

위성자료(NOAA, Topex/Poseidon)를 이용한 한반도 주변해역의 기후적 특성

윤 홍 주
여수대학교 해양시스템학부 해양공학과
(2001년 9월 24일 접수; 2001년 12월 12일 채택)

On Climatic Characteristics in the East Asian Seas by satellite data(NOAA, Topex/Poseidon)

Hong-Joo Yoon

Department of Ocean Engineering, Division of Ocean System, Yosun National University, Yosun 550-749, Korea
(Manuscript received 24 September, 2001; accepted 12 December, 2001)

Satellite data, with sea surface temperature(SST) by NOAA and sea level(SL) by Topex/poseidon, are used to estimate characteristics on the variations and correlations of SST and SL in the East Asian Seas from January 1993 through May 1998. We found that there are two climatic characteristics in the East Asian seas : the oceanic climate, the eastern sea of Japan, and the continental climate, the eastern sea of China, respectively. In the oceanic climate, the variations of SL have the high values in the main current of Kuroshio and the variations of SST have not the remarkable seasonal variations because of the continuous compensation of warm current by Kuroshio. In the continental climate, SL has high variations in the estuaries(the Yellow River, the Yangtze River) with the mixing the fresh water and the saline water in the coasts of continent and SST has highly the seasonal variations due to the climatic effect of continents. In the steric variations of summer, the eastern sea of Japan, the East China Sea and the western sea of Korea is increased the sea level about 10~20cm. But the Bohai bay in China have relatively the high values about 20~30cm due to the continental climate. Generally the trends of SST and SL increased during all periods. That is say, the slopes of SST and SL is presented 0.29°C/year and 0.84cm/year, respectively. The annual and semi-annual amplitudes have a remarkable variations in the western sea of Korea and the eastern sea of Japan. In the case of the annual peaks, there appeared mainly in the western sea of Korea and the eastern sea of Japan because of the remarkable variations of SL associated with Kuroshio. But in the case of the semi-annual peaks, there appeared in the eastern sea of Japan by the influence of current, and in the western sea of Korea by the influence of seasonal temperature, respectively. From our results, it should be believed that SST and SL gradually increase in the East Asian seas concerning to the global warming. So that, it should be requested to the international co-operation against to the change of the abnormal climate.

Key words : Satellite Oceanography, SST, SL, Oceanic and continental climate, El Niño

1. 서 론

해양은 지구 표면의 약 70% 이상을 차지하는 방

Corresponding Author; Hong-Joo Yoon, Dept. of Ocean Engineering, Division of Ocean System, Yosun Nat'l Univ., Yosun 550-749, Korea
Phone : +82-61-659-3153
E-mail : yoonhj@yosun.ac.kr

대한 열을 저장하는 열 저장소이며 해양순환을 통하여 기후조절 인자로서 기후계(climate system)와 밀접한 관계를 가진다. 해양은 해양-대기 상호간의 열 교환을 통한 지구의 온도 조절자로서 매우 중요한 역할을 담당한다.

최근 지구 온난화 현상과 연관되어 해양의 변화

가 기후계 전체에 어떠한 영향을 끼치는지에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 해양의 변화는 엘니뇨, 라니냐 등과 같은 이상기후 현상과 밀접한 상관성을 가지고 기후변화에 영향을 미친다. 또한 산업혁명 이후 지속적인 인류의 온실가스 배출 농도의 증가는 오늘날 환경오염과 함께 대기 온난화를 가중시키고 있다. 이러한 온난화 현상은 해면온도와 해수면의 증가를 가중시키고 있다. 특히 해수면은 기후변화의 장기적인 변동성을 파악할 수 있는 지수가 된다. 따라서 이에 대한 지구 규모적인 감시를 통하여 앞으로 기후변화의 변동성을 예측할 필요성 대두되고 있다¹⁾.

