Review

동중국해 표층수온의 장기 변동성: 종설

이재학* · 김철호

한국해양과학기술원 해양순환·기후연구부
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Long-term Variability of Sea Surface Temperature in the East China Sea: A Review

Jae Hak Lee* and Cheol-Ho Kim

*Ocean Circulation and Climate Research Division, KIOST
Ansan 426-744, Korea*

Abstract : The long-term variability of sea surface temperature in the East China Sea was reviewed based mainly on published literatures. Though the quantitative results are not the same, it is generally shown that sea surface temperature is increasing especially in recent years with the rate of increase about 0.03°C/year. Other meaningful results presented in the literatures is that the difference of water properties between layers upper and lower than the thermocline in summer shows an increasing trend both in temperature and salinity, suggesting that the stratification has been intensified. As a mechanism by which to evaluate the wintertime warming trend in the region, the weakening of wind strength, which is related to the variation of sea level pressure and atmospheric circulation in the western North Pacific and northern Asian continent, is suggested in the most of related studies.

Key words : East China Sea, sea surface temperature, long-term variability, variation mechanism

1. 서 론

동중국해는 북서태평양의 연해로 대부분 수심 200 m 이하의 대륙붕 해역이다. 남쪽에서 수심이 깊은 오키나와 골(Okinawa Trough)을 통해 북서태평양과 연결되고 북쪽에서 황해 및 동해와 연결되어 있다. 이러한 여건으로 동중국해는 북서태평양의 해수를 받아들여 황해와 동해로 공급해 주며, 또한 동중국해의 연안수를 동해와 북서태평양으로 공급해 준다. 이와 함께 동중국해가 중위도에 위치하면서 대륙과 대양의 경계에 있다는 특성 때문에 북서태평양과 우리나라 연해 사이의 열염수송과 동아시아 대륙과 북서태평양 사이에서 부유퇴적물 등 물질 이동에 대한

통로 역할을 한다(Milliman and Meade 1983).

최근 동중국해의 해양 환경, 특히, 해양생태계에서 녹조, 적조, 해파리 번성 등 여러 특이 현상들이 관측되고 있다. 이들의 요인으로 해양온난화와 장강 산사댐 건설, 육지로부터 오염물질 배출, 연안 양식 등 인위적이고 상대적으로 단기적인 외적 변화 등이 제시되고 있다 (Yoon et al. 2008; 최 등 2010). IPCC(유엔 정부간기후협약체)는 4차 보고서 (2007)에서 지구온난화로 대변되는 기후변화가 진행중임을 공표하였고 인위적인 온실기체의 증가가 기후변화의 원인임을 제시하였다. 아울러 기후변화 진행의 증거로서 기온과 수온의 상승, 해수면 상승, 빙하 및 북극해 해빙 감소 및 지구상 물순환 강화에 따른 집중 호우, 폭설 및 가뭄과 같은 극한 기상 증가 등이 제시되었다. 한편, 지구적 변화 양상의 특징으로서 변화 속도에 지역별

*Corresponding author. E-mail : jhlee@kiost.ac

편차가 있어 수온 증가와 해수면 상승의 경우 우리나라 해역을 포함한 서태평양이 전지구 평균보다 높은 해역으로 나타나 있다. 이는 동중국해의 향후 해양 변화에 있어서도 수온과 해수면 상승 변화의 속도가 전 해양의 평균치보다 클 것임을 의미한다. 해양 변화에 대한 대응 정책의 수립에는 이러한 장기적인 변화 경향을 전망하는 것은 기본적인 사항이지만, 보다 근접한 미래(10-30년)에 대한 해양 변화 대응 정책 수립에는 소위 대기와 대양에서의 자연적 변동성에 대한 동중국해의 반응을 이해하는 것도 매우 중요하다. 이를 위하여 과거 및 현재의 변동성을 진단하고 변화의 요인을 분석하는 것이 우선 선행되어야 한다.

동중국해 수온 변화 연구는 1980년대까지 주로 남해안 연안정지 수온관측 자료를 이용한 표층수온의 연주기 및 반년주기의 주기성 분석이 대부분이며 일부 영년변화의 분석이 있었지만 변동성과 기작의 연구는 거의 없었고(김 2002), 해양생태계까지 포함한 다학제적 변화 연구는 최근 들어서야 연구가 수행되고 있는 실정이다(국토해양부 2010). 동중국해 수온의 년 변화 이상의 장기 변동성 진단은 상대적으로 장기자료가 확보된 표층수온에 치중된 경향이며 국내 연구자들의 분석은 동중국해 북부(남해)에 한정된 경우가 많으며 국내외 다양한 논문집에 산재 발표되어 연구 결과들의 정리 필요성이 제기되고 있다. 본 논문에서는 동중국해 표층수온을 중심으로 최근 장기 변화 경

Table 1. Summary of results shown in reviewed references (YS: Yellow Sea, ECS: East China Sea, SS: South Sea, SST: sea surface temperature, SSS: sea surface salinity)

