

Article

지난 130년 간 한반도 근해의 표층 수온 변화 경향

김성중* · 우성호 · 김백민 · 허순도

한국해양연구원 부설 극지연구소 극지기후연구부
(406-840) 인천광역시 인천우체국 사서함 32

Trends in Sea Surface Temperature (SST) Change Near the Korean Peninsula for the Past 130 Years

Seong-Joong Kim*, Sung-Ho Woo, Baek-Min Kim, and Soon-Do Hur

Division of Polar Climate Research, Korea Polar Research Institute
Incheon 406-840, Korea

Abstract : This study examined the change in sea surface temperature (SST) around the Korean peninsula since industrialization at year 1880, and its possible causes using observation based data from the Hadley Center, the Goddard Institute of Space Studies, and National Climate Data Center. Since year 1880, There have been multi-decadal fluctuations with a gradual reduction from 1880 to around 1940, and from 1950-1980. There has then been a marked increase from 1940-1950, and from 1980 to the present. The ocean surface warming is larger during the boreal winter than summer, and greater in the south. The multi-decadal SST fluctuations around the Korean Peninsula are largely consistent with the negative phase of the Pacific Decadal Oscillation (PDO), which fluctuates with periods of about 20-50 years. Secondly, the El Niño-Southern Oscillation (ENSO), whose long period component moves along with the PDO, appears to influence the SST near the Korean Peninsula, especially in recent decades. Overall, the SST around the Korean Peninsula has warmed since year 1880 by about 1°C, which is about twice the global-mean ocean surface warming. This long-term warming is aligned with an increase in greenhouse gas concentration, as well as local factors such as the PDO.

Key words : ocean climate change, sea surface temperature, Hadley Center, Goddard Institute of Space Studies, Pacific Decadal Oscillation

1. 서 론

한반도의 기후는 동해, 황해 그리고 남해에 의해 둘러싸여 있어서 해양의 수온 분포에 지대한 영향을 받는다. 한반도의 연중 기온변화가 다른 지역에 비해 뚜렷하고 위도에 따른 수온 변화가 크게 나타나는 이유도 한반도가 남쪽의 해양과 북쪽의 대륙 사이에 위치해 있어 아시아몬순의 영향을 지배적으로 받기 때문이다. 한반도 유역을

흐르는 해류는 대부분 적도 태평양에서 발원한 비교적 온난한 쿠로시오 해류로서 동중국해를 지나 북태평양으로 진입하는 중에 한반도의 남해를 통과하면서 한반도의 남부를 연중 대체로 온난한 상태로 유지시켜 주는 역할을 한다. 반면에 한반도의 북부는 겨울의 대륙성 찬 기단의 영향을 받고 수온도 남부에 비해 낮기 때문에 연중 큰 기온차이를 유발하고 있다.

한반도와 중국 사이에 위치하는 황해는 동중국해와 연결되어 있고 쿠로시오 해류 지류의 영향을 받으며(Lie and Cho 2002), 큰 반시계방향의 해류가 발달한다. 평균

*Corresponding author. E-mail : seongjkim@kopri.re.kr

수심이 약 45 m 정도로 낮아서 조류에 의한 혼합이 활발하고 외부의 기온변화에 민감히 반응하는 경향이 있다. 황해의 북부에서는 겨울철 시베리아 기단의 확장과 함께 1월 중 약 -10°C 의 기온을 보이는데 반해 남부에서는 약 3°C 의 기온을 보인다. Yeh and Kim (2010) 연구에 의하면 최근 수십년 동안 황해와 동중국해의 수온은 온난화 경향을 보이는데, 특히 1980년대 중반 이후부터 현재까지의 온난화가 두드러지는 것으로 나타난다.

동해는 태평양의 북서쪽에 위치한 반쯤 닫혀진 바다로서 쿠로시오 난류의 많은 양이 대한 해협을 통해 유입되어 동해의 남부를 따라 흐른다. 따라서 동해의 남부는 대체로 온난한 수온을 보이는데 반해 북부는 낮은 수온이 나타난다. 동해의 수온 변동은 연변화, 격년변동, 그리고 그 이상의 변동 등 다양한 주기를 가지고 변동하는 것으로 보고되고 있고(Park and Oh 2000; Minobe et al. 2004; Kim et al. 2001, 2004; Park 2007), 동해 주변의 바람장 변화, 동아시아 몬순, 그리고 해양-대기 상호작용 등이 이와 같은 수온 변동을 일으키는 주원인인 것으로 알려져 있다(Minobe et al. 2004). 최근의 연구에 의하면 동해 남부의 온난화 경향이 두드러지며 특히 겨울철의 온난화 경향이 여름에 비해 더 뚜렷한 것으로 보고되고 있다(Yeh et al. 2010).

앞에서 살펴본 바와 같이 한반도 주변의 해양은 대체로 온난한 경향을 나타내고 있다. 민과 김 (2006)은 한국 연안의 27개 정점 표층 수온(Sea surface temperature, SST)을 분석하여 1969년부터 2004년까지 연간 $0.01\sim 0.06^{\circ}\text{C}$ 의 수온이 증가했으며 특히 동해에서의 수온 증가가 다른 해역에 비해 컸으며 겨울의 수온 증가가 여름에 비해 더 컸음을 밝혔다. 또한 한반도 주변의 표층 수온 변화는 PDO(Pacific Decadal Oscillation)의 변동과 관련된 북태평양의 표층 수온과 연관되어 있음을 밝힌 바 있다. 최근의 다른 연구에 의하면 지난 37년 동안 한반도의 기온은 약 1.3°C 상승했으며 이에 반응하여 표층 수온은 0.97°C 상승한 것으로 나타났다(Jung 2008). 앞에 열거한 몇몇 논문에서 동해의 수온 변화는 1890년부터, 그리고 황해와 동중국해는 1950년도 이후의 한반도 주변 해양 수온 변화를 다루었는데, 한반도 주변 전체에 대한 장기 수온 변동의 경향과 수온 변동의 원인에 대한 연구는 다소 부족한 실정이다. 본 연구에서는 산업혁명 이후 현재까지 한반도 주변의 표층 수온 변화를 살펴보고 장기 수온 변동에 영향을 미친 요인들을 기술하고자 한다.

2. 자료 및 방법

본 연구에는 Met Office Hadley Centre와 뉴욕의 Goddard Institute for Space Studies(GISS) 그리고

National Climate Data Center(NCDC)에서 제공하는 수온 자료를 이용하였다. 자료는 모두 웹에서 제공되는데, Hadley Center 표층 수온 자료(HadISST; Rayner et al. 2003)는 <http://hadobs.metoffice.com/hadisst/data/download.html>에서, GISS 표층 수온 자료(GISS SST; Hansen et al. 2010)는 <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>에서, 마지막으로 NCDC Extended Reconstruction Sea Surface Temperature version3(ERSST; Smith et al. 2008)는 <http://www.ncdc.noaa.gov/ersst/#grid>에서 수집하여 사용하였다. 세 자료 모두 월평균 자료이고 HadISST와 GISS SST는 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 그리고 ERSST 자료는 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 의 공간 해상도를 가진다. 자료의 분석 기간은 두 자료의 기간을 맞추기 위해 1880년부터 2009년까지 총 130년이다. 연구에 사용된 수온의 편차(anomaly) 자료는 세 자료 모두 1951-1990년의 각 월별 평균장을 제거하여 얻어졌다.

