

동중국해 북부해역의 해양환경 장기변동

윤상철¹ · 윤석현^{1,†} · 황재동¹ · 서영상¹ · 윤이용²

¹국립수산과학원 수산해양종합정보과

²가톨릭관동대학교 공과대학 보건환경학과

Long-term Variation in Ocean Environmental Conditions of the Northern East China Sea

Sang Chol Yoon¹, Suk Hyun Yoon^{1,†}, Jae Dong Whang¹, Young Sang Suh¹ and Yi Yong Yoon²

¹Fishery and Ocean Information Division, NFRDI, Busan 619-705, Korea

²Department of Health & Environment, Catholic Kwandong University, Gangnung 210-701, Korea

요 약

우리나라 주변해역의 해양환경에 밀접한 영향이 있는 동중국해 북부해역의 해양환경 특성을 이해하기 위하여 해양환경 인자의 장기변동 양상을 파악하여 동중국해 북부해역의 해양특성을 구명하기 위하여 연구를 수행하였다. 조사 방법은 1995년부터 2014년까지 20년간 계절에 따라 국립수산과학원 한국해양자료센터(KODC : Korea Oceanographic Data Center)의 동중국해 북부해역의 해양조사 자료(수온, 염분, 용존산소, 영양염, 엽록소-*a*)를 이용하였다. 연구기간 동안 동중국해 북부해역에 영향을 미치는 주요 수괴는 장강희석수, 대만난류수, 황해저층냉수, 쿠로시오 기원수로 구분되었다. 표층과 아표층에 형성되는 장강희석수와 대만난류수는 20년간 세력이 약화되었으며, 중층에 형성되는 쿠로시오 기원수의 세기는 현저히 감소하는 추세를 나타내었다. 그러나 황해저층냉수는 세력이 확장되는 추세를 나타내었다. 인산염과 규산염은 감소하는 추세였으며 인산염은 2009년 이후 표층에서 고갈되는 양상을 나타내었다. 이러한 원인으로는 장강희석수와 대만난류수를 통해 유입되는 영양염의 농도가 낮기 때문인 것으로 판단된다. 엽록소-*a*의 농도는 연구기간 동안 증가하는 경향을 나타냈으며 이러한 원인은 수온증가와 황해저층냉수로부터 영양염 공급, 산사댐 건설에 의한 부유물질 감소에 따른 광투과 증가의 영향으로 판단된다.

Abstract – The present study was conducted to investigate the oceanic characteristics of the northern East China Sea through identification of long-term variation patterns of oceanic environment factors, for the objective of gaining understanding of oceanic environment characteristics of the northern waters of East China Sea, which closely influence the oceanic environments of waters nearby South Korea. The study methodology included the use of oceanographic data (water temperature, salinity, dissolved oxygen, nutrients, and chlorophyll-*a*) on the northern East China Sea from the Korea Oceanographic Data Center (KODC), collected by season for 20 years between 1995 and 2014. Moreover, for the study on the distribution of nutrients, chlorophyll-*a*. The main water masses that affected the northern East China Sea during the study period were classified as Changjiang diluted water (CDW), Taiwan current warm water (TCWW), Yellow Sea cold water (YSCW), and Kuroshio source water (KW). The forces of CDW and TCWW that forms on the surface and sub-surface layers had weakened for 20 years and the force of KW that forms on the intermediate layer showed a distinctively decreasing trend. However, YSCW showed a trend of expanding its force. Phosphate and silicate exhibited a decreasing tendency and phosphate showed a pattern of being depleted on the surface layer after 2009. It is determined that one of the reasons for this is the concentration of nutrients introduced through CDW and TCWW being too low. The concentration of chlorophyll-*a* exhibited an increasing tendency during the study period, the reasons for which are determined to be the influences of increase in water temperature, supply of nutrients via YSCW, and increases in light transmission from decrease in suspended solid due to the construction of the Three Gorges Dam.

Keywords: Water masses(수괴), Long-term variation(장기변동), Changjiang Diluted Water(장강희석수), T Current Warm Water(대만난류), Yellow Sea Cold Water(황해저층냉수), Kuroshio Source Water(쿠로시오)

[†]Corresponding author: younsh@korea.kr

1. 서 론

동중국해는 계절에 따라 유입되는 다양한 해류의 영향을 받는 해역이다. 쿠로시오 기원의 고온·고염의 수괴뿐만 아니라 황해와 남중국해(South China Sea)에서 유입되는 해류와 밀접한 관련이 있다(Chen[2008]; Chen[2009]). 남해와 황해 그리고 동중국해는 얕은 수심으로 인하여 해류 분포에 의해 수괴(Water mass) 분포가 결정되며, 바람과 같은 대기 등의 외력 변화에 영향이 큰 해역이다(Seung[1992]; Lee and Kim[2013]). 동중국해역은 $0.5 \times 106 \text{ km}^2$ 의 대륙붕이 발달하여 장강(Yangtze, Changjiang) 하구와 타이완 북쪽에 주요 어장이 형성되는 해역으로 중위도에 위치하며, 육지와 태양의 경계 해역에 해당한다(Gong *et al.*[2003]; Lee and Kim[2013]). 동중국해에 영향을 미치는 주요 수괴는 염분 29.94~30.50 이하의 장강희석수(CDW; Changjiang Diluted Water), 수온 24°C 이상 염분 34.4 이상의 쿠로시오(Kuroshio Current) 해류와 수온 13.2°C 이하, 염분은 32.60~33.70의 황해저층냉수(YSCW; Yellow Sea Cold Water)이다(Hur *et al.*[1999]; Jang *et al.*[2011]). 황해에서 유입되는 중국연안수와 황해저층냉수는 동중국해 북부해역의 염분을 비롯해 질소, 인, 규소 농도에 영향을 준다. 질소와 규소의 농도는 동중국해가 황해보다 더 높으며, 인은 황해의 농도가 동중국해에 비해 높은 특성이 있다(Liu *et al.*[2003]). 또한 남중국해의 아표층수는 대륙붕에서 발생한 용승을 통해 다량의 영양염(N:49%, Si:54%) 중 특히 인(71%)을 유입시킨다(Chen[2008]). 또한 동중국해는 황해에서 어획되는 어획량(2.25 t/km^2)에 비해 높다(3.92 t/km^2). 주요 우점종은 참고둥어(*Scomber japonicus*)와 멸치(*Engraulis japonica*)이며, 입자유기탄소, 총유기물질, 부유물질 그리고 식물플랑크톤은 동해에 비해 높으며, 특히 장강 하구에서 높은 특성이 있다(Rebstock and Kang[2003]). 10월~1월에는 북풍계열의 계절풍이 우세한 시기로 쿠로시오 해류의 세기가 약화되면 황해에서 생성된 황해저층냉수가 유입되는 반면 하계(6월, 7월)에는 남풍계열의 계절풍이 우세하여 중국 대륙 기원의 장강 유출수가 바람의 방향에 따라 북동진하여 동중국해 북부해역으로 유입되거나 중국 연안을 따라 남하하는 계절적인 특성이 있다. 또한 쿠로시오 해류의 세기가 강화되고 연안 용승의 원인이 되는 대만 난류와 중국대륙연안수(YSCC; Yellow Sea Coast Current)가 함께 작용한다(Chen *et al.*[2004]). 1월~4월, 9월~12월에는 장강 유출수(Changjiang discharge Water)가 남하하며, 추계에는 황해 혼합수의 영향을 받는 해역이다(Kim *et al.*[2009]). 매일 동중국해에 영향을 미치는 수괴에 관한 연구에서 1~5월에는 중국대륙연안수와 황해난류수(YSWC; Yellow Sea Warm Current)가 우세하며, 6~12월에는 대만난류수(TCWW; Taiwan Current Warm Water)가 동중국해에서 우세한 것으로 보고되었다(Li *et al.*[2006]).

장강으로부터 하구로 유입되는 DIN의 농도는 1985년~1998년까지 약 1.9배 증가하였고, 같은 기간 DIN의 flux는 1.3배 증가하였다(Lin *et al.*[2005]). 원인으로서는 1980년대 이후 급격히 증가된 화학 비료 사용의 결과로 나타났다(Li *et al.*[2007]). 그 결과 장강하구에서 발생하는 적조의 발생빈도는 1990년대에 비해 2000년대 초에

21배 증가하였으며, 그 결과 1987~1988년에 $2,000 \text{ km}^2$ 의 적조 발생면적이 2000년에는 $7,000 \text{ km}^2$ 이상으로 확대되었고, 이때 우점하는 식물플랑크톤은 규조류(Diatom) 중심에서 외편모조류(*Prorocentrum dentatum*, *Noctiluca scintillans*, *Alexandrium spp.*)로 종의 천이가 발생하고 있다(Chen *et al.*[2003]; Li *et al.*[2007]). 라뎁 동위원소를 통해 장강 유출수의 혼합비에 대한 연구에서 장강은 인산염이나 규산염에 비해 DIN의 주요 공급원으로서 동중국해 북부해역의 생태계에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다(Kim and Kim[2009]). Excess nitrate로 계산한 동중국해 해역의 표층은 외부로부터 유입된 질산염이 식물의 성장에 기여하며, 질산에 비해 인에 의해 제한될 수 있는 것으로 보고되었다(Wong *et al.*[1998]).

동중국해 북부해역에 영향을 미치는 장강 상류에는 산샤댐(Three Gorges Dam)이 하구로부터 400 km 상류에 위치한 Yichang에 건설되었다. 장강은 중국에서 가장 긴 강으로 길이가 6,300 km, 하류는 Xuliujing로부터 하구까지 110 km, 하구의 폭은 90 km로 동중국해로 유입되는 담수의 평균 유출량은 $9.24 \times 10^{11} \text{ m}^3 \cdot \text{year}^{-1}$ 이며, 퇴적물의 유출량은 $470 \text{ Mton} \cdot \text{year}^{-1}$ 이다(Li *et al.*[2007]; Chai *et al.*[2009]). 우기(5월~10월)의 유출량은 연간 유출량의 71.7%, 건기(11월~4월)에는 28.3%에 달한다(Tian *et al.*[1993]; Chai *et al.*[2009]). 산샤댐 건설은 1993년 12월부터 시작되었으며, 2003년 6월에 1차 공사가 완료(Gong *et al.*[2006]) 되었고, 2006년 10월에 2차 물막이공사 완료 후, 2009년 11월에 완공되었다. 장강 유출수의 유량은 산샤댐 건설 이후 인위적으로 조절되고 있으며, 유출량은 산샤댐 건설전인 1961~2002년에 비해 1차 물막이 공사 완료후인 2003년~2009년에 평균 9~18% 감소하였으며(MLTMA[2009]), 또한 부유물질 배출량은 산샤댐 건설 전·후 최대 56% 감소하였다(MLTMA[2009]). 따라서 산샤댐 건설 전·후 유량 감소를 비롯한 여러 가지 환경요인의 변동에 의해 동중국해 북부해역의 해양 생태계는 변화될 것으로 판단되며, 실제로 Chen[2000]은 산샤댐 완공 후 인산염의 공급 감소로 인해 생물생산이 감소될 것으로 예견한 바 있다. Yanagi[2002]은 산샤댐의 유출량 감소로 인해 동중국해로 유입되는 영양염의 감소가 동해에까지 영향이 미칠 것이라 예측하였다.

동중국해에 대한 연구에는 다양한 분야에서 수행되었다. 수온 등의 장기변동을 비롯하여(Min *et al.*[2010]; Lee and Kim[2013]), 수괴 분포(Kim *et al.*[1991]; Gong *et al.*[1996]; Hur *et al.*[1999]), 엽록소-a의 분포 특성(Oh *et al.*[1999]), 유기 탄소 분포(Son *et al.*[2010]; Kim *et al.*[2008, a]), 위성을 이용한 수온과 엽록소-a와의 관계(Kim *et al.*[2008, b]; Son *et al.*[2012]), 동물플랑크톤의 분포(Rebstock and Kang[2003]; Choi *et al.*[2011]), 영양염과 엽록소-a 및 부유물질의 분포특성(Wang *et al.*[2003]; Kim *et al.*[2005]; Kim *et al.*[2007]; MOMAF[2006]; Kim *et al.*[2009]), 황해저층냉수의 거동(Jang *et al.*[2011])에 대한 연구가 수행되었다. 또한 하계에 용승이 발생한 해역에서 영양염과의 관계(Chen *et al.*[2004])와 산샤댐 건설 전·후의 해양 생태계 변화(Chai *et al.*[2009])등에 대한 연구가 이루어졌다.

본 연구에서는 국립수산물과학원에서 지난 20년 동안의 관측 결과를

바탕으로 동중국해 북부해역 주요 수괴의 시간에 따른 변동 양상과 수괴 변동에 따른 환경 인자의 변동 특성에 대하여 구명하고, 산사댐 건설에 따른 동중국해 북부해역의 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

동중국해 북부해역의 물리·화학적 특성을 연구하기 위하여 1995~2014년까지 20년 동안 각 계절을 대표하는 2월, 5월, 8월, 11월의 해양조사자료를 이용하였다. 조사해역은 동중국해 북부해역으로 31°30'N, 124°E~32°30'N, 127°59'E에 해당하며, 국립수산과학원의 동중국해 해양조사 해역으로 3개 Line 315, 316, 317 Line에 위치한 32개 정점에서 수행되었다(Fig. 1).

