

Article

동해지역 NOAA/AVHRR 고해상도 주평균 해수면 온도의 통계적 분석: 지역적 변동성과 엘니뇨/남방진동과의 관계성

권태영^{*1} · 이방용² · 이정순¹

¹강릉대학교 대기환경과학과
(210-702) 강원도 강릉시 지변동 123

²한국해양연구원 극지연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

Statistical Analysis of NOAA/AVHRR High Resolution Weekly SST in the East Sea: Regional Variability and Relationships with ENSO

Tae-Yong Kwon^{*1}, Bang Yong Lee², and Jeong-Soon Lee¹

¹*Department of Atmospheric and Environmental Sciences
Kangnung National University, Kangnung 210-702, Korea*

²*Polar Sciences Laboratory, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

Abstract : The characteristics of SST variability in the East Sea are analyzed using NOAA/AVHRR weekly SST data with about $0.18^\circ \times 0.18^\circ$ resolution (1981~2000) and reconstructed historical monthly SST data with $2^\circ \times 2^\circ$ resolution (1950~1998). The distinct feature of wintertime SST is high variability in the western and eastern parts of $38^\circ \sim 40^\circ \text{N}$ latitudinal band, which are the northern boundary of warm current in the East Sea during winter. However, summertime SST exhibits variability with similar magnitude in the entire region of the East Sea. The analysis of remote correlation also shows that SST in the East Sea is closely correlated with that in the region of Kuroshio in winter, but in summer is related with that in the western and eastern regions of the same latitudes. From these results it is postulated that the SST variability in the East Sea may be related with the variations of East Korean Warm Current and Tsushima Warm Current in winter, but in summer probably with the variations of atmospheric components. In the analysis of ENSO related SST anomaly, a significant negative correlation between SST anomalies in the East Sea and SST anomalies in the tropical Pacific is found in the months of August-October (ASO). The SST in the ASO period shows more significant cooling in El Niño events than warming in La Niña events. Also, the regional analysis shows by the Student's t-test that the negative SST anomalies in the El Niño events are more significant in the southwestern part of the East Sea.

Key words : 동해(East Sea), 해수면 온도(sea surface temperature), 엘니뇨/남방진동(El Niño/Southern Oscillation), NOAA/AVHRR.

1. 서 론

엘니뇨/남방진동(ENSO: El Niño/Southern Oscillation)

은 적도 태평양에서 가장 뚜렷하게 관측되는 대기와 해양의 상호작용을 포함하는 복잡한 현상이다. 이러한 현상은 비록 적도 태평양을 중심으로 나타나고 있으나 이와 관련된 기후학적 영향은 적도와 아주 먼 지역에서도 발견된다 (Angell 1981; Kiladis and Diaz 1989; Ropelewski and

*Corresponding author. E-mail : tykwon@knusun.kangnung.ac.kr

Halpert 1996). 특히 ENSO와 관련된 원거리 지역에서의 변화 가운데 잘 알려진 현상은 북태평양 대기 순환의 변화와 북태평양에 있어 관련된 해수면 온도(SST: Sea Surface Temperature)의 변화이다(Wallace and Gutzler 1981; Deser and Blackmon 1995). 흔히 이러한 현상을 “teleconnections”라 부른다(Bjerknes 1969; Wyrki 1973). 또한 Weare *et al.*(1976), Hsiung과 Newell(1983) 그리고 Pan과 Oort(1983)는 ENSO 현상이 중위도 북태평양 SST 분포의 변화와 밀접하게 연관되어 있다고 보고하였다. 그리고 중위도 북태평양의 서쪽 가장자리에 인접하고 있는 동해 지역에 있어서도 ENSO와 관련된 연안 표층 수온과 SST의 변화가 보고되었다(나영남 1988; Park and Oh 2000, Hong *et al.* 2001). 최근에는 적도 태평양의 ENSO와 중위도 북태평양의 SST 사이의 관계성을 이해하기 위하여 “atmospheric bridge”라는 개념이 제시되고 있다(Alexander 1990; Lau and Nath 1996, 2001; Klein *et al.* 1999). 즉 ENSO와 관련된 적도 태평양의 SST 변화가 중위도 대기의 변화를 일으키고, 이러한 대기의 변화는 해양-대기 경계면에서 에너지와 운동량의 이동을 통하여 해양의 SST에 영향을 미치는 과정으로 이해되고 있다.

ENSO와 중위도 북태평양 SST 사이의 관계성은 다음과 같이 요약된다. ENSO를 묘사하는 대표적인 물리량 가운데 하나인 적도 중·동부 태평양의 SST와 중위도 북태평양 지역의 SST 사이의 상관관계는 1월과 2월에 최대로 나타난다. 그리고 1월과 2월의 적도 태평양 SST의 변화에 대한 중위도 북태평양 SST의 반응은 1~2개월 지연되어 나타난다. 특히 북반구의 겨울철에 있어 적도 태평양 SST의 상승은 북태평양 중앙지역(35°~50°N 영역)에서 SST 하강, 북미의 서부 해안 지역과 일본 남부 해양에서는 SST 상승과 관련되어 있음이 발견된다(Namias and Cayan 1981; Wallace *et al.* 1990; Deser and Blackmon 1995). 또한 이러한 관련성을 설명하기 위하여 관측자료와 모델의 자료의 분석에서는 “atmospheric bridge”라는 물리적 메커니즘과 관련된 다수의 연구 결과들이 보고되고 있다(Cayan 1992; Lau and Nath 1996, 2001). 이들 연구 결과는 ENSO와 관련된 겨울철 중위도 북태평양 SST 분포의 변화가 해양-대기 경계면에서 잠열과 미열의 열속(heat flux) 분포의 변화와 일치하고 있음을 보여준다. 이러한 지표면 열속의 변화는 북태평양 중앙지역(35°~50°N 영역)에서 주로 평균 풍속의 증가에 기인하며, 북미의 서부 해안 지역에서는 대기의 이류에 의한 온도와 습도의 변화에 기인한다고 설명한다. 따라서 이들 연구는 북반구의 겨울철 ENSO와 연관된 중위도 북태평양 SST의 변화가 대기 순환의 변화와 밀접하게 연관되어 있음을 제시하고 있다.

한편 ENSO는 남중국해(2.5°~22.5°N, 100°~120°E)의 SST 변화와도 밀접하게 연관되어 있다. ENSO와 관련된

적도 태평양 SST와 남중국해 SST 사이에는 뚜렷한 양의 상관관계가 존재하며, 남중국해 SST 변화는 적도 태평양 SST 변화에 대하여 5개월 지연되어 나타난다(Klein *et al.* 1999; Lanzante 1996). Klein *et al.*(1999)은 이러한 ENSO와 연관된 남중국해의 SST 변화를 설명하기 위하여 ENSO와 관련된 구름량, 흡수된 태양복사 에너지, 증발량, 그리고 상층 대류권 상대습도 등을 분석하였다. 분석 결과에 의하면, 엘니노 기간에는 남중국해 부근의 대기 순환에서 침강 현상이 보다 늘어나고; 이러한 대기 순환의 변화는 구름량의 감소를 일으키며; 구름량의 감소는 흡수된 태양복사 에너지를 증가시키고; 비록 열적인 관성에 의해서 지연되지만 결과적으로 남중국해 SST의 상승으로 나타난다. 또한 ENSO와 관련된 남중국해 SST의 상승에는 지역적으로 대기 순환의 변화와 관련된 증발량의 감소도 상당한 역할을 한다고 보고하였다.

나영남(1988)은 엘니노와 연관된 동해 수온의 변화를 조사하기 위하여 한반도 주변 동해의 연안 표층 수온(SWT: Surface Water Temperature) 자료와 수온자료(hydrography 자료) 그리고 대한 해협 서수로의 용적 수송량 등을 분석하였다. 엘니노 기간에 동해 연안의 SWT는 몇몇 관측 지점에서 2월에 통계적으로 의미있는 증가를 보였고, 수온자료 또한 상층 100 m까지 대체적으로 평년보다 높은 온도를 보였다. 또한 동해의 열량 공급원 가운데 하나인 대마 난류의 용적 수송량(대한 해협의 용적 수송량)도 몇몇 엘니노 기간에 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 결과로부터 ENSO와 연관된 동해 수온과 동해 해류의 변화 사이에 관련 가능성을 예상할 수 있다. Park and Oh (2000)는 2°×2° 해상도의 COADS(Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) 월평균 SST 자료의 분석에서 동해 남부 지역의 SST와 적도 중·동부 태평양의 SST 사이에 관련성이 있다고 보고하였다. Hong *et al.*(2001)은 ENSO와 연관된 동해 SST의 변화를 조사하기 위하여 일본 기상청에서 수집한 동해 지역의 1°×1° 해상도의 49년(1950~1998) 월평균 SST 자료를 분석하였다. 이 분석에서 엘니노 기간에 있어 여름철 동해 SST는 평년보다 낮고, 반면 겨울철 동해 SST는 평년보다 높게 나타나며, 라니냐 기간에 있어 동해 SST의 변화는 엘니노 기간에 발견된 SST 변화 경향과 전반적으로 반대 경향을 보인다.

이 연구의 목적은 동해 SST의 지역적 변동성과 ENSO 관련성을 약 15 km 크기의 공간규모에서 그리고 가공되지 않은 위성 관측 값에 가까운 SST 자료를 이용하여 자세하게 조사하는 것이다. 이를 위하여 이 연구에서는 기존 연구와 다르게 비록 관측기간은 짧지만 높은 시간적·공간적 해상도를 제공하는 위성 관측 SST 자료를 사용하였다. 이 자료는 0.18°×0.18° 해상도의 약 19년 동안의 NOAA/AVHRR 주평균 SST 자료이다. 특히 이 연구에서

는 동해 지역의 구름에 기인하는 위성 관측 SST에 나타난 상당한 크기의 결측율을 고려하여 내삽과정을 통해서 계산된 자료를 가능한 배제하고 실제 관측된 자료를 사용하고자 노력하였다. 그리고 높은 해상도 자료를 사용함으로써 동해 지역이라는 비교적 좁은 해상에 나타나는 국지적 변동에 대한 분석을 시도하였다. 연구 결과에 대한 신뢰도를 얻기 위하여 다양한 통계 기법을 적용하였으며, 또한 EOFs(Empirical Orthogonal Functions)를 이용하여 재구성한 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 해상도의 49년 동안의 장기간 월평균 SST 자료의 분석 결과로 보완하였다. 다음 절에서 연구에 사용된 SST 자료를 설명하고 그리고 ENSO 현상을 정량적으로 정의하는데 사용된 적도 태평양의 SST 편차에 대하여 설명한다. 그리고 3절에서는 동해의 울릉도 연안 SWT와 NOAA/AVHRR 주평균 SST의 비교를 통하여 연구에 사용된 SST 자료를 검정하고, 그리고 주평균 SST 자료로부터 편차 값을 추정하는 과정을 묘사한다. 다음 4절에서는 동해 SST의 지역적·시간적 변동성을 조사하고 주변 지역 SST와의 관계성을 조사한다. 5절에서는 ENSO와 동해 SST 사이의 통계적 관계성을 조사한다. 끝으로 6절에서 이 연구에서 얻어진 분석결과에 대한 결론이 논의된다.

