

복합위성자료(Topex/Poseidon, Jason-1, ERS, Envisat)를
이용한 한반도 주변해역에서의 해수면 고도 변화와
해수면 온도의 상관성 연구

장새롬, 정기용, 김기영, 하경자
부산대학교 지구환경시스템학부

Variation of the Sea Surface Height around the Korean
Peninsula with the Use of Multi-satellite Data
(Topex/Poseidon, Jason-1, ERS, Envisat) and its
Association with Sea Surface Temperature

Sae-Rom Jang, Gi-Yong Jeong, Ki-Young Kim and Kyung-Ja Ha
Division of Earth Environmental System, Pusan National University
Corresponding author: Kyung-Ja Ha, kjha@pusan.ac.kr

요약

한반도 주변해역에서의 해수면 고도는 1993년부터 2005년까지의 기간 동안 연평균 3.89 mm yr^{-1} 상승하였으며, 이는 전세계 해수면 상승률의 1.3배에 해당한다. 본 연구에서는 AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data)에서 제공하는 복합위성자료 (Topex/Poseidon, Jason-1, ERS, Envisat)인 DT-MSLA (Delayed Time - Maps of Sea Level Anomalies)를 이용하여 동해와 황해, 남해, 한국해협에서의 해수면 고도 변화를 연구하였다.

해수면 고도의 평균적인 변화는 증가하는 경향을 보임과 동시에, 여름에는 4~5년, 겨울에는 3년의 주기성을 가지고 진동하였다. 조화분석을 통하여 해수면 고도와 해수면 온도의 연주기 모드와 반년주기 모드의 진폭과 위상을 나타내었다. 해수면 고도의 연주기 진폭은 한반도 주변해역에서 남동쪽이 높게, 북서쪽이 낮게 나타나는 반면, 해수면 온도는 이와는 반대의 분포를 보였다. 월별 해수면 고도와 해수면 온도의 상관성을 구한 결과, 6~8월에 동해와 남해에서 1 / 2달 시간지연 일 때, 상관계수가 0.7정도로 높게 나타났다. 이러한 결과를 통해 여름철 동해와 남해가 쿠로시오 해류의 영향을 크게 받고 있음을 짐작할 수 있다.

1. 서론

지구온난화로 인한 기후변화 중 인간사회에 가장 큰 악영향을 줄 수 있는 요소 중의 하나가 해수면 고도 (Sea Surface Height, SSH)의 상승인 것으로 평가되고 있다 (IPCC, 2001a). 해수면 고도는 해수면 온도, 해면기압, 바람, 조석, 해류 등의 인자들에 의하여 영향을 받는다. 이러한 인자들은 각 지역에서 그 중요성에 차이가 있는데, 한반도 연안에서 해수면 고도는 열과 염의 변화, 기압의 변화에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (이석우, 1967).

해수면에 영향을 미치는 주요 기후요소 중 한 가지가 해수면 온도이다. Maldives 연안의 해수면과 해수면 온도의 변화에 대한 연구에서는 해수면 고도와 해수면 온도의 한 달, 두 달의 시간 지연 상관계수가 각각 +0.79, +0.78 로 높은 상관도를 밝힌 바 있다 (Singh *et al.*, 2001).

본 연구에서는 복합위성자료를 이용하여 1993년부터 2005년까지 13년 동안의 한반도 주변해역에서의 해수면 변화를 지역별로 조사하고자 한다. 그리고 해수면 온도는 시공간적으로 좋은 분해능과 정확성이 있고, 오랜 기간의 자료가 축적되어 한반도 주변해역에서의 해수면 고도 변화 경향 분석에 도움이 될 것으로 보아 해수면 고도 변화와 해수면 온도와의 상관성을 찾고자 한다.

2. 자료와 분석방법

본 연구에서는 해수면 변화를 연구하기 위한 해수면 고도 편차 (Sea Surface Height Anomaly, SSHA)자료로써 프랑스 AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic

data)에서 제공하는 DT-MSLA (Delayed Time-Maps of Sea Level Anomalies) 자료를 이용하였다. 이 자료는 T/P와 Jason-1, ERS, Envisat의 통합을 통하여 자료를 제공한다. T/P와 Jason-1은 시간 규모가 좋은 자료를 제공하고, ERS와 Envisat은 공간 규모가 좋은 자료를 제공하고 있으며, 이 자료들의 통합을 통하여 시공간적으로 더 좋은 자료로 제공된다. 본 연구에서 사용된 자료는 1993년 1월부터 2005년 12월까지 13년 동안의 자료이며 해수면 고도 자료의 수평 격자 간격은 $1/3^{\circ} \times 1/3^{\circ}$ 이다.

