Journal of Korean Society on Water Environment, Vol. 35, No. 4, pp. 308-315 (July, 2019)
pISSN 2289-0971 eISSN 2289-098X https://doi.org/10.15681/KSWE.2019.35.4.308

산지계류의 계절적 수온변동 특성 및 영향인자 분석

남수연[a] · 최형태[b,†] · 임홍근[c]

국립산림과학원 산림보전연구부 산림 육성 · 복원연구과

Seasonal Variations of Stream Water Temperature and its Affecting Factors on Mountain Areas

Sooyoun Nam[a] • Hyung Tae Choi[b,†] • Honggeun Lim[c]

Forest Conservation Department, National Institute of Forest Science
(Received 30 April 2019, Revised 27 June 2019, Accepted 10 July 2019)

Abstract

The objective of this study was to investigate mountain stream water and air temperatures, area, latitude, altitude, and forest coverage in headwater catchments located in Kangwon-do, Mid-eastern Korea from 2015 to 2017. Daily mean value of mountain stream water temperature was approximately 6 ℃ lower than the daily mean value of air temperature on the monitoring sites during the observation period. Monthly mean value of mountain stream water temperature increased with increasing monthly mean value of air temperature from May to August during the observation period. Seasonal variations of mountain stream water temperature were dependent on air temperature rising and falling periods. Correlation analysis was conducted on mountain stream water temperature to investigate its relationship with air temperature, area, latitude, altitude, and forest coverage of air temperature rising and falling periods. The correlation analysis showed that there exists a relationship (Correlation coefficient: -0.581 ~ 0.825; $p<0.05$), particularly the air temperature showed highest correlation with mountain stream water temperature. Regression equations could be developed due to contribution of air temperature to affect mountain stream water temperature (Correlation coefficient: 0.742 and 0.825; $p<0.01$). Therefore, a method using various parameters based on air temperature rising and falling periods, could be recommended for predicting mountain stream water temperature.

Key words : Air temperature falling period, Air temperature rising period, Mountain stream water, Regression equation

[a] 박사후연구원(Postdoctoral Fellow), sysayks@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5883-476X
[b,†] Corresponding author, 연구관 (Ph.D. Researcher), choiht@korea.kr, https://orcid.org/0000-0002-5472-9820
[c] 연구원(Research Assistant), hgh3514@korea.kr, http://orcid.org/0000-0001-6986-6142

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

우리나라는 전국토의 64 %가 산림으로 피복되어 있기 때문에, 수자원 공급 및 관리 측면에서 산지계류에 관한 연구가 중요하다고 할 수 있다(Jun et al., 2007). 특히, 산지계류는 물과 토사 및 각종 영양, 유기물들의 근원지인 동시에 이들을 하류의 대하천까지 공급하는 중간지대로서 중요한 역할을 가지고 있다(Kim et al., 2011). 산지계류 수질은 하천수질기준 1급수에 해당하며, 하류의 하천이나 호수에 유입되어 수질에 영향을 미치고 있다(Park and Lee, 2000). 특히, 산지계류는 풍부한 생물의 종다양성을 유지하고 있으며, 수계의 건전한 계류생태계에 크게 기여하고 있다(Meyer et al., 2007). 결국, 하류의 하천을 포함한 유역의 특성은 산지계류의 동태에 의해서 결정된다고 할 수 있다(Gomi et al, 2002: Meyer and Wallance, 2001).

최근 지구 온난화로 인한 기온의 상승은 수온변화로 이어져 수생물의 개체수 및 서식지 변화를 발생시키고 있다(Lee, 2014). Bouck et al. (1975)의 연구에서도 수온이 24 ℃ 이상으로 유지 될 경우 연어와 같은 냉수성 어종의 생존에 문제가 발생할 수 있음을 나타냈다. 특히, 수온 상승으로 인한 용존산소의 감소는 오염물질을 분해하는 역할을 가진 호기성 미생물의 객체 수 및 활동성 감소와 연결되어 물의 부영양화를 유발시킨다(Eaton and Scheller, 1996). 이와 같이 수온변화는 수생태계 및 수질환경과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 이는 유역의 근원이 되는 산지계류의 물이용에 관한 지속가능한 유지 및 관리 측면에서 중요하다고 할 수 있다.

수온에 영향을 주는 인자는 강우, 증발산, 기온과 같은 기후인자, 물의 유출에 의한 수문학적 인자 및 고도, 경사, 피복율, 면적 등을 포함하고 있는 지형인자가 있으며, 이를 평가하기 위해 다양한 연구가 국내외에서 실시되고 있다(An and Lee, 2013; Lee, 2014; Mattews and Berg, 1997; Piccolroaz et al., 2013). 수온에 영향을 주는 인자 중, 기온변화에 따른 수온에 관해 Moore (2006)는 브리티쉬 콜롬비아주에 위치하고 있는 하천유역에서는 여름철 기온 상승으로 평균 수온이 약 1.4 ℃까지 상승했다고 보고했다. Lane et al. (2007)의 연구에서는 미시시피 강 하구에서 기온이 상승할 때(>30 ℃) 수온이 상승하였으며, 기온이 하강할 때(<12 ℃)에는 수온이 하강한 결과를 통해, 기온-수온 상관관계를 제시하였다. Park et al. (2016)은 낙동강유역에서 6월 중 평균 수온이 0.2 ~ 0.7℃ 상승하고, 9월은 0.2 ~ 1.1℃ 하강했다는 결과를 도출하였다.

