

추세분석과 주기분석을 이용한 평균해수면과 연안수온 장기전망

Long-term Prospects of Mean sea Level and Coastal Sea Surface Temperature using Trend and Period Analysis

황진아* · 강수진* · 한기종* · 고지민**

Jin A Hwang · Su Jin Kang · Ki Jong Han · Ji Min Ko

요약 전 지구적으로 급격한 기후변화는 해수면의 상승과 표층 해수온도에 영향을 미치게 되며 연안 저지대에 터전을 마련한 주민들에게 큰 피해를 주게 된다. 이 연구에서는 기존에 많이 사용된 평균해수면과 연안수온의 추세분석, 주기분석 방법을 적용하여 예측치를 생산하였다. 그리고 생산한 예측치중 관측치와 상관성이 더 높은 주기분석에 직접적 자료동화방법을 접목한 예측방법을 처음으로 적용하였다. 이 방법은 추세, 주기, 직접적 자료동화방법을 접목한 방법 중 관측치와 상관성이 가장 높은 자료동화 방법을 적용하여 주간전망과 월간전망을 평년 대비 비수, 높음, 낮음으로 전망하였다.

키워드 평균해수면, 표층수온, 추세분석, 주기분석, 자료동화, 장기전망

Abstract The global climate change rapidly affects sea level rise and sea surface temperature so that it gives a lot of damages to the residents of low-level ground at the coastal area. In this study we forecasted coastal sea temperature and mean sea level using the trend and period analysis. For the first time, we used a forecasting method incorporated with a direct observer assimilation methods assimilation method into a cycle forecast that has a higher correlation with observed values. This method shows the highest correlation with the observations among the three methods trend, cycle analysis and direct observer assimilation. Finally, for the accuracy of the long-term prediction, the weekly and the monthly prediction were made with similar, high and low compared to those of usual years.

Key words Wmean sea level, Surface temperature, Trend, Direct observer assimilation method, Long-term prediction

1. 서론

최근 전 세계적으로 일어나고 있는 기후변화와 관련된 문제들은 산업혁명 이후 무분별한 개발의 결과인 온실가스 배출량의 급격한 증가로 인하여 발생되고 있다. 이러한 환경문제를 해결하고자 기후변화협약인 '교토 의정서'를 통하여 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등과 같이 온난화를 일으키는 가스를 감축하고자 하였다. 이와 같은 노력에도 불구하고 평균해수면, 해수면 온도, 대기온도 상승 등 이상기후 현상은 지속적으로 일어나고 있으며, 이상기후에 의한 홍수, 태풍 등과 같은 자연재해가 세계 곳곳에서 일어나고 있다. 특히 기후변화는 해양에 사는 생물들의 서식지 변화, 해양생

물 다양성 감소, 해양 생태계 손실 등과 같은 해양환경에 많은 영향을 미치고 있다.

기후변화에 관한 정부간협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 제 5차 보고서(2013)에 해수면은 1900년~1905년 기준으로 지난 112년(1901~2010년)간 $0.19(\pm 0.2)$ m 상승하였다고 보고하였다. 새로운 기후변화 예측 시나리오인 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) RCP 8.5(저감없이 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우) 경우, 1986~2005년 대비 2046~2065년에 평균해수면이 $0.66(\pm 0.18)$ m 상승할 것이라고 예측하고 있다.

국립해양조사원은 20년 이상 관측된 18개 조위관측소 자료로 해수면을 추세분석하여 평균 해수면 상승률

을 2.46 mm/yr로 발표하였다(국립해양조사원, 2015). 이는 IPCC 5차 보고서(2013)에서 발표한 1901~2010년 지구평균해수면 상승률인 1.7(±0.2) mm/yr 보다 높은 수치이다.

지구온난화가 인류에 미치는 영향 중 가장 큰 것은 해수면 상승이다(IPCC, 2007). 지구온난화는 지구시스템을 구성하는 육지, 대기, 해양, 생물 등의 시스템에 큰 영향을 준다. 지구온난화에 의한 지구 시스템의 변화는 해수면 상승과 같은 현상을 초래한다.

해수면 상승은 그 특성상 인구와 산업 시설이 집중되어 있는 연안에 가장 심각한 영향을 미칠 수 있다. 특히 해수면 상승은 연안 저지대 및 습지의 범람, 해안 침식, 폭풍해일과 홍수, 그리고 표층수와 지하수의 염분 침투 등에 의한 직접적인 피해를 증가시키고 이러한 영향들이 다양한 경로를 통하여 이차적으로 자연생태계 및 사회경제적인 면에 부정적인 영향을 미칠 수 있다(국립해양조사원, 2010a; Nicholls, 2002).

우리나라에서도 해수면 상승에 의한 피해가 예상되고 있다. 조광우 외(2002)는 2100년까지 해수면 상승에 의한 최악의 시나리오를 적용할 경우 약 149만 명이 침수의 위험에 노출되어 막대한 피해가 발생할 수 있음을 예측하였다. 이러한 심각한 문제를 야기할 수 있는 해수면 상승에 대하여 아직 우리나라에서는 많은 연구가 수행되지 않았으며, 해수면 상승으로 인한 피해에 대한 보고나 그 피해를 예측한 연구 또한 많이 미흡한 실정이다(오상명 외, 2011).

