한국해양환경 · 에너지학회지
Journal of the Korean Society
for Marine Environment and Energy
Vol. 17, No. 2. pp. 122-130, May 2014

http://dx.doi.org/10.7846/JKOSMEE.2014.17.2.122
ISSN 2288-0089(Print) / ISSN 2288-081X(Online)

여수연안 표면수온의 변동 특성과 시계열적 예측

성기탁† · 최양호 · 구준호 · 전상백
국립수산과학원 남서해수산연구소

Fluctuations and Time Series Forecasting of Sea Surface Temperature at Yeosu Coast in Korea

Ki-Tack Seong†, Yang-Ho Choi, Jun Ho Koo and Sang-Back Jeon
Southwest Sea Fisheries Research Institute, Yeosu 556-823, Korea

요 약

한반도 여수연안(127°37.73′E, 34°37.60′N)의 46년(1965-2010년)간 월평균 표면수온의 계절변동과 장기변동추세를 파악하였으며, 시계열모형을 수립하여 향후 12개월의 표면수온을 예측하였다. 여수연안의 연평균 표면수온은 15.6 ℃, 연진폭은 9 ℃를 보이며, 연위상은 236°로서 최고수온을 보이는 시기는 8월 26일경으로 나타났다. 장기적으로 여수연안 표면수온은 연간 약 0.0305 ℃의 유의한 상승 추세를 가지며, 시기적으로 1981년부터 2010년까지 30년간의 상승 경향이 1966년부터 1995년까지 30년간의 상승 경향보다 현저하며, 계절적으로 겨울철의 상승 경향이 지배적으로 나타났다. 월평균 표면수온을 적합시켜 선택된 시계열모형은 $ARIMA(1,0,0)(2,1,0)_{12}$을 따르며, 수립된 모형에 의한 2010년 월평균 표면수온의 예측치는 8.3%의 평균절대백분율오차(Mean Absolute Percentage Error)를 수반하였다.

Abstract – Seasonal variations and long term linear trends of SST (Sea Surface Temperature) at Yeosu Coast (127°37.73′E, 34°37.60′N) in Korea were studied performing the harmonic analysis and the regression analysis of the monthly mean SST data of 46 years (1965-2010) collected by the Fisheries Research and Development Institute in Korea. The mean SST and the amplitude of annual SST variation show 15.6 ℃ and 9.0 ℃ respectively. The phase of annual SST variation is 236°. The maximum SST at Yeosu Coast occurs around August 26. Climatic changes in annual mean SST have had significant increasing tendency with increase rate 0.0305 ℃/Year. The warming trend in recent 30 years (1981-2010) is more pronounced than that in the last 30 years (1966-1995) and the increasing tendency of winter SST dominates that of the annual SST. The time series model that could be used to forecast the SST on a monthly basis was developed applying Box-Jenkins methodology. $ARIMA(1,0,0)(2,1,0)_{12}$ was suggested for forecasting the monthly mean SST at Yeosu Coast in Korea. Mean absolute percentage error to measure the accuracy of forecasted values was 8.3%.

Keywords: Sea surface temperature(SST, 표면수온), Seasonal variation(계절변동), Long term linear trend(장기변동추세), ARIMA, Forecast(예측)

1. 서 론

해양은 대기와의 상호작용으로 열, 수증기 및 운동량 등의 교환을 통하여 기상 및 기후변동에 중요한 역할을 하며(Lin and Jonson [1996]), 해양의 수온변동은 해양생물의 분포와 생산력에 많은 영향을 미친다(Chen *et al*.[2009]; Cook *et al*.[1998]). 해양의 수온은 항상 변화하면서도 특정한 변동유형을 가진다. 특정한 변동유형의 존재는 표면수온이 현재는 과거에, 미래는 현재와 과거에 의하여 종속되어 있고, 이 종속성이 시간에 따라 변화를 하고 있음을 의미한다. 즉, 수온은 연주기 성분이 지배적인 계절변동을 하면서 해마다 비슷한 변화를 반복하는 결정론적(deterministic) 변동을 가짐과 동시에 수온의 비계절 성분은 확률적(stochastic)으로 변동한다(Kang and Gong[1987]).

해양수온의 계절변동에 관한 연구는 과거부터 지속적으로 수행되어 왔으나(Murty *et al*.[1998]; Webster[1982]; Weare *et al*.[1976]; Wyrtki [1965]), 최근의 연구추세에서는 벗어나 있는 경향을 보인다(Kenyon [2013]). 반면, 최근의 수온변동 연구는 전 지구적 기후변화와 연관

†Corresponding author: ktseung@korea.kr

하여 장기수온변동에 집중되고 있는 경향으로, 지구온난화와 더불어 해양의 수온 역시 장기적으로 상승하고 있다는 다수의 결과가 보고되고 있다. 대표적으로 Levitus *et al*.[2005]은 전 세계 해양의 저열량(heat content, 0-3000 m)이 1955-1999년 사이에 14.5×10^{22}J 증가하였으며, 이는 0.2 W/m^2 당 평균 수온이 약 0.037 ºC 상승한 것에 해당한다고 보고하였다. 장기적으로 수온 상승 경향을 가지는 해역과 연상승률의 예를 보면, 미국과 캐나다 서부 연근해(0.04 ºC/년, 1977-1999년, Gower[2002]), 호주 서부 연근해(0.02 ºC/년, 1951-2004년, Pearce and Feng[2007]), Georgia 해협(0.024 ºC/년, 1970-2005년, Masson and Patrick[2007]) 등 여러 해역에서 장기적 수온 상승에 관한 결과가 보고되었으며, 동중국해(1975-1995년)의 경우 표면수온 및 저층수온의 연상승률은 각각 0.04 ºC/년, 0.053 ºC/년으로 저층수온의 연상승률이 더 높게 나타나는 것으로 제시되었다(Ning *et al*.[2011]). 한편, 수온의 확률적 변동에 관한 연구는 수온변동의 주기성, 종속성 등 확률 및 통계적 특성을 파악하고, 수온변동을 예측하고자 하는 목적으로 시도되어 왔으며, 주로 ARIMA 모형을 이용하였다. Liu *et al*.[2009]는 Lianyungang 연안의 월평균 표면수온자료(1966-2007)에 대한 최적 계절 ARIMA 모형으로 ARIMA(1,0,1)$(0,1,0)_{12}$ 모형을 제안하고, 모형에 따른 예측결과는 3.5%의 평균상대오차를 가진다고 보고하였다. Karim[2013]은 벵골만 북부해역의 월평균 표면수온자료(1900-2009)로부터 다양한 모형의 예측성능을 비교하여 ARIMA(2,0,1)$(0,1,1)_{12}$ 모형을 최적예측모형으로 선택하였다. Hussian *et al*.[2013]의 경우는 Karachi 연안의 월평균 수온자료(1871-2009)를 이용하여 4월부터 10월의 월별 ARIMA 모형을 제안하고, 2010년부터 2030년까지의 장기예측을 시도하였다.