수온과 기온의 관계를 이용한 연구뿐만 아니라, 고도, 경사, 유역면적, 산림 피복율 등 지형 및 토지이용 특성의 영향인자들을 이용한 연구도 진행되고 있다(Guenther et al.., 2014; Subehi et al.., 2010; Subehi et al., 2009). Jacobsen et al. (1997)는 열대지방의 낮은 고도 및 낮은 위도에서 자생하고 있는 수중생물은 기후변화에 따른 수온 상승으로 새로운 서식지 환경의 적응을 위한 생존 경쟁에 따라 개체수 감소가 나타났다고 보고한 바 있다. Steel et al. (2016)의 연구에서는 하천유역에서 고도가 상승함에 따라 수온변화는 여름철에는 -6.2 ℃, 겨울철에는 -9.8 ℃ 하강하였다. Subehi et al. (2009)은 산림유역의 면적에 따라 소(<0.5ha)유역에서는 산림 피복율, 강우, 기온 및 표면유출이 수온 변화의 영향을 미치고 있었으며, 중(0.5 ~ 100ha)유역에서는 경사 및 산림 피복율, 지하수 유출시간이, 대(>100ha)유역에서는 기온 및 태양복사 등의 기상상태가 수온변화에 영향을 미치고 있다는 연구결과를 제시하였다. Moore et al. (2005)은 산지계류의 유로 폭과 수관울폐도가 수온변화와 유의한 관계가 있음을 밝혔다. 따라서 산지계류는 그 특징에 따라 수온에 다양한 영향을 미칠 수 있으므로, 수온 예측에 적합한 인자의 결정이 필요하다.

우리나라에서는 4대강을 중심으로 수온변화에 대한 영향요인 분석 및 예측에 관한 연구가 실시된 바 있으나(An and Lee, 2013; Lee, 2014; Yoon et al., 2008), 산지계류에서의 수온연구는 상대적으로 부족하다. 특히, 전국에 설치되어 있는 기온관측망과 비교하여 산지계류에 설치된 수온관측망의 확인이 어려운 실정이므로 수생태계 및 수질환경을 파악하는 중요한 인자에 해당하는 수온자료를 이용한 장기적인 물환경 변화를 파악하는 것은 곤란하다. 본 연구에서는 기온변화에 상응하는 수온변화를 파악하고, 산지계류의 계절적 수온변동에 따른 영향인자 분석을 통해 수온의 예측모델을 제시하고자 한다.

2. Materials and Methods

2.1 연구대상지 및 관측자료

연구대상지는 강원도 영서지방 4개 시군(화천군, 춘천시, 홍천군, 평창군)과 경기도 남양주 진접읍에 위치한 총 9개소의 산림유역이다(Fig. 1). Table 1에서는 연구대상지의 특징을 나타내고 있다. 유역면적은 90 ~ 846ha, 고도분포는 254 ~ 755m이며, 산림 피복율은 90 ~ 100 %이다. 임상은 대부분이 활엽수림 및 혼효림으로 구성된 천연림이다.

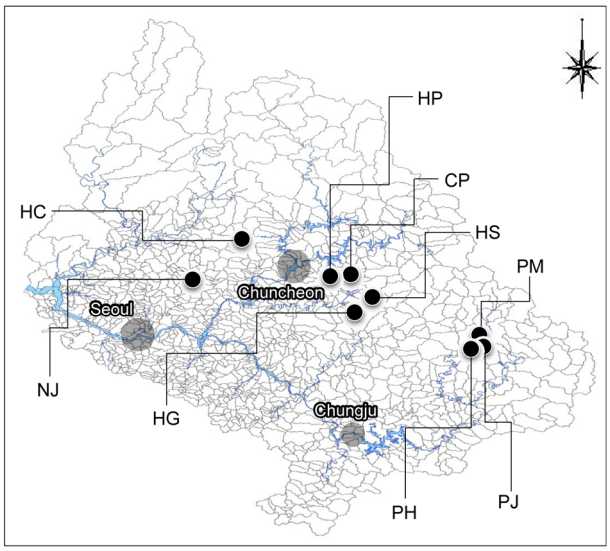

Fig. 1. Locations of the mountain stream water temperature monitoring sites.

