

ORIGINAL ARTICLE

지구기후모형 기온변화에 따른 미래 하천생태환경에서의 수온 예측

이길하*

대구대학교 토목공학과

Prediction of Climate-induced Water Temperature using Nonlinear Air-water Temperature Relationship for Aquatic Environments

Khil-Ha Lee*

Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

Abstract

To project the effects of climate-induced change on aquatic environments, it is necessary to determine the thermal constraints affecting different fish species and to acquire time series of the current and projected water temperature (WT). Assuming that a nonlinear regression between the WT at individual stations and the ambient air temperature (AT) at nearby weather stations could represent the best relationship of air-water temperature, This study estimates future WT using a general circulation model (GCM). In addition, assuming that the grid-averaged observations of AT correspond to the AT output from GCM simulation, this study constructed a regression curve between the observations of the local WT and the concurrent GCM-simulated surface AT. Because of its low spatial resolution, downscaling is unavoidable. The projected WT under global warming scenario A2 (B2) shows an increase of about 1.6°C (0.9°C) for the period 2080-2100. The maximum/minimum WT shows an amount of change similar to that of the mean values. This study will provide guidelines for decision-makers and engineers in climate-induced river environment and ecosystem management.

Key words : Climate change, GCM, River temperature, Water quality, Downscaling

1. 서론

산업혁명이후 경제가 급속도로 발전하고 인구가 증가함에 따라 화석연료의 사용이 증가한 결과 지구의 평균 기온이 상승하여 지구 온난화로 이어졌다는 가설은 이미 잘 알려진 사실이다. 지구 온난화로 인해 장기적인 기후 변화가 일어나며 기후변화는 생태계와 해양환경 등 모든 환경에 지대한 영향을 미칠 것이다. 이는 수문학적 인자의 변화로 연결되어 인간의 생활 사회, 경제, 문화, 보건 등의 기본생활에 영향을 미치므로 이에 대한 고찰을 거

친 후 적절한 대비가 필요하다(Asselman et al., 2003). 기온이 상승함에 따라 생물의 생존 환경 또한 영향을 미치며, 식물의 성장일수와 성장시기의 변화, CO₂농도의 증가로 식물로부터 생산되는 생물량에 영향을 미치며 동물은 환경변화로 개체수가 변화할 것이다(Johnson, 1971; Mohseni et al., 1998; Mohseni and Stefan, 1999; Mohseni et al., 1999; Mohseni et al., 2002; Morrill et al., 2005; Pilgrim and Stefan, 1995; Stefan and Sinokrot, 1993; Stockle et al., 1992; Struyf et al., 2004; Tang and Keen, 2009; Webb, 1987). 기온의 변

Received 11 April, 2016; Revised 10 May, 2016;

Accepted 10 May, 2016

*Corresponding author : Khil-Ha Lee, Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea
Phone : +82-53-850-6522
Email : khil_ha@yahoo.com

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© 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.

화는 하천과 연안지역에서 수중생물의 종, 개체수 변화와 환경조건에 큰 영향을 미칠 것이다. 따라서 하천의 유지관리를 위해서는 미래의 수온변화를 예측하여 수중환경과 하천생태환경 등의 변화를 사전 분석할 필요성이 있다.

선행 연구 (An and Lee, 2013; Lee, 2014)에서 미래 기후변화에 따른 수온의 변화를 예측하기 위한 사전 작업으로 기존에 관측된 과거의 자료를 이용하여 비선형 기온-수온 상관관계를 구축하고, 이를 통해 보다 정확한 미래의 수온 값을 얻고자 하였다. 이를 위해서 기상청에서 제공하는 기온 관측 자료와 2009년에서 2011년까지 3년 동안 환경부 산하 국립환경과학원에서 제공하는 일 관측 자료를 바탕으로 자기상관관계와 교차상관관계를 검토하여 높은 상관관계를 확인하였다. 기온자료와 수온 자료를 동시에 관측하는 관측소가 없기 때문에 수온관측소에서 가장 근거리에 위치한 기온관측소의 관측 자료를 통하여 기온-수온 상관관계를 구성하였다. 분석을 통해 관측지점에 따라서 자료의 상승기(rising limb)와 하강기(falling limb)에 증감 양상이 서로 다르게 나타나는 이력현상(Hysteresis)을 보여주는 관측 지점을 확인하였고, 기온-수온 관계를 분리하여 구축하고 계절적인 이력 현상을 고려하였다. 기온-수온 상관관계는 시간규모에 따른 최대 온도와 최소 온도에 차이가 있으나 수질 또는 생태 반응의 적당한 시간규모에 해당하는 주 평균 온도를 이용하여 분석한 결과, 전반적으로 우리나라 하천의 기온-수온 관계는 선형 보다는 비선형 모형에서 정확도가 더 우수하여 비선형 모형이 적합한 것으로 나타났다. 비선형의 특성을 표현하기 위하여 로지스틱(Logistic) 함수모형으로 선정하였으며, 우리나라 하천에 대하여 최적화기법을 통하여 4개 매개변수 ($\alpha, \beta, \gamma, \mu$)를 결정하여 기온-수온 상관관계를 구축하였다(An and Lee, 2013).

Fig. 1은 과거의 기온-수온 관측 자료를 이용하여 GCM자료로부터 미래의 수온을 예측하는 전반적인 흐름을 보여준다. 일단 과거 자료로부터 구축된 기온-수온 상관관계는 GCM자료와 함께 실제 하천에 적용하여 수온 예측에 이용하게 된다. 여기에서는 하나의 후속 연구로서 사전연구에서 구축된 기온-수온 상관관계를 미래의 하천 수온을 예측하기 위한 최적의 모형이라 간주하고 전지구기후모형(general circulation model, GCM)

에서 추정된 2100년경의 기온자료를 독립변수로 하여 우리나라 미래 하천의 수온을 추정해 분석해 보았다 (DeGaetano, 2001; Karl et al., 1990; Oshima et al., 2002; Schubert, 1998; School and Pryor, 2001; Winkler et al., 1997).