최근에는 위성을 이용하여 다양한 방법으로 세계 해양을 감시하고 있는데, 가장 효율적인 감시 수단 중의 하나가 해양 원격탐사 위성이다. NOAA/AVHRR data(해면온도 자료)와 Topex/Poseidon의 altimeter data(해수면 자료)들이 해양의 다양한 규모의 현상을 연구·조사하는데 대단히 유용하게 사용되고 있다²⁻⁸⁾.

본 연구의 목적은 세계 기후변화현상과 관련하여 한반도 주변해역을 중심으로 한 해면온도 및 해수면 변화와 이들의 상관성을 알아보고 한반도 주변해역의 지역적 기후변화특성을 파악하는데 있다. 첫째는 해양순환에 의해서 생기는 해수면의 운동과 흐름 그리고 둘째는 해면온도와 해수면의 계절 및 연변화의 변동양상을 파악하는 것이다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서 사용한 자료는 Topex/Poseidon의 해수면 자료와 NOAA/AVHRR의 해면온도자료이다. 해수면 자료는 프랑스 CNES의 AVISO^{9,10)}에서 제공한 MSLA¹¹⁾를 사용하였고, 해면온도자료는 NOAA MCSST(18Km×18Km, 1993년 1월~1998년 12월)를 사용하였다.

조사 대상지역은 한반도 주변해역을 중심으로 한 동아시아 전지역으로 설정하였는데(위도: 20°~50°N, 경도: 110°~150°E), 현재 기상청은 기상예보와 관련하여 이 지역을 중심으로 수치모델을 가동하므로 향후 본 연구의 결과를 이에 맞추기 위해서이다. 그리고 연구의 편의상 임의로 4개 소구역으로 나누어서 지역에 따른 그 특성들을 비교하였다. 즉, 한국 서해(평균 수심 44m)를 Area A으로, 한국 동해(수심 1000~4000m)를 Area B로, 일본 서해(수심 25~2000m)를 Area C로 그리고 일본 동해(수심 1000~6000m)를 Area D로 각각 나누어 해역별로 그 특성을 파악하였다

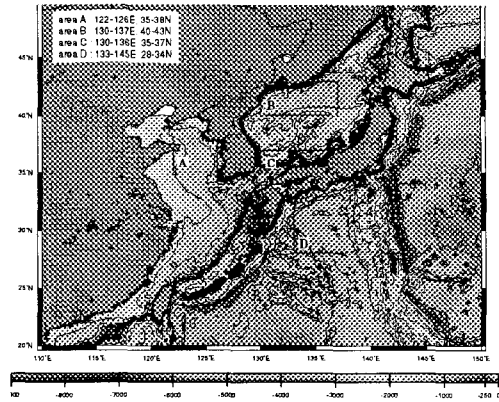


Fig. 1. Schematic map shows the East Asia region. Area A presents the Yellow Sea, Area B the East Sea, Area C the Japan Sea and Area D the North Pacific Sea, respectively.

자료 처리는 공간적으로 전 기간에 대한 RMS (Root-Mean-Square)와 계절별 anomaly를 계산하여 그 특성을 파악하였고 시간적으로 RMS 및 상관계수를 계산하고 Cross spectral density와 phase 계산을 통하여 주기별 특성을 알아보았다.

RMS는 해양 역학적 현상들 즉, 사행, 혼합난류, 와동류, 해수면 변화 등에의 현상들을 시·공간적으로 파악하고 변동 양상을 잘 이해할 수 있게 해준다. 그리고 Anomaly의 변화를 통하여 계절에 따른 해수면의 높낮이 특성과 전 기간에 걸친 변동폭의 크기를 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

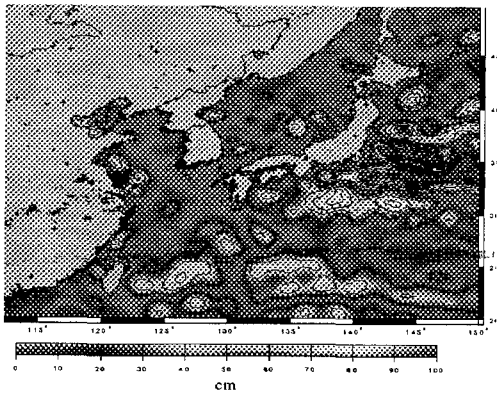
3.1. 해수면 변화(Sea Level Variability)