Table 1. Mountain stream water temperature on the monitoring sites

Section	Site ID	Location	Latitude (°)	Longitude (°)	Area (ha)	Altitude (m)	Forest cover* (%)	Nearest weather station	Distance from the station (km)
Training	HC	Hwacheon Gwangdeok-ri	38.0454	127.4688	277	444	90.2	Sanae	5.6
	CP	Chuncheon Pumgeol-ri	37.8481	127.9432	846	470	93.1		7.6
	HP	Hongcheon Pungcheon-ri	37.8389	127.8875	90	391	98.4	Hwacheon	10.2
	HG	Hongcheon Guneop-ri	37.7357	128.0464	606	287	96.9		8.0
	HS	Hongcheon Sokcho-ri	37.6639	127.9742	419	254	99.8	Hongcheon	8.5
	PH	Pyeongchang Haanmi-ri	37.4656	128.4984	216	658	96.9		10.2
	PM	Pyeongchang Makdong-ri	37.5770	128.5300	328	755	100.0	Daehwa	8.4
	PJ	Pyeongchang Jangjeon-ri	37.4772	128.5413	555	679	98.7		11.6
Test	NJ	Namyangju Jinjeop-eup	37.7365	127.1590	155	118	100.0	Gwangneung	2.5

Note: ID indicates catchment ID. Distance was from meteorological station. Asterisk (*) is percentage of forest cover cited by forest map (1:5,000), Korea Forest Service.

9개소 산지계류에서 산지계류의 수온 측정은 2015년 6월 26일 ~ 9월 22일, 2016년 5월 1일 ~ 10월 10일, 2017년 5월 1일 ~ 10월 31일까지 3년간 실시하였다. 동절기에는 산지계류의 유량 부족 및 동결로 인해 관측을 중지하였다. 산지계류의 수온은 수온 측정이 가능한 압력식 수위계(OTT-Orpheus Mini Water Level Logger, OTT Messtechnik, Germany)를 이용하여 10분 간격으로 측정하였으며, 측정한 수온 자료를 바탕으로 일평균값을 산출하였다. 기온은 Table 1과 같이 산지계류의 수온 측정지점에서 지리적으로 2.5 ~ 11.6 km내에 위치하고 있는 화천군 사내면, 홍천군 화촌면, 홍천군 홍천읍, 평창군 대화면, 남양주시 진접읍에 위치한 자동 기상 관측소(Automatic Weather System, AWS)에서 측정된 1시간 간격의 데이터를 이용해서 일평균값을 산출하였다.

2.2 분석방법

본 연구에서는 산지계류의 수온에 영향을 주는 인자 중, 기온과 수온 관계를 파악하기 위하여 기온의 증감에 따른 수온의 증감이 서로 다른 곡선을 따라 변화하는 계절적 수온변동을 적용하여 분석하였다. 이를 위하여 기온자료를 기준으로 동절기를 제외한 계절적 상승기(5 ~ 7월)와 하강기(8 ~ 10월)로 구분하였다(Cho et al., 2007; Lee, 2014; Subehi et al., 2010).

Table 1에서와 같이 총 9개 산림유역 중 검증용으로 사용할 경기도 남양주 진접읍 산림유역을 제외한 8개 산림유역에서 측정된 산지계류의 수온, 기온, 유역면적, 위도, 고도 및 산림 피복율 등의 자료를 바탕으로 상관분석 및 다중회귀식을 도출하였다.

상관분석은 두 변수간에 어떤 선형적 관계를 갖고 있는지를 분석하는 방법으로, 본 논문에서는 산지계류의 수온과 영향 인자와의 연관된 정도를 알기 위해서 적용하였다. 또한, 다중회귀식은 서로 복합적인 관계에서 어떤 독립변수들이 영향을 미치는지를 파악할 수 있는 분석방법으로서, 본 논문에서는 각 영향인자 자료들의 선형적인 합의 관계로 산지계류의 수온을 예측하였다(Anh et al., 2014; Lee et al., 2014). 자료의 통계적 분석은 Statistical Package for Social Sciences (SPSS), version 19을 이용하였다.

3. Results and Discussion

3.1 산지계류의 수온특성

Table 2에서 측정 기간 동안(2015년 6월 26일 ~ 9월 22일, 2016년 5월 1일 ~ 10월 10일, 2017년 5월 1일 ~ 10월 31일), 산지계류의 일평균 기온과 수온을 나타내고 있다. 일평균 기온은 사내 2.0 ~ 26.9 ℃, 화촌 4.3 ~ 28.7 ℃, 홍천 4.9 ~ 29.9 ℃, 대화 3.2 ~ 25.7 ℃으로 나타났으며, 일평균 수온은 화천 광덕리(HC) 7.9 ~ 21.4 ℃, 춘천 품걸리(CP) 7.5 ~ 21.5 ℃이며, 홍천 풍천리(HP) 7.6 ~ 21.3 ℃, 홍천 군업리(HG) 8.0 ~ 23.2 ℃, 홍천 속초리(HS) 7.7 ~ 23.5 ℃이며, 평창 하안미리(PH) 9.0 ~ 18.3 ℃, 평창 막동리(PM) 7.4 ~ 18.8 ℃, 평창 장전리(PJ) 7.0 ~ 18.8 ℃로 나타났다. 산지계류에서 관측지점의 기온은 고도가 높은 사내(298m) 및 평창(561m)지역을 제외하고는 화촌(187m)과 홍천(140m)지역에서 유사한 범위를 나타내고 있었으며, 수온은 7.0 ~ 23.5 ℃의 유사한 범위를 나타내고 있었다.

