

연안해역 기온과 수온의 상관관계 및 이력현상 분석 Correlation and Hysteresis Analysis between Air and Water Temperatures in the Coastal Zone - Masan Bay

조홍연* · 이길하** · 조경준*** · 김준성***

Hong Yeon Cho*, Khil Ha Lee**, Kyung Jun Cho*** and Jun Sung Kim***

요 지 : 전지구적으로 지구 온난화 문제가 대두되고 있는 현 상황에서, 기온변화에 수반되는 수온변화 반응을 파악하기 위하여 해양수산부에서 제공하는 마산만 연안해역의 기온 및 수온 관측자료를 이용하여 기온과 수온의 관계를 분석하였다. 수온과 기온의 무차원 자기상관함수와 교차상관함수 변화를 분석한 결과, 지체시간 10일 이내에서는 상관계수가 0.9 이상으로 매우 크게 나타났으며, 지점별로 수온의 상관계수보다 기온의 상관계수가 크게 나타나는 것으로 파악되었다. 마산만 기온 및 수온자료를 수온상승기, 수온하강기로 구분하여 분석한 결과, 수온상승기에는 MA1 지점, MA2 지점의 기울기가 각각 0.829, 0.774로 나타났으며, 수온하강기에는 MA1 지점, MA2 지점의 기울기가 각각 1.385, 1.444로 기온상승기에 비하여 기온하강기의 기울기가 약 1.75배 정도 크게 나타나고 있으며, 명확한 이력현상으로 파악되었다. 따라서, 마산만 연안해역의 기온-수온 상관관계를 보다 정확하게 결정하기 위해서는 기온-수온의 계절적인 이력현상을 포함하여야 하며, 이 경우 기온을 이용한 수온 추정결과의 정확도가 향상되는 것으로 파악되었다.

핵심용어 : 기온, 수온, 이력현상, 자기상관 및 교차상관함수, 지구온난화, 마산만

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 and some efforts have been made to build an air/water temperature relationship at the Masan Bay area by the Ministry of Maritime Affairs & Fisheries (MOMAF). As a result of analyzing the auto- and cross-correlation coefficient between air/water temperature, high correlation (~ 0.9) is shown and the correlation coefficient of air temperature is higher than that of water temperature at the lag time less than approximately 10 days. Separate functions are fitted to the air/water relationship at the Masan Bay to take hysteresis into account. The slopes of the straight line for the rising limb are 0.829 and 0.774 for MA1 and MA2 station respectively, while 1.385 and 1.444 (~ 1.75 times larger) for the falling limb. Consequently, the seasonal hysteresis should be considered in order to determine an air/water relationship and accurately estimate the water temperature using the air temperature at Masan Bay.

Keywords : air temperature, water temperature, hysteresis, auto-correlation and cross-correlation function, global warming, Masan Bay

1. 서 론

지구의 연평균 기온은 지난 수십년 동안 증가하는 추세를 보여주고 있으며(IPCC, 2001), 우리나라에서도 장기적

인 기온 증가 현상이 발견되어, 지구온난화 현상에 대한 주장을 뒷받침하고 있다. 기온, 강우, 증발산 등 주요한 기후 인자의 변화는 토지피복형태, 생태계, 물순환에 영향을 미치는 수문학적 인자의 계속되는 변화를 가져오고, 이 변

*한국해양연구원 연안개발연구본부(Corresponding author: Hong Yeon Cho, Coastal Development Research Department, KORDI, Ansan PO Box 29, Seoul 425-600, Korea hycho@kordi.re.kr)

