

## Article

## 한국 연안 표층수온의 경년변동과 장기변화

민홍식\* · 김철호

한국해양연구원 해양환경연구본부  
(424-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29Interannual Variability and Long-term Trend of Coastal  
Sea Surface Temperature in Korea

Hong Sik Min\* and Cheol-Ho Kim

Marine Environment Research Department, KORDI  
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

**Abstract** : Interannual variation and long-term trends of coastal sea surface temperature (SST) in Korea were investigated by analyzing 27 coastal SST time series from 1969 to 2004. Long-term linear increasing trend was remarkable with the rate over  $0.02^{\circ}\text{C}/\text{year}$  at almost all the stations. The slope of long-term linear trend was larger at the stations along the eastern coast than in the western and southern regions. It was also noticeable that there was a common tendency of interannual variability with the period of 3-5 years at most of the stations. SST was lower in the 1970's and early 1980's while it was higher in the 1990's and early 2000's after the increase in the late 1980's. The pattern of the interannual variability of SST was similar to that of air temperature. Increasing trend of minimum SST in winter was obvious at most stations and it was larger along the eastern coast, while the linear trend of maximum SST in summer was less definite. Therefore, the decreasing tendency of annual amplitude was mainly due to the increasing tendency of SST in winter.

**Key words** : sea surface temperature, long-term trend, interannual variability, annual amplitude, linear increasing trend

## 1. 서 론

정부간기후변화협약의체보고서(IPCC 2001)는 지구표면의 온도가 지난 세기 동안 약  $0.4\sim 0.8^{\circ}\text{C}$  정도 상승하였으며 이런 상승은 지역별로 차이가 크고 겨울에 뚜렷하게 나타난다고 보고하였다. 한국기후표(기상청 2001)에서도 IPCC 보고서에서 나타난 온난화 경향과 유사한 기온 변화가 보고되었다. 즉, 1971년부터 2000년까지 30년간 평균값이 1961년부터 1990년까지 종전 평균값보다 연평균 기온은 지역별로  $0.1\sim 0.5^{\circ}\text{C}$  상승했으며 특히 겨울철 기온

의 상승폭이 커  $0.4\sim 0.6^{\circ}\text{C}$  상승했으나 8월에는 기온상승폭이 매우 작거나 오히려 하강했다. 대기-해양간 열교환으로 인해 표층수온은 기온과 밀접한 관계가 있으므로 온난화 현상은 표층수온에서도 나타나게 된다. 한국 주변 해역 해수의 수온 변화에 대한 연구에서 표층수온 상승에 대한 보고는 이를 뒷받침한다(Hahn 1994; Kang 2000).

특히 Kang(2000)은 한국 연안에 위치한 18개 관측정점(이하 정점)에서 측정한 1936년부터 1995년까지 표층수온 자료를 분석하여 표층수온의 선형 변화 경향(linear trend)을 구하였다. 그 결과 1966년부터 1995년까지 최근 30년간 연평균 표층수온이 평균  $0.024^{\circ}\text{C}/\text{year}$ 의 증가율로 상승하였으며 이는 1936년부터 1995년까지 60년간 연평균

\*Corresponding author. E-mail : hsmi@kordi.re.kr

표층수온의 증가율보다 2배 이상 큰 값이라고 주장하였다. 또한 1966년부터 1995년까지 겨울철 표층수온이 평균 0.035°C/year의 비율로 증가하였음에 비해 여름철 표층수온은 0.010°C/year의 비율로 감소하였고 연변동폭은 평균 0.021°C/year의 비율로 감소했다고 주장하였다.

한편 동해안의 기온은 서해안보다 높고 그 차이는 겨울철에 더욱 큰 것으로 알려져 있으며(이 2003) 기온과 유사하게 동해의 표층수온은 같은 위도 상의 황해의 표층수온보다 높다고 보고되었다(Kang and Jin 1984). 온난화 경향이 겨울철에 뚜렷하게 나타나므로 동해안과 서해안의 기온 차이가 겨울철에 크게 나타나는 것은 기온 상승과 동반하는 표층수온 상승이 서해안보다 동해안에서 더 크고 특히 겨울철 표층수온 상승이 동해안에서 더 크게 나타날 수 있음을 내포한다. 또한 황해의 표층수온의 연변동폭은 동해나 남해보다 크므로(Kang and Jin 1984) 온난화에 의한 표층수온의 연변동폭의 변화가 해역에 따라 다르게 나타날 수 있다. 그렇지만 Kang(2000)은 전반적인 표층수온의 상승 경향이나 연변동폭의 감소에 대해 밝혔으나 해역에 따라 표층수온의 변화 양상이 어떤 차이점을 보이는 지에 대해 깊이 분석하지 않았다.

표층수온 상승이 기온 상승과 밀접한 관계가 있기는 하지만 해양의 역학 규모(dynamic scale)가 대기의 역학 규모보다 훨씬 작으므로 지역에 따라 기온 변화가 다르게 나타나는 정도에 비해 표층수온 변화의 해역별 차이는 더 크게 나타날 수 있다. 한국 연해의 경우 지형적으로 동해, 남해, 황해로 나뉘어 있기 때문에 해수의 이동이 제한될 수 밖에 없어서 해수의 특성 및 순환이 해역별로 다르게 나타난다. 예를 들면, 동해의 경우 동해안을 따라 북상하는 동한난류(East Korean Warm Current, EKWC)에 의해 고온고염의 해수가 북쪽으로 이동하고 동해안을 따라 남하하는 북한한류(North Korean Cold Current, NKCC)에 의해 저온저염의 해수가 남쪽으로 이동한다(김과 김 1983; Kim and Legeckis 1986). 따라서 동해안의 표층수온 변화는 기온 변화와 동반하여 나타나는 변화 이외에 두 해류의 변동 등 해수 순환 변화에 의해서도 나타날 수 있다. 따라서 단순히 전 해역의 평균적인 표층수온 변화 경향만을 조사하기 보다는 해역에 따른 표층수온의 변화 양상 차이도 함께 연구되어야 한다.

이 연구에서는 최근 관측 자료의 추가를 통해 한국 연안 표층수온의 상승 경향에 대한 기존 연구 결과를 확장하여 최근까지 나타나는 표층수온의 변화 경향을 포함하여 최대 36년간의 변화를 조사하였다. 이를 위하여 전반적인 표층수온의 증가 경향 및 연변동폭의 변화 경향을 파악함은 물론 단순한 선형 변화 경향에 더해 표층수온의 경년변동성을 함께 분석하였다. 또한 해역에 따른 표층수온의 경년변동성 및 장기 변화 경향의 차이를 함께 조사하였다.