해수의 물성 조사를 위하여 SBE 19 plus 와 9/11 CTD을 이용하여 표층에서 저층까지 수온, 염분을 측정하였다. CTD 자료는 하강시의 자료를 사용하여 표준수층의 자료를 평균하여 분석하였다. 영양염과 엽록소-a를 분석하기 위한 시료는 Rosette sampler의 니스킨(Niskin) 채수기를 이용하여 표층에서 125 m까지 8개 수층에서 시료를 채수하였다.

영양염 분석을 위해 채수한 시료는 0.45 µm membran filter로 여과한 후 냉동 보관하였으며 실온에서 해동한 후 질산염, 인산염, 규산염을 분석하였다. 질산 질소(NO₃-N)는 카드뮴 환원관을 이용하여 아질산 질소로 환원시킨 후 술페닐아미드(Sulfanilamide)에 반응시키고, 염화 나프틸 에틸렌디아민(Ethylene diamine chloride)과 반응시킨 후 분광광도계(Spectrophotometer, varian)를 이용하여 분석하였다. 인산 인(PO₄-P)은 몰리브덴산(Molybdic acid)과 반응시키고

안티모니(Antimony)가 첨가된 아스코르빈산(Ascorbic acid)으로 환원시킨 후 분석하였고, 규산 규소(SiO₂-Si)는 몰리브덴(Molybdenum)과 반응시킨 후 메탈(Metal)과 옥살산(Oxalic acid) 환원용액을 첨가하여 규소-몰리브덴산 착화합물을 생성시킨 후 분광광도계를 이용하여 분석하였다. 엽록소-a의 분석은 해수를 0.45 µm membran filter에 여과한 후 90% 아세톤으로 추출하여 Turner 10 Fluorometer를 이용하여 분석하였다.

3. 결 과

3.1 수괴의 장기변동

해양 생태계는 해역에 유입되는 해류 즉 수괴에 의해 영향을 받는다. 동중국해 북부해역은 지역적인 특성으로 크게 고온, 고염의 수괴와 중국대륙으로부터 유입되는 장강희석수로 대표되는 연안수 그리고 황해저층으로부터 유입되는 저온수의 영향을 받는다. 수괴의 구분은 다양한 방법으로 분석되며, 흔히 T-S diagram을 이용하여 수괴를 구분한다(Li *et al.*[2006]). 수온과 염분은 보존적인 특성을 나타내어 수괴의 구분과 기원을 추적하는데 사용된다.

동중국해 해역의 수괴에 관한 연구로 Kim *et al.*[1991]은 집괴(Cluster) 분석을 통해 11개의 수괴로 구분하였으며, Gong *et al.*[1996]은 T-S diagram 분석을 통해 6개의 수괴로 구분하였다. Hur *et al.*[1999]은 집괴 분석을 통해 9개의 수괴로 구분하였다. 이들 방법들은 연구시기와 해역에 따라 다른 결과를 제시하였으며, 이는 동중국해 수괴가 복잡함을 의미한다.

동중국해는 동계와 하계에 각각 다른 수괴에 의해 영향을 받는다고

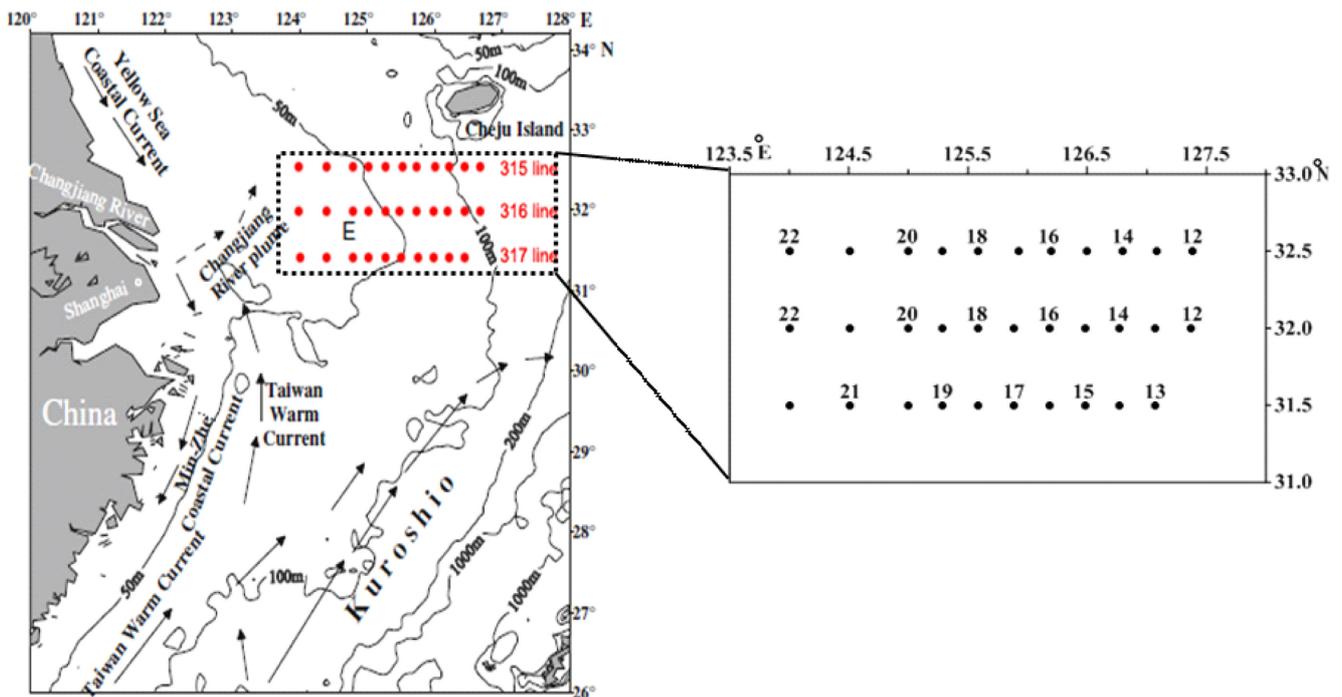


Fig. 1. Monitoring stations in the northern East China Sea, 1995~2014 (Ning *et al.*[2011]).

제시하였다. 동계에는 쿠로시오 기원수의 수괴(KW; Kuroshio source water)가 표층에서 저층까지 형성되어 주요 영향 수괴로 작용하며, 제주도 남서해역에서는 황해에서 유입되는 해류와 쿠로시오 기원 해수와의 혼합수(MW: Mixed Water)로 하계에 비해 영향 수괴가 작은 것으로 보고하였다. 하계에는 표층의 가열과 혼합에 의해서 동계 쿠로시오 기원의 해류에 비해 고온·저염화된 수괴(KES; Kuroshio-ECS surface)로 나누어지고, 황해표층수(YSS; Yellow Sea Surface, 50 m 상층)가 동중국해 북부해역에 분포하며, 표층(평균 6 m)은 장강희석수의 영향을 받는다고 보고하였다(Hur *et al.*[1999]). Gong *et al.*[1996]에 의해 분석된 기준에 의하면 동계와 춘계에는 대기의 영향을 받아 표층 수온이 감소하여 황해저층냉수의 특성을 나타냈으며, 중·저층에는 황해저층냉수와 쿠로시오 기원수의 영향으로 표층과 저층이 혼합된 양상을 나타내었다. 하계에는 장강희석수의 영향이 확대되어 다른 계절에 비해 염분 31이하의 저염수와 장강희석수보다 고염분인 대만난류가 대부분의 표층에 형성되었으며, 황해저층냉수와 쿠로시오 해류가 중·저층에 형성되었다. 추계에는 장강희석수의 영향이 감소하고, 황해저층냉수의 특성을 보이는 수괴 또한 감소하였으며, 상대적으로 고염분인 대만난류와 쿠로시오 기원수의 영향을 받는 것으로 나타났다. Gong *et al.*[1996]에 의하면 장강희석수는 다른 수괴에 비해 인의 농도가 낮고, 황해저층냉수는 탁도가 높은 특징이 있으며, Wong *et al.*[1998]은 황해저층냉수에는 인에 비해 질소가 풍부한 수괴로 보고하였다. 장강희석수는 31이하의 염분을

나타내며, 장강 하구 동부해역의 표층에서 15~20 m의 얇은 층으로 관측되고 질산염과 규산염이 높는데 비해 인산염은 낮은 특성을 보였다(Wong *et al.*[1998]). 쿠로시오 기원수는 34.6이상의 높은 염분 특성을 나타내며 표층을 비롯한 중·저층에 출현하였다.

본 연구에서는 Gong *et al.*[1996] 기준에 준하여 동중국해 북부해역의 수괴를 T-S diagram을 통해 분석하였다(Fig. 2). 연구해역은 크게 4개의 수괴 즉, 장강희석수, 대만난류, 쿠로시오 기원수, 황해저층냉수에 의해 계절적으로 다른 특성을 나타낸다.

3.1.1 장강희석수(CDW)

장강희석수는 동중국해 북부해역의 표층으로 유입되는 수괴로서 수온 23 °C 이상, 염분 31 이하의 수괴로 구분하였으며(Gong *et al.*[1996]) 장강희석수의 다양한 환경인자의 장기변동과 수계 특성을 Fig. 3과 Table 1에 나타내었다. 연구 결과 장강희석수는 하계에 집중적으로 관측되었고 거의 모든 정점에서 관측되었다. 출현 수심은 0~30 m 수층에서 출현하나 주로 약 5 m 수층에 집중되어 나타났다. 장강희석수의 연평균 수온, 염분, 용존산소의 농도는 각각 27.6 °C, 29.5, 4.93 mL·L⁻¹ 로 나타났다. 영양염의 비를 살펴보면 N/P ratio는 21.3으로 일반 해역에 비해 높게 나타났다. 현장의 인산염의 농도로 계산된 Excess nitrate는 1.02 uM으로 일반 해역에 비해 N의 농도가 높은 수괴로 나타났다. 소모된 산소의 양을 나타내는 AOU (Apparent Oxygen Utilization)는 -0.26 mL·L⁻¹ 으로 용존산소가 과

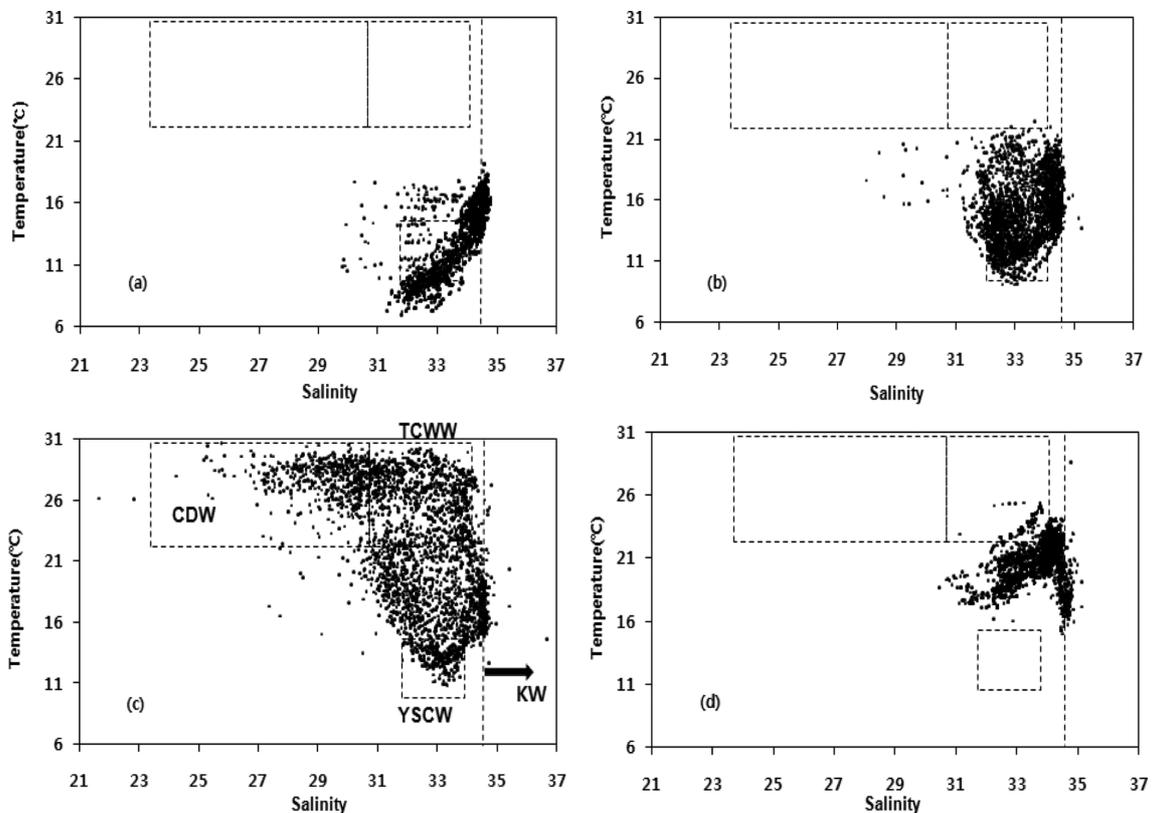


Fig. 2. Seasonal variations of temperature and salinity in the northern East China Sea, 1995~2014 by Gong *et al.*[1996] (a) winter, (b) spring, (c) summer, (d) fall.