**경원대학교 GIS 연구소(Gis Institute, Kyungwon University)

***전주 상산고등학교(Sangsan High School, Jeonju)

화는 인간의 사회, 경제, 문화, 보건 등의 문제로 연결되어 기본생활에 영향을 미치기 때문에 이에 대한 적절한 고찰 및 대비가 필요하다(Asseman 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 식물에 의해 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. 특히, 기온증가는 수온변화를 유발하기 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 의한 기온변화는 수온의 변화를 유발하며, 이로 인하여 수중생물의 환경조건이 심하게 변할 수도 있으며(IPCC-TGICIA, 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, 기온 증가는 연안해역의 수온에도 영향을 미치기 때문에 수온의 영향을 직접적으로 받는 연안 수중생물의 환경조건 변화에도 큰 영향을 미친다. 그러나, 일반적으로 기온자료는 풍부한 반면, 상대적으로 수온자료는 매우 미흡한 실정이므로 수중 생물의 환경조건을 파악하는 중요한 인자에 해당하는 수온자료를 이용하여 장기적이고 미미한 환경변화를 파악하는 것은 곤란하다. 본 연구에서는 기온변화에 상응하는 수온반응을 파악하기 위하여 마산만 연안의 기온 및 수온 동시 관측자료를 이용하여 기온과 수온자료의 통계적인 특성분석, 상관관계 및 이력현상에 대한 분석을 수행하여 수온과 기온의 물리적인 영향을 심층적으로 고려하여 기온자료를 이용한 향상된 수온 추정기법 제시를 목적으로 한다. 보다 많은 기상자료를 이용하여 수온자료를 추정하는 기법이 있으나, 장기적인 가용한 기상자료의 제한으로 실질적으로는 적용이 곤란하기 때문에 본 연구에서는 기온의 상승기, 하강기에 수온의 증감양상이 다르게 나타나는 이력현상분석에 중점을 두어 수온을 추정하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 마산만 해역의 기온 및 수온자료

마산만 해역에서는 해양수산부(해양환경과)에서 수행하는 '해양수질자동측정망' 운영사업을 통하여 연속적으로 기온을 포함한 기상인자, 수온 및 오염물질의 농도를 관측하고 있으며, 관측자료를 실시간으로 제공하고 있다(해양환경포탈서비스, www.meips.go.kr/tmsinfo/default.asp). 마산만에서는 총 3개 지점에서 관측을 수행하고 있으나, 마산-3(MA3) 지점에서는 기상관측을 수행하고 있지 않기 때문에 본 연구에서는 마산-1(MA1) 지점, 마산-2(MA2) 지점의 기온 및 수온자료를 이용하여 분석을 수행하였다(관측지점은 Fig. 1참조). 분석대상 마산만의 기온 및 수온자료는 2004년 1월 1일부터 2006년 12월 31일까지의 자료이며, 기온은 일반적으로 이용되는 온도계를 이용하여 관측하였으며, 수온은 PT-1000 제품을 이용하여 관측하였다. 관측간격은 5분이며, 일자료는 5분간격으로 측정된 자료를 평균한 자료이다.

결측구간의 자료는 선형내삽법을 이용하여 보완(filling)하였으며, 장기간의 결측구간은 가용한 자료를 이용하여 추정된 기온-수온 회귀곡선식(regression curve)을 이용하여 추정하였다. 수온자료의 결측율은 11.6~11.8% 정도로 기온자료의 결측률 2.6~3.7% 정도에 비하여 4배 정도 높았다(Table 1참조). 연속적으로 10일 이상의 장기간 결측구간은 수온의 경우 MA1 지점은 2004. 4.22~5.12(21일), 6.11~6.21(11일), 12.1~12.19(19일), MA2 지점은 2004. 1.9~1.28(20일), 5.1~5.14(14일), 9.19~9.30(12일), 12.1~12.19(19일); 2005. 2.9~2.22(14일), 5.10~5.26(17일)이며, 기온의 경우는 MA2 지점의 2004. 1.10~1.28(19일)로, 전반적으로 2004



Fig. 1. Air and Water Temperature Monitoring Stations in Masan Bay.

Table 1. Missing Data Information of the MA1 and MA2 Stations

Items	Water Temperature		Air Temperature		
	MA1	MA2	MA1	MA2	KMA*
Stations	MA1	MA2	MA1	MA2	KMA*
Data Numbers	1,096	1,096	1,096	1,096	1,096
Missing Data Numbers	127	129	28	40	0
Missing Data Percentage	11.6	11.8	2.6	3.7	0.0