한반도 주변 표층 수온 변화의 원인을 분석하기 위하여 여러 자료가 사용되었다. 해양 순환장 변화와의 상관관계를 조사하기 위해 NCEP Global Ocean Data Assimilation System(GODAS)의 남북방향 해류 속도 자료가 사용되었다. 자료의 공간 해상도는 약 $1^{\circ}\times 0.33^{\circ}$ 이고 한반도 주변 수온과의 관계는 자료가 허락하는 1980년부터 2009년까지 기간에 대하여 조사하였다. 한반도 주변 수온의 시계열과 대규모 기후지수(Climat index)들 사이의 상관관계를 조사하기 위해 엘니뇨 남방 진동(Elniño-Southern Oscillation, ENSO)과 Pacific Decadal Oscillation(PDO) 지수가 사용되었다. PDO는 20°N 이상 북쪽 태평양의 월별 수온 편차의 경험적직교함수(Empirical Othogonal Function)의 주성분 시계열(principal component time series)로 정의 된다(Zhang et al. 1997). 지수는 Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean (JISAO) 웹사이트(<http://jisao.washington.edu/pdo>)로부터 제공 받아 사용하였다. ENSO 지수는 NINO 3.4 지역(남위 5° ~북위 5° , 서경 170° ~서경 120°)의 평균된 수온 편차 시계열을 5개월 이동 평균한 것으로 정의하였다.

표층 수온 변화 값들의 통계적 유의성을 확인하기 위하여 신뢰도 검사를 수행하였으며, 한반도 남쪽에서 유입되는 해류의 변화가 표층 수온에 얼마만큼 영향을 미치는지 조사하기 위하여 선형 회귀 분석을 수행하였다.

3. 결 과

수온 변화 경향

Fig. 1은 HadISST에서 얻어진 한반도 주변의 지난 130년간의(1880-2009) 표층 수온 변화 경향(trend)과 1980년부터 2009년까지 최근의 수온 변화 경향을 보여주고 있다. HadISST를 기준으로 봤을 때, 한반도 주변에서 온난

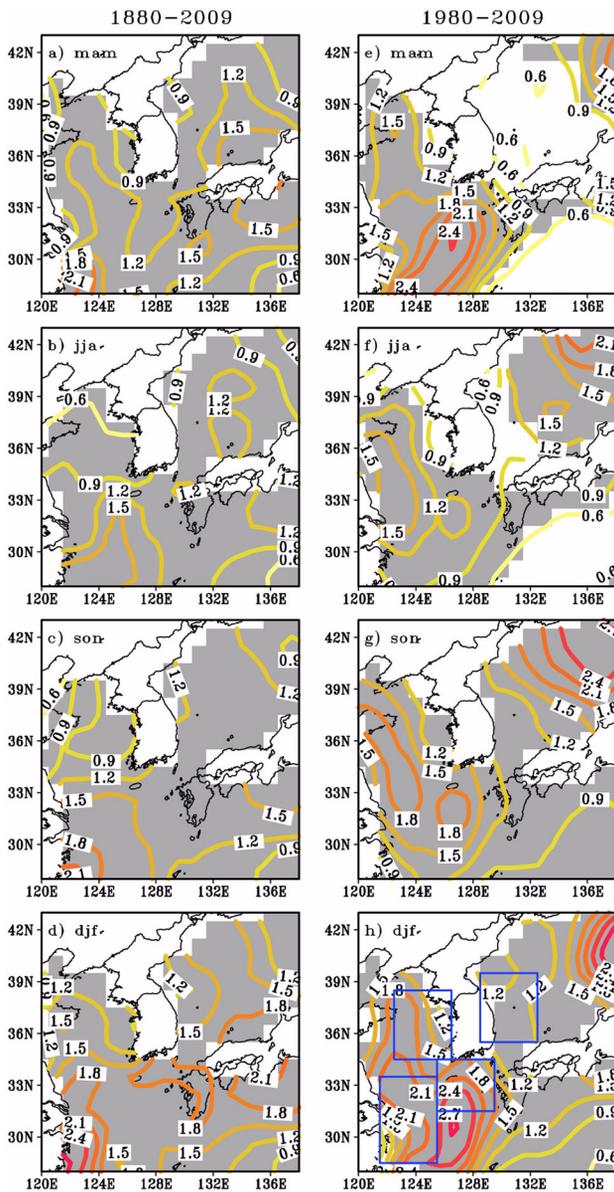


Fig. 1. The ($^{\circ}\text{C}/\text{period}$) seasonal mean SST anomaly (Hadley Center SST) near Korean Peninsula during 1880-2009 (left column), and 1980-2009 (right column). The shading indicates a region statistically significant above the 95% confidence level. Blue boxes in h) indicate the area over western (122.5-126.5E 34.5-38.5N), southern (125.5-129.5E 31.5-34.5N), and eastern (128.5-132.5E 35.5-39.5N) and South China Sea (121.5-125.5E 28.5-33.5N), respectively

화가 가장 크게 나타나는 지역은 남해이며 모든 계절에 지난 130년 동안 평균 1.2°C 이상의 수온 상승을 보인다. 두 번째로 온난화가 크게 나타나는 곳은 동해로서 특히, 동해의 남부에서 온난화가 크게 나타나며 동해 북부로 온난화가 전과되어가는 경향을 보인다. 하지만 동해의 한반

도 근해에서는 온난화가 상대적으로 작게 나타나고 있다. 황해에서도 다른 해역에 비해 온난화가 상대적으로 작게 나타나는데, 황해의 북부에서 겨울철을 제외하고는 온난화가 지난 130년 동안 1°C 이하로 작게 나타나며 특히, 여름철의 온난화가 작은 경향을 보인다(Fig. 1). 전체적으로 지난 130년 동안 계절에 따른 표층 수온 변화의 경향을 보면, 북반구 겨울의 수온 증가가 여름에 비해 크게 나타남을 알 수 있다. 한반도 남해와 동해 남부 그리고 중부를 따라 1.6°C 이상의 수온 상승을 보이지만 한반도 연안에서는 공통적으로 겨울철 온난화가 약해지는 경향이 있다. 여름에는 겨울과 수온 변화 패턴은 비슷하게 나타나지만 겨울에 비해 수온 증가율이 작으며, 특히 발해만에서는 지난 세기동안 거의 온난화가 나타나지 않았음을 알 수 있다. Yeh et al. (2010)의 연구결과에서도 동해의 겨울철 수온 증가가 여름에 비해 더 크게 나타났다.

최근 수십년간의 한반도 주변 수온 증가 경향이 지난 130년간의 수온 증가 경향과 어떤 차이가 있는지 살펴보기 위하여 1980년 이후의 수온 증가 경향을 나타내 보았다(Fig. 1e-h). 1880년 이후에서 현재까지의 수온 증가 경향에 비해 1980년도 이후 한반도 주변의 수온 증가가 대체로 크게 나타남을 알 수 있다. 최근 30년간 봄철과 겨울철의 수온 증가가 남해와 동중국해에서 크게 나타나며, 가장 큰 온난화가 제주도 남부에서 나타나는데, 30년간 봄철에 최대 2.4°C 증가했고 겨울철에는 최대 2.7°C 증가가 나타난다.