2. 자료 및 방법

이 연구에 사용한 NOAA/AVHRR 주평균 SST 자료는 JPL PO.DAAC(Jet Propulsion Laboratory의 Physical Oceanography Distributed Active Archive Center)에서 네트워크(<http://podaac.jpl.nasa.gov>)을 통하여 제공하는 $0.1757812^{\circ} \times 0.1757812^{\circ}$ 해상도의 약 19년(1981년 11월 11일~2000년 9월 6일) 동안의 전구($60^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{S}$) 자료이다. 이 자료는 실제적으로 8일 동안의 SST 평균값이며, 평균을 취하는 8일 기간이 다음 기간과 하루가 겹치게 되어 매 주일간격으로 그리고 낮과 밤으로 분리되어 제공되는데, 두 종류의 SST 자료로 구성되어 있다. 하나는 단지 관측자료가 있는 격자에서의 주평균 SST 값이고, 다른 하나는 내삽과정을 통하여 관측 자료가 없는 격자(결측 격자)를 포함하는 모든 격자의 주평균 SST 값이다. NOAA/NESDIS Global Retrieval Tapes로부터 SST 값을 받아 격자 평균값을 구하고 반복적인 내삽을 통하여 결측 격자를 채우는 과정은 UM/RSMAS(University of Miami, Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Sciences)에 의해서 수행된다. 이에 사용된 NOAA/AVHRR SST 자료는 NOAA-7, -9, -11, -14 위성에 탑재된 동일한 5 채널 AVHRR 기기로부터 수집된다. 이들 위성은 모두 태양동주기 궤도 위성이며, 적도 통과 시각이 서로 비슷한(13:30 혹은 14:30 LST) 오후 위성이다. 따라서 사용된 NOAA/AVHRR SST 자료는 낮과 밤 각각에 있어 비슷한 시간대(낮의 경우 대

략 13:30 혹은 14:30 LST; 밤의 경우 대략 1:30 혹은 2:30 LST)의 관측 값이며, 주평균 SST도 밤과 낮 기간에 대하여 독립적으로 계산된다. NOAA/AVHRR SST는 선박 관측 값과 비교에서 bias가 $0.3 \sim 0.4^{\circ}\text{C}$ (위성 SST가 선박 관측 값보다 낮다)이고 표준편차가 $0.5 \sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 인 정확도를 보인다(McClain *et al.* 1985).

또한 동해 SST의 장기간 변화와 주변 지역 SST와의 관계성을 조사하기 위하여 장기간 월평균 SST 자료(Reconstructed Historical Monthly SST Data)를 사용하였다. 이 자료는 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 해상도의 49년(1950~1998) 동안의 월평균 SST 값으로서, 이를 위하여 먼저 Reynolds와 Smith(1994)의 최적 내삽 분석자료로부터 공간적·시간적 EOFs(Empirical Orthogonal Functions)를 계산하고 그리고 EOFs의 주된 모드를 이용하여 월평균 SST 자료를 재구성하였다(Smith *et al.* 1996). 이 분석에 사용된 자료는 1950년부터 1981년까지는 선박과 부이의 직접 관측자료, 1981년부터 1998년까지는 NOAA/AVHRR SST 자료와 직접 관측자료이다. 장기간 월평균 SST 자료도 JPL PO.DAAC을 통하여 수집하였다.

ENSO 현상은 흔히 대기 성분과 해양 성분으로 나누어 묘사되는데, 각 성분의 정량적인 세기 혹은 강도는 SOI(Southern Oscillation Index)와 적도 태평양 SST의 변화로 표현된다. SOI는 동반구(타이티)와 서반구(다윈) 사이의 월평균 표면 기압의 차이에 바탕을 두고 계산되며, 이 지수는 동부 적도 태평양과 인도네시아-호주 지역의 기압에 나타나는 반비례 관계를 묘사한다. 그리고 ENSO와 관련된 적도 태평양 SST 변화의 특성은 주로 적도 태평양에 있어 동부 지역에서 나타나는 SST의 대규모 변화, 즉 SST의 편차로 표현된다. 이와 관련하여 Trenberth(1997)는 Niño 3.4 지역($5^{\circ}\text{N} \sim 5^{\circ}\text{S}$, $120^{\circ} \sim 170^{\circ}\text{W}$)의 SST 편차가 역사적으로 확인된 ENSO 현상과 잘 일치한다고 보고하였다. 따라서 이 연구에서는 ENSO 현상의 세기를 정량적으로 표현하기 위하여 Niño 3.4 지역의 SST 편차를 이용하였으며, Trenberth(1997)를 따라 SST 편차를 5개월 이동 평균하였을 때 연속적으로 6개월 이상이 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 보다 크거나 작을 때를 엘니뇨(클 때)와 라니냐(작을 때)로 정의하였다.

3. 자료의 검정과 SST 편차 계산을 위한 자료처리

NOAA/AVHRR 주평균 SST 자료의 검정

NOAA/AVHRR SST 자료로부터 고해상도 주평균 SST 자료를 생성하는 과정에서 가장 어려운 문제점 가운데 하나는 구름에 기인하는 결측 자료이다. 예를 들어 8일 동안의 SST 평균값이 실제적으로는 SST 관측 값이 존재하는 불과 몇 일 동안의 SST 평균값일 수 있다. 더욱이 내삽

과정을 통하여 생성된 주평균 SST 값은 주어진 격자 (0.1757812°×0.1757812°)의 실제 관측 값이 아니라 주변 격자의 관측 값을 바탕으로 추정된 값이므로 주평균 위성 SST 자료에는 상당한 오류가 있을 수 있다.

동해 지역 NOAA/AVHRR 주평균 SST 자료의 정확성을 조사하기 위하여, 먼저 국립수산진흥원에서 네트워크를 통하여 제공하는 한반도 주변의 약 40개 연안정지 해양관측 지점 중 하나인 울릉도 지점(37°29'00"N, 130°54'35"E)에 가장 근접한 격자에서 주평균 위성 SST(NOAA/AVHRR SST 관측자료가 존재하는 경우)와 대응되는 울릉도 연안의 8일 평균 SWT를 비교하였다. 울릉도 연안 SWT는 1952년부터 기록되어 있으나 부분적으로 상당한 결측 기간이 발견되는데, 이 연구에서는 약 18년(1981년 11월 11일~1999년 12월 31일) 동안의 SWT를 사용하였으며, 일부 결측 자료(6일 이하의 결측 자료)는 선형 내삽 과정을 통하여 보완하였다. 이 비교에서 동일한 SWT를 사용하여 낮과 밤 각각의 NOAA/AVHRR 주평균 SST 자료를 조사하였다. Fig. 1은 낮과 밤 각각의 주평균 위성 SST와 SWT의 차이 값에 대한 빈도 분포를 보여준다. 주평균 위성 SST의 bias와 RMSE(Root Mean Squared Error)는

낮의 경우 1.1 °C와 1.75 °C이고 밤의 경우 0.92 °C와 1.76 °C이며, 주평균 위성 SST가 전반적으로 SWT보다 높게 나타났다. 한편 Ahn et al.(2001)의 연구는 동아시아 지역의 GMS-5 위성자료로부터 추정된 18 km×18 km 해상도의 주평균 SST 자료에서 bias와 RMSE가 0.4 °C와 1.2 °C까지 향상될 수 있음을 보였다. 이러한 결과로부터 NOAA/AVHRR 주평균 SST 자료가 울릉도 연안 SWT와의 비교에서 비록 상당한 크기의 체계적인 오류를 보이거나, 차이값(주평균 위성 SST-SWT)의 표준편차는 GMS-5 주평균 SST의 값과 비슷하다는 것을 알 수 있다. 그러나 특별히 이 분석에서 사용한 주평균 SST 자료(울릉도에 가장 근접한 격자에서 NOAA/AVHRR SST 관측자료가 있는 경우)가 내삽 값을 포함하는 전체 주평균 SST 자료의 약 30 %(낮)와 16 %(밤)에 불과하다는 것에 주목할 필요가 있다.

한편, 동해 지역에서 NOAA/AVHRR의 SST 관측률을 조사하기 위하여 위성 관측자료가 있는 경우의 주평균 SST 격자와 내삽과정으로 계산된 주평균 SST 격자의 수를 비교하였다. 이 연구에서 동해 지역 전체는 35°~44°N 그리고 128°~140°E 사이의 해상으로 정의하였다. Fig. 2는 동해 지역에서 주어진 기간에 대하여 주평균 SST의 전체 자료에 대한 관측자료로부터 직접 계산된 주평균 SST 자료의 비율(%)을 보여준다. 주평균 SST 자료로부터 계산된 NOAA/AVHRR의 SST 관측률은 낮의 경우 평균 약 33 %이며 기간에 따라 0 %에서 98 %까지 커다란 변화를 보인다. 그리고 밤의 경우 평균이 약 14 %이며 80년대에 약 10 %이하에서 90년대 중·후반에는 약 30 %로 뚜렷한 증가 경향을 보인다. 위성의 SST 관측률은 구름량에 관련되어 있으며, 일반적으로 구름량이 적을수록 관측률이 높고 구름량이 많을수록 관측률이 낮게 나타날 것이다. 따라서 위성의 SST 관측률로부터 구름량을 추정하는 일도 가능하겠지만, NOAA/AVHRR의 SST 관측률에 있어 낮과 밤사이의 뚜렷한 차이 그리고 밤 동안의 매우 낮은 관측률과 뚜렷한 증가 추세를 구름량과 관련시켜 해석하기는 어려울 것이다. 오히려 이러한 차이는 낮과 밤에 적용되는 구름을 탐지하는 기법의 차이에 기인할 수 있을 것이다. 여기에서는 동해 지역에 있어 SST의 일변화가 크지 않다고 보고(Fig. 1 참조), NOAA/AVHRR의 낮과 밤 두 종류의 주평균 SST 자료 가운데 관측률이 높은 낮 동안의 주평균 SST 자료를 사용하였다.

그러나 낮 동안의 주평균 SST 자료 가운데 동해 지역에서 SST 관측자료로부터 직접 얻어진 SST 자료는 약 33 %에 불과하다. 따라서 이러한 자료의 부족을 보완하기 위해서 내삽과정으로 계산한 SST 자료를 사용할 필요가 있다. 이를 위하여 동해 지역에 있어 내삽과정으로 계산한 NOAA/AVHRR 주평균 SST 자료의 정확성을 조사하였다.

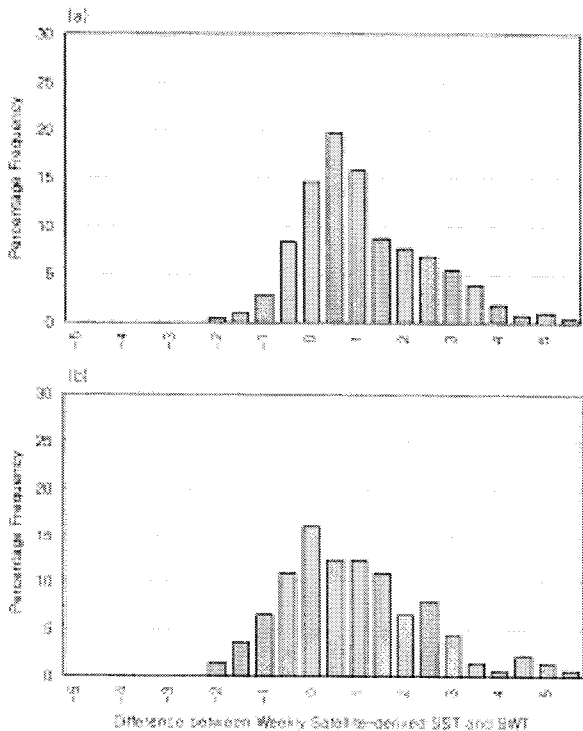


Fig. 1. Percentage frequency distribution of the difference between weekly satellite-derived SST with measurements and SWT (sea water temperature) at Ulleungdo for (a) daytime and (b) nighttime.