*Korea Meteorological Agency (www.kma.go.kr), Masan Station

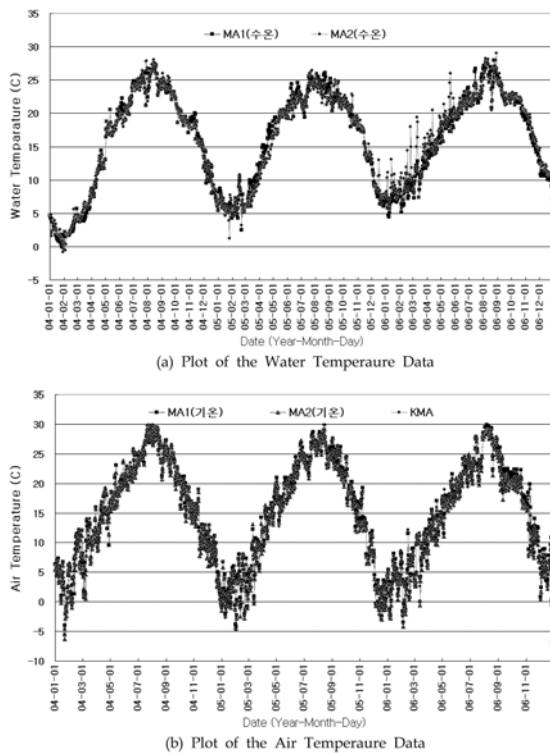


Fig. 2. Data Plot of the Air and Water Temperatures in Masan Bay.

년 결측비율이 높게 나타나고 있다.

결측자료를 보완한 마산만의 기온, 수온 자료 및 기상청 마산측후소 기온자료를 도시법을 통하여 상호비교 분석하여 자료의 품질보증(Quality Assurance)을 시각적으로 수행하였다(Fig. 2참조). 도시적인 분석에 의하면, 2005년 2월 및 2005년 12월부터 2006년 6월까지의 기간에 해당하는 수온자료에서 MA2 지점의 수온자료가 MA1 지점의 수온자료가 크게 차이가 나는 자료가 발생하고 있음을 알 수 있다. 정확한 원인 분석은 곤란하지만, 이 자료가 다른 자료와는 다른 양상을 보이고 있는 이상자료(outlier)로 판단할 수 있다. 본 연구에서는 이 자료를 이상자료로 판단하였으나, 전체적인 분석에 미치는 영향은 미미할 것으로

판단하여 분석대상에서 배제하지는 않았다. 수온 자료에서 이상자료로 판단되는 자료가 발생한 반면, 기온자료에서는 이 이상자료로 판단할 만한 두드러진 자료는 관찰되지 않았다.

3. 기온 및 수온자료의 상관관계 분석

연안해역의 수온에는 여러 가지 요소가 영향을 미친다. 복사열 및 복사열의 장애물에 의한 차단 정도, 유역에서 유출되는 하천수 및 지하수의 온도, 수면에서의 열 교환, 조석에 의한 혼합효과 등이 있다. 복잡하게는 열전달 이송확산모형을 이용하여 기온과 수온 관계를 찾을 수도 있으나, 지역에 따라 다양한 영향인자 특성을 보이고 있기 때문에 일반적으로 드러나는 현상에 해당하는 이력현상을 검토하여 관계를 도출할 수도 있다(Crisp and Howson, 1982; Webb, 1987; Webb and Nobilis, 1997). 선형회귀 분석이 인공위성 영상 등에서의 기온-수온 관계를 잘 표현해 주어 여러 분야에서의 연구에서 성공적인 결과를 거두어왔으며, 비선형 관계를 분석하는 연구도 수행되어 왔다(Pilgrim and Stefan, 1995; 이길하, 2007).

수면에서는 일반적으로 여름철이 겨울철보다 증발로 인해 잠열 손실이 크며, 지하수나 용설이 유입부로 들어오는 경우에는 계절적으로 다른 기작을 가지게 된다(Stefan and Preud'home, 1993; Stefan and Sinokrot, 1993). 그래서 기온과 수온 관계를 찾아내기 위해서는 봄철(또는 늦겨울)에서 여름철로 이동하는 온도 증가시기와 가을철(또는 늦여름)에서 겨울철로 이동하는 온도감소시기에 따른 계절적 이력현상을 먼저 점검하는 것이 바람직하다. 마산만 해역의 기온과 수온 관계가 이력현상을 가지게 되면 수온상승시기와 수온하강시기에 대하여 서로 다른 상관관계곡선을 각각 추정하여야 한다.