HadISST를 사용한 표층 수온 경향 분석 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 GISS SST와 ERSST를 조사해 보았다(Fig. 2, 3). GISS SST는 최근 수십년을 제외하고는 HadISST를 생산하기 위해 이용된 비슷한 기원의 관측 자료를 이용해 재분석했기 때문에 HadISST와 대체로 비슷한 수온 변화 경향을 보인다. 하지만 1980년도 이후의 수온 변화 경향을 확인해 본 결과, HadISST에서 나타난 결과와는 달리, GISS SST에서는 가장 큰 증가가 봄철의 동중국해에서 나타났으며, 두 번째로 큰 수온 증가가 여름철 동중국해 그리고 가을철 동해 북부에서 나타나 HadISST에서 보여주는 경향과 다소 차이가 있음을 알 수 있다. ERSST에서 얻어진 경향은 HadISST나 GISS SST에 비해 대체로 단조로운 경향성이 나타나며, 수온 변화의 크기도 대체로 작게 나타난다(Fig. 3). 이러한 HadISST와 ERSST의 차이는 해상도의 차이와도 일정부분 연관이 있다고 여겨진다. 앞의 3개 자료를 바탕으로 얻어진 한반도 주변의 표층 수온 변화 경향은 지역에 따라 다소간의 차이가 나타나지만 전체적으로 온난화 방향으로의 경향성은 일치하고 있다.

Fig. 4는 1880년 이후부터 2009년까지의 계절별 한반도 주변(동경 122.5도~동경 132.5도, 북위 31.5도~북위

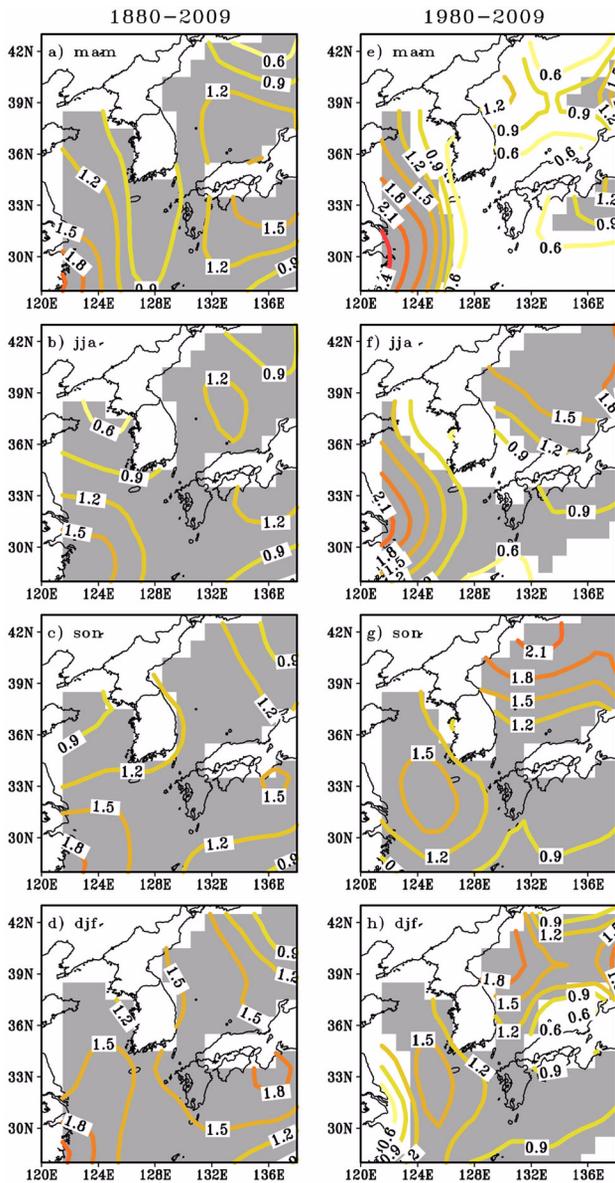


Fig. 2. Same as Fig. 1 but for Goddard Institute for Space Studies (GISS) sea surface temperature (SST) dataset

39.5도) 평균 수온의 시간변화를 보여주며, 장주기 변화를 보기 위하여 5년 이동 평균한 그래프도 나타냈다. HadISST는 검정색으로, GISS SST는 파란색으로, ERSST는 빨간색으로 나타내었다. 앞에서 언급했던 바와 같이 최근 HadISST와 GISS SST는 20여년을 제외하고 사계절 모두에서 두 자료의 차이는 거의 없음을 알 수 있다. 하지만 HadISST와 ERSST는 많은 기간에서 불일치를 보이고 있다. 특히 1900년대부터 1950년대 여름철에는 ERSST가 HadISST보다 대체로 낮게 나타난다. 이러한 불일치는 HadISST와 ERSST 사이의 자료를 가공하여 격자화하는 방법의 차이가 중요한 원인일 수 있다. 또한 ERSST의 해

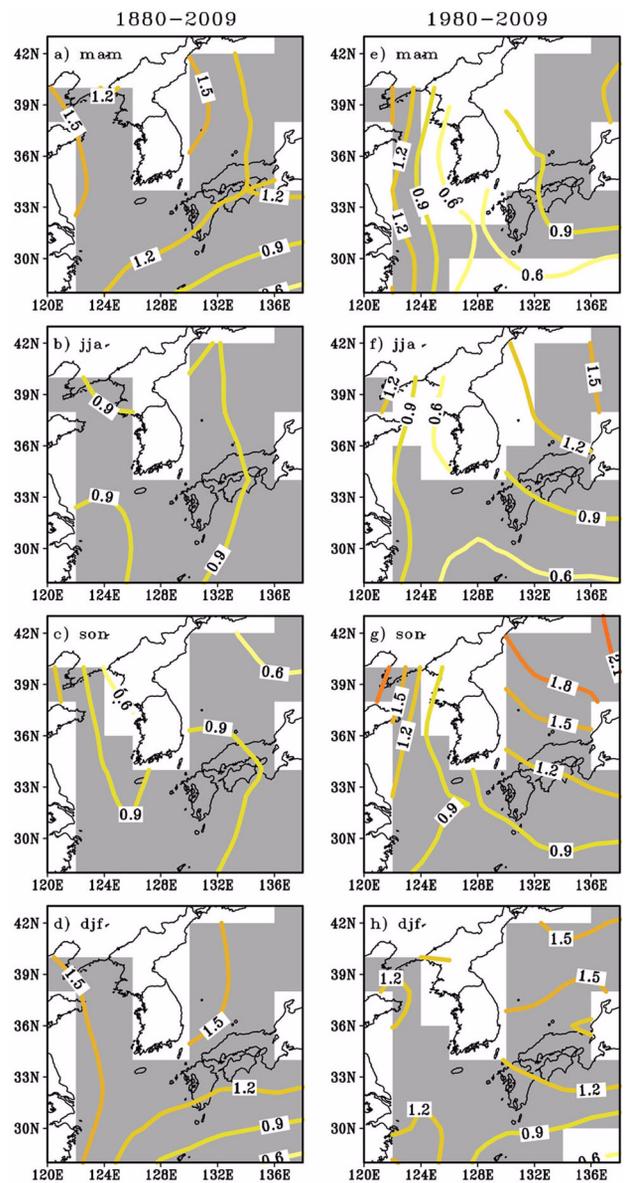


Fig. 3. Same as Fig. 1 but for Extended Reconstructed sea surface temperature (ERSST) dataset

상도는 HadISST에 비해 해상도가 낮기 때문에 관측 자료를 격자화 할 때 HadISST에 비해 실제 관측치보다 과소하게 산출할 가능성도 있다. 두 자료간 동화 품질의 비교우위를 결정하기는 쉽지 않지만 전체적으로 두 자료에서 보여주는 한반도 주변의 수온 변화 경향은 지난 세기동안 모든 계절에 1°C 이상 증가했고, 현재로 오면서 수온의 증가 경향은 강해진다(Fig. 4).