한반도 연근해 수온의 계절변동 연구는 주로 조화분석(harmonic analysis)을 중심으로 고찰되었으며, 표면수온변동은 연주기 성분에 지배적인 영향을 받는 것으로 보고되었다(Gong[1968]; Hahn[1970]; Kim[1983]; Lim[1972]; Min *et al*.[2010]). 한편, 한반도 주변해역의 장기 표면수온변동에 관한 연구는 주로 2000년 이후 다양하게 수행되었으며(Hahn[1997]; Kang[2000]; Seong *et al*.[2010]; Yoon *et al*.[2011]), 이들 결과를 정리한 Lee and Kim[2013]의 보고에 의하면, 한반도 주변해역의 표면수온은 1970년대 중반 이후 현저한 상승 경향을 보이며, 평균 상승률은 0.03 ºC/년 정도이며, 계절적으로 겨울철의 상승경향이 지배적인 것으로 보고하고 있다. 계절변동이나 장기변동에 관한 연구에 비하여 표면수온의 확률변동에 관한 연구는 제한적으로 수행되었다. Kang and Gong[1987]은 한국 남동연안 5개소의 28년간(1957-1984년) 월별 표면수온의 평년편차(anomalies) 변동의 마르코프 연쇄(Markov chain)에 대한 통계적 검정을 실시하였으며, 월별 표면수온 평년편차의 변동은 시간적으로 정상적(stationary)이고, 공간적으로 균질적(homogeneous)이며, 평년편차의 마르코프 연쇄성을 보유하는 기억은 3개월 정도 유지된다고 보고하였다. 전반적으로 수온변동에 관한 선행연구의 경우 수온의 계절변동, 장기변동추세 및 확률변동 등의 연구가 개별적으로 수행되어온 경향을 가진다.

표면수온을 결정하는 물리적 요인은 해류, 조류, 연직혼합과 같은 해수의 운동에 의한 열의 이류와 해면을 통한 열교환에 따라 결정된다(Deser *et al*.[2010]). 물리적 요인에 따라 표면수온의 변동을 결정하기 위해서는 해수의 유동, 해면을 통한 열교환, 혼합층의 깊이 등에 대한 시공간적인 분포에 대한 정량적 자료가 요구되며, 이러한 자료가 충분하지 못할 경우 열수지방정식(Deser *et al*.[2010])으로부터 수온변동을 예측하는 것은 매우 어려운 과정임과 동시에 비효율적인 방법이 될 수도 있다. 본 연구에서는 열수지방정식으로부터 수온변동을 정량적으로 예측하기 어려운 측면을 고려하여 그 대안적인 방법으로 통계적 분석을 수행하여 여수연안 표면수온의 계절변동, 장기변동추세 및 확률변동을 동시에 살펴보고자 하며, 이를 위하여 여수연안의 월평균 표면수온자료(국립수산과학원 해양자료센터)에 대한 조화분석과 회귀분석의 결과로부터 여수연안 표면수온의 변동 특성을 이해함과 더불어 표면수온 변동의 시계열 모형을 수립하여 확률변동의 고찰 및 표면수온의 단기예측을 실시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

여수연안 표면수온의 계절변동과 장기변동추세를 이해하기 위하여 국립수산과학원 해양자료센터에서 제공하는 여수연안(127°37.73′E, 34°37.60′N)의 46년(1965-2010년)간 매일(오전 10시) 획득된 자료의 월평균 표면수온 시계열 자료로부터 조화분석과 회귀분석을 실시하여 계절변동과 장기변동 특성을 파악하였다. 확률변동은 자료 중 최근 15년(1995-2009년)간의 자료로부터 시계열 모형을 수립하고, 검정과정을 거쳐 구축된 모형으로부터 확률변동 특성을 기술함과 동시에 2010년의 월평균 표면수온에 대한 예측을 실시하고, 2010년의 실측치 자료와 비교하여 모형의 예측성능을 평가하였다.

2.1 조화분석

조화분석은 시계열자료를 진폭, 주기(또는 주파수) 및 위상이 다른 유한개의 조화함수 합으로 나타내는 기법으로 수온의 경우 계절변동을 파악하기 위하여 많이 이용되어 왔다(Gong[1968]; Hahn[1997]; Kim[1983]; Lim[1972]; Min *et al*.[2010]). 월평균 표면수온변동의 계절변동은 연주기 및 반년주기만을 고려하여 파악하고자 하였으며, 월평균 표면수온을 식 (1)과 같이 적합시켜 조화상수(T_0, A_1, A_2, ϕ_1, ϕ_2)를 결정하였다.

$$T(t) = T_0 + A_1\cos(\omega_1 t - \phi_1) + A_2\cos(\omega_2 t - \phi_2) \quad (1)$$

$T(t)$: 시간 t(1월 1일 기준)일 때의 표면수온
T_0: 연평균 수온
A_1: 수온의 연진폭, ω_1: 연주기, ϕ_1: 연위상
A_2: 수온의 반년진폭, ω_2: 반년주기, ϕ_2: 반년위상

2.2 장기변동 추세

장기변동추세는 조화분석으로 얻어진 연평균 표면수온자료를 식 (2)의 선형회귀직선으로 적합시켜 표면수온의 연변화율을 결정하고, 연변화율의 통계적 유의성을 검정하였다.

$$F(\text{year}) = a(\text{year} - 1964) + b \quad (2)$$

F(year): 연평균수온, a: 수온의 연변화율, b: 상수

2.3 시계열분석

월평균 표면수온의 변동과 같이 강한 계절변동을 가지는 시계열을 적합하기 위하여 계절 자기회귀 이동평균 모형(seasonal Auto Regressive Integrated Moving Average, 계절 ARIMA)을 선택하였으며, 계절 ARIMA 모형은 아래와 같이 정의된다(Box and Jenkins [1976]).

$$\phi_p(B)\Phi_p(B^s)(1-B)^d(1-B^s)^D Z_t = \theta_1(B)\Theta_Q(B^s)e_t \quad (3)$$

$\phi_p(B)$: 자기회귀(Auto-Regressive; AR)항

$= 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \cdots - \phi_p B^p$

$\Phi_p(B^s)$: 계절자기회귀(Seasonal AR; SAR)항

$= 1 - \Phi_1 B - \Phi_2 B^{2s} - \cdots - \Phi_P B^{Ps}$

$\theta_q(B)$: 이동평균(Moving Average; MA)항

$= 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \cdots - \theta_q B^q$

$\theta_Q(B^s)$: 계절이동평균(Seasonal MA; SMA)항

$= 1 - \Theta_1 B^s - \Theta_2 B^{2s} - \cdots - \Theta_Q B^{Qs}$

Z_t: 원시계열 자료, t: 시간연산자
e_t: $N(0, \sigma^2)$을 따르는 오차항, 백색잡음
B: 후향연산자, $B^j Z_t = Z_{t-j}$
p: AR항의 차수, q: MA항의 차수
d: 차분의 차수, P: 계절AR항의 차수
Q: 계절MA항의 차수, D: 계절차분의 차수

