광역 기온자료를 이용한 국지 수온 추정오차 비교 분석

Error Analysis of the Local Water Temperature Estimated by the Global Air Temperature Data

이 길 하 / 조 홍 연*

Lee, Khil-Ha / Cho, Hong-Yeon

Abstract

A local or site-specific water temperature is downscaled from the nation-wide air temperature that represents simulation by General Circulation Model (GCM). Both two-step and one-step method are tested and compared in three sites: Masan Bay, Lake Sihwa, and Nakdong River Estuary. Two-step method uses a linear regression model as the first step that converts nation-wide air temperature into local air temperature, and the corresponding coefficient of determination is in the range of 0.98~0.99. The second step that converts air temperature into water temperature uses a nonlinear curve, so called S-curve, and the corresponding root mean squared error (RMSE) is 2.07 for rising limb in Masan Bay, 1.93 for falling limb in Masan Bay, 2.59 for Lake Sihwa, and 1.58 for Nakdong River Estuary. In a similar way, one-step method is performed to directly convert nation-wide air temperature into local water temperature, and the corresponding RMSE is 2.28 for rising limb in Masan Bay, 1.89 for falling limb in Masan Bay, 2.55 for Lake Sihwa, and 1.52 for Nakdong River Estuary. Consequently both methods show a similar level of performance, and one-step method is recommendable in that it is simple and practical in relative terms.

Keywords : GCM data, global air temperature, local air temperature, local water temperature, regression analysis, S-shape function

요 지

미래 기온변화 정보를 제공하는 General Circulation Model (GCM) 자료, 즉 광역 기온자료를 이용하여 우리나라의 국지 수온변화를 추정하는 연구를 수행하였다. 국지수온 추정은 마산만, 시화호, 낙동강 하구를 대상으로 Two-step 접근방법과 One-step 접근방법을 적용하여 각각의 추정오차를 비교 분석하였다. Two-step 추정방법은 광역기온으로 국지기온을 추정하는 제1단계에서는 선형회귀분석 기법을 적용하였으며, 모든 지점에서 결정계수가 0.98~0.99 정도로 매우 높게 나타났다. 그리고 국지기온으로 국지수온을 추정하는 제2단계에서는 S-형태함수의 비선형 회귀분석기법을 적용하였으며 이 경우 RMS (Root-mean squared) 오차는 마산만에서 2.07 (온도 증가시기), 1.93 (온도 감소시기), 시화호에서는 2.59, 낙동강 하구에서는 1.58로 파악되었다. 반면 동일한 S-형태함수를 이용한 비선형 회귀분석기법으로 광역기온자료로부터 바로 국지 수온을 추정하는 One-step 접근방법을 적용한 경우, RMS 오차는 마산만이 2.28 (온도 증가시기), 1.89 (온도 감소시기), 시화호에서는 2.55, 낙동강 하구는 1.52로 Two-step 접근방법과 비슷한 수준의 오차를 보이는 것으로 파악되었다. 따라서 광역 기온자료를 이용하여 국지 수온을 추정하는 경우에는 One-step 접근방법도 유용하고 실용적인 것으로 판단된다.

핵심용어 : GCM 자료, 광역기온, 국지기온, 국지수온, 회귀분석, S-형태함수

* 협술투스 수자원부 (e-mail: khil-ha@yahoo.com)
Web-solus, Water Resources Department

** 교신저자, 한국해양연구원 해양환경방재연구부 책임연구원 (e-mail: hycho@kordi.re.kr)

Corresponding Author, Marine Environment & Pollution Prevention Research Department, KORDI, Ansan PO Box 29, Seoul 425-600, Korea

1. 서론

지구 온난화에 따른 미래의 장기 기후변화가 해양환경 및 생태계에 미치는 영향 분석 연구는 해양 환경 생태계와 관련한 모든 인자를 고려하여 연구하는 것이 바람직하다. 그러나 가용한 자료의 부족과 신뢰도 문제로 중요한 환경 인자에 중점을 두는 연구가 우선한다. 연안 생태계 및 해양환경에서 수온은 용존 산소(Dissolved Oxygen, DO)의 양을 조절하는 역할을 하는 가장 중요한 환경인자 중의 하나로써, 21세기 연안 생태환경변화를 예측하기 위해서는 미래 기후변화에 따른 수온변화를 예측하는 연구가 수행(선행)되어야 한다.