이용 가능한 GCM 후보군은 여러 수십 개 존재하나 대부분 주평균 또는 월평균 자료를 제공하고 있어 일평균 자료가 필요한 기온-수온 관계 연구에서는 이용하기가 기술적으로 어렵다. 그래서 일평균 기온자료가 제공 되면서도 신뢰성이 국제적으로 확보된 캐나다형 GCM인 CCCma (canadian centre for climate modeling and analysis)를 연구모형으로 선정하였다(<http://www.ec.gc.ca/ccmac-cccma/>). CCCma는 공간 해상도가 3° 정도로 하나의 격자가 수 백 km에 해당하므로 우리나라 전역의 정보가 1개의 격자에 들어간다. 대상하천에서 먼저 다운스케일 기법을 통해 GCM 기온자료로 대상 하천 지점의 기온으로 분해한 후 미래 하천수온을 예측하였다. 연구 결과는 간편하고 보다 정확한 미래 하천 수온 예측을 통하여 지구 온난화에 따른 하천환경과 유지관리 및 수생태계변화에 효과적인 대비에 이바지 하고자 한다.

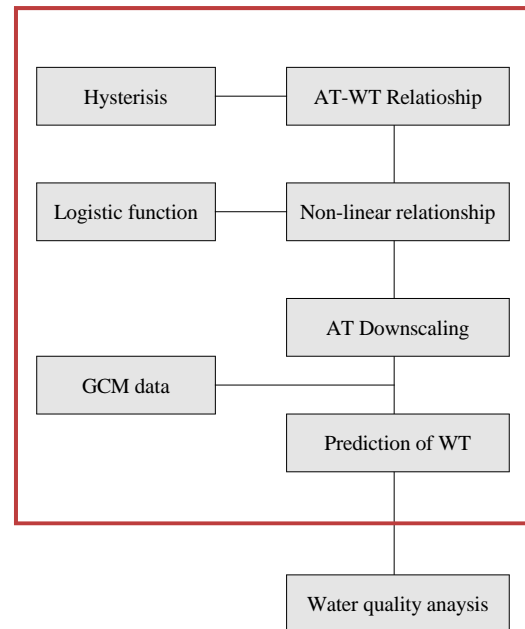


Fig. 1. Schematic diagram of prediction for future water temperature.

2. 대상 지역 및 관측 자료

환경부 산하 국립환경과학원에서 수질자동관측망을 통해 주요 4대 하천(한강, 낙동강, 영산강, 금강)의 수온은 관측하고 있지만, 기상 관측을 동시에 수행하고 있지는 않기 때문에 기온자료는 기상청에서 제공되는 일평균 기온자료 (Table 1) 를 사용하였다. 수온관측소에서 지리적으로 가장 가까운 거리에 위치한 기상관측소를 선별하여 기온-수온 상관관계를 분석하였다. Fig. 2는 연구에 사용된 기온관측소 (Fig. 2-a) 와 하천 수온관측소 (Fig. 2-b)의 위치를 나타낸 것이다. 기온자료는 2002년 1월 1일부터 2011년 12월 31일까지 10년간의 자료이다. 수온 자료는 2009년 1월 1일부터 2011년 12월 31일까지 3년간의 자료이며, 기온-수온 상관관계 분석은 기온자료와 수온 자료가 같은 기간인 3년간의 자료를 사용하였다. 수온자료도 기온자료와 같이 10년간의 자료를 사용하면 신뢰도가 더 높아 질 것이다. 하지만 기온자료에 비해서 수온자료가 상대적으로 부족하며 위 기간 동안 자료에서

특별한 이상관측현상이 나타나지 않아 3년간의 관측 자료를 이용해서 기온-수온 상관관계를 밝혀내는 것에는 큰 문제가 없다고 판단되어진다.

우리나라 기상관측은 종관기상관측장비(ASOS)와 무인으로 운영되는 자동기상관측장비(AWS)를 이용하여 관측하고 있다. ASOS는 지방청, 기상대, 관측소에 설치되어 기상상태를 관측하고 기상관측소가 없는 곳에는 AWS가 설치되어 관측을 수행하고 있다. 기온자료에서 이상자료로 판단될 만한 자료는 관찰되지 않았지만, 결측 자료가 존재하는 구간은 나타났다. 주암호지역 주암(순천) 기상관측소의 경우 2011년 4월 1일부터 2011년 4월 12일까지 결측이 되었고, 주암호지역을 제외한 기상관측소에서는 결측 구간이 하루단위 (동두천, 이천 등 14개소)로 나타났다. 하지만 10년간의 기온자료에서 볼 때 결측 구간이 신뢰성에 문제를 줄만큼 크지는 않은 것으로 판단된다.

수온의 관측기기는 미국 YSI사의 YSI600XL, 600EDS, 600XL BCR와 독일 SEBA사의 Qualilong 16 제품을

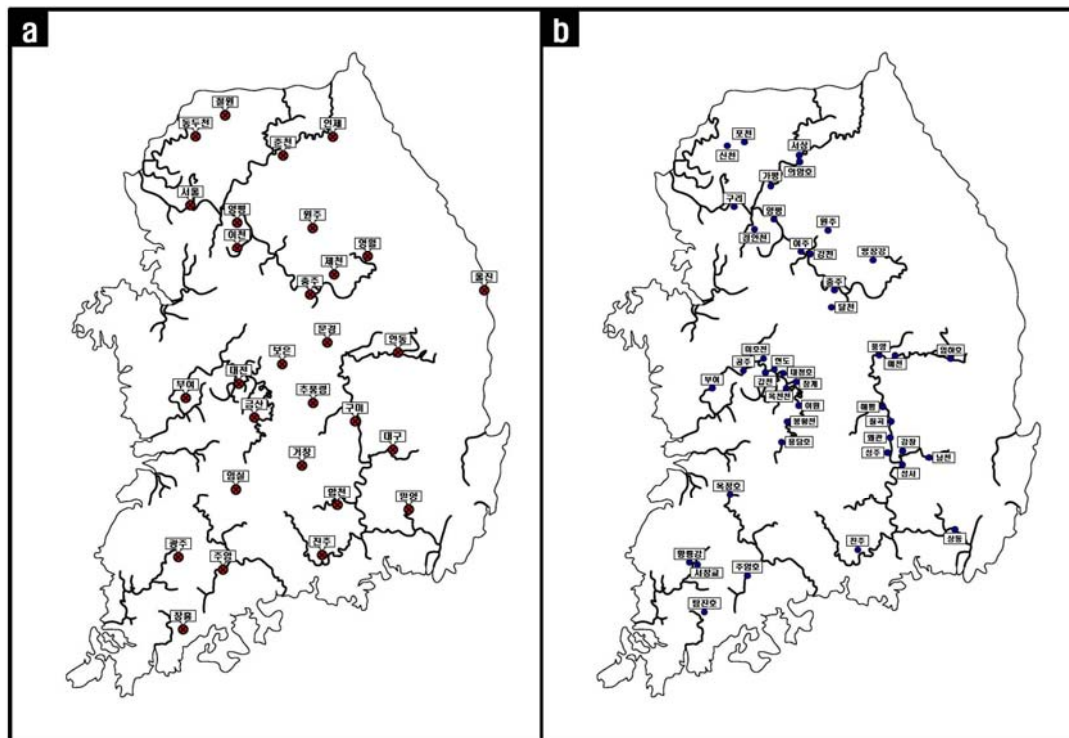


Fig. 2. Location of measurement point: (a) Air temperature; (b) Water temperature.

