

우리나라 연안 기온과 수온의 비선형 상관관계 분석 Nonlinear correlation analysis between air and water temperatures in the coastal zone, Korea

이길하*
Khil-Ha Lee*

요지 : 해양수산부에서 연안에 설치한 기상 관측 장비로 측정된 우리나라 세 지역(낙동강 하구, 시화호, 마산만)의 기온과 수온 자료를 바탕으로 기온-수온의 비선형 상관관계를 분석하였다. 기온-수온 대표관계인 비선형 S-모형의 관계식에 포함된 4개의 매개변수를 결정하기 위해서 SCE 최적화 기법을 이용하였으며, 마산만 지역에서는 계절적 이력현상을 고려하여 서로 다른 관계식을 적용하였다. 기온-수온 상관 관계는 시간규모에 따른 최대 온도값과 최소 온도값에 차이가 있으나 수질 또는 생태 반응의 적당한 시간규모에 해당하는 주 평균 온도값을 이용하여 분석하였다. 전반적으로 연구지역인 하천과 해안이 접하는 우리나라 해안 및 하구 지역에서는 S-모형의 관계식이 선형 관계식보다 적합한 것으로 파악되었다. 이 연구는 기후변화 가설에 따른 미래의 수온변화에 반응하는 수질, 수문, 및 생태반응을 모의하여 공학기술자 또는 정책입안자에게 적절한 기후변화 대책 방향을 설정하는데 기여할 것으로 사료된다.

핵심용어 : 기온, 수온, 비선형 상관관계, 매개변수, 지구온난화

Abstract : In response to anthropogenic global warming due to a buildup greenhouse gas, the effect of the air temperature on water temperature has been noticed. Therefore, efforts have been made to build an air/water temperature relationship at three study regions using the data collected by the Ministry of the Maritime Affairs and Fisheries (MOMAF). The air/water relationship varies with time-scale and weekly time-scale was chosen for the study. The data were fitted to the S-shaped non-linear relationship, and the parameters for the S-curve were derived using a single-criteria multi-parameter optimization scheme. Separate regression curves were fitted to consider seasonal hysteresis at the Masan site. The study results support the S-shaped non-linear relationship is the best fit for the air/water relationship at the Korean coastal zone. This study will contribute to determine the future policy regarding water quality and ecosystem for the decision-driving organization.

Keywords : Air Temperature, Water Temperature, Non-linear correlation, Parameter, Global Warming

1. 서론

지구의 연평균 기온은 지난 수십년 동안 증가하는 추세를 보여주고 있으며(IPCC, 2001), 우리나라에서도 장기적인 기온 증가 현상이 발견되어, 지구온난화 현상에 대한 주장을 뒷받침하고 있다. 기온, 강우, 증발산 등 주요한 기후인자의 변화는 토지피복형태, 생태계, 물순환에 영향을 미치는 수문학적 인자의 계속되는 변화를 가져오고, 이 변화는 인간의 사회경제문화보존 등의 문제로 연결되어 기본생

활에 영향을 미치기 때문에 이에 대한 적절한 고찰 및 대비가 필요하다(Asselman et al., 2003). 기온 증가는 생물의 생존 조건에 직접적으로 영향을 미친다. 식물의 경우, 성장일수가 증가할 것이며 성장시기의 변화를 가져오고, CO₂ 농도의 증가는 CO₂ 거름효과(fertilization effects)를 통해 다양한 식물로부터 생산되는 생체량(biomass)에 직접적으로 영향을 미친다(Stockle et al., 1992; Stefan and Sinokrot, 1993). 동물의 경우, 기온의 증가에 따른 환경변화로 인해서 개체수의 증감을 초래한다. 또한, 기온증가는 수온변화를 유발

*경원대학교 GIS 연구소(Corresponding author: Khil-Ha Lee, GIS Research Institute, Kyungwon University, khil_ha@yahoo.com)

하기 때문에 수온변화에 따른 환경에 적응하기 위하여 수생식물의 종류가 바뀔 수 있으며, 수온변화의 직접적인 영향으로 어종에도 변화를 가져올 수 있다. 그리고, 수중에서의 생화학적 반응을 지배하는 수질반응에도 영향을 미친다. 인간에 의하여 초래된 기온변화는 수온의 변화를 유발하며, 이로 인하여 수중생물의 환경조건이 심하게 변할 수도 있으며(IPCC-TGCI, 1999; IPCC, 2001), 이 영향은 토목기술자, 농업기술자, 수문학자, 생태학자 그리고 정부기관에서 중요하게 고려해야 하는 문제로 대두되고 있다.

