

동해연안 수괴의 특성과 장기변동 추이

윤이용[†] · 정소정 · 윤상철
관동대학교 환경방재학과

Characteristics and long term variation trend of water mass in the coastal part of East Sea, Korea

Yi Yong Yoon[†], So Jung Jung and Sang Chul Yoon

Department of Environment & Disaster Prevention, Kwandong University, 210-701, Korea

요 약

최근 지구온난화로 인하여 동해안 어족 자원의 감소와 변화, 해저 식생의 아열대화와 같이 동해 연안 생태계의 급격한 변화가 주목되고 있다. 따라서 본 연구에서는 1960년도부터 2005년 사이 지난 45년 동안 매년 월별로 정선해양관측한 수온, 염분, 용존산소 등의 자료를 분석하여 동해 연안에 존재하는 해수 수괴들의 특성과 지구온난화로 인한 수괴별 물리, 화학적 특성 변화를 고찰하였다. 전 수괴의 수온이 지난 45년 동안 상승하였으며, 대만난류계수(약 1.6°C 상승)보다 북한난류계수(약 2.33°C)의 상승폭이 약 1.5배 크며, 기후변화의 직접적인 영향을 받는 대만난류계 표층 수온의 상승폭이 2.57°C로 기온 변화폭 보다 크다. 이는 육상상태계보다 연안 생태계의 아열대화가 훨씬 빠른 속도로 진행될 수 있음을 암시 한다. 반면, 표층수의 염분은 기온상승과 더불어 강수량의 증가 추세로 지난 45년 동안 약 0.29‰ 감소하였다. 용존산소농도는 전 수괴에서 감소하는 추세이며, 특히 수온 상승폭이 큰 북한난류계수의 용존산소농도 감소가 년 간 0.021 mg/l로 가장 크다. 동해고유수의 용존산소 감소는 수온 증가와 더불어 동해 내부 해양순환 시스템의 변화를 암시하며, 차후, 수온 상승과 함께 연안 수산 생물의 서식환경에 부정적인 요인으로 작용할 것이다.

Abstract – Rapid variation of coastal ecosystem in the East Sea of Korea, such as fishery resource variation and subtropical change of benthic flora, according to the global warming are actually noticed. In this study we try to identify the characteristics of water mass existing in this coastal area and to consider the variation of their physical and chemical properties using data of temperature, salinity and dissolved oxygen obtained by National Fisheries Research & Development Institute from 1960 to 2005. The temperature of all water mass rise during last 45 years; the rise of North Korea Cold Water temperature (about 2.33°C) is 1.5 times higher than that of Tsushima warm water (about 1.6°C), and the temperature rise of Tsushima Surface Water, directly affected by climate change is 2.57°C, higher than the atmospheric temperature rise during same period, indicating that subtropical change makes progress more rapidly in the coastal marine ecosystem than in the land ecosystem. Otherwise, the salinity in the surface water decrease 0.29‰ during last 45 years due to the rising trend of rainfall with atmospheric temperature. The dissolved oxygen concentration in the all water mass make a decreasing trend. Specially for the North Korea Cold Water, the dissolved oxygen concentration diminish 0.021 mg/l per year and the decrease in the East Sea Proper Water indicate a change of inner water circulation system.

Keywords: water mass(수괴), East Sea(동해), East Sea Proper Water(동해고유수), North Korea Cold Water(북한난류계수), Tsushima Middle Water(대만난류계 중층수), Tsushima Surface Water(대만난류계 표층수)

[†]Corresponding author: yoonyy@kd.ac.kr

1. 서 론

급속한 도시의 발달과 인구의 집중현상은 도시 대기 오염을 유발하고 산업 활동으로 인한 온실기체(CO₂, O₃, 등) 증가는 지구의 평균기온 상승과 더불어 기후변화를 예상하고 있으며, 최근의 지구 온난화는 전 지구적으로 중요한 관심사가 되고 있다.

지난 1세기 동안 온실가스 방출의 결과로 지구의 평균 기온은 최소한 0.5°C 정도 상승한 것으로 알려져 있으며 특히, 1980년대 이후 최근 20여 년 동안 전 지구적 규모의 기온 상승이 현저하게 나타나고 있다. 이 같은 변화의 영향에 대한 예측은 복잡하며 이에 대한 지속적인 연구가 수행되고 있다(Khalil and Rasmussen, 1984; Thompson and Cicerone, 1986; Novelli *et al.*, 1994).

지구온난화현상은 강수량과 증발량 같은 기상요소에도 영향을 미칠 수 있으며, 해양은 기상과 밀접한 상호작용을 하기 때문에(Gill, 1982) 기후변화는 해양 생태계의 중요한 물리적 환경인자인 수온과 염분의 변화를 조래할 수 있다. 해양에서 수온과 염분의 변화는 해양생태계의 변화에 직접적인 영향을 미칠 수 있으며(Zhang *et al.*, 2000), 해양생태계 변화에 대한 지표가 될 수 있기 때문에 수온과 염분의 장기변화 패턴을 연구하는 것은 매우 중요하다.