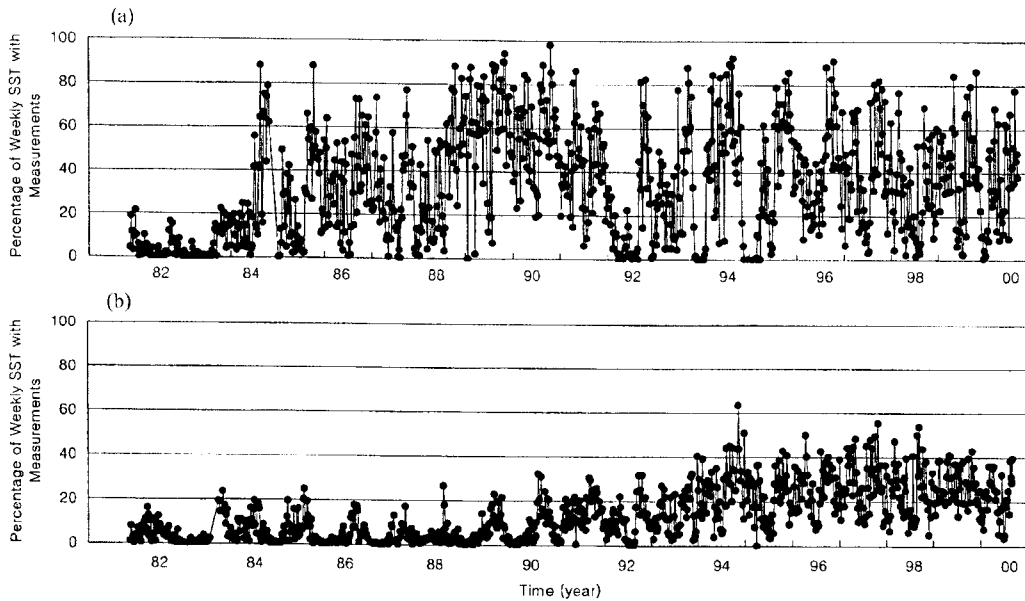


Fig. 2. Percentage of satellite-derived weekly SST with measurements in the East Sea for (a) daytime and (b) nighttime.

이 조사에서 울릉도에 인접한 격자에서 내삽과정으로 계산한 주평균 위성 SST와 대응되는 울릉도 연안 SWT의 차이를 비교하였다. Fig. 3은 울릉도 연안에서 위성 SST와 SWT 사이의 평균 절대 오차(mean absolute error)와 내삽과정에서 사용한 SST 관측자료의 위치 사이의 관계를 보여준다. 관측자료의 위치는 내삽과정으로 계산한 위성 SST의 격자를 중심으로 채어진 SST 관측자료의 거리(위·경도 방향의 격자 수)로 표현되며, 이 거리는 다시 내삽할 위성 SST 격자를 중심으로 정사각형 창의 폭으로 나타내었다. Fig. 3에서 평균 절대 오차는 SST 관측자료를 포함하는 정사각형 창의 폭과 함께 증가한다. 즉 이것은 SST 관측자료로부터의 거리와 함께 내삽된 값의 오차가 증가한다는 것을 의미한다. 이 조사에서 평균 절대 오차는

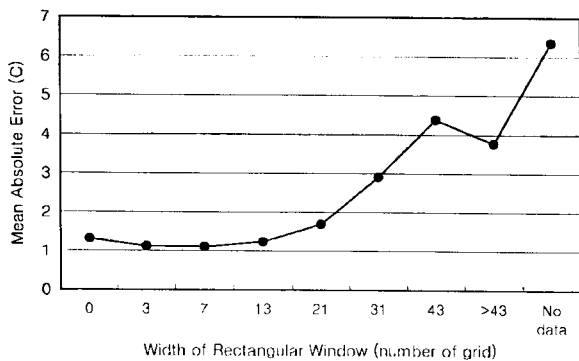


Fig. 3. Mean absolute error and interpolation interval (number of grid) for daytime.

정사각형 창의 폭이 21 격자까지는 1~2 °C이며, 이 후 급격한 증가를 보인다. 따라서 이 연구에서는 내삽과정으로 계산한 주평균 위성 SST 자료 가운데 정사각형 창의 폭(SST 관측자료의 위치)이 21 격자 이하인 자료만을 사용하였다.

울릉도 연안에서 낮 동안의 주평균 위성 SST 자료 가운데 SST 관측자료로부터 직접 얻어진 주평균 SST 자료는 약 30 %이고, 내삽과정으로 계산한 그리고 SST 관측자료가 21 격자 내에 존재하는 경우의 주평균 SST 자료는 약 55 %이다. 따라서 이 연구에서 주평균 위성 SST 자료는 울릉도 연안에서 전체의 약 85 %를 사용하였다.

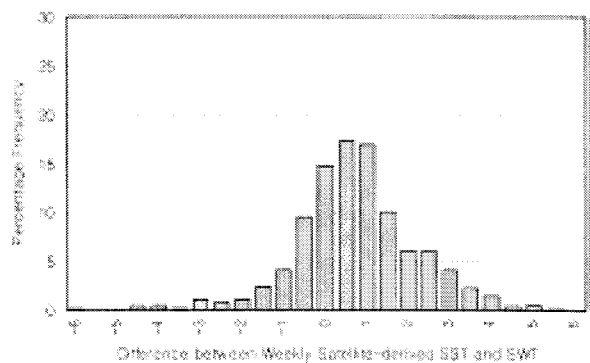


Fig. 4. Percentage frequency distribution of the difference between weekly satellite-derived SST including some interpolation data and SWT (Sea Water Temperature) at Ulleungdo at for daytime.

이 자료의 bias와 RMSE는 0.76°C 와 1.65°C 이며, 이 값은 SST 관측자료로부터 직접 얻어진 주평균 SST 자료의 bias와 RMSE (1.11°C 와 1.75°C)와 비교할 때 비슷한 정확도를 보인다(Fig. 4).

NOAA/AVHRR 주평균 SST의 편차

NOAA/AVHRR 주평균 SST 자료를 사용하여 주어진 격자에서 주평균 SST의 평균 연주기(mean annual cycle)를 추정하고, 이 값으로부터 주평균 SST의 편차(anomaly)를 계산하였다. 그리고 주로 이 편차(NOAA/AVHRR 주평균 SST의 편차)를 이용하여 4절과 5절의 분석을 수행하였는데, NOAA/AVHRR 주평균 SST 자료는 7일 간격으로 구성되어 있으며, 연도에 따라 7일 기간의 날짜가 조금씩 달라진다. 또한 SST 관측 자료의 공간 분포에 따라 내삽으로 계산한 주평균 SST 자료의 일부는 이 연구에서 제외하였다. 따라서 이 연구에 사용한 주평균 SST 자료로부터 각 격자의 평균 연주기를 추정하는 일은 결코 쉬운 일이 아니기 때문에, 주평균 SST 자료로부터 평균 연주기를

추정하기 위하여 울릉도 연안의 주평균 SST와 SWT의 연변화를 비교하였다.

Fig. 5a에서 SST는 울릉도에 인접한 격자의 약 19년 동안의 주평균 SST 자료로부터 동일한 줄리안 날짜(Julian day)의 자료를 평균하여 얻었다. 그러나 이러한 평균은 특정한 날짜에 대해서 단지 3~4개의 주평균 SST 자료(19년 동안 주어진 격자에서 동일한 날짜의 주평균 SST는 3~4개에 불과하다)를 평균한 값이다. 한편 결측인 날짜에 대해서는 주변 자료를 내삽하여 그 결측 구간을 보완하였다. 그리고 SWT는 울릉도 연안 SWT의 일자료를 8일 이동 평균(8-day running mean)을 취하여 계산하였다. 앞에서 계산한 SST의 연주기(annual cycle)에서 평균을 취했음에도 불구하고 상당한 변동을 발견할 수 있었는데, 이러한 변동은 자료 채취에 나타난 문제점 때문에 SST의 연주기에서 경년변화(interannual variation)의 성분을 완전히 제거하지 못했다는 것을 의미한다. 반면 SWT의 연주기는 평탄하고 뚜렷한 연변화를 보이며, 전체적인 연변화 패턴에서 SST의 연주기와 일치하고 있다. 따라서 주평균 SST 자료로부터 평균 연주기를 추정하기 위해서는 위에서 계산한 SST의 연주기에서 경년변화의 성분을 제거하는, 즉 SWT의 연변화 패턴과 일치시키는 과정이 필요하다.

SST와 SWT의 연변화 패턴을 비교하기 위하여 조화 분석을 이용하여 Fig. 5a의 SST를 평활화(smoothing)시켰다. 이 과정에서 SST 자료는 다수의 조화성분으로 나누어지고, 이들 가운데 장주기 성분의 부분적 결합을 통해서 SST를 평활화시켰다. 그리고 평활화된 SST와 SWT 사이의 차이 값(SST-SWT)에 대한 표준편차를 구하였다. 이러한 과정을 가장 긴 주기의 조화성분부터 차례로 결합시키면서 반복 수행하였다. 표준편차는 조화성분을 가장 긴 주기로부터 6개까지 결합했을 때 약 0.5°C 로 최소가 되었다. Fig. 5b에서 회색 실선은 조화분석을 이용하여 SST를 평활화한(단지 6개 조화성분만을 결합한) 값이다. 평활화된 SST는 여름철에는 SWT보다 높고 겨울철에는 SWT와 비슷하나, 전체적으로 SWT와 비슷한 연변화 패턴을 보인다. 이 연구에서는 동해 지역의 모든 격자에서 평활화 과정을 통하여 주평균 SST의 평균 연주기를 추정하고, 이 값으로부터 주평균 SST의 편차를 계산하였다.

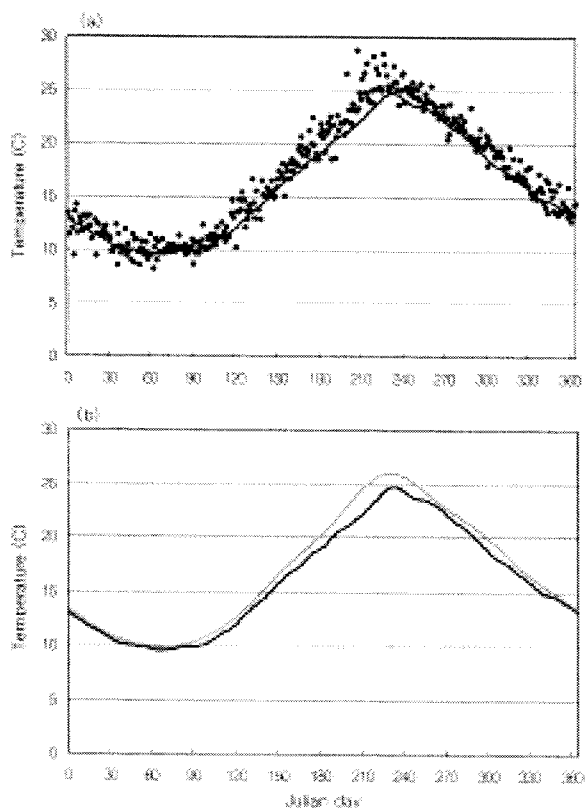


Fig. 5. Annual distribution of satellite-derived SST and SWT at Ulleungdo; (a) weekly SST (dots) and SWT (solid line) and (b) smoothed weekly SST (gray line) and SWT (black line).