Reference	Data	Period	Area	Result (–: increase, +: decrease)
Kang (2000)	NFRDI coastal data	1936-1995	SS Coastal area	SST variation rate in past 60 yrs: +0.004–0.015°C/yr SST variation rate in past 30 yrs: –0.003~+0.032°C/yr
Min and Kim (2006)*	NFRDI coastal data	1969-2004	SS Coastal area	SST variation rate (SS): > +0.02°C/yr Variation rate of annual SST range: –0.05~ –0.03°C/yr
Hahn (1994)	Read from chart, NFRDI data	1881-1990	Korean seas	Northward movement of 10°C(February) and 25°C (August) isotherms
Jeong et al. (2003)*	NFRDI data	1968-2002	North ECS	SST variation rate: +0.027°C/yr SSS variation rate: –0.006 psu/yr Variation rate of salinity on 100m depth: +0.003 psu/yr
Seong et al. (2010)*	NFRDI data	1968-2008	North ECS	SST: +1.27°C(variation rate: +0.031°C/yr) Variation rate of temperature on 100 m depth: +0.008°C/yr
The Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010)*	WOD01	1961-2000	North ECS	SST variation rate: > +0.01°C/yr
Park et al. (2011)	KODC/NFRDI	1967-2008	West of Jeju-do	Bottom cold water variability
Min et al. (2010)*	NOAA/AVHRR	1985-2009	Northeast Asian seas	SST variation rate :+0.063°C/yr (former period), –0.056°C/yr (latter period)
Son et al. (2012)*	NOAA/AVHRR, JPL composite	1985-2010	ECS	Annual and monthly mean SST: +0.2~1.0°C Northward movement of SST isotherm
Yeh and Kim (2010)	Reanalysis data (HadISST)	1950-2008	YS, ECS	Winter SST since mid 1970s: +1.5°C
Kim et al. (2011)*	Reanalysis data (HadISST etc)	1880-2009	ECS	Winter SST: +1.5°C (3 times of global mean)
Kim et al. (2012)*	Reanalysis data (HadISST)	1950-2010	East & south ECS	Winter SST variation rate: +0.027~0.028°C/yr
Park et al. (2012)	Reanalysis data (ERSST)	1970-2005	North Pacific	SST variation rate (ECS): +0.03~0.05°C/yr
Tang et al. (2009)	MSD/ChineseAS	1957-1996	Mid ECS	SST variation (first and second half period): +0.46°C
Ning et al. (2011)	China SOA	1975-1995	32°N	SST, Bottom T: +0.71, +1.1°C (variation rate: +0.053°C/yr) SSS, Bottom S: -0.21, +0.13 psu

*These references are written in Korean language in a bibliography

향에 대한 논문들을 정리하고, 발표된 결과들로부터 변화 경향에 대해 일반화할 수 있는 사항을 제시하고자 한다. 문헌마다 해수면온도, 해표면수온, 표면수온, 표면온도, 표층수온 등 다르게 표현되는 관계로 용어의 일관성이 없어 본 논문에서는 문헌에서 표현된 것과 관계없이 표층수온으로 표기하였다.

2. 표층수온의 변동성

동중국해에서의 해양 조사는 장기적인 변화 탐지 관점에서는 체계적이지 못하였지만 수온은 오랜 기간 동안의 현장 관측 자료 누적과 인공위성 관측 자료 및 수치모델링에 의하여 생산된 과거의 재분석 자료 활용이 가능하여 상대적으로 많은 연구가 있었다. Table 1에 검토된 전체 문헌 자료를 요약하였으며 각 문헌에서 제시된 상세 내용을 다음에 설명하였다.

연안역 관측 자료 분석

우리나라 도서를 포함한 연안역 정점에서 국립수산물학원에 의한 매일 표층수온 관측 자료가 오랜 기간 동안 누적되어 있어 이로부터 수온의 변화 경향에 대한 분석이 수행되었다. Kang (2000)은 우리나라 연안과 도서 18개 지점에서 1936~1995년의 60년 동안 매일 1회 관측된 표층수온 자료로부터 수온 변화의 경향을 분석하였다. 전 기간인 60년 동안 남해 연안 정점들의 표층수온은 $0.004 \sim 0.015^{\circ}\text{C}/\text{년}$ 의 증가율을 보였고 후반 30년 동안에는 $-0.003 \sim 0.032^{\circ}\text{C}/\text{년}$ 으로 후반 30년 동안이 전체 60년 동안 증가율보다 평균 2배 정도 높은 증가 경향이 있는 것으로 나타나 해양온난화가 최근에 강화되었음을 보여주었다.

민과 김 (2006)은 우리나라 연안과 도서의 27개 지점에서 1969~2004년의 36년 동안 관측된 표층수온 자료에 기초하여 겨울철 최저수온과 여름철 최고수온 및 연변동폭의 변화 경향을 분석하였다. 선형회귀의 분석 결과 최저해면수온은 대부분의 정점에서 $0.02^{\circ}\text{C}/\text{년}$ 이상의 수온 증가율을 보였다. 동해안의 정점에서 서해안의 정점으로 향할수록 최고 표층수온의 증가율이 감소하는 경향으로, 남해안은 중간 정도로 나타나 평균 수온 변화 경향은 Kang (2000)의 결과와 일치하였으나, 여름철 최고 표층수온은 민과 김 (2006)의 결과에서는 뚜렷한 변화 경향이 없었던 반면 Kang (2000)은 하강으로 나타나 서로 다른 결과를 보여주었다. 한편, 최고 및 최저 표층수온의 차로 정의된 표층수온 연변동폭은 $0.03 \sim 0.05^{\circ}\text{C}/\text{년}$ 정도 감소하는 경향으로 나타났다.