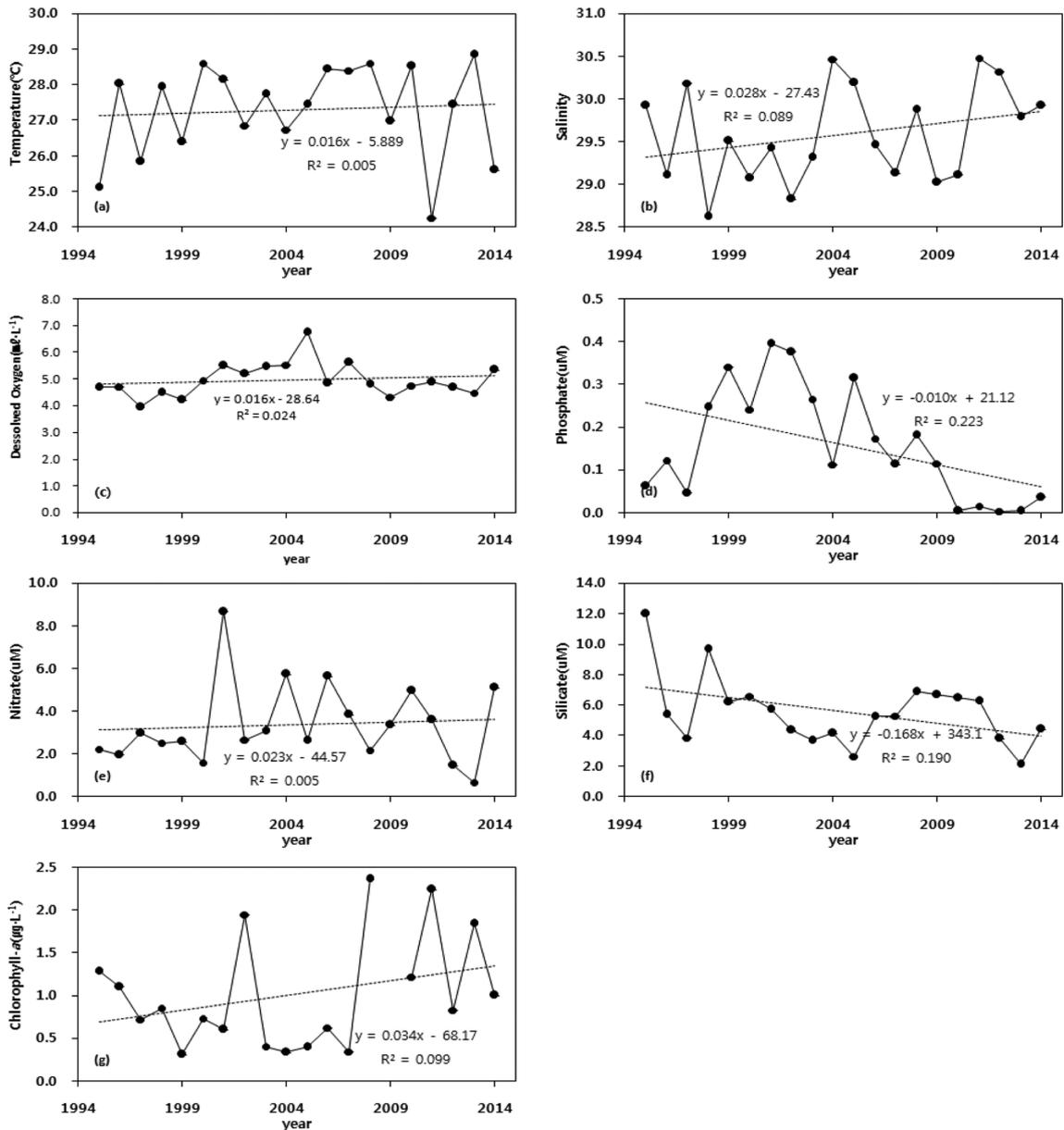


Fig. 3. The variation rates of environment parameters of CDW in the northern East China Sea, 1995-2014 (a) Annual mean temperature of CDW, (b) Annual mean salinity of CDW, (c) Annual mean dissolved oxygen of CDW. (d) Annual mean phosphate of CDW. (e) Annual mean nitrate of CDW. (f) Annual mean silicate of CDW, (g) Annual mean chl-a of CDW(The dashed line is regression line).

포화 되어있는 특성을 보였다. 장강희석수의 연구기간 동안 변동률을 보면, 수온과 염분, 용존산소의 농도는 20년간 다소 증가하는 경향을 나타내며, 각각 평균 0.32 °C, 0.56, 0.32 mL·L⁻¹ 증가하였다. 영양염 중 질산염은 증가하는 경향을 나타냈으나, 인산염과 규산염은 연구기간 동안 각각 0.20 µM, 3.36 µM 감소하였다. 인산염의 경우 2002년까지 증가하는 경향을 보였으나, 이후 감소하다가 2010년 이후 급격히 감소하여 0.1 µM 이하로 장강희석수내에서 고갈된 상태를 나타내었다. 엽록소-a의 농도는 증가하는 경향을 나타내어 연구기간 동안 0.68 µg chl-a·L⁻¹ 증가하는 추세를 보였다. Excess nitrate의 변동률은 연간 유의한 양의 증가를 나타내 장강희석수 N의 양이 P에

비해 증가하고 있음을 알 수 있다.

장강희석수는 4월부터 장강 하구에 형성되어 황해와 대한해협까지 영향을 미친다. 8월에 동중국해에 영향이 가장 크고 9월 이후에는 영향이 감소하는 것으로 보고되었으며, 형성되는 수심은 표층에서 30 m 이내이며, 평균 수심은 6 m 내외인 것으로 알려졌다(Hur *et al.*[1999]). Ning *et al.*[2011]은 장강희석수에 의해 고농도의 탁도 해역, 수온, 염분, 영양염 그리고 생산력 전선 등이 형성되어 연구해역의 생물학적 다양성에 중요한 역할을 한다고 하였다. 장강희석수는 계절적인 영향으로 하계에 남동 계절풍에 의한 에크만 수층에 의해 북동방향으로 이동하며, 대마난류와 혼합되어 동해로 유입된

Table 1. The annual means, standard errors and rates of change of the related environmental parameters according to the water masses in the northern East China Sea, 1995~2014

| Parameter | CDW | | | TCWW | | | YSCW | | | KW | | |
|----------------------|-------|------|----------|-------|------|----------|-------|------|----------|-------|------|----------|
| | mean | se | rates |
| Temp. | 27.59 | 1.51 | 0.016** | 26.26 | 2.05 | 0.054* | 11.59 | 1.76 | 0.003 | 17.14 | 1.81 | 0.070 |
| Salinity | 29.49 | 1.25 | 0.028** | 32.87 | 0.95 | -0.052** | 32.74 | 0.55 | -0.012** | 34.69 | 0.13 | -0.001 |
| DO | 4.93 | 0.80 | 0.016* | 4.78 | 0.92 | 0.015* | 6.01 | 0.89 | 0.014* | 5.09 | 0.96 | -0.018 |
| NO ₃ -N | 3.19 | 2.74 | 0.023 | 2.99 | 3.23 | -0.015 | 8.72 | 4.32 | 0.105 | 6.17 | 6.54 | -0.141 |
| PO ₄ -P | 0.13 | 0.14 | -0.010** | 0.22 | 0.27 | -0.010* | 0.47 | 0.32 | -0.015** | 0.38 | 0.31 | 0.020 |
| SiO ₂ -Si | 5.12 | 3.26 | -0.168** | 5.23 | 4.45 | -0.138** | 12.00 | 4.36 | 0.050 | 7.76 | 4.38 | -0.362* |
| Chl- <i>a</i> | 1.08 | 1.00 | 0.034** | 0.62 | 0.83 | 0.032** | 0.63 | 0.75 | 0.027** | 0.27 | 0.33 | 0.009** |
| N/P | 21.3 | 18.2 | 24.280** | 14.5 | 5.02 | 5.789* | 16.2 | 1.02 | 0.685** | 16.1 | 0.37 | 0.117** |
| Si/N | 1.7 | 0.1 | -0.076 | 1.8 | 0.09 | -0.098* | 1.4 | 0.14 | -0.015 | 1.2 | 0.02 | -0.139** |
| Si/P | 35.3 | 26.8 | 41.975** | 25.9 | 9.66 | 11.76** | 23.0 | 0.63 | 0.681** | 19.9 | 0.41 | -0.000 |
| Excess N | 1.02 | 3.36 | 0.2** | -0.61 | 4.67 | 0.147 | 1.17 | 0.41 | 0.337** | 2.09 | 7.33 | 0.186 |
| AOU | -0.26 | 0.81 | -0.018** | -0.07 | 1.02 | -0.016 | 0.19 | 0.82 | -0.014* | 0.39 | 0.93 | 0.010* |

°C·year⁻¹, temperature; uM·year⁻¹, nutrients; µg chl-*a*·L⁻¹·year⁻¹, chlorophyll-*a*; se, standard error; *, p<0.05; **, p<0.01.

다(Rebstock and Kang[2003]). 추계에 장강희석수의 특성을 갖는 수괴는 동중국해 북부해역에 질소를 공급하는 주요 공급원임을 보고하였다(Kim and Kim[2009]). 장강희석수의 수송량당 질산이온의 연간 flux는 105.1×1010 mol·yr⁻¹·Sv⁻¹, 인산은 1.8 mol·yr⁻¹·Sv⁻¹, Si는 304.1 mol·yr⁻¹·Sv⁻¹로 질산에 비해 규산의 유출량이 많은 것으로 알려졌다(Chung *et al.*[2000]) 본 연구 결과에서도 유사한 결과를 나타내었다.

3.1.2 대만난류(TCWW)

대만난류는 하계에 장강 하구역까지 유입될 수 있으며 장강희석수와 함께 동중국해 북부해역의 해양 생태계를 더욱 복잡하게 하는 역할을 한다(Zhu *et al.*[2011]; Ning *et al.*[2011]). 본 연구에서는 Gong *et al.*[1996]에 의해 정의된 수온 23 °C 이상, 염분 31 이상 34.2 이하의 수괴를 대만난류수로 구분하였으며 대만난류 환경인자의 장기변동과 수계 특성을 Fig. 4와 Table 1에 나타내었다. 연구 결과 대만난류는 장강희석수와 같이 표층으로 유입되는 수괴로서 하계와 추계에 관측되었다. 하계에 관측된 수심은 0~30 m 수층인데 비하여 추계에는 0~50 m 수층에서 형성되는 것을 확인하였다.

또한 1998년에는 다른 해에 비해 대만난류의 특성을 나타내는 수괴가 거의 관측되지 않아 시기에 따른 변동성이 있는 것으로 밝혀졌다(Fig. 7b). 대만난류의 연평균 수온, 염분, 용존산소의 농도는 각각 26.3 °C, 32.9, 4.8 mL·L⁻¹로 장강희석수에 비해 높은 염분을 나타내었다. 영양염의 비를 보면 장강희석수에 비해 인산염의 농도가 증가하여 N/P, Si/P ratio가 감소하였다. Excess nitrate는 -0.61 uM로 일반해역에 비해 N이 부족한 수괴 특성을 나타내었다. AOU는 -0.07 mL·L⁻¹로서 장강희석수에 비해 용존산소의 농도는 낮으나 과포화된 수괴로 밝혀졌다. 대만난류 수괴의 연간 변동률을 보면, 수온과 용존산소는 각각 평균 1.08 °C, 0.30 mL·L⁻¹ 증가하는 경향을 나타냈으나, 염분은 1.04 감소하여 장강희석수에 비해 수온과 염분의 변동이 크게 나타났다. 대만난류의 질산염, 규산염, 인산염 농도는

모두 감소하는 경향을 나타냈는데 각각 0.28 uM, 2.76 uM, 0.20 uM로 규산염의 감소가 크게 나타났으며, 인산염은 장강희석수와 같이 2010년 이후 급격히 감소하여 0.1 uM 이하로 고갈된 상태를 나타내었다. 엽록소-*a*의 농도는 20년 동안 증가하여 평균 약 0.64 µgchl-*a*·L⁻¹ 증가하여 장강희석수와 유사한 경향을 나타내었다. Gong *et al.*[1996]은 염분 31이하의 저염분에서는 질산염의 농도가 높으나 염분 31 이상의 상대적으로 고염분의 수괴에서는 질산염의 농도가 낮은 특성이 있음을 제시하였으며, 쿠로시오 기원수에 비해 염분은 낮으나 고수온의 수괴를 대만난류수로 분석하였다. Seung[1992]은 계절에 따라 대만난류의 수온과 염분이 하계에는 수온 28 °C, 염분 33.5에서 동계에는 수온 15 °C, 염분 34.4로 수온은 냉각되고 염분은 증가한다고 밝혔다. Hur *et al.*[1999]은 쿠로시오 기원수 보다 저염분의 특성을 보이며 하계에 출현 하는 수괴를 쿠로시오-동중국해 표층수로 구분하였다. Li *et al.*[2006]에 의해 분석된 대만난류는 동계에는 연안수 확장의 영향으로 동계에는 약화되고, 6월부터 세기가 증가하여 11월에 최대로 증가하나 중국 연안수의 제주도 남부해역으로의 유입에 의해 북쪽에서의 이동이 제한됨을 밝혔다.