우리나라 동해 연안에서도 지구온난화로 인한 수온 상승과 이로 인한 생태계 변화에 주목하고 있다. 한류성 어종인 명태의 어획량이 줄어든 반면, 난류성 어종인 오징어의 어획량이 늘어나는 등 어족자원의 감소와 변화, 해저 식생의 아열대화 같은 현상들이 나타나고 있다.

1968년부터 2002년까지 동·서·남해 180여개 지점에서 측정한 수온을 분석한 결과 동해의 표면수온은 연평균 0.022°C, 33년간 0.72°C 높아졌다는 보고가 있으며(장이현 외 2003), 지난 100년간 겨울철 평균 해수면 수온이 3.4°C 높아져 연교차가 3.7도 줄었으며, 수심 500 m에서 0.216°C, 수심 1,000 m에서 0.124°C 상승했다는 보고 자료가 발표된 바 있다. 겨울 해수온이 상승하면서 계절에 따른 온도차(연교차)가 줄어들게 되어 아열대화 해역으로 변화될 수 있음을 시사한다.

그러나 동해 해역의 전반적인 물리적 순환에 관한 연구는 아직 대단히 미비한 실정이며, 수온과 염분 변화에 대한 일부 연구가 수행된 바 있으나(Hahn 1997, 국립수산진흥원 1998, Kang 2000, Jeong *et al.* 2003) 표층수에 국한되거나 수층별로 고려되었으며, 동해로 유입되는 물량별 변화 패턴에 대한 고려는 없었다. 또한 가속화되고 있는 온난화의 영향을 고려 할 때 최근 10여 년간의 변화 동향도 분석할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 국립수산과학원에서 1960년도부터 2005년 사이 지난 45년 동안 매년 월별로 6회(2, 4, 6, 8, 10, 12월) 정선해양관측한 수온, 염분, 용존산소 등의 자료를 분석하여 동해 연안에 존재하는 해수 수괴들의 특성과 지구온난화로 인한 수괴별 물리, 화학적 특성 변화를 고찰하였다.

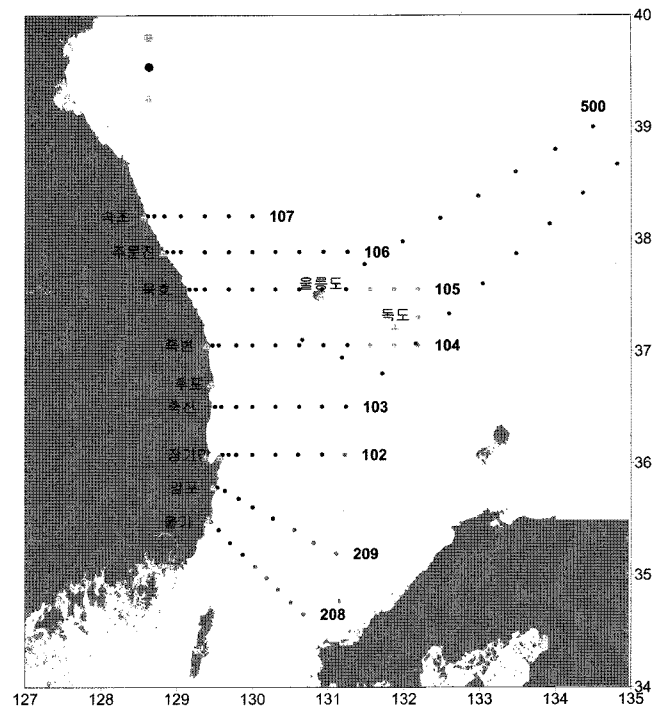


Fig. 1. Study area and location of observation stations.

2. 조사 방법

최근 동해 연안의 물리, 화학적 수질 특성 변화를 규명하기 위하여 국립수산과학원에서 9개정선 65개 정점(Fig. 1)에서 최근 45년 동안(1960년~2005년), 년 6회씩 수층별로 조사한 수온, 염분, 용존산소의 자료를 중심으로 T-S diagram을 작성하여, 동해 연안에 존재하는 수괴의 특성을 파악하고, 최근 반세기 동안의 수괴별 수온, 염분, 용존산소의 변화 양상을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 동해연안 수괴분석(T-S diagram)

1960년부터 2005년 사이 월별(2, 4, 6, 8, 10, 12월) 수온과 염분 자료를 10년 단위로 [1960년대(1960~1969년), 1970년대(1970~1979년), 1980년대(1980~1989년), 1990년대(1990~1999년), 2000년대(2000~2005년)] 구분하여 T-S diagram을 작성하여 Fig. 2에 도시하였으며, Table 1에 각 수괴별 특성을 요약하였다.