동중국해 북부 해역 관측 자료 분석

대부분의 분석들은 국립수산물학원에서 수행하고 있는

Fig. 1. Isothermal lines changes for (a) 10°C in February and (b) 25°C in August (A: 1881-1910, B: 1911-1925, C: 1926-1940, D: 1961-1975, E: 1976-1990). (Hahn 1994)

정선해양관측 자료를 이용한 것으로 나타났다. Hahn (1994)은 국내 최초로 1881년~1990년 기간 동안 초기의 도면에서 독취한 자료와 함께 정선해양관측 수온 자료를 분석하여 우리나라 해역 표층의 등온선 분포 형태를 도시하였다(Fig. 1). Fig. 1a는 2월의 10°C 등온선 분포로 남해에서 등온선의 북상이 뚜렷하게 보인다. 하계에도 기간에 따라서 등온선의 연안측 접근 정도에 변동이 보이지만 1881~1910년의 평균 위치(A선)에 비해 1976~1990년의 평균 위치(E선)가 $30' \sim 60'$ 정도 연안 쪽으로 접근한 것으로 나타났다(Fig. 1b). 해역 전체 평균값은 2월에 2°C , 8월에 1°C 의 온도 증가를 보였다. 성 등 (2010)은 1968~2008년 동안의 정선해양관측 수온 자료를 분석하여 남해 표층수온 변화는 동해보다는 작고 황해보다는 높은 1.27°C 증가와 $0.031^{\circ}\text{C}/\text{년}$ 의 증가율을 제시하였다. 이는 2002년까

Fig. 2. The variation rate of SST in the period of 1961-2000. The line interval is 0.005°C/year (The Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs 2010)

지의 관측 자료를 분석한 정 등 (2003)의 결과인 0.027°C/년 증가율보다는 높은 것으로 최근의 수온 상승 정도가 높아진 것을 보여주고 있다. 해양 내부에서의 변화 경향은 100 m 수심의 경우 0.008°C/년의 상승 경향을 보인 것으로 나타났다. 계절별로는 여름철 수온 상승이 강하여 동해나 황해와는 달리 겨울보다 여름의 수온상승이 장기 수온 변화 경향을 지배하는 것으로 보고하였다. 한편, 한국해양 연구원의 연구(국토해양부 2010)에서는 세계해양자료집(WOD01)의 자료를 이용한 1961~2000년 사이의 40년간 동중국해 북부해역의 해면수온 변화 경향을 분석 도시하여 대부분 해역에서 표층수온이 0.01~0.03°C/년의 증가율로 상승한 것으로 파악하였다(Fig. 2). 또한, 1990년대와 1960년대의 평균 표층수온을 비교하여 2월에는 전체해역에서 1~2°C 증가하였고 8월에는 1°C 감소한 것으로 판단하였다. 저층 해수의 수온 변화 연구로 Park et al. (2011)은 1967~2008년 사이의 한국해양자료센터(KODC) 자료로부터 황해에서 제주도 서쪽 해역까지 포함된 해역의 저층냉수의 변동성을 분석하여 저층냉수의 수온 변화가 2~7년 및 10~20년 주기성이 있으며 1967~1971년, 1983~1988년 및 1996~1998년 사이의 냉각시기와 1972~1980년 및 1990~1995년의 온난시기가 있었음을 제시하였다. 이는 동중국해 북서부 저층냉수의 수온 변화가 장기적인 온난화와 같은 전지구적인 변화보다는 보다 짧은 주기의 지역적 또는 자연적 변동성에 더 우세하게 영향을 받고 있음을 의미한다.

해수 물성의 주요 성분인 염분의 변화에 대한 정량적 연구는 자료의 양과 신뢰도 문제로 연구가 매우 드물었다. 정 등 (2003)은 1968~2004년 기간의 정선관측자료에 의한 염분의 장기 변화를 분석하여 연변화율은 남해에서 표층은 -0.006 psu/년, 50 m 수심에서는 0.001 psu/년, 그

리고 100 m 수심에서는 0.003 psu/년으로 표층은 저염화 경향임에 반해 저층은 고염화 경향임을 보고하였다. 이는 동중국해는 여름철에 수온의 변화와 마찬가지로 염분의 변화도 성층이 강화되는 방향으로 기여하고 있음을 보여주는 사항이다.