전 지구적인 급격한 기후변화는 해수면의 상승과 표층 해수온도에 영향을 미치게 되며, 이러한 연안의 해양환경변화는 연안 저지대에 터전을 마련한 주민들에게 큰 피해를 주게 될 것으로 생각된다.

따라서 해수면 상승으로 예측되는 연안지역의 재해 위험성을 평가하고 효율적인 대응방안을 마련하는 것은 장기적인 연안관리 및 지속 가능한 연안개발을 위해 반드시 필요하다. 이를 위해서는 무엇보다 해수면 상승에 대한 과학적인 연구와 예측이 선행되어야 한다. 특히 미래에 해수면이 어느 정도까지 상승할 것인가에 대한 예측은 연안재해 대응을 위한 시작점이라 할 수 있다.

2015년 12월에 열린 파리협정에서는 전 세계의 장기목표로 산업화 이전 대비 지구평균기온 상승을 2°C 보다 상당히 낮은 수준으로 유지하도록 하고, 온도 상승을 1.5°C 이하로 제한하기 위한 노력을 추구하기로 하였다(김길환, 2016).

기후변화와 관련된 평균해수면의 높이와 평균수온에 대한 정확한 전망이 이뤄진다면 계획된 개발에 대한 해수면 상승에 따른 피해 저감 방안, 해안가 보호를

위한 설계, 생태계 보호 및 회복에 도움이 되는 기초자료가 될 수 있다.

해수면과 수온상승은 기존의 전통적인 추세분석 방법이 해수면과 수온의 상승추세와 직접적인 연관이 있는지에 대한 의문이 제기될 수 있기 때문에 장기적인 평균해수면과 평균수온 변화를 예측하기 위한 새로운 방법이 요구되고 있다(국립해양조사원, 2015).

이 연구에서는 연안에 위치한 조위관측소의 과거 수십 년의 해수면과 연안수온 자료로 추세분석과 주기분석 방법을 적용하고 처음으로 주기분석에 자료동화 방법을 접목하여 방법에 따른 예측치와 관측치의 상관성을 통계 분석하였다. 그 중 상관성이 높은 방법으로 해수면과 수온의 장기전망을 하였으며 관측치와 검증을 통해 보다 정확한 전망 방법을 제시하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1 자료

우리나라 연안의 평균해수면과 표층수온을 분석하기 위하여 국립해양조사원에서 운영하는 KOOFS (Korea Ocean Observing and Forecasting System)에서 제공하는 자료를 수집하여 분석하였다.

분석에 사용된 해수면 자료는 조석의 장주기 성분인 18.6년 주기를 고려하여 관측기간이 최근 20년 이상인 18개소 자료를 사용하였다. 표층수온은 최근 5년 이상인 17개소 조위관측소 자료를 월 평균하여 분석에 사용하였다.

관측소별 관측기간은 Table 1과 같고, 조위관측소 위치는 Fig. 1에 나타내었다.

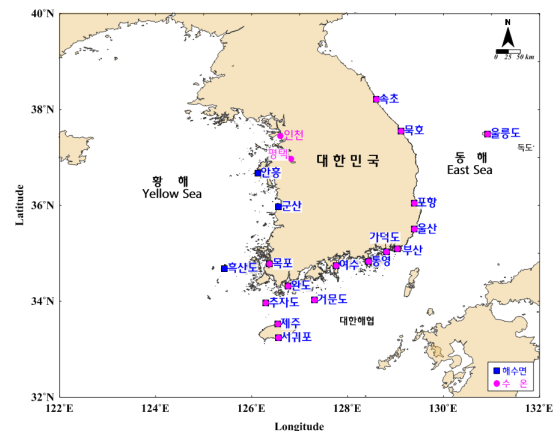


Figure 1. Tide stations for data analysis

Table 1. Data information

해역	조위관측소	해수면(18개)	수온(17개)
황해	인천	-	2000. 1.~2015. 12.
	평택	-	2000. 1.~2015. 12.
	안흥	1987. 1.~2015. 12.	-
	군산	1981. 1.~2015. 12.	-
	목포	1960. 1.~2015. 12.	2005. 1.~2015. 12.
	흑산도	1979. 1.~2015. 12.	-
제주	제주	1965. 1.~2015. 12.	2002. 1.~2015. 12.
	서귀포	1985. 1.~2015. 12.	2002. 1.~2015. 12.
	거문도	1982. 1.~2015. 12.	2008. 1.~2015. 12.
남해	추자도	1985. 1.~2015. 12.	2006. 1.~2015. 12.
	완도	1983. 1.~2015. 12.	2005. 1.~2015. 12.
	여수	1968. 1.~2015. 12.	2003. 1.~2015. 12.
	통영	1977. 1.~2015. 12.	2002. 1.~2015. 12.
	가덕도	1977. 1.~2015. 12.	2005. 1.~2015. 12.
	부산	1962. 1.~2015. 12.	2002. 1.~2015. 12.
동해	울산	1963. 1.~2015. 12.	2004. 1.~2015. 12.
	포항	1972. 1.~2015. 12.	2000. 1.~2015. 12.
	울릉도	1978. 1.~2015. 12.	2001. 1.~2015. 12.
	북호	1977. 1.~2015. 12.	2000. 1.~2015. 12.
	속초	1977. 1.~2015. 12.	2003. 1.~2015. 12.