## 2. 자료 및 방법

국립수산과학원이 한국 연안에 위치한 정점에서 매일 측정된 표층수온의 시계열 중 장기간의 수온 변화를 분석하기 위해 가능한 한 많은 정점에서 같은 기간 동안 연속적으로 관측된 시계열을 선택하였다. 비록 몇몇 정점에서는 1930년대부터 표층수온이 관측되었으나 1940년대와 1950년대에 관측이 이뤄지지 않아 1930년대부터 최근까지 연속적으로 관측된 표층수온 자료는 없다. 한편, 몇몇 정점에서는 표층수온 관측을 1990년대에 중단한 경우도 있으며 일부 정점에서 관측된 표층수온 자료는 관측 기간이 30년보다 짧아 장기 변화를 연구하기에 부적합한 경우도 있다.

통계적인 분석을 위해서는 연속적인 시계열이 필요하므로 결측 기간이 긴 자료는 이용하기 어렵다. 따라서 자료가 없는 기간이 두 달을 넘지 않는 관측 자료만을 선택하였다. 1950년대부터 연속적으로 표층수온이 관측된 정점도 있으나 가능한 한 많은 정점을 포함하도록 하기 위하여 30년 이상 관측된 표층수온 자료 중 1969년부터 2004년까지 36년 동안 연속적으로 표층수온이 관측된 27개 정점의 자료를 선택하였다(Table 1, Fig. 1).

자료 중단이 없는 연속적인 시계열을 얻기 위하여 자료가 없는 기간이 15일보다 짧은 경우에는 선형 내삽하여 자료가 없는 부분을 보충하였으며 자료가 없는 기간이 15일보다 긴 경우에는 전년도와 후년도의 같은 시기의 평균을 이용하여 보충함으로써 연속적인 시계열을 구성하였다. 매우 짧은 기간 안의 일시적인 변동은 전반적인 표층수온 변동 양상, 즉 최저 표층수온이나 최고 표층수온의 변동 등을 파악하는데 있어 오류를 유발할 수 있으므로

Table 1. Coastal observing stations shown in Fig. 1.

Station number	Station	Station number	Station
1	Sokcho	15	Dangsado
2	Jumunjin	16	Jeju
3	Jukbyeon	17	Jukdo
4	Pohang	18	Soheuksando
5	Janggigap	19	Hongdo
6	Gampo	20	Mokpo
7	Ulgi	21	Maldo
8	Busan	22	Gunsan
9	Gadeokdo	23	Eocheongdo
10	Seoimal	24	Budo
11	Yeosu	25	Seonmido
12	Sorido	26	Incheon
13	Geomundo	27	Socheongdo
14	Udo		

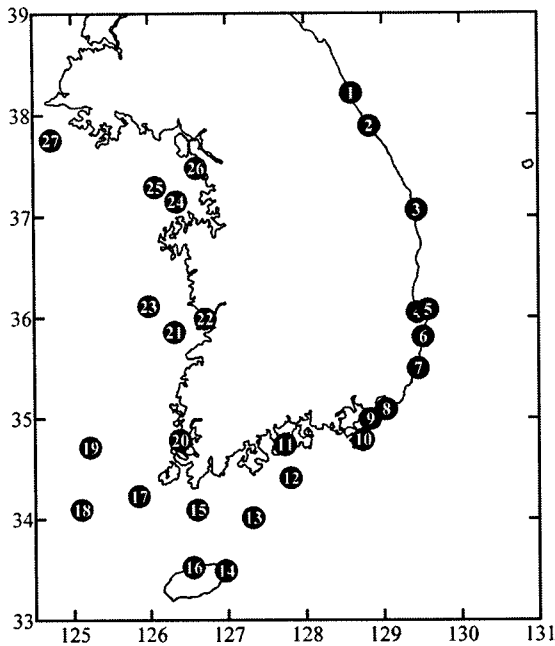


Fig. 1. Location of 27 coastal observing stations where daily sea surface temperatures (SST) were observed consecutively during 1969~2004.

제거할 필요가 있다. Kang(2000)은 일년 주기 성분과 반년 주기 성분의 합으로 조화 분석(harmonic fitting)하여 일시적인 변동을 제거하였다. 그러나 스펙트럼 분석 결과, 일반적인 경향에 따라 일년 주기 성분의 크기가 가장 크고 반년 주기 성분이 그 다음으로 크긴 했으나 4개월 주기의 성분도 무시하지 못할 정도의 크기로 나타났다. 따라서 일년 주기와 반년 주기의 변동의 합만을 이용하여 단주기 현상을 제거하면 정확한 표층수온의 변동성을 파악하기에 부족한 면이 있다. 그러므로 이 연구에서는 조화 분석을 통해 시계열을 재구성하는 방법을 사용하는 대신 한 달보다 짧은 기간 동안의 일시적인 변동을 장주기 통과 필터(low-pass filter)를 사용하여 제거한 후 시계열을 재구성하여 통계 분석에 이용하였다.

### 3. 결 과

#### 표층수온 계절변동성의 장기변화

전체적인 표층수온의 연변동 특성을 구하기 위해 경험 직교함수(Empirical Orthogonal Function, EOF) 분석을 하였다. 총분산의 94%를 설명하는 제 1모드는 2월경에 최소값을 보이고 8월경에 최대값을 보이는 뚜렷한 계절변동 특성을 잘 나타낸다(Fig. 2b). 모든 정점에서 같은 부호(+인 고유벡터(eigen vector)의 성분은 전체적으로 동해안이나 남해에 위치한 정점보다 황해에 위치한 정점에서 큰