동해 연안의 해수는 수온, 염분, 용존산소와 수심으로 부터 네 개의 고유한 수괴가 혼합되어 있는 양상임을 알 수 있다(Fig. 2, Fig. 3). 저역의 표층수(Surface Water)는 한국이나 일본으로부터 유입되는 육수와 대한해협을 통해 유입되는 동중국해 해수에 의해 형성되며 일반적으로 여름철 계절적 수온약층 상부에 존재한다. 표층수 아래의 중층수(Intermediate Water)로는 동해남부 난수역에 존재하는 대마난류에 의해 운반되는 고온, 고염의 대마난류 계수와 동해북부 냉수역에 존재하는 저온, 저염분, 높은 용존산소

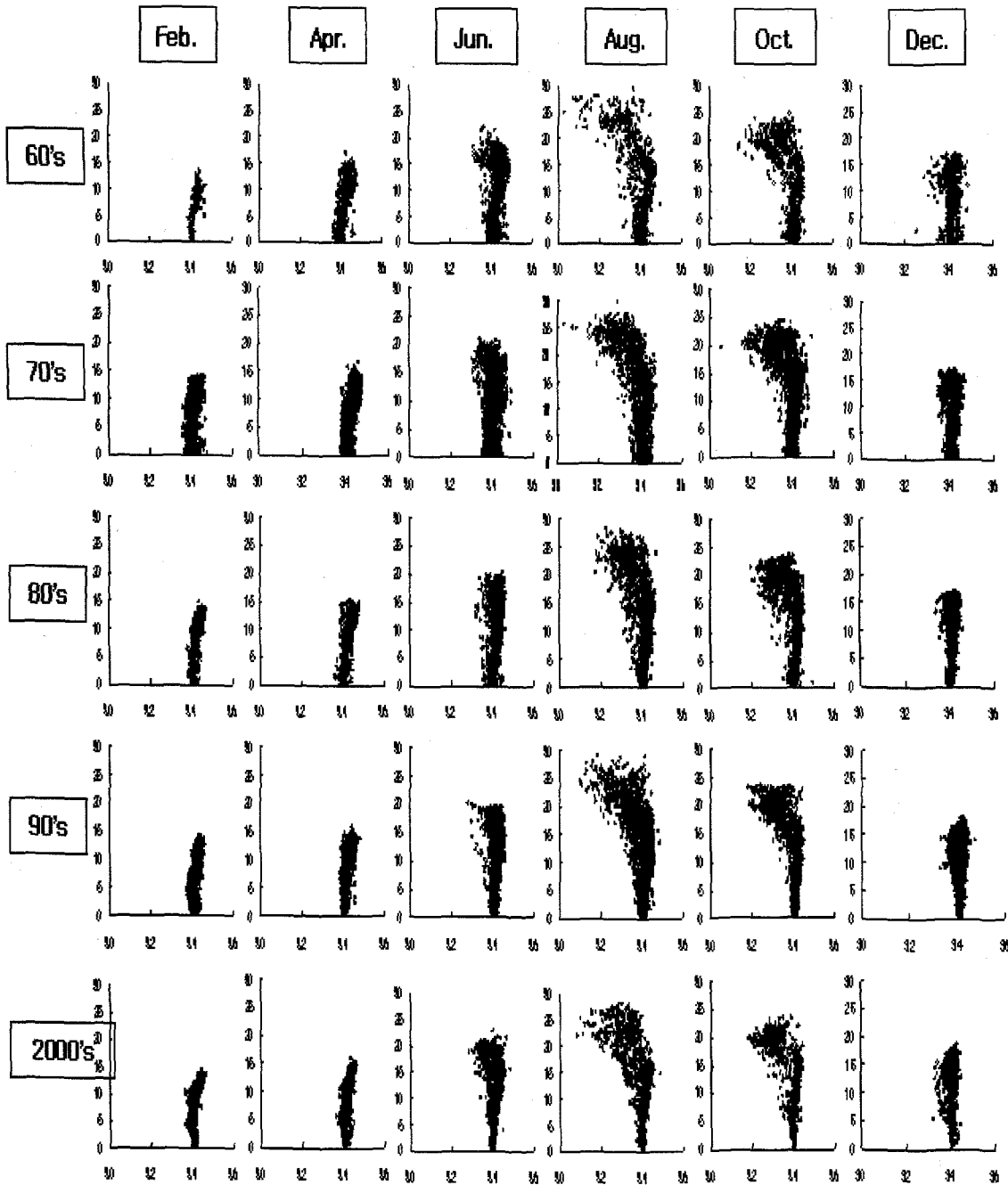


Fig. 2. T-S diagram in the coastal part of the East sea, Korea from 1960 to 2005.