4. 동해 SST의 지역적·시간적 변동성

지역적 변동성

동해 지역 SST의 지역적 분포를 조사하기 위하여 먼저 평활화 과정을 통하여 계산한 주평균 SST의 평균 연주기로부터 최대값과 최소값의 분포를 조사하였다(Fig. 6). 이러한 분포는 NOAA/AVHRR 주평균 SST 자료의 공간 분해능이 $0.18^{\circ} \times 0.18^{\circ}$ 이기 때문에 동해 지역에 있어 약

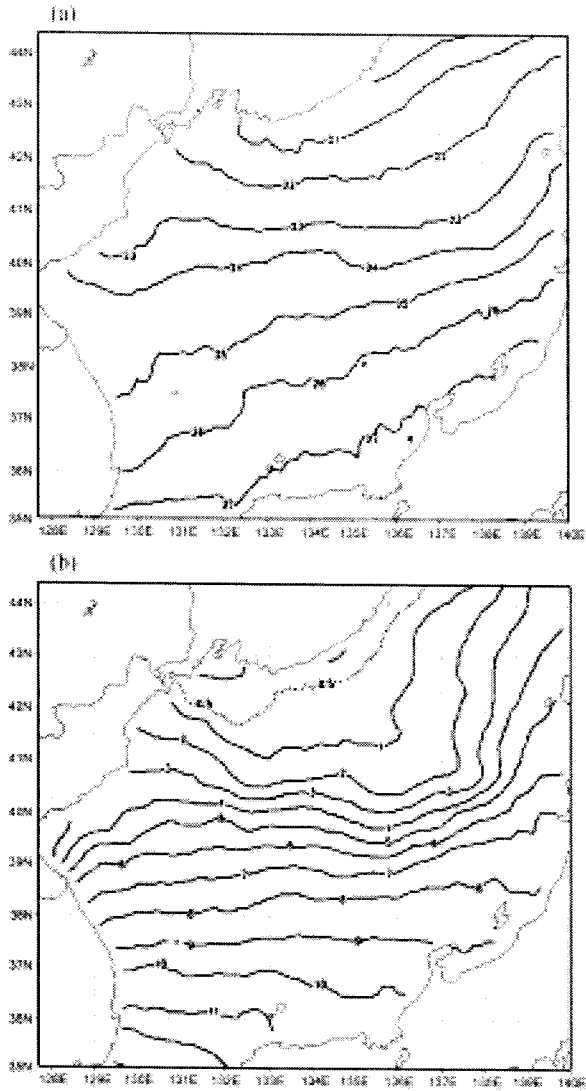


Fig. 6. Distribution of the weekly SST at (a) annual maximum and (b) annual minimum.

15 km×15 km 격자 자료로 구성된다. 최대값은 동해지역에서 20~27°C 사이에 분포하며, 약 7°C 범위에서 변화를 보이는데, 최대값의 공간 변화(spatial gradient)는 상대적으로 동해 중동부 지역에서 크게 나타난다. 반면 최소값은 0~12°C 사이에 분포하며, 그 변화 범위는 최대값의 약 1.7배로 크게 나타나고 공간 변화는 약 40°N 부근의 동·서대에서 크게 나타나는데, 이 지역은 동한 난류와 대마 난류의 겨울철 북방 한계와 일치하고 있다. 최대값이 나타나는 시기는 원산만과 그 북부 지역에서 8월 10~15일로 상대적으로 이르고, 동해 동부 지역에서 8월 16~20일로 다소 늦다. 최소값은 동해 남부 지역에서 3월 초순에 나타나는 반면 동해 북부 지역에서는 2월 중순과 말에 나타난

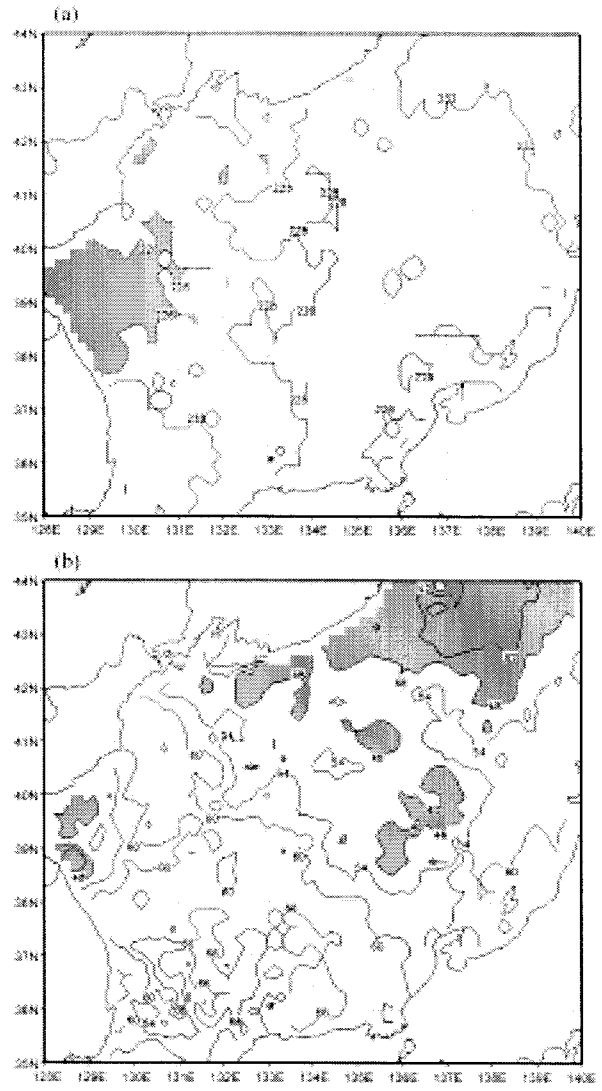


Fig. 7. Occurrence date (Julian day) of (a) annual maximum and (b) minimum in weekly SST. Values less than 48 (minimum) or 226 (maximum) are shaded.

다. 특히 최소값이 나타나는 시기는 지역에 따라 상당한 차이가 발견된다(Fig. 7). 여기서 3월 1일과 8월 10일은 줄리안 날짜로 각각 60일과 222일이다. 동해 SST에 있어 최대값과 최소값의 발생 시기는 주변 육지의 기온에 나타난 이들의 발생 시기와 비교할 때, 열적인 관성에 의해서 일반적으로 지연되어 나타난다. 한편 SST 최소값과 최대값의 발생 시기는 지역에 따라 상당한 변화를 보이는데 이러한 변화는 주로 해류와 육지의 영향과 연관되어 있는 것으로 이해된다. 즉 최소값의 발생시기는 겨울철에 한류 영역에서 상대적으로 이르고, 난류 영역에서 늦다. 그리고

여름철에 있어 최대값의 발생은 부분적으로 육지에 둘러싸인 원산만 부근에서 이른 시기에 나타난다.

또한 동해 지역 SST의 지역적 변동성을 조사하기 위하여 각 격자에 대한 주평균 SST 편차의 변화량을 계절별로 분석하였다. 이 연구에서 계절은 SST의 평균 연주기를 참고로 봄(4, 5, 6월), 여름(7, 8, 9월), 가을(10, 11, 12월), 그리고 겨울(1, 2, 3월)로 나누어 정의하였다. 그리고 계절별 SST의 변화량을 나타내기 위하여 SST 편차로부터 SST의 분산을 계산하였다. Fig. 8은 동해 지역 SST에 있어 계절별 분산의 지역적 분포를 보여준다. 분산이 큰 곳은 동해 중부 지역에 위치한 원산만 부근과 일본에 인접한 동해 중동부 지역이다. 특히 이 지역의 분산은 겨울철에 크게 나타나며, 원산만 부근 보다 동해 중동부 지역에서 크게

나타난다. 겨울철 SST의 분산은 지역적으로 상당한 변화를 보이는데, 동해 중부 지역이 북부와 남부 지역과 비교할 때 뚜렷하게 큰 분산을 보이고 또한 남부 지역이 북부 지역보다 상대적으로 큰 분산을 보인다. 이러한 겨울철 SST 변화를 해류와 연관시켜 분석하면, 겨울철 SST의 변화는 난류와 한류의 경계지역, 즉 SST의 공간 변화량 (spatial gradient)이 큰 동해 중부 지역에서 크게 나타나며, 특히 동한 난류와 대마 난류의 북방 한계 지점인 원산만 부근과 동해 중동부 지역에서 크게 나타난다. 그리고 겨울철에 난류 지역인 동해 남부 지역이 북부 지역보다 큰 SST 변화를 보인다. 이러한 분석 결과는 해류와 관련된 SST 변화와 일치하고 있다. 해류의 변화는 그 해류의 이동 경로에서 SST의 변화와 관련되며, SST의 변화는

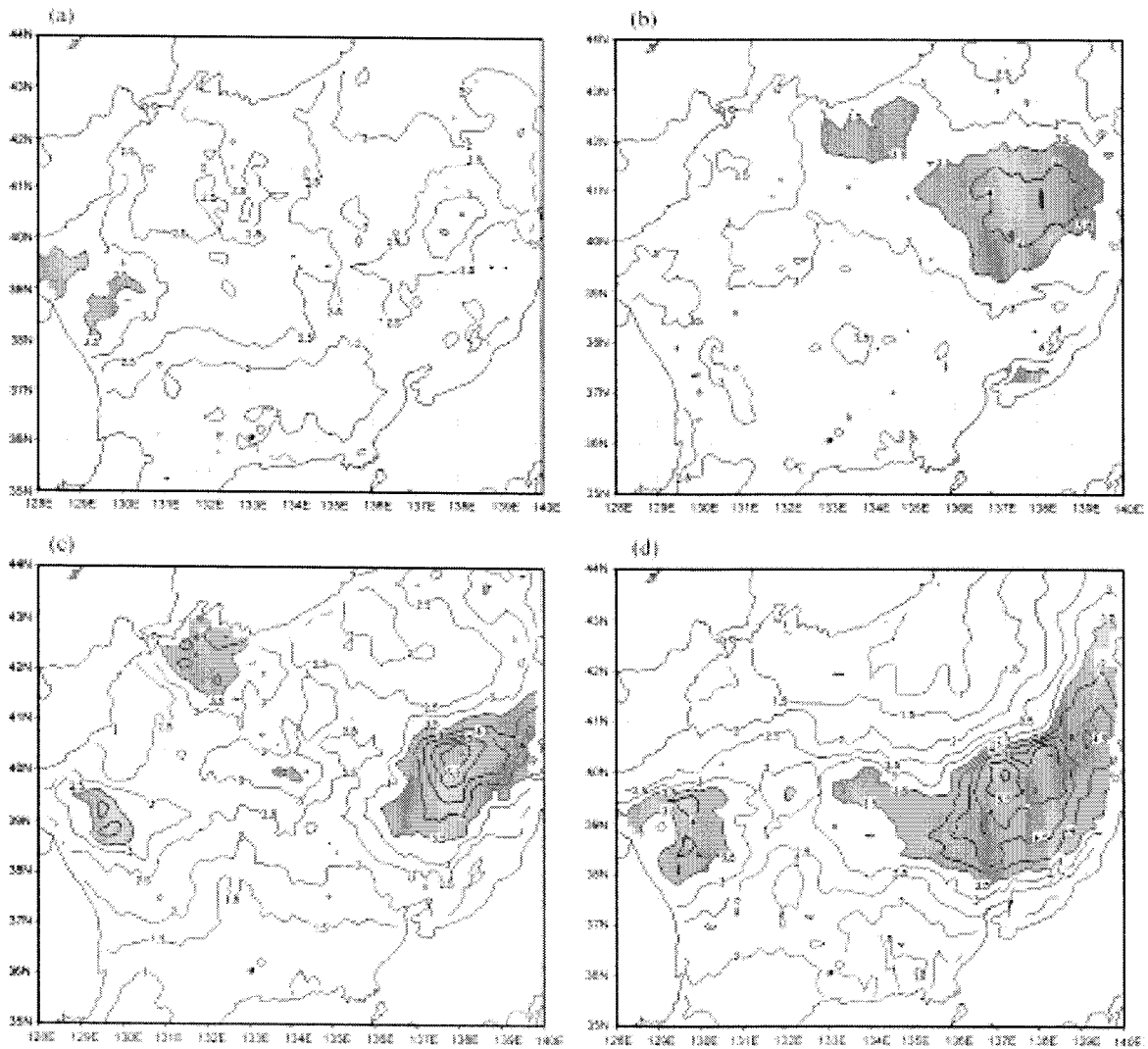


Fig. 8. Distribution of weekly SST variance for (a) spring, (b) summer, (c) fall, and (d) winter. The variance is calculated using the weekly SST anomaly obtained in this study. Values greater than 3.5 are shaded.