화석연료의 사용으로 인류가 초래한 기온 증가는 생물의 생존 조건에 직접적인 영향을 미치고 있으며, 기온증가는 연안해역의 수온에도 영향을 미치기 때문에 수온의 영향을 직접적으로 받는 연안 수중생물의 환경조건에도 큰 영향을 미친다. 그러나, 일반적으로 기온자료는 풍부한 반면, 상대적으로 수온자료는 매우 미흡한 실정으므로 수중 생물의 환경조건을 파악하는 중요한 인자에 해당하는 수온자료를 이용하여 장기적인 작은 환경변화(온도변화)를 파악하는 것은 매우 곤란하다. 따라서, 장기간의 기온자료를 이용한 수온변화를 추정하는 과정이 불가피하며, 보다 정확하게 수온자료를 추정하기 위해서는 보다 신뢰할 만한 수온-기온 관계를 도출하는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 기온변화에 상응하는 수온반응을 파악하기 위하여 해양수산부에서 제공하는 마산만, 시화호, 낙동강 하구연안의 기온 및 수온 동시 관측자료를 이용하여 기온과 수온자료의 비선형 상관관계 분석을 수행하였다. 보다 많은 기상자료를 이용하여 수온자료를 추정하는 기법이 있으나, 장기적으로 가용한 기상자료의 제한으로 실질적으로는 적용이 곤란하기 때문에 본 연구에서는 기존의 연구에서 제시되는 선형 상관관계의 한계를 극복한 비선형 상관관계를 분석하여 보다 향상된 수온 추정기법을 제시하고자 한다.

2. 연안의 기온 및 수온자료의 변화특성

2.1 연안의 기온 및 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 해양환경포털서비스에서 실시간으로 제공하고 있다(www.meps.go.kr). 시화호 해역에서는 3개 지점, 마산만 해역에서도 3개 지점, 낙동강 하구에서는 1개 지점에서 관측을 수행하고 있으나, 마산-3(MA3) 지점에서는 기상관측을 수행하고 있지 않

기 때문에 본 연구에서는 마산-1(MA1) 지점, 마산-2(MA2) 지점의 기온 및 수온자료를 이용하여 분석을 수행하였으며, 시화호 및 낙동강 하구에서는 모든 지점의 자료가 이용되었다(Fig. 1-3. 관측지점 위치 참조). 분석대상 기온 및 수온자료는 시화호는 2003년 1월 1일부터 2006년 12월 31일

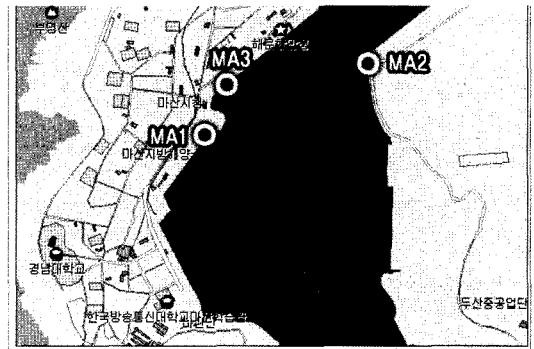


Fig. 1. Air and Water Temperature Monitoring Stations in Masan Bay (excerpt from “www.meps.go.kr”).

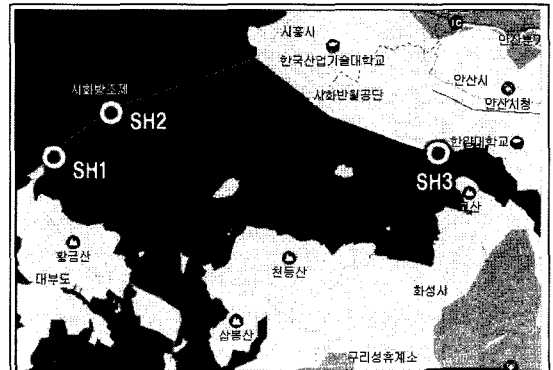


Fig. 2. Air and Water Temperature Monitoring Stations in Lake Shihwa (excerpt from “www.meps.go.kr”).