시계열 Z_t가 식 (3)을 만족하면 시계열 Z_t는 주기가 s이고 차수가 (p,d,q) (P,D,Q)인 계절 ARIMA 모형을 따른다고 하고, Z_t~ARIMA(p,d,q) $(P,D,Q)_s$로 표시한다. 일반적으로 Box-Jenkins에 의한 시계열 모형 수립 절차는 모형식별, 모형의 모수추정, 모형진단 과정을 만족스러운 모형이 선택될 때까지 반복적으로 수행하여 최종적인 모형을 결정하며, 결정된 모형으로 미래의 값을 예측하거나, 유사한 생성체계를 가지는 시스템에 활용한다(Box and Jenkins[1976]). 시계열분석은 SAS/ETS(version 9.2) Proc ARIMA를 이용하여 시계열모형을 수립하고, 모수추정 및 진단과정을 거쳐 구축된 모형으로 예측을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 계절변동

여수연안 표면수온의 46년(1965-2010)간 월별 산술평균인 평년 월평균수온(Normals, Fig. 1)에 의하면, 여수연안 표면수온은 2월에 6.1 ℃로 최저수온을 나타내고, 8월에 24.7 ℃로서 최고수온을 보이며, 약 18 ℃의 연변동폭을 보인다. 계절에 따른 변동폭은 겨울철의 경우 2 ℃ 내외, 여름철에 약 4 ℃의 변동폭을 보여 겨울철에 비하여 여름철의 변동폭이 증가한다. 겨울철에서 여름철로 갈수록 표면수온의 변화가 심한 것은 표면혼합층의 계절변화에 기인한 것으로 여름철의 표면혼합층의 깊이가 겨울철의 표면혼합층의 깊이보다 얕아 여름철의 유효열용량(effective heat capacity)이 겨울철의 유효열용량보다 적기 때문이다(Kang and Lee[1984]).

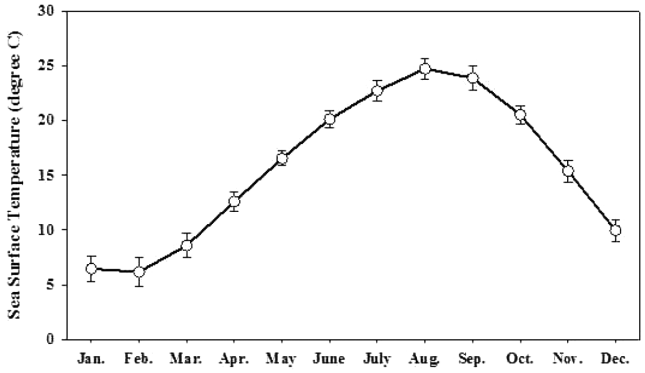

Fig. 1. Monthly normals of sea surface temperature (SST), with standard deviations, at Yeosu Coast in Korea.

한편, 조화분석에 의한 46년간 매년의 여수연안 월평균표면수온의 조화상수(Fig. 2)의 평균과 표준편차는 다음과 같다.

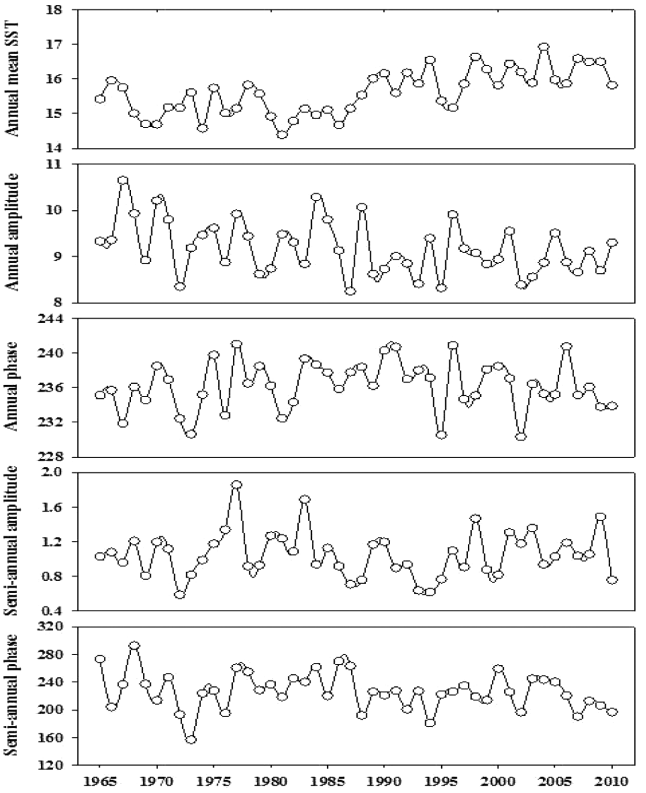

Fig. 2. Annual fluctuations of harmonic constants of SST at Yeosu Coast for 46 years (1965-2010).

T_0 = 15.61±0.63(°C)
A_1 = 9.18±0.57(°C), A_2 = 1.06±0.27(°C)
Φ_1 = 236.3°±2.8°, Φ_2 = 227.0°±26.6°

이는 여수연안의 연평균 표면수온은 15.6 ℃ 이며, 연진폭은 약 9.0 ℃로서 앞서 언급한 연변동폭이 18 ℃임을 의미하고, 연위상은 236°로서 최고수온을 보이는 시기가 8월 26일경에 해당하는 것을 의미한다. 전반적으로 여수연안의 표면수온은 해마다 유사한 변동을 보이나, 조화상수의 표준편차에 의하면 해마다 연평균수온과 연진폭이 약 1.0 ℃ 내외로 변화하고, 연위상이 5일 내외로 변동하면서 해마다 다소 다른 변동을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 Gong[1968] 및 Kim[1983]의 결과와 비교하면, 과거에 비하여 여수연안의 평균표면수온은 상승하는 경향을 보인 반면, 연진폭은 감소하는 경향을 보이며, 연위상은 10-15일 지연되는 것으로 나타났다.

3.2 장기변동 추세

3.2.1 표면수온의 장기변동 추세

여수연안 연평균 표면수온의 변화(Fig. 3)에 의하면 46년간 평균 표면수온은 15.6 ℃로 나타난 것은 앞서 언급한 바 있으며, 연평균 수온이 가장 낮은 시기는 1981년으로 14.4 ℃를 나타내었고, 2004년에 가장 높은 16.9 ℃를 기록하였다.