SST의 공간 변화량(spatial gradient)이 큰 지역에서 크게 나타난다. 따라서 동해 지역 겨울철 SST의 변동은 주로 난류(동한 난류와 대마 난류)의 변화와 관련되어 있다고 이해할 수 있다.

동해 지역에 있어 봄과 가을의 SST 분산은 겨울철과 비슷한 분포 패턴을 보이는 반면 여름과 겨울 SST 분산의 분포 사이에서는 상당한 차이를 발견할 수 있다(Fig. 8). 여름철 SST의 분산은 40°~43°N에서 북서와 남동 방향으로 상대적으로 높은 값을 보이거나 전체적으로 균일한 값(2.5~3 °C)을 나타낸다. 그리고 동해 남·북부 지역의 이러한 분산은 다른 계절의 분산(1~2 °C)과 비교할 때 상대적으로 큰 값이다. 따라서 여름철 SST의 지역적 변동에 나타난 특징은 SST의 변화량이 다른 계절과 비교할 때 일반적으로 크다는 것과 또한 지역적인 차이가 작은 비교적 균일한 분포를 보인다는 것으로 요약할 수 있다. 한편 이러한 특징으로부터 동해 지역 여름철 SST의 변동은 겨울철 SST 변동과 다르게 해류의 변화 이외에 다른 중요한

요인과 연관될 수 있다는 가능성을 발견한다.

동해 지역 SST의 경년 변동을 일으키는 주된 과정은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 하나는 역학적인 해류의 변화이고 다른 하나는 해양과 대기의 상호작용에 의한 열역학적인 해양 표면에서의 열속의 변화이다. 그리고 이러한 열속은 태양 복사에 의한 단파장 에너지, 잠열, 미열의 열속 등을 포함한다. 이 연구에서는 SST 경년 변동과 관련된 주된 과정을 조사하기 위하여 월평균 SST(Historical Reconstructed SST Data)에 나타난 공간적인 관계성(spatial relation)을 분석하였다. 이를 위하여 동해와 주변 해양의 계절 평균 SST(여름과 겨울) 사이에 상관계수를 계산하였다(Fig. 9). 여기서 동해 지역 계절 평균 SST는 동해를 대표할 수 있는 36°~42°N 그리고 130°~138°E 지역의 월평균 SST 격자(2°×2°) 값을 전체 평균한 값을 사용하였다. 주변 해양의 계절 평균 SST는 50°N~20°S 그리고 100°E~280°E 사이의 각 격자(2°×2°)에서의 계절 평균 SST를 사용하였다. 동해와 주변 해양의 SST 사이에는 여

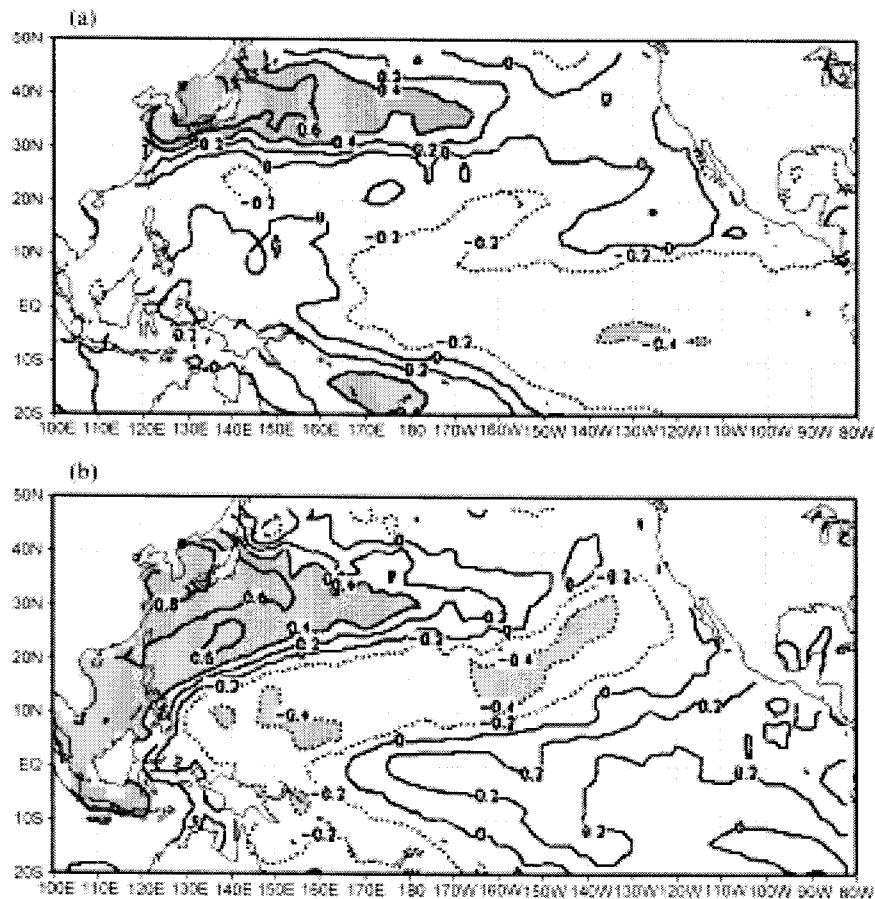


Fig. 9. Distribution of correlation coefficient between 3-month SST average in the East Sea and in the Pacific Ocean for (a) summer and (b) winter. Values greater than 0.4 or less than -0.4 are shaded.

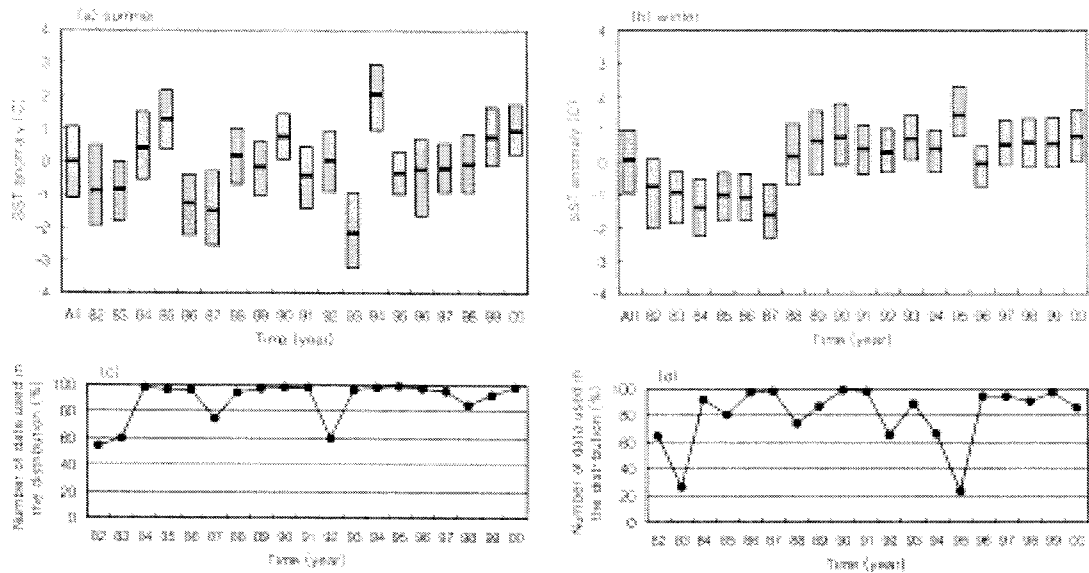


Fig. 10. Interannual variability of the SST distribution in the East Sea for (a) summer and (b) winter. The upper and lower box are drawn at the quartiles. The bar through the box is drawn at the median. Also the number (%) of data used in the distribution is shown for (c) summer and (d) winter.

를철의 경우 동해를 중심으로 비슷한 위도대에서 동서 방향으로 밀접한 양의 상관관계가 나타난다. 그러나 적도 동부 태평양에서는 통계적으로 의미있는 음의 상관관계가 나타난다. 겨울철의 경우 동해와 주변 해양의 SST 사이에는 쿠로시오 지역, 즉 남북 방향의 해양에서 밀접한 양의 상관관계가, 또한 적도 중·동부 태평양에서도 약한 양의 상관관계가 나타난다.

이러한 분석 결과는 다시 한번 동해 지역 겨울철 SST의 변동이 주로 난류의 변화와 관련되어 있다는 추론을 지지하고 있으며, 또한 여름철 SST의 변동이 대기의 역학적 혹은 열역학적 성분의 변화와 연관된다는 강한 가능성을 제시한다. 즉 겨울철 SST의 변동은 쿠로시오 및 대마 난류와 관련되어 있고, 여름철 SST의 변동은 동서 방향의 공간적 관계성 때문에 일반적으로 서쪽 방향으로 이동하는 대기와 관련되어 있다고 이해할 수 있다. 동해 지역 여름철 해양과 대기의 상호작용에 의한 해양 표면에서의 열속의 변화는 보다 연구가 필요한 부분이다. 또한 동해 SST와 적도 태평양 SST 사이에는 겨울철에는 약한 양의 상관관계를 그리고 여름철에는 통계적으로 의미있는 음의 상관관계를 발견할 수 있다. 동해 SST와 적도 태평양 SST 사이의 관계성은 5절에서 보다 자세히 조사하였다.

시간적 변동성

동해 지역 SST의 시간적 변동성을 조사하기 위하여 각 격자에 대한 NOAA/AVHRR 주평균 SST 편차의 연도별

계절 평균(여름과 겨울)을 계산하고, 이를 이용하여 연도별로 동해 지역 전체($35^{\circ}\sim 44^{\circ}\text{N}$, $128^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)에 대한 계절 평균 SST 편차의 분포를 비교하였다. 또한 결측 자료에 기인하는 영향을 고려하기 위하여 연구에 사용된 자료 수(%)를 연도별로 계산하였다(Fig. 10). SST의 분포는 75와 25 percentile 값과 중앙값(median)을 사용하여 표현하였다. 동해 지역 여름철 SST의 분포는 연도에 따라 커다란 변화를 보이며, SST의 분포에 따라 1982, 1983, 1986, 1987, 1993년 여름은 추운 여름으로 그리고 1985, 1990, 1994, 1999, 2000년은 상대적으로 더운 여름으로 나눌 수 있을 것이다. 특히 1993년과 1994년 여름은 19년 기간 동안(1982~2000)에 가장 추운 여름(1993)과 가장 더운 여름(1994)이며, 두 계절의 SST 차이는 $4\sim 5^{\circ}\text{C}$ 로 나타난다. 한편 추운 여름이 나타난 기간은 대체적으로 엘니뇨 기간과 잘 일치하고 있다.