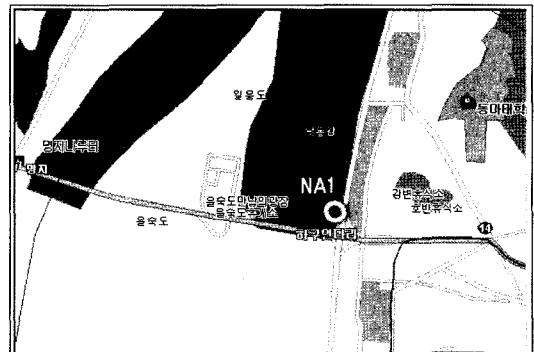


Fig. 3. Air and Water Temperature Monitoring Stations in Nakdong River Estuary (excerpt from “www.meps.go.kr”).

(총 4년동안의 자료), 마산만은 2004년 1월 1일부터 2006년 12월 31일(총 3년동안의 자료), 그리고 낙동강 하구는 2005년 1월 1일부터 2006년 12월 31일까지의 자료(총 2년동안의 자료)이며, 기온은 일반적으로 이용되는 온도센서를 이용하여 관측하였으며, 수온은 PT-1000 제품을 이용하여 관측하였다. 관측간격은 5분이며, 일 자료는 5분 간격으로 측정된 자료를 평균한 자료이다.

2.2 기온과 수온 관계의 시간규모에 따른 자료 특성 변화

기온과 수온의 관계식에서는 시간규모(time scale)에 따라 최대값과 최소값이 변하고, 그로 인하여 기온과 수온 관계의 양상이 달라질 수 있어 연구(분석)목적에 적합한 시간규모를 결정하는 것이 시간규모를 1일, 3일, 7일, 30일(월 단위)로 결정하여 수온 자료를 평균하면 평균자료를 생산

Table 1. Maximum and minimum values of water temperatures due to the daily-, three-day-, weekly-, and monthly-averaged data

	Max. temperature (°C)	Min. temperature (°C)
1-day average	30.55	2.02
3-day average	30.43	2.57
7-day average	29.65	3.11
monthly average	26.87	5.06

하는 시간규모에 따라 최대값은 각각 30.55, 30.43, 29.65, 26.87 °C로 작아지며, 최소값은 2.02, 2.57, 3.11, 5.06 °C로 커지는 현상을 보이고 있다(Table 1참조). 또한, 관계분석을 위한 시간규모가 증가할 수록 자료의 개수는 감소하고 있으나 기온과 수온의 상관도는 증가하는 양상을 보이고 있음을 알 수 있다(Fig. 4참조). 따라서, 선형을 가정하면 시간규모가 증가함에 따라 자료(수온 및 기온)의 기울기(=[최대값-최소값]/분석기간; 분석기간은 일정)가 작아지는 경향을 나타내며 이것은 일반적인 현상으로 받아들여지고 있다(Pilgrim and Stefan, 1995).

한편, 대기(수온)에서 수면(수온)으로 열전도가 일어날 때 대기보다 밀도가 큰 물에 열이 저장되는 데 걸리는 시간은 대기보다 크기 때문에 최대 및 최소 수온에 도달하기까지는 시간지체(delayed lag) 현상이 일어나는데, 그 시간규모는 수심에 따라 0.6 m 이하의 얕은 곳에서는 4시간 정도이며, 1.5 m 이상의 보다 깊은 곳에서는 몇 일 정도가 된다(Webb, 1987; Preud' Homme and Stefan, 1993). 따라서, 일평균 정도의 시간규모가 작은 자료는 기온-수온의 상관도가 낮을 수가 있으므로, 수온의 변화양상이나 수중의 생태반응을 고려할 때 일주일의 기간이 적합한 것으로 판단되며, 일주일 정도의 시간규모 자료를 이용한 기온-수온 상관 관계가 양호하여 기온-수온 상관관계에서는 주평균(weekly-