2.2 예측방법

자료를 분석하기 전에 관측자료에 포함된 이상자료(장비오류, 관측자 실수, 자료전송 오류, 입력 오류 등)를 품질처리 하여 분석하였다(국립해양조사원, 2015). 품질처리 후 추세분석과 주기분석 방법, 추가적으로 주기 분석한 결과에 자료동화방법을 적용하여 예측치를 산출하였다.

2.2.1 품질처리

자료의 품질처리는 1차와 2차로 나누어 수행하였다(Fig. 2).

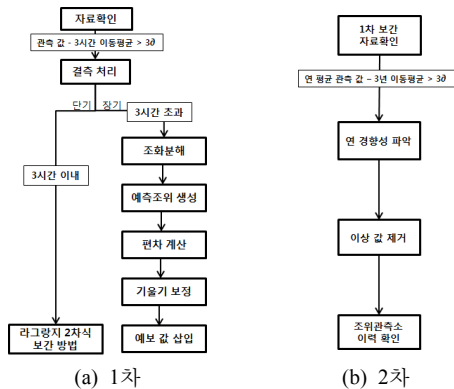


Figure 2. Quality control process

1차 품질처리 방법은 3시간 이동 평균한 값과 관측

치의 편차가 표준편차의 3배 이상 차이가 발생하는 값을 결측 처리하고, 시계열 그림으로 확인하였다. 결측이 발생한 경우 3시간 미만은 라그랑지 2차식 보간 방법으로 자료를 생성하여 보완하였다. 3시간 이상 결측 자료는 조화분해로 산출한 조화상수로 예보한 값과 결측 구간에 인접한 값과 편차를 계산하여 이 편차 기울기를 보정한 예보 값을 삽입하여 보간하였다.

2차 품질처리방법은 1차 품질처리된 자료의 연평균값의 경향성과 각 연평균 표준편차의 3배 이상 차이가 발생하는 연 평균값을 제거하였고, 조위관측소의 유지보수, 이전, 기준면 재결정으로 인한 높이 변경 관련내용의 조위관측소 이력을 확인 후 수정하여 분석하였다.

2.2.2 추세분석

선형 회귀분석은 종속변수와 독립변수 사이의 선형 상관관계를 모델링하는 회귀분석 방법으로 특정 해안에서 평균해수면의 상승 또는 하강 경향 뿐 아니라 연 주기 변화 및 반년주기 변화를 정량적으로 파악할 수 있다(Thompson, 1980).

이 연구에서는 해수면과 수온의 연평균자료와 월평균자료를 이용하여 선형회귀분석을 수행하고, 이를 통해 연간 상승률을 계산하여 연평균 상승률은 주기분석의 추세(비주기 성분)제거에 사용하였고, 월별 상승률은 월별 추세 예측에 사용하였다.

추세분석에 사용한 선형회귀법은 (식 1)이다.

$$y = ax + b \tag{1}$$

여기서 a는 상승 경향, b는 y절편이다.

2.2.3 주기분석

주기분석은 해수면의 높이 변화와 같이 주기성을 띠는 반복적인 파동을 분해하여 이미 결정된 주기들의 각 분조의 진폭과 지각을 계산하는 분석 방법이다.

이 방법으로 계산된 분조들을 합성하면 앞으로 나타나는 변화에 대하여 예측치를 제시할 수 있다. 해수면과 수온 예측은 조화분해 방법인 (식 2)로 계산하였다(변도성, 2013).

$$\hat{T}(t) = T_0 + \sum_{i=1}^N f_i(t) H_i \cos (Greenwich (Vo_i(t_0) + u_i(t)) + a_i \hat{t} - g_i) \tag{2}$$

T_0 : 전년도 연평균 해수면(cm), 수온(°C)

a_i : 각 분조의 각속도(°)

t : 시각

t_0 : 지역표준시로 표현되는 기준시각

\hat{t} : 기준시각으로부터 경과된 시각($t-t_0$)

- H_i : 각 분조의 진폭(cm 또는 °C)
- g_i : 각 분조의 KST 기준 지각(°)
- f_i, u_i : 각 분조의 교점인자(nodal factor)와 교점각(nodal angle)
- V_{oi} : 그리니치 경도 기준의 각 분조의 천문위상각(astronomical argument)

2.2.4 자료동화

해수면과 수온은 계절변동과 주기운동으로 발생하는 결정론적(Deterministic) 변동을 가짐과 동시에 기상변화와 환경변화 등과 같은 요인으로 나타나는 불규칙한 확률론적(Stochastic) 변화를 가지고 있다(강용균과 공영, 1987).

조화분석을 수행하여 얻은 연평균 해수면과 수온의 예측치는 결정론적인 변동만을 예측하기 때문에 장기적인 전망에 그대로 사용하는 것은 어렵다. 또한 강용균과 공영(1987)은 우리나라 남동해역의 수온자료에서 발생한 이상 수온이 과거 이상 값에 의존하는 마르코프 연쇄성질(Markov chain property)을 갖고 있으며 마르코프 연쇄성을 보유하는 열적 기억(thermal memory)은 약 3개월 정도 유지된다고 보고하고 있다. 이처럼 과거에 발생한 이상치가 앞으로 나타날 관측치에도 영향을 미칠 수 있기 때문에 과거의 관측치와 예측모델 사이의 관계를 규명하여 미래의 예측모델을 재설정하고 합리적인 전망치를 제시하는 자료동화(Data Assimilation) 과정이 필요하다.