일반적으로 지구의 미래 기상자료(예: 기온, 강수, 증발산, 습도, 복사열 등)는 GCM 자료를 활용할 수 있다(IPCC, 2001; IPCC-TGCI, 1999; Wilby et al., 2004; Meehl et al., 2007; Asselman et al., 2003). 그러나 GCM 모형은 연안의 세부 지역이나 육지의 국지적인 수온 자료는 제공하지 않으므로 국지적인 수온을 추정하기 위해서는 기본적으로 두 단계를 필요로 한다. 즉 GCM 광역 기온자료로부터 국지적인 기온자료를 적절한(기 구축된) 관계식을 이용하여 도출하는 단계와 국지 기온자료와 미리 구축한 국지 기온-수온 관계식을 이용하여 국지 수온을 추정하는 단계로 구분된다. 그러나 번거롭게 두 단계를 거치지 않고 오차전파를 줄이는 관점에서 바로 광역 기온자료를 이용하여 국지 수온자료를 추정하는 One-step 접근방법도 가능하다.

수온변화는 인근 지역의 기온변화와 밀접한 관계가 있으며, 국내외의 연구에서 간단하면서도 신뢰할만한 수준을 유지하는 관계식 도출이 가능하다는 것을 보여 주었다(이길하, 2007; 조흥연 등, 2007; Webb, 1987; Preud'Homme and Stefan, 1993; Pilgrim and Stefan, 1995). 이러한 연구

에서 초기에는 선형의 기온-수온관계에 의지하였으나, 선형관계식이 고온과 저온에서 큰 오차를 발생시키는 문제점을 해결하기 위하여 S-형태함수(logistic curve)를 이용하는 비선형관계식이 주류를 이루어 좋은 성과를 거두고 있다. 따라서 관심 대상지역 인근의 미래 기온자료가 가용하고 적절한 기온-수온 관계식을 미리 구축할 수 있다면 미래 수온변화를 적정 수준으로 추정할 수 있다.

GCM 자료는 낮은 공간 해상도(약 1~5°)로 인하여 우리나라 전체 영역이 격자 1~2개 정도의 대표기온(광역 기온)으로 표현되기 때문에 지역적인 기온차이(위도, 고도 등)가 반영되지 못하는 단점이 있다. 그래서 우리나라 전체 대표기온(평균기온, Nationally-averaged; 광역 기온으로 간주)과 주요 관심지점(local or site-specific)의 기온과의 신뢰할 만한 관계를 파악하는 연구 즉 GCM 기온자료의 Downscaling 방법과 국지 수온추정에 대한 정량적인 오차분석 연구가 필요하다(이길하 등, 2008).

본 논문에서는 GCM 자료를 적용하여 장래 수온변화를 예측하기위한 선행연구로서, 광역기온자료를 국지 수온자료로 추정하는 경우, Two-step 방법과 One-step 방법의 추정오차를 분석하였다. Two-step 방법에서는 우리나라 모든 기상대의 기온자료를 이용하여 우리나라 평균 기온(GCM 자료에 상응한다고 가정; 광역 기온자료)을 산정하고, 시화호, 마산만, 낙동강 하구의 지역 기온(국지 기온)과 광역기온자료와의 관계를 선형회귀분석을 이용하여 도출하였다. 도출된 관계식을 이용하여 추정한 시화호, 마산만, 낙동강 하구의 국지 기온자료와 국지 관측 수온자료의 비선형 관계식을 유도하여 국지 수온추정 오차를 산정하였으며, One-step 방법은 한 단계 단축되어 우리나라 평균기온자료와 시화호, 마산만, 낙동강 하구의 국지 관측 수온자료의 비선형 관계식을 바로 유도하여 국지 수온추정 오차를 산정하여 비교 분석하였다.