인공위성 관측 자료 분석

인공위성으로부터 해면수온의 관측은 종관적이고 반복성이 확실하여 시계열 자료로서 매우 유용하다. 민 등 (2010)은 1985~2009년 사이의 미국 NOAA/AVHRR 위성 관측 자료로부터 동중국해를 포함하여 우리나라 주변해역을 7개 해역으로 구분하여 표층수온의 시공간적 변화 특성을 제시하였다. 이 기간 동안 동북아시아 해역의 평균 표층수온은 8~26°C 변화를 보였고 연진폭은 7~24°C로 나타났다. 표층수온의 연진폭은 저위도에서 고위도로 갈수록 연변화폭이 커지는 경향으로 쿠로시오 해역에서는 11°C 이하, 그리고 황해 북부에서는 22°C 이상으로 나타났다. 연위상은 연진폭의 경향과는 반대로 동중국해 남부에서 일본 주변해역보다 빠르게 나타났는데 이는 해양성 기후를 보이는 해역이 대륙성 기후를 보이는 해역보다 빠른 위상을 나타내기 때문이다. 수온변화는 일관적인 경향을 보이지는 않았으나 1985~1998년에 0.063°C/년의 증가와 1998~2009년에 -0.056°C/년으로 감소를 보인 것으로 분석되었다. 감소 경향은 관측 자료에 근거한 대부분의 분석 결과와는 상이한 것으로 이는 분석 해역과 정량화한 기간이 다른 이유로 판단된다. 인공위성 자료를 분석한 다른 예로서 손 등 (2012)은 동중국해의 1985~2010년 동안 NOAA/AVHRR 위성 관측 자료와 NASA/JPL 월별 합성 자료로부터 표층수온의 변화를 제시하였다. 26년간 월평균 해면수온은 약 0.2~1.0°C 상승한 것으로 나타났으며,

Fig. 3. Distributions of an isothermal line of 20.3°C SST. (a) shows isothermal lines every 4 or 5 years and (b)–(f) present isothermal lines for 5 consecutive years from 1985 (Son et al. 2012)

연평균 해면수온도 증가율은 0.025°C/년이었다. 공간적으로 표층수온 분포의 변화를 분석하고 연평균 20.3°C 등온선을 예로 그 분포 위치가 점진적으로 북상하고 있음을 도시하였다. 1998년의 경우 연구해역의 연평균 표층수온이 가장 높았던 해로 제주도 남동쪽 및 대마도 북쪽까지 북상하였다(Fig. 3). 등온선 위치가 북상하는 정도는 서쪽인 중국 연안 부근에 비하여 대한해협에 근접할수록 크게

나타났는데 이는 수온 상승의 신호가 동해 쪽으로 잘 전달 될 수 있음을 시사해준다.

재분석자료의 분석

선박과 인공위성을 이용한 현장 관측 자료는 자료의 기간이 짧아 기후적 변화를 분석하는 데는 한계가 있다. 이를 보완하는 방법은 해양순환 및 기후모델의 실험 결과로

Fig. 4. The time series of SST averaged over the region 25-40°N, 118-127°E during winter for the period 1950-2008. Red line indicates the 9-year running mean time series and the units is °C (The Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs 2010)

부터 과거의 상태를 가늠할 수 있는 재분석자료를 생산하는 것이다. 외국의 기상관련 기관에서는 다양한 재분석 자료를 제공하고 있으며 이를 활용한 장기간의 변화 연구가 수행되었다. Yeh and Kim (2010)은 국토해양부 (2010)에 제시된 연구 내용을 확대하여 영국 기상청 Hadley 센터의 HadISST 자료로 1950~2008년 기간 동안의 황해 및 동중국해의 겨울철(12, 1, 2월) 표층수온 변화를 분석하고 대기 순환과 관련하여 해석하였다. EOF 분석결과로부터 표층수온은 1970년대 후반 이후 2008년까지 약 1.5°C 정도로 지속적인 상승 경향을 나타내고 있음을 보여주었다(Fig. 4). 또한, 김 등 (2011)은 HadISST, 미국 GISS SST 및 미국 국립기후자료센터 ERSST의 1880~2009년의 130년간 관측 및 재분석자료로부터 우리나라 주변해역의 수온 변화 경향을 분석하였다. 이 기간 동안 우리나라 근해의 표층수온은 약 1°C 이상의 증가를 보였고 겨울철 남해의 표층수온은 Yeh and Kim (2011)의 결과와 일치하여 약 1.5°C 증가로 전지구 평균수온 증가보다 약 3배 빠르게 온난화가 진행 중인 것으로 나타났다. 김 등 (2012)은 1950~2010년 동안의 HadISST 자료를 이용하여 동중국해와 동해 남부 해역의 살오징어 산란장 해역에 대한 표층수온의 변동성을 가을철과 겨울철로 구분하여 분석한 결과 표층수온 증가율은 가을과 겨울에 각각 동중국해 대륙붕과 대륙사면 해역에서 0.024°C/년, 0.028°C/년, 북부 동중국해 및 제주도 해역에서 0.021°C/년, 0.027°C/년으로 나타났음을 보고하였다.