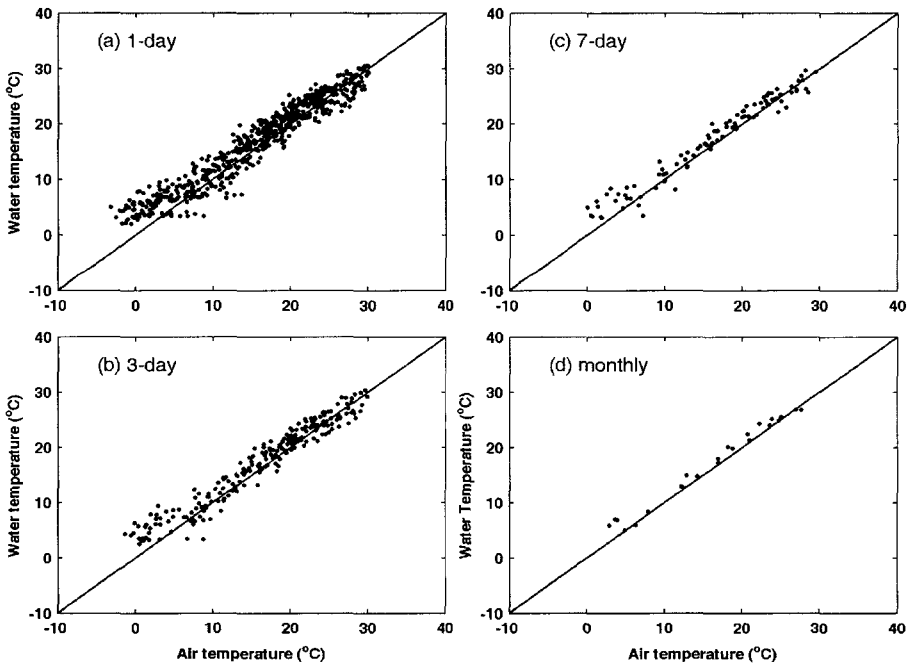


Fig. 4. Scatter plot of the air and water temperatures in Nakdong River estuary.

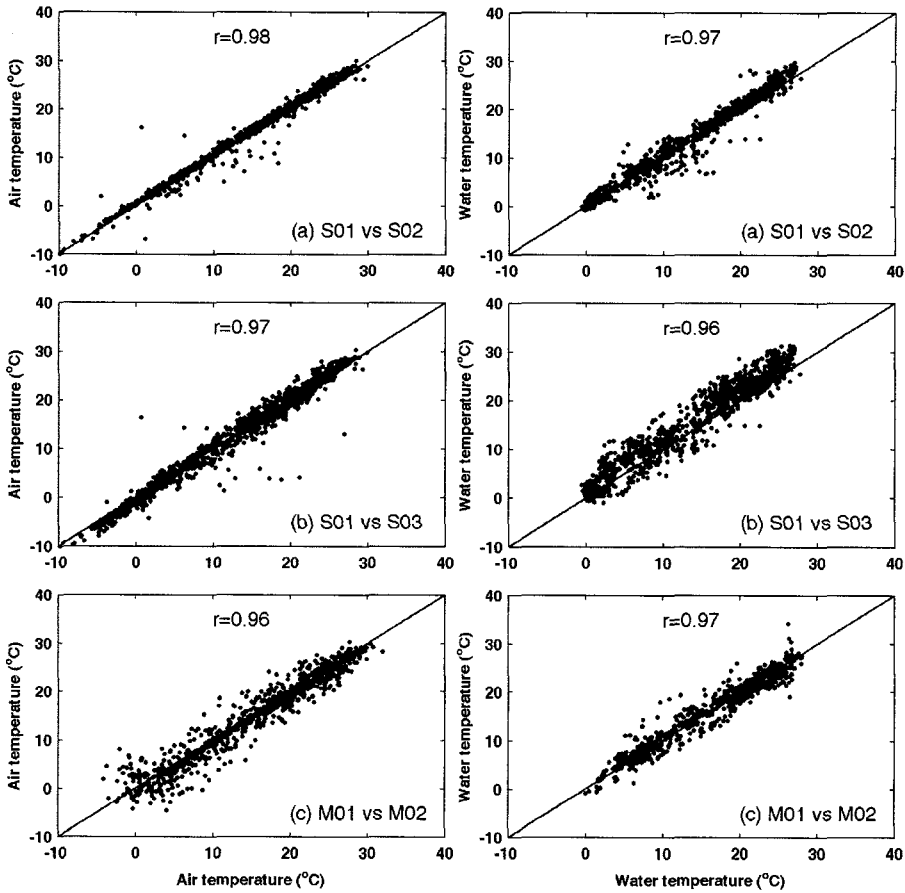


Fig. 5. Scatter plot of the air and water temperatures in Masan Bay and Lake Shihwa.

mean) 자료가 주로 사용되며, 본 연구에서도 주 평균자료를 이용하여 기온-수온 상관관계를 분석하였으며, 공간적인 자료변화 및 자료 품질검토는 산포도를 이용하여 수행하였다(Fig. 4-5참조).

3. 비선형 기온-수온 관계모형 및 매개변수 추정

3.1 비선형 기온-수온 관계모형

전통적으로 기온-수온 관계는 간단한 선형 관계식을 이용하여 분석되어 왔으나, 일반적으로 시간규모가 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 식 (1)로 제시되는 Logistic 함수형태를 선정하여 기온-수온 비선형 관계분석을 수행하였다.