3.1.3 황해저층냉수(YSCW)

황해저층냉수는 동계의 낮은 기온에 의해 표층 수온이 낮아지면서 표층과 저층이 혼합된 후 춘계와 하계에 형성되는 수온약층에 의해 저층에 형성된다. 춘계와 하계 동안 수온약층에 의해 안정한 상태에서 하계에 역풍류(upwind)에 의해 남하하며 일부는 제주해협을 통해 남해로 유입된다(Kim *et al.*[1991]; Jang *et al.*[2011]). Jang *et al.*[2011]은 수온 13.2 °C 이하, 염분 32.6~33.7, 밀도 24.7~25.5로 제시하였으며, Hur *et al.*[1999]은 40년간 황해와 동중국해 자료의 집괴 분석을 통해 황해저층냉수는 수온은 10 °C 이하, 염분은 33.2 이하로 황해에서 평균 50~70 m 수심의 저층에 형성되는 것을 확인하였다. 이번 연구에서는 Gong *et al.*[1996]에 준하여 황해저층냉수는 수온 14.5 °C 이하, 염분 33.7 이하를 기준으로 구분하였으며,

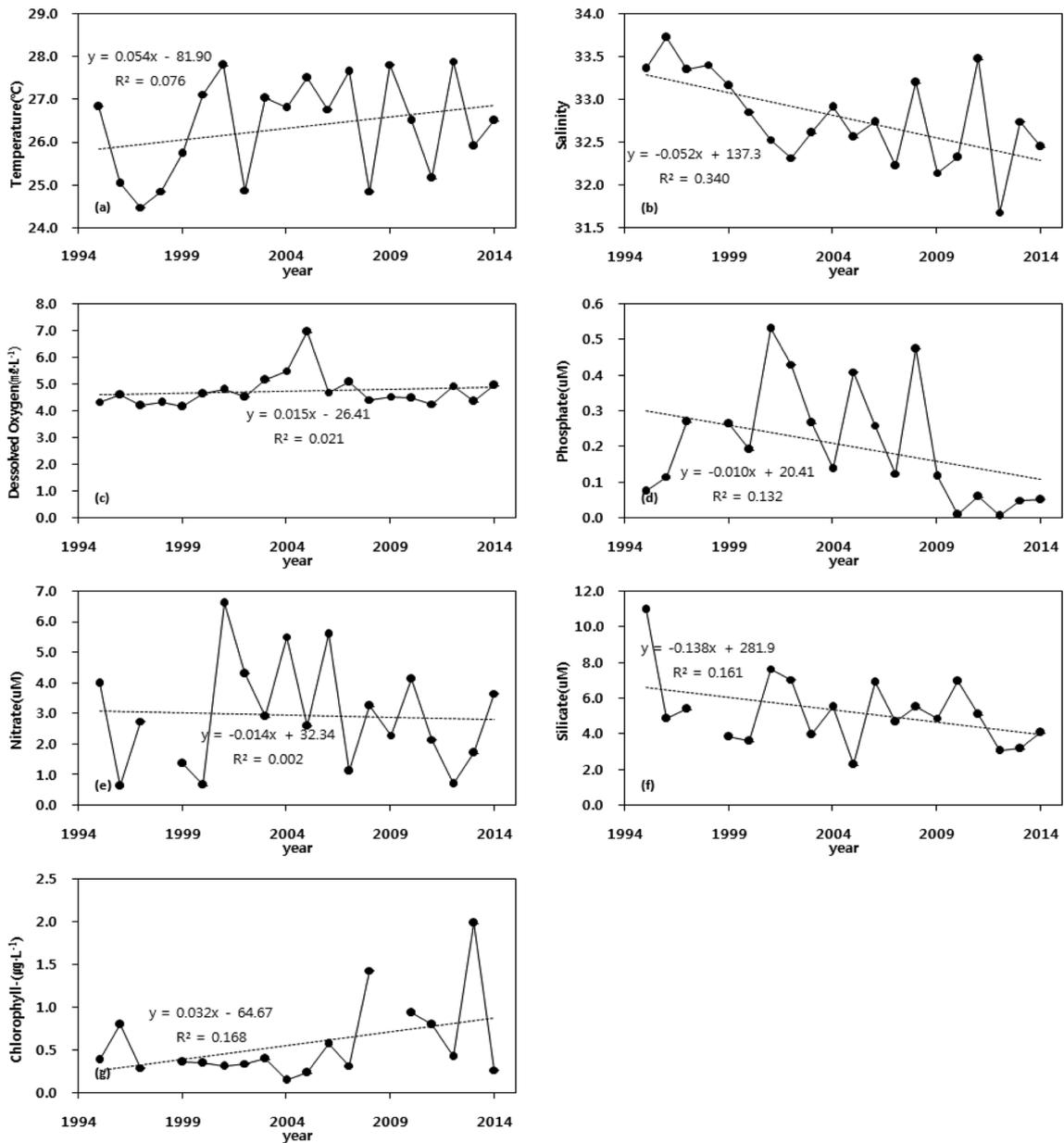


Fig. 4. The variation rates of environment parameters of TCWW in the northern East China Sea, 1995~2014 (a) Annual mean temperature of TCWW, (b) Annual mean salinity of TCWW, (c) Annual mean dissolved oxygen of TCWW, (d) Annual mean of phosphate of TCWW, (e) Annual mean nitrate of TCWW, (f) Annual mean silicate of TCWW, (g) Annual mean chl-a of TCWW(The dashed line is regression line).

환경인자의 장기변동과 수계 특성을 Fig. 5와 Table 1에 나타내었다. 분석결과 연 평균 수심 약 25 m 내외에 집중되어 형성되었으며, 하계에는 50 m 내외에서 관측되었으며, 추계에는 관측되지 않았다. 수온, 염분, 용존산소의 평균 농도는 각각 11.6°C, 32.7, 6.0 mL·L⁻¹으로 대만난류와 평균 염분은 유사하나 수온은 낮고, 용존산소의 농도는 큰 특성을 나타내었다. 영양염의 평균 농도는 주요 수괴 중에 가장 높은 농도를 나타내었다. N/P ratio는 16으로 일반 해양의 ratio와 유사한 특성을 보였다. AOU는 0.19 mL·L⁻¹로 포화 농도에 비해 낮게 나타나 생물의 호흡에 의해 용존산소가 소비되었음을 나타내었다. 황해저층냉수의 변동률을 보면 수온은 20년간 유사한 분포를

나타냈으며, 염분과 용존산소는 각각 0.24, 0.26 mL·L⁻¹ 증가하는 경향을 나타내었다. 질산염과 규산염은 증가하는 경향을 나타내었으며, 인산염은 0.28 uM 감소하는 경향을 나타내었다. 엽록소-a는 0.54 µgchl-a·L⁻¹으로 증가하는 추세를 나타내었다.

3.1.4 쿠로시오 기원수(KW)

일반적으로 쿠로시오 해류는 대만 동쪽의 수로를 통해 동중국해로 유입되어 30°N까지 대륙붕단(Continental shelf break)을 따라 북동진하여 일부는 대만난류로 동해에 영향을 미치며 나머지는 Tokara strait 통해 북태평양으로 열과 염을 공급한다(Hsuh[2000]). 동중국

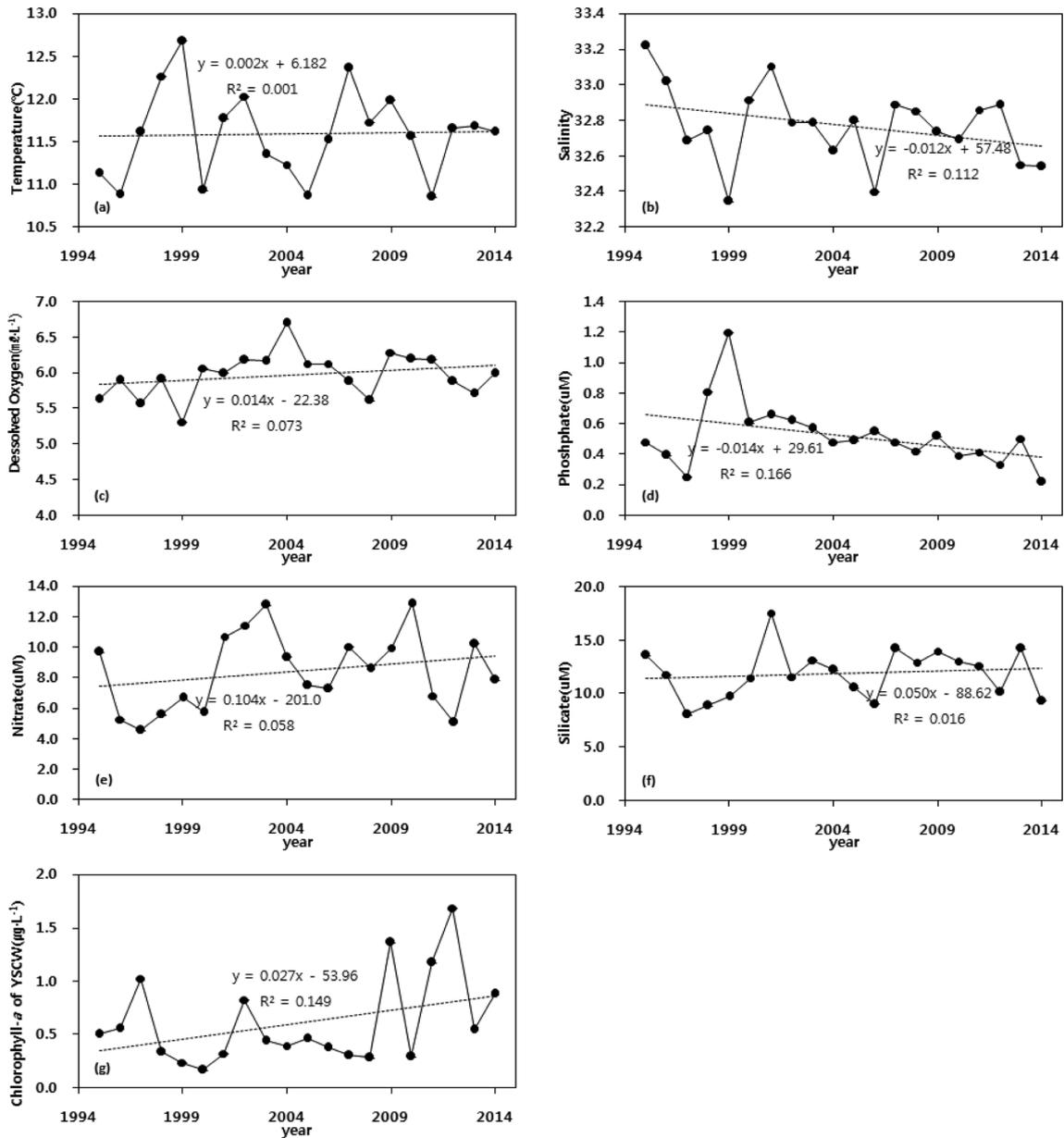


Fig. 5. The variation rates of environment parameters of YSCW in the northern East China Sea, 1995~2014 (a) Annual mean temperature of YSCW, (b) Annual mean salinity of YSCW, (c) Annual mean dissolved oxygen of YSCW, (d) Annual mean phosphate of YSCW, (e) Annual mean nitrate of YSCW, (f) Annual mean silicate of YSCW. (g) Annual mean chl-a of YSCW(The dashed line is regression line).

해에 영향을 미치는 쿠로시오 해류는 주로 표층에서 나타나며, 하계에는 표층에서 관측되었던 쿠로시오 수괴가 저층에 형성되고, 표층에는 상대적으로 저염의 수괴가 형성된다. 따라서 Hur *et al.*[1999]은 동일한 수괴로서 계절의 영향으로 나누어진 쿠로시오 수괴로 보았다. Gong *et al.*[1996]은 주로 중-저층에 출현하는 고염분의 수괴를 하나의 수괴(Kuroshio Water)로서 염분 34.6 이상으로 구분하였고 표층에 형성된 상대적으로 저염분의 수괴는 대만난류수로 분석하였다.

연구해역에서 분석된 쿠로시오 기원수는 염분 34.6 이상의 특성을 갖는 수괴로 구분하였으며, 환경인자의 장기변동과 수계 특성을 Fig.