한반도는 삼면이 바다로 둘러싸여 있으며, 영역에 따라 수심, 해류 등의 환경적 차이가 존재한다. 이에 따른 해수면 고도의 변화 또한 다를 것이다. 본 연구에서는 한국해양연구원에서 제공하는 한국해양종합해양환경도를 기준으로 한반도 주변해역을 네 영역 (Fig. 1)으로 구분하여 각 영역에 대한 해수면 고도와 해수면 온도의 변화를 연구하였다.

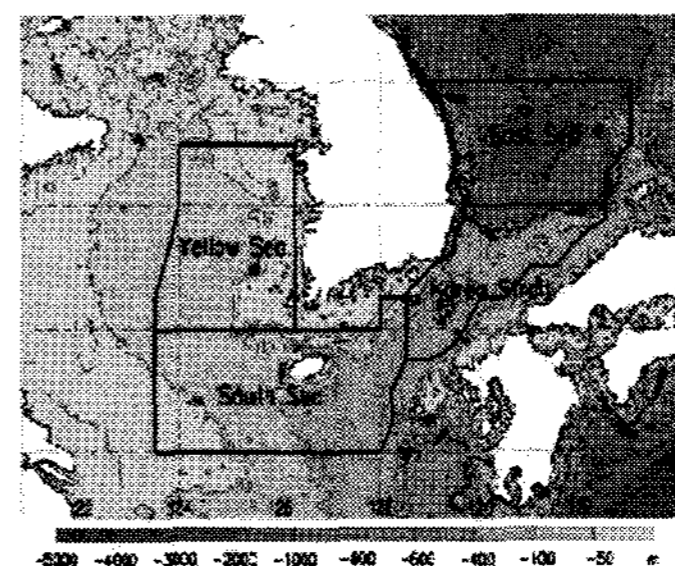


Fig. 1. Four regions (the East Sea, the Korea Strait, the Yellow Sea, and the South Sea) for performing this study draw boundary (solid line), and the submarine topography (shading).

3. 해수면 고도의 경년변화 분석

3.1 해수면 변동의 요인

해수면 고도의 변화 (h_{ssh})는 여러 가지 인자들에 의하여 영향을 받는데, 수식적으로 나타내면 아래와 같다.

$$h_{ssh} = h_{tide} + h_{ib} + h_{wind} + h_{current} + h_{steric} \quad (2)$$

각 인자들은 조석 (h_{tide}), 해면기압 (h_{ib}), 바람 (h_{wind}), 해류 ($h_{current}$), 스테릭 (h_{steric})을 의미하며, 대체로 제시된 5가지 인자들에 의해서 해수면 고도의 변화가 좌우된다. 앞서 제시한 바와 같이 한반도 주변 해역은 주로 열과 염의 변화, 기압의 변화에 의해 영향을 받는데, 여기서 해수면 온도의 변화는 열의 변화를 나타낼 수 있으며, 스테릭에 영향을 주는 주요 요인이다. 해수면 온도의 상승은 스테릭 항의 값을 상승시켜 해수면 고도의 상승을 야기하고, 반대로 온도의 하강은 해수면 고도의 하강을 야기한다.

3.2 해수면 고도의 경년변화

1993년부터 2005년까지 13년 동안 해수면 고도 편차의 경년변화를 각 영역에 따라 분석하였다 (Fig. 2). 경년변화에서는 전반적으로 해수면 고도가 상승하는 추세를 보여주고 있으며, 전 영역의 상승률은 3.89 mm yr^{-1} 이다. 각 영역별 상승률은 Table 1과 같다. 1993년과 1996년에 해수면 고도 편차가 이례적으로 작은 값을 기록하고 있다. 이와 관련하여 1993, 1995, 1997년 여름철에 Yamato basin에서 낮은 해수면 고도가 기록되었으며, 선박관측에서 Yamato basin가 위치한 37°N 주변의 수온약층이 평년보다 낮은 수온과 얇은 담수층에 의해서 높은 밀도를 나타내었다는 보고가 있다 (Hirose