HadISST를 중심으로 한반도 주변의 계절별 표층 수온 변화 경향을 보면, 봄철에 한반도 주변 모든 해역에서 1900년까지 수온이 완만히 증가하다가, 이후 1930년대 말까지는 다시 완만히 감소한다. 1930년대 말부터 1950년까지 급격히 수온이 증가하는 경향을 보이다가 1950년에서

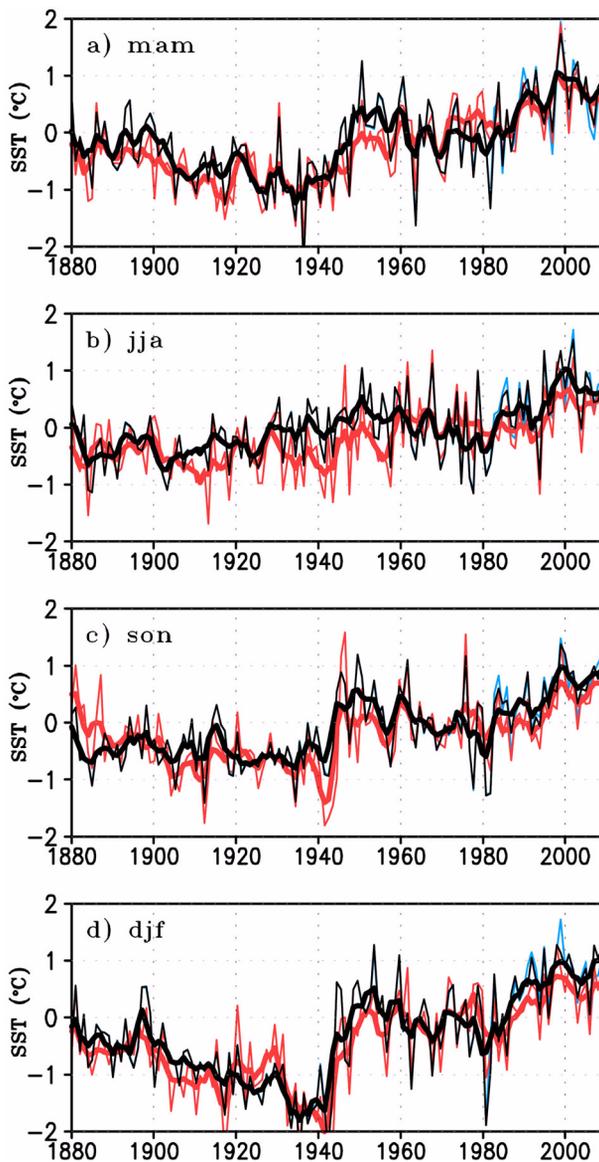


Fig. 4. A time series of the seasonal mean sea surface temperature (SST) anomaly averaged over the ocean near the Korean Peninsula (122.5-132.5E, 31.5-39.5N) for a) spring, b) summer, c) autumn, and d) winter. The black, blue and red lines indicate Hadley Center surface temperature (SST), Goddard Institute for Space Studies (GISS) SST and Extended Reconstructed (ER) SST, respectively. The black and red thick lines are 5 year running mean for Hadley Center SST and ERSST, respectively

1980년까지는 몇 차례의 상승과 하강의 기복을 거쳐 수온이 대체로 감소하는 경향을 보인다. 1980년부터 1998년까지 급격한 수온 증가를 보이다가 이후 현재까지 수온이 다소 감소하는 경향을 보이고 있다(Fig. 4a). 전체적으로 지난 세기동안 봄철의 한반도 주변 수온은 최소 -2°C 에

서 최대 $+2^{\circ}\text{C}$ 까지 약 4°C 정도의 진폭을 가지고 변동하고 있다.

여름철의 한반도 주변 수온 변화는 봄철과는 다른 경향을 보이는데, 봄철에는 1940년도까지 대체로 완만한 수온 감소를 보인데 반해, 여름철에는 1880대 초 몇 년을 제외하고는 1950년까지 완만한 상승을 보이고 있다(Fig. 4b). 이후 1980년까지는 지속적 수온 하강을 보이고, 2000년까지는 급격한 상승을 보이다가 이후 현재까지는 수온 하강이 나타나고 있는데, 1950년도 이후의 여름철 한반도 주변 수온 변화 경향은 봄철의 경향과 유사한 형태이다. 시간에 따른 여름철 한반도 주변 수온 변화 폭은 최소 -1°C 에서 최대 1.5°C 로 최대 약 2.5°C 의 변화폭을 보이는데, 봄철의 변화폭(4°C)에 비해 여름철 수온의 변화가 작게 나타남을 알 수 있다.

가을철 표층 수온 변화 경향은 1940년도 이후에는 봄철과 비슷한 경향을 보이지만, 1940년 이전까지는 다른 경향을 보인다. 1880년대 초 몇 년간 수온이 하강하다가, 이후 1940년까지는 특별한 수온 변화 경향을 보이지 않는다. 1950년까지 급격한 수온 증가를 보이다가 1980년도까지는 완만한 수온 감소가 나타나는데, 이는 특히 황해에서 1980년경의 수온 감소가 중요한 역할을 한 것으로 생각된다. 이후 2000년까지는 수온이 증가하고 2000년 이후 현재까지 감소하는 경향으로 다른 계절과 유사한 패턴이다. 지난세기 동안 한반도 주변의 가을철 수온 변동 폭은 -1.5°C 에서 최대 $+1.5^{\circ}\text{C}$ 로 여름과 봄의 중간정도이다.

겨울철 한반도 주변의 수온 변화에 대한 전체적인 변화 경향을 보면, 1880년대 말에 일시적으로 수온이 상승하는 경향이 나타나기도 하지만 1940년까지 지속적으로 수온이 하강하는 경향을 보인다. 1950년까지 급격한 증가를 보이고, 1980년까지 완만한 하강을 하다가 2000년까지는 상승하는 경향을 보이고 이후 현재까지 완만한 수온 하강을 보인다. 겨울철 수온 변화 경향에서 알 수 있는 특징은 수온 하강은 대체로 완만하게 이루어지지만 수온 상승은 급격히 일어나는 전형적인 톱니바퀴(Saw Tooth) 형태의 수온 변화 특징을 보인다. 수온의 연간 변동 폭도 최소 -2.5°C 에서 최대 $+2^{\circ}\text{C}$ 정도로 지난 세기동안 다른 계절에 비해 가장 크게 나타나는데, 예를 들어 1940년경에는 최소 -2°C 이하의 낮은 수온을 보이다가 이듬해에 0.5°C 이상의 수온 상승이 나타나 2년 동안 2.5°C 정도의 수온 변화를 보여 주어 다른 계절에 비해 수온의 변동 폭이 매우 크게 나타남을 알 수 있다. 1880년 이후 한반도 주변의 수온 변화 경향에서 모든 계절에 공통적으로 나타나는 특징은 1940년도 이후 1950년경까지 수온 상승이 나타나고 1980년까지 하강하고 2000년까지 상승하다 다시 하강하는 추세이다. 1940년도 이전까지는 계절에 따라 수온