6와 Table 1에 나타내었다. 쿠로시오 기원수는 모든 계절에서 출현을 확인할 수 있으며, 출현 수심은 동계에는 표층에서 저층까지 관측되었으며, 추계에는 주로 저층을 중심으로 관측되었다. 쿠로시오 기원수의 평균 수온과 염분, 용존산소의 농도는 17.1 °C, 34.7, 5.1 mL·L⁻¹으로 염분은 높으나 평균 수온은 강강희석수, 대만난류보다 낮은 특성을 보였다. 영양염의 농도는 질산염, 인산염, 규산염이 각각 6.2 µM, 0.4 µM, 7.8 µM 으로 상층에서 관측된 수괴에 비해 높은 농도를 나타내었다. 이러한 쿠로시오 기원수의 영양염 공급 기작으로 동중국해 남부 해역과 규슈 남부 해역의 대륙붕에서 강한 수직 혼합에 의한 용승으로 저층으로부터 16 µM 이상의 규산염을 대륙

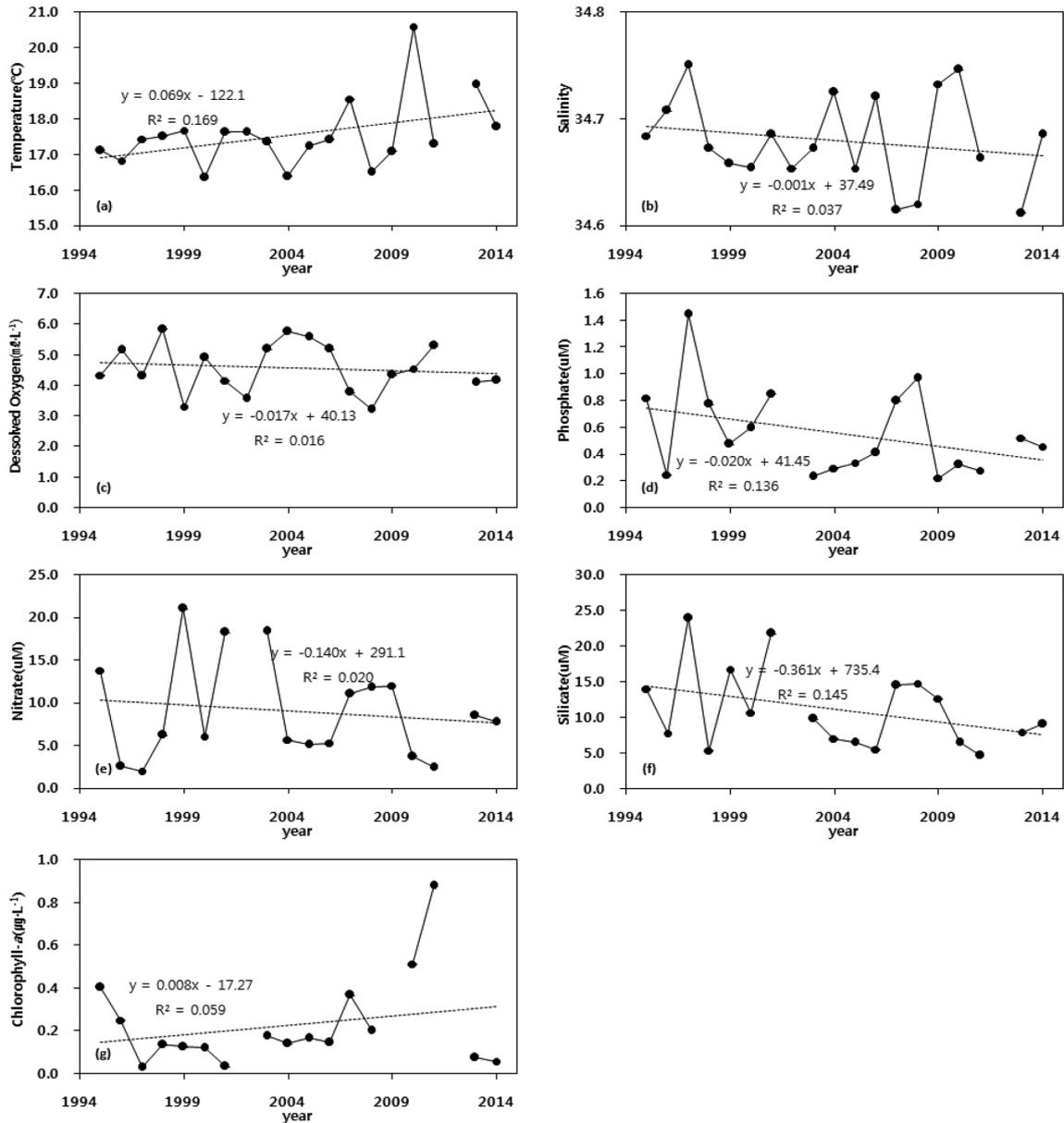


Fig. 6. The variation rates of environment parameters of KW in the northern East China Sea, 1995~2014 (a) Annual mean temperature of KW, (b) Annual mean salinity of KW, (c) Annual mean dissolved oxygen of KW, (d) Annual mean phosphate of KW, (e) Annual mean nitrate of KW, (f) Annual mean silicate of KW, (g) Annual mean chl-a of KW (The dashed line is regression line).

붕내로 공급한다(Ito *et al.*[1994]). 엽록소-*a*의 농도는 분석된 수괴 중 가장 낮은 농도를 나타내었다. 그러나 Excess nitrate는 분석된 수괴 중 가장 높은 농도를 나타내었다. 이 수괴의 수온의 증가는 지속적으로 상승하여 20년간 1.38 °C 증가하였으며 주요 4개의 수괴 중 가장 큰 수온 증가를 나타내었다. 염분은 연구기간 동안 유사한 특성을 보였으며, 용존산소는 연구기간 동안 0.34 mL·L⁻¹ 감소하는 추세를 나타내었다. 쿠로시오 기원수의 질산염, 규산염, 인산염은 각각 2.8 µM, 7.22 µM, 0.40 µM 으로 감소하는 경향을 나타내어 다른 수괴에 비해 영양염의 감소가 큰 것으로 분석되었으며, 엽록소-*a*는 0.16 µgchl-*a*·L⁻¹ 증가하는 양상을 나타내었다.

4. 고 찰

4.1 수괴의 변화

동중국해 북부해역 주요 수괴의 시간에 따른 세기의 변화를 확인하기 위하여 T-S diagram을 이용하여 분석하였다(Fig. 7). 동중국해 수괴는 다양한 기준에 따라 여러 가지 수괴로 구분되나 본 연구에서는 앞에서 언급한 것처럼 장강희석수, 대만난류수, 황해저층냉수, 쿠로시오 기원수로 분류하였다. 분석된 수괴는 계절적인 차이를 나타내며, 다른 계절에 비해 하계에는 장강희석수와 황해저층냉수에 의해 더 복잡한 양상을 나타낸다(Hur *et al.*[1999]). 분석결과 장강

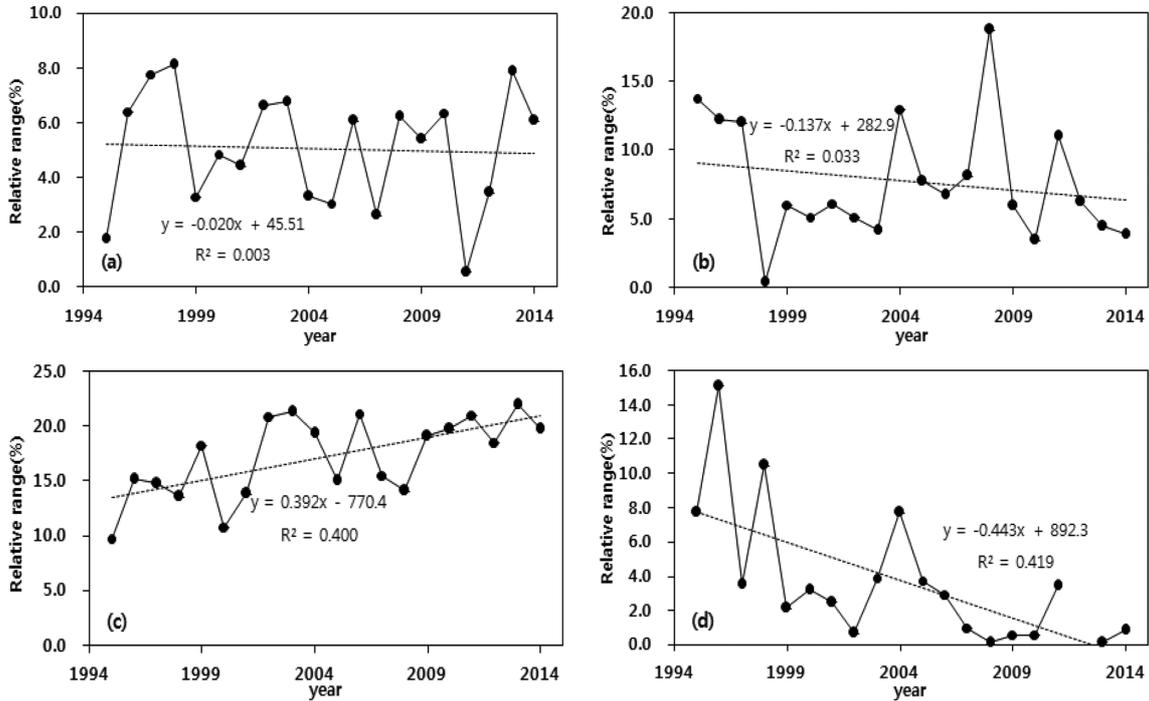


Fig. 7. The variation rates of relative range of water masses in the northern East China Sea, 1995~2014 (a) CDW, (b) TCWW, (c) YSCW, (d) KW (The dashed line is regression line).

희석수는 20년간 다소 감소하나 뚜렷한 변동성은 나타내지 않았으며, 대만난류는 약 2.7% 감소하는 경향을 보였으며, 쿠로시오 기원수는 약 8.9% 감소($p < 0.01$)하였다. 반대로 황해저층냉수는 약 7.8% 증가($p < 0.01$)하였다. 쿠로시오 기원수는 2007년 이후 뚜렷한 감소 추세를 보이고 특히 2012년에는 쿠로시오 기원수가 관측되지 않았다. Kim and Kim[2009]이 분석한 풍수기(하계)의 수괴 조성을 보면 장강희석수는 1~23%, 쿠로시오 기원수는 0~30%, 동중국해수는 58~100%으로 구분하여 사계절의 자료를 분석한 이번 결과와는 다소 차이를 보였다. 이러한 수괴들의 세기의 차이는 향후 해양의 공간적인 수온, 염분, 영양염 변화뿐만 아니라 해양생태계의 변화를 유발하는 원인으로 작용할 것으로 판단된다. 특히 현저한 증가와 감소를 보이는 황해저층냉수와 쿠로시오 기원수는 연구해역에서 수온과 염분이 상반된 특성을 나타내는 수괴로서 이들 수괴의 세기의 변동으로 향후 동중국해 해역의 수온과 염분이 감소할 가능성이 있다. 두 수괴가 분포하는 수층도 중·저층으로 유사하여 중·저층의 해양환경이 변동하고 이에 따라 해양생태계의 변동이 있을 것으로 판단된다. 따라서 연구기간 동안 관측된 수괴의 각 환경 인자에 따른 상대적인 특성을 비교하고 향후 동중국해 북부해역의 해양생태계의 변동을 예측하기 위하여 주요 수괴의 특성을 분석하였다(Fig. 8). 연구기간 동안 관측된 주요수괴의 점유율은 황해저층냉수가 약 17%로 가장 높고, 대만난류수가 약 8%, 장강희석수가 약 5%, 쿠로시오 기원수가 3.5%으로 분석되었다. 이에 따라 향후 황해저층냉수의 확대와 쿠로시오 기원수의 감소가 지속되면 동중국해 북부해역은 저층을 비롯해 표층까지 수온과 염분은 감소될 것으로 판단되며, 용존산소는 황해저층냉수의 높은 농도에 의해 증가할 것으로 판단된

다. 영양염은 쿠로시오 기원수가 동중국해로 유입되면서 대륙붕단의 저층에서 용승에 의해 공급되던 저층의 높은 영양염 특이인의 유입이 점차 감소하면서 N/P ratio가 증가될 것으로 판단된다. 또한 식물플랑크톤의 현존량을 대변하는 엽록소-a는 특정 영양염(인산염)에 의해 제한 받기까지는 증가할 것으로 판단되나, 저층에서 공급이 확대되는 황해저층냉수에 포함된 영양염이 표층으로 확산을 통해 영양염의 지속적인 공급이 이루어 질것으로 판단된다. 따라서 향후 수괴변동에 대한 식물플랑크톤의 변동성에 대한 지속적인 연구가 수행되어야 한다.

4.2 수온, 염분

동중국해 북부해역에서 황해저층냉수가 생성되는 기작은 동계의 황해와 동중국해의 표층 수온과 밀접한 관련이 있으며, 표층 수온은 동계의 북극진동 지수(AOI; Arctic Oscillation Index)와 높은 상관성을 보이는 것으로 알려졌다(Jang et al.[2011]; Lim et al.[2012]. 북극진동의 값이 음일 때 시베리아 고기압이 확장하면서 북서풍의 찬공기가 한반도에 유입되어 기온에 영향을 미친다. 따라서 동중국해 표층 수온과 북극진동 지수 그리고 연구해역과 인접한 기상자료 중 육지보다는 해양의 영향을 많이 받는 서귀포 지역의 기온(<http://www.kma.go.kr/weather/climate>)과 비교하였다(Fig. 9).