값을 갖는 북한한류계수가 있다. 이들 세 개의 고유한 수괴가 동해 연안 표층중수에서 혼합되며, 혼합되는 양상은 수역과 수리적 특성에 따라 다양하게 나타난다. 동해내 해수의 대부분을 차지하는 400 m 이하의 수심에는 수온이 1 미만의 수직적으로 균질한 해수가 존재하며, 이는 동해고유수(East Sea Proper Water)로 정의된다.

2000년도 동절기(2월)와 하절기(8월)에 동해 연안에 존재하는 물량의 물리적 혼합 양상을 설명하기 위해 Fig. 3에 T-S diagram을 도시하였다. 동절기인 2월에는 표층수와 대마난류계중층수

의 구분이 명확하지 않은 반면 하절기인 8월에는 4개의 수괴가 뚜렷이 구분되며 수역별로 수리적 특성에 따라 혼합되는 양상을 알 수 있다. 8월 동해 연안에 존재하는 표층수는 담수와 대만해협을 통해 유입되는 동중국해 해수의 영향에 따라 30.8~33.7% 넓게 분포하며, 이들 표층수와 표층하부에 위치하는 저염의 북한한류계수 고염의 대마난류계수의 물리적 혼합으로 인한 분포 양상이 뚜렷이 나타나고 있다. 춘계와 추계의 수괴는 동절기와 하절기의 양상으로 변해가는 과도기적 양상을 보이고 있다.

Table 1. Definition of water masses in the East sea of Korea

	Gong & Park* (1969)	Lim & Chang* (1969)	An (1974)*	Park (1978)*	This study**
Tsushima Surface Water	higher than 20°C less than 33.8‰	18~29°C 32.0~34.0‰	+	higher than 20°C less than 33.8‰	18.4~26°C 33.45~34.3‰
Tsushima Middle Water	14~17°C 34.30~34.60‰	14~18°C 34.40~34.80‰	13~17°C 34.20~34.70‰	14~17°C 34.30~34.60‰	12.2~17.6°C 34.25~34.62‰
North Korean Cold Water	Middle Water 5~7°C 33.95‰	+	0.5~4°C 34.00~34.05‰	0.2~4°C 34.00~34.05‰	1.95~7.22°C 33.90~34.1‰
	Lower Water 1°C 33.96~34.10‰	※ Bottom Cold Water in the Korea Strait 3~10°C 34.0~34.30‰			
East Sea Proper Water	approx. 1°C 33.96~34.10‰	0~1°C 34.0~34.05‰ below 200 m	+	approx 1°C 33.96~34.10‰ below 200 m	0~1.05°C 33.90~34.18‰

*Definition of water masses in the southern part of the East sea in summer.

**Definition of water masses in the coastal part of the East sea from 1960 to 2005

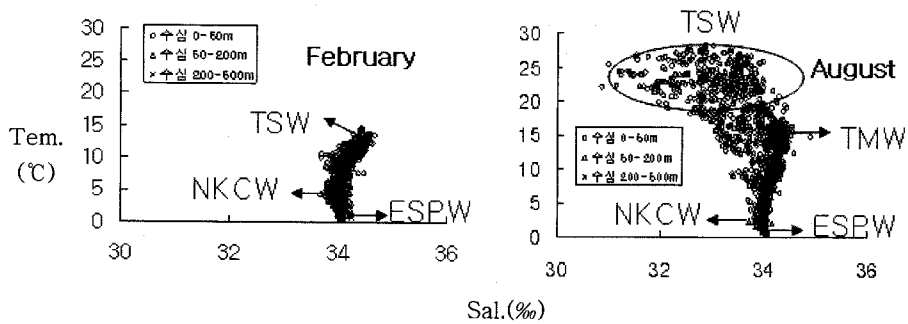


Fig. 3. T-S diagram of February and August of 2000's in the coastal part of the East sea, Korea.

- ※ESPW: East Sea Proper Water
- ※NKCW : North Korea Cold Water
- ※TMW : Tsushima Middle Water
- ※TSW : Tsushima Surface Water