중국 및 일본 자료의 분석

국내 분석자들에 의한 분석 결과들은 관측 자료의 경우 우리나라 관할 해역에 국한되어 동중국해 전체의 변화 경향을 정량화하기에는 한계가 있다. 그러나 일본 학술지에는 동중국해의 장기적인 수온 변화 연구 논문은 거의 없

었고, 중국 학술지에 발표된 논문은 대부분 중국어로 발표되어 일부 영문으로 발표된 논문만 본 검토에는 포함하였다. Tang et al. (2009)은 국내 학자들의 관측 자료 분석의 경우에 비해 보다 넓은 해역인 동경 122-128도, 북위 28-32도 범위에서 1957~1996년 기간 동안 관측 자료로부터 온난화 경향을 분석하였다. 평균 표층수온의 변화는 자료의 후반기인 1977~1996년의 평균치가 전반기인 1957~1976년의 평균치보다 약 0.46°C 증가한 것으로 제시하였다. 특히, 양자강 부근의 연안역은 0.53°C로 증가 폭이 분석해역 전체 평균보다 높은 것으로 나타났다. 후반기의 수온변화가 전반기보다 우세한 점은 국내 학자들의 분석과 일치한다. 한편, Ning et al. (2011)은 북위 32도, 동경 122-127도의 1975~1995년 기간의 정선관측자료를 분석하여 동 기간 사이에 표층 및 저층수온이 각각 0.71°C 및 1.1°C 증가하였고 연증가율은 각각 0.034°C/년 및 0.053°C/년으로 저층에서 증가가 더 큰 것으로 제시하였다. 아울러 염분은 21년 사이에 표층에서는 0.21 psu 감소한 경향인 반면 저층에서는 0.13 psu 증가한 것으로 나타나 전반적인 변화 경향이 정 등 (2003)의 결과와 일치하며 여름철에 동중국해의 성층 강화가 일반적인 경향임을 시사해준다.

3. 변화의 기작

장기적인 수온 변화의 기작에 대한 연구의 경향을 보면 관측 자료를 분석한 경우 관측 해역만의 해양 변화와 바람을 포함한 규모가 큰 외력 변화 등 사이의 관련성을 분석하였거나 가능성을 제시한 경우가 많았고(민과 김 2006; 성 등 2010; Park et al. 2011), 재분석자료를 분석한 경우는 북태평양을 포함한 광역에서의 해양 변화와 해양 및 대기의 기후지수들 사이의 관련성을 종관적으로 해석한 경우가 많았다(Yeh and Kim 2011; 김 등 2011; Park et al. 2012).

동중국해 대부분은 수심이 얇은 대륙붕 해역이기 때문에 바람과 같은 대기로부터 외력 변화의 영향이 전반적으로 쉽게 전달되며 반응한다. 대부분의 연구들에서 동중국해 대륙붕에서의 장기 수온 변화의 기작을 해석하는데 대기의 기후지수와 연결시키는 노력을 하였다. Yeh and Kim (2010)은 1970년대 후반 이후 겨울철 해면수온의 지속적인 상승을 유도하는 가능한 기작으로 북태평양진동(North Pacific Oscillation) 형태의 해면기압 변화를 제시하였다. 이는 북태평양에서 시계방향 대기순환이 강화됨에 따라 겨울철 북풍이 약해지고 (동중국해상에서 1980년대 중반을 기점으로 전후 약 20년 기간의 기압 1000 hPa 층 평균 바람이 약 1 m/s 감소한 것으로 제시) 따라서 동중국해에서 해양-대기 사이의 열교환이 감소 경향을 보이게 됨을 의미한다. Park et al. (2011)은 제주도 서부해역

의 저층냉수(황해저층냉수의 일부) 수온 변화는 주로 겨울철 대기의 외력에서 기인되고 냉각 시기는 겨울철 시베리아고기압 강화, 알류산저기압, 태평양수십년진동(Pacific Decadal Oscillation; PDO) 및 극진동(Arctic Oscillation; AO) 상태뿐만 아니라 여름철 해수면기압 증가 및 쿠로시오 표층수온의 상승과도 관련이 있음을 제시하였다. 또한, 겨울철 황해난류수를 통하여 북서태평양의 신호가 동중국해를 통하여 황해 내부까지 전달될 수 있을 것이라는 가설을 제시하였다. 이 연구도 황해와 동중국해 대륙붕 해역에서 장기적인 수온 변화가 해양보다는 대기의 변화에 더 영향을 받음을 암시하고 있다. 한편, 김 등 (2011)의 분석에서는 동중국해를 포함한 우리나라 주변해역의 해양 변화가 북태평양의 해양 변동성과 관련이 있으며 1970년대 중반까지는 PDO 역할이 지배적이었고 최근의 수온변화는 여름과 가을의 쿠로시오 난류의 강화와도 연관이 있을 것임을 제시하였다. 이는 PDO와 ENSO 등의 해양에서의 변동성과 지역적 순환 변화와 같은 해양 내부 되먹임(feedback) 작용이 우리나라 주변해역의 수온 변화에 영향을 주는 것을 의미하고 있지만, 수온변화의 정확한 기작을 설명하기 위해서는 해양-대기 상호작용 등의 역학적 분석이 필요하다는 점을 지적하였다. 최근 Park et al. (2012)은 북서태평양의 높은 수온 상승 경향과 NCEP-NCAR 재분석자료에 기반한 해양-대기 플렉스 변수 등을 AO, PDO, 서태평양형태(Western Pacific mode), 남방진동(Southern Oscillation) 등 다양한 해양 및 대기의 기후지수와 비교 분석하여 1970~1989년 기간에는 시베리아고기압의 약화에 의한 시베리아고기압과 알류산저기압 사이의 기압경도 변화로 동아시아 겨울계절풍이 약화되어 해면수온이 상승하였고, 1990~2005년 기간의 해면수온 변화는 바람장 변화와 아울러 해양역학의 중요성도 증가하고 있음을 제시하였다. 특히, 시베리아고기압 강도(약화)나 알류산저기압의 위치(북쪽 이동) 변동은 바람장 변화뿐만 아니라 아열대 해양순환계의 형태의 변화를 수반하여 수온이 높은 난류수가 우리나라 주변해역을 포함하는 서태평양 중위도 해역으로 더 공급될 기작을 제시하였다. 이는 대기로부터의 영향이 우리나라 주변해역 수온 변화의 요인이 된다는 Yeh and Kim (2010), 성 등 (2010) 및 Park et al. (2011)의 주장과 일치하는 해석이다. 한편, Park et al. (2012)이 제시한 1990~2005년 기간의 해양역학의 중요성 부분은 구체적으로 일관적인 해석이 나오고 있지 않아 보다 심도 있는 연구가 필요하다.