Fig. 2-a는 전 조사기간에 걸친 해수면 변화(sea level variability)를 나타낸다. 일본 동해안지역은 항시 쿠로시오 해류의 주 흐름이 지나가는 지역으로서 강한 해수면의 변화를 보이는 것을 잘 볼 수 있다. 이 때 변동폭이 30°~40°N 근처에서 50~100cm의 높은 값을 나타낸다. 이것은 강한 흐름(평균유속: 95cm/sec)을 가지는 쿠로시오 해류의 사행(meandering)과 함께 강한 와동류를 형성하기 때문이다. 일본 서해안지역은 쿠로시오 해류의 지류인 쓰시마난류가 지나가는 지역으로 해수면 변화가 30~70cm의 폭을 나타낸다. 이때 흐름이 해저지형과 관련하여 와동류를 형성한다. 한국 동해안지역의 동해만(홍남~원산 사이)은 북한한류가 지나가면서 30~50cm의 해수면 변화를 보이는데, 북한한류와 동해난류가 상충하면서 와동류를 형성한다. 그리고 중국 동해안 보하이(발해)만 내의 황하강 하구에는 중국 대륙연안수가 지나가면서 50~70cm

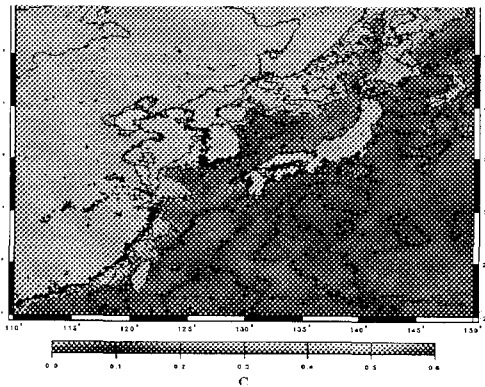
연구위성자료(NOAA, Topex/Poseidon)를 이용한 한반도 주변해역의 기후적 특성

의 해수면 변화를 보인다. 즉, 중국 대륙연안수와 황하강 담수가 상충하면서 와동류를 형성한다. 끝으로 중국 동해안 상해북부지역(양자강 하구)도 마찬가지로 중국 대륙연안수가 지나가는데, 80~90cm의 높은 해수면 변화를 보였다. 이 또한 중국대륙연안수와 양자강 담수가 상충하면서 와동류를 형성하기 때문이다.

성을 나타내는 것을 알 수 있다. 즉, 0.3~0.6°C 범위의 뚜렷한 해면온도의 변화가 나타나며, 특히 보하이만은 0.5°C 이상의 높은 변화를 나타내었다. 그리고 동해(일본해)~한국동해 중·남부지역~동지나해를 따른 남부지역은 해양성 기후와 대륙성 기후의 중간적인 상태인 완충지역으로 0.1~0.3°C 범위의 해면온도 변화를 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 2. Variations of (a) sea level and (b) sea surface temperature from 1993 to 1998.

3.2. 해면온도 변화(Sea Surface Temperature Variability)

Fig. 2 b는 조사지역에서의 전 기간에 걸친 해면온도 변화를 나타낸다. 일본열도를 따른 동부해안은 0.0~0.1°C의 변화 범위를 보이면서 뚜렷한 해면온도의 변화가 없음을 알 수 있다. 이것은 고온 고염인 쿠로시오 해류의 영구적인 흐름 때문인데 해양성 기후의 영향을 받는다는 것을 잘 알 수 있다. 반대로 소련동해안-한국동해 북부지역-한국서해-중국동해안을 경계로 북쪽지역은 대륙성 기후의 특