동해 지역 겨울철 SST의 분포에 나타난 주된 특징은 1988년을 경계로 전체적으로 전반기는 SST가 낮고 후반기는 SST가 높은 뚜렷한 변화이다. 전반기와 후반기 사이에는 약 2°C 의 SST 증가와 약 50 percentile에 해당되는 SST 분포의 변화가 나타난다. 더구나 후반기 분포에 나타난 1995년 겨울의 특이하게 높은 SST를 약 80%에 이르는 결측 자료의 영향으로 간주한다면 1988년을 경계로 나타나는 SST의 변화는 비록 기간은 짧지만 기후 변위(climate regime shift)에 해당하는 뚜렷한 변화이다. 전반기와 후반기 사이의 SST 차이는 지역적으로 위도 $39^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 에

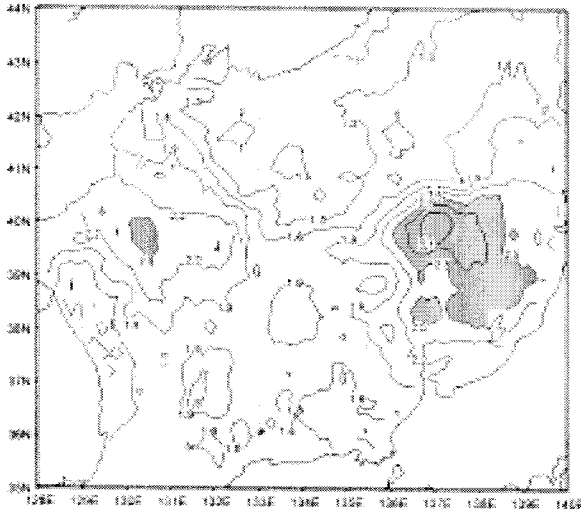


Fig. 11. Distribution of SST difference in the 3-month average for the winter between the early period (1982-1987) and the late period (1988-2000). Values greater than 2.5 °C are shaded.

서 크게 나타나며, 특히 원산만 부근과 일본에 인접한 동해 중동부 지역에서 각각 2~2.5 °C와 2.5~3.5 °C의 증가를 보인다. 그리고 일반적으로 동해 남부 지역이 북부 지역보다 큰 SST 차이를 보인다(Fig. 11). 여기서 사용한 SST 차이는 각 격자에 대한 후반기(1988~2000)와 전반기(1982~1987)의 겨울철 평균 SST의 차이 값이다. 따라서 이러한 전반기와 후반기의 SST 차이는 주로 난류의 북상에 기인한다고 볼 수 있다.

5. ENSO와 동해 SST 사이의 관계성

ENSO와 동해 SST 사이의 관계를 조사하기 위하여 월 평균 SST(Historical Reconstructed SST Data)를 이용하여 Niño 3.4 지역의 SST 편차와 동해 지역(36°~42°N, 130°~138°E) SST 편차 사이의 상관관계를 분석하였다. 사용된 SST 편차는 3개월 이동 평균값을 위의 두 지역 각각에 대해서 평균한 값이다(매년 1, 2, 3월 평균에서 12, 1, 2월 평균까지 12개의 이동 평균값으로 구성된다). 여기에서 지연 관계(lagged relationship)를 조사하기 위하여 위의 두 자료를 전·후 12개월까지 이동시켜 가면서 상관계수를 계산하였다(Fig. 12). 지연 관계에서 음수(개월 수)는 ENSO에 대해서 동해 SST의 변화가 지연되어 나타나는 관계이며, 양수는 반대로 선행되어 나타나는 관계를 의미한다. ENSO와 동해 SST 사이의 관계는 8, 9, 10월의 3개월 평균에서 1% 유의 수준의 음의 상관관계(약 -0.4)를 보이며, 12, 1, 2월과 1, 2, 3월의 3개월 평균에서는 0.25~

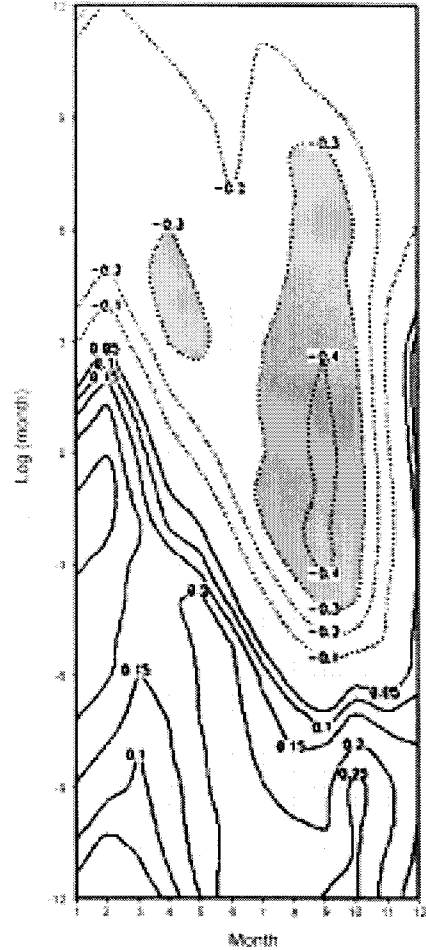


Fig. 12. Temporal distribution of the correlation coefficient between areally averaged 3-month running mean of SST in the NINO 3.4 region and the East Sea. Values less than -0.3 are shaded.

0.3의 약한 양의 상관관계(10% 유의 수준)를 보인다. 또한 월평균의 분석에서도 8, 9, 10월 각각에서 의미있는 음의 상관관계(약 -0.4 이하)가 그리고 1월과 2월에 약한 양의 상관관계가 나타난다.

지연 관계의 조사에서 8, 9, 10월 상관계수(음의 관계)는 3개월 지연과 3개월 선행 사이에서 최대값을 보이며, 비록 2개월 지연의 가능성이 보이나 그 관계성은 뚜렷하지 않다. 오히려 선행 관계에서 8개월까지 의미있는 관련성이 나타나는데 이러한 관계는 ENSO 현상의 발달 단계와 연관시켜 설명할 수 있다. 즉 대부분의 엘니뇨는 여름이나 초가을에 시작하여 그 해 말 혹은 그 다음 해 초에 절정에 도달한다(Trenberth 1997). 그러므로 8, 9, 10월의 Niño 3.4 지역 SST 편차는 그 해 말 혹은 그 다음 해 초의 값과 밀접한 관계성을 가질 것이고, 결과적으로 이 관계는

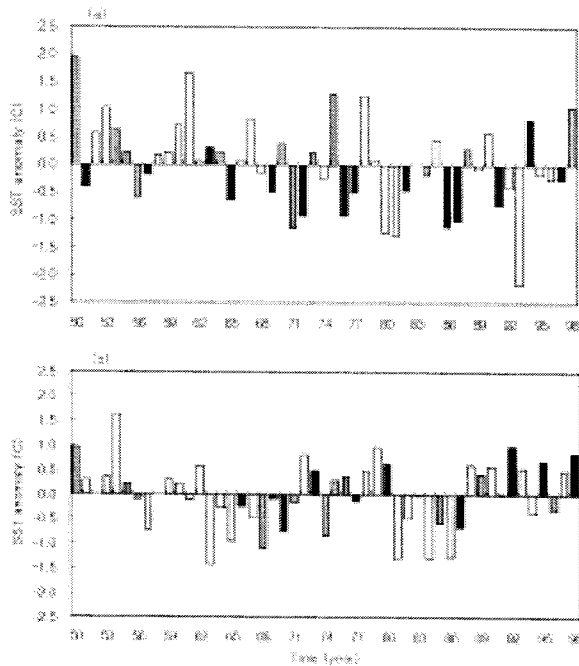


Fig. 13. Distribution of seasonal SST anomalies in the East Sea for (a) August-September-October period and (b) the winter. The El Niño and La Niña periods are denoted by black and gray, respectively.

ENSO와 동해 SST 사이의 선형 관계로 나타날 것이다. 한편 12, 1, 2월과 1, 2, 3월의 3개월 평균에서는 비록 약한 양의 상관관계이지만 약 1~2개월의 지연 관계가 나타난다. 그러나 3개월 평균이 아닌 월평균 자료의 분석에서는 비록 몇몇 특정 월에 지연과 선형 관계가 나타나지만 일관성 있는 선형-지연 관계를 발견할 수 없다.

ENSO와 동해 SST 사이의 관계를 조사하기 위하여 ENSO를 그것의 두 개의 극한 상태인 엘니뇨와 라니냐 기간으로 나누고, 각 기간에 있어 동해 SST의 편차를 분석하였다. Fig. 13은 ENSO와 동해 지역 SST의 상관관계가 상대적으로 높았던 8, 9, 10월과 1, 2, 3월 두 기간에 대하여 엘니뇨와 라니냐에 관련된 동해 지역 SST(3개월 평균)의 편차를 보여준다. 여기서 3개월 모두가 엘니뇨이거나 라니냐일 때 SST 편차 막대를 흑색과 회색으로 각각 표시한다. 초가을(8, 9, 10월)에 있어 엘니뇨는 동해 지역 SST의 음의 편차와 관련되어 있고(14 사례 가운데 12개가 음의 편차를 보인다), 라니냐는 양의 편차와 관련되어 있다(12 사례 가운데 9개가 양의 편차를 보인다). 또한 이항 분포를 이용한 가설 검증에서 엘니뇨의 음의 편차와 라니냐의 양의 편차는 각각 1%와 10% 수준에서 유의하다. 그러나 겨울철(1, 2, 3월)에 있어 엘니뇨는 12 사례 가운데 8

개가 동해 지역 SST의 양의 편차와 관련되어 있으며, 라니냐는 11 사례 가운데 5개에서 음의 편차를 보인다. 이러한 관계는 가설 검증에서 통계적으로 유의한 관계가 아닌 것으로 나타난다. 따라서 엘니뇨/라니냐와 동해 지역 SST 사이에는 초가을 기간(8, 9, 10월)에 밀접한 관계성이 나타난다. 즉 엘니뇨 기간에 SST의 감소와 라니냐 기간에 SST의 증가가 나타나고, 특히 초가을의 엘니뇨 기간에 SST의 감소는 통계적으로 1% 유의 수준에서 뚜렷하다. 이러한 결과는 엘니뇨 기간에 있어 한반도 여름철 기온이 평년보다 낮게 나타난다는 강인식(1998)의 연구 결과와도 잘 일치하고 있다.