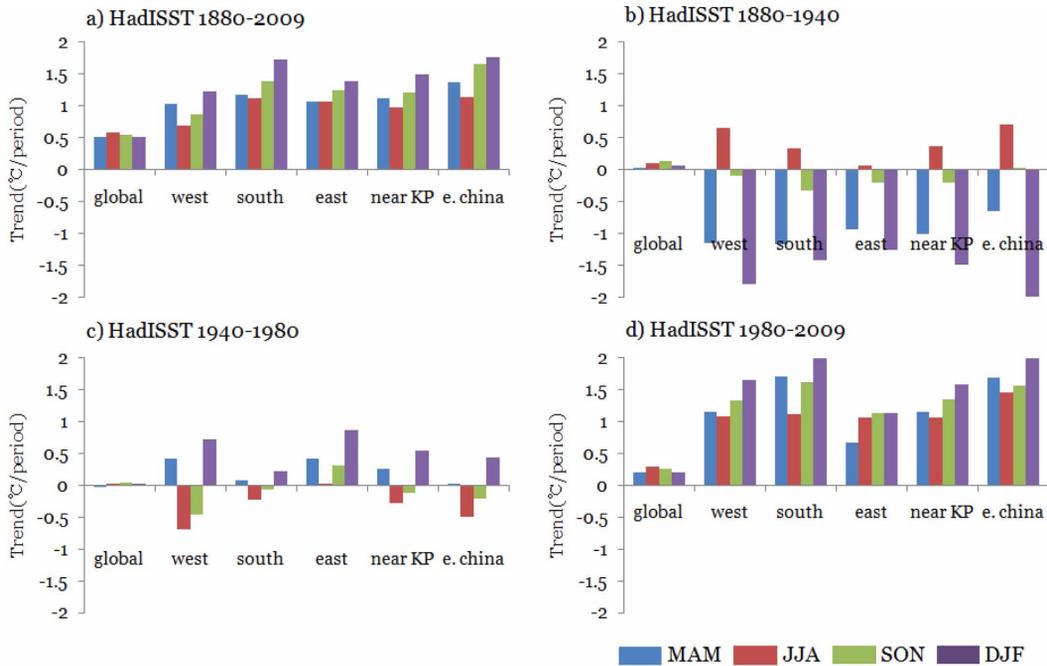


Fig. 5. A comparison of regional SST anomalies (Hadley Center SST) for a) 1880-2009, b) 1880-1940, c) 1940-1980, and d) 1980-2009

변화 경향이 다르게 나타나고 있다.

한반도 주변의 수온 변화 경향을 자세히 조사하기 위하여 한반도 주변을 4개 해역으로 구분하였다(Fig. 1h). 황해는 동경 122.5도에서 126.5도까지, 북위 34.5도에서 북위 38.5도, 동해는 동경 128.5도~132.5도, 북위 35.5도~39.5도, 남해는 동경 125.5도~129.5도, 북위 31.5도~34.5도, 그리고 동중국해는 동경 121.5도~125.5도, 북위 28.5도~33.5도의 해역으로 대표했다. Fig. 5는 HadISST로부터 얻어진 해역별, 기간별, 그리고 계절별로 한반도 주변과 전지구 평균 수온 변화 경향을 요약해서 보여주고 있다. 1880년에서 2009년까지 전체 기간 동안 모든 해역에서 온난화가 나타나는데, 가장 큰 온난화는 겨울철 남해에서(약 1.7°C/130년) 나타나고 여름철의 수온 상승이 가장 작게 나타난다. 특히 한반도 주변의 수온 상승은 전지구 평균 수온 변화 경향(약 0.5°C/130년)에 비해 약 3배정도 빠르게 수온이 증가하는 것으로 나타난다.

기간별로 나누어 수온 변화 경향을 분석해본 결과, 1880년에서 1940년까지는 여름을 제외하고 모든 계절의 모든 해역에서 수온 하강이 나타났으며, 특히 겨울의 수온이 황해에서 60년간 약 1.7°C 하강했고, 남해에서도 60년간 약 1.5°C의 수온 하강이 관측되었다. 두 번째로 큰 수온 하강은 봄철에 모든 해역에서 나타났으며, 가을에는 수온 변화가 거의 없는 것으로 나타난다. 여름철에는 황해에서 60년간 약 0.6°C 정도 수온이 상승하는 것으로 나타난다. 1940년에서 1980년 동안은 겨울철 수온이

동해와 황해에서 40년간 약 0.5°C 정도 상승하는 것으로 나타나는데 반해 여름철 수온은 황해에서 약 0.5°C 정도 하강하는 것으로 나타난다. 이 기간 동안 전지구 평균 수온은 큰 변화가 없는 것으로 나타난다. 앞의 수온 변화 경향의 공간분포에서 살펴본 바와 같이 1980년에서 2009년까지 마지막 30년 동안 한반도 주변의 수온 변동이 가장 크게 나타나는데, 겨울철 남해에서 2°C 정도로 가장 크게 상승하는 것으로 나타났다.

한반도 주변 수온 변화의 원인

한반도 주변의 수십년 주기의 수온 변동에 지배적으로 영향을 주는 요인으로는 PDO를 들 수 있다. PDO는 북위 20도에서 북극까지 표층 수온의 경험적교함수의 첫번째 모드의 주성분 시계열을 나타내는 것으로, PDO의 위상이 양일 때 북서태평양은 평년보다 수온이 내려가고 음의 상태 일 때는 올라가는 공간 분포를 보이며, 태평양의 수온이 짧게는 15-25년 주기로 길게는 50-70년 주기로 변동하는 것으로 알려져 있다(Mantua 1997). 좀 더 짧은 주기의 수온 변동에 영향을 주는 요인으로 ENSO를 들 수 있는데, ENSO는 전형적으로 2년에서 7년의 주기를 가지고 변동하는 것으로 알려져 있으며 ENSO의 장주기 변동도 장기적인 수온 변동에 영향을 끼칠 것으로 여겨진다.

표층 수온 변동의 위상과 PDO, ENSO의 위상이 일치하는지 조사하기 위하여 계절 평균 수온 변동과 지수들을 비교하였고(Fig. 6), 장기 수온 변동과 이들 지수들의 관

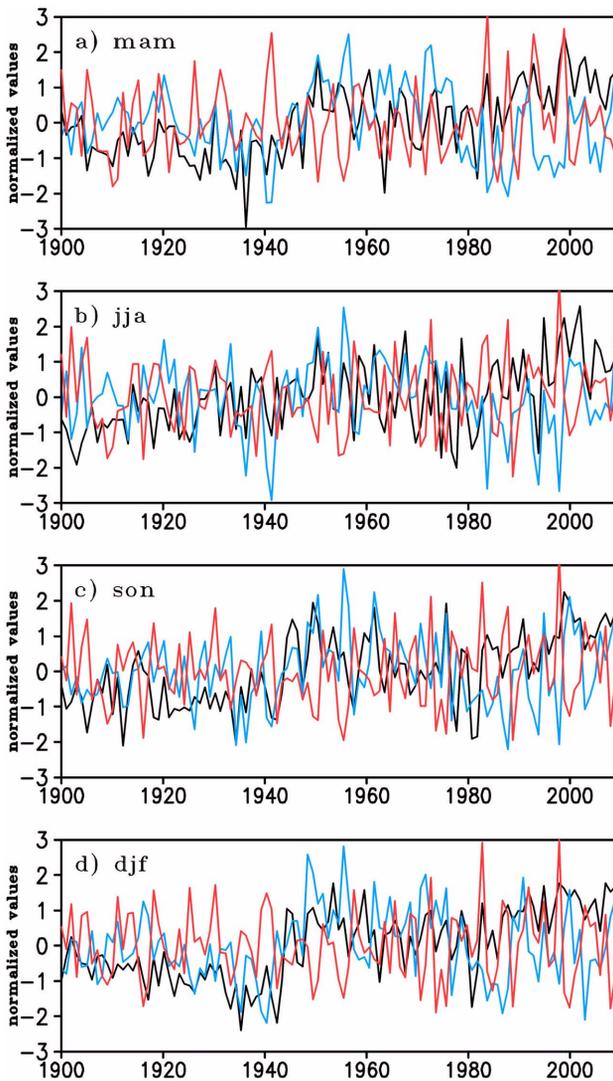


Fig. 6. A comparison between a time series of averaged SST anomalies near the Korean Peninsula (black), PDO (blue) and ENSO (red) index. The PDO index is represented by a multiplied minus sign for clarity