Fig. 1. Flow Chart for Predicting Future Change on Aquatic Environment

GCM 자료를 이용한 광역 기온자료를 이용한 국지 수온 추정을 위한 Two-step, One-step 방법의 산정과정은 Fig. 1과 같다.

2. 평균 기온자료의 지역화 (Downscaling)

2.1 Downscaling 대상 기온자료

GCM 자료의 Downscaling 기법 적용을 위한 대상 자료는 우리나라 전국에 걸쳐 분포한 기상청 기상대 자료 19개 지점의 일평균 기온자료로부터 일주일 시간간격으로 평균하여 분석하였다. 총 19개 지점의 기온을 공간 평균한 자료(평균 기온, 주 평균)를 GCM 자료로 간주하였으며, 이 평균기온과 각 세 지점(시화, 마산, 낙동강 하구)의 평균기온과의 관계를 분석하는 방법은 선형회귀분석 방법을 이용하였다. 일반적으로 기상대의 일일 평균기온 자료는 양호한 상태이므로 아무런 수정이 없이 사용하였다.

2.2 연안의 수온자료

시화호, 마산만 및 낙동강 하구 지점에서는 해양수산부(해양환경과)에서 수행하는 ‘해양수질자동측정망’ 운영사업을 통하여 연속적으로 기온을 포함한 기상인자, 수온 및 염도, DO, 오염물질의 농도가 관측되고 있으며, 관측 자료를 해양환경관리공단 해양수질자동측정망에서 실시간으로 제공하고 있다(<http://tmsinfo.meis.go.kr>). 시화호에서는 3개 지점, 마산만 해역에서도 3개 지점, 낙동강 하구에서는 1개 지점에서 관측을 수행하고 있으나, 마산만-3(MA3) 지점에서는 기상관측을 수행하고 있지 않기 때문에 본 연구에서는 마산만-1(MA1) 지점, 마산만-2(MA2) 지점의 기온 및 수온자료만을 이용하여 분석을 수행하였으며, 시화호 및 낙동강 하구에서는 모든 지점의 자료가 이용되었다(Fig. 2. 관측지점 위치 참조). 분석대상 기온 및 수온자료는 시화호는 2003년 1월 1일부터 2006년 12월 31일(총 4년 동안의 자료), 마산만은 2004년 1월 1일부터

Table 1. Comparison of the Researches on the Relationship Between Air and Water Temperatures

Researcher	Description of the research (methods and processes)
Lee et al. (2008)	One-Step, Linear-regression method using KMA data. Comparison (estimation error analysis) between observed and estimated air temperatures at each weather station. The local air temperatures are estimated by the relationship between nationally-averaged and local temperatures data.
Lee (2007)	One-step, Non-linear regression (logistic-curve) method using the MEIS data. Comparison (estimation error analysis) between observed and estimated water temperatures in Lake Shihwa, Masan Bay and Nakdong river estuary. The local water temperatures are estimated by the relationship between local air and water temperatures data.
Cho et al. (2007)	One-step, Linear-regression (hysteresis analysis) method using the MEIS data in Masan Bay.
This study (2010)	Suggestion of the one-step and two-step method in order to estimate the local water temperatures using GCM data. Non-linear regression method is used to estimate the local water temperatures from nationally-averaged air temperature data (considered as the GCM air temperature data). In the two-step method, the linear-regression method is used in the first step (local air temperature estimation using the GCM data) and the non-linear regression method is used in the second step (local water temperature estimation using the results of the first step).

Fig. 2. Air and Water Temperature Monitoring Stations (<http://tmsinfo.meis.go.kr>)

2006년 12월 31일 (총 3년 동안의 자료), 그리고 낙동강 하구는 2005년 1월 1일부터 2006년 12월 31일까지의 자료 (총 2년 동안의 자료)이며, 기온은 일반적으로 이용되는 온도센서를 이용하여 관측하였으며, 수온은 PT-1000 제품을 이용하여 관측하였다. 관측간격은 5분이며, 일 자료는 5분 간격으로 측정된 자료를 평균한 자료이다.