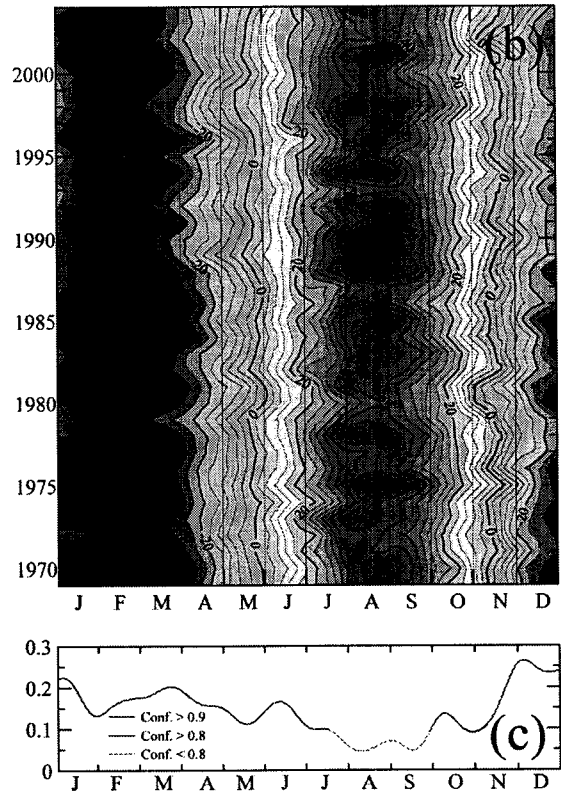
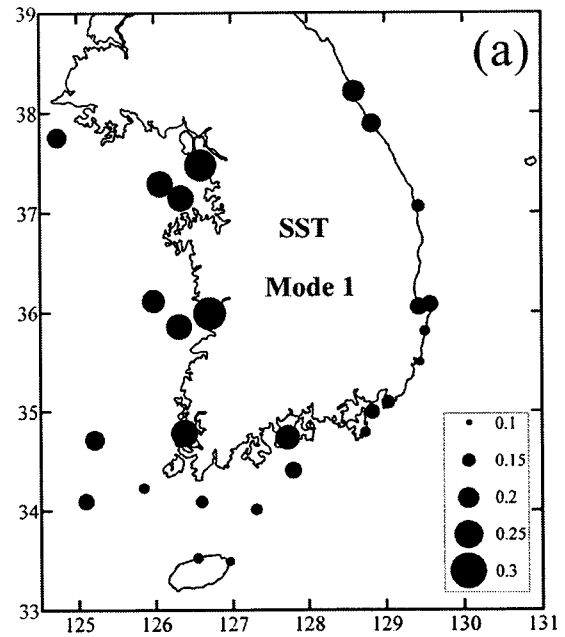


Fig. 2. The first EOF mode for SST that explains 94% of total variance; eigen vector (a), time coefficients vs. calendar date (b) and linear trend of time coefficients at each calendar date (c). Red solid, blue solid and dashed lines represent the linear trends with confidence levels higher than 0.9, 0.8 and less than 0.8, respectively.

값을 갖는다(Fig. 2a). 특히 인천과 군산에서 가장 큰 반면, 제주도의 정점(제주, 우도)과 울기, 감포에서 작은 값을 갖는다. Kang and Jin(1984)이 정선관측 자료를 이용하여 구한 한국 근해 표층수온의 평균적인 연변동폭의 공간 분포는 제주도 주변과 울기-감포 해역에서 낮게 나타났다. 비록 연안 정점에서 측정된 표층수온의 연변동폭과 정선관측 자료로부터 구한 표층수온의 연변동폭의 차이가 크지만 고유벡터 성분의 공간적인 분포 즉, 연변동폭의 공간 분포는 정선관측 자료를 이용하여 구한 연변동폭의 공간적인 분포와 잘 일치한다.

제주해협 남쪽의 표층수온은 남해 연안역의 표층수온보다 연중 높고 특히 겨울철에 더 높다(노와 김 1983). 제주도의 서쪽에서부터 제주도를 시계방향으로 돌아 제주해협의 남쪽에 국한되어 흐르는 제주난류(Cheju Current, CC)는 주로 봄과 겨울에 따뜻한 제주난류계수(Cheju Warm Current Water, CWCW)를 공급하는 것으로 알려져 있다(Chang 2000). 이러한 제주난류계수의 이류에 의해 제주도 정점의 표층수온이 남해 연안역보다 연중 높은 것으로 생각되며, 제 1모드 고유벡터에서 제주도에 위치한 정점의 작은 값은 겨울철 제주난류계수의 공급에 의해 연변동폭이 작은 것을 반영한 것으로 판단된다. 한편, 울기-감포 해역은 여름철 용승이 뚜렷하게 나타나는 해역으로(Lee 1983; Lee and Na 1985; Byun 1989) 여름철 표층수온이 주변 해역에 비해 상대적으로 낮다. Lee and Na(1985)는 울기-감포 해안은 동한난류의 경압비틀(baroclinic tilting) 영향으로 계절에 관계없이 대륙붕 위로 저층 냉수가 편중되어 나타나는 곳이며 지형적 효과와 함께 여름에 바람에 의해 용승이 일어나 표층수온이 낮게 나타난다고 하였다. 제 1모드 고유벡터에서 울기, 감포의 작은 값은 이러한 지역적 요인에 의한 것으로 생각된다.

1년 중 같은 날짜에 해당하는 시간계수(time coefficients)를 이용하여 제 1모드에 표현된 36년 동안 시기별 표층수온 상승 경향을 선형회귀도(linear regression)를 이용하여 구하였다(Fig. 2c). 표층수온의 상승 경향은 11월에 증가하여 12월에 가장 크게 나타나며 1월에 다시 감소하는 형태를 보인다. 상승 경향은 2월부터 3월까지 증가하여 3월말 경에 극대값이 나타나고, 5월 중순까지 감소한 후 5월에서 6월 사이에 증가하여 6월 중반의 상승 경향이 5월 중반보다 크게 나타난다. 7월부터 9월까지 여름철 표층수온의 상승 경향은 작게 나타났지만 여름철 표층수온의 선형회귀도의 신뢰수준(confidence level)은 0.8보다 낮아 여름철 표층수온의 상승은 통계적으로 큰 의미가 없다고 할 수 있다.

각 정점별 겨울철 표층수온과 여름철 표층수온의 장기 변화 추세를 각 해의 최저 표층수온과 최고 표층수온의 선형회귀도를 통해 조사하였으며, 최고 표층수온과 최저