Table 1. Summary of weather station

Basin	No.	Station	EL. (m)	Location	
				Longitude (E)	Latitude (N)
Han	1	Youngwol	240.6	128° 27'	37° 10'
	2	Jecheon	263.6	128° 11'	37° 09'
	3	Chungju	115.1	127° 57'	36° 58'
	4	Wonju	148.6	127° 56'	37° 20'
	5	Yicheon	78.0	127° 29'	37° 15'
	6	Yangtyeong	48.0	127° 29'	37° 29'
	7	Cheolwon	153.7	127° 18'	38° 08'
	8	Inje	200.2	128° 10'	38° 03'
	9	Chuncheon	77.7	127° 44'	37° 54'
	10	Seoul	85.8	126° 57'	37° 34'
	11	Donhducheon	109.1	127° 03'	37° 54'
Nakdong	1	Wooljin	50.0	129° 24'	36° 59'
	2	Andong	140.1	128° 42'	36° 34'
	3	Moongeong	170.6	128° 08'	36° 37'
	4	Gumi	48.9	128° 19'	36° 07'
	5	Daegu	64.1	128° 37'	35° 53'
	6	Geochang	221.0	127° 54'	35° 40'
	7	Hapcheon	33.1	128° 10'	35° 33'
	8	Jinju	30.2	128° 02'	35° 09'
	9	Milyang	11.2	128° 44'	35° 29'
Youngsan	1	Gwangju	72.4	126° 53'	35° 10'
	2	Imsil	247.9	127° 17'	35° 36'
	3	Juam	74.6	127° 14'	35° 04'
	4	Jangheong	45.0	126° 55'	34° 41'
Geum	1	Geumsan	170.4	127° 28'	36° 06'
	2	Chupungyong	244.7	127° 59'	36° 13'
	3	Bon	175.0	127° 44'	36° 29'
	4	Daejeon	68.9	127° 22'	36° 22'
	5	Buyeo	11.3	126° 55'	36° 16'

사용하여 관측하였으며, 오차 범위가 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 이다. 수온 관측은 수면에서 50 cm부터 수위에 따라 변할 수 있다. 관측간격은 5분이며, 일 자료는 관측 자료를 평균한 자료이다. 결측 자료는 선형 내삽법으로 보완하였으며, 장기 간의 결측 구간은 신뢰성 확보를 위해 제외시켰다. 정규 분포를 가정, 관측값이 신뢰구간 95%를 벗어나는 자료 및 두드러지게 다른 양상을 보이는 자료도 분석에 상당

한 영향을 미칠 것으로 판단하여 제외시켰다(An and Lee, 2013).

3. GCM 자료

지구 온난화로 인한 기후 변화는 인간의 생활에 많은 영향을 미친다. 미래의 기후 변화를 예측하고 그에 대한 적절한 대비를 할 수 있다면, 피해를 최소화할 수 있고 예

방도 가능할 것이다.

CCCma (canadian centre for climate modeling and analysis)는 전 지구적 기후, 지역 기후 및 기후 변화 시뮬레이션을 통해 특정 원인(specific causes)에 의한 기후변화를 관찰하는 GCM 모형의 하나이다. 계절 및 장기간의 기후 변화를 예측하고 기후변화의 가변성(variability)과 다양한 기후 시스템을 제어하는 프로세서들을 가지고 있다. 수년간의 연구를 통하여 기존 보다 향상된 모형을 개발하고 더 복잡하고 다양한 기후 문제 연구도 수용할 수 있게 되었다. 모델 개발과 더불어 기후 시스템에 대한 이해를 높이기 위해 과거와 미래의 예측 기후 변화를 분석해 놓았다. 여기에서 사용되는 CCCma 자료는 웹사이트 (<http://www.ec.gc.ca/ccmac-cccma/>)에서 무료로 이용할 수 있다.

CCCma의 모델 중 2세대 전지구적 기후 모델 CGCM2 (The second generation global climate model)는 기후 변화 예측을 IPCC SRES A2 및 B2 시나리오를 합쳐 사용하였다. CGCM2는 먼저 만들어진 1세대 전지구적 기후 모델 (The first generation coupled global climate model)을 기반으로 이전 모델에서 확인된 단점을 해결하기 위해서 개선, 보완한 모델이다. Hadley Centre (hence, the data for 1961-1990 are identical for both scenarios)에서 제공하는 1961년부터 1990년까지 관찰된 온실 가스(GHG) 변화를 기반으로 A2와 B2 시나리오의 1961-2100년에 대한 일자료를 사용할 수 있다. A2는 IPCC SRES GHG와 에어로졸 추매 시나리오의 결합 시뮬레이션으로 111년의 데이터로 구성되어 있는 반면 B2는 IPCC SRES B2 GHG와 에어로졸 추매 시나리오의 결합 시뮬레이션으로 111년 데이터 자료로 구성되어 있다. A2 시나리오는 다소 느린 경제 및 기술 개발, 2100년까지 15억에 인구 증가 계획하고 있는 반면에, B2 시나리오는 더 빠르게 발전하는 경제와 환경 보호에 중점을 두고 있다. 그러므로 B2는 A2보다 상대적으로 적은 온실가스 배출 및 더딘 미래의 온난화 현상이 예상된다.

