\circ\text{C}$ 로서, 산출된 일평균 수온 $12.9 \sim 25.0^\circ\text{C}$ 와는 $-5.4 \sim 4.7^\circ\text{C}$ 의 차이를 나타내었으며, 가을철의 일평균 수온은 $3.6 \sim 19.3^\circ\text{C}$ 로서, 산출된 일평균 수온 $3.7 \sim 17.8^\circ\text{C}$ 와는 $-3.1 \sim 3.2^\circ\text{C}$ 의 차이를 나타내었다.

이 연구는 2년간의 현지 모니터링에 기초하여 산지계류의 수온변화에 영향을 미치는 환경인자를 분석하고, 계절별 산지계류의 수온 예측에 적절한 환경인자로 봄철과 여름철은 기온과 유량, 가을철은 기온과 강우를 도출하였다. 또한, 계절별 수온변화의 예측모델을 제시하고, 실측치와 비교하여 유효성을 검토하였다. 단, 공간적으로는 단일 산림유역에서 실시하였으므로 정밀도 높은 예측을 위해서는 지속적인 시·공간적 데이터의 확보가 중요하다고 판단된다.

Table 3. Summary of stepwise multiple linear regression analyses to estimate headwater stream temperature (WT)

Treatment	Equation	R^2	n	F-value	p-value
Spring	$WT = (0.553 \times \text{Air temperature}) + (0.086 \times \text{Runoff}) + 4.145$	0.505	84	41.357	<0.01
Summer	$WT = (0.756 \times \text{Air temperature}) + (-0.072 \times \text{Runoff}) + 2.670$	0.510	184	94.103	<0.01
Fall	$WT = (0.738 \times \text{Air temperature}) + (0.028 \times \text{Precipitation}) + 2.660$	0.844	128	339.188	<0.01

Note: Relationship between the headwater stream temperature (WT) and the other environmental factors (precipitation, runoff, and air temperature) are selected using a stepwise procedure. n indicate numbers of monitoring day. Correlation is significant at $p<0.01$ level using a stepwise regression.

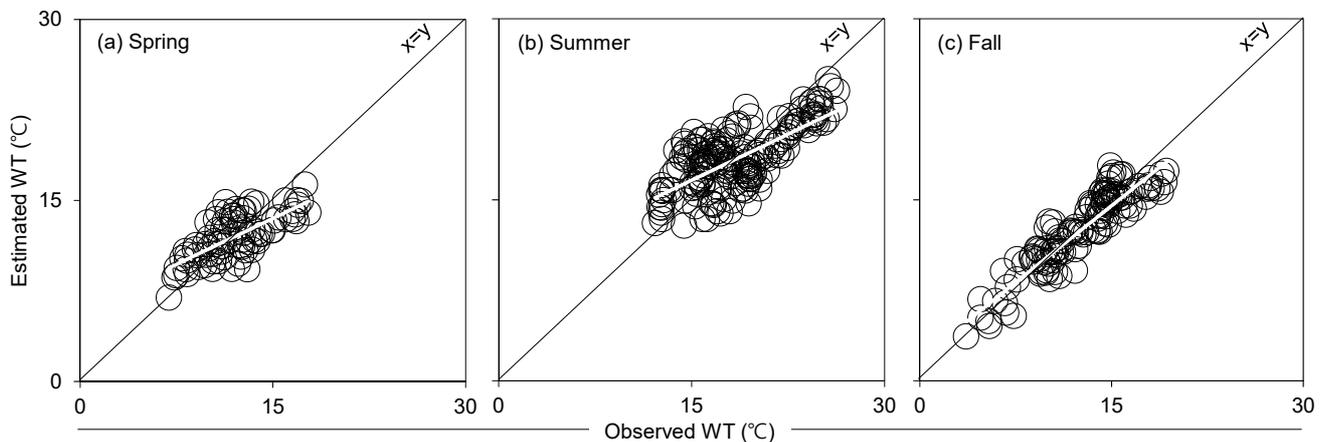


Figure 4. The relationship between observed and estimated headwater stream temperature (WT) by mean values of daily (a) spring, (b) summer, and (c) fall. The white lines indicate linear regression between observed and estimated WT for each seasonal changes.