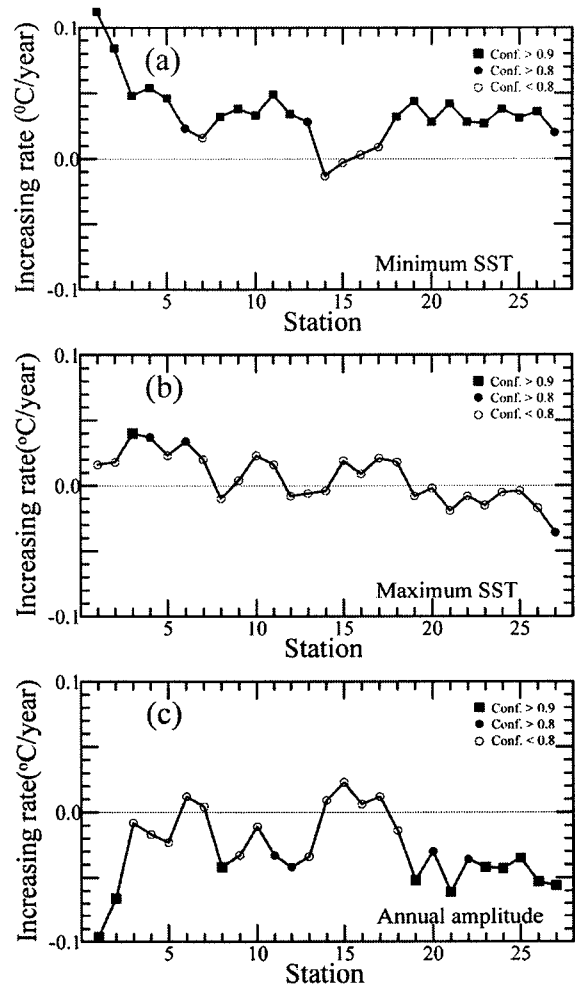


Fig. 3. Linear trends of minimum SST (a), maximum SST (b) and amplitude of annual variation (c) at each station. Amplitude of annual variation was defined with difference between maximum SST and minimum SST.

표층수온의 차를 연변동폭으로 정의하여 연변동폭의 장기 변화 추세도 함께 조사하였다. 최저 표층수온은 신뢰수준이 0.8이하인 몇 정점(울기, 우도, 당사도, 제주, 죽도)을 제외한 모든 정점에서 증가하였다(Fig. 3a). 속초의 증가율이  $0.11^{\circ}\text{C}/\text{year}$ 로 가장 컸으며 대부분 정점에서  $0.02\sim 0.05^{\circ}\text{C}/\text{year}$ 의 증가율을 보였다. 최저 표층수온이 대부분 정점에서 0.9 이상의 높은 신뢰수준으로 뚜렷한 증가 추세를 보이는 것과 달리 최고 표층수온의 경우 선형회귀도의 신뢰수준이 0.8 이상인 정점은 네 곳(죽변, 포항, 감포, 소청도)에 불과하며 그 중 신뢰수준이 0.9 이상인 곳은 죽변뿐이다(Fig. 3b). 신뢰수준이 낮은 정점도 고려하면 동해안의 정점에서 황해에 위치한 정점으로 갈수록 최고 표층수온의 증가율이 감소하는 형태가 보이며, 동해안의 정

점에서는 증가하는 반면 황해에 위치한 정점에서는 감소하는 등 최고 표층수온의 전반적인 증가나 감소 추세는 보이지 않았다. 최저 표층수온과 최고 표층수온의 선형 증가 경향의 차이는 앞의 EOF 제 1모드의 시간계수의 선형 회귀도가 겨울철에는 신뢰수준도 높고 증가율도 큼에 비해 여름철에는 신뢰수준도 작고 증가율도 미미했던 것과 일관된다.

표층수온의 연변동폭은 대체로 감소하는 경향이며 최저 표층수온의 증가율이 가장 높았던 속초의 감소율이 0.1°C/year로 가장 컸으며 황해에 위치한 대부분 정점에서 0.8 이상의 신뢰수준을 갖는 감소 추세가 뚜렷하였다(Fig. 3c). 속초와 주문진을 제외한 대부분 정점에서 표층수온의 연변동폭의 감소 추세는 0.03~0.06°C/year였다. 최저 표층수온의 상승 추세가 뚜렷함에 비해 최고 표층수온의 상승 추세는 뚜렷하지 않은 특징으로부터 연변동폭의 감소원인이 겨울철 표층수온의 상승임을 알 수 있다. 이는 겨울철 온난화가 크게 나타나는 전지구적인 온난화 경향과 잘 일치한다(IPCC 2001). 한편 죽변, 포항, 장기갑에서는 겨울철 최저 표층수온의 증가가 뚜렷하지만 여름철 최고 표층수온도 역시 증가하여 연변동폭의 감소는 다른 정점에 비해 뚜렷하지 않았다.

**표층수온의 경년변동**

표층수온 변동에서 가장 크게 보이는 계절변동성을 제거한 후 표층수온의 경년변동성을 조사하기 위하여 기존

의 표층수온에서 각 날짜의 평균 표층수온을 뺀 편차(anomaly)를 구하여 분석하였다. 표층수온편차의 선형회귀도는 우도를 제외한 정점에서 증가하는 경향이 보였으며 전반적으로 황해나 남해에 위치한 정점에서보다 동해안의 정점에서 더 크게 증가하였다(Fig. 4). 포항 이북의 동해안 북쪽에 위치한 정점에서 증가율이 0.04°C/year 이상으로 컸으며 특히 속초에서 0.06°C/year 이상으로 가장 컸다. 황해와 남해에 위치한 정점 중 여수와 서이말을 제외한 대부분 정점에서 증가율은 0.03°C/year 이하이며 특히 남서부에 위치한 거문도, 당사도, 죽도, 소흑산도의 증가율은 0.02°C/year보다 작았다.

표층수온편차를 이용한 EOF 분석에서 총분산의 39%를 설명하는 제 1모드는 경년변동성을 잘 표현한다. 제 1모드의 고유벡터는 모든 정점에서 같은 부호(+)로 감포 이북의 동해안 정점에서 0.2 이상으로 크고 제주와 우도

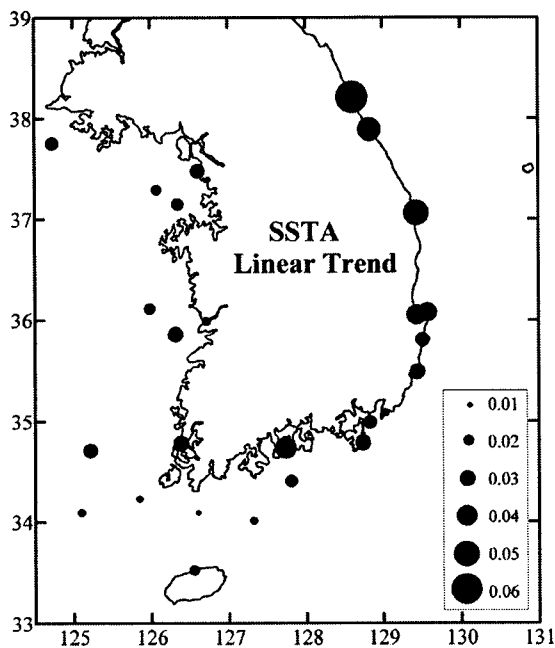


Fig. 4. Linear trends of sea surface temperature anomaly (SSTA) at each station.