전체적으로 산지계류의 관측지점간 기온의 변화는 2.0 ~ 29.9 ℃이며, 수온의 변화는 7.0 ~ 23.5 ℃으로 수온의 변화범위가 기온의 변화범위 보다 6 ℃ 정도 낮게 나타났다. An and Lee (2013)의 연구에서 한강유역은 기온의 변화는 10.1 ~ 12.6, 수온의 변화는 11.2 ~ 14.6 ℃ 정도로 수온의 변화범위가 기온의 변화범위보다 2 ℃ 정도 낮게 파악되었다. 이는 산지계류가 상대적으로 높은 고도(>250m)에 위치하고, 산림 피복율(>90 %)이 높기 때문인 것으로 판단되는데, 높은 산림 피복율로 인한 울폐도 증가로 지표면에 도달하는 태양복사량이 감소하였기 때문으로 사료된다(Becker et al., 2004; Steel et al., 2016; Webb et al., 2008). Moore et al. (2005)의 연구에서도 유사하게 산지계류의 수온은 산림 피복율이 증가하면 수온이 5 ℃까지 하강한다고 보고한바 있다.

Table 2. Daily mean mountain stream water and air temperatures of the monitoring sites during observed period

Site ID	Mountain stream water temperature (℃)		Nearest weather station	Air temperature (℃)	
	MEAN ± SD	Range (Min. ~ Max.)		MEAN ± SD	Range (Min. ~ Max.)
HC	16.4 ± 2.6	7.9 ~ 21.4	Sanae	19.2 ± 4.4	2.0 ~ 26.9
CP	16.4 ± 2.5	7.5 ~ 21.5			
HP	16.4 ± 2.6	7.6 ~ 21.3	Hwachon	20.9 ± 4.4	4.3 ~ 28.7
HG	17.5 ± 2.8	8.0 ~ 23.2			
HS	18.2 ± 3.0	7.7 ~ 23.5	Hongcheon	22.0 ± 4.5	4.9 ~ 29.9
PH	13.9 ± 1.9	9.0 ~ 18.3			
PM	13.8 ± 2.2	7.4 ~ 18.8	Daehwa	18.4 ± 4.1	3.2 ~ 25.7
PJ	12.7 ± 2.0	7.0 ~ 18.8			

Note: SD: Standard deviation, Min. and Max: minimum and maximum value.

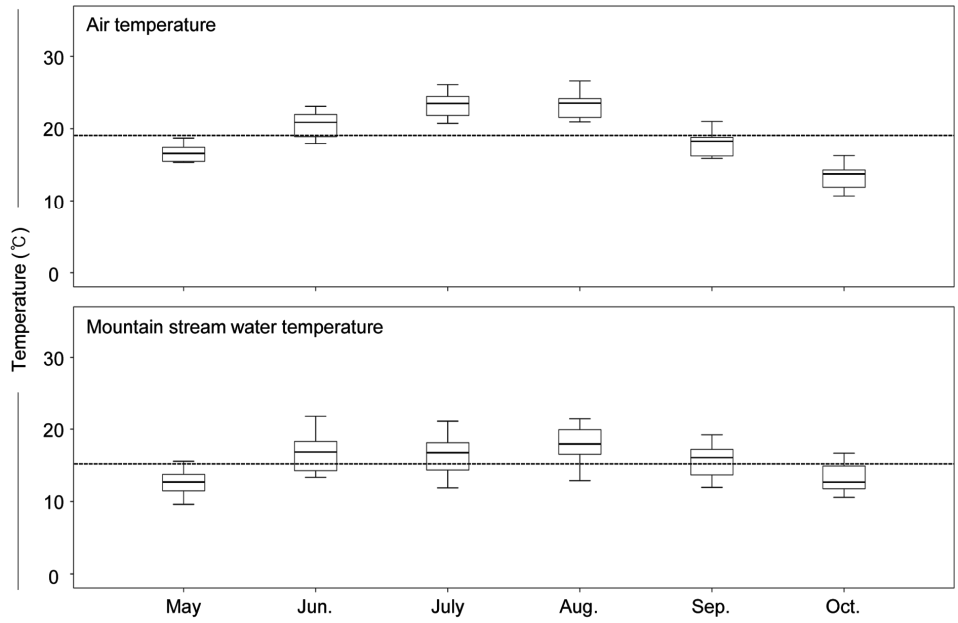

Fig. 2. Box plots of monthly distributions of daily mean air and mountain stream water temperatures of the monitoring sites during observed period. The upper and lower hinges correspond to the first and third quartiles(the 25th and 75th percentiles), respectively. The whiskers extend from the hinges to the highest and lowest values that are within 1.5 (the inter-quartile range). Values beyond the end of the whiskers are outliers and plotted as points. Dashed line represents mean value of total daily mean air and mountain stream water temperatures of the monitoring sites during observed period.

Fig. 2에서는 산지계류 관측지점의 월평균 기온은 9.0 ~ 26.6 ℃이며, 월평균 수온은 9.6 ~ 21.6 ℃으로 산지계류의 기온 상승에 따라 수온이 상승하고 있지만, 수온변화의 폭은 기온보다 작게 나타났다. 이는 물이 공기에 비하여 비열이 크다는 물리적 특성 때문인 것으로 판단된다(Crisp and Howson, 1982; Webb and Nobilis, 1997). 또한, 수면은 여름철이 겨울철보다 증발로 인한 잠열 손실이 크며, 지하수나 융설이 유입부로 들어오는 경우는 계절적으로 다른 형태를 가지게 된다(Stefan and Preud'home, 1993; Stefan and Sinokrot, 1993). 따라서 봄철(또는 늦겨울)에서 여름철로 이동하는 온도 상승시기와 가을철(또는 늦여름)에서 겨울철로 이동하는 온도 하강시기에 따른 계절적 수온변동의 특성을 분석하고자한다.