2.3. 광역 기온자료를 이용한 국지 기온 추정 : Two-step 방법에서의 제1단계 추정

앞서 설명하였듯이 지구온난화와 동반한 기후변화에 따른 연안 생태환경 변화 예측을 위한 입력 자료로 필수적인 수온자료를 구하기 위해서는 연안 지역의 기온자료가 필요하다. 연안지역의 기온자료는 GCM 자료로부터 일차적으로 필요한 지역적인 규모의 기온자료를 얻는 과정, 즉 GCM 자료의 Downscaling (이하 DS) 과정이 필요하다. DS 방법은 선형관계식을 이용한 통계적인 방법이 널리 사용되고 있는데, 이길하 등 (2008)은 우리나라 전체 대표기온 (평균기온, Nationally-averaged)과 주요 관심 지점 (local or site-specific) 사이에 다음과 같이 선형관계 (linear regression function)가 성립한다는 것을 보여 주었다.

이 연구에서도 다음과 같이 선형관계식을 사용하였다.

$$T_L = aT_G + b \quad (1)$$

여기서, T_L =국지 기온 (지역인자), T_G =광역기온 (평균인자), a , b =각각 지역 보정 계수이다.

세 지역에서 Eq. (1)에 의한 관계식의 결정 계수는 0.98~0.99로 좋은 결과를 보여주고 있다. Fig. 3은 세 지역의 선형 관계를 산포도로 보여준다 (마산 지역은 이력 현상이 뚜렷하게 보이므로 온도 상승 시기와 하강 시기를 따로 분리하여 다른 관계식을 적용, 조홍연 등, 2007).

GCM 자료 적용을 위한 대상 자료로 우리나라 전국에 걸쳐 분포한 기상청 기상대 자료 23개 지점의 2000~2005년 기온자료를 이용하였으며, 모든 지점의 기온을 평균한 자료 (평균 기온)를 GCM 자료 (광역 기온)로 간주하여 이 평균기온과 각 기상대의 평균기온과의 관계를 선형회귀 분석방법을 이용하여 유도하였다. 결정 계수는 0.939~0.933이며, 평균은 0.977로 강한 선형성을 보여주어 전체 대표기온 (평균기온, Nationally-averaged)에서 선형 이동을 통하여 주요 관심지점 (local or site-specific)의 기온을 유도해 낼 수 있으며, 이는 곧 앞서 제시된 2 단계 접근법 대신 S-곡선의 계수 보정을 통하여 GCM 기온과 지역 수온의 관계를 직접 유도해 낼 수 있는 "1 단계 (One-step) 접근법"에 대한 근거를 제시해 준다.

(a) Masan Bay (rising-limb)

(b) Masan Bay (falling-limb)

(c) Lake Sihwa

(d) Nakdong River Estuary

Fig. 3. Scatter Plot Showing a Linear Relationship between Nationally-averaged and Each Station (Masan Bay, Lake Sihwa, and Nakdong River Estuary)

3. 기온자료를 이용한 국지 수온 추정

이 단계는 국지 수온 추정에 이용하는 자료가 Two-step 방법의 제1단계에서 추정된 국지 기온자료인 경우에는 Two-step 추정방법의 제2단계 추정에 해당하며, 광역 수온자료인 경우에는 One-step 추정방법에 해당한다. 그러나 기본적으로 기온자료를 이용하여 수온을 추정하는 기온과 수온의 관계 도출이라는 측면에서 매우 유사하기 때문에 상호비교가 필요할 것으로 판단된다. 일반적으로 기온-수온 관계는 시간간격이 증가함에 따라 높은 온도는 낮아지고 낮은 온도는 높아지는 경향을 보이므로 선형 관계보다는 S-모형으로 제한된 비선형 관계를 가지고 있는 것으로 파악되고 있다 (Pilgrim and Stefan, 1995). 따라서 본 연구에서도 Eq. (2)로 제시되는 Logistic 함수형태를 선정한 S-모형을 이용하여 기온-수온 비선형 관계 분석을 수행하였다. S-모형은 곡선의 기울기, 변곡점까지의 거리, 최대 수온, 최소 수온에 해당하는 4개의 매개변수 ($\alpha, \beta, \gamma, \mu$)를 가지며, 분석기간 동안의 시간규모에 따라 평균한 관측자료를 활용하게 된다.