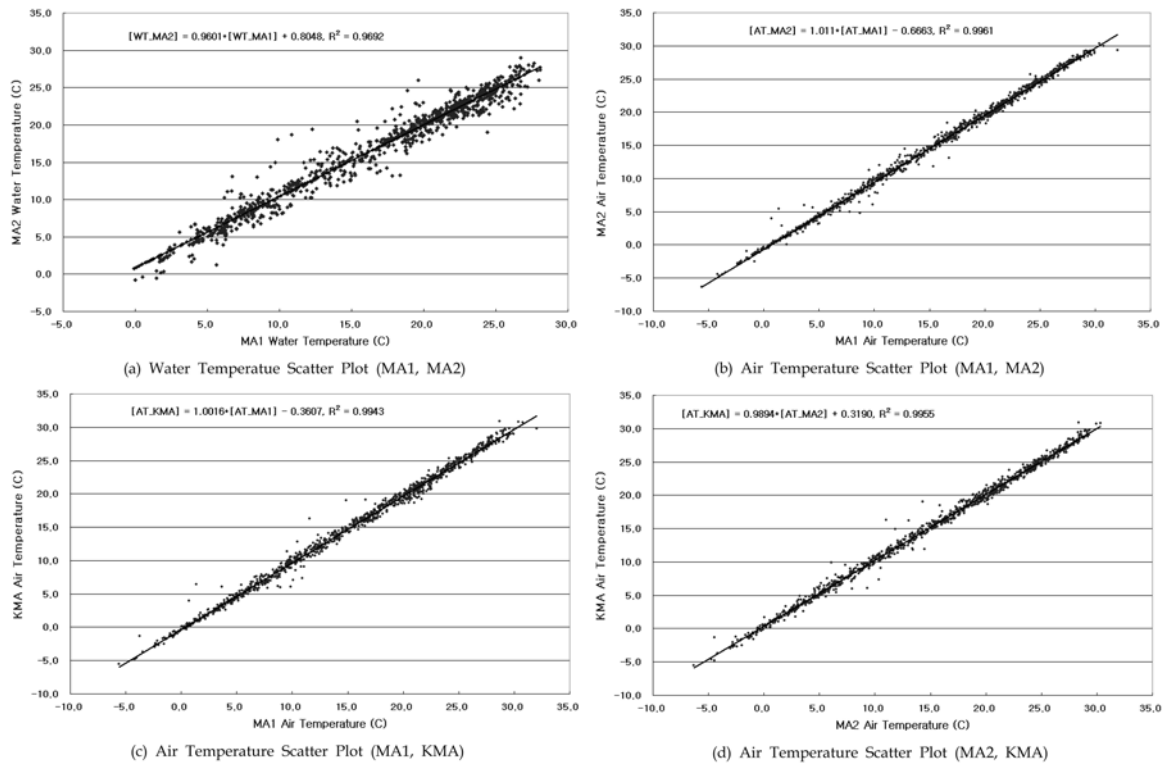
3.1 기본 통계정보 및 추이분석

MA1, MA2 지점의 수온 및 기온자료의 기본적인 통계정보는 평균, 분산, 표준편차, 최대값, 최소값, 범위 및 이상자료의 영향을 제거한 범위분석을 위하여 상위 5% 경

Table 2. Statistical Information of the Air and Water Temperature Data

Items	Water Temperature		Air Temperature		
	MA1	MA2	MA1	MA2	KMA*
Stations	MA1	MA2	MA1	MA2	KMA*
Mean	15.98	16.15	15.11	14.61	14.78
Standard Deviation	7.25	7.07	8.62	8.73	8.64
Maximum Value	28.07	29.02	32.01	30.36	30.90
Minimum Value	-0.08	-0.82	-6.80	-6.99	-5.50
Range	28.15	29.84	38.81	37.35	36.40
95th-percentile Value	25.49	25.31	27.70	27.48	27.50
5th-percentile Value	3.93	4.04	0.54	-0.08	0.20
5th~95th Percentile Range	21.56	21.27	27.16	27.56	27.30

*Korea Meteorological Agency (www.kma.go.kr), Masan Station

**Fig. 3.** Scatter Plot between Air Temperatures and Water Temperatures.

계값, 하위 5% 경계값 및 5% 경계값을 이용한 범위 등을 분석하였다(Table 2참조). 평균은 지점별 차이는 1 °C 이하로 미미한 정도로 파악되었으며, 수온이 기온보다 높게 나타났으나, 표준편차는 기온이 보다 크게 나타났다. 관측 자료의 범위는 지점차이는 미약하며 수온의 변화범위가 기온변화범위보다 10 °C 정도 높게 나타났다. 5%~95% 범위 자료를 이용한 경우에는 수온의 변화범위는 21 °C, 기온의 변화범위는 27 °C 정도로 기온의 변화범위가 수온의 변화

범위보다 6 °C 정도 높은 정도로 파악되었다.