사용된 북극진동 지수는 NOAA 기후예측센터(Climatic Prediction Center)에 구축된 자료에서 2월 자료를 이용하였다(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>). 결과 북극진동은 동중국해 북부해역의 표층수온과 유사한 경향을 나타냈으며, 국지적으로 발생하는 기상현상이 반영된 기온자료와 유사한 경향을 나타내었다. 또한 같은 연구기간

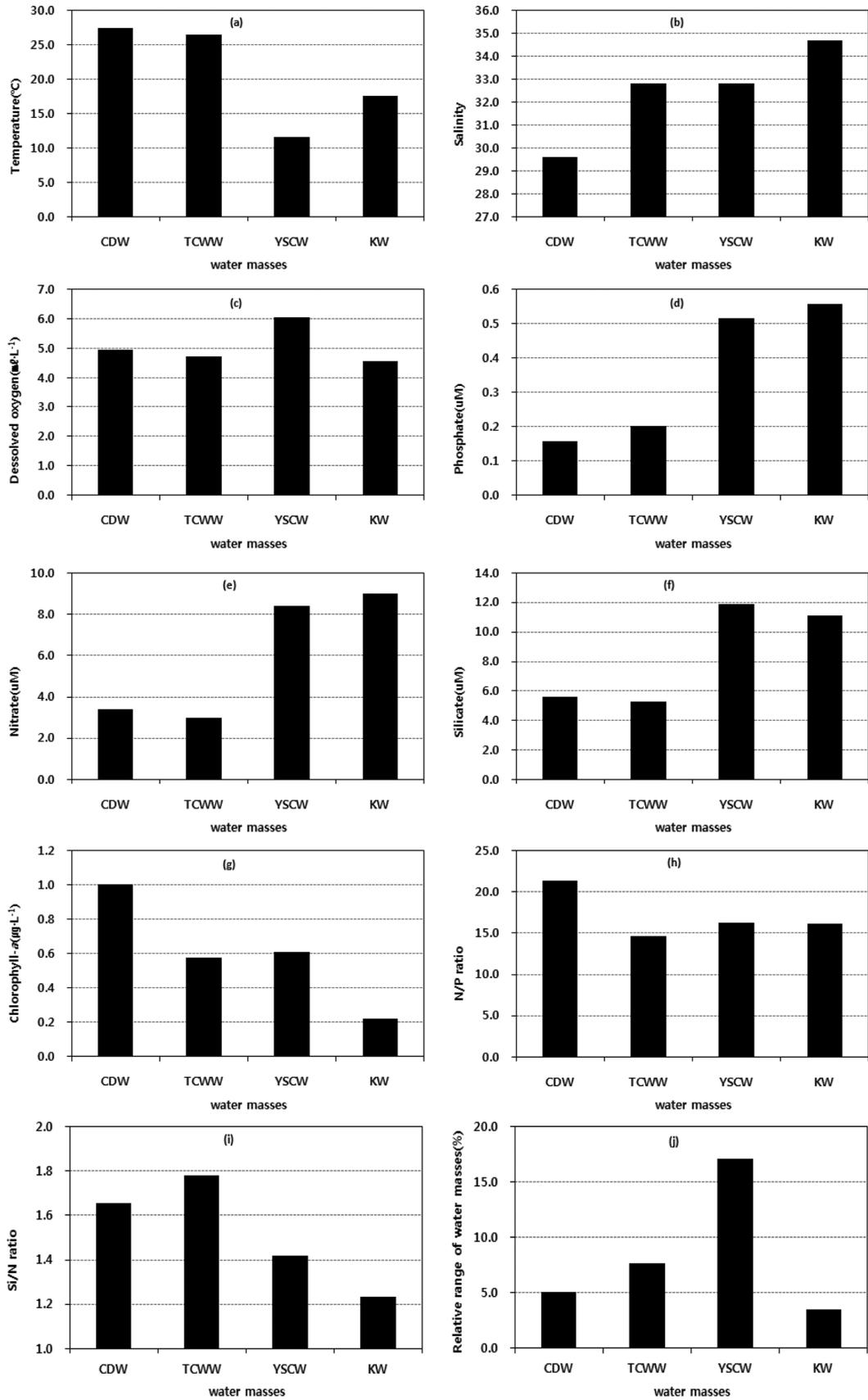


Fig. 8. The relative characteristics of water masses parameters in the northern East China Sea, 1995~2014 (a) Temperature, (b) Salinity, (c) Dissolved oxygen, (d) Phosphate, (e) Nitrate, (f) Silicate, (g) Chl-a, (h) N/P ratio, (i) Si/N ratio, (j) Relative range of water masses.

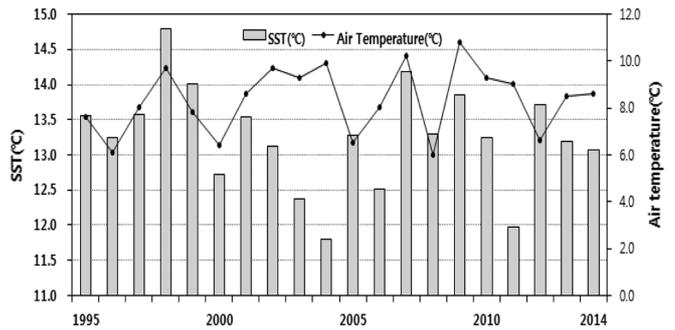
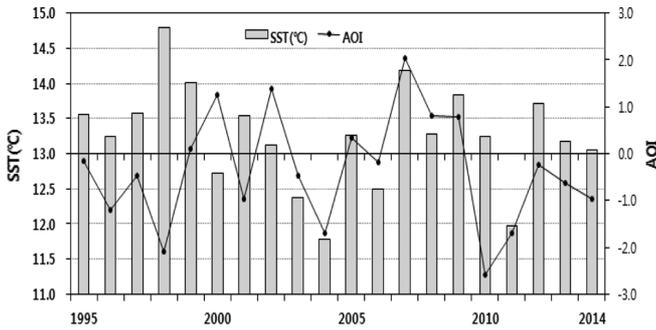


Fig. 9. Comparison between Arctic Oscillation Index (line), mean air temperature (line) at the Seogwipo, Jeju and mean surface temperature (bar) of the northern East China Sea during winter, 1995~2014.

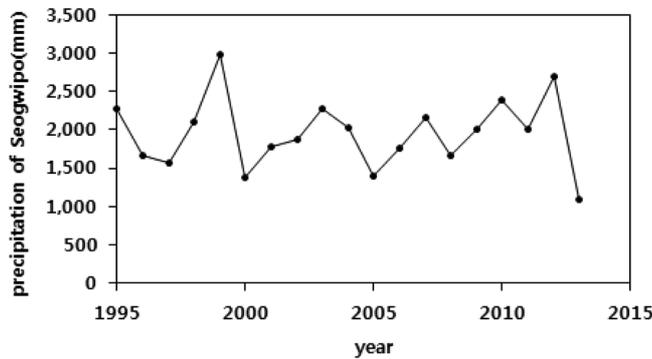


Fig. 10. The annual Means precipitation at the Seogwipo, 1995~2013.

의 북극진동 지수가 음의 추세로 증가하는 것은 동계에 표층수의 냉각으로 이어져 황해저층냉수의 생성이 증가하여 이로 인해 동중국해 북부해역으로의 영향이 증가할 것으로 판단된다. 이번연구에서 분석된 수온 하강의 직접적인 원인은 연구해역에서 상대적인 볼륨이 가장 크고, 세기가 지속적으로 증가하며, 주요 수괴 중 수온이 가장 낮은 황해저층냉수의 영향으로 전 수층에서 수온이 하강하는 것으로 판단된다.

연구기간동안 염분이 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 대기와의 상관성을 확인하기 위해 연구해역과 인접한 제주도 서귀포에서 관측된 평균 강수량(<http://www.kma.go.kr/weather/climate>)과 비교하였다. 결과 강수량은 연구기간 동안 감소하는 추세를 나타내었다 (Fig. 10). 따라서 연구해역에서의 염분 감소는 대기에 의한 영향보다는 동중국해 주요 수괴 중 가장 높은 염분을 나타내나, 다른 주요 수괴에 비해 상대적인 볼륨이 가장 작고, 연구기간 동안 세기가 지속적으로 감소하는 쿠로시오 기원수의 영향으로 나타나는 결과로 판단된다.

4.3 영양염과 엽록소-a 변화

관측된 영양염의 농도는 표층에서는 동계에 높고 하계에 낮은 농도를 나타냈다. 다른 영양염과는 달리 질산염은 증가하는 경향을 나타냈는데 증가 원인에는 첫 번째, 장강하구 유역에서 인간활동의 결과로 발생하는 도시 오·폐수와 하구의 양식 활동에 의해 유입되는 영향(Chai et al.[2009])과 질소계 화학비료를 주로 사용한 결과를

들 수 있다(Harrison et al.[1990]). 두 번째 원인으로서는 인간활동에 의한 인위적인 영향이 아닌 수계내에서 발생하는 용승에 의한 높은 영양염을 포함한 저층수 유입의 영향을 들 수 있다. 동중국해 해역은 해류의 영향으로 중국연안 (저장성) 용승(Hu[1994]), Taiwan 북동부 용승(Hung et al.[2007]), 제주도 남서해역 용승과 대륙붕단에서 쿠로시오 중층수에 의해 발생하여 동중국해로 유입되는 용승(Ito et al.[1994])의 영향을 받는 것으로 보고되었다. 이러한 용승에 의한 기여도는 하계에 발생하는 용승(30% 이상)이 동계에 발생하는 용승(10~30%)에 비해 영향이 크며, 쿠로시오 중층수의 대륙붕 내로의 유입도 하계에 더 큰 것으로 알려졌다. 일반적으로 해양에는 질소와 규소에 대한 인의 상대적인 양이 16:1의 ratio로 분포하는 것으로 알려졌으며, 각각의 비에 따라 식물플랑크톤의 성장과 증식에 영향을 미치며, N/P의 상대적인 비를 이용하여 해양 생태계의 영양 상태를 평가할 수 있다. 따라서 동중국해 북부해역에서 관측된 각각의 영양염에 대한 상대적인 비를 Table 2에 나타냈으며, 또한 N/P ratio의 수층에 따른 변동은 Fig. 11에 나타내었다. 그림으로 나타내지 않은 영양염의 ratio의 변동율은 Table 3에 나타내었다. 하계의 N/P ratio는 낮은 인산염의 농도에 의해 가장 높게 나타났으며, 동계에 낮은 ratio를 나타내었다. 동계는 다른 계절에 비해 질

Table 2. The annual means and seasonal means of the related environmental parameters in the northern East China Sea, 1995~2014

| Parameter | N/P | Si/N | Si/P | N* | Si* | |
|--------------------------|--------|------|------|------|------|-----|
| Surface | Annual | 17.7 | 1.4 | 25.1 | 0.5 | 2.6 |
| | Winter | 15.4 | 1.4 | 21.2 | -0.3 | 2.4 |
| | Spring | 17.8 | 2.1 | 36.6 | 0.3 | 3.7 |
| | Summer | 21.6 | 1.7 | 35.8 | 0.8 | 2.7 |
| | Fall | 18.6 | 1.1 | 20.8 | 1.0 | 1.8 |
| Bottom | Annual | 18.3 | 1.3 | 23.2 | 1.2 | 3.7 |
| | Winter | 15.4 | 1.4 | 21.1 | -0.3 | 2.6 |
| | Spring | 16.3 | 1.3 | 21.1 | 0.2 | 2.6 |
| | Summer | 23.5 | 1.3 | 30.3 | 3.4 | 6.4 |
| | Fall | 18.5 | 1.2 | 21.6 | 1.5 | 3.2 |
| Average for water column | Annual | 17.9 | 1.4 | 24.5 | 0.7 | 3.0 |
| | Winter | 15.7 | 1.4 | 21.6 | -0.1 | 2.4 |
| | Spring | 16.6 | 1.6 | 26.1 | 0.2 | 3.1 |
| | Summer | 23.2 | 1.5 | 34.1 | 1.8 | 4.6 |
| | Fall | 17.9 | 1.1 | 20.3 | 0.8 | 1.8 |

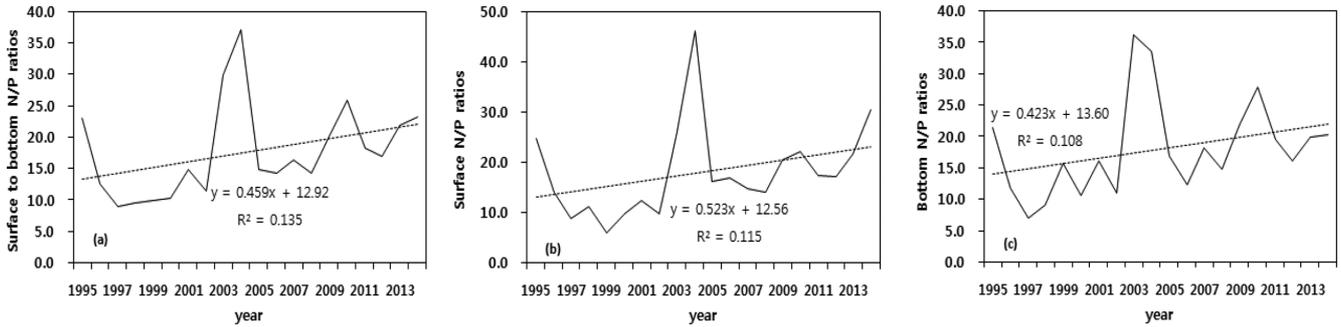


Fig. 11. The variation rates of N/P ratios in the northern East China Sea, 1995~2014 (a) Annual mean N/P ratios of all layers, (b) Annual mean surface N/P ratios, (c) Annual mean bottom N/P ratios (The dashed line is regression line).