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

여기서, T_w 는 모형에서 추정하는 수온(기온자료를 이용하여 추정되는 수온), T_a 는 관측된 기온을 나타낸다. 수식에 의하면 α 는 최대 수온, β 는 변곡점에서의 기온, γ 는 변곡점에서의 기울기, μ 는 최소 수온으로 모형의 매개변수에 해당한다(Fig. 6참조).

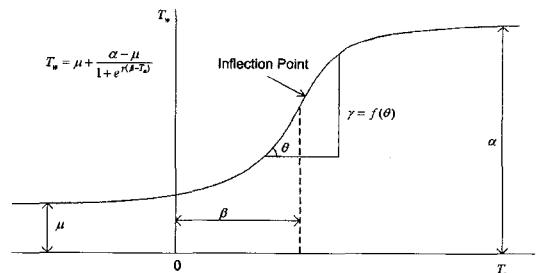


Fig. 6. Schematic diagram of the parameters in the S-curve model.

식 (1)로 제시되는 S-모형은 곡선의 기울기, 변곡점까지의 거리, 최대 수온, 최소 수온에 해당하는 4개의 매개변수 ($\alpha, \beta, \gamma, \mu$)를 가지며, 분석기간동안의 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 결정하는 작업이 불가피하며, 매개변수 추정작업은 비선형 최적화 문제에 해당하기 때문에 많은 시간을 필요로 한다.

3.2 SCE 기법을 이용한 매개변수 추정 기법

일반적으로, n개의 매개변수를 가지는 수치모형은 m개 ($m \geq n$)의 관측값을 이용하여 보정(calibration)한다. 본 연구에서 제시하는 기온-수온 S-모형관계식 매개변수는 지역의 기온변화 특성(최대 온도, 최저 온도, 중간 값, 기울기 등)을 나타내며, 관측자료는 마산만, 시화호, 낙동강 하구 지역의 기온과 수온자료이다. 관측값과 n개의 매개변수로 결정된 모형 추정값과의 오차는 목적함수(objective function) O로 구성할 수 있으며, 이 연구에서는 RMS(Root Mean Squared) 오차가 사용되었다. 보정과정은 목적함수 O의 값을 최소화하는 n개의 매개변수를 반복적으로 일정범위 이내로 수렴할 때 까지 찾아가는 과정에 해당한다(Fig. 7참조).

SCE(Shuffled Complex Evolution) 기법은 Downhill Simplex Algorithm(Nelder and Mead, 1965) 방법을 바탕으로 하여 단일 기준(하나의 목적함수) 다변수 최적화 기법으로 수문(hydrology) 및 기상분야와 같은 수자원 관련 비선형 모형의 광역(global) 최적화 매개변수를 추정하기 위하여 개발되었다. SCE 기법은 가능한 매개변수 공간에서 여러 변수를 선택하여 시도하기 위하여 임의로 표본 선정을 반복한다. Fig. 4에서 보듯이 일반적인 최적화 기법의 취약점중의 하나는 국지적 최적화 지점(local minima 또는 secondary

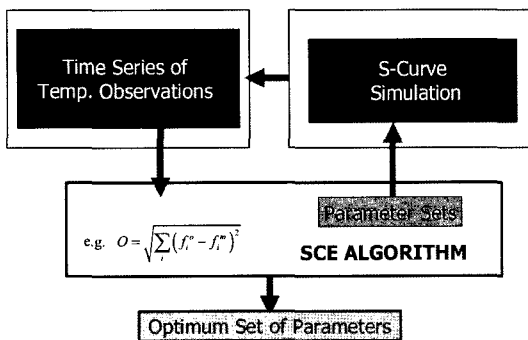


Fig. 7. Process of the optimal parameter estimation using SCE algorithm.

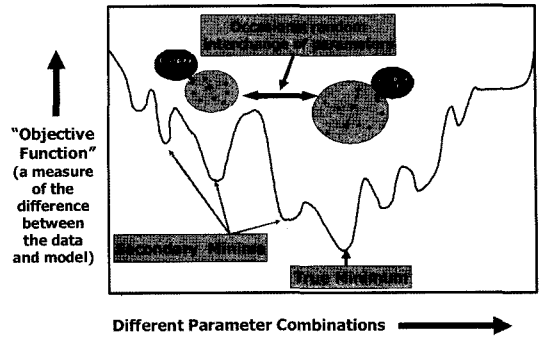


Fig. 8. Schematic diagram of the SCE algorithm looking for global minimum.

minima)에 도달하는 문제인데, SCE 기법은 다경로(complex)를 통해 반복과정을 수행함으로써 이러한 취약점을 극복하고 광역 최적화 지점(global minima)에 도달하도록 설계되어졌다(Fig. 8참조).