3.2 상관관계 분석

자료의 상관관계 분석은 서로 비교하는 자료의 상관정도를 파악하는 목적도 있으나, MA1 지점과 MA2 지점 및 마산축후소 지점이 인접한 지점이기 때문에 상호간의 상관관계 분석을 통하여 자료의 품질을 파악(간접적인 정확도 분석)할 수도 있다. 본 연구에서는 수온 및 기온자료

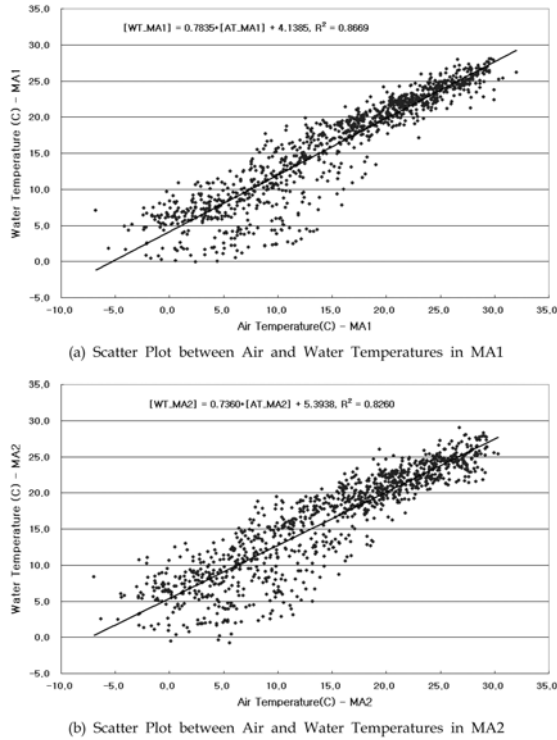


Fig. 4. Scatter Plot between Air Temperatures and Water Temperatures.

의 지점별 상관관계 분석을 수행하였으며, 시각적인 비교를 위한 산포도(scatter plot)를 제시하였다(Fig. 3참조). MA1, MA2 지점의 상관계수의 제곱에 해당하는 결정계수는 수온의 경우에는 0.9692, 기온의 경우에는 마산축후소(KMA) 자료를 포함하여 0.9961, 0.9943, 0.9955으로 수온보다 높게 나타났으며, 이는 수온의 공간적인 변화보다 기온의 공간적인 변화정도가 작기 때문인 것으로 판단된다.

한편, MA1 지점 및 MA2 지점의 수온과 기온의 상관관계도 산포도 및 상관계수를 이용하여 분석하였다(Fig. 4참조). 결정계수는 수온과 수온, 기온과 기온에 해당하는 0.969, 0.995 정도보다 매우 작은 0.867(MA1 지점), 0.826(MA2 지점) 정도로 산정되었다.

3.3 이력현상 분석

이력현상(hysteresis)의 사전적 의미는 “어떤 물리량이 어떤 특정시점의 물리조건만으로는 일의적으로 결정되지 않고, 그 이전에 그 물질이 겪어 온(경과해 온) 상태의 변화 과정에 의존하는 현상”이며, 이러한 현상의 대표적인 예는

강자성체의 자기이력현상과 탄성체의 탄성이력현상이 있다. 이력현상에서는 일반적으로 외부의 영향이 증가할 때와 감소할 때에 서로 다른 값이 주어지며 자기장이나 온도장에서 흔히 볼 수 있는 현상으로 수공학(hydro-engineering) 분야에서는 비포화 지하수의 침투와 증발시 습윤-건조(wet-dry period) 과정에서 볼 수 있으며, 수위-유량 곡선에서는 수위에 따른 홍수량 증감(rising-falling limb)단계에서 볼 수 있는 현상이다. 본 연구에서는 마산만 해역의 기온과 수온 관계 규명을 위하여 수면과 대기가 접하는 지점에서의 열전도 과정에서 태양의 복사열의 영향이 증가할 때와 감소할 때, 즉 기온의 증감에 따른 수온의 증감이 서로 다른 곡선을 따라 변화하는 이력현상을 파악분석하였다. 이력현상 분석을 위하여 기온자료를 기준으로 기온상승기(2.1~7.31) 자료와 기온하강기(8.1~12.31) 자료로 구분하였다. 연초에 해당하는 1월 자료는 상승기 또는 하강기 자료 구분이 곤란하여 분석에서 제외하였다. 상승기-하강기로 구분된 자료는 상관관계 분석에서 수행한 내용과 동일한 분석을 수행하였다.