$$T_w = \mu + \frac{\alpha - \mu}{1 + e^{(\beta - T_a)}} \quad (2)$$

여기서, T_w 는 모형에서 추정하는 수온(기온자료를 이용하여 추정되는 수온), T_a 는 관측된 기온을 나타낸다. 수식에 제시된 α 는 최대 수온, β 는 변곡점에서의 기온, γ 는 변곡점에서의 기울기, μ 는 최소 수온에 해당하는 모형의 매개변수에 해당한다.

Eq. (2)로 제시되는 S-모형은 곡선의 기울기, 변곡점까지의 거리, 최대 수온, 최소 수온에 해당하는 4개의 매개변수 ($\alpha, \beta, \gamma, \mu$)를 가지며, 분석기간 동안의 시간규모에 따라 평균한 관측자료를 활용하게 된다. 기온-수온 비선형 관계모형의 매개변수에 해당하는 $\alpha, \beta, \gamma, \mu$ 값은 지역의 특성을 반영하고 있기 때문에, 지역에 따라 매개변수를 결정해야해야 하는데 이 연구에서는 Shuffled Complex Evolution (SCE) 최적화 기법 (Duan et al., 1993; Nelder, 1965)이 사용되었다.

마산만, 시화호, 낙동강 하구의 관측 지점에 대하여 SCE 최적화 기법으로 구한 매개변수는 Table 2에 제시하였으며, 구축한 S-모형을 이용하여 추정된 국지 수온자료(모형)와 관측자료를 도시하여 Fig. 4에 제시하였다.

산정된 기온을 이용한 세 연안 지역의 기온-수온 관계식의 정확도를 파악하기 위하여 Eqs. (3) and (4)에서 제시된 NSC(Nash and Sutcliffe, 1970) 값과 RMS 오차(Root-mean squared error)를 이용하여 계산하였다.

(a) Masan Bay

(b) Lake Sihwa

(c) Nakdong Estuary (Two-step approach)

Fig. 4. The Fitted S-curve Using the Preferred Parameters Driven by SCE Scheme for Three Stations

Table 2. Preferred Parameter Set for S-curve Driven by SCE Optimization Scheme

	Two-step method (The second step)				One-step method			
	α	β	γ	μ	α	β	γ	μ
Masan bay(rising limb)	32.31	17.98	0.135	2.68	29.87	16.19	0.138	3.92
Masan bay(falling limb)	25.91	11.25	0.195	2.78	26.62	6.34	0.142	0.00
Lake Sihwa	28.80	13.31	0.156	0.84	29.80	13.27	0.144	0.00
Nakdong river estuary	32.30	15.15	0.133	0.00	32.30	12.48	0.118	0.00

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_{iO} - T_{iC})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{T}_{iO} - T_{iO})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{iO} - T_{iC})^2} \quad (4)$$

여기서, T_{iO} =수온 관측자료, T_{iC} =추정치를 이용한 기온 계산자료, N =자료의 개수, $\bar{T}_{iO}$ =추정 기온자료의 평균 (평균기온)이다.

NSC 값의 최대값은 1로, 1에 접근할수록 추정 정확도가 높음을 의미하며, RMS 오차는 오차의 크기를 나타내므로 작을수록 추정 신뢰도가 좋은 것을 의미한다.

한편 One-step 추정방법을 적용한 경우도 동일한 과정으로 매개변수를 추정하고, 결과 비교를 위하여 Tables 2 and 3에 제시하였다. One-step 방법으로 마산만, 시화호, 낙동강 하구의 관측 지점에 대하여 SCE 최적화 기법으로 구한 매개변수는 Table 2에 제시하였으며, 구축한 S-모형을 이용하여 추정한 국지 수온자료 (모형)와 관측자료를 도시하여 Fig. 5에 제시하였다.