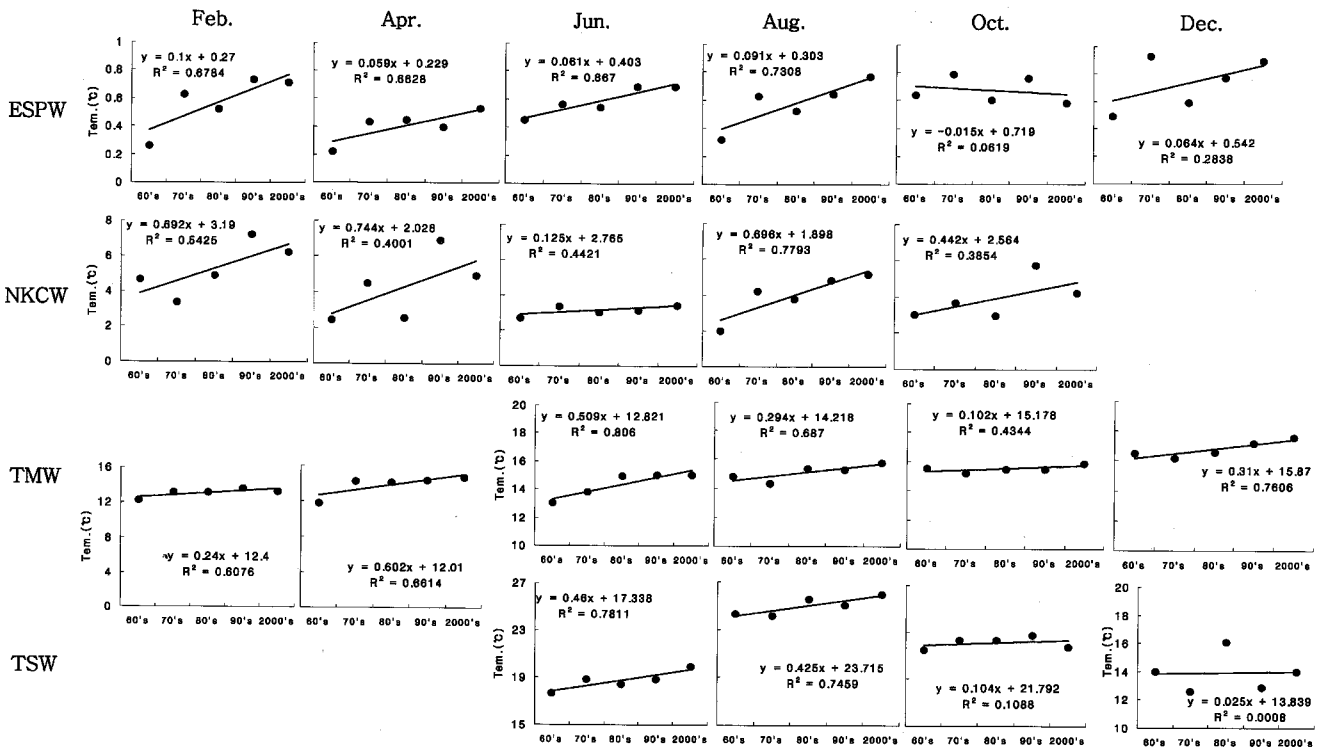


Fig. 4. Trend of change in the water temperature at the coastal part of the East sea, Korea from 1960 to 2005.

3.2 수괴별 수온과 염분의 변동 추이

지난 45년 동안(1960~2005) 동해 연안에 존재하는 수괴들의 월별 수온 변동 추이를 Fig. 4에 나타내었다. 전반적으로 모든 수괴의 수온이 상승하였으나, 수괴별, 계절별로 다소 차이가 있다.

동해고유수는 수문학적으로 환절기인 10월 (0.06 감소)을 제외하고는 계절별로 0.24~0.4 상승하였으며, 특히 동절기인 2월의 수온 상승이 두드러진다. 북한 한류계수는 계절별로 0.5~2.78 상승했으며 6월을 제외한 2, 4, 8월달 모두 상승폭이 크다. 대만 난류계수는 북한한류계수 보다 수온의 변화가 적으며, 동절기인 2월과 4월에는 표층수와 완전히 혼합되어 구분되지 않으나 수온약층이 형성되는 하절기에는 저염의 표층수와 뚜렷이 구별된다. 저염의 표층수도 전반적으로 상승하였으며, 계절별로 0.1~2.41 상승하여 하절기의 상승폭이 동절기보다 크다.

지난 45년간 각 수괴별로 수온과 염분의 장기 변화 추이를 Fig. 5에 도시하였으며, 년대별로 월평균한 수온과 염분 자료를 이용하여 식 (1)과 같은 1차 선형회귀식에 의해 장기변화를 구하였다.

$$Y=at+b \quad (1)$$

여기서 t 는 시간이며, Y 는 시간 t 에서 1차 선형회귀식에 의해 구한 값으로 수온과 염분을 나타내고, a 는 기울기이고, b 는 절편이다.

지난 45년 동안(1960~2005) 수온 변화를 살펴보면, 동해고유수가 약 0.33°C 상승했고 북한한류계수는 약 2.33°C 상승했으며, 대만난류수계층층수는 약 1.6°C 상승했고 대만난류수계표층수는 약 2.57°C 상승하였다.