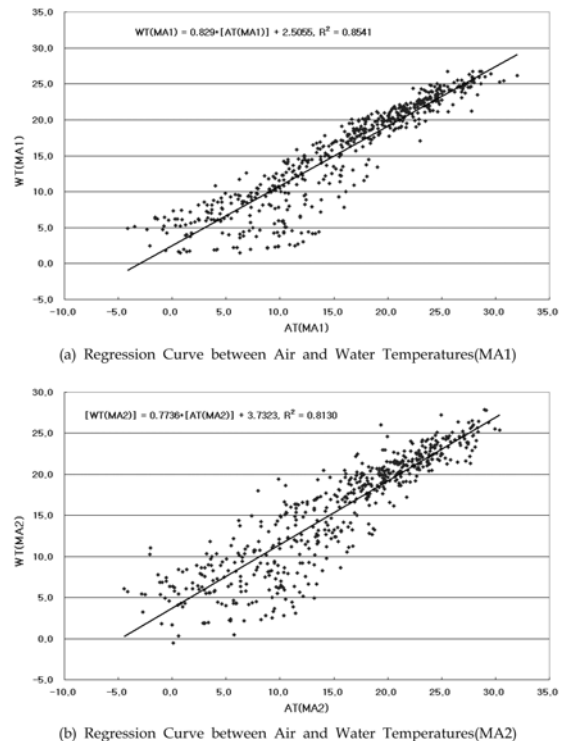


Fig. 5. Scatter Plot between Air and Water Temperatures (Rising Stage).

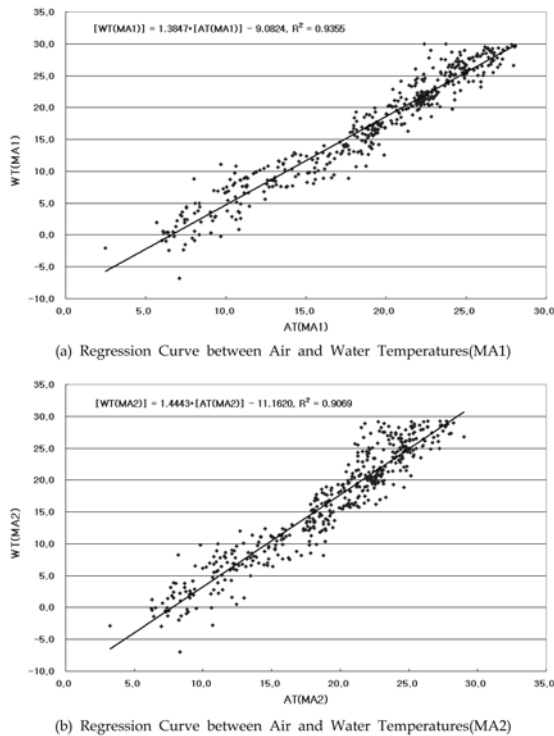


Fig. 6. Scatter Plot between Air and Water Temperatures (Falling Stage).

마산만 기온 및 수온자료를 수온상승기, 수온하강기로 구분하여 분석한 결과, 수온상승기에는 MA1 지점, MA2 지점의 기온기각이 각각 0.829, 0.774로 나타났으며, 수온하강기에는 MA1 지점, MA2 지점의 기온기각이 각각 1.385, 1.444로 수온상승기에 비하여 수온하강기의 기온기각이 보다 크게 나타나고 있다(Fig. 5, Fig. 6참조). 이 기온기각 변화는 기온변화에 따른 수온변화가 명확하게 이력현상을 보이고 있는 것으로 판단할 수 있다. 따라서, 기온자료를 이용한 수온자료 추정에는 이력현상을 고려하여 기온 상승기와 하강기 구간으로 구분하여 추정하는 것이 보다 정확한 결과를 제시함을 알 수 있다. 한편, 일단위의 온도변화 자료를 이용한 이력현상 분석은 변동성분이 크게 나타나고 있기 때문에 자료를 주단위의 시간규모로 평균(weekly-mean)하여 기온에 따른 수온의 증감양상(이력현상)을 지점별, 연도별로 도시 분석하였다(Fig. 7참조). MA1, MA2 지점의 수온 증감양상은 유사하게 나타났으며, 연도별 변화를 보면 2004년, 2005년은 뚜렷하고 강한 이력현상을 보이고 있는 반면, 2006년은 비교적 약한 이력현상을 보이고 있으나, 전반적으로 기온 상승기의 수온변화율보다 기