3.3. 해수면의 스테릭 변화(Steric variations)

해양에서의 해면 변화 h_{sl} 은 여러 가지 인자들에 의하여 영향을 받는데, 간단히 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$h_{sl} = h_{tide} + h_{ib} + h_{wind} + h_{current} + h_{steric} + h_{eustatic} + h_{geological}$$

여기서 h_{tide} 는 조석에 의한 영향, h_{ib} 는 해면기압에 의한 영향, h_{wind} 는 바람에 의한 영향, $h_{current}$ 는 해류에 의한 영향, h_{steric} 는 스테릭의 영향, $h_{eustatic}$ 는 해수의 용량에 의한 변화, 그리고 $h_{geological}$ 는 지질학적 변동에 의한 영향을 의미한다. 이 때 수세기에 걸쳐서 일어날 수 있는 장주기 성분의 영향들을 무시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_{sl} = h_{tide} + h_{ib} + h_{wind} + h_{current} + h_{steric}$$

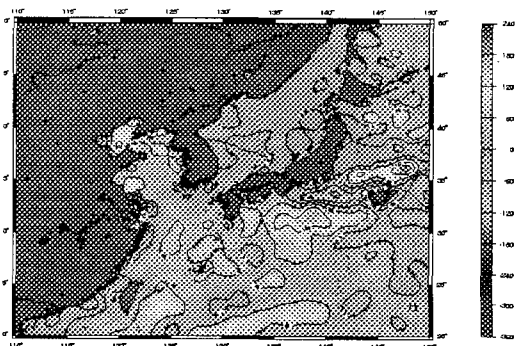
그리고 단주기 성분들을 보정하면,

$$h_{sl} = h_{current} + h_{steric}$$

이 된다. 해류의 흐름이 항상 일정하게 흐른다(쿠로시오 해류 = const.)고 하면 최종적으로 우리는 알고자하는 스테릭 변화를 다음과 같은 식으로 간단하게 나타낼 수 있다. 즉,

$$h_{sl} = h_{steric}$$

가 된다. 해수는 계절에 따른 온도나 밀도의 증가 혹은 감소로 인하여 단일 팽창 혹은 단일 압축을 받는데, 이때 계절 변화에 따른 해면의 상승과 하강을 계절변화에 의한 스테릭 변화라고 한다.



(a)