Table 3. The rates of change of the annual means and seasonal averages of the related environmental parameters in the northern East China Sea, 1995~2014

| Parameter | N/P | Si/N | Si/P | N* | Si* | |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Surface | Annual | 0.5** | -0.0 | 0.4** | 0.2** | 0.1** |
| | Winter | 0.5** | -0.0** | 0.3** | 0.3** | 0.4** |
| | Spring | 0.7** | 0.0 | 5.5** | 0.1 | 0.1** |
| | Summer | 11.3** | -0.1 | 20.7** | 0.2** | -0.0 |
| | Fall | -0.4* | -0.1** | -0.8** | 0.1 | -0.0 |
| Bottom | Annual | 0.4* | -0.0** | 0.4** | 0.2** | 0.1** |
| | Winter | 0.6* | -0.0** | 0.5* | 0.4** | 0.4** |
| | Spring | 0.1 | -0.0 | -0.1 | 0.1* | 0.1* |
| | Summer | 1.8* | -0.0** | 1.4* | 0.2** | -0.0 |
| | Fall | -0.3** | -0.1** | -0.2* | 0.2 | 0.0 |
| Average for water column | Annual | 0.5** | -0.0* | 0.4** | 0.2** | 0.1** |
| | Winter | 0.5** | -0.0** | 0.4** | 0.3** | 0.3** |
| | Spring | 0.3** | 0.0 | 0.5** | 0.1** | 0.1** |
| | Summer | 2.6** | -0.1* | 2.3** | 0.2** | 0.0** |
| | Fall | -0.3** | -0.0** | -0.4** | 0.1 | -0.0 |

산염의 농도는 낮았는데 비해 인산염은 높으나, 다른 계절에는 질산염에 비해 인산염이 낮은 것으로 나타났다. Si/N ratio는 질산염의 농도가 낮은 춘계에 높은 ratio를 나타냈으며, 표층에서는 춘계에, 저층에서는 동계에 가장 높은 ratio를 나타내었다. 상대적인 농도차가 크지 않았던 추계에는 표층과 저층 모두에서 낮은 ratio를 나타내었다. 또한 Si/P의 ratio는 하계에 높게 나타나 하계의 낮은 인산염의 영향을 대변했다. 각 영양염 ratio에 대한 장기변동을 알아보면 N/P ratio는 하계에 가장 높은 증가 추세인데 비해 추계에는 감소하는 추세를 나타내며, 증가율은 20년 동안 약 9.2 증가한 것으로 나타났다. 또한 Si/N의 ratio는 춘계에 가장 높은 증가율을 보였다. Si/P의 장기 변동은 인산염의 낮은 농도로 인해 하계에 가장 높으며, 추계에는 규산염의 영향으로 감소하는 경향을 나타내었다.

일반적인 해양의 영양염 ratio와 비교하기 위해 Excess N 농도를 계산하였다. 하계에는 높은 질소 농도가 확인되었으며, 약 1.0~3.4 uM의 질산염이 과잉 존재하는 것으로 나타났다. 반면에 동계에는 인산염에 비해 질산염이 약 0.1~0.3 uM 부족한 것으로 나타났다.

연구기간 동안 인산염의 농도가 감소하는 원인은 동중국해 북부

해역으로 유입되는 장강희석수(Fig. 3), 대만난류(Fig. 4), 황해저층 냉수(Fig. 5), 쿠로시오 기원수(Fig. 6)에 포함된 인산염의 농도 감소에 영향을 받은 것으로 판단되며, 특히 표층수의 대부분을 차지하는 장강희석수와 대만난류수가 2010년 이후 평균 0.1 uM 이하의 낮은 농도가 원인이라 할 수 있다. 또한 각 수괴 중 쿠로시오 기원수에 포함된 높은 인산염에 의해 공급되던 양이 쿠로시오 기원수의 세력 약화에 의한 공급량 감소에 의한 것으로 판단된다(Fig. 6). 이번 연구결과와 같이 N의 증가와 P와 Si가 감소하는 해역에서는 식물플랑크톤 중의 철이 현상이 발생되며, 식물플랑크톤의 종 다양성이 감소될 수 있는 것으로 보고되었다(Wong, et al.[1998]; Chen[2000]; Wang et al.[2003]).

엽록소-a의 농도는 연구기간 동안 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 일반적으로 식물플랑크톤의 현존량을 의미하는 엽록소-a는 크게 수온과 영양염의 영향을 크게 받는다. 앞에서 언급한 바와 같이 4개의 주요 수괴에서의 영양염은 일부 수괴의 질산염 증가 추세를 제외하면 대부분의 수괴에서 영양염의 농도가 감소하는 추세를 나타내었다. 그럼에도 불구하고 엽록소-a의 농도가 증가하는 원인은 크게 4개의 주요 수괴에서 나타난 수온 증가와 주요 수괴 중에서 상대적인 볼륨이 가장 크고, 세기가 지속적으로 증가하는 황해저층냉수에 포함된 비교적 높은 영양염의 공급 그리고 산사댐 건

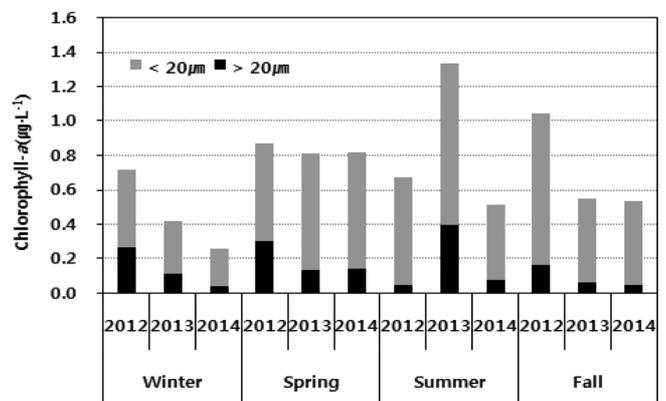


Fig. 12. Relative seasonal concentration ($\mu\text{g L}^{-1}$) of size fractionated chl-a of the northern East China Sea from 2012 to 2014.

설에 의한 부유물질 유출량의 감소에 의한 것으로 판단된다.

N/P ratio의 변동에 따른 식물플랑크톤의 크기에 따른 변화를 알아보기 위해 2012년부터 2014년까지 엽록소-*a*를 크기에 따라 즉 20 μm 이상과 이하로 나누어 분석하였다(Fig. 12). 이 시기에 분석된 식물플랑크톤의 크기에 따른 엽록소-*a*의 농도를 비교하면 20 μm 이상의 식물플랑크톤에 의한 엽록소-*a*의 농도는 20 μm 이하의 식물플랑크톤에 의한 엽록소-*a* 농도 보다 낮게 나타났다. 이는 P의 농도가 감소함에 따라 중의 천이가 발생하는 원인이라 볼 수 있다. Wang *et al.*[2003]은 N/P>30 일 때 P에 의해, N/P<8 일 때 N에 의한 제한 요인으로 제안하였으며, Justic *et al.*[1995]는 Si:P>22, N:P>22 이면 P에 의해, N:P<10, Si:N>1 이면 N에 의해, Si:P<10, Si:N<1 일 때 Si에 의해 각각 식물플랑크톤의 성장과 증식에 제한인자로 작용한다고 밝혔다. 따라서 이들의 기준을 연구 결과에 적용하면 연평균 자료에서는 제한되지 않으나 하계의 저층에서 P에 의해 결핍되는 것으로 판단된다. 또한 Brzezinski-Nelson[1990], Ptacnik *et al.*[2010]에 의해 제한된 영양상태에 대한 기준에 의하면 2010년 이후에는 인산염이 0.2 μM 이하를 나타내어 식물플랑크톤의 성장과 증식에 제한 인자로 작용한 것으로 판단된다. N/P ratio의 증가는 기존의 단순했던 먹이망 구조가 복잡한 미세생물먹이망으로 변동될 가능성이 있으며 이에 따라 최고 포식자인 어류의 생산력 즉 잠재적 수산 생산력의 감소로 이어져 우리나라 최고의 어장인 동중국해 북부해역의 어업 생산력이 감소할 것으로 전망된다.

반면 다른 연구결과에 의하면 황해에서 P와 Si 그리고 DO가 감소함에 따라 작은 크기의 식물플랑크톤이 증가하게 되고, 25년간 수온이 1.7°C, 염분 0.18 상승함에 따라 어류의 군집구조와 종 다양성도 변동하여 삼치(*Scombermorus niphonius*)와 등가시치(*Enchelyopus polyactis*)에서 참조기(*Pseudosciaena polyactis*)와 병어(*Stromateus argenteus*)으로 우점종의 천이가 발생하며, 전갱이(*Trachurus japonicus*)의 생물량은 증가하는 반면에 꼼치(*Liparis tanakai*)와 멸치(*Engraulis japonicus*)의 생물량은 감소하는 것으로 보고 되었다(Lin *et al.*[2005]).

따라서 수온 및 염분 그리고 영양염의 변화는 식물플랑크톤 뿐만 아니라 어종의 종수(Species number), 종풍부도(Species richness), 다양성(Diversity), 균등도(Evenness) 지수까지 영향을 미쳐 결국에는 해양생태계 변동에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

4.4 산사댐의 건설의 영향

2009년 장강 중·하류에 완공된 산사댐으로 인하여 유출량이 인위적으로 조절되고 있어 건설 전과 건설 후의 담수 유입량이 9~18% 감소(MLTMA[2009])함에 따라 해양생태계에 영향을 미칠 것으로 전망되고 있다. 그 예로 2000년 이전과 비교하면 1, 2차 물막이 공사가 진행되던 2003~2008년에 부유물질 배출량이 최대 56% 감소하였다(MLTMA[2009]). 댐건설은 유출수 중의 Si 감소에 영향을 미쳐 Si와 N의 ratio를 변화시키고, 규조류로부터 편모류로 식물플랑크톤의 종구성을 변화시킬 가능성이 있다(Humborg *et al.*[1997]; Li *et al.*[2007]). 따라서 위에서 언급한 산사댐 건설에 따른 영향을

영양염과 식물플랑크톤의 현존량을 나타내는 엽록소-*a*를 중심으로 독립표본 t-test를 통하여 환경인자의 유의성을 검정하였다(Table 4). 동중국해는 계절에 따라 유입되는 수괴와 세기가 다르므로 연평균 비교보다는 계절을 구분하여 비교하는 것이 타당하다고 생각되며, 비교 기준은 1차 물막이 공사가 완공되어 실제로 장강의 흐름이 제어되기 시작한 2003년 춘계를 기점으로 전·후의 값을 평균하여 나타내었다.

수온의 경우 표층과 저층에서 감소하는 경향을 나타내었으며 수온차는 춘계에 가장 크게 나타났으며, 염분은 수온차와는 반대로 증가하는 경향을 나타내 담수 유입이 감소하여 인근 해역의 수온은 하강하고 염분은 상승한 것으로 해석된다. 이러한 결과는 장강 하구에서 관측된 Jiao *et al.*[2007]의 결과와 유사하여 본 연구해역에서도 산사댐 건설의 영향을 확인할 수 있었다. 영양염의 변화를 보면 질산염은 계절에 상관없이 산사댐 건설 후 유의한 증가가 확인되며, 규산염은 동계를 제외하고 다른 계절에는 감소하였으며, 추계에 감소폭이 크게 나타났다. 인산염은 모든 계절에 감소하였으며 특히 추계에 현저한 감소를 나타내었다. 엽록소-*a*는 모든 계절에서 상승하는 경향을 보였다. 또한 춘계의 표층에서 가장 큰 증가를 보여 계절적인 영향으로 식물플랑크톤의 증식이 발생한 것으로 보인다. 산사댐 건설 후 엽록소-*a*의 증가는 산사댐 건설의 영향으로 유출량이 감소한 부유물질에 의해 인근 해역의 탁도가 감소(Chai *et al.*[2009])하여 광투과가 증가한 결과(Asanuma *et al.*[2005])로 Jiao *et al.*[2007]와 유사한 경향을 보였다. 또 다른 원인으로는 식물플랑크톤의 종조성의 변화로 기인된 가능성도 있어 향후 식물플랑크톤의 종조성에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 실제로 Son *et al.*[2012]에 의하면 동중국해역의 식물플랑크톤의 구성이 micro, nano 플랑크톤의 양은 감소하고 상대적으로 크기가 작은 pico 플랑크톤은 증가하고 있다고 지적한 바 있다. N/P ratio의 증가와 Si의 감소는 규조류 중심의 식물플랑크톤 군집을 와편모류로 종조성을 변화시키는 요인으로 알려졌다. N/P, Si/N 그리고 Si/P ratio를 이용하여 영양염의 변화를 살펴보면 N의 증가와 P의 감소의 영향이 큰 것으로 나타났다. 일반적인 해양의 N/P ratio가 16인 것을 감안하면 산사댐 완공 후 P에 대한 N의 농도차가 더 크게 나타났다. Justic *et al.*[1995]의 영양염 제한 기준에 적용하면 하계와 추계에는 P에 의해 식물플랑크톤의 성장과 증식에 제한이 될 수 있을 것으로 판단된다. 산사댐 건설에 따른 유량과 영양염 유입량의 감소로 동중국해 북부해역의 생태계 변화에 영향을 주고 이러한 결과는 동중국해에서 신생산, 일차생산, 어획량 등의 생물량 감소로 이어질 것으로 예측되었다(Chen[2000]). Wang *et al.*[2003]은 1997년부터 1999년까지 표층에서 평균 14.5~27.8의 N/P ratio와 1.66~4.50의 Si/N ratio를 보고하여, N의 농도가 Si 농도에 비해 감소하는 것을 확인하였다.

따라서 앞에서 언급했던 수괴의 세기 변화, 담수 유입의 감소, N/P ratio의 변화는 연구해역의 해양생태계의 변동으로 이어질 가능성이 있는 것으로 판단된다.