온하강기의 수온변화율이 크게 나타나고 있는 것으로 파악되어 마산만의 기온-수온변화는 이력현상을 보이고 있는 것으로 판단할 수 있다. 2006년의 약한 이력현상은 시계적인 영향인지, 자료의 품질에 의한 영향인지는 보다 장기간의 품질관리가 세세하게 수행된 기온 및 수온자료를 이용하여 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다. 한편, 어느 시간 축척(time scale)이 이력현상을 파악하기에 적합한가는 해역의 지형적인 특성, 특성(수심, 밀도 등) 및 대기에서 해역으로의 열전달 속도, 기온변화 등에 따라 다르게 나타날 수 있으므로 보다 근거있는 시간축척 결정을 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 자기상관함수 및 교차상관함수 분석

기온 및 수온자료의 자기상관관계 및 교차상관관계를 분석하기 위하여 자기상관함수 및 교차상관함수를 계산하여 분석하였다. 계산된 함수는 지체길이(Lag Number)=0 조건에서의 값으로 무차원화하였다(Table 3참조). 절대적인 상관함수 값은 0.9 이상으로 전체적으로 매우 크게 나타나고 있으며, MA1 지점의 기온의 자기상관관계는 7일 이후 0.9 정도로 감소하는 양상을 보이고 있으며, MA2 지점도 유사한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 기온의 자기상관함수 값이 지체길이 증가함에 따라 감소하는 비율이 수온보다 큰 이유는 기온 변화가 수온보다 수월하게 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결론 및 제언

수온과 기온의 자기상관함수와 교차상관함수를 분석한 결과, 지체시간 10일 이내에서는 0.9 이상으로 매우 크게 나타났으며, 지점별로 수온의 상관계수보다 기온의 상관계수가 크게 나타나는 것으로 파악되었다. 한편, 마산만 해역에서의 MA1 지점, MA2 지점에서 기온과 수온 자료의 상관관계를 분석하였으며, 기온상승기간과 하강기간에 따른 수온 상승비율 및 하강비율이 다르게 나타나는 이력현상이 파악되었다.

마산만 기온 및 수온자료를 수온상승기, 수온하강기로 구분하여 분석한 결과, 수온상승기에는 MA1 지점, MA2 지점의 기온기각이 각각 0.829, 0.774로 나타났으며, 수온하강기에는 MA1 지점, MA2 지점의 기온기각이 각각 1.385, 1.444로 기온상승기에 비하여 기온하강기의 기온기각이 약 1.75배 정도 크게 나타나고 있다. 따라서, 마산만 연안해