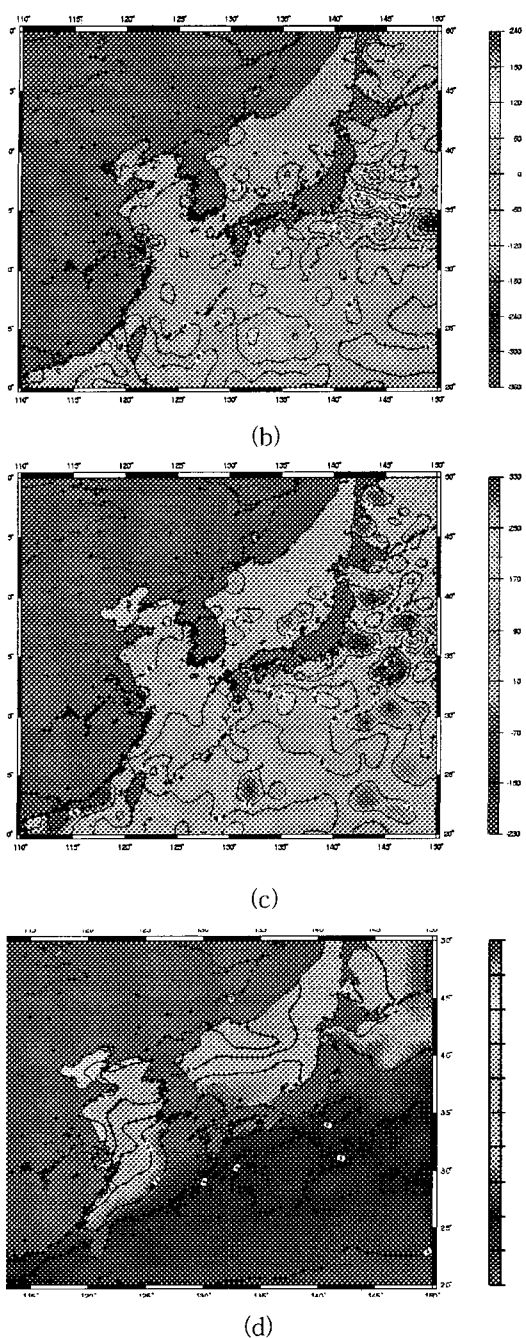


Fig. 3. Sea level anomaly in (a) Summer, (b) Winter and (c) Summer-Winter, and SST anomaly in (d) Summer-Winter.

Fig. 3 a는 여름(5, 6, 7월)의 해수면 편차(sea level anomaly)를 나타낸다. 대체로 전 해역이 +anomaly값(10~20cm)을 보인다. 한편 Fig. 3 b는 겨울(11, 12, 1월)의 해수면 편차를 나타낸다. 이 때

쿠로시오 해류의 영향을 받는 지역만 +anomaly값(0~10cm)을 보이고 그 외 지역은 여름에 비해서 대체로 -anomaly값을 나타낸다. 스테릭 변화의 계절간의 차를 알기 위하여 여름에 대하여 겨울을 뺀 결과를 Fig. 3 c로 나타내었다. 전 조사지역에 걸쳐서 대체로 모두 +anomaly값을 보이는 것을 잘 알 수 있다. 즉, 일본 동해안의 쿠로시오 해류가 지나가는 지역, 동지나 해역 그리고 한국 서해지역들은 여름철 쿠로시오 해류의 증가된 열 수송과 관련하여 10~20cm 범위의 값을, 중국 보하이만 지역은 여름철 대륙성 기후의 강한 복사열과 관련하여 20~30cm 범위의 값을 각각 보였다. 또한 해수면온도의 계절편차를 보면, 해양지역에서 대륙지역으로 감에 따라 편차 값들이 증가하고 이때 발해만 근처에서는 18°C 이상의 높은 계절편차를 나타낸다.

3.4. 해면온도와 해수면의 시간별 변화와 상관계수

해면온도(sea surface temperature, SST)와 해수면(sea level anomaly, SLA)의 연간 변화 추이를 알기 위하여 전 지역에 대하여 평균한 값을 시간별로 나타내고 그리고 두 값의 상관계수를 Fig. 4에 나타내었다.

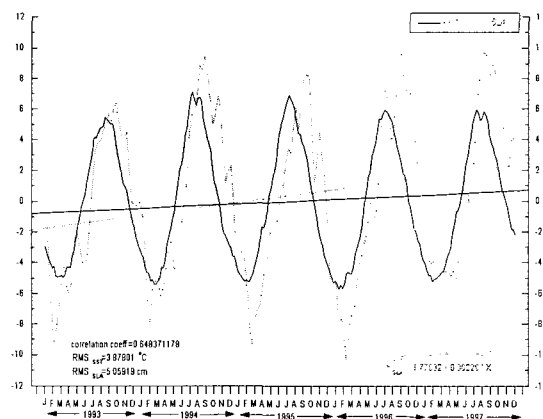


Fig. 4. Trends of mean sea level anomaly and sea surface temperature anomaly from 1993 to 1998.