한편 초가을의 동해 지역 SST의 감소와 엘니뇨 사이에 밀접한 관계성이 있음에도 불구하고, Fig. 13a에는 엘니뇨와 무관한 강한 음의 SST 편차가 나타난다. 이들은 93년, 81년, 80년 그리고 71년 초가을의 동해 지역 SST의 편차로, 크기 순서에서 첫 째부터 넷 째에 해당하는 강한 음의 편차이다. 여기서 93년의 경우는 8월이 엘니뇨 기간이기 때문에 지연 과정과 연관된 ENSO에 기인하는 SST 감소로 이해할 수 있을 것이다. 그러나 71년의 경우는 라니냐 기간이고 또한 81년과 80년은 엘니뇨 혹은 라니냐 기간과 관련시키기 어려운 기간이다. 따라서 위의 결과로부터 동해 지역 SST의 변화가 ENSO 이외의 다른 요인에 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

ENSO와 동해 지역 SST 사이의 관계에 있어 공간 분포의 특성을 조사하기 위하여 NOAA/AVHRR 주평균 SST 편차를 이용한 합성 분석(composite analysis)을 수행하였다. 이를 위하여 앞의 상관분석과 편차분석에서 ENSO와 관련 가능성이 나타난 초가을(8, 9, 10월)과 겨울(1, 2, 3월)을 각각 엘니뇨와 라니냐 기간으로 분류하였다. 그리고 엘니뇨(라니냐) 기간에 대한 SST 편차의 합성 값을 각 격자에서 계산하고, 이 합성 값과 비엘니뇨(비라니냐) 기간의 합성 값 사이의 차이를 계산하였으며, 또한 지역적으로 이 차이의 통계적 유의성을 조사하기 위하여 Panofsky와 Brier(1968)의 방법대로 Student's t-test를 수행하였다. 여기서 ENSO와 동해 지역 SST 사이의 지연 관계를 고려하여 Trenberth(1997)의 정의에 따라, 초가을이 엘니뇨인 해는 1982, 1986, 1987, 1991, 1993, 1994, 1997이고, 라니냐인 해는 1984, 1988, 1995, 1998, 1999년으로 하였다.

우선 동해 지역 전체에 대한 초가을 SST의 분포에 나타난 시간적 변화를 조사하기 위하여 Fig. 10과 같이 8, 9, 10월의 SST 분포에서 연도별 75와 25 percentile 값과 중앙값을 분석하였다. Fig. 14(8, 9, 10월 SST 분포)와 fig. 10(7, 8, 9월 SST 분포)은 각각 연도에 따라 뚜렷한 변화를 보이고 있으나, 서로 큰 차이 없이 전체적으로 비슷한 분포를 보인다. 이 분석에서 8, 9, 10월 기간의 SST 결측률은 7, 8, 9월 기간 보다 상대적으로 낮다. 초가을 SST의

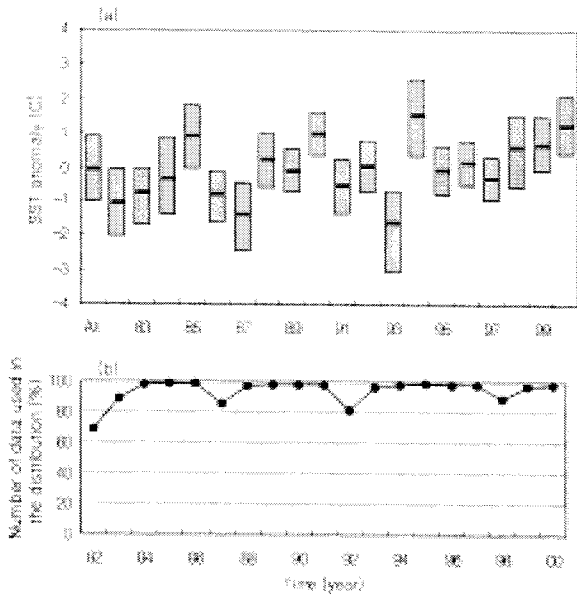


Fig. 14. Same as Fig. 10 except for the period of August-October.

분포에서 중앙값을 기준으로 추운 기간은 추운 순서로 5 번째까지 1993, 1987, 1982, 1986, 1983, 1991년이고, 더운 기간은 1994, 2000, 1990, 1985, 1999년이다. 그리고 대체적으로 이들 추운 기간은 엘니뇨 기간과 잘 일치하고 있으며, 더운 기간은 1994년과 1990년을 제외하고 라니냐 기간과 일치하고 있다. 엘니뇨 해의 SST 분포는 1994년

을 제외하고 모두 뚜렷하게 음의 방향으로 이동되어 있다. 그러나 라니냐 해의 SST 분포에서는 뚜렷한 이동을 발견할 수 없다. 이러한 결과는 상관분석과 편차분석의 결과와 잘 일치하고 있다. 한편 1994년 초가을은 엘니뇨 기간임에도 불구하고 가장 따뜻한 초가을 SST를 기록하는 특이한 사례에 속한다.

Fig. 15a는 초가을(8, 9, 10월) 동해 지역에서 합성 SST 편차로부터 계산된 엘니뇨와 비엘니뇨 기간 사이의 SST 차이에 대한 분포를 보여준다. SST의 차이는 동해 전역에서 약 $-0.5 \sim -1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 사이에 분포하며, 특히 동해 남서부의 광범위한 지역에서 $-1 \text{ }^\circ\text{C}$ 이하의 큰 음의 값이 나타난다. 이들 음의 값은 Student's t-test에서 1~5 % 유의 수준에 속한다. 엘니뇨와 비엘니뇨 기간 사이의 SST 차이는 Student's t 값이 -2.9 와 -2.1 일 때 각각 1 %와 5 % 수준에서 유의하다(Fig. 15b). 그러나 라니냐와 비라니냐 기간 사이의 SST 차이는 비록 동해 전역에서 양의 값을 가지나, 통계적으로 유의한 값은 아니다. 따라서 이러한 결과는, ENSO와 동해지역 SST 사이에 유의한 관계는 초가을에 나타나며 그 관계는 라니냐 보다 엘니뇨와 관련된 SST의 강한 감소로 나타나고 또한 그러한 감소는 동해의 남서부 지역에서 뚜렷하다는 것을 의미한다.

Fig. 16은 겨울철(1, 2, 3월) 동해 지역에서 합성 SST 편차로부터 계산된 엘니뇨와 라니냐 기간 사이의 SST 차이에 대한 분포를 보여준다. SST 차이는 동해 전역에서 대체적으로 작은 값을 보이고, 상대적으로 큰 SST 차이는 동해의 $39^\circ \sim 41^\circ\text{N}$ 위도 대에 나타난다. 특히 동해 중부의

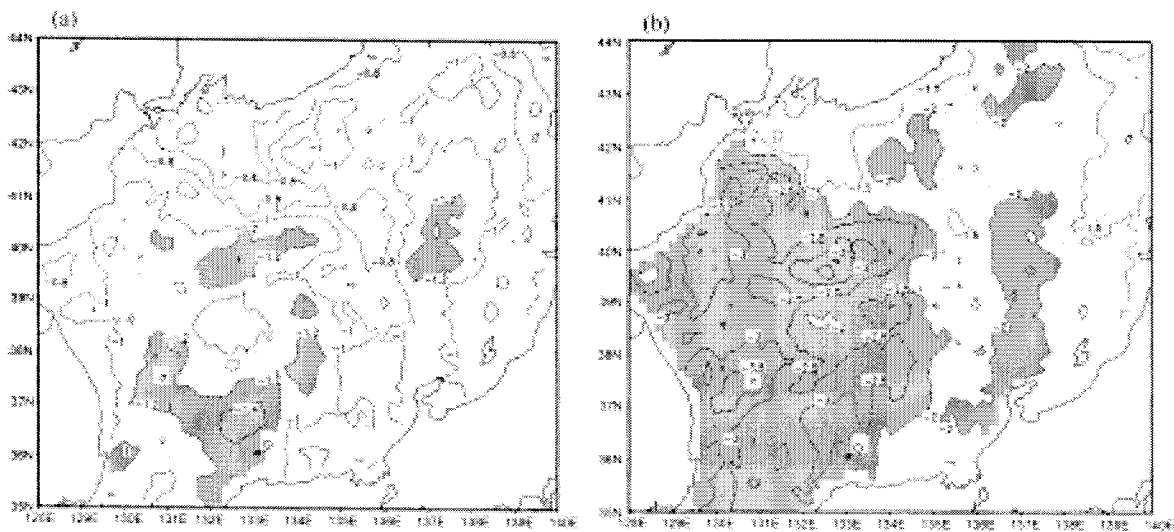


Fig. 15. SST anomalies in the East Sea related with El Niño events for the months of August-October; (a) the difference of composite anomalies and (b) Student's t value of the difference. Shading denotes areas with the difference less than $-1.2 \text{ }^\circ\text{C}$ and with Student's t value less than -2 .

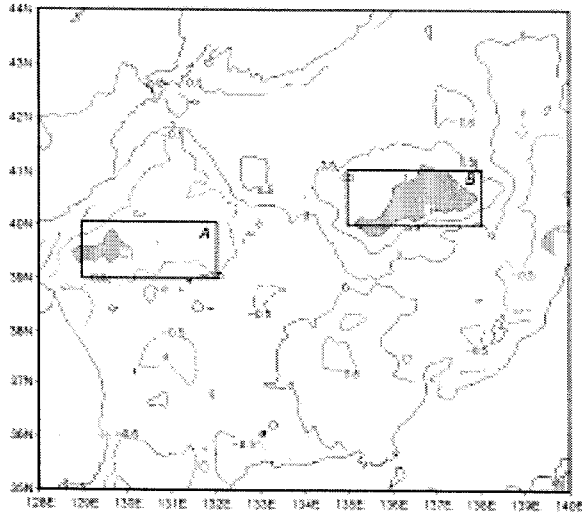


Fig. 16. Distribution of SST difference between El Niño period and La Niña period. Values less than -1°C or greater than 1°C are shaded. A and B regions are indicated for reference.

서쪽 (A 지역; $39^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $129^{\circ}\sim 131^{\circ}\text{E}$)과 동쪽(B 지역; $40^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$, $135^{\circ}\sim 138^{\circ}\text{E}$) 지역에서는 크기가 약 1인 양과 음의 값이 각각 분포한다. 여기서 겨울이 엘니뇨인 해는 1983, 1987, 1988, 1992, 1993, 1995, 1998년과 그리고 라니냐인 해는 1985, 1989, 1996, 1999, 2000년을 사용하였다. 그러나 4월의 겨울철 SST 분포의 분석에서 동해 지역의 겨울철 SST는 1988년을 경계로 전반적으로 전반기는 낮고 후반기는 높은 뚜렷한 변화를 보였으며, 특히 이러한 변화는 동해의 중부 지역에서 뚜렷하게 나타났다. 따라서 위에 계산된 엘니뇨와 라니냐 기간 사이의 SST 차이는 SST의 수년 변화(multi-year variation)에 영향을 받을 수 있다.

A 지역과 B 지역에 있어 엘니뇨와 라니냐 기간 사이의 SST 차이를 자세히 분석하기 위하여 연도별 겨울철 평균 SST 편차를 계산하였는데(Fig. 17), A 지역의 경우 평균 SST 편차는 1988년을 경계로 전반기는 낮고 후반기는 높은 뚜렷한 변화를 보이고, 반면 B 지역에서는 약한 증가 추세가 나타난다. 따라서 엘니뇨와 라니냐 사이의 SST 차이를 계산하는 과정에서 SST의 수년 변화를 제거하고자 시도하였다. A 지역의 경우 1988년을 기준으로 전반기와 후반기의 각각의 평균값을 그 기간의 SST 편차에서 빼주었고, B 지역은 SST의 증가 추세를 제거하였다. 이러한 과정을 거친 후 계산된 엘니뇨와 라니냐 사이의 SST 차이는 A와 B 지역 모두에서 큰 변화를 보이지 않는다. 결론적으로 겨울철 동해 지역 SST의 변화는 상당한 크기의 장기적 변동에 영향을 받고 있는 것으로 이해할 수 있으며,

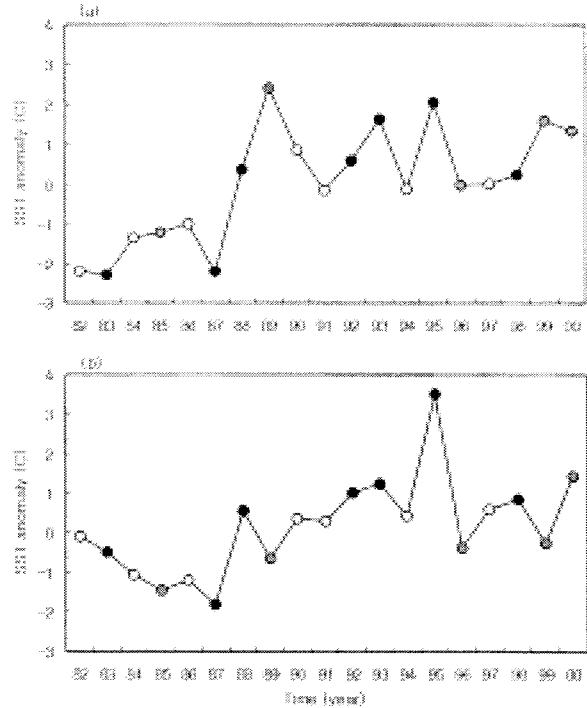


Fig. 17. Time series of interannual mean SST anomaly for winter in the (a) A region and (b) B region. Values for El Niño (La Niña) period are denoted by black (gray) dot.