전 수괴의 수온이 지난 45년 동안 상승하였으며 대만난류계수보다 북한한류계수가 약 1.5배 상승폭이 크며, 기후변화의 직접적인 영향을 받는 표층수온의 상승폭이 2.57°C로 가장 두드러지게 나타났다. 이는 지난 100년 동안 지구온난화로 인한 한국 근해 표면 수온이 1.8°C 상승하였으며, 다음 100년 후에는 지속적으로 증가하여 4°C 증가할 것으로 예측한 Hahn(1997)의 자료와 비교할 만하다.

최근 지구온난화와 동해 인접한 강원도 기상환경 변화 연구(윤, 2004)에 의하면 지난 45년 동안 강원도 동해안의 기온은 1.12°C

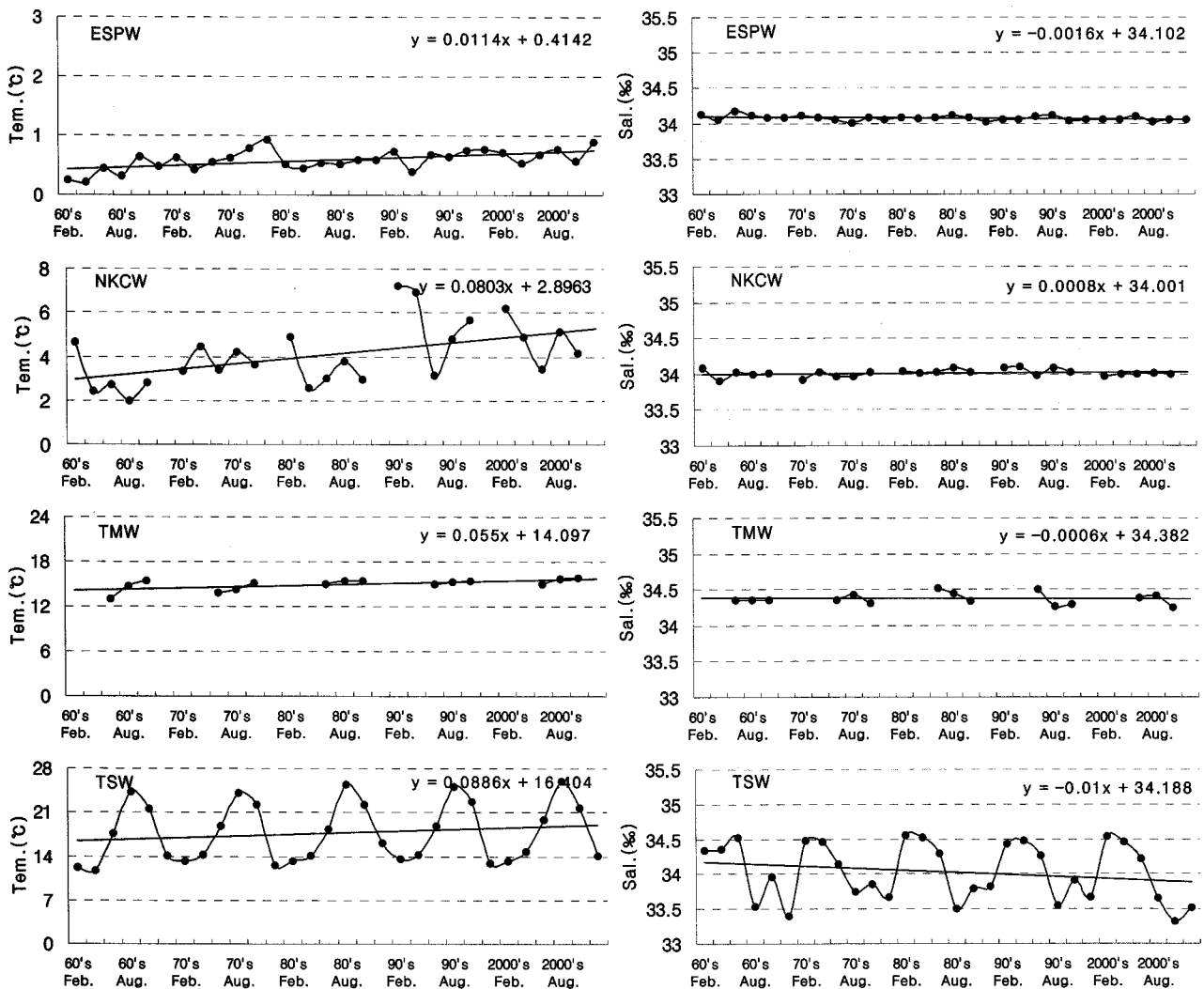


Fig. 5. Trend of average change in water temperature and salinity at the coastal part of the East sea, Korea from 1960 to 2005.