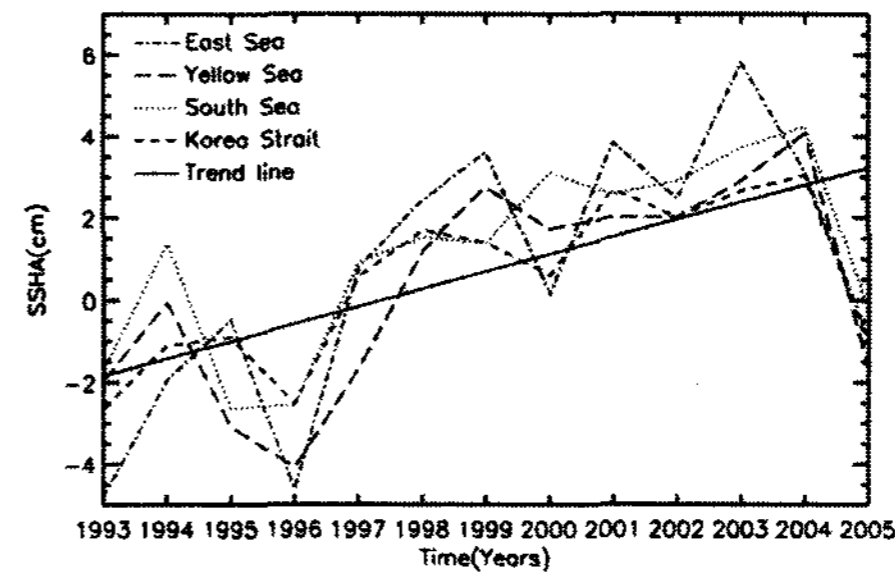


Fig. 2. Interannual variation of SSHA over the East Sea (dash dot line), the Yellow Sea (long dash line), the South Sea (dotted line), and the Korea Strait (dash line) during the period from 1993 to 2005, and total region trend (solid line).

and Ostrovskii, 2000). 특히, 한국해협과 동해는 쿠로시오 해류와 연관성이 높는데, 쿠로시오 해류가 강할 때 동해와 한국해협의 해수면 고도가 낮아지고, 해류가 약할 때 고도가 높아지는 특성을 보인다 (Gordon and Giulivi, 2004).

1993년부터 2005년까지 13년 동안 해수면 고도 편차의 계절별 변화를 각 영역에 따라 분석하였다 (Fig. 3). 전반적으로 해수면 고도 편차는 가을에 가장 높은 값을 나타내고 있다. 전 영역에서의 상승률은 Table 2와 같다. 이를 통해서 한반도에 강수량이 집중되는 여름과 가을에 해수면 상승폭이 크다는 것을 알 수 있으며, 태풍이 내습할 때에나 폭풍우가 칠 때에는 연안지대나 저지대에 침수, 홍수 등이 더욱 빈번하게 발생할 수 있다.

Table 1. Results of interannual variation trend analysis performed on SSHA (Unit: mm yr^{-1}).

Region	Trend	Region	Trend
East Sea	5.04	South Sea	3.55
Yellow Sea	3.70	Korea Strait	3.10
Total region	3.89		