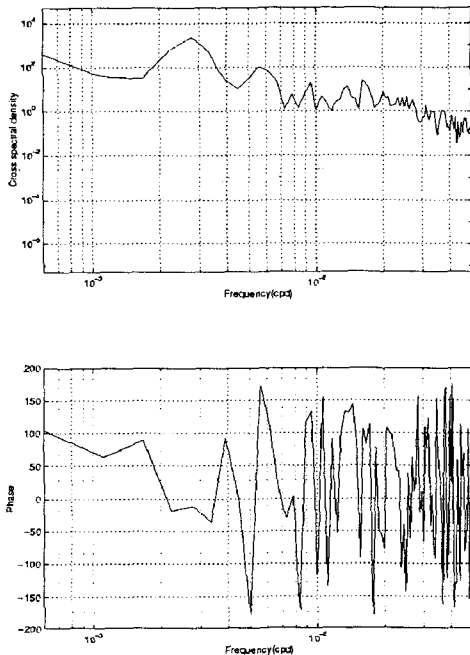
해면온도와 해수면 모두 뚜렷한 계절적 변화를 보였다. 두 값의 상관계수는 65%를, 해수온도의 변화(RMS_{SST})는 3.9°C를, 해수면의 변화(RMS_{SLA})는 5.1cm를 각각 나타내었다. 여기서 해수면의 변화가 해수온도의 변화보다 그 변화폭이 상대적으로 큰 것은 쿠로시오 해류의 흐름과 관계를 가지기 때문이다. 그리고 해수면의 최대 peak간의 시간차는 약 1~1.5개월로 나타난다. 전 조사기간에 걸쳐서 두

연구위성자료(NOAA, Topex/Poseidon)를 이용한 한반도 주변해역의 기후적 특성

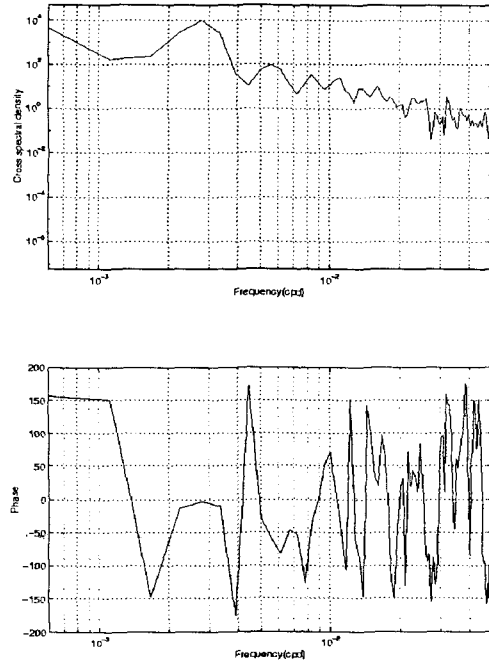
성분 모두 기온기가 증가 추세를 보이는 것으로 드러났다. 즉, 해수온도에 관해서 $Y_{SST} = -0.75 + 0.0008X$ ($0.29^{\circ}\text{C}/\text{year}$)를, 해수면과 관해서는 $Y_{SLA} = -1.78 + 0.0023X$ ($0.84\text{cm}/\text{year}$)를 각각 보인다. 특히 해수면은 1994년 12월 중순을 기점으로 해수온도에 비해 상대적으로 해수면 변동이 더 커지는 현상이 나타났다. 이것은 지구 온난화와 관련하여 해수온도 및 해수면이 지속적으로 증가하는 양상을 보인다는 것을 의미한다.

Fig. 1에서 임의로 나눈 4개 지역 각각에 대한 SST 및 SLA의 평균값의 변화들은 Fig.4의 전지역 평균값과 마찬가지로 모두 뚜렷한 계절적 변화를 보인다. 그러나 두 자료간의 상관관계 값과 해면변화의 값은 A지역→B지역→C지역→D지역으로 감에 따라 값이 높게 나타난다. 이것은 쿠로시오 해류 흐름의 강도와 밀접한 관계를 가지기 때문이다. 그리고 해수면 온도의 변화 값은 A지역→B지역→C지역→D지역으로 감에 따라 값이 낮게 나타난다. 즉, 대륙성 기후의 영향(계절적 해면온도의 교차가 큼)에서 해양성 기후의 영향(계절적 해면온도의 교차가 적음)을 받는다는 것을 의미한다.