Two-step 추정방법의 제2단계에서는 마산지역의 경우 앞서 언급하였듯이 이력현상을 고려하여 기온상승기와 기온하강기를 분리하여 관계식을 구하였다. S-모형을 이용한 경우 마산 지역에서는 NSC 값이 0.91 (온도 증가 시), 0.98 (온도 감소 시)이며, RMS 오차는 2.07 (온도 증가 시), 1.93 (온도 감소 시)으로 양호한 결과를 보여주었다. 시화호 지역에서는 NSC 값이 0.90, RMS 오차는 2.59로 나타났으며, 낙동강 하구에서도 비슷한 양상이 나타나는데 NSC 값이 0.95, RMS 오차가 1.58로 나타났다 (Table 2).

마찬가지로 One-step 추정방법에서도 마산지역의 경우는 이력현상 (조홍연 등, 2007)을 고려하여 기온상승기와 기온하강기를 분리하여 관계식을 구하였다. 연구 결과 기온-수온 비선형 관계에서 마산 지역에서는 NSC 값이 0.89 (온도 증가 시기), 0.93 (온도 감소 시기)이며, 시화호 지역에서는 0.90이며 낙동강 하구에서는 0.96으로 나타났다. RMS 오차는 마산이 2.28 (온도 증가 시기), 1.89 (온도

감소 시기)로 나타났으며, 시화호 지역에서는 2.55, 낙동강 하구에서도 1.52로 비슷한 양상을 보여주었다 (Table 3).

본 연구에서 제안한 방법의 RMS 오차는 2.0°C 수준에 해당하지만, 보다 낮은 수준의 오차범위에서 추정하기 위해서는 본 모형은 한계가 있으며, RMS 오차 수준을 개선하는 새로운 모형의 개발 또는 새로운 접근방법의 제안 등이 필요할 것으로 판단된다. 기본적으로 기온과 수온은 뚜렷한 계절변동 성분을 가지기 때문에 계절 변동 성분

(a) Masan Bay

(b) Lake Sihwa

(c) Nakdong Estuary (One-step approach)

Fig. 5. The Fitted S-curve Using the Preferred Parameters Driven by SCE Scheme for Three Stations

Table 3. Basic Statistics (RMSE and NSC) for the Fitted S-curve

	Two-step method (The second step)		One-step method	
	RMS Error	NSC	RMS Error	NSC
Masan bay (rising limb)	2.07	0.91	2.28	0.89
Masan bay (falling limb)	1.93	0.98	1.89	0.93
Lake Shihwa	2.59	0.90	2.55	0.90
Nakdong river estuary	1.58	0.95	1.52	0.96

(a) Two-step approach

(b) One-step approach

Fig. 6. Probability of Exceedance for the Fitted S-curve vs Observed Water Temperature for Three Stations

등을 제거한 전차성분만을 이용하여 추정하는 방법을 개발하는 것도 가능한 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 GCM 자료를 이용한 국지 수온 추정기법을 제시하는 방법과 그 방법의 한계를 제시하는 것으로 그 범위를 한정하고 있다.

신뢰수준(confidence level, significance level; 유의수준)이 높을수록, 신뢰구간(오차범위/구간)이 증가하고, 신뢰구간이 증가하면 추정치를 기준으로 하는 추정범위(추정치±신뢰구간)에서 벗어나는 자료가 감소하게 된다. 그 감소 정도는 추정범위를 벗어나는 자료의 개수를 전체 자료의 개수로 나눈 비율(percentage), 즉 초과확률로 표현이 가능하다. 그 초과확률은 추정범위를 벗어나는 자료의 개수에 비례하기 때문에 신뢰구간이 증가할수록 초과확률이 감소하는 양상을 보이게 된다. 따라서 추정치와 관측치가 높은 수준의 일치성을 보일 경우에는 초과확률 감소양상이 매우 급격하게 발생하여야 하며, 낮은 수준의 경우에는 매우 완만한 감소양상을 보이게 된다.

본 연구에서의 일치수준은 보통 수준의 경우로 판단된다. 그러나 Two-step 추정방법과 One-step 추정방법에 따른 차이는 지역적인 차이는 있으나 방법에 따른 차이는 매우 미미한 것으로 판단된다.