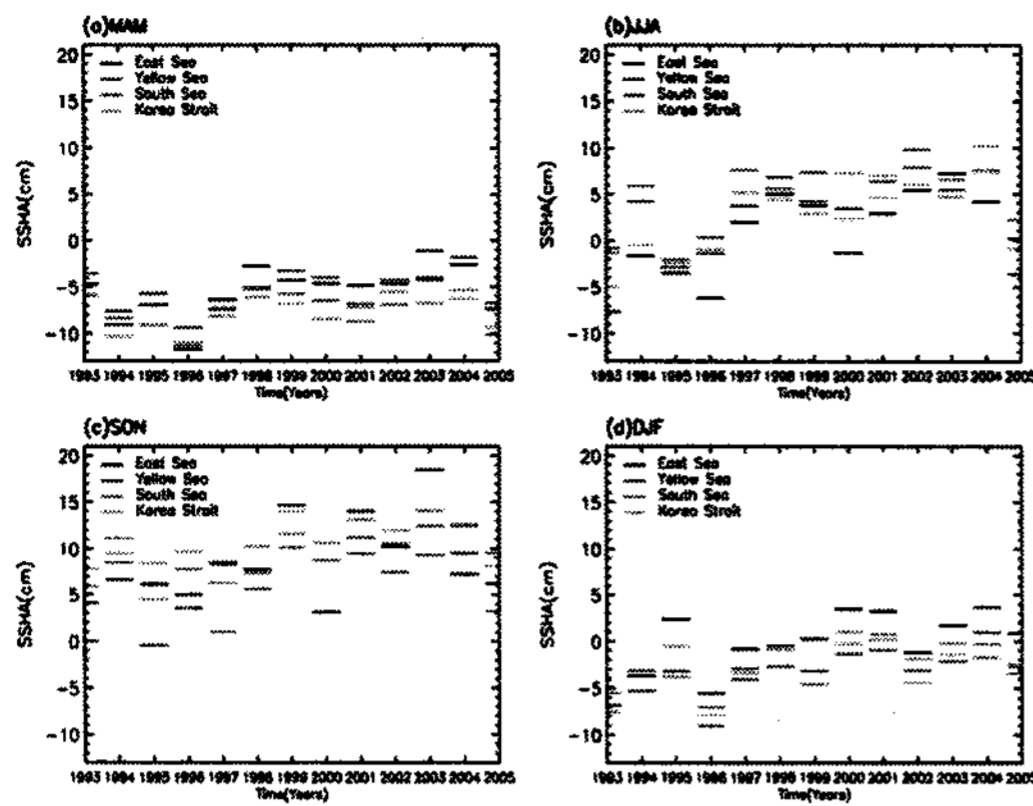


Fig. 3. Seasonal variation of SSHA over the East Sea, the Yellow Sea, the South Sea, the Korea Strait in (a) MAM, (b) JJA, (c) SON, and (d) DJF during the period from 1993 to 2005.

4. 연주기 모드와 반년 주기 모드의 분석

해수면 고도와 해수면 온도의 변화 사이에 상관성을 이해하기 위하여 푸리에 조화분석을 수행하였다. 분석에 사용된 수식은 다음과 같다.

$$X(t) = A_0 + A(n) \cos\left[\frac{2\pi n}{T}(t - \theta(n))\right] \quad (3)$$

T 는 주기이고, n 은 파수, A_0 는 시간 평균된 진폭, $A(n)$ 은 푸리에 조화분석의 사인, 코사인 함수에서의 진폭을 나타내며

Table 2. Results of seasonal variation trend analysis performed on SSHA (Unit: mm yr⁻¹).

	Spring (MAM)	Summer (JJA)	Autumn (SON)	Winter (DJF)
East Sea	2.53	6.48	5.73	5.41
Yellow Sea	2.35	4.40	3.62	4.41
South Sea	0.99	5.42	4.19	3.61
Korea Strait	1.18	5.67	2.82	2.75
Total region	1.78	5.46	4.19	4.14

$\theta(n)$ 은 위상의 값을 나타낸다.

한반도 연안에서 일 년 주기의 해수면 진폭이 약 6 ~ 12 cm이다 (Fig. 4a). 영역별로 살펴보면, 한국해협이 10 ~ 12 cm 정도로 한반도 연안에서 진폭이 가장 큰 지역이고 동해의 진폭이 약 6 ~ 11 cm 정도이고 가장 작게 나타난다. 해수면이 최대가 되는 시기 (Fig. 4b)를 보면 황해가 8월부터 9월 초까지로 가장 빠르며, 동해는 대부분의 지역이 9월 말부터 10월 사이에 해수면이 최고점에 도달하고, 일부 지역은 11월이 되어서야 최대값을 이루는 지역도 있다. 한반도 연안에서 반년 주기 성분의 진폭은 대략 2 ~ 3.5 cm 정도인데 동해와 한국해협 북쪽에 일부 지역은 4 ~ 4.5 cm 정도로 다른 지역에 비해 상대적으로 큰 진폭을 가진다 (Fig. 4c). 해수면 고도의 반년 주기가 최대로 나타나는 기간은 보통 10 ~ 12월 사이로 황해와 남해 지역은 11월에서 12월 말까지 반