3.5. 주기에 따른 에너지 분포(Cross Spectral Density)와 위상(Phase)



(a)



(b)

Fig. 5. Cross spectrum density and phase in (a) the Yellow Sea and (b) the North Pacific Sea.

Fig. 5는 한반도 주변해역에서 대표적으로 대륙성 기후(A지역; 한국 서해) 및 해양성 기후(D지역; 일본동해)의 특성을 갖는 두 지역에 대한 에너지 분포와 위상을 보여준다. 에너지 분포에서 A지역과 D지역은 둘 다 모두 일년주기 성분(360일)과 반년주기 성분(180일)에서 뚜렷한 peak를 가진다. 또한 전주기에 걸쳐서 D지역이 상대적으로 높은 에너지 값을 보이는데, 이것은 쿠로시오 해류의 강한 변동성과 관련된다. 여기서 위상은 '+'의 부호를 나타내면 해면온도의 변동성이 우세한 것을, 반대로 '-'의 부호를 나타내면 해수면의 변동성이 우세한 것을 의미한다. 일년주기에 대해서는 두 지역 모두 '-'값을 보이므로 해수면 변동이 항상 일어난다는 것을 말한다. 그러나 반년주기에서는 두 지역이 서로 반대의 부호를 보이는 것을 잘 알 수 있다. 즉, A지역의 변동성은 '+'값으로서 해류 흐름의 영향에 의한 것보다는 온도의 영향에 의한 것이 우세하다는 것을 알 수 있다. 반대로 B지역의 변동성은 '-'값으로 해류 흐름의 영향이 계절적 온도의 영향보다 크다는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 연구의 결과로부터 우리가 알 수 있는 것은

한반도를 중심으로 두 가지 기후학적인 특성이 뚜렷이 나타나는데, 즉 해양성 기후와 대륙성 기후가 각각 나타난다. 해양성 기후는 일본 동해안지역으로 해수면 변화는 쿠로시오 해류가 지나가는 곳을 중심으로 높은 변화 값을 보였고, 해면온도 변화는 난류인 쿠로시오 해류의 지속적인 보상으로 인하여 계절에 따른 변화가 뚜렷하지 않았다. 대륙성 기후의 특성이 강한 중국 동해안지역에서의 해수면 변화는 주로 중국 대륙연안수가 해안을 따라 남하하면서 황하강과 양자강의 담수유출지역의 흐름과 만나면서 높게 나타나고 해면온도는 대륙성 기후에 기인하는 계절적 변화가 크게 나타났다.

여름철의 해수면 증가를 보면, 일본동해안지역, 동지나 해역, 한국서해지역은 쿠로시오 해류의 증가된 열 수송에 의하여 10~20cm의 증가된 값을 보인다. 그러나 중국 보하이만(발해만)의 경우는 대륙성 기후에 의한 강한 복사열 때문에 상대적으로 높은 범위인 20~30cm의 값을 보였다.

전 조사기간에 걸쳐서 해면온도와 해수면이 증가하는 경향을 나타낸다. 이것은 기후변화와 관련된 지구 온난화의 결과로 보여진다. 해면온도는 연간 0.29°C의 증가를 그리고 해수면은 연간 0.84cm 씩 증가하는 것으로 조사되었다.

한국서해와 일본동해는 모두 일년주기 및 반년주기 진폭의 뚜렷한 변동성을 보였다. 일년주기의 경우는 쿠로시오 해류와 관련된 해수면의 변동성이 우세하기 때문인데 주로 한국서해와 일본동해에서 나타난다. 반면 반년주기의 경우에는 해류흐름의 영향이 우세한 일본동해지역에서 그리고 계절적 온도의 영향이 우세한 한국 서해지역에서 큰 peak가 뚜렷이 나타난다.