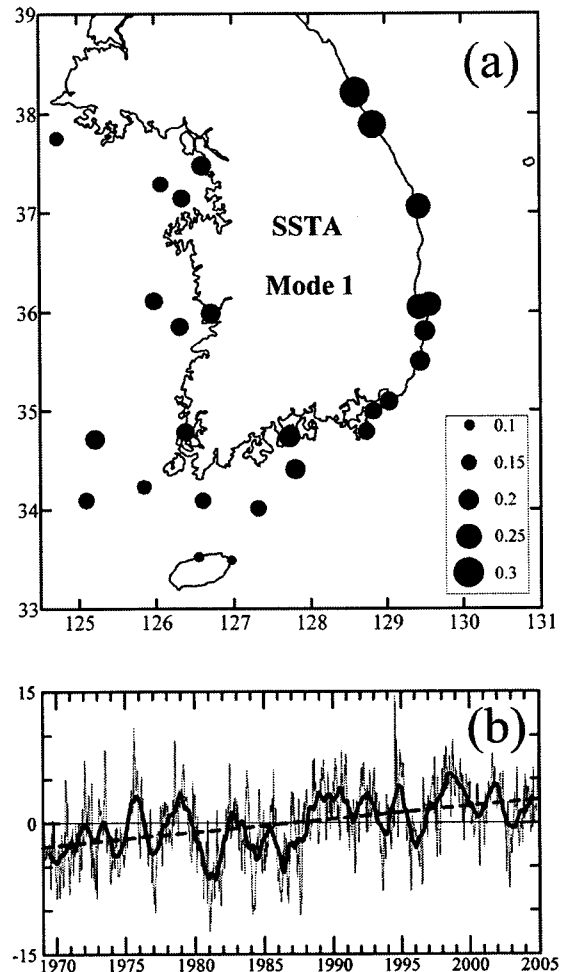


Fig. 5. Eigen vector (a) and time coefficients (b) of the first EOF mode for SSTA. Thick solid line and dashed line represent 1-year running mean and linear trend.

에서 가장 작아 0.1 이하이며, 남해와 황해에 위치한 대부분 정점에서 0.15~0.2이다(Fig. 5a). 시간계수의 선형 증가 경향은 0.15/year로 고유벡터의 크기를 감안하면 약 0.015~0.045°C/year의 증가에 해당한다(Fig. 5b). 속초와 제주 등의 증가율이 Fig. 4에 나타난 선형 증가율보다 작게 나오는 등 약간의 차이를 제외하면 전체적인 증가 경향의 크기나 분포가 Fig. 4로 설명한 선형 증가 경향과 비교적 잘 일치한다.

시간계수의 1년 이동 평균에서 약 3~5년 주기의 경년변동성이 보이며 변동폭의 크기로 보아 해에 따른 표층수온 편차의 변화가 상당함을 알 수 있다. 1년 이동평균은 1981년경과 1986년에 가장 낮은 값을 보이며, 1998년경에 가장 높은 값을 보인다. 1988년 이전에는 몇몇 시기(1975년경, 1978~1979년, 1982년)를 제외하면 대부분 0 이하로 낮은 반면 1988년 이후에는 몇몇 시기(1993년경, 1995~1996년, 2002~2003년)를 제외하면 0보다 크다. 1980년대 후반(1986~1988년)의 상승이 매우 뚜렷하며, 1990년대

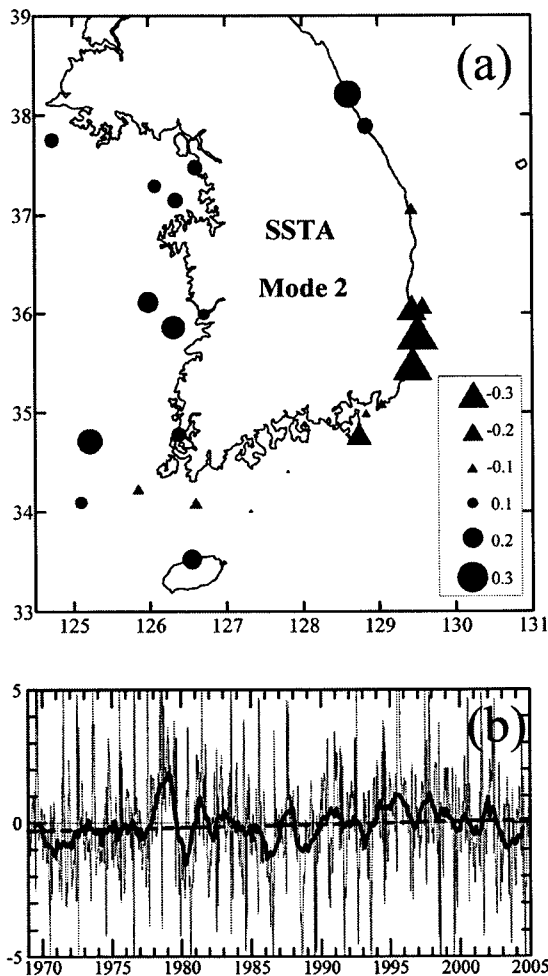


Fig. 6. Same as Fig. 5, but for the second EOF mode.

전반에 하강하는 경향이 있으나 1996년부터 1998년 사이에 상승이 매우 커 1990년대 이후로는 높은 값이 유지된다. 이처럼 표층수온편차의 경년변동성이 크기 때문에 비록 Fig. 4의 선형회귀도에서 수온의 증가 추세가 뚜렷하긴 하지만 선형 증가 추세로만 수온의 장기 변화를 설명하기에는 부족함이 있다. 제 1모드에서 보이는 경년변동성은 표층수온이 1970년대에 꾸준히 증가하는 추세였으나 1979년에서 1980년 사이에 일어난 급격한 하강으로 상승 추세가 이어지지 못했으며 1986년부터 1988년 사이에 나타난 상승이 1990년대 이후 표층수온이 높은 것에 크게 작용했음을 나타낸다.

총분산의 10%를 차지하는 제 2모드 시간계수는 1970년대 후반 이전까지는 큰 변동 없이 0보다 작은 값이 보이다가 1970년대 후반과 1980년대 초반 사이에 급격한 증감을 보인다(Fig. 6b). 즉, 1977년부터 증가하여 1979년 초반에 가장 높으며 이후 감소하여 1980년 초에 가장 낮은 값을 갖고 다시 증가한다. 1980년대 후반기에는 1986년과 1988년에 낮은 값을 갖는 반면 1987년에는 높은 값을 갖는 2년 주기의 변동성이 보인다. 1995년 이후에는 1996년경과 2002년경의 2년 주기의 변동성과 함께 전체적으로 감소하는 경향이 보인다.