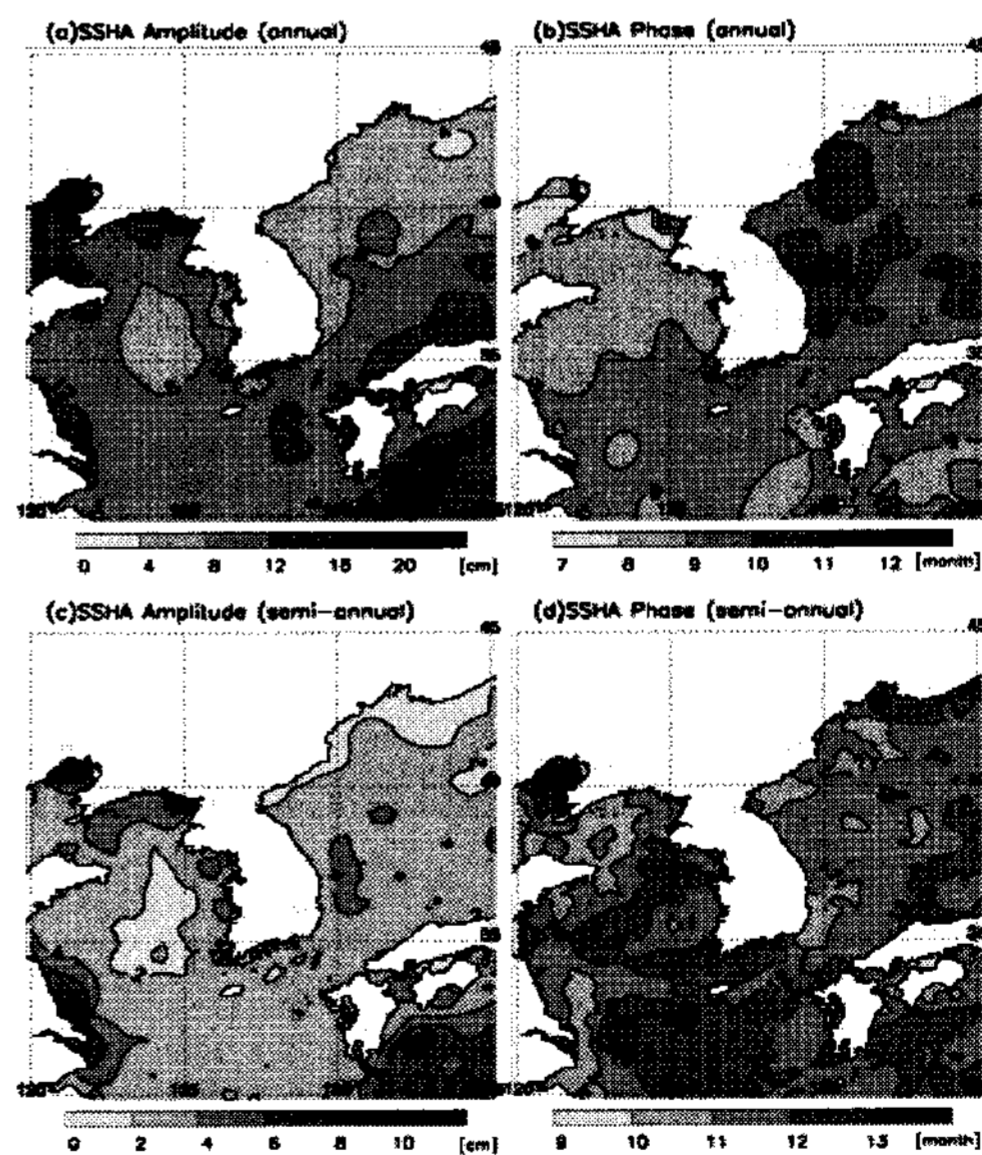


Fig. 4. Amplitude and phase of annual cycle (a, b) and semi-annual cycle (c, d) in sea surface height anomaly.