SCE 기법은 n개의 매개변수에 대해서 가능한 일정 정도의 범위를 미리 선정하여 놓고, 그 범위 내에서 오차가 최소인 매개변수가 결정된다. 또한, 여러 개의 해를 구한 후 오차가 가장 작은 매개변수를 최적해로 선정한다.

3.3 매개변수 추정 및 분석

본 연구에서는 3.2절에서 소개한 SCE 기법을 이용하여, 목적함수(objective function)는 관측자료와 추정자료의 RMS(Root Mean Squared) 오차를 최소화하는 함수로 선정하여 매개변수를 추정하였다. 한편, 마산만 지역에서는 늦봄에서 여름철로의 온도 증가시기와 여름철에서 초겨울 철로의 온도 감소시기에 서로 다른 경로를 따라 기온-수온의 변화를 보여 주는 이력 현상이 나타나는 것으로 파악된 바(조·이, 2007; Fig. 9참조), 마산만의 기온-수온 관계를 구하는 과정에서 자료를 상승기간, 하강기간으로 분리하여 고려하였다.

최적화기법을 이용하여 추정된 매개변수는 Table 2에 제시하였으며, 제시된 결과를 보면 SCE 기법이 비록 물리적인 의미를 고려하지 않고 단순히 수학적으로 최적화된 매개변수만을 찾아낸다 할지라도 S-모형의 매개변수는 물리적인 의미부여가 가능할 것으로 판단된다.

4. 비선형 기온-수온의 S-모형의 오차분석

마산만 지역은 두 개의 관측 지점, 시화호 지역은 세 개의 관측 지점과 낙동강 하구의 한 개 관측 지점에 대하여

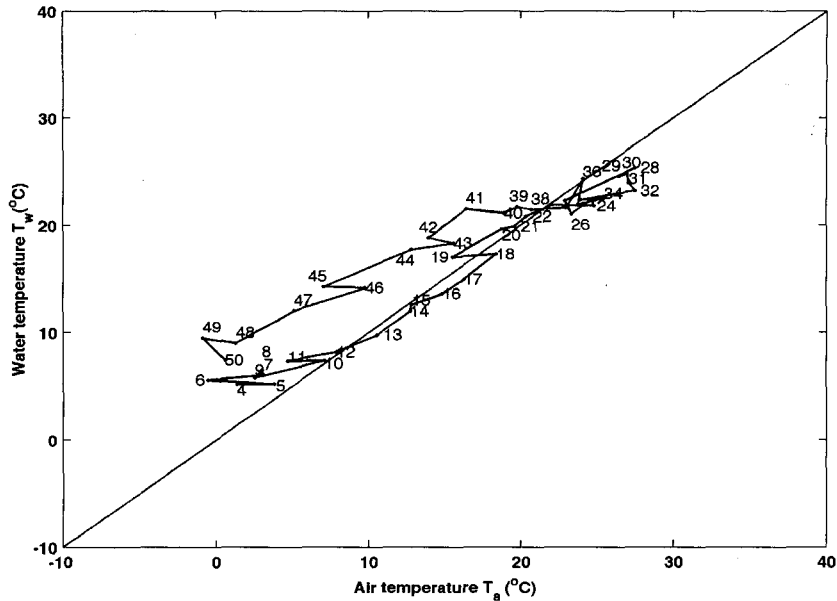


Fig. 9. Hysteresis pattern of the air and water temperatures (Masan bay).

Table 2. S-Model Parameters estimated by the SCE scheme

Parameters	α	β	γ	μ
마산(기온상승시)	27.78	16.10	0.187	4.14
마산(기온하강시)	24.75	11.20	0.221	4.50
시화호	31.50	14.44	0.131	0.00
낙동강 하구	30.70	15.17	0.155	1.68

앞 절에서 설명한 방법으로 구한 매개변수를 이용하여 구축한 S-모형을 이용하여 추정된 수온자료(모형)와 관측자료를 도시하여 Fig. 9에 제시하였다. 모형을 이용한 수온추정의 정확도를 파악하기 위하여 Nash-Sutcliffe coefficient of Efficiency(NSC)(Nash and Sutcliffe, 1970) 값과 RMS 오차를 식 (2), (3)을 이용하여 계산하였다.