제 2모드 고유벡터는 속초와 주문진을 제외한 동해안의 정점과 남해 서쪽에 위치한 정점(당사도, 죽도)에서 음의 값을 가지며 황해에 위치한 정점과 제주에서는 양의 값을 갖는다(Fig. 6a). 이는 제 2모드에서 표현되는 수온 변화가 황해의 정점과 남해 서쪽의 정점에서 반대로 나타난다는 것을 의미하며, 한국 남서 해역의 표층수온구배의 변동성을 표현한다고 생각된다. 한편 동해안 북쪽의 속초와 주문진의 부호가 울기, 감포 등 남쪽 정점의 부호와 반대인 것은 동해안에 나타나는 남북 표층수온구배의 변동성을 표현하는 것으로 판단된다.

제 2모드가 해역별 표층수온구배의 변화를 설명하는 것을 확인하기 위해 속초와 울기의 표층수온편차의 차이 및

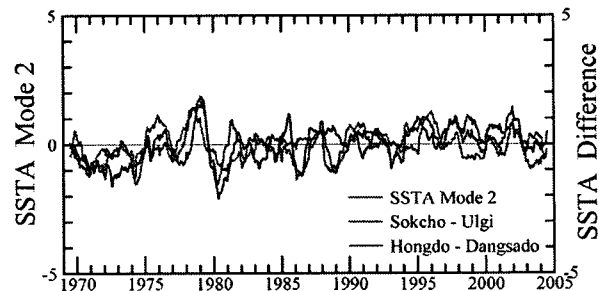


Fig. 7. 1-year running means of time coefficients of the second EOF mode for SSTA (green), the differences of SSTA between Sokcho and Ulgi (Sokcho minus Ulgi, blue) and between Hongdo and Dangsado (Hongdo minus Dangsado, red).

홍도와 당사도의 표층수온편차의 차이의 1년 이동 평균과 제 2모드 시간계수의 1년 이동 평균을 비교하였다(Fig. 7). 제 2모드 시간계수의 변화는 1980년대 전반에서 중반 사이에는 홍도와 당사도의 표층수온편차 차이의 변화와 다른 양상을 보이고 1988년경에는 속초와 울기의 수온편차 차이의 변화와 다른 양상을 보이는 등 서로 일치하지 않는 경우가 있다. 그럼에도 제 2모드에 나타나는 전반적인 경년변동성은 동해안 남북의 표층수온구배 및 한국 남서 해역의 표층수온구배의 변동성과 비슷한 양상을 보인다.

**기온의 변동성**

표층수온편차에 적용했던 것과 동일한 방법으로 15개 정점에서 관측된 기온의 편차에 대해 EOF 분석을 하였다(Fig. 8). 표층수온을 관측한 정점에서 측정된 기온 자료를 이용하는 것이 비록 타당하나 표층수온 관측 정점에서 동일 기간 동안 기온이 측정되지 않은 경우가 많아 내륙 지

방의 기온 자료도 함께 이용하였다. 제 1모드 시간계수의 선형회귀도는 0.16/year로 고유벡터의 크기를 고려하면 약 0.030~0.045°C/year의 기온 상승에 해당한다. 1년 이동 평균의 경년변동 특징은 표층수온편차의 제1모드 시간계수의 1년 이동 평균의 특징과 매우 유사하여 제 1모드는 표

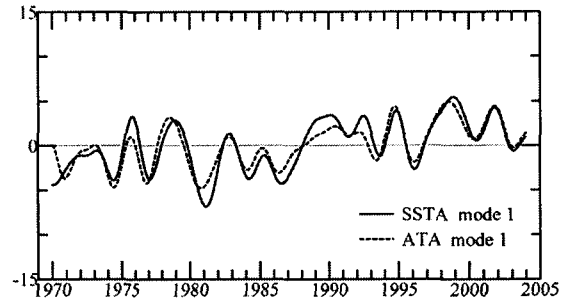


Fig. 9. Comparison between the first EOF modes of SSTA (solid) and air temperature anomaly (dashed). Both time coefficients are low-pass filtered to retain periods longer than 2 years.

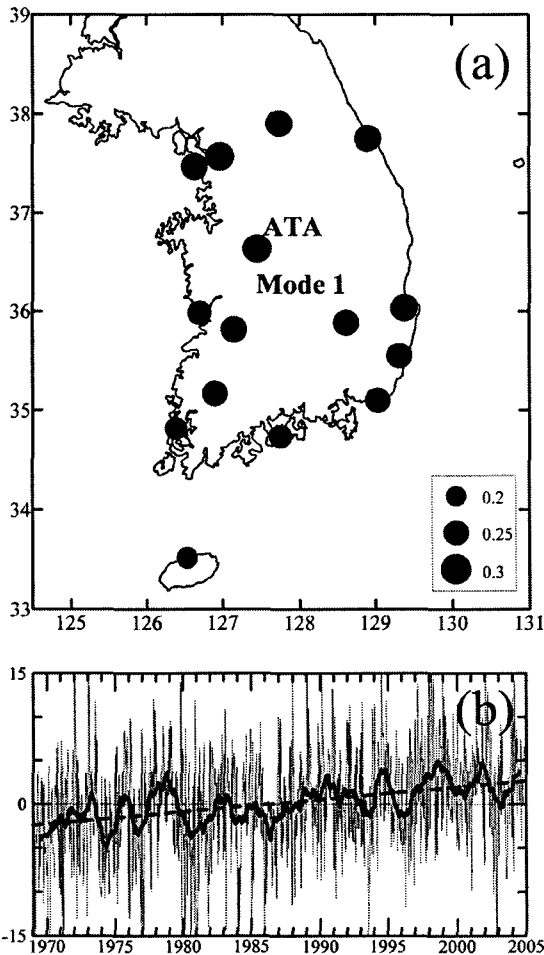


Fig. 8. Same as Fig. 5, but for air temperature anomaly.