대기로부터의 동중국해 해양에 대한 영향은 인근 연해 및 열대-중위도 해역간의 원격상관도 중요한 변수인바 Park and Oh (2000), Chang et al. (2002) 및 윤과 예 (2009)는 엘니뇨와 동중국해를 포함한 우리나라 주변해역의 표층수온과의 상관성 연구를 수행한 바 있다. Park and

Oh (2000)는 1951~1996년 기간의 COADS 표층수온 자료로부터 동중국해 표층수온 이상치(anomaly)의 5~6년 주기 경년변화는 동해남부에서의 변화와 일관성이 높고 엘니뇨와 지연 상관성이 있음을 제시하였다. 특히, 윤과 예 (2009)는 겨울철 엘니뇨 시기에는 황해를 포함한 동중국해 해역에서 계절풍의 약화로 표층수온은 양의 편차를 보이지만 우리나라를 포함한 동아시아 기후변동성의 상호 관련성을 분석할 때 열대 태평양에서 엘니뇨의 공간적 특성 차이(EP-엘니뇨 또는 CP-엘니뇨 등)를 반드시 고려해야함을 주장하였다.

4. 토의 및 결론

동중국해 표층수온의 경년 변동성에 대한 정량적인 결과를 발표한 논문은 2000년대 들어 발표되기 시작하였고 2000년대 중반 이후 증가하였다. 최근까지 발표 문헌에 제시된 결과들은 시계열 자료의 기간이 기후적 장기 변화 경향을 분석하기에는 충분하지 않고 대부분 동중국해 북쪽 해역만 대상으로 하여 동중국해 전체를 대상으로 정량화하는데 한계가 있었다. 또한 분석에 사용된 자료의 획득 방법(승선 조사, 인공위성 관측 또는 재분석 자료 등)에 따라 산출된 수온변화의 크기가 차이를 보이는 것으로 나타났다. 일부 논문에서는 자료의 분석과정에서 중요한 단주기 변화에 의한 변화 영향 제거 등 통계적인 자료 처리 과정의 기술이 누락되어 결과의 신뢰도에 대한 편차도 있었다. 검토한 문헌들에서 제시된 결과들의 상이점을 고려하여 공통적 또는 일반적이라 할 수 있는 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 표층수온 상승은 1970년대 중반 이후 두드러졌다. 연평균 증가율은 분석 영역과 자료의 기간에 따라 다르지만 평균 약 $0.03^{\circ}\text{C}/\text{년}$ 정도로 나타났다. 영역을 구분하여 비교하면 동중국해 서쪽 중국연안역의 수온 증가가 상대적으로 크다.
- 동중국해 표층수온 증가의 경향은 계절적으로는 겨울철에 우세하다는 것이 대부분이지만 극히 일부 상반된 주장이 있다.
- 인공위성 관측 자료로 분석한 표층수온 등온선의 공간적 변화에는 북상하는 경향이 나타났다.
- 여름에 표층수온 증가가 저층수온 변화보다 크고 표층염분은 감소 경향인 반면 저층염분은 증가 경향이다. 이는 표층 및 저층의 수온과 염분 차이가 모두 증가하는 방향으로 변화하여 성층강화의 경향이 있음을 의미한다.
- 수온 변화의 기작에 대하여 대부분 해면 기압계 배치, 즉 대기 순환의 변화에 따른 북풍 약화의 영향을 제시하였다. 최근 들어 서태평양으로부터 해양을 통한 온

난화 시그널의 유입 가능성이 제시되었으나 구체적으로 이와 관련된 해양역학의 일관적인 해석은 나오지 않았다.