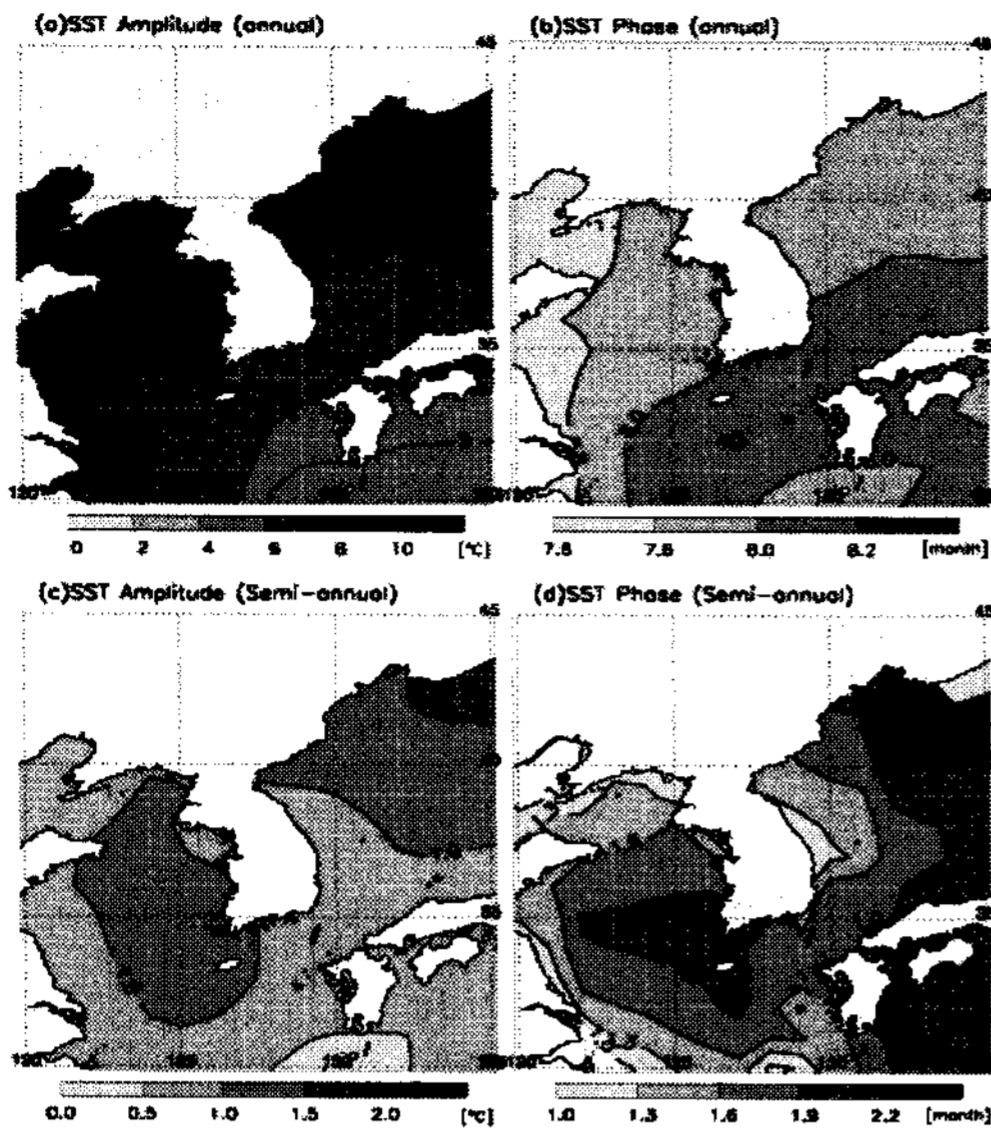


Fig. 5. Amplitude and phase of annual cycle (a, b) and semi-annual cycle (c, d) in sea surface temperature.

년 주기 성분에 최대가 나타나며 한국해협과 동해는 10월과 11월 사이에 극대가 나타난다 (Fig. 4d).

해수면 온도의 일 년 주기는 진폭이 6 ~ 10°C 정도로 위도에 나란하게 극에 가까워질수록 큰 진폭을 나타내는데, 황해가 8 ~ 10°C 정도로 가장 큰 값을 보인다 (Fig. 5a). 해수면 온도가 가장 높게 나타나는 시기는 남해와 한국해협은 8월, 황해와 동해는 7월로 나타난다 (Fig. 5b). 반년 주기는 진폭이 0.5 ~ 1.0°C 정도이며, 황해가 1.0°C 이상으로 가장 높게 나타난다 (Fig. 5c). 그리고 해수면 온도가 가장 높게 나타나는 시기는 대부분 지역이 1월이다 (Fig. 5d).