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (K_{simi} - K_{obsi})^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{K}_{obsi} - K_{obsi})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{simi} - T_{obsi})^2}{n-4}} \quad (3)$$

여기서, T 는 수온, 첨자로 사용한 $obsi$, $simi$ 는 각각 관측치, 계산치를 의미하며, n 은 사용한 자료의 개수, 변수 상단의 $\bar{}$ 표시는 평균을 의미한다.

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

일반적으로 기온-수온 관계의 S-모형 추정결과와 단순 선형 관계식을 이용한 추정결과를 비교하였을 때, 계산된 NSC와 RMS 오차 모두 마산 지역에서 현저하게 감소하였으며, 시화호와 낙동강 하구 지역에서는 약간 감소하였다. 우선, 마산 지역에서는 앞서 언급하였듯이 이력현상을 고려하여 기온상승기와 기온하강기를 분리하여 관계식을 구하였다. S-모형을 이용한 경우에는 NSC가 0.888(온도 증가시), 0.929(온도 감소시)로 선형모형을 이용한 경우의 0.768(온

Table 3. NSC and RMS Error of the Linear and Nonlinear Models

Classification		Masan bay		Lake Shihwa	Nakdong Estuary
		Rising limb	Falling limb		
NSC	S-curve model	0.888	0.929	0.917	0.967
	Linear model	0.768	0.901	0.910	0.960
RMSE	S-curve model	2.518	1.765	2.426	1.388
	Linear model	3.629	2.077	2.520	1.532

도 증가시), 0.901(온도 증가시)보다 약 0.03~0.12 증가하였다. 한편, RMS 오차는 2.518(온도 증가시), 1.765(온도 감소시)로 선형관계식을 이용한 경우에서의 3.629(온도 증가시), 2.077(온도 감소시)보다 약 0.8~1.6°C 감소하였다. 시화호 지역에서는 S-모형을 이용한 경우 NSC가 0.917로 선형모형을 이용한 경우의 0.910보다 약 0.007°C 증가하였다. RMS 오차는 2.426으로 선형모형 조건의 2.520 보다 약 0.1°C 감소하였다. 한편, 낙동강 하구에서도 비슷한 양상이 나타나는데 S-모형을 이용한 경우의 NSC가 0.967로 선형관계식을 이용한 경우의 0.960보다 약 0.007 증가하였으며, RMS 오차는 1.388으로 선형관계식을 이용한 1.532보다 약 0.150 감소하였다.

한편, 마산만 지역에서 비선형성이 더 확연하게 나타나는 경향이 있으며 봄철에서 여름철로의 기온 증가시보다는 여름철에서 겨울철로의 기온 감소시에 더 좋은 일치를 보이며, 기온 감소시에 S-모형이 선형모형에 비하여 우수한 것으로 나타났다(Fig. 10참조). 낙동강 하구지역은 하구언 방조제로 인하여 해류가 차단되어있어 해류의 영향이 상대적으로 적으며 이는 안정적인 대기-수표면의 상호작용으로 이어져 정확도가 마산 또는 시화호 지역보다 높은 것으로 생각된다. 마산 지역은 해류의 계절적 온도 영향에 의하여 계절적 이력현상이 나타나는 것으로 생각되며 시화호보다 정

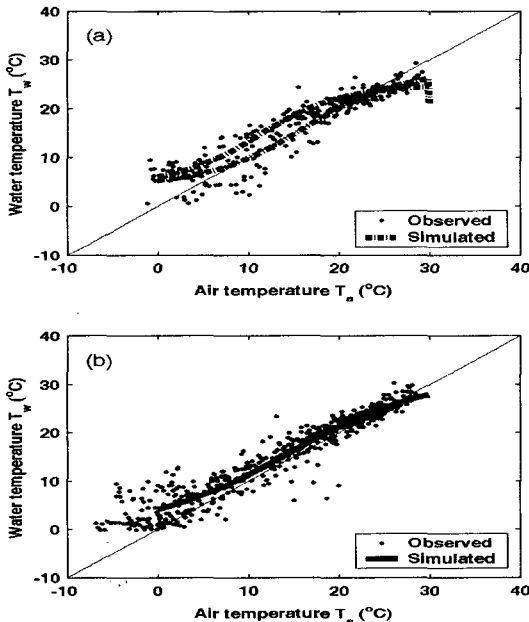


Fig. 10. Scatter plot of the observed and simulated temperatures (Masan Bay).