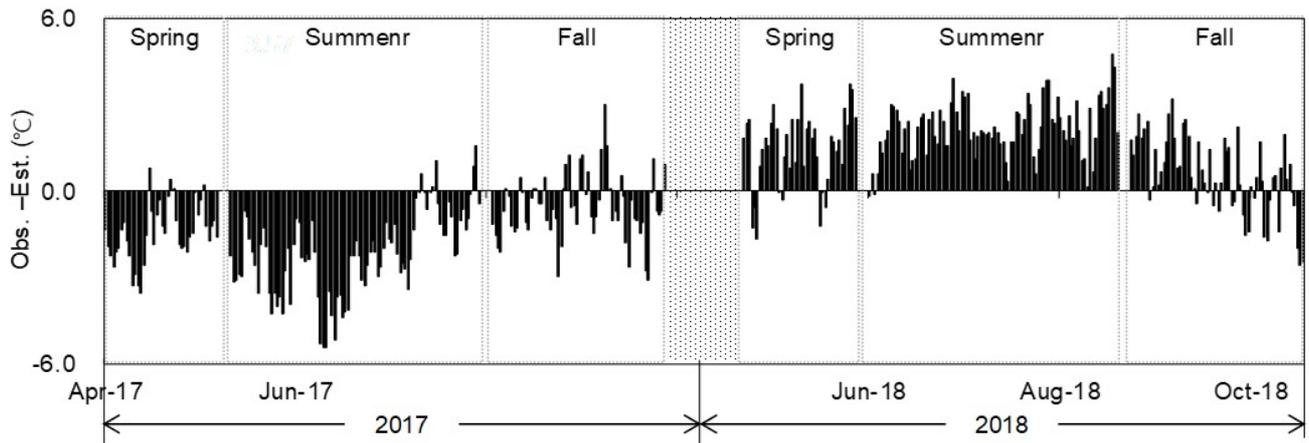


Figure 5. Differences between observed and estimated headwater stream temperature by mean values of daily during monitoring period (spring, summer, and fall). The dotted areas indicate values excluded because of missing data during winter and early spring.

향후 지속적인 현지 모니터링과 함께 상류의 산지계류부터 하류의 하천 또는 저수지까지 공간적 범위를 확대하여 상류에서부터 하류까지 수온의 종단적 변화와 함께 토지피복의 영향도 고려된다면 실용적인 유역 수계의 수온변화 예측모델이 도출될 것으로 기대되며, 이는 곧 유역의 수환경과 수생태계의 유지 및 관리를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

REFERENCES

- An, J.H. and K.H. Lee(2013) Correlation and hysteresis analysis of air-water temperature in four rivers: Preliminary study for water temperature prediction. *Journal of Environmental Policy* 12: 17-32. (in Korean with English abstract)
- Asselman, N.E.M., H. Middelkoop and P.M. Dijk(2003) The impact of change in climate and land use on soil erosion, transport and deposition of suspended sediment in the River Rhine. *Hydrological Processes* 17: 3225-3244.
- Beschta, R.L., R.E. Bilby, G.W. Brown, L.B. Holtby and T.D. Hofstra(1987) Stream Temperature and Aquatic Habitat: Fisheries and Forestry Interactions. In: *Streamside Management: Forestry and Fishery Interactions*, E.O Salo and T.W. Cundy (Editors). University of Washington, Institute of Forest Resources, Contribution No. 57. Seattle, Washington, pp. 191-232.
- Chang, H.J., J. Franczyk and C.W. Kim(2009) What is responsible for increasing flood risks? The case of Gangwon Province. *Korea Natural Hazards* 48: 339-354.
- Chikita, K.A.(2018) Environmental factors controlling stream water temperature in a forest catchment. *Geosciences* 4: 192-214.
- Cho, H.Y., K.H. Lee, K.J. Cho and J.S. Kim(2007) Correlation and hysteresis analysis between air and water temperatures in the Coastal Zone: Masan Bay. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineering* 19: 213-221. (in Korean with English abstract)
- Dugdale, S.J., I.A. Malcolm and K. Kantola(2018) Stream temperature under contrasting riparian forest cover: Understanding thermal dynamics and heat exchange processes. *Science of the Total Environment* 610-611: 1375-1389.
- Eaton, J.G. and R.M. Scheller(1996) Effects of climate warming on fish thermal habitat in streams of the United States. *Limnology and Oceanography* 41: 1109-1115.
- Espírito-Santo, H.M.V., W.E. Magnusson, J. Zuanon, F.P. Mendonca and V.L. Landeiro(2009) Seasonal variation in the composition of fish assemblages in small Amazonian forest streams: Evidence for predictable changes. *Freshwater Biology* 54: 536-548.
- Ha, K.J., E.H. Ha, C.S. Yoo and E.H. Jeon(2004) Temperature trends and extreme climate since 1909 at big four cities of Korea. *Korean Meteorological Society* 40: 1-16. (in Korean with English abstract)
- Heide, O.M.(2003) High autumn temperature delays spring bud burst in boreal trees, counterbalancing the effect of climatic warming. *Tree Physiology* 23: 931-936.
- Hockey, J.B., I.F. Owens and N.J. Tapper(1982) Empirical and theoretical models to isolate the effect of discharge on summer water temperatures in the Hurunui River. *Journal of Hydrology: New Zealand* 21: 1-12.
- IPCC(2001) *Climate Change 2001: The scientific basis*. Cambridge University Press.
- Isaak, D.J., S. Wollrab, D. Horan and G. Chandler (2012) *Climate*