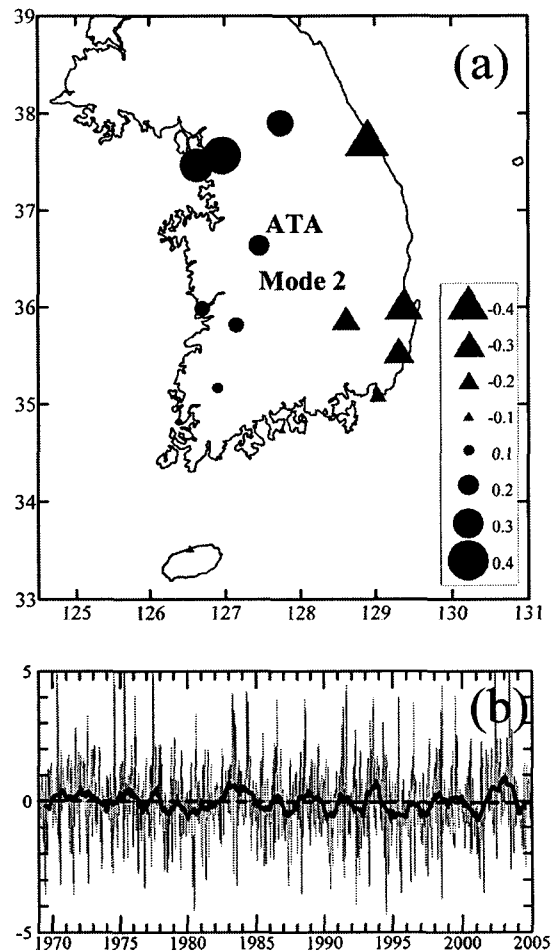


Fig. 10. Same as Fig. 8, but for the second EOF mode.

층수온의 경년변동과 기온의 경년변동의 상관도가 매우 높음을 설명한다. 그러나 일부 다른 형태도 보여 1975년경의 변화와 1980~1981년경의 변화가 표층수온편차의 제 1모드에 비해 작게 나타났으며 표층수온편차가 1986년부터 1988년까지 급격하게 상승했음에 비해 기온은 1986년부터 1990년까지 완만하게 상승했다(Fig. 9). 한편 기온편차의 제 1모드는 총분산의 88%를 설명하여 표층수온편차의 제 1모드가 39%를 설명함에 비해 차지하는 비율이 매우 크다. 또한 기온편차의 제 1모드 고유벡터의 성분은 0.2~0.3로 표층수온편차의 제 1모드 고유벡터의 성분이 0.1~0.3임에 비해 성분간 크기 차이가 작다. 이는 기온편차의 경우 지역에 따른 변화 양상 차이가 작음에 비해 표층수온편차의 경우는 해역에 따른 변화 양상 차이가 기온편차보다 큼을 반영한다.

총분산의 5%를 차지하는 제 2모드의 고유벡터에서 서쪽 정점의 부호는 동쪽과 남쪽 정점의 부호와 반대이다(Fig. 10a). 이러한 반대 양상은 표층수온편차의 제 2모드(Fig. 6a)에서도 보이므로 제 2모드 사이에 상관관계가 있을 가능성이 있다. 기온편차의 제 2모드에서 보이는 1980년대 중반부터 1990년 중반까지 기간 동안의 경년변동성은 표층수온편차의 제 2모드에서 보이는 경년변동성과 유사하나 1980년대 후반의 경년변동성의 크기가 상대적으로 작다. 또한 표층수온편차에서 보이는 1977년부터 1981년까지 기간의 큰 변동성은 보이지 않는다. 이는 표층수온편차의 제 2모드에 보이는 경년변동성이 기온 변동성만으로는 설명되지 않음을 의미한다.

#### 4. 요약 및 토의

한국 연안의 27개 정점의 표층수온을 분석한 결과, 1969년부터 2004년까지 수온의 선형 증가 추세는 우도를 제외한 정점에서 0.01~0.06°C/year로 나타났다. 선형 증가 추세는 동해안의 정점에서 가장 컸으며 한국 남서 해역의 정점에서 상대적으로 작았다. 전반적인 상승 추세와 함께 약 3~5년 주기의 경년변동 역시 뚜렷하게 나타났다. 표층수온은 1970년대에 꾸준히 증가하였으며 1979년부터 1980년 사이에 일어난 하강 이후 1980년대 중반까지 표층수온의 증가 추세가 크지 않았으며 1980년대 후반에 급격히 상승한 이후 최근까지 높은 수온이 유지되었다.

표층수온의 증가 추세는 3월 후반과 11월 중반부터 1월 중반까지 컸으며 특히 12월에 가장 컸다. 반면에 7월부터 9월까지는 증가 경향이 뚜렷하지 않았다. 겨울에 나타나는 최저 표층수온은 일부 정점을 제외한 대부분 정점에서 0.25°C/year 이상으로 증가하는 경향이 뚜렷하여 기존의 연구 결과(Kang 2000)와 일치하나 여름철 표층수온 하강을 주장한 기존의 연구 결과(Kang 2000)와 달리 여름의

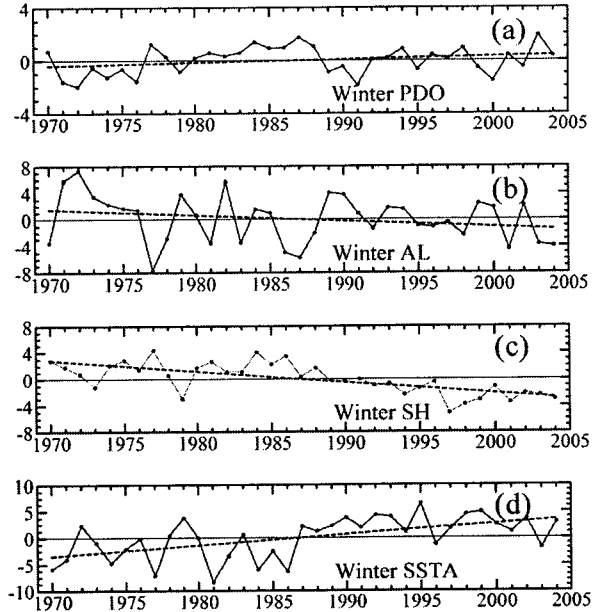


Fig. 11. Temporal variations of the Pacific Decadal Oscillation index (PDO), the Aleutian Low (AL), the Siberian High (SH) and time coefficients of the first EOF mode for SSTA averaged during winter (December to February).

최고 표층수온의 증가나 감소는 뚜렷하지 않았다. 여름철 최고 표층수온과 겨울철 최저 표층수온의 차인 연변동폭은 줄어드는 경향이 나타났으며 이는 주로 겨울철 최저 표층수온의 증가에 의한 것으로 판단된다.