ENSO와 겨울철 동해 SST 사이의 관계성은 통계적으로 유의한 수준이 아닌 것으로 나타난다.

6. 결 론

동해 지역에 있어 SST의 변동성과 ENSO와 관련된 SST 편차를 조사하기 위하여 동해 지역의 약 $0.18^{\circ}\times 0.18^{\circ}$ 해상도의 약 19년(1981~2000)동안의 NOAA/AVHRR 주평균 SST 자료와 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 해상도의 49년(1950~1998) 동안의 장기간 월평균 SST 자료를 분석하였다. 주평균 SST 편차의 계절별 변화량은 겨울철의 경우 난류와 한류의 경계지역, 즉 SST의 공간 변화량(spatial gradient)이 큰 동해 중부 지역에서 크게 나타나며, 특히 동한 난류와 대만 난류의 북방 한계 지점인 원산만 부근과 동해 중동부 지역에서 크게 나타난다. 그러나 여름철의 경우 SST의 변화량은 다른 계절과 비교할 때 전반적으로 크게 나타나며, 또한 지역적인 차이가 작은 비교적 균일한 분포를 보인다. 그리고 동해 SST와 주변 해양 SST 사이의 상관 분석에서는 여름철의 경우 동해를 중심으로 비슷한 위도대에서 동서 방향으로 밀접한 양의 상관관계가 나타나고, 겨울철의 경우 쿠로시오 지역, 즉 남북 방향의 해양에서 밀접한

양의 상관관계가 나타난다.

이러한 분석 결과는 동해 지역 겨울철 SST의 변동은 주로 난류의 변화와 관련되어 있고, 반면 여름철 SST의 변동은 대기 성분의 변화와 연관된다는 강한 가능성을 제시한다. 즉 겨울철 SST의 변동은 쿠로시오와 대마 난류와 관련되어 있고, 여름철 SST의 변동은 동서 방향의 공간적 관계성 때문에 일반적으로 서쪽 방향으로 이동하는 대기와 관련되어 있다고 이해할 수 있다. 동해 지역 여름철 해양과 대기의 상호작용에 의한 해양 표면에서의 열속(태양 복사에 의한 단파장 에너지 속, 잠열속, 미열속 등)의 변화는 보다 연구가 필요한 부분이다.

ENSO와 동해 SST 사이의 관계는 8, 9, 10월의 3개월 평균에서 1% 유의 수준의 음의 상관관계(약 -0.4)가 나타나며, 12, 1, 2월과 1, 2, 3월의 3개월 평균에서 0.25~0.3의 약한 양의 상관관계(10% 유의 수준)가 나타난다. 또한 월평균의 분석에서도 8, 9, 10월 각각에서 의미있는 음의 상관관계(약 -0.4 이하)가 그리고 1월과 2월에 약한 양의 상관관계가 나타난다. 엘니뇨와 라니냐에 관련된 동해 지역 SST의 편차 분석에서 엘니뇨는 8, 9, 10월에 동해 지역 SST의 음의 편차와 관련되어 있고(14 사례 가운데 12개가 음의 편차를 보인다) 라니냐는 양의 편차와 관련되어 있다(12 사례 가운데 9개가 양의 편차를 보인다). 이항 분포를 이용한 가설 검증에서 엘니뇨의 음의 편차와 라니냐의 양의 편차는 각각 1%와 10% 수준에서 유의하다. 그러나 겨울철(1, 2, 3월)에 있어 엘니뇨와 라니냐에 관련된 동해 SST 편차는 가설 검증에서 통계적으로 유의한 수준이 아니다.

NOAA/AVHRR 주평균 SST 편차를 이용한 합성 분석에서 엘니뇨와 비엘니뇨 기간 사이의 초가을(8, 9, 10월) SST 차이는 동해 남서부의 광범위한 지역에서 -1°C 이하의 큰 음의 값을 보인다. 이 음의 값은 Student's t-test에서 1~5% 유의 수준에 속한다. 그러나 라니냐와 비라니냐 기간 사이의 SST 차이는 비록 동해 전역에서 양의 값을 가지나, 통계적으로 유의한 값은 아니다. 또한 겨울철 SST는 수년 변화(multi-year variation)에 영향을 받고 있으며, 엘니뇨와 라니냐 사이의 SST 차이는 동해 전역에서 통계적으로 유의한 수준이 아니다. 따라서 이러한 결과는 ENSO와 동해지역 SST 사이에 유의한 상관관계가 8, 9, 10월에 나타나고; 이러한 음의 상관관계는 라니냐 보다 엘니뇨와 관련된 SST의 강한 감소로 나타나며; 그리고 이러한 감소는 동해의 남서부 지역에서 뚜렷하다는 것을 의미한다. 또한 기존의 연구 결과(나영남 1988, Park and Oh 2000; Hong *et al.* 2001)와 비교할 때 이 연구의 결과는 “엘니뇨 기간에 동해지역의 여름철 SST에 뚜렷한 감소가 나타난다”는 Hong *et al.*의 결과와 일치하고 있다. 그러나 엘니뇨(라니냐)와 관련된 겨울철 SST의 상승(감소) 그리

고 라니냐와 관련된 여름철 SST의 상승에 관한 기존의 분석 결과는 이 연구에서 통계적으로 유의한 수준이 아닌 것으로 나타난다.

사 사

이 연구의 일부는 한국해양연구원 기관고유사업인 ‘극지환경 특성 및 보존에 관한 연구(ECPP 99001-03)’의 일환으로서, 연구기법 개발과 적용차원에서 수행되었다. 연구에 사용한 울릉도 연안정지 해양관측 지점의 표층 수온 자료를 제공해 주신 국립수산진흥원에 감사드린다. NOAA/AVHRR 주평균 SST 자료와 Reconstructed Historical 월 평균 SST 자료는 Jet Propulsion Laboratory의 Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (<http://podaac.jpl.nasa.gov>)로부터 제공받았다. 또한 이 논문을 심사하여 주시고 많은 조언을 해주신 심사위원님들께 감사드린다.

참고문헌

- 강인식. 1998. 엘니뇨와 한반도 기후변동의 관련성, 한국기상학회지, 34, 390-396.
- 나영남. 1988. 엘니뇨와 관련된 동해의 수온 변화, 석사학위논문, 서울대학교, 51 p.
- Ahn, M.H., B.J. Hwang, E.H. Sohn, M.J. Kim, and A.S. Suh. 2001. Derivation of sea surface temperature from GMS-5 for the high resolution numerical weather prediction models. *Kor. J. Atmos. Sci.*, 4, 41-56.
- Alexander, M.A. 1990. Simulation of the response of the North Pacific Ocean to the anomalous atmospheric circulation associated with El Niño. *Climate Dyn.*, 5, 53-65.
- Angell, J.K. 1981. Comparison of variations in atmospheric quantities with sea surface temperature variations in the equatorial eastern Pacific. *J. Climate*, 109, 230-243.
- Bjerknes, J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Weather Rev.*, 97, 163-172.
- Cayan, D.R. 1992. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: Driving the sea surface temperature. *J. Phys. Oceanogr.*, 22, 859-881.
- Deser, C. and M.L. Blackmon. 1995. On the relationship between tropical and North Pacific sea surface temperature variations. *J. Climate*, 8, 1677-1680.
- Hong, C., K.-D. Cho, and H.-J. Kim. 2001. The relationship between ENSO events and sea surface temperature in the East (Japan) sea. *Progress Oceanogr.*, 49, 21-40.
- Hsiung, J. and R.E. Newell. 1983. The principal nonseasonal modes of variation of global sea surface tempera-

- ture. *J. Phys. Oceanogr.*, 13, 1957-1967.
- Kiladis, G.N. and H.F. Diaz. 1989. Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation. *J. Climate*, 2, 1069-1090.
- Klein, S.A., B.J. Soden, and N.-C. Lau. 1999. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge. *J. Climate*, 12, 917-932.
- Lanzante, J.R. 1996. Lag relationships involving tropical SSTs. *J. Climate*, 9, 2568-2578.
- Lau, N.-C. and M.J. Nath. 1996. The role of the "atmospheric bridge" in linking tropical Pacific ENSO events to extratropical SST anomalies. *J. Climate*, 9, 2036-2057.
- Lau, N.-C. and M.J. Nath. 2001. Impact of ENSO on SST variability in the North Pacific and North Atlantic: Seasonal dependence and role of extratropical sea-air coupling. *J. Climate*, 14, 2846-2866.
- McClain, E.P., W.G. Pichel, and C.C. Walton. 1985. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures. *J. Geophys. Res.*, 90, 11587-11601.
- Namias, J. and D.R. Cayan. 1981. Large-scale air-sea interactions and short period climate fluctuations. *Science*, 214, 869-876.
- Panofsky, H.A. and G.W. Brier. 1968. *Some Applications of Statistics to Meteorology*. Pennsylvania State University, Pennsylvania, 224 p.
- Pan, Y.H. and A.H. Oort. 1983. Global climatic variations connected with SST anomalies in the eastern equatorial Pacific ocean for 1958-1973 period. *Mon. Wae. Rev.* 111, 1244-1258.
- Park, W.-S. and I.S. Oh. 2000. Interannual and Interdecadal variations of sea surface temperature in the East Asian marginal seas. *Progress Oceanogr.*, 47, 191-204.
- Reynolds, R.W. and T.M. Smith. 1994. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *J. Climate*, 7, 929-928.
- Ropelewski, C.F. and M.S. Halpert. 1996. Quantifying Southern Oscillation-precipitation relationships. *J. Climate*, 9, 1043-1059.
- Smith, T.M., R.W. Reynolds, R.E. Livezey, and D.C. Stokes. 1996. Reconstruction of historical sea surface temperatures using empirical orthogonal functions. *J. Climate*, 9, 2845-2862.
- Trenberth, K.E. 1997. The definition of El-Niño. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 2771-2777.
- Wallace, J.M. and D.S. Gutzler. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 784-812.
- Wallace, J.M., C. Smith, and Q. Jiang. 1990. Spatial patterns of atmospheric-ocean interaction in the northern winter. *J. Climate*, 3, 990-998.
- Weare, B.C., A. Navato, and R.E. Newell. 1976. Empirical orthogonal analysis of Pacific Ocean sea surface temperature. *J. Phys. Oceanogr.*, 6, 671-678.
- Wyrski, K. 1973. Teleconnections in the equatorial Pacific Ocean. *Science*, 180, 66-68.

Received Oct. 15, 2001

Revised Dec. 12, 2001

Accepted Dec. 17, 2001