- change effects on stream and river temperatures across the northwest U.S. from 1980-2009 and implications for salmonid fishes. *Climatic Change* 113: 499-524.
- Jun, J.H., K.H. Kim, J.Y. Yoo, H.T. Choi and Y.H. Jeong(2007) Variation of suspended solid concentration, electrical conductivity and pH of stream water in regrowth and rehabilitation forested catchments, South Korea. *Journal of Korean Forest Society* 96: 21-28. (in Korean with English abstract)
- Kim, I.J. and D.H. Han(2008) A small stream management plan to protect the aquatic ecosystem. Korea Environment Institute, Sejong, Korea, 167pp.
- Kim, J.S. and S. Jain(2011) Precipitation trends over the Korean peninsula: Typhoon-induced changes and a typology for characterizing climate-related risk. *Environmental Research Letters* 6: 034033.
- Kobayashi, D., Y. Ishii and Y. Kodama(1999) Stream temperature, specific conductance and runoff process in mountain watersheds. *Hydrological Process* 13:865-876.
- Korea Forest Service(2019) 2019 Statistical yearbook of forestry, 444pp.
- Lane, R.J., W. Day, B. Marx, E. Reyes, E. Hyfield and J.N. Day(2007). The effects of riverine discharge on temperature, suspended sediments, and chlorophyll a in a Mississippi delta estuary measured using a flow-thorough system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 74: 145-154.
- Lee, S.J., Y.H. Choi, J.H. Jung, M.S. Won and G.H. Lim(2015) Development of optimal modeling system for analyzing mountain micrometeorology. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 17: 165-172. (in Korean with English abstract)
- Meier, W., C. Bonjour, A. Wüest and P. Reichert(2003) Modeling the effect of water diversion on the temperature of mountain streams. *Journal of Environmental Engineering* 129: 755-764.
- Moore, R.D., D.L. Spittlehouse and A. Story(2005) Riparian microclimate and stream temperature response to forest harvesting: A review. *Journal of the American Water Resources Association* 41: 813-834.
- Nakamura, F. and T. Dokai(1989) Estimation of the effect of riparian forest on stream temperature based on heat budget. *Journal of the Japanese Forestry Society* 71: 387-394. (in Japanese with English abstract)
- Nam, S., H.T. Choi and H. Lim(2019) Seasonal variations of stream water temperature and its affecting factors on mountain areas. *Journal of Korean Society on Water Environment* 35: 308-315. (in Korean with English abstract)
- Park, J.C. and H.H. Lee(2000) Variations of stream water quality caused by discharge change. *Journal of Korean Forest Society* 89: 342-355. (in Korean with English abstract)
- Park, J.S., K.R. Kim, C.B. Cho, M.S. Kang and B.J. Kim(2016) Spatio-temporal characteristics of air and water temperature change in the middle reach of the Nakdong River. *Journal of Environmental Policy and Administration* 9: 233-253. (in Korean with English abstract)
- Poole, G.C. and C.H. Berman(2001) An ecological perspective on in-stream temperature: Natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation. *Environmental Management* 27: 787-802.
- Stefan, H.G. and B.A. Sinokrot(1993) Projected global climate change impact on water temperatures in five north central US stream. *Climate Change* 24: 353-381.
- Stefan, H.G. and E.B. Preud'home(1993) Stream temperature estimation from air temperature. *Water Resources Research* 29: 27-45.
- Stockle, C.O., P.T. Dyke, J.R. Williams, C.A. Jones and N.J. Rosenberg(1992) A method for estimating the direct and climate 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.
- Subehi, L., T. Fukushima, Y. Onda, S. Mizugaki, T. Gomi, K. Kosugi, S. Hiramatsu, H. Kitahara, T. Kosugi and T. Terajima(2010) Analysis of stream water temperature changes during rainfall events in forested watersheds. *Limnology* 11: 115-124.
- Tague, C., M. Farrell, G. Grant, S. Lewis and S. Rey(2007) Hydrogeologic controls on summer stream temperatures in the McKenzie Riverbasin, Oregon. *Hydrological Processes* 21: 3288-3300.
- Webb, B.W. and D.E. Walling(1993) Longer-term water temperature behavior in an upland stream. *Hydrological Processes* 7: 19-32.
- Worrall, J.(1993) Temperature effects on bud-burst and leaf-fall in subalpine larch. *Journal of Sustainable Forestry* 1: 1-18.