5. 해수면 고도와 해수면 온도의 상관관계

한반도 연안에서의 해수면 고도와 해수면 온도의 관계를 알아보기 위하여 각 영역에 대한 두 변수의 연변화를 분석하였

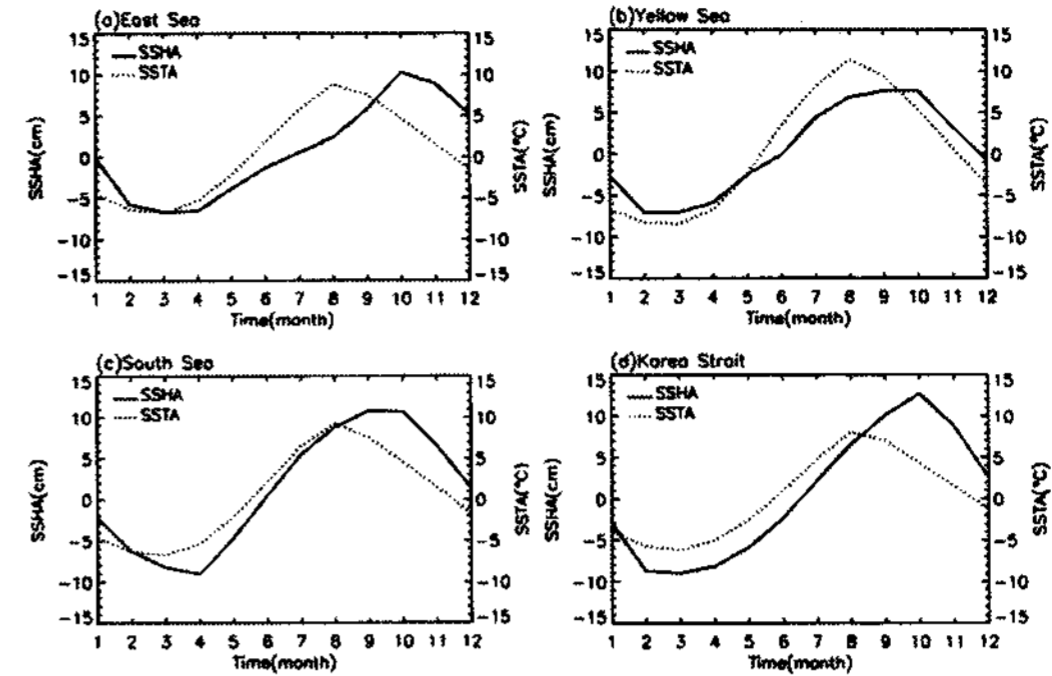


Fig. 6. Annual variation of SSHA (solid line) and SSTA (dotted line) at (a) the East Sea, (b) the Yellow Sea, (c) the South Sea, and (d) the Korea Strait.

다 (Fig. 6). 최대값을 나타내는 시기는 해수면 온도가 8월, 해수면 고도 편차는 10월로써 두 달의 시기 차이를 보이고 있으며 전반적으로 해수면 온도가 해수면 고도의 변화에 앞서고 있다.

시간지연에 따른 상관계수의 연변화를 살펴보기 위해서 각 영역별로 시간지연 상관계수를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 상관계수의 값은 월별로 해수면 고도에 0, 1, 2달의 시간지연을 줌으로써 해수면 온