연평균 표면수온 변동의 뚜렷한 주기성을 파악하기 어려우나, 대체로 3-6년을 주기로 상승과 하강을 반복하는 경향을 보인다. 전반적으로 1980년 초반의 경우 여수연안 수온은 15.0 ℃ 내외의 낮은 경향을 보였으며, 1980년 후반 이후 현저한 상승경향을 보여, 1990년대 초반에 16.0 ℃, 2000년 이후에 16.5 ℃ 내외로 상승추이를 보이는 것으로 판단된다(Fig. 3). 이러한 경향과 관련하여 장기적 관점에서 여수연안의 연평균 표면수온이 상승하고 있다고 할 수 있는가하는 문제를 회귀분석을 통하여 검토하였다. 분석결과 추세식의 기울기, 즉 표면수온의 연변동률이 0.0305 ℃/년으로서 0에 가까운 값을 보이고 있어 실제로 이 값이 0인지 아닌지에 관한 검정을 실시하였다. 여수연안 표면수온이 장기적으로 상승하고 있는가에 대한 확인은 여수연안의 표면수온이 장기적으로 유의한 변동을 보이지 않는다는 귀무가설(연변동률 = 0)에 대한 대립가설(연변동률 > 0)의 검정으로 이루어진다. 검정결과 계산된 유의확률이 0.01 이하로 귀무가설을 채택할 수 없음을 알 수 있다(Table 1).

이는 여수연안 표면수온이 장기적으로 상승하고 있음을 의미하며, 추세식에 의하면 여수연안 표면수온은 0.0305 ℃/년(46년간 약 1.4 ℃)의 유의적인 상승추세가 있음을 추정할 수 있다. 여수연안 표면수온의 상승 경향은 Seong *et al.*[2010]이 보고한 지난 41년(1968-2008년)간의 남해안의 평균 표면수온 상승률(0.031 ℃/년) 및 Lee and Kim[2013]이 제시한 한반도 주변해역의 전반적인 표면수온 상승률(0.03 ℃/년)과 유사한 추세를 보인다.

표면수온의 상승 경향을 1966년부터 1995년 사이의 30년간(Fig. 4)과 1981년부터 2010년 사이의 30년간(Fig. 5)의 두 기간으로 나누어 연간상승률을 비교한 결과 각각의 연상승률은 0.022 ℃/년 및

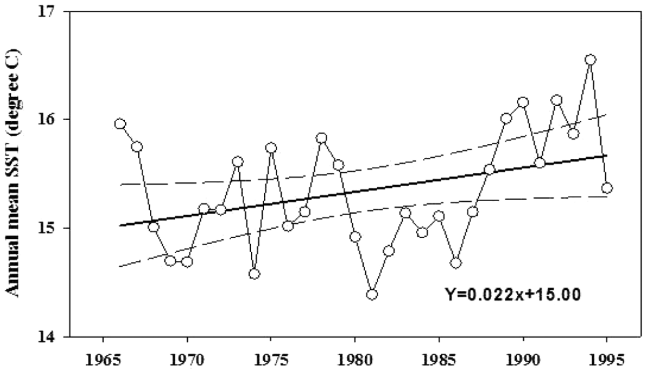

Fig. 4. Linear trend of annual mean sea surface temperature at Yeosu Coast for 30 years (1966-1995) with 95% confidence interval (dotted line).

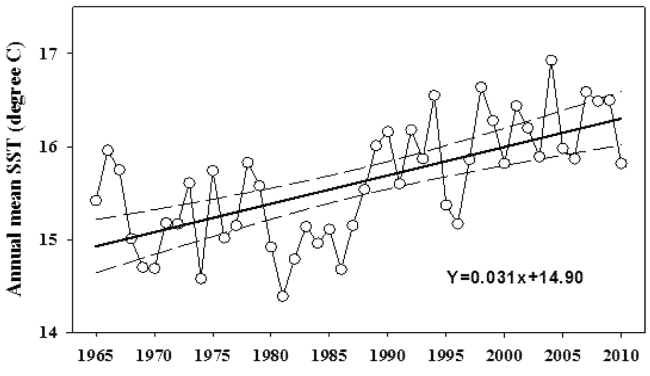

Fig. 3. Linear trend of annual mean sea surface temperature at Yeosu Coast for 46 years (1965-2010) with 95% confidence interval (dotted line).

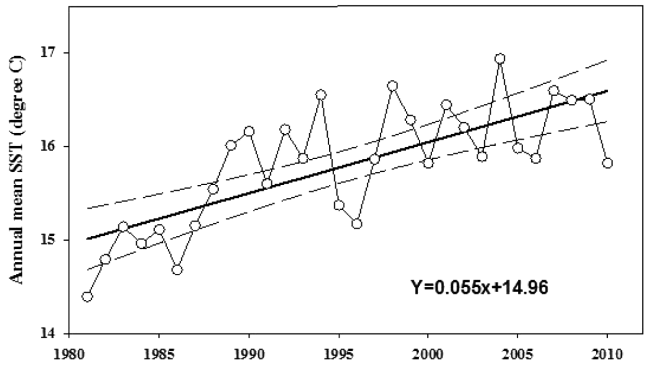

Fig. 5. Linear trend of annual mean sea surface temperature at Yeosu Coast for 30 years (1981-2010) with 95% confidence interval (dotted line).

Table 1. Regression coefficients with t tests (α = 0.05)

Variable	DF	Estimate	Standard Error	t Value	Approx Pr > |t|
Intercept	1	14.8975	0.1469	101.40	< .0001
n	1	0.0305	0.005443	5.61	< .0004

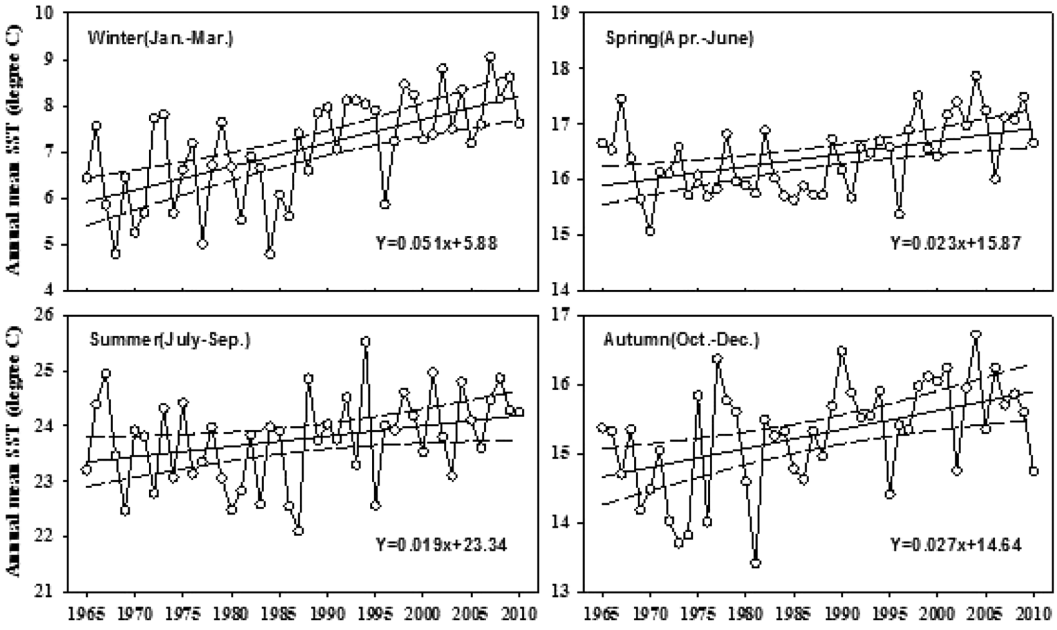

Fig. 6. Seasonal linear trend of annual mean sea surface temperature at Yeosu Coast for 46 years (1965-2010) with 95% confidence interval (dotted line).