동중국해 해수 물성 변화 경향을 추정하는 데는 동중국해 일부 해역의 분석보다는 동중국해 전체 해역이나 황해를 함께 포함한 광역의 동시 분석이 바람직하다. 이를 위하여 국내 관측자료 뿐만 아니라 일본 및 중국의 관측 자료를 모두 이용하는 방안을 강구하여야 할 것이다. 특히, 동중국해가 지리적으로 중위도에 위치하고 육지와 대양의 경계 해역에 해당되기 때문에 자료 분석의 영역이 좁을 경우에는 특정한 기후지수가 강조될 가능성이 높다. 따라서 수온변화의 기작을 파악하기 위해서는 태평양까지 포함한 해역을 대상으로 해양-대기 변화 상관성과 동아시아-태평양의 물순환과 열수지 분석을 포함한 해양과 대기 현상 사이의 되먹임(feedback) 작용 분석이 요구된다. 최근 Park and Jang (2012)이 모델연구를 통하여 양자강유출수와 동중국해 표층염분 변화가 엘니뇨 등 기후지수와 관련성 있음을 제시한 점은 하나의 예다. 또한, 동중국해 해양 내부 변동성과 관련된 주요 지표의 하나인 대한해협에서의 해수 물성 시계열 자료(민 등 2011)와 수송량에 시계열 자료(Fukudome et al. 2010) 등의 분석 결과도 함께 해석하는 것이 요구된다.

해양의 기후적 변화는 매우 긴 시간(예, 100년)의 틀에서 다루며 그 보다 짧은 주기의 변화는 지구온난화 경향에 수반된 장기 변화보다는 변화의 폭이 훨씬 큰 자연적 변동성(태평양수십년진동)이 함께 고려되어야 한다. 따라서 해양생태계 변화와 연안역 침수/침식과 같은 해양 변화에 대한 적응정책 수립에 필요한 기반자료를 생산하고자 하는 경우에는 자연적 변동성과 관련된 근미래의 예측 연구가 필요하다. 예를 들면 10-20년 후 또는 그보다 더 짧은 시간 내의 변화를 고려한 적응정책이 50년 후를 보는 것 보다 현실적이고 더 중요하기 때문이다. 대부분의 동중국해의 수온변화 기작의 분석에서 연 주기의 대기 외력(계절풍 등) 변화를 주로 고려하였지만 기후변화에 따른 동중국해상의 태풍이나 중국 대륙에서 저기압의 발달 변화 경향 등 불규칙적인 단주기성 기상 변화의 경향도 고려하여야 할 것으로 판단된다. 이들은 쿠로시오 해류와 마찬가지로 동중국해 경계역(중국연안과 남부)에서 동중국해로의 열 유입에 영향을 주기 때문이다(Yamamoto 2012).

또한, 동중국해의 육지로부터 담수 유입이 표층의 해수 물성 변화에 많은 영향을 미치기 때문에 해수 물성 변화를 분석할 때 육상에서의 인위적 경제활동에 의한 영향이 함께 고려되어야 한다. 최근 동중국해에서 환경 및 수산업의 문제가 되는 해파리, 적조, 녹조 현상들이 나타난 요인은 기후변화에 의한 영향일 수도 있지만 이들의 발생원인 물질이 중국으로부터 강물로 유입되었거나 중국 연안

에서의 양식 활동에 의한 영향이 해양온난화 영향과 겹친 결과일 수도 있다. 따라서 기후변화 적응정책을 산사담과 남북운하 공사와 같은 중국 내륙에서의 인위적 경제활동 등이 해양에 미치는 영향을 고려한 대응정책과 구분하여 수립하는 것은 적절치 않은 전략이다.

해양 및 기상 관련 기관의 내부 보고용 자료와 연구결과 보고서에 제시된 내용과 단순히 학술회의에서 발표한 결과는 국제적으로 전문가들에게 인용이 될 확률이 낮다. IPCC 보고서 등에서는 엄격한 검토 과정을 거쳐 출판된 논문만이 검토 대상이 되기 때문에 심사 과정을 거친 논문으로 발표하는 노력을 기울여야 할 것이다. 관측 자료를 기반으로 한 해수 물성 변화 경향은 표준화(영역, 분석 방법 등)된 지수의 선택과 지속적인 분석 및 결과 발표가 필요하다.

사 사

본 논문은 국토해양부 소관 연구개발사업인 ‘기후변화가 남해권역 해양생태계에 미치는 영향 및 기능평가 기술개발(PM57090)’ 사업의 지원을 받았습니다.

참고문헌

- 국토해양부 (2010) 기후변화에 따른 남해(동중국해 북부)의 해양환경 및 생태계 변동 연구. 한국해양연구원, BSPM 55670-2202-1, 300 p
- 김성중, 우성호, 김백민, 허순도 (2011) 지난 130년 간 한반도 근해의 표층 수온 변화 경향. *Ocean and Polar Res* **33**(3):281-290. doi:10.4217/OPR.2011.33.3.281
- 김중진, 민홍식, 김철호, 윤진희, 김수암 (2012) IPCC 기후변화 시나리오(A1B)에 따른 살오징어 산란장(*Todarodes pacificus*)의 변동 예측. *Ocean and Polar Res* **34**(2):253-264. doi:10.4217/OPR.2012.34.2.253
- 김철호 (2002) 지구 온난화와 한반도 해역의 수온해수면 변화. In: 한국해양학회 춘계학술심포지움 강연집, 전남대학교, 2002년 5월 9-11일, pp 1-20
- 민승환, 김대현, 윤홍주 (2010) NOAA/AVHRR 자료에 의한 동북아시아해역 표층수온의 시공간 분석. 한국해양정보통신학회논문지 **14**(12):2818-2826
- 민홍식, 김철호 (2006) 한국 연안 표층수온의 경년변동과 장기변화. *Ocean and Polar Res* **28**(4):415-423
- 민홍식, 박재훈, 최아라, 박영규, 신경준, 장풍국 (2011) 2006~2010년 기간 동안 대한해협 서수도에서 관측된 해수 물성의 변동. *Ocean and Polar Res* **33**(3):325-336
- 성기탁, 황재동, 한인성, 고우진, 서영상, 이재영 (2010) 한국 연근해 수온의 시공간적 장기변동 특성. *해양환경안전학회지* **16**(4):353-360
- 손영백, 이태희, 최동림, 장성태, 김철호, 안유환, 유주형, 김