향후 계획으로 한반도지역의 해면온도 및 해수면 변동은 북태평양지역의 기후변화와 연관하여 엘니뇨/라니냐와는 어떠한 관계를 가지며, 이러한 것들이 직접적인지 아니면 간접적인지에 주안점을 두고 연구할 것이다. 현재의 여러 가지 결과들을 볼 때, 적도 동태평양의 페루부근에서 약 10~20cm의 높은 해면 높이를 나타내는 때인 엘니뇨가 발생하는 해에는 일본 동부해안의 쿠로시오 해류가 지나가는 지역에서도 동시에 같은 정도의 높은 해수면 높이를 나타내는 것으로 보아 우리나라 주변해역에서 어떠한 형태로든 영향을 미칠 것으로 사료된다. 그리고 한반도지역의 대기압력에 대한 해수면의 반응이 어떠한 것인가에 대해서는 대기력(atmospheric force)에 의한 지속적인 load가 해수면 변화에도 직접적인 어떤 영향을 미칠 것이다. 이것은 해양-대기기간의 상호작용 및 반응과 관련하여 중요한 의미

를 가지고 있다. 마지막으로 한반도지역의 현장해수면과 위성해수면간 상호비교 및 검증을 통한 위성해수면자료의 범용화를 위한 알고리즘 개발은 어떻게 할 것인가 인데, 아직까지 우리나라 특성에 맞는 기술이 개발되어 있지 않은 상태이다. 또한 범용화는 앞으로 이 분야와 관련되는 여러 연구에 유용하게 이용되고 모델의 초기화 자료로도 유용하게 사용되어 질 수 있다.

현재 한반도 주변지역의 해수면과 해면온도가 상승하고 있는 결과가 나온 만큼 기후변화와 이상기후 변화와 관련되는 기후온난화의 현상을 기정 사실로 받아 들여져야 할 것이다. 즉, 전 지구적인 문제인 온난화 현상이 이제는 다른 나라의 문제가 아니라 우리나라의 문제라는 것을 인식하고 범국가적이고 국제적인 대응방안을 위한 대책이 강구되어져야 한다고 본다. 따라서 해양과 기후변화라는 주제 하에 국가적으로 주도하는 조직이 구성되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) Barnett, T. P., 1984, The estimation of global sea level change: A problem of uniqueness. *J. Geophys. Res.*, 89: 7870-7988.
- 2) Bernstein, R. L., Born, G. H., and Whritner, R. H., 1982, Seasat altimeter determination of ocean current variability. *J. Geophys. Res.*, 87: 3261-3268.
- 3) Rapp, R. H., Wang, Y. M., Pavlis, N. K., 1991, High resolution gravity models combining terrestrial and satellite data, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, USA.
- 4) Rapp, R. H., Wang, Y. M., 1992, Geoid Undulation Difference Between Geopotential Models, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, USA.
- 5) Rapp, R. H., 1992, Computation and Accuracy of Global Undulation Models, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, USA.
- 6) Le Provost, C., Genco, M., L., Lyard, F., 1994, Spectroscopy of the world ocean tides from a finite element hydrodynamic model, *J. of Geophys. Res.*, TOPEX/ POSEIDON Special Issue.
- 7) Mazzoni, P., 1993, Le contenu de la mesure altimétrique, *Memoire de DEA MMGE, Uni-*

연구위성자료(NOAA, Topex/Poseidon)를 이용한 한반도 주변해역의 기후적 특성

- rsite Joseph Fourier, Juin, 1993.
- 8) Yoon, H. J., 1997, La variation du niveau de la mer sur la region d'Amsterdam-rozet-erguelen au Sud de l'Ocean Indien, Memoire de these, Universite Joseph Fourier, Mai, 1997.
- 9) AVISO, 1994a, 'AVISO CD-ROM User Manual: Merged TOPEX/POSEIDON Products', AVI-NT-02-100-CN, Edition 2.1.
- 10) AVISO, 1994b, 'AVISO User Handbook Merged TOPEX/POSEIDON Products', AVI-NT-02-101-CN, Edition 2.1.
- 11) AVISO, 1999, 'T/P MSLA 1-5', Volume AVI-CLS00002.