4. 분석 결과

대기모형, 수문모형, 수리 모형과 같은 수치모형에서 수치지도를 적용하는데 있어 항상 따라다니는 문제점이

축척문제(scaling issues)이다. 이 때문에 다운스케일(Downscaling) - 업스케일(Upscaling) 방법에 대한 많은 연구가 이루어졌으며, GCM자료 (강우, 기온 등)의 다운스케일 적용과정은 통계적인 방법, 동역학적 방법, Regression 방법 등이 많이 제시되어왔으나 복잡성과 정확도에 있어 서로 장단점이 있어 선호도가 사용자에 따라 엇갈리는 편이다 (Wilby et al., 2004).

미래의 기온 자료를 얻는 가장 현실적인 방법은 일반적으로 기후수치모의 GCM으로부터 얻는 것이다. GCM 자료의 특성상 공간해상도가 1°(~100 km)에서 크기는 5°(~500 km)까지 이르고, 하나의 GCM격자로 우리나라 전국의 기온을 대표해서 나타나기도 하므로 전국에 걸쳐 퍼져있는 하천 관측지점에서 생태환경 반응을 모의하기 위해서는 GCM 기온 자료의 다운스케일 과정이 필요하다. 사실 대기 모형을 운영할 때 격자를 세분화(grid nesting 방법 등)하여 필요한 공간해상도의 정보를 얻을 수 있다. 그러나 원하는 공간해상도에 상응하는 모형의 입력 자료를 생성하고, 모형의 보정 및 검증을 수행하는 과정은 매우 비효율적이고 복잡하다. 공간격자의 대푯값으로 제시된 GCM 자료를 이용하여 국지적 정보를 유추해내는 다운스케일 과정을 따르는 것이 효율적이며 현실적이다.

GCM 자료로부터 다운스케일 기법을 적용하여 하천 지점의 기온을 유추해내기 위하여 다음의 과정을 거쳤다 (Lee and Cho, 2015). 기후모형(GCM)에 대한 자세한 분석과 물리적 이론이나 과정은 다루지 않고 여기에서는 단지 GCM이 최선의 기온예측값이라고 가정한다.

Fig. 3은 전국의 관측지점 평균기온 대 대표지점에서의 기온-기온 산포도를 보여준다. 앞서 설명한 듯이 대표 지점은 4대 하천에서 각각 한 개의 지점을 선정하였으며, 평창강(한강), 칠곡(낙동강), 탐진호(영산강), 갑천(금강)으로 이와 가장 근거리에 위치한 기온관측소의 기온자료를 이용하였다. 기온-기온 산포도 그래프로 얻은 결정계수가 약 0.99로 모든 지점에서 강한 선형성을 보여준다. 결과적으로 GCM기온자료로부터 관측 지점별 기온을 유추해 낼 수 있음을 암시한다. 다운스케일 방법은 선형 관계식을 이용한 통계적인 방법이 널리 사용되고 있는데, 여기에서도 전국 평균기온과 각 기상대 관측지점별 평균 기온과의 관계를 연결하는 고리(linkage)는 다음과 같이 선형관계식이 이용되었다.

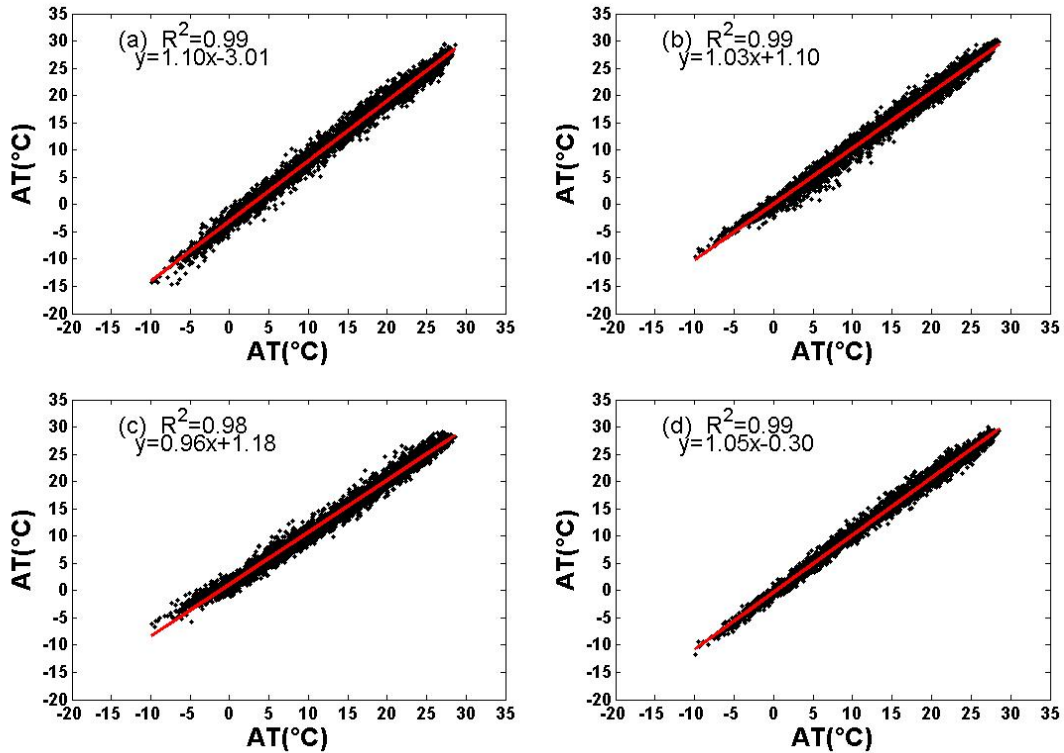


Fig. 3. X-axis presents mean air temperature of 29 points, while Y-axis presents a point temperature of specific location: (a) Youngwol-Han river, (b) Gumi-Nakdong river, (c) Janpheong-Youngsan river, and (d) Daejeon-Geum. river.

$$T_L = \alpha T_G + b \quad (1)$$

여기서, T_L = 지점별 지역인자, T_G = 전국 29개 관측소 평균인자, a = 비례계수, b = 절편을 나타낸다. 물론 보정된 모형의 매개변수는 미래에도 변하지 않는다는 가정하에서 지형, 지형물이나 식생에 의해 가려진 하의에 응달같이 하천온도에 영향을 미치는 외적인 요인도 변하지 않는다고 가정한다.

우리나라 전국에 걸쳐 분포한 기상청 기상대 자료 29개 지점의 2002년-2011년까지의 일평균 기온자료를 GCM 자료로 간주하고, 과거의 관측 자료를 이용하여 미리 구축해 놓은 식(1)을 이용한다면 GCM 미래 기온을 하천의 지점 기온으로 전환할 수 있다(Lee and Cho, 2015).