0.055 ℃/년으로 나타나 시기적으로 1981년부터 2010년까지의 30년간의 연간상승률이 1966년부터 1995년 사이의 30년간의 연간상승률보다 2.5배 높은 연상승률을 보였다. 이는 1970년 후반 이후 한반도 주변해역의 수온이 현저히 상승한 것으로 보고한 Lee and Kim [2013]의 결과와 같은 맥락을 가진다.

한편, 46년(1965-2010년)간의 계절별 평균 표면수온의 변동 경향(Fig. 6)에 의하면, 겨울철(1, 2, 3월)의 평균 상승률은 0.051 ℃/년, 봄철(4, 5, 6월)의 경우는 0.023 ℃/년, 여름철(7, 8, 9월)의 상승률은 0.018 ℃/년 이며, 가을철은 0.027 ℃/년 상승률을 나타내었다. 전반적으로 겨울철의 상승률이 현저한 추세로서, 겨울철의 상승률은 여름철에 비하여 2.5배 이상, 봄과 가을보다 2배 정도 높은 상승경향을 보였고, 봄과 가을은 유사한 상승률을 나타내었으며, 여름철에 가장 낮은 상승경향을 보였다. 이러한 상승 경향으로부터 한반도 주변해역 표면수온의 장기변동 경향은 계절적으로 겨울철의 상승 추세가 지배적이라는 결과(Lee and Kim[2013])를 확인할 수 있다. 또한, 월별 표면수온의 장기변동 경향(Table 2)에 의하면 2월에 가장 높은 상승률(0.051 ℃/년)을 보였으며, 7월에 가장 낮은 상승률(0.012 ℃/년)을 보였다.

Table 2. Linear trends of monthly mean sea surface temperature at Yeosu Coast for 46 years (1965-2010)

	Linear trends		Linear trends
Jan.	0.050×(Year-1965)+5.29	July	0.012×(Year-1965)+22.42
Feb.	0.056×(Year-1965)+4.86	Aug.	0.014×(Year-1965)+24.40
Mar.	0.047×(Year-1965)+7.49	Sep.	0.029×(Year-1965)+23.20
Apr.	0.032×(Year-1965)+11.84	Oct.	0.035×(Year-1965)+19.71
May	0.021×(Year-1965)+16.04	Nov.	0.017×(Year-1965)+14.92
June	0.016×(Year-1965)+19.75	Des.	0.030×(Year-1965)+9.26
Avg.	0.03 ℃/Year		

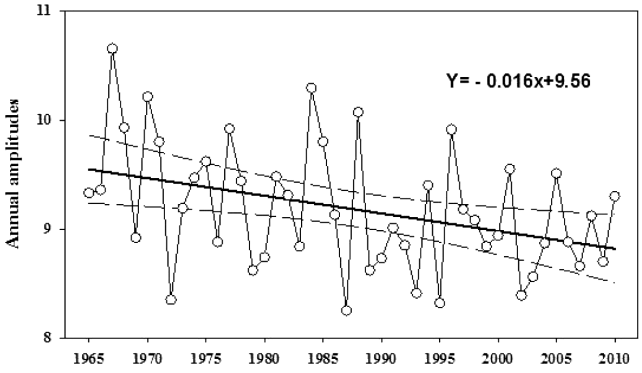

Fig. 7. Linear trend of annual amplitudes of sea surface temperature at Yeosu Coast for 46 years (1965-2010).

Table 3. Regression coefficients with t tests (α = 0.05)

Variable	DF	Estimate	Standard Error	t Value	Approx Pr > |t|
Intercept	1	9.5583	0.1632	58.58	< .0001
n	1	-0.0162	0.005458	-2.59	0.0127

3.2.2 연진폭의 장기변동 경향

조화분석 결과에 의한 연진폭의 장기변동 추이(Fig. 7)에 따르면, 여수연안 표면수온의 연진폭은 0.0162/년 감소하는 추세를 보였으나, 유의성 검정결과(Table 3) 유의수준 0.05의 경우 유의성을 보이나, 유의수준 0.01의 경우는 그렇지 않은 결과(probably significant)를 보여 연진폭이 유의하게 감소되고 있다는 대립가설을 강하게 뒷받침하지는 못하고 있다. 그러나 한반도 연안수온의 연직폭이 감소하고 있다는 Kang[2000]의 보고를 반영할 경우, 본 연구의 결과로부터 여수연안 표면수온 연진폭의 하강 추세를 전면적으로 부정하

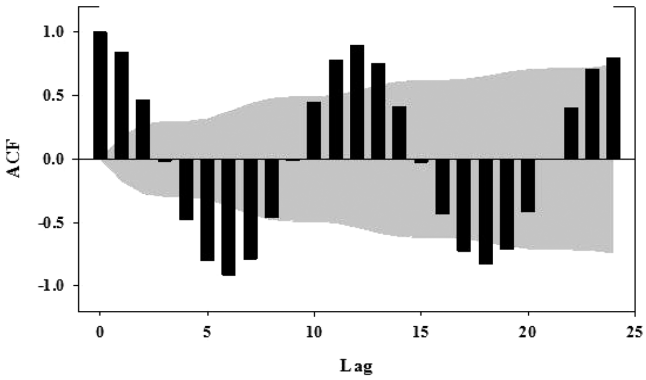

Fig. 8. Estimatied autocorrelation functions (ACF) of monthly SST with 95% confidence interval.

기는 어려울 것으로 판단되며, 조사 자료의 기간을 확대하여 재검토를 필요로 하는 부분으로 판단된다.

3.3 여수 연안수온의 시계열적 예측

3.3.1 모형식별

계절변동에서 언급한 바와 같이, 여수연안 표면수온은 2월에 최저수온, 8월에 최고수온에 이르는 형태로 매년 유사하게 반복적으로 변화하는 형태를 보여 수온변화의 계절주기가 12개월임을 알 수 있다. 또한 표면수온자료의 자기상관함수(AutoCorrelation Function, ACF, Fig. 8)로부터 계절주기를 확인 할 수 있다. 즉 자기상관함수는 계절시차 12, 24 등을 중심으로 심하게 돌출되어 있으며, 계절시차의 배수에 해당하는 시차를 따라 아주 느리게 반복하면서 감소하는 형태를 띠고 있다.

이것은 표면수온 시계열이 계절시차가 12개월인 계절변동을 포함하고 있음을 나타내고 있으며, 동시에 표면수온 시계열이 계절 비정상성(seasonal nonstationary)을 포함하고 있음을 의미하여 계절차분을 통한 시계열의 정상화가 요구된다.