계를 보기 위하여 10년 이상 장주기 성분만을 필터하여 비교하였다(Fig. 7). PDO의 변동 양상을 살펴보면(비교의 편의를 위해 PDO 지수에 -를 곱하였음), 변동 폭의 차이는 있지만 모든 계절에 1900년대부터 1940년까지 PDO의 위상이 감소하는 경향을 보이다가 1940년대에 급격히 증가하는 경향을 보인다. 이후 계절에 따라 다소 차이는 있지만 완만한 감소를 유지하다가 1970년도 중반에 급격히 감소했다가 1980년대 중반부터 다시 증가하는 경향을 보인다. 수온의 장주기 변동성을 보면, 1970년대 중반까지는 모든 계절에 PDO 지수와 대체로 잘 일치함을 알 수 있다. 관측에서 보이는 1920년에서 1940년 동안의 완만한 수온 하강과 1940년에서 1950년까지의 급격한 수온

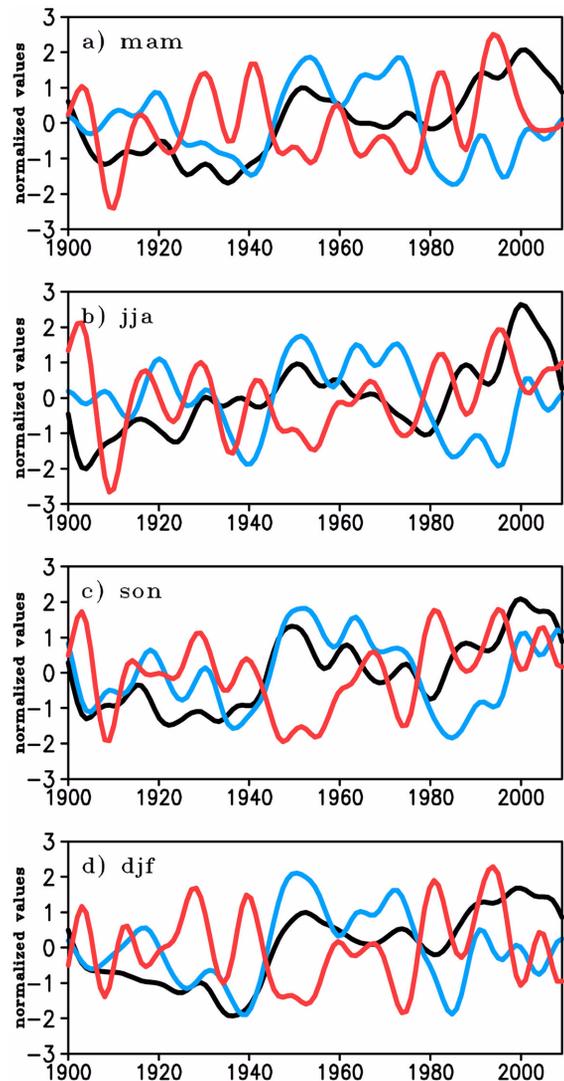


Fig. 7. A comparison between a low-pass-filtered time series of averaged SST anomalies near the Korean Peninsula (black), PDO (blue) and ENSO (red) index. The PDO index is represented by a multiplied minus sign for clarity

상승은 매우 잘 일치하고 있다. 1950년 이후부터 1980년도까지의 완만한 수온 하강 경향은 가을철과 겨울철 PDO의 변동 패턴과는 잘 일치하지만 이 기간의 봄철과 여름철 PDO는 뚜렷한 경향성 없이 진동하다가 1970년대 중반 이후 급격히 하강한다(Fig. 7). 계절적으로 보면, 표준 수온 경향은 가을과 겨울철에 PDO와 가장 잘 일치하는 것으로 나타난다. 하지만 최근으로 오면서 수온 변화와 PDO의 변화가 서로 다른 방향으로 진행하고 있다. 1980년 이후부터 2000년까지는 수온이 서서히 증가하다가 이후 2009년까지 약간 감소하는 경향을 보이는데 반해, PDO 지수는 1980년도 중반까지 감소했다가 2009년까지 대체로 증가하는 경향을 보인다.

ENSO의 장주기 변동은 대체로 수온 변동과 반대되는 양상을 보인다(Fig. 7). 하지만 1982/1983년 그리고 1997/1998년에 강한 엘니뇨가 발달했던 해인데, 이 시기의 봄철과 겨울에는 한반도의 수온이 상승하는 경향을 보인다(Fig. 6).

앞에서 살펴본 바와 같이 수십년 주기의 한반도 수온 변동은 PDO의 역할이 지배적이고 PDO는 해양 순환과 연관이 있기 때문에 해양 순환의 변화와 한반도 주변의 수온 변동과의 관계를 파악해 보고자 한다. 한반도 주변의 수온에 결정적으로 영향을 끼치는 해류는 열대해역에서 시작된 쿠로시오 난류로서 일부는 황해로 유입되고 일부는 대한 해협을 통해 동해로 유입된다. 쿠로시오 해류는 난류이기 때문에 해류가 강해지면 한반도 주변의 수온을 쉽게 올릴 수 있다. 한반도로 유입되는 난류가 한반도 주변의 수온 변동에 얼마만큼 역할을 하는지 파악하기 위하여 자료가 허락하는 1980~2009년 동안 한반도 남쪽에서 유입되는 해류를 대표하는 영역(동경 122.5도~동경 127.5도, 북위 30도~북위 32도)을 설정하고 그 영역에 대하여 평균된 남북방향 해류 성분과 한반도 주변의 표층 수온 사이의 회귀분석을 수행하고 회귀계수의 분포를 계절별로 나타내었다(Fig. 8a-d). 회귀분석 결과를 보면 한반도로 유입되는 쿠로시오 해류의 증가에 대해 표층 수온은 계절별로 다른 반응을 보이고 있다. 봄에는 해류의 세기 증가에도 불구하고 황해와 동해의 북서부는 수온의 하강이 나타나는데 반해 여름과 가을에는 통계적으로 유의한 수온 상승이 나타난다. 겨울에도 남해와 동해 남부에서는 약간의 수온 상승이 보이지만 황해와 동해 북부에서는 수온이 다소 하강하는 경향을 보인다. 이 결과는 겨울과 봄에 황해와 동해 북부에서의 수온 변화는 한반도 남쪽에서 유입되는 쿠로시오 난류의 세기 변화에 크게 영향을 받지 않음을 나타낸다.