- 문구, 정섬규, Ishizaka J (2010) 동중국해에서 위성에서 추정된 10년 동안의 표층 입자성 유기 탄소의 시/공간적 변화. *대한원격탐사학회지* **26**(4):421-437
- 손영백, 유주형, 노재훈, 주세중, 김상현 (2012) 남해와 동중국해에서 위성으로 추정된 표층수온 및 클로로필의 장기 변화. *Ocean and Polar Res* **33**(3):281-290. doi:10.4217/OPR.2012.34.2.201
- 윤진희, 예상욱 (2009) 서로 다른 두 유형의 엘니뇨와 동아시아 인근 표층 온도 상관성 연구. *Ocean and Polar Res* **31**(1):51-61
- 최동립, 노재훈, 유주형, 이재학, 장풍국, 이태희, 최동한 (2010) 2008년 여름철 북부 동중국해에서 대규모 녹조(가시파래) 출현. *Ocean and Polar Res* **32**(4):351-359. doi:10.4217/OPR.2010.32.4.351
- 정희동, 황재동, 정규귀, 허승, 성기탁, 고우진, 양준용, 김상우 (2003) 한반도 근해 수온 및 염분의 장기변화 추세. *해양환경안전학회지* **9**(2):59-64
- Chang YS, An HS, Jeon DC, Nam JC, Seo JW (2002) The El Nino signals contained in precipitation at the East China Sea. *Clim Res* **23**:31-38
- Fukudome K, Yoon JH, Ostrovskii A, Takikawa T, Han IS (2010) Seasonal volume transport variation in the Tsushima Warm Current through the Tsushima Straits from 10 years of ADCP observations. *J Oceanogr* **66**(4):539-551
- Hahn SD (1994) SST warming of Korea coastal waters during 1881-1990. *KODC Newsletter* **24**:29-38
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, New York, 996 p
- Kang YQ (2000) Warming trend of coastal waters of Korea during recent 60 years (1936-1995). *J Fish Sci Tech* **3**(3-4):173-179
- Milliman JD, Meade RH (1983) World-wide delivery river sediment to the oceans. *J Geol* **91**(1):1-21
- Ning X, Lin C, Su J, Liu C, Hao Q, Le F (2011) Long-term changes of dissolved oxygen, hypoxia, and the responses of the ecosystems in the East China Sea from 1975 to 1995. *J Oceanogr* **67**(1):59-75. doi:10.1007/s10872-011-0006-7
- Park S, Chu PC, Lee JH (2011) Interannual-to-interdecadal variability of the Yellow Sea Cold Water Mass in 1967-2008: Characteristics and seasonal forcings. *J Mar Sys* **87**(3-4):177-193. doi:10.1016/j.jmarsys.2011.03.012
- Park T, Jang CJ (2012) Seasonal variation of freshwater budget in the Yellow and East China Seas simulated from an Ocean General Circulation Model. *Ocean Sci J* **47**(1):51-59
- Park WS, Oh IS (2000) Interannual and interdecadal variations of sea surface temperature in the East Asian Marginal Seas. *Prog Oceanogr* **47**(2-4):191-204
- Park YH, Yoon JH, Yoon YH, Vivier F (2012) Recent warming in the western North Pacific in relation to rapid changes in the atmospheric circulation of the Siberian High and Aleutian Low systems. *J Climate* **25**(10):3476-3493. <http://dx.doi.org/10.1175/2011JCLI4142.sl>
- Tang X, Wang F, Chen Y, Li M (2009) Warming trend in northern East China Sea in recent four decades. *Chin J Oceanol Limn* **27**(2):185-191
- Yoon WD, Yang JY, Shim MB, Kang HK (2008) Physical processes influencing the occurrence of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* (Scyphozoa: Rhizostomeae) around Jeju Island. *Korea J Plankton Res* **30**(3):251-260
- Yamamoto M (2012) Mesoscale structures of two types of cold-air outbreaks over the East China Sea and the effect of coastal sea surface temperature. *Meteorol Atmos Phys* **115**:89-112. doi:10.1007/s00703-011-0176-2
- Yeh SW, Kim CH (2010) Recent warming in the Yellow/East China Sea during winter and the associated atmospheric circulation. *Cont Shelf Res* **30**(13):1428-1434. doi:10.1016/j.csr.2010.05.002

Received Apr. 2, 2013

Revised Jun. 10, 2013

Accepted Jun. 17, 2013