3.2 계절적 수온변동 및 상관관계 분석

Fig. 3a와 b에서는 기온자료를 기준으로 동절기를 제외한 전 관측기간을 기온 상승기(5 ~ 7월)와 하강기(8 ~ 10월)로 구분하여 검토하였다(Crisp and Howson, 1982; Webb and Nobilis, 1997). An and Lee (2013)는 물이 공기에 비하여 비열이 크기 때문에, 수온이 기온에 비하여 지체하는 현상을 나타낸다는 연구결과를 발표했다. 또한, Park et al. (2016)에서도 물과 공기의 열용량 차이로 인하여 기온 상승기에는 수온이 기온보다 높은 상태로 상승하며, 기온 하강기에서 상승한 수온이 하강하는데 시간이 지연된다는 유사한 연구결과를 나타내고 있다.

산지계류의 수온에 영향을 미치는 인자로는 기온, 고도, 경

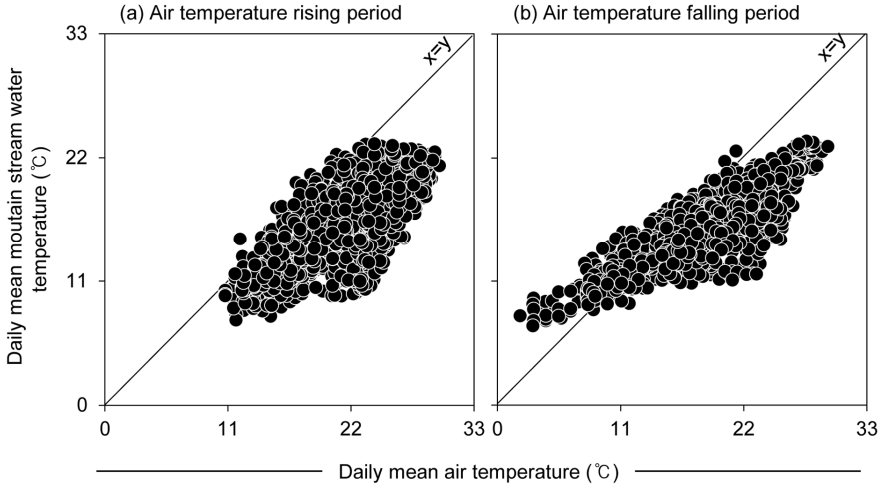

Fig. 3. Daily mean temperature between air and mountain stream water separated to air temperature (a) rising and (b) falling periods.

사, 유역면적, 산림 피복율 등 지형 및 토지이용 특성 등이 있다(Guenther et al.., 2014; Jacobsen et al., 1997; Park et al., 2016; Subehi et al.., 2010; Subehi et al.., 2009). 비록 수온에 영향을 미치는 인자들이 다양하게 존재하고 있지만, 수온 예측에 있어서 적합한 모형과 인자를 선정하기 위해서는 그 대상이 되는 산지계류의 특성을 고려해야 한다. 이에 본 연구에서는 기온 상승기와 하강기의 결과를 바탕으로 Table 3에서와 같이 기온을 포함한 유역면적, 위도, 고도, 산림 피복율 등을 수온변화의 설명인자로서 이용하였다.

그 결과, 영향 인자들은 기온 상승기와 하강기에서 수온과 유의성(p<0.01)을 나타내고 있었으며, 고도(-0.581, -0.549) 및 산림 피복율(-0.122, -0.137)과는 음의 상관관계를 나타내고 있었다. 이는 An and Lee (2013)의 연구와 유사한 경향으로, 하천유역의 경우에도 지형적으로 그 영향인자에 따라 기온 상승기와 하강기에서 특징이 다르게 나타나고 있었다. Huang et al. (2008)의 연구에서도 지형의 공간적 다양성으로 인한 유로 흐름의 변화는 수온변화와 관계되는 영향인자들이 미치는 정도의 차이가 발생된다고 보고한바 있다.