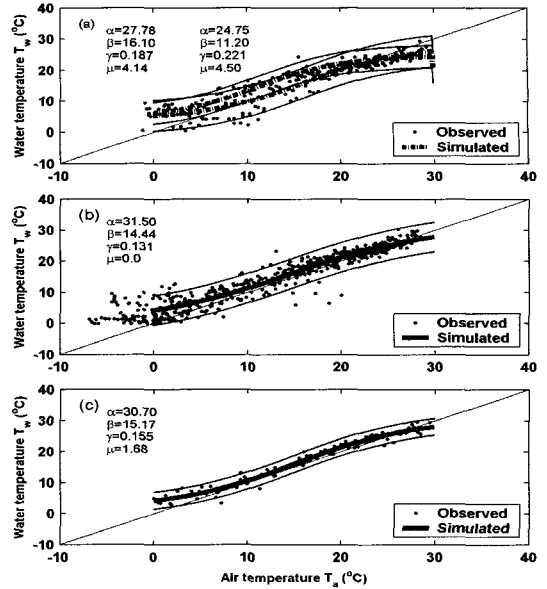


Fig. 11. Comparison of the observed and computed water temperatures.

확도가 높은 것은 우연인 것으로 생각된다. 다만 시화호는 관측지점 부근에 발전소가 있어 이로부터 방류되는 온수의 영향이 있을 것으로 사료된다.

이상의 결과에서 제시된 바와 같이, 연안 지역 모두 식 (1)로 제시되는 비선형 기온-수온 관계를 표현하는 S-모형 곡선이 보다 우수한 추정결과를 보이고 있으며(Fig. 11참조), 향후 하천 및 하구, 연안해역 등의 다양한 지역에서 보다 많은 자료를 이용한 연구를 수행하여 수리, 수문, 수질 및 생태 분야의 전반적 기후변화 반응을 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

6. 결론 및 제언

본 연구에서는 해양수산부에서 연안에 설치한 기상 관측 장비로 측정된 우리나라 연안 주요 지역(마산만, 낙동강 하구, 시화호)의 기온과 수온 자료를 활용하여, 기온-수온 비선형 상관관계모형(S-모형)을 구축하고, 모형 매개변수는 SCE 최적화 기법을 이용하여 추정하고, 기온-수온의 비선형 상관관계식을 지점별로 제시하였다. 시간규모에 따른 기온-수온 관계의 변화양상을 간략하게 분석하였으며, 적합한 시간규모에 해당하는 주 평균 온도자료를 이용하여 상관관계 분석 및 모형적용을 수행하였다. 기온-수온의 비선형 관계를 재현하는 S-모형의 추정 수준이 단순 선형 관계식을

이용한 경우와 비교하였을 때, 계산된 NSC와 RMS 오차 모두 마산만 지역에서 현저하게 감소하였으며, 시화호 및 낙동강 하구 지역에서는 소량 감소하였다. 전반적으로, 본 연구지역에서는 복잡한 매개변수 추정과정이 불가피하지만 S-모형을 이용한 비선형 관계식이 보다 적합한 것으로 파악되었다. 향후, 우리나라 연안 및 하천을 포함한 지역에서 수온-기온 상관관계 도출연구를 광범위하게 수행하여 장래 예상되는 기후변화 가설(scenario)에 따른 수생환경의 미래의 수온변화 예측 및 이에 상응하는 수리, 수질, 수문, 및 생태반응을 모의하여 공학기술자, 환경전문가 또는 정책입안자에게 적절한 대책을 수립할 필요가 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원 기본연구사업(하구 관리 및 복원기술개발, PE-977-01) 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 조홍연, 이길하 (2007). 연안해역 기온과 수온의 상관관계 및 이력현상 분석, 한국해양해양공학회지(투고).
- 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*, 17, 3225-3244.
- Duan, Q.Y., Gupta, V.K., and Sorooshian, S., (1993). Suffled Complex Evolution approach for effective and efficient global minimization, *Journal of Optimization Theory and Application*, 76, 501-521.
- IPCC, (2001). *Climate change 2001: The scientific basis*, Cambridge University Press.
- IPCC-TGCIA (1999). *Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment*, Version 1. In : Carter, T.R., Hulme, M., Lal, M. (Eds.). *Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment*.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., (1970). River flow forecasting through conceptual models, I-A Discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Nelder, J.A. and Mead, R.A., (1965). A simplex method for function minimization, *Compt. J.* 7, 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*, 29(1), 27-45.
- Stockle, C.O., Dyke, P.T., Williams, J.R., Jones, C.A., and 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.
- 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., 197-222.

Received March 16, 2007

Accepted March 26, 2007