계절차분된 시계열($(1-B^{12})Z_t$)의 자기상관함수(Fig. 9)는 시차가 증가할수록 지수함수적으로 감소하고, 또한 시차 12 이후 역시 감소하는 형태를 갖는다. 편자기상관함수(Partial AutoCorrelation Function, PACF, Fig. 9)의 경우는 시차 1에서 양의 값, 시차 12, 24에서 음의 값을 갖는 돌출형태를 띠고 있으며, 그 이외의 시차에서는 유의한 값을 갖지 않는다. 그러므로 이런 형태는 계절자기회귀모형의 형태 즉, $ARIMA(1,0,0)(2,1,0)_{12}$로 식별할 수 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(1-\phi_1 B)(1-\Phi_1 B^{12}-\Phi_2 B^{24})(1-B^{12})Z_t = e_t \quad (4)$$

3.3.2 모수추정 및 모형진단

식별된 모형 식 (4)의 모수(ϕ_1, Φ_{12}, Φ_{24})를 최우추정법으로 추정하였으며, 추정값은 ϕ_1=0.5133, Φ_{12}=−0.6786, Φ_{24}=−0.4401로 모두 유의한 값을 가진다(Table 4).

또한 식(5)에 추정된 모수를 적용하여 적합시켜 얻은 잔차가 백색잡음과정을 따른다는 가설검정 결과, 검정통계량에 대한 확률이

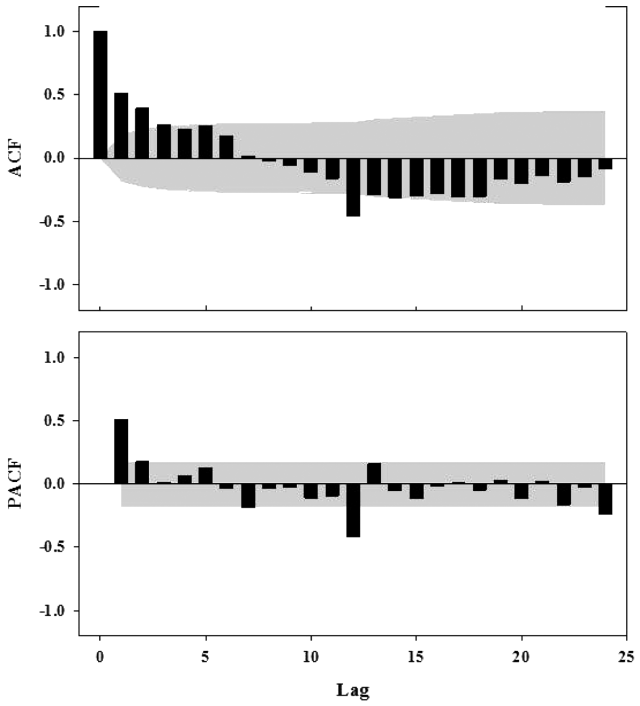

Fig. 9. Estimatied autocorrelation functions (ACF) and partial autocorrelation functions (PACF) of monthly SST after seasonal differencing.

Table 4. Parameter estimation of $ARIMA(1,0,0)(2,1,0)_{12}$ on montly SST

Maximum Likelihood Estimation					
Parameter	Estimate	Standard Error	t Value	Approx Pr > |t|	Lag
AR1,1	0.51330	0.06518	7.88	< 0.0001	1
AR2,1	-0.67858	0.07339	-9.25	< 0.0001	12
AR2,2	-0.44010	0.07176	-6.13	< 0.0001	24

0.658, 0.766 등으로 상당히 큰 값을 가지고 있어 오차항에 대한 가정을 만족하고 있다(Table 5).

더불어 추정된 잔차들의 자기상관함수와 부분자기상관함수 역시 특정한 유형을 보이지 않으며, 모든 시차에서 유의한 값을 보이지 않아 백색잡음과정을 따른다고 할 수 있어, 모형의 타당성을 제시하고 있다(Fig. 10). 따라서 여수연안 월평균수온을 예측하기 위한 시계열모형은 아래와 같이 구축된다.

$$(1-0.5133B)(1+0.6786B^{12}+0.4401B^{24})(1-B^{12})Z_t = e_t \quad (5)$$

여수연안의 표면수온이 $ARIMA(1,0,0)(2,1,0)_{12}$ 모형으로 표현됨은 여수연안 표면수온은 1개월 전 수온의 영향과 1년 전 및 2년 전 같은 달 수온의 영향을 받는다는 것을 의미한다. 예를 들어 2010년 5월의 수온은 2010년 4월과 2009년 및 2008년 5월의 수온에 의하여 결정된다. Kang and Gong[1987]에 의하면, 한국 남동해안 5개 연안 관측점의 28년간(1957-1984) 월별 수온 자료로부터 매달의 장기간 월평균에 대한 편차, 즉 이상수온(water temperature anomalies)은 1개월 전 이상수온에 의존하는 마르코프 연쇄성질(Markov chain

Table 5. Autocorrelation check of residuals

To Lag	Chi-Square	DF	Pr > ChiSq	Autocorrelations					
6	1.61	3	0.6580	-0.026	0.006	0.020	0.023	0.082	0.029
12	5.73	9	0.7664	-0.033	-0.085	0.096	-0.009	0.017	-0.071
18	11.32	15	0.7293	0.044	0.002	-0.119	0.070	-0.067	-0.066
24	21.01	21	0.4581	0.046	-0.039	0.086	-0.086	-0.090	-0.150
30	25.15	27	0.5658	0.010	0.111	-0.045	-0.012	0.074	0.021

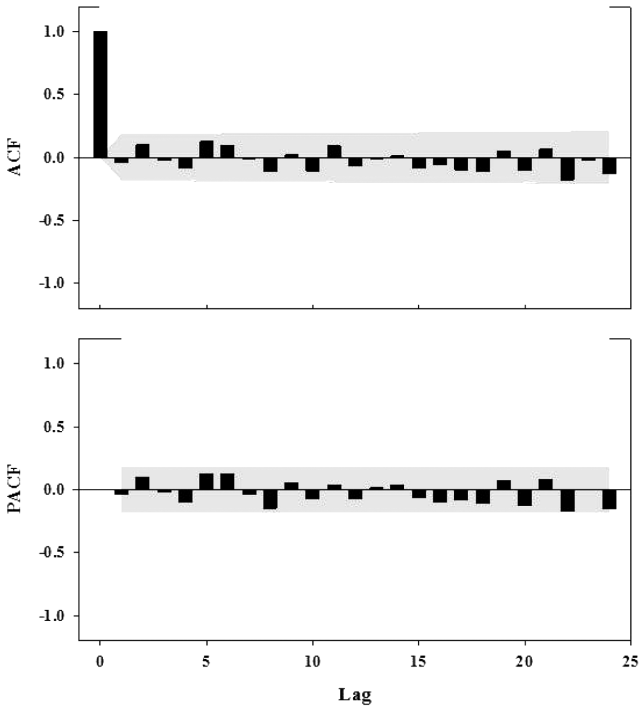

Fig. 10. Estimatied residual ACF and PACF of ARIMA(1,0,0)(2,1,0)$_{12}$ on montly SST.

property)을 가지며, 마르코프 연쇄성을 보유하는 열적 기억(thermal memory)은 약 3개월 정도 유지된다고 보고하였다. 추정된 여수연안 표면수온의 시계열 모형(식 5) 역시 계절변동을 제외할 경우 AR(1)과정, 즉 선형마르코프과정을 따르는 것을 알 수 있다.