Fig. 1에서 살펴본 바와 같이 1980년도 이후 표층 수온의 증가가 강화되는 경향이 나타났는데, 1980년도부터 2009년까지 남북방향 해류의 변동에 따라서 한반도 주변의 수온이 얼마만큼 변했는지를 조사하였다(Fig. 8e-h). Fig. 9는 한반도 남쪽의 영역에 대해 평균된 남북방향 해류편차의 계절 평균값과 계절별 시계열 그리고 경향을 나타낸다. 모든 계절에서 해류 편차는 증가하는 경향을 보이는데 특히 가을과 겨울철에 가장 강한 증가 경향을 보인다. 그런데 겨울철은 해류의 평균 속도가 다른 계절에 비하여 매우 약하다. 여름철에는 해류 속도의 증가 경향은 약한 반면 해류의 평균 속도는 사계절 중 가장 강하다. 이러한 해류의 경향 특성으로 인해 해류로 설명되는 수온 경향은 여름과 가을 그리고 겨울철에 두드러지게 나타난다. 비록 겨울철에 해류와 표층 수온 사이의 관계가 통계적으로 유의하지 않지만, 전체적으로 남쪽으로부터

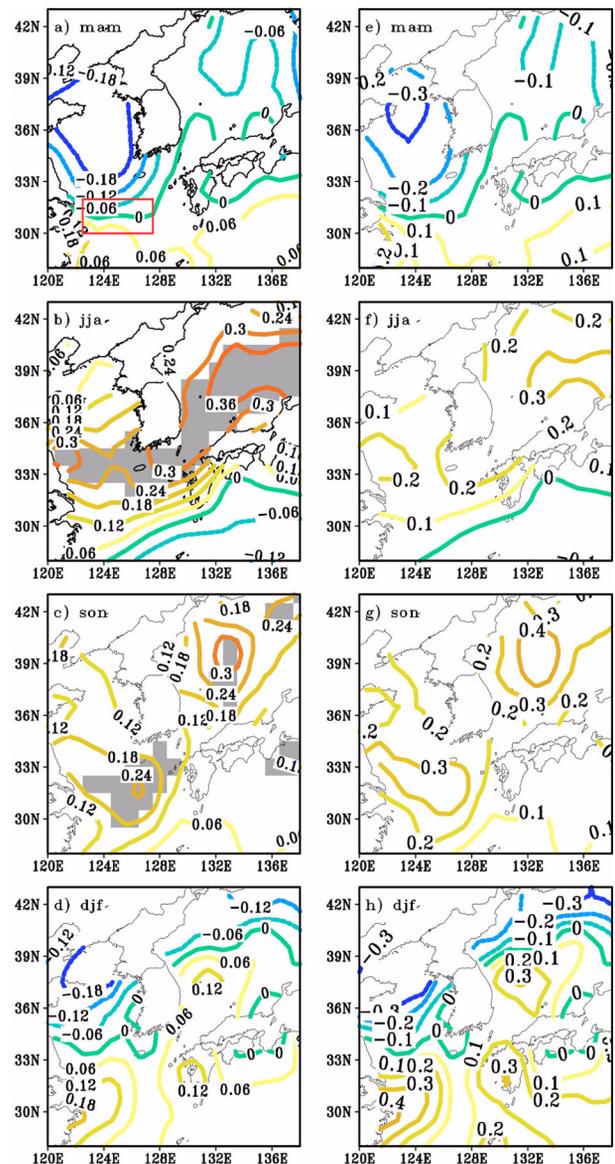


Fig. 8. Seasonal mean SST ($^{\circ}\text{C}/1$ std-m/s) regressed on meridional surface current anomaly averaged over red box area (30N-32N and 122.5E-127.5E) in a) (left column). Seasonal mean SST ($^{\circ}\text{C}/\text{period}$) reconstructed by meridional surface current averaged over red box area from 1980-2009 (right column)

유입되는 난류에 의해 남해와 동해의 수온은 증가되는 특징을 보여준다. 남북방향 해류와 연관되어 가장 뚜렷한 관계를 보이는 여름과 가을철 수온 경향은 Fig. 1g-h의 HadISST 경향과 비교하였을 때 전체적으로 남해와 동해에서 약 20~30% 정도가 해류의 증가로 설명된다. 봄과 겨울철에는 황해와 동해 북부에서 해류에 의해 수온이 오히려 약간 감소하는 것으로 나타나는데, 이는 이 해역의 수온 증가가 해류의 세기변화가 아닌 다른 요인에 의한

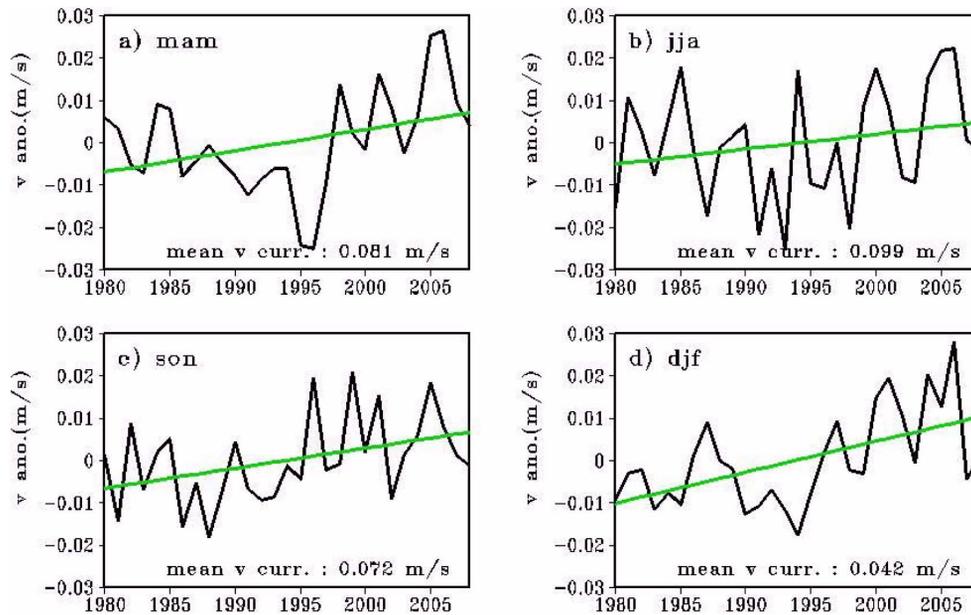


Fig. 9. Time series in seasonal mean meridional current (m/s) anomaly averaged over red box in Fig. 8. The green line in time series of v current anomaly represents its trend line. The value at the bottom of each figure represents the seasonal mean velocity of meridional current

것임을 시사한다.