전국평균기온과 지역 기온의 선형 회귀분석을 통한 관계식과 결정계수는 Table 2에서 분석결과를 정리하

여 제시하였다. 식(1)에 의한 관계식의 결정 계수는 0.96~0.99, 평균 0.99이다.

다음은 과거 기온관측소에서 관측된 기온과 CCCms로 예측된 기온 간의 상관관계를 보여주기 위해서 기온 기온 산포도 그래프를 통해 결정계수를 나타내었다. 기간은 1973년 1월 1일부터 2011년 12월 31일까지이다. Fig. 4에서 보듯이 A2시나리오의 경우 일평균 결정계수가 0.79, B2시나리오는 A2보다 미소하게 낮은 0.78로 나타났다.

Fig. 5는 1973년부터 2011년까지의 관측기온, A2와 B2 시나리오의 기온을 연평균하여 그래프로 나타낸 것이다. 일부에서 관측치보다 A2, B2의 연평균이 높게 나오는 구간이 있지만 거의 모든 부분에서 A2와 B2의 연평균 기온이 관측치 연평균 기온보다 낮게 나오고 있으며, 1990년까지의 A2와 B2 기온은 동일하게 나타났다. 관측치 연평균과 가장 큰 차이를 보이는 것은 A2, B2 모

Table 2. Determination coefficients comparison of the regression methods

Basin	No.	Station	Ta (°C)	$T_L = aT_G + b$	R^2
Han	1	Youngwol	11.03	1.10 $T_G - 3.01$	0.99
	2	Jecheon	10.39	1.12 $T_G - 3.83$	0.99
	3	Chungju	11.76	1.12 $T_G - 2.56$	0.99
	4	Wonju	12.05	1.12 $T_G - 2.22$	0.99
	5	Yicheon	11.64	1.10 $T_G - 2.41$	0.99
	6	Yangbyeong	11.81	1.11 $T_G - 2.29$	0.99
	7	Cheolwon	10.21	1.15 $T_G - 4.46$	0.98
	8	Inje	10.36	1.10 $T_G - 3.62$	0.98
	9	Chuncheon	11.40	1.13 $T_G - 3.02$	0.98
	10	Seoul	12.78	1.09 $T_G - 1.05$	0.98
	11	Donhducheon	11.19	1.11 $T_G - 2.92$	0.98
Nakdong	1	Wooljin	12.83	0.86 $T_G + 1.88$	0.96
	2	Andong	12.14	1.05 $T_G - 1.28$	0.99
	3	Moongeong	11.64	1.02 $T_G - 1.32$	0.99
	4	Gumi	13.15	1.03 $T_G + 0.10$	0.99
	5	Daegu	14.51	1.00 $T_G + 1.75$	0.99
	6	Geochang	12.02	1.02 $T_G - 0.78$	0.98
	7	Hapcheon	13.57	1.01 $T_G + 0.70$	0.98
	8	Jinju	13.58	1.00 $T_G + 0.89$	0.98
	9	Milyang	13.68	1.00 $T_G + 0.93$	0.98
Youngsan	1	Gwangju	14.18	1.00 $T_G + 1.45$	0.99
	2	Imsil	11.46	1.07 $T_G - 2.14$	0.99
	3	Juam	12.90	1.00 $T_G + 0.17$	0.98
	4	Jangheong	13.33	0.96 $T_G + 1.18$	0.98
Geum	1	Geumsan	11.85	1.08 $T_G - 1.85$	0.99
	2	Chupungyong	11.78	1.02 $T_G - 1.23$	0.99
	3	Bon	11.29	1.07 $T_G - 2.30$	0.99
	4	Daejeon	13.06	1.05 $T_G - 0.30$	0.99
	5	Buyeo	12.51	1.07 $T_G - 1.10$	0.99
Mean			12.21	-	0.99

두 1988년으로 관측치보다 3.67도 낮은 값이 나왔다. A2 경우 관측치보다 평균적으로 1.60도, B2는 1.42도 낮게 나왔으며 A2보다 B2가 미소하게 높은 온도를 나타내었다.

미래의 수온변화모의에 앞서 이상과 같이 과거의 관측 자료와 모의 자료가 일치하지 않으면 CCCma 기온 모의자료의 신뢰성을 확보하기 위하여 보정하는 과정을

거치는데, 식(2)과 같이 관측값과 모의값의 차이를 이용하여 보정을 하였다(Alcamo et al., 1997).

$$T_{GCM} = T_{his.avg} + (\bar{T}_{GCMfut} - \bar{T}_{GCMhist}) \quad (2)$$

식(2)에 T_{GCM} 은 보정된 미래의 온도, $T_{his.avg}$ 는 과거 관측 온도, \bar{T}_{GCMfut} 은 GCM 미래 모의 온도, $\bar{T}_{GCMhist}$

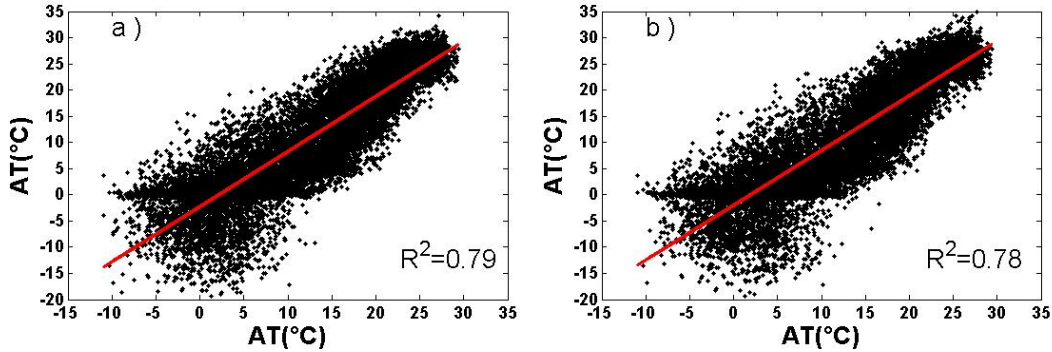


Fig. 4. A scatter plot of GCM daily temperature: (a) A2 scenario, (b) B2 scenario. X-axis is observed, while Y-axis is simulated.