3.3.3 예측

구축된 모형으로 향후 12개월간의 월별 평균수온, 즉 2010년의 월별 평균 표면수온을 최소평균제곱오차(minimum mean square error; MMSE)법을 이용하여 예측하고, 예측치는 평균절대백분율오차(Mean Absolute Percentage, MAPE)를 적용하여 예측성능을 측정하였다. 평균절대백분율오차는 실측치(A_t)와 예측치(F_t)와의 차이인 오차의 평균으로서 그 값이 작을수록 예측성능이 우수함을 의미하며, 다음과 같이 표현된다.

$$MAPE = \frac{1}{n}\left(\sum_{t=1}^{n}\left|\frac{A_t - F_t}{A_t}\right| \times 100\right) \quad (6)$$

예측치(Fig. 11)는 전반적으로 실측치에 비하여 0.4-1.5 ℃ 높게 나타났고, 6월과 7월은 0.2-0.3 ℃ 낮게 예측되었다. 예측치와 실측

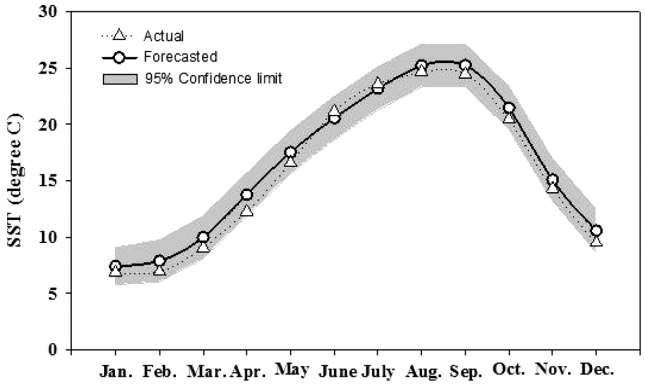

Fig. 11. Comparison of forecasted monlty SST and actual monthly SST.

치간 편차의 절대값은 여름철(5-9월)의 경우 0.2-1.0 ℃, 겨울철(10-4월)은 1.0-1.5 ℃의 편차를 보여 겨울철의 편차가 여름철에 비하여 상대적으로 큰 편차를 보였으며, 예측치의 평균절대백분율오차는 8.3%로 나타났다. 여기서 평균절대백분율오차의 기준은 10% 미만일 때 매우 정확, 10-20% 이내는 정확, 20-50% 이내는 보통, 50% 이상은 부정확하다는 의미이다(Choi[1998]; Lewis[1982]). 전반적으로 예측치가 실측치에 비하여 높게 나고, 특히 겨울철의 편차가 큰 것은 과거에 비하여 최근의 겨울철의 표면수온에 낮아진 것에 기인한 것으로 추정되며, 앞으로 표면수온에 영향을 미치는 기온 및 각종 기후지수 등의 입력 자료를 더하여 전이함수 모형 또는 다변량 시계열 모형을 수립하여 예측을 수행할 경우 예측성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

여수연안 표면수온의 계절변동, 장기변동추세 및 확률변동 특성을 이해하기 위하여 국립수산과학원 해양자료센터에서 제공하는 여수연안의 46년(1965-2010년)간 월평균 표면수온자료에 대한 조화분석, 회귀분석 및 시계열분석을 수행하여 각 변동 특성을 파악하였으며, 표면수온의 시계열 모형을 구축하고 구축된 모형으로부터 향후 12개월간의 예측을 수행하였다.

여수연안의 연평균 표면수온은 15.6 ℃, 연교차폭은 약 18 ℃를 보이며, 연위상은 236°로서 최고수온을 보이는 시기는 8월 26일경에 나타난다. 계절에 따른 표면수온 변동폭은 겨울철의 경우 2 ℃ 내외, 여름철에 약 4 ℃의 변동폭을 보여 겨울철에 비하여 여름철의 변동폭이 증가한다.

장기적으로 여수연안 표면수온은 연간 약 0.0305 ℃의 유의한 상승 추세를 가지며, 시기적으로 1981년부터 2010년까지의 30년간의 상승 경향이 현저하며, 계절적으로는 겨울철의 상승 경향이 지배적이다. 반면, 연진폭의 경우는 연간 0.0162 ℃ 하강 추세를 보였으나, 유의성 검정결과, 연진폭이 유의하게 감소되고 있다는 가설을 강하게 뒷받침하지는 못하는 것으로 나타났다. 그러나 선행 연구의 결과(Kang[2000])를 반영할 경우, 본 연구의 결과만으로 여수연안 표면수온의 연진폭 하강 추세를 전면적으로 부정하기는 어려울 것으로 판단되며, 조사 자료의 기간을 확대하여 연진폭 하강 추세에 대한 재검토가 요구된다.

최근 15년간(1995-2009년)의 여수연안 월평균 표면수온을 적합시켜 선택된 모형은 $ARIMA(1,0,0)(2,1,0)_{12}$로 식별되며, 아래와 같이 나타난다.

$$(1-0.5133B)(1+0.6786B^{12}+0.4401B^{24})(1-B^{12})Z_t = e_t$$

위의 모형을 기초로 분석에 포함되지 않은 2010년의 월평균 표면수온을 예측한 결과, 예측치는 전반적으로 실측치에 비하여 0.4-1.5 ℃ 높게 나타났고, 6월과 7월은 0.2-0.3 ℃ 낮았으며, 예측치의 평균절대백분율오차는 8.3%로 나타났다. 본 연구에서는 표면수온 예측을 위하여 수립된 모형이 과거의 표면수온만을 이용한 단변량 시계열분석에 의한 시도였으나, 앞으로 표면수온에 영향을 미치는 기온 및 각종 기후지수 등의 입력 자료를 더하여 전이함수 모형 또는 다변량 시계열 모형을 수립하여 예측을 시도 할 경우 예측성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 국립수산과학원 남서해수산연구소 시험연구사업(RP-2014-ME-012)의 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] Box, G. and Jenkins, G., 1976, Time series analysis : Forecasting and control, Holden-Day Series in Time Series Analysis and Digital Processing, Holden-Day, San Francisco, CA, pp. 337-380.