4. 결론 및 토의

지난 130년 간 한반도 주변의 수온 변화 경향을 파악하기 위하여 HadISST, GISS SST 그리고 ERSST를 분석하였다. 130년 동안 전지구 연평균 수온은 약 0.6°C 상승했으며, 여름철 수온 상승이 겨울에 비해 약간 더 크게 나타나고 있다. 1900년도 초까지는 수온 하강이 있었기 때문에, IPCC AR4에서 산출한 1906년에서 2005년까지의 전지구 평균 수온 변화 경향은 약 0.7°C 로 IPCC 보고서의 값과 유사함을 밝혀 준다. 한반도 근해의 표층 수온은 산업혁명 이후 약 1°C 이상의 증가를 보였고, 겨울철 남해의 수온증가는 1.5°C 정도로 전지구 평균 수온 증가보다 약 3배 정도 빨리 진행되고 있으며 황해의 경우 약 2배 정도 온난화가 빠르게 진행되고 있다. 하지만 전지구 평균 수온은 대체로 지속적으로 상승하는데 반해, 한반도 주변의 수온변화 경향은 단순하지 않고 다양한 주기의 변동성을 보였으며, 특히 겨울의 경우 완만한 수온 하강과 급격한 수온 상승을 반복하는 톱니형태의 수온변화 경향을 보였다. 한반도 주변의 장기 수온 변동과 기후 지수들 사이의 연관성을 살펴본 결과, 1970년대 중반까지는 PDO의 역할이 지배적이었고 PDO는 일부 해양 순환과 연관이 있기 때문에 최근의 급격한 수온 증가는 한반도 주변으로 유입되는 쿠로시오 난류의 강화와도 연관이 있는 것으로 여겨지며 특히 여름과 가을에 쿠로시오 해류의 세기 변화

가 수온 증가에 영향을 준 것으로 나타난다.

본 연구의 결과로부터 PDO, ENSO 그리고 지역적인 순환의 변화와 같은 내부 피드백이 한반도 주변의 수온 변동에 영향을 미치는 것을 보였지만 그것만으로는 수온 변동 전체를 설명할 수는 없다. 좀 더 정확한 원인 분석을 위해서는 대기-해양 상호 작용이나 정밀한 해양순환 변화 등의 역학적인 분석이 뒷받침 되어야 할 것으로 판단된다.

또한 한반도 주변 표층 수온 변동에 있어 단기적으로는 PDO나 ENSO 같은 내부 피드백이 중요한 역할을 하지만, 장기적(예로 100년 이상)으로는 외부 강제력 변화가 지역 규모의 수온 변동에 중요한 역할을 할 수 있다. 한반도 주변의 장기적 수온 변화에 영향을 미칠 수 있는 외부 강제력 요인으로는 대기 온실가스 농도 변화, 태양 활동에 의한 에너지 변동, 화산폭발에 의한 대기의 광학적 깊이 변화 등을 들 수 있다. 간단하게 살펴본 결과(Fig. 10), 지난 130년간 온실가스의 농도가 증가 경향을 보이는 것은 같은 기간의 한반도 주변 표층 수온의 전체적인 증가 경향과 연관되어 있을 수 있지만 수십년 변동에서는 온실가스 변동과는 일치하지 않았다. 태양활동의 변화에 의한 에너지 변동폭은 0.2 W/m^2 이내이기 때문에 태양활동의 변화가 수온변화에 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단되고 큰 화산폭발에 의한 복사 강제력의 변화도 한반도 주변 수온 변동과 연관성은 약해 보인다. 하지만 외부 강제력 변화는 내부 피드백을 변화시키기 때문에 한반도 주변의 장기간 수온 변동에 대한 정확한 이해를 위해서는 proxy 자료의 활용과 같은 장기간의 표층 수온과

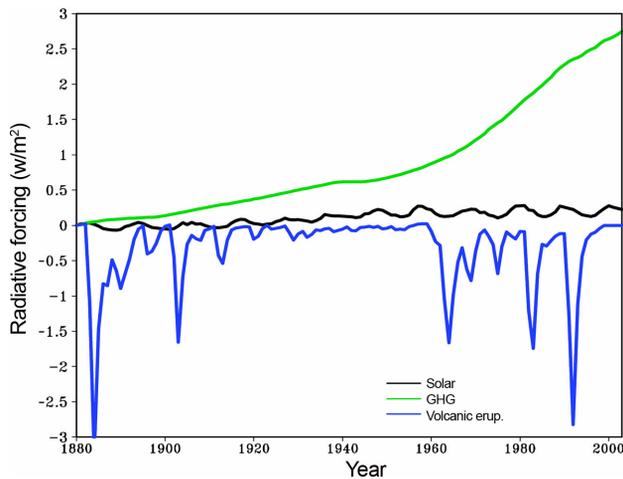


Fig. 10. Radiative forcing (w/m^2) of sunspot activity, greenhouse gases (GHG), and stratosphere aerosol by volcanic eruption

외부 강제력 자료의 확보가 중요하다. 또한 이를 이용한 장기 변동성에 대한 연구와 수치 모형을 활용한 외부 강제력 효과를 조사하는 등의 노력이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업(CATER 2009-1150, RACS_2010-3007)과 극지연구소에서 수행하는 서남극 기후변화 원인규명을 위한 남극진동(SAM) 구성요소재현 및 관측연구(PE11010) 사업의 지원을 받아 수행되었다.

참고문헌

- 민홍식, 김철호 (2006) 한국연안 표층 수온의 경년변동과 장기 변화. *Ocean and Polar Res* **28**(4):415-423
- Kim K, Kim K-R, Kim Y-G, Cho Y-K, Kang D-J, Takematsu M, Volkov Y (2004) Water masses and decadal variability in the East Sea (Sea of Japan). *Prog Oceanogr* **61**:157-174
- Kim K, Kim K-R, Min D-H, Volkov Y, Yoon J-H, Takematsu M (2001) Warming and structural changes in the East (Japan) Sea: a clue to future changes in global oceans? *Geophys Res Lett* **28**:3293-3296
- Lie H-J, Cho C-H (2002) Recent advances in understanding the circulation and hydrography of the East China Sea.

Fish Oceanogr **11**(6):318-328

- Smith, TM, Reynolds RW, Peterson TC, Lawrimore J (2008) Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880-2006). *J Climate* **21**:2283-2296
- Yeh S-W, Park Y-G, Min H-S, Kim C-H, Lee J-H (2010) Analysis of characteristics in the sea surface temperature variability in the East/Japan Sea. *Prog Oceanogr* **85**: 213-223
- Hansen J, Ruedy R, Sato M, Lo K (2010) Global surface temperature change. *Rev Geophys* **48**:RG4004. doi:10.1029/2010RG000345
- Jung S (2008) Spatial variability in long-term changes of climate and oceanographic conditions in Korea. *J Environ Biol* **29**:519-529
- Mantua NJ, Hare SR, Zhang Y, Wallace JM, Francis RC (1997) A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull Amer Meteor Soc* **78**:1069-1079
- Minobe S, Sako A, Nakamura M (2004) Interannual to interdecadal variability in the Japan Sea based on a new gridded upper water temperature dataset. *J Phys Oceanogr* **34**:2382-2397
- Park W-S, Oh I-S (2000) Interannual and interdecadal variations of sea surface temperature in the East Asian Marginal Seas. *Prog Oceanogr* **47**:191-204
- Park Y-G (2007) The effect of Tsushima warm current on the interdecadal variability of the East/Japan Sea thermohaline circulation. *Geophys Res Lett* **34**:L06609. doi:10.1029/2006GL029210
- Rayner NA, Brohan P, Parker DE, Folland CK, Jenedy JJ, Vanicek M, Ansell TJ, Tett SFB (2006) Improved analysis of changes and uncertainties in sea surface temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: HadSST2 Dataset. *J Climate* **19**:446-469. doi: 10.1175/JCLI3637.1
- Yeh S-W, Kim C-H (2010) Recent warming in the Yellow/East China Sea during winter and the associated atmospheric circulation. *Cont Shelf Res* **30**:1428-1434
- Zhang Y, Wallace JM, Battisti DS (1997) ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. *J Climate* **10**:1004-1020

Received Jan. 12, 2011

Revised Jun. 9, 2011

Accepted Sep. 9, 2011