은 과거 관측온도를 나타낸다.

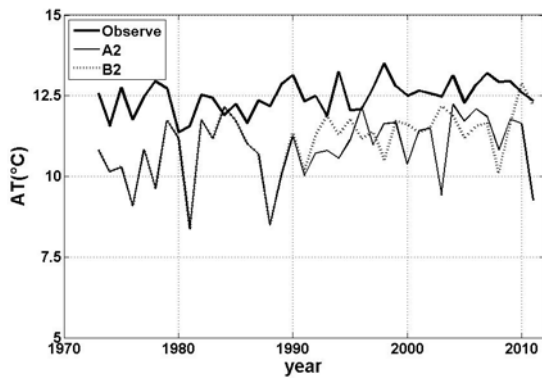


Fig. 5. Adjustment of past record and CCCma simulation temperature.

다음으로 식(1)의 기온-기온 관계를 이용한 다운스케일 과정 통해 각 지점의 미래 기온을 추정하였다. 추정된 미래 기온을 바탕으로 선행연구에서 구축된 비선형 기온-수온 관계식(Lee, 2014)을 이용하여 미래의 수온을 산

정하였다. Fig. 6은 대표지점에서 산정된 미래의 기온과 수온을 연평균하여 그래프로 나타낸 것으로 4대 하천에서 1개의 관측지점을 임의로 대표지점으로 선정하여 나타내었다. 한강지역에서는 평창관측소, 낙동강은 칠곡관측소, 영산강은 탐진호, 금강은 갑천지역을 대표지점으로 선정하였다.

우선, 한강대표지점인 평창지역 A2시나리오의 경우 연평균이 2012년 9.95도에서 2100년 13.59도로 3.64도 증가하였고 최대치는 14.12도가 나왔으며, 최소치는 9.08도가 산정되었다. B2 경우 11.94도에서 14.66도로 2.72도 증가하였고 최대 13.01, 최소 8.89가 산정되었다. Table 3은 GCM자료로부터 추출한 미래의 기온값을 나타내며 Table 4는 예측된 하천의 수온을 나타낸다. 4개 대표지점에서는 수온의 평균값이 기온의 평균값보다 높게 나타났으며, A2시나리오보다는 B2시나리오가 보다 완만한 기온기를 보여주고 있다. B2시나리오에서 환경보호에 중점을 둔 것을 고려해 볼 때 기후변화에 대비하여 대책을 수립하고 예방한다면 기온이 증가하는 것을 늦출 수 있을 것으로 보인다.

Table 3. Future GCM air temperature at the representative point

	Pyeongchang		Chilgok		Tamjinho		Gapcheon	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
mean	11.62	11.14	13.69	13.25	13.84	13.43	13.62	13.17
max	14.12	13.01	16.01	14.98	16.01	15.04	16.00	14.94
min	9.08	8.89	11.33	11.16	11.64	11.48	11.20	11.03

Table 4. Future water temperature at the representative point

	Pyeongchang		Chilgok		Tamjinho		Gapcheon	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
mean	13.19	12.83	15.40	15.03	15.37	15.05	17.51	17.20
max	15.07	14.25	17.33	16.48	17.08	16.34	19.12	18.41
min	11.26	11.11	13.44	13.29	13.63	13.49	15.86	15.73

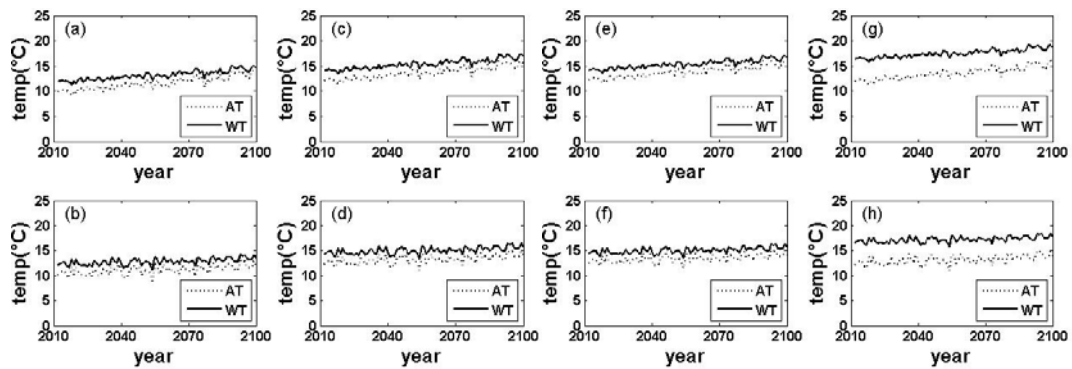


Fig. 6. A time series of annual temperature at the representative point. (a) Pyeongchang-A2 scenario, (b) Pyeongchang-B2 scenario, (c) Chilgok-A2 scenario, (d) Chilgok-B2 scenario, (e) Tamjinho-A2 scenario, (f) Tamjinho-B2 scenario, (g) Gapcheon-A2 scenario, (h) Gapcheon-B2 scenario.

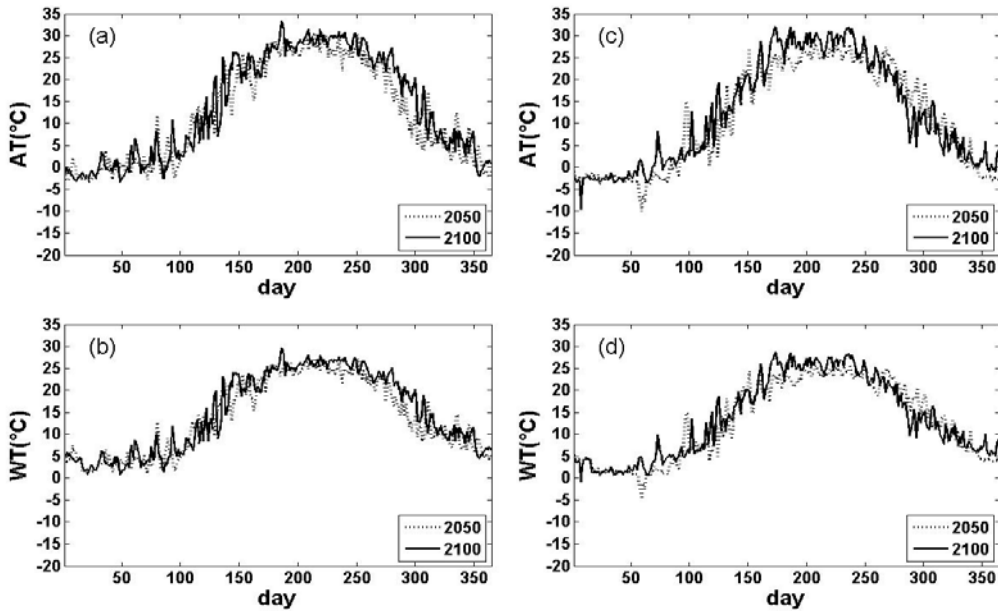


Fig. 7. A seasonal variation of annual air and water temperature at Pyeongchang point. The dotted line denote the year of 2050, while the solid line denotes the year of 2100. (a) AT-A2 scenario, (b) WT-A2 scenario, (c) AT-B2 scenario, (d) WT-B2 scenario.