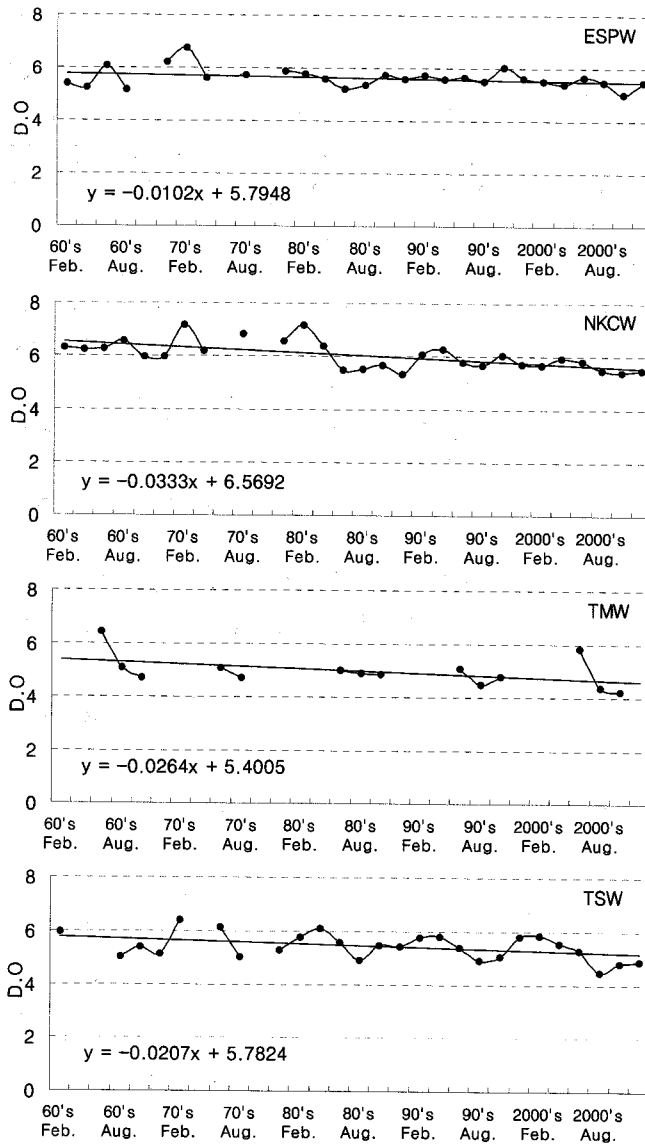


Fig. 6. Trend of average change in dissolved oxygen at the coastal part of the East sea, Korea from 1960 to 2005.

상승한 것으로 알려져 있다. 비록 동해연안의 평균수온 상승은 아니지만 각 수괴의 수온 상승으로 부터 육상 생태계보다 해양생태계의 온난화가 더욱 빠르게 진행될 수 있음을 알 수 있다.

반면, 염분의 변화는 표층수를 제외하고는 거의 변화가 없다. 표층수의 염분은 지난 45년 동안 0.29% 감소하였는데 이는 기후 상승과 더불어 강수량의 증가 추세(윤, 2004)와 밀접한 관계가 있을 것으로 사료된다.

3.3 수괴별 용존산소 농도와 동해해수의 순환체계의 변화

각 수괴별 용존산소 농도의 변화추이를 Fig. 6에 나타내었다. 일반적으로 수온 상승은 용존산소의 포화도를 감소시킨다. 따라서 전 수괴에서 지난 45년 동안 용존산소의 농도가 감소하는 추세이며, 특히 수온 상승폭이 큰 북한한류계수의 용존산소 농도 감소가

두드러진다. 각 수괴별로 동해고유수가 0.29 mg/l, 북한한류계수가 0.96 mg/l, 대마난류계수 0.76 mg/l, 표층수 0.60 mg/l 감소하였다.

동해고유수의 용존산소 감소는 수온증가와 더불어 동해 해수 순환 시스템의 변화를 암시한다. 동해고유수는 동해 북부의 일본 분지에서 추운 겨울철 표층에서 냉각된 차고 산소가 풍부한 물이 동해 바닥으로 내려가 저층수를 만드는 것으로 알려져 있다(서문식 외, “동해 해수 순환의 이해”). 따라서 동해 고유수의 용존산소 농도 감소는 표층에서 하강하여 물과 함께 공급되는 용존산소의 감소를 의미하며, 이는 해수 순환시스템의 감속을 의미한다.

표층 하강수의 감소는 동해 일본 해역에서 흔히 나타나는 냉수대의 감소를 초래하며, 심층에서 표층으로 공급되는 영양성분의 감소는 수온상승, 용존산소감소와 더불어 연안 수생 생물의 서식 환경에 부정적인 요인으로 작용할 것이다.