[2] Chen, T., Yu, K., Shi, Q., Li, S., Price, G. J., Wang, R., Zhao, M., Chen, T. and Zhao, J., 2009, Twenty-five years of change in scleractinian coral communities of Daya Bay(northern South China Sea) and its response to the 2008 AD extreme cold climate event, Chinese Science Bulletin, Vol. 54, pp. 2107-2117.

[3] Choi, Y.M., 1998, Forecasting accuracy of tourism demand : An evaluation of time series methods, Ph.D Thesis, University of Kyonggi, Suwon, Korea.

[4] Cook, T., Folli, M., Klinck, J., Ford, S. and Miller, J., 1998, The relationship between increasing sea-surface temperature and the northward spread of *Perkinsus marinus* (Dermo) disease epizootics in oysters, Estuarine, Coast and Shelf Science, Vol. 46, pp. 587-597.

[5] Deser, C., Alexander M.A., Xie, S.P. and Phillips, A.S., 2010, Sea surface temperature variability : Patterns and Mechanisms, Annual Review of Marine Science, Vol. 2 pp. 115-143.

[6] Gong, Y., 1968, On the seasonal variation of coastal surface water temperature, Bulletin of Fisheries Research & Development Agency, No. 3, pp. 59-79.

[7] Gower, J.R.R., 2002, Temperature, wind wave and wave climatologies, and trends from marine meterological buoys in the northest Pacific, Journal of Climate, Vol. 15, pp. 3709-3718.

[8] Hahn, S.B., 1970, Periodic variation of water temperature in the seas of around Korea (I): Annual and secular variations of surface water temperature, Kumun-do region, Southern Sea of Korea, Journal of Oceanological Society of Korea, Vol. 5, No. 1, pp. 6-13.

[9] Hahn, S.B., 1997, Role of SST warming for living resources in Korean coastal waters, KODC Newsletter, 30, pp. 19-28.

[10] Hussian, M.A., Abbas, S., Ansari, M.R.K. and Zaffar, A., 2013, Perturbations of modeling and forecast of Karachi coastal region seawater, Proceedings of the Pakistan Academy of Science, Vol. 50, No. 3, pp. 235-245.

[11] Kang, Y.Q., 2000, Warming trend of coastal waters of Korea during recent 60 years (1936-1995), Journal of Fisheries Science and Technology, Vol. 3, No. 3, pp. 173-179.

[12] Kang, Y.Q. and Gong, Y., 1987, Markov chain properties of sea surface temperature anomalies at the southeastern coast of Korea, Journal of Oceanological Society of Korea, Vol. 22, No. 2, pp. 57-62.

[13] Kang, Y.Q. and Lee, B.D., 1984, Year-to-year fluctuation of seasonal variation of surface temperature in the Korea Strait. Bulletin of Korean Fisheries Society, Vol. 17, No. 3, pp. 557-165.

[14] Karim, R., 2013, Season ARIMA for forecasting sea surface temperature of the north zone of the Bay of Bengal, Research& Reviews : Journal of Statistics, Vol. 2, Issue 2, pp. 2278-2273.

[15] Kenyon, K.E., 2013, Seasonal sea surface temperatures of the North Pacific, Natural Science Vol. 5, No. 8, pp. 875-879.

[16] Kim, B.K., 1983, Periodic and correlation analysis between water temperature and air temperature in the Korean waters, Journal of the Oceanological Society of Korea, Vol. 18, No. 1, pp. 55-63.

[17] Lee, J.H. and Kim, C.H., 2013, Long-term variability of sea surface temperature in the East China Sea: A review, Ocean and Polar Research, Vol. 35, No. 2, pp. 171-179.

[18] Levitus, S., Antonov, J. and Boyer, T., 2005, Warming of the world ocean, 1955-2003, Geophysical Research Letters, Vol. 32, L02604.

[19] Lewis, C.D., 1982, Industrial and business forecasting method, Butterworths, London, p. 42.

[20] Lim, K.B., 1972, On the study of monthly variation of surface water temperature and its annual mean condition in the coast of

Korea, Bulletin of Fisheries Research & Development Agency, No. 9, pp. 29-45.

[21] Lin, X. and Johnson, R.H., 1996, Heating, moistening, and rainfall over the Western Pacific warm pool during TOGA COARE, American Meterological Society, Vol. 2, No. 22, pp. 3367-3383.

[22] Liu, F.C., Liu, J.T., Su, W. and Guo, Y.Y., 2009, Time series of coastal sea surface temperature : Simulation and prediction based on seasonal ARIMA model, Journal of Huaihai Institute of Technology(Natural Sciences Edition), Vol. 15, pp. 3709-3718.

[23] Masson, D. and Patrick, F.C., 2007, Temperature trends and interannual variability in the Strait of Georgia, British Columbia, Continental Shelf Research, Vol. 27, pp. 634-649.

[24] Min, S.H., Kim, D.H. and Yoon, H.J., 2010, Temporal and spatial analysis of SST in the northern Asian Seas using NOAA/AVHRR data, Journal of the Korea Institute of Marine Information & Communication Sciences, Vol. 14, No. 12, pp. 2818-2826.

[25] Murty, V.S.N., Subrahmanyam, B., Gangdhra Rao, L.V. and Reddy, G.V., 1998, Seasonal variation of sea surface temperature in the Bay of Bengal during 1992 as derived from NOAA-AVHRR SST data, International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 12, pp. 2361-2372.

[26] Ning, X., Lin, C., Su, J., Liu, C., Hao, Q. and Le, F., 2011, Long-term changes of dissolved oxygen, hypoxia, and the response of the ecosystem in the East China Sea from 1975 to 1995, Journal of Oceanography, Vol. 67, No. 2, pp. 59-75.

[27] Pearce, A. and Feng, M., 2007, Observations of warming on the Western Australian continental shelf, Marine and Freshwater Research, Vol. 58, No. 10, pp. 914-920.

[28] Seong, K.T., Hwang, J.D., Han, I.S., Go, W.J. and Suh, Y.S., 2010, Characteristic for long-term trend of temperature in the Korean waters, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 16, No. 4, pp. 353-360.

[29] Weare, B.C., Navato, A.R. and Newell, R.E., 1976, Empirical orthogonal analysis of Pacific sea surface temperature, Journal of Physical Oceanography, Vol. 6, pp. 671-678.

[30] Webster, P.J., 1982, Seasonality in the local and remote atmospheric response to sea surface temperature anomalies, American Meteorological Society, Vol. 39, pp. 41-52.

[31] Wyrtki, K., 1965, The annual and semiannual variation of sea surface temperature in the North Pacific Ocean, American Society of Limnology and Oceanography, Vol. 10, No. 3, pp. 307-313.

[32] Yoon, D.Y. and Choi, H.W., 2011, A comparison of spatio-temporal variation pattern of sea surface temperature according to the regional scale in the South Sea of Korea, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, Vol. 14, No. 4, pp. 182-193.

2014년 3월 4일 원고접수
2014년 4월 14일(1차), 2014년 5월 13일(2차) 심사수정일자
2014년 5월 15일 게재확정일자