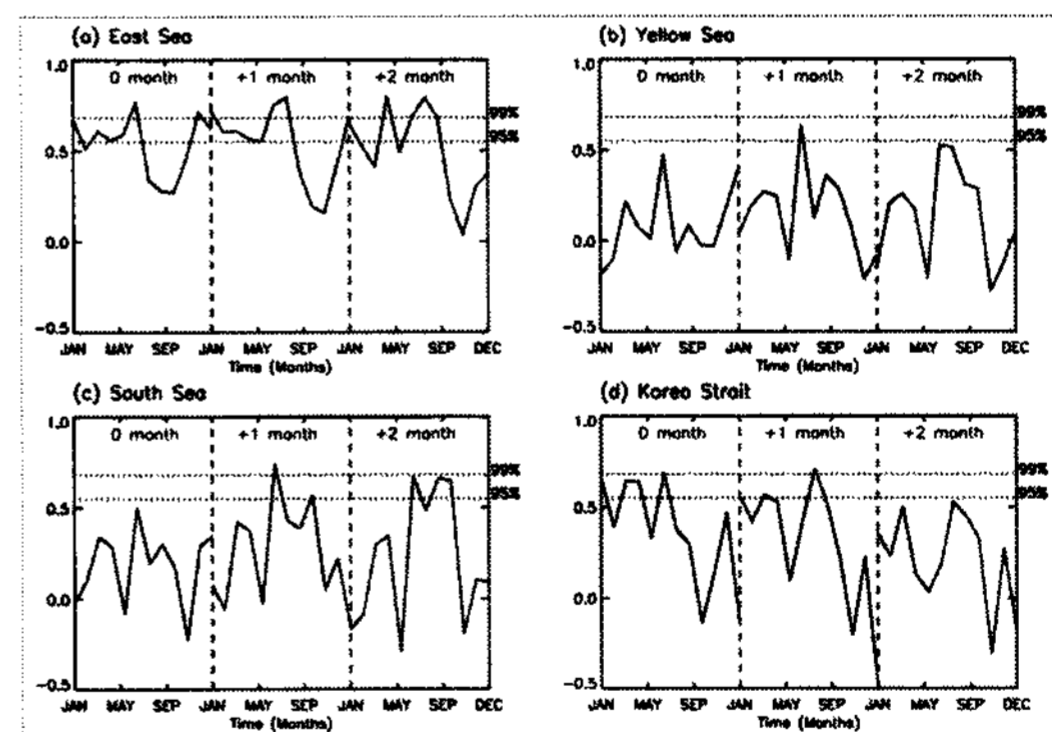


Fig. 7. Lag correlation coefficients between time series of SSHA and SSTA at (a) the East Sea, (b) the Yellow sea, (c) the South Sea, (d) the Korea Strait. 0 month, +1 month, +2 month denotes the month after the reference SSHA.

도가 해수면 고도에 앞서는 변화를 가질 때의 상관계수를 13년간 자료를 통하여 나타내었다. x축의 시간(월)은 해수면 고도를 기준으로 하였다. 해수면 온도와 상관성은 동해에서 가장 높은 값을 나타내고 있으며, 황해에서는 낮은 값을 보이고 있다. 대부분 영역에서 6월에 가장 높은 상관도를 보이고 있으며, 9 ~ 10월에 급격히 낮아지고 있다. 한국해협은 쿠로시오 해류와 가장 밀접한 관계가 있는 영역으로 이에 따른 해수면 고도의 변화 또한 빠르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이를 통해 한국해협의 해수면 고도 변화에 관한 연구에서 쿠로시오 해류를 통한 분석의 중요성을 제시할 수 있다.

6. 결론 및 고찰

한반도 연안의 해수면 고도의 변화와 해수면 온도와 상관성을 이해하기 위해서 한반도 연안을 네 개의 영역 (동해, 남해, 황해, 한국해협)으로 나누고 그 영역에 따른 변화를 분석하였다. 해수면 고도는 가을에 가장 높게 나타나는 반면, 계절별 변화에서는 여름에 가장 높은 상승률을 기록하고 있다. 해수면 고도와 해수면 온도는 일 년, 반 년 주기가 가장 뚜렷한데, 해수면 고도의 일 년 주기의 진폭은 한국해협이 가장 크게 나타난다. 해수면이 최대가 되는 시기는 황해가 가장 빠르게 나타나고, 동해가 가장 느리다. 반 년 주기는 동해와 한국해협에 걸쳐 큰 진폭이 나타난다. 또한 반 년 주기에서 해수면이 최대가 되는 시기는 한국해협이 가장 빠르고, 황해와 남해에 가장 느리게 나타난다. 해수면 고도와 해수면 온도의 상관도를 분석을 통하여 황해보다 동해와 남해에서 1달 / 2달의 시간지연에 따른 상관도가 높음을 확인하였다. 또한 6,

7월에 대부분 영역에서 상관도가 높게 나타남을 통해 한반도 주변 해역의 해수면 고도가 기압이나 바람보다 열적변화에 더 민감함을 알 수 있다. 본 연구의 결과를 통하여 황해에 비하여 남해와 동해 여름철 1달 / 2달 지연 상관성이 높아 여름철 쿠로시오 해류의 영향을 크게 받고 있음을 짐작할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 환경부의 “차세대핵심환경기술개발사업(Eco-technopia 21 project)”의 지원과 교육인적자원부의 ‘BK21 2단계 사업’의 지원으로 연구되었습니다.

참고문헌

- 이 석우, 1967. 한국연안의 월평균해면의 변화에 대하여, 한국해양학회지, 2: 24-33.
- Gordon, A.L. and C.F. Giulivi, 2004. Pacific decadal oscillation and sea level in the Japan/East sea, Deep-Sea Research I, 51: 653- 663.
- Hirose, N. and A.G. Ostrovskii, 2000. Quasi-biennial variability in the Japan Sea, J. Geophys. Res., 105 (C6): 14011-14027.
- IPCC, 2001a. Climate Change, 2001. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge Univ. Press., 1032pp.
- Singh, O.P., T.M.A. Khan, F. Aktar and M.A. Sarker, 2001. Recent Sea Level and Sea surface Temperature Changes Along the Maldives Coast, Marine Geodesy, 24: 209-218.