한국 연안의 표층수온의 변화는 북태평양의 표층수온의 변화와 관련이 있을 수 있다. 뚜렷하게 나타나는 겨울철 표층수온의 변화와 북태평양의 표층수온의 변화의 연관성을 12월부터 2월까지 겨울철 PDO지수(Pacific Decadal Oscillation Index)를 평균한 값과 같은 기간 동안 표층수온편차의 EOF 제 1모드의 시간계수를 평균한 값의 해에 따른 변동성 비교를 통해 조사한 결과, 5년 이내의 짧은 경년변동에서 한국연안의 겨울철 표층수온이 높은 해에 PDO 지수가 낮은 양상이 보였다(Fig. 11). 북태평양의 수온이 높을 때 PDO 지수는 낮으므로 이는 한국연안의 표층수온과 북태평양의 표층수온의 경년변동이 관련이 있음을 의미한다. 그러나 PDO 지수의 선형 변화 추세는 감소한다기 보다는 오히려 증가하는 경향을 보여 북태평양 표층수온의 선형 변화 추세와 한국 연안의 표층수온의 선형 변화 추세는 반대로 나타난다. 따라서 비교적 짧은 기간의 경년변동성에서 PDO 지수와 표층수온편차의 EOF 제 1모드의 시간계수의 연관성은 높지만 1970년대부터 최근까지 한국 연안의 겨울철 표층수온이 상승한 현상은 PDO 지수로 나타난 북태평양의 표층수온 변화와 관련성이 크



지 않은 것으로 판단된다.

한국 연안 겨울철 표층수온에 영향을 미칠 수 있는 대기 조건으로 시베리아 고기압(Siberian High)과 알류산 저기압(Aleutian Low)을 들 수 있다. 일반적으로 시베리아 고기압과 알류산 저기압이 강할수록 한국 연안 해역에서 해양에서 대기로 열 손실이 커 겨울철 표층수온이 하강하게 된다. 겨울철 평균 해수면기압에서 시베리아 고기압의 기압과 알류산 저기압의 기압이 낮아지는 경향이 보인다. 이는 시베리아 고기압의 강도는 약해지는 반면 알류산 저기압의 강도는 증가하는 경향이 있음을 의미한다. 그러므로, 1970년대 이후 나타나는 한국 연안의 겨울철 표층수온의 상승은 알류산 저기압의 변화와는 연관성이 적은 반면 시베리아 고기압의 약화와 연관성이 높다고 할 수 있다. 한편 겨울철 대기 조건을 나타내는 지수로서 Jhun and Lee(2004)가 제시한 동아시아 겨울 몬순 지수는 겨울철 표층수온의 상승 추세와 연관성을 보이지 않았다.

본 연구에서 연안에 위치한 정점에서 관측한 표층 수온을 분석하여 해역에 따른 표층수온의 분포와 변화 양상의 차이를 규명하였으나 한국 연안 해역의 전반적인 표층수온 분포나 변화 양상을 파악하기에는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해서는 동해, 남해, 황해에 걸쳐 정기적으로 관측된 정선 관측 자료 분석을 통해 한국 연안 해역의 표층수온의 경년변동성 및 장기 변화 경향을 파악해야 한다. 또한 연변동폭이 큰 표층수온과 연변동폭이 상대적으로 작은 아표층(subsurface) 해수의 수온은 연변동을 제거한 경년변동성에서 상관성이 높으므로(Kang and Kang 1991), 수심에 따른 수온의 변동성과 표층수온의 변동성의 비교가 이루어져야 한다. 이와 더불어 수괴 분석 등을 통하여 해역에 따른 표층수온 변화 양상의 차이를 유발할 수 있는 해수의 이류 등에 대하여 조사하여야 하며, 바람장 등 경계조건의 시간변동성을 고려한 수치실험을 통해 대기 조건 및 해수 순환의 변동성과 표층수온 변동성을 비교함으로써 표층수온의 변화 및 해역별 차이의 원인을 파악하고자 하는 연구가 필요하다.

## 사 사

이 연구에서 이용된 PDO지수는 “<http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>”의 자료를 이용하였으며 해수면기압은 “[http://jisao.washington.edu/data\\_sets/slp\\_ncar/#data](http://jisao.washington.edu/data_sets/slp_ncar/#data)”의 자료를 이용하였다. 이 연구는 “중장기 기후변화에 따른 동중국해 해양생태계 반응 예측 연구(PM39000)”와 “기후

변화에 따른 동해 해수순환과 중장기 변동 반응 및 예측 연구(PE97005)”의 일환으로 수행되었다.

## 참고문헌

- 기상청. 2001. 한국의 기후표. 2001. 632 p.
- 김철호, 김구. 1983. 한국 동해안에 출현하는 냉수괴의 특성과 기원. *한국해양학회지*, 18(1), 73-83.
- 노홍길, 김구. 1983. 제주와 목포, 제주와 완도간의 표면수온 변화. *한국해양학회지*, 18(1), 64-72
- 이승호. 2003. 우리나라 동서해안의 기온 차이에 관한 연구. *한국기상학회지*, 39(1), 43-57.
- Byun, S.-K. 1989. Sea surface cold water near the southeastern coast of Korea: wind effect. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 24(3), 121-131.
- Chang, K.I., M.S. Suk, I.-C. Pang, and W.J. Teague. 2000. Observation of the Cheju Current. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 35(3), 129-152.
- Hahn, S.D. 1994. SST warming of Korea coastal waters during 1881-1990. KODC Newsletter, 24, 29-38.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Bases. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. 881 p.
- Jhun, J.-G and E.-J. Lee. 2004. A new east Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon. *J. Climate*, 17, 711-726.
- Kang, Y.Q. 2000. Warming trend of coastal waters of Korea during recent 60 years (1936-1995). *J. Fish. Sci. Tech.*, 3(3,4), 173-179.
- Kang, Y.Q. and H.-E. Kang. 1991. Long-term fluctuations of water temperatures in the upper 200 m off the southeast coast of Korea. *Bull. Kor. Fish. Soc.*, 24(6), 450-458.
- Kang, Y.Q. and M.-S. Jin. 1984. Seasonal variation of surface temperatures in the neighboring seas of Korea. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 19(1), 31-35.
- Kim, K. and R. Legeckis. 1986. Branching of the Tsushima Current in 1981-1983. *Prog. Oceanogr.*, 17, 265-276.
- Lee, J.C. 1983. Variations of sea level and sea surface temperature associated with wind-induced upwelling in the southeast coast of Korea in summer. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 18(2), 149-160.
- Lee, J.C. and J.Y. Na. 1985. Structure of upwelling off the southeast coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 20(3), 6-19.

Received Nov. 15, 2006

Accepted Dec. 4, 2006