3.3 회귀분석을 이용한 산지계류의 수온 예측

Table 3의 분석 결과에서 선정된 모든 인자들은 산지계류의 수온에 대한 기온 상승기와 하강기에서 유의성이 나타났기 때문에 다중회귀식 산출에 포함하였다. Table 4는 산지계류의 기온 상승기 및 하강기에 따른 다중회귀식을 나타낸 것으로서, 결정계수(R^2)는 0.678, 0.835으로서 1 % 수준에서 유의한 것으로 분석되었으며, 이는 산지계류의 수온은 모든 영향인자와 높은 상관관계가 있다고 판단된다. 특히, 기온 상승기와 하강기에서 모두 기온과 수온 간에 상관관계(0.742, 0.825; p<0.01)를 확인하였으며(Table 3), 이로 인해 다중회귀방정식의 예측도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 4는 2015 ~ 2017년 경기도 남양주시 진접읍에 위치한 산림유역에서 측정된 산지계류의 수온, 기온, 유역면적, 위도, 고도 및 산림 피복율 등의 자료를 이용하여 Table 4에 제시한 다중회귀식을 검증한 결과이다. 다중회귀식을 통해 예측된 수온은 11.4 ~ 25.7 ℃로서, 실측한 수온인 14.0 ~ 20.8 ℃와는 - 6.0 ~ 3.2 ℃ 차이를 보였다. 예측된 수온과 실측한 수온 간의 결정계수(R^2)는 0.434로서 1 % 수준에서 유의하였다. 이는 기온을 이용한 수온 예측값이 실측값의 약 79 %에 달하는 결과를 도출한 Moore (2006)의 연구결과와 유사하였다. 또한 수온을 포함한 강우 등의 영향인자를 통해 예측된 수온 예측값과 실측값이 0.086의 유의 수준의 차이를 나타낸 Saila et al. (2004)의 연구와도 유사한 결과를 도출하였다.

Fig. 5는 검증용으로 사용한 경기도 남양주 진접읍 산림유역을 제외한 8개 산림유역에서 실측된 산지계류의 월평균

Table 3. Correlation analysis between mountain stream water temperature and various parameters of air temperature rising and falling periods.

	Air temperature rising period		Air temperature falling period	
	Correlation coefficient	p-value	Correlation coefficient	p-value
Air temperature	**0.742**	<0.01	**0.825**	<0.01
Area	**0.094**	<0.01	**0.054**	**0.034**
Latitude	**0.364**	<0.01	**0.380**	<0.01
Altitude	**-0.581**	<0.01	**-0.549**	<0.01
Forest cover	**-0.122**	<0.01	**-0.137**	<0.01

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

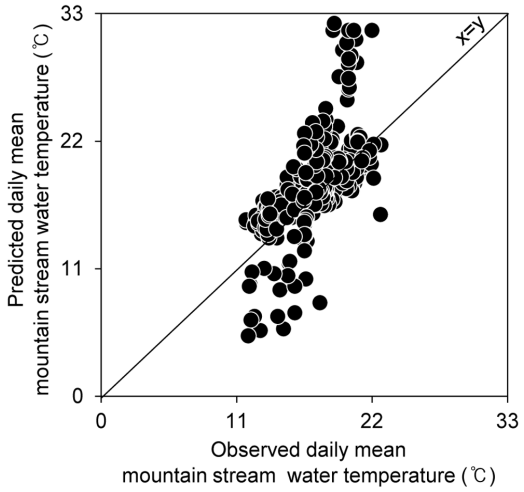

Fig. 4. Observed and predicted values of daily mean mountain stream water temperature for evaluating the regression equation located in Jinjeop-Eup, Namyangju-Si.

수온과 다중회귀식을 통해 예측된 산지계류의 월평균 수온을 나타낸 것이다. 다중회귀식을 통해 예측된 산지계류의 월평균 수온은 연구기간 동안 12.2 ~ 18.2 ℃로서, 실측한 월평균 수온인 11.9 ~ 18.9 ℃와는 -1.5 ~ 1.8 ℃ 차이를 보였다. 예측된 월평균 수온과 실측한 월평균 수온 간의 결정계수(R^2)는 0.737로서 1 % 수준에서 유의하였다. 이는 산지계류의 수온과 높은 유의성(0.742, 0.825)을 나타낸 기온자료를 포함하여 다중회귀식을 예측하였기 때문에, 예측된 수온자료의 결정계수가 높게 나타났다고 판단된다.

본 연구는 제한된 영향인자와 더불어 유량이 포함되지 않았으며, 지역적으로도 강원도에 편중되었다고 할 수 있으므로, 좀 더 많은 지역과 더불어 세부적인 영향인자를 이용한 실험이 차후 연구에서 요구된다. 기후변화 심화에 따라 산지계류 수자원 환경의 변화가 예상되므로, 좀 더 정확한 수온의 예측은 산지계류의 수질평가 및 지속가능한 이용에 중요한 평가 자료로 활용 될 것으로 기대된다.

4. Conclusion

산지계류의 수온변화는 수생태계 및 수질환경과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 이는 하류의 하천에 영향을 미치고 있다. 향후, 기후변화에 따라 산지계류 환경의 변화가 예상됨에 따라 수온변화의 예측에 기반한 산지계류 수생태계 보전 대책의 마련이 필수적이다. 이를 위해 본 연구에서는 강원도 화천군, 춘천시, 평창군과 경기도 남양주시 진접읍에 위치한 산림유역을 대상으로 2015년부터 2017년까지 기온, 수온, 유역면적, 위도, 고도 및 산림 피복율을 이용하여 산지계류의 수온변화 특성을 분석하였다.

산지계류에서 관측지점간의 기온의 변화는 2.0~29.9 ℃이며, 수온의 변화는 7.0 ~ 23.5 ℃으로 수온의 변화범위가 기온의 변화범위 보다 6 ℃ 정도 낮게 나타났다. 기온 상승기와 하강기로 분리하여 수온과 그 영향인자들과의 상관관계를 분석한 결과, 모든 인자들이 기온의 상승기와 하강기에서 수온과 유의성(p<0.01)을 나타내었다. 상관분석 결과를 이용

Table 4. Regression equation to predict daily mean mountain stream water temperature using parameters of air temperature rising and falling periods.