Fig. 6에서는 추정치와 관측치의 일치성을 나타내는 통계량으로 상한치와 하한치의 초과치를 그림으로 나타내었는데, 약 90~95%의 자료가 신뢰도 90% 수준의 범위에 있다. 이는 이길하 등(2008)이 제시한 Two-step 방법의 제1단계와 비슷한 정도의 정확도를 보여준다.

이 연구의 결과는 연안 지역의 수온을 추정 시 GCM 격자의 수치 평균 기온이 관측 평균 기온과 일치한다는 가정 성립한다면 S-곡선식을 이용하여 GCM 기온 자료로부터 지역의 수온 자료를 적절한 신뢰도와 정확도를 가지고 추정할 수 있다는 것을 보여준다.

실질적으로 GCM 자료는 다양한 조건에 대하여 미래의 기후변화, 즉 기온 변화예측자료를 제시하고 있기 때문에 GCM 자료를 이용하여 우리나라 연안의 미래의 수온자료를 예측하기 위해서는 본 연구에서 제안한 모형과 더불어 추가적인 연구·분석이 필요하다. 본 연구에서는 우리나라 모든 기상대의 기온관측 자료를 평균하여 GCM 자료로 가정하였으나, GCM 결과로 제시되는 자료와는 일정한 또는 예상할 수 없는 어떤 차이가 발생할 수 있기 때문에 GCM 과거자료와 우리나라의 전국 평균 기온자료를 비교하여 그 차이를 비교·분석하여야 한다. 이 경우, 적절한 GCM 모형으로부터 제시되는 미래 예측자료를 이용하여 우리나라 전국 평균 기온자료를 추정하고, 이러한 방법으로 추정된 전국 평균 기온자료는 본 연구에서 제안한 One-step 또는 Two-step 방법을 이용하면 국지적인 미래의 연안 수온 추정에 바로 활용할 수 있다. 현재 단계에서는 본 연구에서 제안한 모형의 매개변수가 제시되어 있는 시화호, 마산만, 낙동강 하구 영역으로 적용 영역이 제한되어 있으나, 향후 적용 범위를 확대하기 위해서는 연안 주요 지점에 대한 최소 3년 이상의 연속적인 수온 관측자료의 축적이 필요하다.

4. 결론 및 제언

지구 온난화와 관련된 장기 기후변화로 인한 연안 생태 환경 변화를 예측의 일환으로 연안 수온 변화를 예측할 필요가 있으며, 연안 수온변화 예측은 연안의 미래 기온 변화예측을 필요로 한다. 본 연구에서는 미래 기온변화 정보를 제공하는 GCM 자료를 우리나라 연안의 국지적인 수온변화 예측에 이용하기 위하여 우리나라 전국 기온평균 자료와 국지적인 기온자료의 선형회귀관계식을 도출하였다. 도출된 관계식을 이용하여 산정된 지역 기온 추

정치로부터 S-곡선을 바탕으로 연안 수온자료를 추정하여 관측 자료와 비교하였다.

선형회귀분석 기법을 이용한 우리나라 연안의 국지적인 기온은 결정계수가 0.98~0.99로, 이 방법으로 21세기 기후변화 모의조건 (scenario)에 대한 GCM 자료의 우리나라 격자정보 (전국 평균기온)를 이용하여 우리나라 연안의 국지적인 기온변화를 추정하는데 활용할 수 있었다. 이전된 기온-수온 비선형 관계에서 마산 지역에서는 NSC 값이 0.91 (온도 증가시기), 0.98 (온도 감소시기)이며, RMS 오차는 2.07 (온도 증가시기), 1.93 (온도 감소시기)으로 양호한 결과를 보여주었다. 시화호 지역에서는 NSC 값이 0.90, RMS 오차는 2.59로 나타났다으며, 낙동강 하구에서도 비슷한 양상이 나타나는데 NSC 값은 0.95, RMS 오차는 1.58로 나타났다