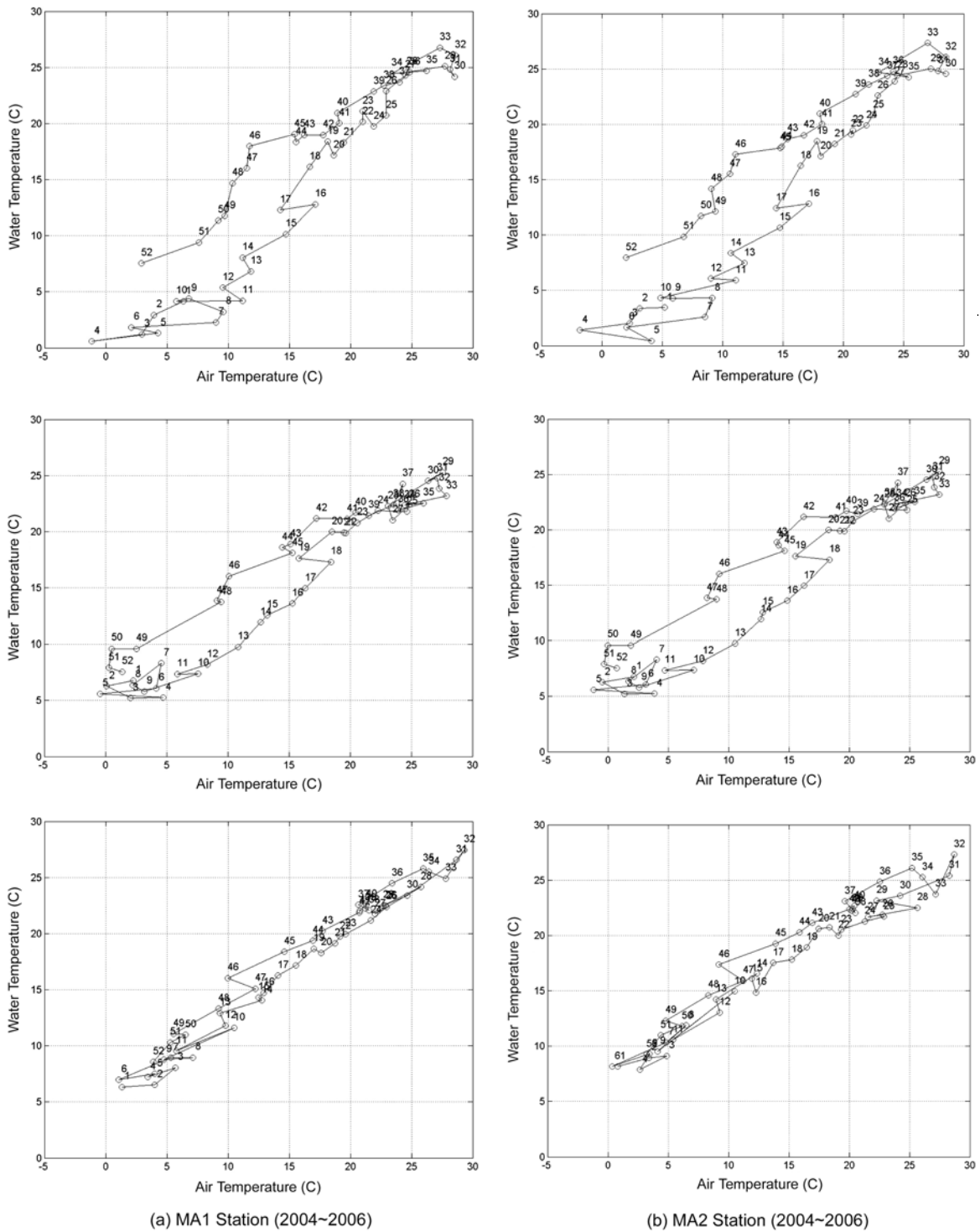


Fig. 7. Rising and Falling Limb of the Air-Water Temperature Relationship.

Table 3. Auto-correlation and Cross-correlation Values in MA1 and MA2 Stations

(a) MA1 Station

Lag No.	Item	Air -Air Temperatures	Water-Water Temperatures	Air-Water Temperatures	Water-Air Temperatures
0		1.000	1.000	1.000	1.000
1		0.973	0.991	0.997	0.985
2		0.947	0.983	0.989	0.972
3		0.931	0.977	0.984	0.962
4		0.923	0.972	0.979	0.955
5		0.918	0.968	0.979	0.950
6		0.913	0.965	0.979	0.946
7		0.910	0.962	0.979	0.941
8		0.908	0.958	0.979	0.930
9		0.907	0.954	0.977	0.930
10		0.905	0.950	0.976	0.924

(b) MA2 Station

Lag No.	Item	Air-Air Temperatures	Water-Water Temperatures	Air-Water Temperatures	Water-Air Temperatures
0		1.000	1.000	1.000	1.000
1		0.974	0.986	0.998	0.983
2		0.947	0.974	0.993	0.968
3		0.931	0.965	0.988	0.956
4		0.922	0.959	0.985	0.949
5		0.918	0.955	0.983	0.943
6		0.913	0.951	0.982	0.939
7		0.909	0.949	0.982	0.934
8		0.907	0.945	0.982	0.928
9		0.905	0.941	0.982	0.921
10		0.904	0.938	0.981	0.916

역의 수온은 이력현상을 고려하여 추정하는 것이 바람직하며, 보다 정확한 결과를 제시하는 것으로 분석되었다.

감사의 글

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

참고문헌

이길하, 2007. 우리나라 연안 기온과 수온의 비선형 상관관계 분석, 한국해양·해양공학회지, 제19권, 제2호, pp.128-135.
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.
Crisp, D.T., and Howson, G., (1982). Effect of air temperature upon mean water temperature in streams in the north Pennines and English Lake District, Fishwater Biol., 12, 359-367.
IPCC, (2001). Climate Change 2001: The scientific basis, Cambridge University Press.
IPCC-TGCIAM (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.
Stefan, H.G. and Sinokrot, B.A., (1993). Projected global climate change impact on water temperatures in five north central US streams, Climate change, 24, 353-381.
Stefan, H.G. and Preud'home, E.B., (1993). Stream temperature estimation from air temperature, Water Resources Research, 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.
- 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.
- Webb, B.W., (1987). The relationship between air and water temperatures for a Deven river, Rep. Trans. Deveonshire Association Adv. Sci., 119, 197-222.
- 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, 137-147.
-

Received March 5, 2007

Accepted May 25, 2007