Variable	Regression equation	R^2	p-value
Mountain stream $water_R$	(0.482×Air temperature) + (-0.0002×Area) + (0.600×Latitude) + (-0.006×Altitude) + (-0.044×Forest cover) - 9.803	0.678	<0.01
Mountain stream $water_F$	(0.497×Air temperature) + (-0.001×Area) + (1.698×Latitude) + (-0.006×Altitude) + (-0.035×Forest cover) - 50.989	0.835	<0.01

Note: Mountain stream $water_R$ and Mountain stream $water_F$ indicated mountain stream water temperature of air temperature rising and falling periods; Correlation is significant at p<0.01 level using a stepwise regression.

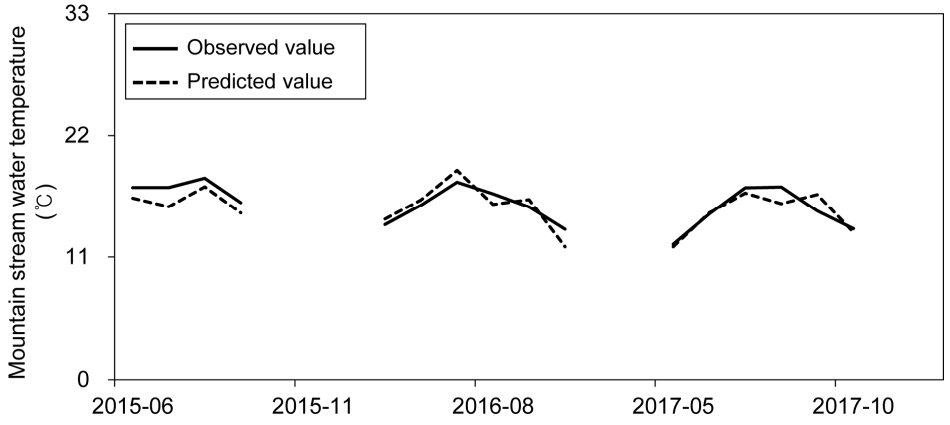

Fig. 5. Distributions of observed and predicted values for monthly mean mountain stream water temperature. Thick and broken lines indicated observed and predicted values, respectively.

한 다중회귀방정식을 산출한 결과, 결정계수(R^2)는 0.678, 0.835으로서 1% 수준에서 유의한 것으로 분석되었다. 특히, 기온의 상승기와 하강기에서는 기온-수온 상관관계(0.436 ~ 0.886; p<0.01)를 확인하였으며, 이로 인해 다중회귀방정식의 예측도가 높게 나타났다.

따라서, 본 연구에서는 기온변화에 상응하는 수온변화를 파악하였으며, 산지계류의 계절적 수온변동에 따른 영향인자 분석을 통해, 산지계류의 수온 예측을 위한 다중회귀방정식을 제시하였다. 하지만, 본 연구에서 도출된 다중회귀방정식은 한정된 유역에서 제한된 영향인자들을 이용하여 분석하였으므로, 차후의 연구에서는 좀 더 많은 지역과 더불어 보다 다양한 영향인자를 이용한 실험이 필요하다고 판단된다.

References

An, J. H. and Lee, K. H. (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]

Anh, P. T. Q., Gomi, T., MacDonlad, L. H., Mizugaki, S., Khoa, P. V., and Furuichi, T. (2014). Linkage among land use, macronutrient levels, and soil erosion in northern Vietnam: A plot-scale study, *Geoderma*, 232-234, 352-362.

Becker, M. W., Georgian, T., Ambrose, H., Siniscalchi, K., and Fredrick, K. (2004). Estimating flow and flux of ground water discharge using water, *Journal of Hydrology*, 296, 221-233.

Bouck, G. R., Chapman, G. A., Schneider, P. W., and Stevens, D. G. (1975). *Effects of holding temperatures on reproductive development in adult sockeye salmon (Oncorhynchus Nerka)*, In 26 th Annual Northwest Fish Culture Conference.

Cho, H. Y., Lee, K. H., Cho, K. J., and Kim, J. S. (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(3), 213-221. [Korean Literature]

Crisp, D. T. and Howson, G. (1982). Effect of air temperature upon mean water temperature in streams in the north Pennies and English Lake District, *Freshwater Biology*, 12(4), 359-367.

Eaton, J. G. and Scheller, R. M. (1996). Effects of climate warming on fish thermal habitat in streams of the United States, *Limnology and Oceanography*, 41(5), 1109-1115.

Gomi, T., Sidle, R. C., and Richardson, J. S. (2002). Understanding processes and downstream linkages of headwater systems, *Bioscience*, 52(10), 905-916.

Guenther, S. M., Gomi, T., and Moore, R. D. (2014). Stream and bed temperature variability in a coastal headwater catchment: influences of surface-subsurface interactions and partial-retention forest harvesting, *Hydrological Processes*, 28, 1238-1249.