자료동화 방법은 크게 직접적 자료동화 방법(Direct Observer Assimilation Methods)과 동역학적 자료동화 방법(Dynamic Observer Assimilation Methods)으로 나뉘는데, 이 연구에서는 직접적 자료동화 방법(Direct Observer Assimilation Method) 중에서 (식 3)과 같이 직접 삽입 방법(Direct Insertion Method)을 사용하여 자료동화를 수행하였다(Paola Malanotte - Rizzoli and Allan R. Robinson, 1993).

자료동화에 사용한 해수면과 수온은 전 월 25일까지의 평균을 사용하였다. 이는 예측 전 월에 다음 달의 해수면과 수온을 전망하기 위해서이다.

$$H_i^{신규예측} = H_i^{예측} + \alpha(H_{i-1}^{관측} - H_{i-1}^{예측}) \quad (3)$$

$H_i^{신규예측}$: 당월의 신규예측 월평균해수면, 수온

$H_i^{예측}$: 당월의 예측 월평균해수면, 수온

α : 자료동화 조절계수

$H_{i-1}^{관측}$: 전 월의 관측 25일 평균해수면, 수온

$H_{i-1}^{예측}$: 전 월의 예측 25일 평균해수면, 수온

2.3 장기전망

2.3.1 평년값 계산

‘기후 표준평년값(Climatological Standard Normal)’은 1931~1960년, 1961~1990년, 1991~2020년 등과 같이 고정된 30년간의 누년평균값¹⁾이라고 하며, ‘기후평년값(Climatological Normal)’은 그 밖의 임의의 30년간의 누년평균값이라고 한다. 세계기상기구에서는 ‘기후 표준평년값’을 이용하도록 권고하고 있으나 최근 기후변화를 조사하려는 목적으로 각 나라에서는 새로운 ‘기후 평년값’을 산출하고 있다. 평년값을 산출하는 30년간 또는 30년 미만의 통계 기간에 결측이 있는 경우는, 이를 제외한 자료를 이용하여 누년평균값을 구한다. 30년 미만인 자료에 대해 산출한 누년평균값은 그 자료 기간이 25년 이상인 경우는 ‘평년값’, 자료기간이 8년 이상 24년 이하인 경우는 ‘준평년값’이라 하고, 평년값에 준하여 사용한다(이만기, 2013).

수온의 경우 8년 이상 24년 이하의 자료들로, ‘기후 평년값’을 산출하지 못하고, 준평년값을 산출하였다. 평균해수면과 평균수온은 천문조에 의한 영향이 작고, 주로 기상조에 의해 결정되기 때문에 준평년값의 기준은 기상분야에서 사용하는 것을 준용하였다(Table 2).

Table 2. Statics period

조위관측소		해수면(18개)	수온(17개)
황해	인천	-	2000~2015 (16년)
	평택	-	2000~2015 (16년)
	안흥	1987~2015 (29년)	-
	군산	1986~2015 (30년)	-
	목포	1986~2015 (30년)	2005~2015 (11년)
	흑산도	1986~2015 (30년)	-
제주	제주	1986~2015 (30년)	2002~2015 (14년)
	서귀포	1985~2015 (30년)	2002~2015 (14년)
	거문도	1986~2015 (30년)	2008~2015 (08년)
남해	추자도	1986~2015 (30년)	2006~2015 (10년)
	완도	1986~2015 (30년)	2005~2015 (11년)
	여수	1986~2015 (30년)	2003~2015 (13년)
	통영	1986~2015 (30년)	2002~2015 (14년)
	가덕도	1986~2015 (30년)	2005~2015 (11년)
	부산	1986~2015 (30년)	2002~2015 (14년)
동해	울산	1986~2015 (30년)	2004~2015 (12년)
	포항	1986~2015 (30년)	2000~2015 (16년)
	울릉도	1986~2015 (30년)	2001~2015 (15년)
	묵호	1986~2015 (30년)	2000~2015 (16년)
	속초	1986~2015 (30년)	2003~2015 (13년)

기상청에서는 확률론적 예측을 위하여 평균과 표준

1) 수년 동안의 기간에 대해서 평균한 값을 말하며, 통계 기간과 시기에 따라 기후 표준평년값, 기후 평년값, 평년값, 준평년값 등으로 나뉘어 쓰인다.

편차를 계산하고 확률밀도 함수를 생산하는 가우시안 기법을 이용하여 기준이 되는 모델의 확률밀도함수를 높음, 비슷, 낮음의 단계로 3분위하여 날씨를 전망한다. 이 연구에서도 기상청의 분석방법을 참고하여 평년자료의 평균과 표준편차를 산출하고, 높음, 비슷, 낮음의 3개 구간으로 나누었다. 이 3개 구간을 나누기 위한 3분위는 0.43σ를 적용하였다(기상청, 2015).