4. 결 론

동해연안은 계절풍의 영향을 많이 받는 지역으로 여름철에는 남동풍의 영향으로 표층의 유동이 북쪽으로 올라가려는 흐름이 강하고, 겨울철에는 북서풍의 영향으로 남쪽으로 향하는 유동의 세기가 강해져서 북쪽으로 올라가려던 흐름이 방해 받게 된다. 이처럼 동해연안 계절풍의 영향으로 한류와 난류가 서로 순환하는 독특한 수괴 구조를 갖고 있기 때문에 동해연안의 수온과 염분 같이 보존성이 큰 인자들의 시-공간적인 분포양상이 매우 복잡하게 나타난다.

본 연구에서는 최근 45년 동안 수온과 염분 자료를 중심으로 동해연안에 존재하는 수괴의 특성을 규명하였으며, 이들 수괴의 변화 양상을 분석하였다. 전 수괴의 수온이 지난 45년 동안 상승하였으며, 대마난류계수(약 1.6°C 상승)보다 북한한류계수(약 2.33°C)의 상승폭이 약 1.5배 크며, 기후변화의 직접적인 영향을 받는 대마난류계 표층 수온의 상승폭이 2.57°C로 기온 변화폭 보다 크다. 이는 육상상태계보다 연안 생태계의 아열대화가 훨씬 빠른 속도로 진행될 수 있음을 암시 한다. 반면, 표층수의 염분은 기온상승과 더불어 강수량의 증가 추세로 지난 45년 동안 약 0.29% 감소하였다.

용존산소농도는 전 수괴에서 감소하는 추세이며, 특히 수온 상승폭이 큰 북한한류계수의 용존산소농도 감소가 년 간 0.021 mg/토 가장 크다. 동해고유수의 용존산소 감소는 수온 증가와 더불어 동해 내부 해양순환 시스템의 변화를 암시하며, 차후, 수온 상승과 함께 연안 수산 생물의 서식환경에 부정적인 요인으로 작용할 것이다.

동해연안 해수온 상승의 원인 규명에 대해서는 태평양상에 발생되고 있는 엘니뇨현상과의 관계 여부 등 아직 연구, 보완할 점이 있으나, 지구온난화에 의한 해류변동, 먹이생물 변동, 북태평양해역의 기후변동과 더불어 일어나는 해양환경의 체제전환(Regime Shift) 현상으로 볼 수 있을 것이다.

따라서 전 지구적인 기후변화에 따른 온난화 현상과 연근해의 수온 상승이 지속된다면, 동해연안의 한류성 어종이 소멸되는 반면 난류성 어종은 점점 다양하게 나타날 것으로 예상되며, 궁극적으로는 온대성 해양생태계가 아열대성 해양생태계로 변화될 것이다.

후 기

본 연구는 관동대학교 첨단해양공간개발연구센터 RIC 연구사업인 “해양생태복원기술개발”과 교내연구비의 일부로 수행되었으며, 본 연구에 사용된 자료들의 측정에 참여한 국립수산물품질관리원의 모든 분들께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김철호, 김 구, 1983, “한국 동해안에 출현하는 냉수괴의 특성과 기원”, *The journal of the Oceanological Society of Korea*, Vol. 18, No. 1, p. 73-83.
- [2] 윤이용, 윤상철, 2004, “지구온난화와 강원도 기상환경의 변화”, *산업기술개발 논문집*, 제21호.
- [3] 장이현, 황재동, 서영상, 2003, “지구환경 변화와 관련된 한국 연근해 해양 이상변동”, *한국환경과학회*, Vol. 12, No. 3, p. 257-263.
- [4] Chung Kil Park, 1978, “Chemical Oceanographic aspect of the cold water mass in the offshore of the East coast of Korea”, *Bull. Korean Fish. Soc.* 11(2), p. 49-54.
- [5] Gill, A. E. 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Academic Press, 662pp.
- [6] Jeong, H. D., Hwang, J. D., Jung, K. K., Heo, S., Sung, K. T., Go, W. J., Yang, J. Y., Kim, S. W., 2003, “Long term trend of change in water temperature and salinity in coastal water around Korea Peninsula”, *Journal of the Korea Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 9, No. 2, p 59-64.
- [7] Hahn, S. D. 1997, “Role of SST warming for living resources in Korean coastal waters”, *KODC Newsletter*, 30, 19-28.
- [8] 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.
- [9] Khalil, M. A. K., and Rasmussen, R. A., 1984, “Carbon monoxide in the Earth's atmosphere; Increasing trend”, *Science*, 224, 54-56.
- [10] Thompson, A. M. and R. J. Cicerone, 1986, “Possible perturbation of CO₂, CH₄ and OH”, *J. Geophys. Res.* 91, 10853-10864.
- [11] Zhang, C. I., Lee, J. B., Kim, S. and Lee, J. H., 2000, “Climatic regime shifts and their impacts on marine ecosystem and fisheries resources in Korean water”, *Progress in Oceanography*, 44, 171-190.

2006년 11월 11일 원고접수

2007년 2월 7일 수정본 채택