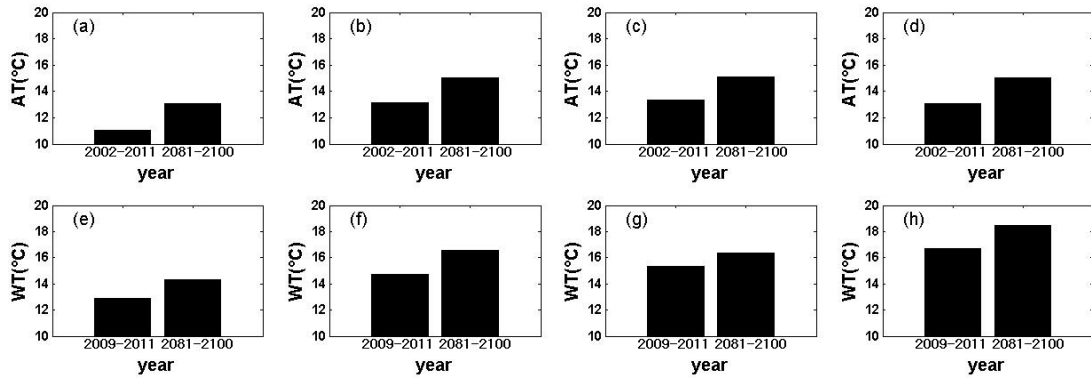


Fig. 8. Predicted change of air and water temperature by A2 scenario. The left bar presents the period of 2002-2011 (2009-2010 for water temperature), while the right bar presents the period of 2081-2100. (a) Pyeongchang-AT, (b) Chilgok-AT, (c) Tamjinho-AT, (d) Gapchen-AT, (e) Pyeongchang-WT, (f) Chilgok-WT, (g) Tamjinho-WT, (h) Gapchen-WT.

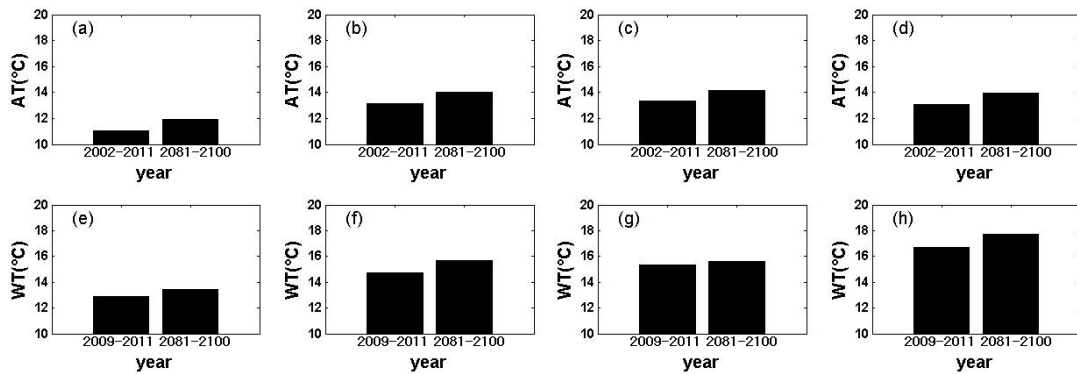


Fig. 9. Predicted change of air and water temperature by B2 scenario. The left bar presents the period of 2002-2011 (2009-2010 for water temperature), while the right bar presents the period of 2081-2100. (a) Pyeongchang-AT, (b) Chilgok-AT, (c) Tamjinho-AT, (d) Gapchen-AT, (e) Pyeongchang-WT, (f) Chilgok-WT, (g) Tamjinho-WT, (h) Gapchen-WT.

Fig. 7은 2050년과 2100년에 대해 예측된 연중 하천 수온의 계절적 변화를 보여준다. Fig. 8부터 Fig. 9까지는 GCM 시나리오 A2와 B2에 대해 CCCma에서 예측한 대표관측지점에서의 관측된 기온, 수온과 미래의 기온, 수온의 연평균을 비교한 그래프이다. 미래 기온과 수온은 2081-2100년 20년 간격 평균 예측 수온을 보여준다. 일반적으로 2080-2100년에서 A2시나리오에 의한 평균수온이 2009년부터 2011까지 3년간의 수온관측치의 평균수온을 기준으로 비교해 볼 때 1.58°C 정도의 상승을 보여주고, B2시나리오는 0.84°C 정도의 상승을 보

여준다. Fig. 7에서 2100년 예측된 기온과 수온의 연간 변화량을 볼 때, 예측된 연평균 수온은 증가 추세를 보이거나 계절적 증가 추세나 패턴은 보이지 않는다.

5. 결론

지구 온난화와 관련된 장기 기후변화로 인하여 하천 생태환경의 변화는 불가피해 보인다. 이를 위해서는 하천 수온 변화를 예측할 필요가 있으며, 하천 수온변화 예측은 미래 기온 변화예측을 필요로 한다. 여기에서는 미

래 기온변화 정보를 제공하는 GCM 자료를 우리나라 4대 하천의 국지적인 기온변화 예측에 이용하기 위한 다운스케일 방법을 활용하였다. 즉 GCM 수치모의 자료는 과거의 관측자료를 바탕으로 오차 조정을 하여 정확도를 향상시키고 기 구축한 기온-기온 선형관계를 토대로 GCM기온을 지점별 기온으로 전환한다. 다시 각 지점별로 선행연구에서 기 구축된 기온-수온 비선형 상관관계를 이용하여 지점별 수온을 예측한다. A2와 B2 기후변화 시나리오에 따른 CCCma 모형을 GCM모형으로 선택하였으며, 주요결론은 다음과 같다.