3. 결과

이 연구에서는 각각의 자료 분석 시작일부터 2014년까지의 자료를 사용하여 2015년 관측치와 예측치의 연관성을 확인하기 위해서 (식 4)-(식 7)의 통계분석을 하였다. 정확도와 오차는 관측치와 예측치를 비교하여 어느 정도의 오차를 판별하는 Bias(mean error), 예측치로부터 산출되는 자료의 정확성을 나타내는 RMSE (Root Mean Square Error), MAE(Mean Absolute Error), 예측치와 관측치간 일치도를 판단하는 IOA(Index Of Agreement)를 계산하였다.

$$\text{Bias} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i) \quad (4)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2} \quad (5)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |M_i - O_i| \quad (6)$$

$$\text{IOA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{M}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (7)$$

여기서 M은 예측치, O는 관측치, \bar{M} , \bar{O} 는 자료의 평균, N, n은 자료의 개수이다. 오차정도를 나타내는 Bias와 정확성을 나타내는 RMSE, MAE는 ‘0’에 가까울수록 예측치와 관측치의 유사성을 나타낸다. IOA는 ‘1’에 가까울수록 예측치와 관측치 간의 유사성을 나타낸다(Baek J.J and M.H. Choi, 2012, 백 외, 2013.).

3.1 추세분석

선형회귀분석법으로 예측한 추세분석은 2014년까지의 자료로 2015년의 월평균해수면과 표층수온을 예측하고, 관측치와 상관관계를 분석하였다(Table 3).

해역별 평균해수면의 결정계수(R²)와 IOA는 제주, 남해, 황해, 동해 순으로 상관성이 높고, 잔차(관측치-예측치), RMSE는 제주, 남해, 동해, 황해, MAE는 제주, 남해, 황해, 동해 순으로 ‘0’에 가까운 값을 보였다.

Table 3. Statics between observation and prediction of mean sea level and sea surface temperature by trend analysis

		* 단위: cm, ** 단위: °C				
구분		황해	제주	남해	동해	평균
해수면	R ²	0.852	0.946	0.904	0.819	0.876
	IOA	0.947	0.979	0.962	0.879	0.938
	잔차 σ*	4.78	2.96	3.28	3.44	3.61
	RMSE*	5.615	3.461	3.938	5.478	4.659
	MAE	4.371	3.000	3.306	4.573	3.844
수온	Bias*	-0.01	0.32	-1.83	-3.48	-1.53
	R2	0.995	0.968	0.974	0.956	0.971
	IOA	0.995	0.984	0.990	0.984	0.988
	잔차 σ**	0.54	0.67	0.76	1.11	0.81
	RMSE**	1.037	0.936	0.885	1.266	1.033
	MAE	0.881	0.750	0.640	0.976	0.801
Bias**	-0.86	0.28	-0.22	-0.27	-0.26	

해역별 평균수온의 결정계수(R²)와 IOA는 황해, 남해, 제주와 동해 순으로 상관성이 높고, MAE와 RMSE는 남해, 제주, 황해, 동해, 잔차(관측치-예측치)는 황해, 제주, 남해, 동해 순으로 ‘0’에 가까운 값을 보였다.

3.2 주기분석

주기분석을 통한 예측방법에 대한 신뢰도를 평가하기 위하여, 관측 시작일부터 2014년까지의 자료를 이용하여 2015년의 월평균해수면과 월평균수온을 예측하고, 관측치와 상관관계를 분석하였다(Table 4).

해역별 평균해수면의 결정계수(R²)는 제주, 남해, 황해, 동해, IOA는 남해, 제주, 황해, 동해 순으로 상관성

Table 4. Statics between observation and prediction of mean sea level and sea surface temperature

		* 단위: cm, ** 단위: °C				
구분		황해	제주	남해	동해	평균
해수면	R ²	0.867	0.941	0.903	0.827	0.880
	IOA	0.945	0.971	0.972	0.925	0.953
	잔차 σ*	4.56	3.09	3.32	3.37	3.57
	RMSE*	5.734	3.930	3.399	4.190	4.226
	MAE	4.337	3.056	2.766	3.580	3.395
수온	Bias*	0.89	-1.78	-0.18	-1.80	-0.66
	R2	0.995	0.982	0.991	0.967	0.983
	IOA	0.998	0.994	0.996	0.986	0.993
	잔차 σ**	0.54	0.52	0.48	0.48	0.63
	RMSE**	0.670	0.595	0.652	1.144	0.790
	MAE	0.550	0.480	0.558	0.881	0.637
Bias**	-0.22	0.27	0.27	-0.10	0.00	

이 높고 MAE와 RMSE는 남해, 제주, 동해, 황해, 잔차(관측치 - 예측치)는 제주, 남해, 동해, 황해 순으로 '0'에 가까운 값을 보였다.

해역별 평균수온의 결정계수(R^2)와 IOA는 황해, 남해, 제주와 동해 순으로 높고, MAE는 제주, 황해, 남해, 동해, RMSE는 제주, 남해, 황해, 동해, 잔차(관측치-예측치)는 남해, 제주, 황해, 동해 순으로 '0'에 가까운 값을 보였다.