Huang, M., Liang, X., and Leung, L. R. (2008). A generalized subsurface flow parameterization considering subgrid spatial variability of recharge and topography, *Journal of Hydrometeorology*, 9, 1151-1171.

Jacobsen, D., Schultz, R., and Encalada, A. (1997). Structure and diversity of stream invertebrate assemblages: the influence of temperature with altitude and latitude, *Freshwater Biology*, 38, 247-261.

Jun, J. H., Kim, K. H., Yoo, J. Y., Choi, H. T., and Jeong, Y. H. (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. [Korean Literature]

Kim, S. W., Chun, K. W., Park, C. M., Nam, S. Y., Lim, Y. H., and Kim, Y. S. (2011). The morphologic characteristics of step-pool structures in a steep mountain stream, Chuncheon, Gangwon-do, *Journal of Korea Society of Forest Science*, 100(2), 202-211. [Korean Literature]

Lane, R., J., Day, W., Marx, B., Reyes, E., Hyfield, E., and Day, J. N. (2007). The effects of riverine discharge on temperature, suspended sediments, and chlorophyll a in a Misssissippi delta estuary measured using a flow-thorough system, *Estuarine and Coastal Shelf Science*, 74, 145-154.

Lee, K. H. (2014). Building a nonlinear relationship between air and water temperature for climate-induced future water temperature prediction, *Journal of Environmental Policy*, 13(2), 21-37. [Korean Literature]

Lee, S. Y., Kim, D. W., and Choi, Y. W. (2014). Development of predictive models for the number of potholes using multi regression analysis, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 14, 1-8. [Korean Literature]

Mattews, K. R. and Berg, N. H. (1997). Rainbow trout responses to water temperature and dissolved oxygen stress in two southern California stream pools, *Journal of Fish Biology*, 50, 50-67.

Meyer, J. L., Strayer, D. L., Wallace, J. B., Eggert, S. L., Helfman, G. S., and Leonard, N. E. (2007). The contribution of headwater streams to biodiversity in river networks, *Journal of the American Water Resources Association*, 43(1), 86-103.

Meyer, J. L. and Wallace, J. B. (2001). *Lost linkages and lotic ecology : Rediscovering small streams* In Huntly, M. C., and Levin N. J. eds., Ecology : Achievement and Challenge, Oxford : Blackwell Scientific, 295-317.

Moore, R. D. (2006). Stream temperature patterns in British Columbia, Canada, based on routine spot measurements, *Canadian Water Resources Journal*, 31(1), 41-56.

Moore, R. D., Spittlehouse, D. L., and Story, A. (2005). Riparian microclimate and stream temperature response to forest harvesting: a review, *Journal of the American Water Resources Association*, 41, 813-834.

Park, J. S., Kim, K. R., Cho, C. B., Kang, M. S., and Kim, B. J. (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. [Korean Literature]

Part, J. C. and Lee, H. H. (2000). Variations of stream water quality caused by discharge change, *Journal of Korean Forest Society*, 89, 342-355. [Korean Literature]

Piccolroaz, S., Toffolon, M., and Majone, B. (2013). A simple lumped model to convert air temperature into surface water temperature in lakes, *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 3323-3338.

Saila, S., Cheeseman, M., and Poyer, D. (2004). *Maximum stream temperature estimation from air temperature data and its relationship to brook trout(Salvelinus fontinalis) habitat requirements in rhode island,* Wood Pawcatuck Watershed Association(WPWA):Hope Valley, RI, USA.

Steel, E. A., Colin, S., and Peterson, E. E. (2016). Spatial and temporal variation of water temperature regimes on the Snoqualmie River network, *Journal of the American Water Resources Association*, 52(3), 769-787.

Stefan, H. G. and Preud'home, E. B. (1993). Stream temperature estimation from air temperature, *Water Resources Research*, 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 stream, *Climate change*, 24, 353-381.

Subehi, L., Fukushima, T., Onda, Y., Mizugaki, S., Gomi, T., Kosugi, K., Hiramatsu, S., Kitahara, H., Kosugi, T., and Terajima, T. (2010). Analysis of stream water temperature changes during rainfall events in forested watersheds, *Limnology*, 11(2), 115-124.

Subehi, L., Fukushima, T., Onda, Y., Mizugaki, S., Gomi, T., Terajima, T., Kosugi, K., Hiramatsu, S., Kitahara, H., Kuraji, K., and Ozaki, N. (2009). Influences of forested watershed conditions on fluctuations in stream water temperature with special reference to watershed area and forest type, *Limnology*, 10(1), 33-45.

Webb, B. W. and Nobilis, F. (1997). Long term perspective on the nature of the air-water temperature relationship: A case study, *Hydrological Processes*, 11(2), 137-147.

Webb, B. W., Hannah, D. M., Moore, D., Brown, L. E., and Nobilis, F. (2008). Recent advances in stream and river temperature research, *Hydrological Processes*, 22(7), 902-918.

Yoon, S. W., Chung, S. W., and Choi. J. K. (2008). Variation of inflow density currents with different flood magnitude in Daecheong Reservoir, *Journal of Korea Water Resources Association*, 41, 1219-1230. [Korean Literature]