한편, One-step 접근방법을 이용하여, 미래 기온변화 정보를 제공하는 GCM 기온 자료를 우리나라 하천 또는 연안의 국지적인 수온변화 예측에 이용하기 위한 사전 관계식 도출을 위하여 우리나라 전국 기온평균 자료를 바탕으로 S-곡선에 의한 관심지역의 수온관계식을 도출하였다. 연구 결과 기온-수온 비선형 관계에서 마산 지역에서는 NSC 값이 0.89 (온도 증가시기), 0.93 (온도 감소시기)이며, 시화호 지역에서는 0.90이며 낙동강 하구에서는 0.96으로 나타났다. RMS 오차는 마산이 2.28 (온도 증가시기), 1.89 (온도 감소시기)로 나타났으며, 시화호 지역에서는 2.55, 낙동강 하구에서도 1.52로 비슷한 양상을 보여주었다. 이 연구의 결과는 앞서 발표된 2단계 접근법보다 간단하면서도 비슷한 정도의 정확도를 보여주어 실용적인 면에서 우수한 것으로 판단된다.

본 연구는 연안 생태환경변화를 예측하기 위한 초기단계의 연구로서 GCM 자료형태의 광역정보를 국지적인 공간정보로 연결하는 연구, 연안의 수온을 인근 지역의 기온 및 기상정보로 정확하게 추정하는 연구가 수행되었거나 진행 중이며, 나아가 기상 환경변화 정보를 이용하여 연안 생태계 변화를 예측하는 연구가 추가로 이루어져야한다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원 창의 연구과제 사업 (PE-9853D)의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 본 논문을 심사해 주신 익명의 심사위원에게도 감사드립니다.

참고문헌

조흥연, 이길하, 조정준, 김준성 (2007). "연안 해역 기온

과 수온의 상관관계 및 이력현상 분석." **한국해양-해양공학학회지**, 한국해양해양공학회, 제19권, 제3호, pp. 213-221.

이길하 (2007). "우리나라 연안 기온과 수온의 비선형 상관관계 분석." **한국해양-해양공학학회지**, 한국해양해양공학회, 제19권, 제2호, pp. 128-135.

이길하, 조흥연, 조범준 (2008). "연안 해역의 미래 기온변화 예측을 위한 GCM 자료 Downscaling 기법의 신뢰수준 분석." **한국해양-해양공학회는문집**, 한국해양해양공학회, 제20권, 제1호, pp. 34-41.

Asselman, N.E.M., Middelkoop, H., and 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*, Vol. 17, pp. 3225-3244.

Duan, Q.Y., Gupta, V.K., and Sorooshian, S. (1993). "Shuffled Complex Evolution approach for effective and efficient global minimization." *Journal of Optimization Theory and Application*, Vol. 76, pp. 501-521.

IPCC (2001). *Climate change 2001: The scientific basis*. Cambridge University Press.

IPCC-TGCI (1999). "Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment, Version 1." *Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment*. (Edited by Carter, T.R., Hulme, M., and Lal, M.).

Meehl, G.A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J.F.B., Stouffer, R., and Taylor, K. (2007). "Multi-model dataset: A new era in climate change research." *American Meteorological Society*, pp. 1383-1394.

Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models, I-A Discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.

Nelder, J.A., and Mead, R.A. (1965). "A simplex method for function minimization." *Computer Journal*, Vol. 7, pp. 308-313.

Pilgrim, J.M., and Stefan, H.G. (1995). *Correlation of Minnesota stream water temperatures with air temperatures*. Project. Rep. 382. St Anthony Falls Lab., U of Minnesota, Minneapolis.

Preud'Homme, E.B., and Stefan, H.G. (1993). "Stream

temperature estimation from air temperature." *Water Resources Bulletin*, Vol. 29, No. 1, pp. 27-45.

Webb, B.W. (1987). *The relationship between air and water temperatures for a Devon River*. Rep. Trans., Devon Association for the Advancement of Science, Exter, U.K., pp. 197-222.

Wilby, R.L., Charles, S.P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., and Mearns, L.O. (2004). *Guidelines for*

Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods. Task Group on Data and Scenario Support for Impacts and Climate Analysis (TGICA), IPCC.

논문번호: 10-078	접수: 2010.08.29
수정일자: 2011.01.06/03.17	심사완료: 2011.03.17