3.3 자료동화

일반적으로 나타나는 겨울과 여름의 기압차이, 7 ~ 8월에 발생하는 태풍, 서해안과 남해안의 지형적 특징 등에 의하여 변하는 해수면의 높이와 수온의 변화를 하나의 식과 하나의 계수로 정의하는 것은 거의 불가능하다. 그래서 2015년 자료를 각 조위관측소별로 실험하여 각 조위관측소에 적합한 자료동화 조절계수를 획득하였다.

Fig. 3은 제주 조위관측소 자료로 자료동화 조절계수를 변경하여 자료동화를 수행하였을 때 예측자료의 변화를 나타내고 있다. 그림과 같이 예측하는 전 달의 관측치와 예측치의 차이가 클수록 자료동화 조절계수에 따른 변화폭이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

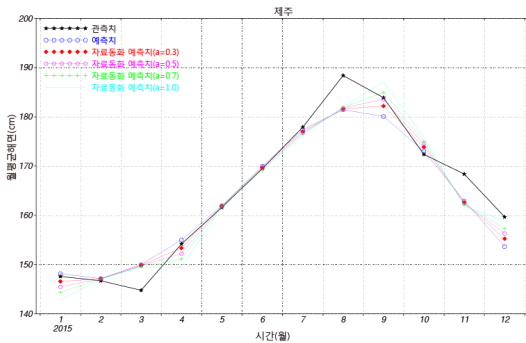


Figure 3. Data assimilation factor deduced from prediction and observations in Jeju tide station

자료동화 방법에 대한 신뢰도를 평가하기 위하여 2014년까지의 자료로 2015년의 월평균해수면과 월평균수온을 주기분석 방법으로 예측하고 자료동화하여 관측치와의 상관관계를 분석하였다. 자료동화 조절계수는 예측치와 관측치의 상관관계가 높고, 잔차는 낮게 나타나는 값을 선정하였다(Table 5).

해역별 평균해수면의 결정계수(R^2)와 IOA는 제주, 남해, 황해, 동해 순으로 상관성이 높고, MAE와 RMSE는 남해, 제주, 동해, 황해, 잔차(관측치 - 예측

치)는 제주, 남해, 동해, 황해 순으로 '0'에 가까운 값을 보였다.

Table 5. Statics between observation and prediction of mean sea level and sea surface temperature by period analysis and data assimilation

* 단위: cm, ** 단위: $^{\circ}\text{C}$

구분	황해	제주	남해	동해	평균	
해수면	R^2	0.884	0.943	0.903	0.834	0.886
	IOA	0.960	0.973	0.972	0.933	0.958
	잔차 σ^*	4.27	3.01	3.32	3.33	3.48
	RMSE*	4.822	3.761	3.400	3.991	3.940
	MAE	3.504	2.971	2.767	3.404	3.142
	Bias*	0.28	-1.78	-0.18	-1.56	-0.73
수온	R^2	0.995	0.982	0.991	0.969	0.983
	IOA	0.998	0.994	0.996	0.987	0.994
	잔차 σ^{**}	0.53	0.51	0.45	0.92	0.61
	RMSE**	0.621	0.590	0.596	1.105	0.749
	MAE	0.510	0.475	0.498	0.857	0.601
	Bias**	-0.18	0.26	0.04	-0.14	-0.01

해역별 평균수온의 결정계수(R^2)와 IOA는 황해, 남해, 제주와 동해 순으로 높고, MAE는 제주, 남해, 황해, 동해, RMSE는 제주, 남해, 황해, 동해, 잔차(관측치-예측치)는 남해, 제주, 황해, 동해 순으로 '0'에 가까운 값을 보였다.

3.4 예측방법별 결과 비교

추세 예측과 주기 예측, 주기 예측에 자료동화를 접목하여 계산한 2015년 전체해역의 월평균해수면과 월평균수온 예측치와 관측치 상관관계는 Table 6과 같다.

Table 6. Correlation between prediction and observation by prediction method

* 단위: cm, ** 단위: $^{\circ}\text{C}$

구분(단위)	추세	주기	자료동화	
해수면	R^2	0.876	0.880	0.886
	IOA	0.938	0.953	0.958
	잔차 σ^*	3.61	3.57	3.48
	RMSE*	4.659	4.226	3.940
	MAE	3.844	3.395	3.142
	Bias*	-1.53	-0.66	-0.73
수온	R^2	0.971	0.983	0.984
	IOA	0.988	0.993	0.994
	잔차 σ^{**}	0.81	0.63	0.61
	RMSE**	1.033	0.790	0.749
	MAE	0.801	0.638	0.601
	Bias**	-0.26	0.00	-0.01

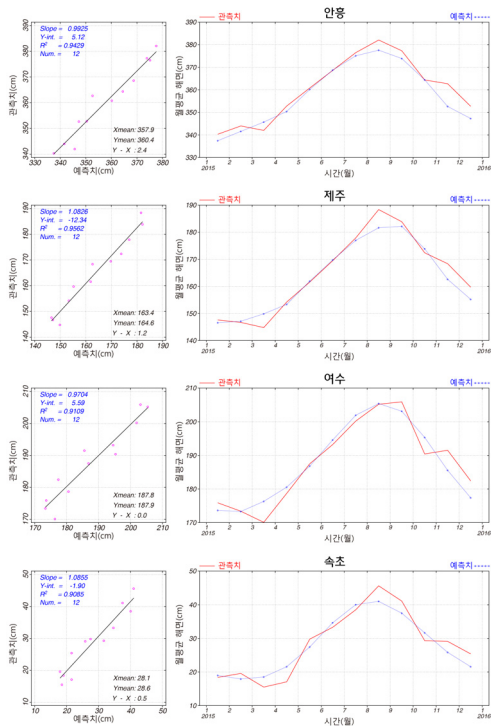


Figure 4. Monthly mean sea level results estimated from analysis and data assimilation