- 2080-2100년 기간에 A2시나리오에 의한 평균 수온 상승은 약 1.58°C 정도이고, B2시나리오에 의한 평균 수온 상승은 약 0.84°C 정도로 나타났다.
- 2100년 미래 예측 수온은 증가추세를 보이나 계절적 패턴이나 특성은 보이지 않는다.

이 연구의 종착점은 기후변화에 의한 수온 상승이 하천생태환경에 미치는 영향을 사전에 파악하는 것이다. 연구결과는 미래의 기온 상승 변화에 반응하는 수질, 수자원 및 하천 생태 반응에 대비하여 공학기술자와 정책입안자에게 적절한 기후변화 대책 방향을 설정하는 데 지침을 제공할 것이다. 그러나 자료가 제한되어 여기에서 제시한 방법론을 검증하는데 제한이 있으며 더 많은 지역에서 자료를 수집하여 확대된 검증을 필요로 한다. 여기에서 제안된 알고리즘이 현장의 복잡성을 극복하기에는 한계가 있으며 완벽한 검증이 될 수는 없으나, 적어도 향후 연구에 있어 아이디어 차원의 직감이나 근거를 제시할 수는 있을 것으로 본다.

감사의 글

이 논문은 대구대학교 교내과제 번호 20160156의 재정지원을 받아 수행하였습니다. 최영선 학생의 도움에 감사합니다.

REFERENCES

- An, J. H., Lee, K., 2013, Correlation and Hysteresis Analysis of Air-Water Temperature in Four Rivers: Preliminary study for water temperature prediction, *Environment Policy Research*, 12(2), 17-32.
- Lee, K., 2014, Building a nonlinear relationship between air and water temperature for climate-induced future water temperature prediction, *Environment Policy Research*, 13(2), 21-37.
- Alcamo, J., Doll, P., Kaspar, F., Siebert, S., 1997, Global change and global scenarios of water use and availability: An Application of Water GAP 1.0, Report A 9701, Center for Environmental Systems Research, German: University of Kassel.
- Asselman, N. E., M. Middelkoop, H., Dijk, P. M., 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.
- DeGaetano, A. T., 2001, Spatial grouping of united states climate stations using a hybrid clustering approach, *International Journal of Climatology*, 2, 791-807.
- Johnson, F. A., 1971, Stream temperatures in an alpine area, *Journal of Hydrology*, 14, 322-336.
- Karl, T. R., Wang, W., Schlessinger, M. E., Knight, R. W., Potman, D., 1990, A Method of relating general circulation model simulated climate to the observed local climate, Part I: Seasonal Statistics, *Journal of Climate*, 3, 1053-1079.
- Lee, K., Cho, H. Y., 2015, The Projection of climate-induced future water temperature for the aquatic environment, *Journal of Environmental Engineering -ASCE*, 141(11), 10.1061/(ASCE)EE, 1943-7870. 0000974, 06015004.
- Mohseni, O., Ericson, T. R., Stefan, H., 1999, Sensitivity of stream temperature in the United States to air temperature projected under a global warming scenario, *Water Resources Research*, 35(12), 3723-3733.
- Mohseni, O., Ericson, T. R., Stefan, H., 2002, Upper bounds for stream temperature in the contiguous United States, *Journal of Environmental Engineering*, 128(1), 4-11.
- Mohseni, O., Stefan, H., 1999, Stream temperature /air temperature relationship: A Physical interpretation, *Journal of Hydrology*, 218, 128-141.
- Mohseni, O., Stefan, H., Ericson, T. R., 1998, A Nonlinear regression model for weekly stream temperature,

An, J. H., Lee, K., 2013, Correlation and Hysteresis Analysis of Air-Water Temperature in Four Rivers: Preliminary study for water temperature prediction,

- Water Resources Research, 34(10), 2685-2699.
- Morril, J. C., Bales, R. C., Conklin, M. H., 2005, Estimating stream temperature from air temperature: Implications for future water quality, *Journal of Environmental Engineering*, 131(1), 139-146.
- Oshima, N., Kato, H., Kadokura, S., 2002, An Application of statistical downscaling to estimate surface air temperature in Japan, *Journal of Geophysical Research*, 107(14), 1-10.
- Pilgrim, J. M., Stefan, H. G., 1995, Correlation of Minnesota stream water temperatures with air temperatures Project, Rep. 382, St Anthony Falls Lab., U of Minn., Minneapolis.
- School, J. T., Pryor, S. C., 2001, Downscaling temperature and precipitation: A Comparison of regression-based methods and artificial neural networks, *International Journal of Climatology*, 21, 773-790.
- Schubert, S., 1998, Downscaling local extreme temperature changes in south-eastern Australia from the CSIRO Mark2 GCM, *International Journal of Climatology*, 18, 1419-1438.
- Stefan, H. G., Sinokrot, B. A., 1993, Projected global climate change impact on water temperatures in five north central US streams, *Climate Change*, 24, 353-381.
- Stockle, C. O., Dyke, P. T., Williams, J. R., Jones, C. A., Rosenberg, N. J., 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.
- Struyf, E., Damme, S. V., Meire, P., 2004, Possible effects of climate change on estuarine nutrient fluxes: A Case study in the highly nutrified Schelde estuary (Belgium, The Netherlands), *Estuarine Coastal and shelf Science*, 60, 649-661.
- Tang, H. S., Keen, T. R., 2009, Analytical model for temperature response of channel flows with time-dependent thermal discharge and boundary heating, *Journal of Hydrologic Engineering-ASCE*, 135, 327-339.
- Webb, B. W., 1987, The Relationship between air and water temperatures for a Deven river, Rep. Trans. Devenshire Assoc. Adv. Sci., 119, 197-222.
- Wilby, R. L., Charles, S. P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., Mearns, L. O., 2004, Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods, Supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change, available from the DDC of IPCC TGCI.
- Winkler, J. A., Palutik, J. P., Andersen, J. A., Goodess, C. M., 1997, The Simulation of daily temperature time series from GCM output, Part II: Sensitivity analysis of an Empirical Transfer function Methodology, *Journal of Climate*, 10, 2514-2532.