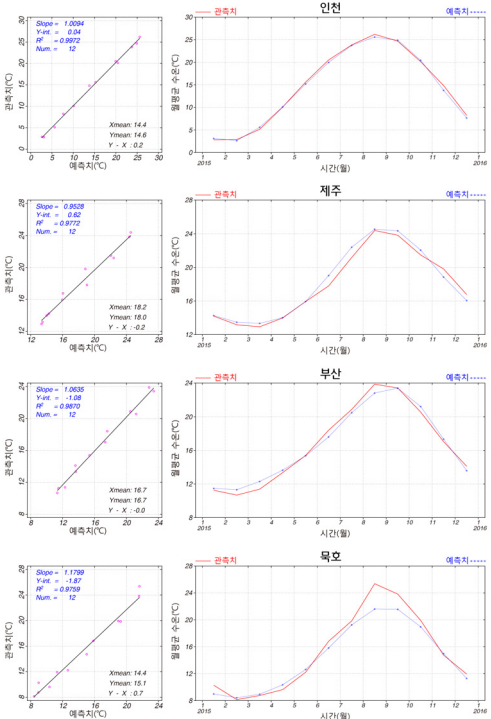


Figure 5. Monthly mean temperature results estimated from period analysis and data assimilation

통계분석 결과 평균해수면과 평균수온의 예측방법은 ‘주기 예측에 자료동화를 접목’한 방법이 가장 좋은 결과를 나타내었다. 이러한 결과에 의해 해수면과 수온을 장기전망하는 방법은 주기예측에 자료동화를 접목하는 방법이 가장 좋은 것으로 판단된다. 자료동화로 예측한 결과는 Fig. 4~Fig. 5에 나타내었다.

3.5 장기전망 결과

해수면과 수온을 기상청의 분석방법을 참고하여 주기 예측 결과를 전월 25일의 자료로 자료동화하여 지역별 주평균·월평균을 예측하고, 전년과 평년 값과 비교하여 평년자료의 평균과 표준편차를 산출하고 주간, 월간 장기전망을 ‘높음’, ‘비슷’, ‘낮음’으로 전망하였다.

이 장기전망의 검증은 예측치와 같은 기간의 관측치와 비교하고(Fig. 7), 기상청과 같이 분위별 예보와 관측에 대한 예보의 정확도를 판정하기 위해 Table 7의 3분위 판정 분할표를 작성하고, (식 8)로 적중률을 계산하였다(Wilks, 1995).

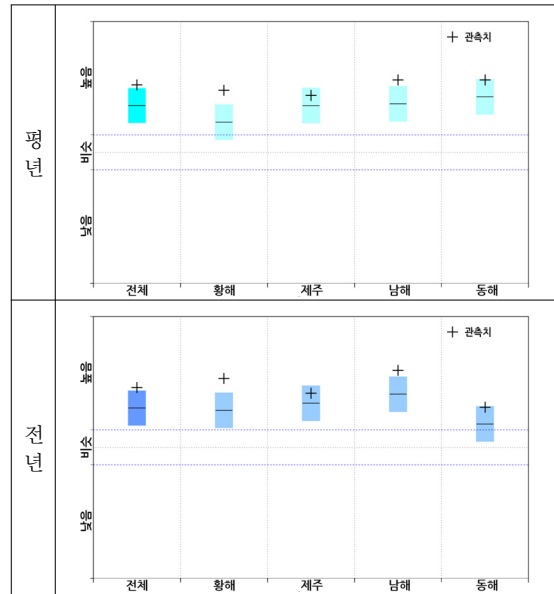


Figure 6. Verification of mean sea level outlook and observation in March 2016

Table 7. Decision partition table of 3 steps

관측	예측			
	낮음	비슷	높음	총계
낮음	n_{11}	n_{21}	n_{31}	n_{x1}
비슷	n_{12}	n_{22}	n_{32}	n_{x2}
높음	n_{13}	n_{23}	n_{33}	n_{x3}
총계	n_{1y}	n_{2y}	n_{3y}	N

그 결과 2016년 3월의 평균해수면과 표층수온의 전망 적중률은 평년과 비교한 경우 각각 70%, 60%이고, 전년과 비교한 경우 각각 50%, 70%이다(Table 8).

$$\text{적중률} = (n_{11} + n_{22} + n_{33}) / N \quad (8)$$

n_{11} : 전망(예측)과 실제관측이 모두 '낮음'인 경우

n_{22} : 전망(예측)과 실제관측이 모두 '비슷'인 경우

n_{33} : 전망(예측)과 실제관측이 모두 '높음'인 경우

N : 사례 수

Table 8. Forecast hit rate of March 2016

구분	평년 적중률(%)	전년 적중률(%)
해수면	70	50
수온	60	70

4. 결론

이 연구에서는 해수면과 수온의 변화를 예측하기 위하여 추세분석, 주기분석, 주기분석에 직접적 자료동화를 접목한 방법으로 각각의 예측치를 생성하였다. 추세분석은 선형회귀분석으로 각 월의 연간 상승 추세를 계산하는 방법이고, 주기분석은 이미 결정된 주기들의 각 분조 진폭과 지각을 합성하여 예측치를 계산하는 방법이다. 여기에 예측하기 어려운 특이 기상현상에 의해 발생하는 변화는 자료동화 방법으로 보완하였다.

예측 방법별 통계분석을 통한 검증 결과, 전체해역에서 평균적으로 주기분석에 자료동화를 접목한 방법이 가장 높은 상관관계를 보였고, 관측치와 편차도 가장 작았다. 이 방법으로 2016년 3월 주간과 월간 전망을 하였으며, 관측치와 적중률을 계산하였다. 이 적중률은 해수면과 수온 모두 50% 이상으로 높은 값을 보였다.

연구 결과와 같이 추세분석은 과거의 자료를 기초로 미래 자료를 예측하기 때문에 불규칙한 변화는 예측하기가 힘들다. 따라서 주기분석을 이용한 결정론적인 분석에 자료동화를 이용한 확률론적인 분석을 추가적으로 수행한다면 보다 더 신뢰성 높은 예측을 할 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구에서 제시한 방법으로 해수면 높이와 수온 변화의 정량적인 장기전망을 도출할 수 있고, 이는 해양산업에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 이 방법의 검증은 장기간 자료로 지속적으로 실시할 필요가 있다.

참고문헌

1. 강용균, 공영, 1987. 한국 남동연안 이상 수온의 마르코프 연쇄 성질. *Journal of the Oceanological Society of Korea*, Vol. 22, No.2, pp.57~62.
2. 국립해양조사원, 2010a. 지구온난화에 의한 해수면 변화 연구.
3. 국립해양조사원, 2015. 해수면 변동 분석 및 예측 연구 결과보고서. pp.18~19
4. 기상청, 2012. 한반도 기후변화 전망보고서.
5. 기상청, 2015. 장기예측 업무 편람.
6. 김길환, 2016. 파리협정 채택과 우리나라의 대응 방향, 과학기술정책, 정책특집, pp 22-27.
7. 변도성, 2013. 수로학 계산식에서 국지 조석지각(κ)이 올바른 사용, 한국수로학회지, 제2권, 제2호, 67-76.
8. 백종진, 변규현, 김동균, 최민하, 2013. 천리안 위성의 일사량 검증: 설마천, 청미천. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, No.1, 2013. pp 137-150.
9. 오상명, 권석재, 문일주, 이은일, 2011. 지구온난화에 의한 북서태평양 및 한반도 근해의 해수면 상승. *한국해양-해양공학학회논문집*, 제23권, 제3호, pp.236~247.
10. 이만기, 2014. 기상정보론, p288.
11. 조광우, 김지혜, 정휘철, Mimura, N. and Nicholls, R.J. 2002. 지구온난화에 따른 한반도 주변의 해수면 변화와 그 영향에 관한 연구(II), KEI-2002-RE-14, 220p
12. Baek J.J and M.H. Choi, 2012. Availability of lane surface temperture from the COMS in the Korea Peninsula, *Korea Water Resources Association*, 45(8): 755-765 (in Korean with English abstract).
13. IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and new York, USA.
14. IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and new York, USA. Thompson, K.R.,

1980. 'An analysis of British monthly mean sea level'. Geophysical Journal of Royal Astronomical Society, Vol. 63, pp.57-73.
15. Nicholls R.J. 2002. 'Analysis of global impacts of sea-level rise: a case study of flooding.' Physics and Chemistry of the Earth, 27, pp.1455-1466.
16. Paola Malanotte-Rizzoli and Allan R. Robinson, 1993. Ocean Processes in Climate Dynamic: Global and Mediterranean Example. p.332
17. Thompson, K.R., 1980. 'An analysis of British monthly mean sea level'. Geophysical Journal of Royal Astronomical Society, Vol. 63, pp.57-73.
18. Wilks, D.S.,1995. Statistical Methods in The Atmospheric Sciences, Academic Press, p.467.



강 수 진
 2014년 충남대학교 해양학과 이학사
 2014~2015년 (주)한국해양과학기술
 2016년~현재 (주)유에스티21

관심분야는 해양관측, 자료분석, 수치모델



한 기 종
 1995년 충남대학교 해양학과 이학사
 1995~1999년 (주) 한국해양과학기술
 2005~2008년 (주) 지오시스템리서치
 2012년~현재 (주) 유에스티21

관심분야는 해양관측, 수로측량, 자료분석, 수치모델



황 진 아
 2008년 군산대학교 해양학과 이학사
 2009~2011년 군산대학교 해양학과
 이학석사
 2015년~현재 (주) 유에스티21

관심분야는 해양관측, 자료분석, 해양물리



고 지 민
 2009년 인하대학교 해양학과 이학사
 2012년~현재 국립해양조사원
 해양예보과

관심분야는 해양예보, 해양관측, 자료분석