Table 4. The pre-post difference of t-test result on the water parameter after Three Gorges Dam construction in May, 2003

| Season | Parameter | layer | t-value | p | pre(a) | | post(b) | | difference(b-a) | | |
|-----------------------------|--------------------------|--------------|---------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-----------------|-------------|--------------|
| | | | | | mean | se | mean | se | mean | se | % |
| Winter | Temp. (°C) | s | -0.36 | 0.723 | 13.13 | 0.49 | 13.11 | 0.51 | -0.02 | 0.05 | -0.2 |
| | | b | 1.19 | 0.243 | 13.01 | 0.46 | 13.09 | 2.73 | 0.07 | 0.06 | 0.5 |
| | Sal. | s | 5.96 | 0.000 | 33.40 | 0.12 | 33.64 | 0.15 | 0.24 | 0.32 | 0.7 |
| | | b | 2.25 | 0.032 | 33.63 | 0.12 | 33.71 | 0.14 | 0.08 | 0.19 | 0.2 |
| | DO (ml·L ⁻¹) | s | 5.18 | 0.000 | 5.99 | 0.07 | 6.16 | 0.07 | 0.17 | 0.03 | 2.8 |
| | | b | -0.64 | 0.526 | 5.97 | 0.07 | 5.95 | 0.09 | -0.03 | 0.04 | -0.5 |
| | Nitrate (uM) | s | 2.698 | 0.012 | 5.96 | 0.69 | 7.18 | 0.50 | 1.23 | 0.46 | 17.1 |
| | | b | 0.75 | 0.462 | 7.66 | 0.71 | 7.80 | 0.52 | 0.34 | 0.45 | 4.3 |
| | Silicate (uM) | s | 2.78 | 0.010 | 9.11 | 0.71 | 9.97 | 0.69 | 0.86 | 0.31 | 8.6 |
| | | b | 1.27 | 0.217 | 10.46 | 0.88 | 11.10 | 0.73 | 0.64 | 0.50 | 5.8 |
| | Phosphate (uM) | s | -0.66 | 0.548 | 0.45 | 0.05 | 0.42 | 0.02 | -0.02 | 0.04 | -4.4 |
| | | b | -2.18 | 0.041 | 0.56 | 0.05 | 0.46 | 0.02 | -0.11 | 0.05 | -19.6 |
| Chl.a (µg·L ⁻¹) | s | 11.08 | 0.000 | 0.31 | 0.02 | 0.59 | 0.02 | 0.27 | 0.02 | 45.8 | |
| | b | 5.13 | 0.000 | 0.32 | 0.02 | 0.49 | 0.04 | 0.17 | 0.03 | 34.7 | |
| Spring | Temp. (°C) | s | -21.11 | 0.000 | 18.45 | 0.22 | 16.18 | 0.28 | -2.27 | 0.11 | -12.3 |
| | | b | -7.33 | 0.000 | 13.58 | 0.20 | 12.82 | 0.23 | -0.75 | 0.10 | -5.5 |
| | Sal. | s | 4.46 | 0.000 | 32.65 | 0.11 | 32.97 | 0.14 | 0.32 | 0.07 | 1.0 |
| | | b | -1.39 | 0.174 | 33.44 | 0.14 | 33.40 | 0.14 | -0.04 | 0.03 | -0.1 |
| | DO (ml·L ⁻¹) | s | 4.95 | 0.000 | 5.84 | 0.06 | 6.06 | 0.17 | 0.22 | 0.04 | 3.6 |
| | | b | 7.21 | 0.000 | 5.32 | 0.09 | 5.59 | 0.08 | 0.27 | 0.04 | 4.8 |
| | Nitrate (uM) | s | 2.70 | 0.012 | 2.81 | 0.37 | 3.32 | 0.34 | 0.51 | 0.19 | 15.4 |
| | | b | -2.63 | 0.014 | 9.45 | 0.80 | 7.52 | 0.35 | -1.92 | 0.73 | -20.3 |
| | Silicate (uM) | s | -0.27 | 0.790 | 6.65 | 0.43 | 6.53 | 0.41 | -0.12 | 0.45 | -1.8 |
| | | b | -3.95 | 0.001 | 11.85 | 0.43 | 9.85 | 0.45 | -1.99 | 0.51 | -16.8 |
| | Phosphate (uM) | s | -2.05 | 0.050 | 0.22 | 0.13 | 0.16 | 0.01 | -0.06 | 0.03 | -27.3 |
| | | b | -4.29 | 0.000 | 0.60 | 0.03 | 0.46 | 0.02 | -0.14 | 0.03 | -23.3 |
| Chl.a (µg·L ⁻¹) | s | 4.69 | 0.000 | 0.48 | 0.08 | 0.89 | 0.13 | 0.40 | 0.09 | 44.9 | |
| | b | -0.03 | 0.978 | 0.39 | 0.08 | 0.39 | 0.06 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | |
| Summer | Temp. (°C) | s | -0.52 | 0.607 | 27.92 | 0.12 | 27.87 | 0.09 | -0.06 | 0.11 | -0.2 |
| | | b | -3.93 | 0.000 | 17.67 | 0.59 | 16.84 | 0.47 | -0.83 | 0.21 | -4.7 |
| | Sal. | s | 5.06 | 0.000 | 30.11 | 0.21 | 30.60 | 0.17 | 0.49 | 0.10 | 1.6 |
| | | b | -2.98 | 0.006 | 33.38 | 0.15 | 33.22 | 0.18 | -0.16 | 0.05 | -0.5 |
| | DO (ml·L ⁻¹) | s | 3.44 | 0.002 | 4.86 | 0.06 | 5.03 | 0.03 | 0.18 | 0.05 | 3.6 |
| | | b | 3.68 | 0.001 | 3.47 | 0.07 | 3.69 | 0.10 | 0.22 | 0.06 | 6.0 |
| | Nitrate (uM) | s | 1.32 | 0.198 | 2.67 | 0.20 | 3.00 | 0.16 | 0.33 | 0.25 | 11.0 |
| | | b | 2.20 | 0.041 | 9.34 | 0.67 | 11.16 | 0.33 | 1.82 | 0.83 | 16.3 |
| | Silicate (uM) | s | -4.66 | 0.000 | 6.27 | 0.38 | 4.32 | 0.13 | -1.95 | 0.42 | -31.1 |
| | | b | -2.01 | 0.059 | 15.10 | 0.81 | 13.10 | 0.36 | -2.00 | 0.99 | -13.2 |
| | Phosphate (uM) | s | -3.25 | 0.003 | 0.21 | 0.03 | 0.11 | 0.01 | -0.10 | 0.03 | -47.6 |
| | | b | -3.78 | 0.001 | 0.57 | 0.05 | 0.39 | 0.03 | -0.18 | 0.05 | -31.6 |
| Chl.a (µg·L ⁻¹) | s | 1.14 | 0.267 | 0.80 | 0.12 | 0.90 | 0.07 | 0.10 | 0.08 | 11.1 | |
| | b | 0.65 | 0.525 | 0.32 | 0.04 | 0.35 | 0.04 | 0.03 | 0.05 | 8.6 | |
| Fall | Temp. (°C) | s | -0.77 | 0.446 | 21.08 | 0.18 | 21.04 | 0.16 | -0.04 | 0.05 | -0.2 |
| | | b | 2.87 | 0.007 | 19.53 | 0.23 | 19.80 | 0.19 | 0.27 | 0.09 | 1.4 |
| | Sal. | s | 3.67 | 0.001 | 33.33 | 0.09 | 33.43 | 0.10 | 0.10 | 0.03 | 0.3 |
| | | b | 0.24 | 0.815 | 33.75 | 0.14 | 33.76 | 0.13 | 0.01 | 0.03 | 0.0 |
| | DO (ml·L ⁻¹) | s | -1.55 | 0.132 | 5.19 | 0.03 | 5.15 | 0.03 | -0.04 | 0.03 | -0.8 |
| | | b | 1.58 | 0.123 | 4.40 | 0.12 | 4.50 | 0.10 | 0.09 | 0.06 | 2.0 |
| | Nitrate (uM) | s | 2.72 | 0.011 | 5.82 | 0.71 | 7.65 | 0.51 | 1.82 | 0.67 | 23.8 |
| | | b | 5.09 | 0.000 | 8.69 | 0.54 | 11.29 | 0.41 | 2.61 | 0.51 | 23.1 |
| | Silicate (uM) | s | -3.15 | 0.004 | 10.31 | 1.18 | 7.24 | 0.54 | -3.07 | 0.97 | -29.8 |
| | | b | -7.173 | 0.000 | 15.71 | 0.75 | 11.62 | 0.45 | -4.09 | 0.57 | -26.0 |
| | Phosphate (uM) | s | -3.23 | 0.003 | 0.51 | 0.06 | 0.34 | 0.02 | -0.17 | 0.05 | -33.3 |
| | | b | -6.30 | 0.000 | 0.86 | 0.06 | 0.49 | 0.02 | -0.37 | 0.06 | -43.0 |
| Chl.a (µg·L ⁻¹) | s | 9.09 | 0.000 | 0.31 | 0.01 | 0.69 | 0.04 | 0.39 | 0.04 | 56.5 | |
| | b | 5.57 | 0.000 | 0.17 | 0.03 | 0.46 | 0.06 | 0.29 | 0.05 | 63.0 | |

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, s: surface water, b: bottom water, se: standard error

5. 결 론

동중국해 북부해역에서 관측된 20년간의 환경 자료를 이용하여 장기변동 특성을 연구하였다. 표층수를 구성하는 장강희석수와 대만난류수는 다소 감소하는 경향을 보인 반면에 중·저층에 형성되는 황해저층냉수의 세기는 증가하는 경향을 보였다. 쿠로시오 기원수의 세기는 뚜렷한 감소 추세를 나타냈다. 또한 지속적으로 증가하는 황해저층냉수는 주요 수괴 중 연구해역에서 상대적으로 가장 큰 볼륨을 나타냈으며, 감소 추세를 나타내는 쿠로시오 기원수는 주요 수괴 중에서 가장 작은 볼륨을 나타냈다. 일반적으로 동중국해 전체해역에서의 주요 영양염 공급원은 장강희석수로 알려져 있으나, 이번 연구에서는 주요 수괴 중 상대적 볼륨이 가장 크고 세기가 지속적으로 증가하는 황해저층냉수의 영양염이 비교적 높은 특성을 나타냈다. 또한 연구기간 동안 질소를 제외한 대부분의 영양염의 농도는 감소하는 추세를 나타냈음에도 불구하고 엽록소-*a*의 농도는 지속적으로 증가하는 경향을 확인하였다. 따라서 연구해역에서의 주요 영양염 공급원은 황해저층냉수로 제시할 수 있다. 황해저층냉수의 세기가 지속적으로 증가하는 것을 감안하면 향후 연구해역에서는 황해저층냉수의 영향과 산사댐 건설에 의해 배출되는 부유물질의 감소로 인한 광투과 증가로 인해 식물플랑크톤의 농도는 지속적으로 증가할 것으로 판단된다. 인의 지속적인 감소와 질소의 증가 경향은 연구해역의 N/P ratio를 비정상적으로 증가시키는 것으로 판단되며, 이러한 변화는 구조류 중심의 식물플랑크톤 군집에서 외편모조류 군집으로 종의 천이를 발생 시키는 것으로 예측된다. 또한 산사댐 건설로 수온은 감소하나 염분은 증가하는 경향을 나타내 담수 유입 감소의 영향으로 해석된다.

후 기

본 논문을 세밀하게 검토해주신 심사자들께 깊이 감사드립니다. 본 연구는 2015년도 국립수산과학원 수산과학연구소(2015051)의 지원으로 수행되었습니다. 수고로움도 마다않고 현장자료 확보를 위해 수고하셨던 국립수산과학원 정선해양조사 관련 연구원들께 감사의 말씀을 드립니다.

References

- [1] Asanuma, I., Park, J.G., Yasuda, Y. and Hara, K., 2005, "Monitoring of the East China Sea related to the Three Gorges Dam operation", Proceedings of the First International Workshop on HAB in the northwest Pacific region, 51-61.
- [2] Benitez-Nelson, C.R., 2000, "The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems", Earth-Sci. Reviews, Vol.51, 109-135.
- [3] Chai, C., Yu, Z., Shen, Z., Song, X., Cao, X. and Yao, Y., 2009, "Nutrient characteristics in the Yangtze river and the adjacent East China Sea before and after impoundment of the Three Gorges Dam", Sci. Total Environ., Vol.407, 4687-4695.
- [4] Chen, C.T.A., 2000, "The Three Gorges Dam: Reducing the upwelling and thus productivity in the East China Sea", Geophysical Res. Lett., Vol.27, No.3, 381-383.
- [5] Chen, C.T.A., 2008, "Distribution of nutrients in the East China Sea and the South China Sea connection", J. Oceanogr., Vol.64, 737-751.
- [6] Chen, C.T., 2009, "Chemical and physical fronts in the Bohai, Yellow and East China Seas", J. Mar. Syst., Vol.78, 394-410.
- [7] Chen, Y.L., Chen, H.Y., Gong, G.C., Lin, Y.H., Jan, S. and Takahashi, M., 2004, "Phytoplankton production during a summer coastal upwelling in the East China Sea", Cont. Shelf Res., Vol.24, 1321-1338.
- [8] Choi, K.H., Lee, C.R., Kang, H.K. and Kang, K.A., 2011, "Characteristics and variation of size-fractionated zooplankton biomass in the Northern East China Sea", Ocean and Polar Res., Vol.33, No.2, 135-147.
- [9] Chung, C.S., Hong, G.H., Kim, S.H., Kim, Y.I., Moon, D.S., Park, J.K., Park, Y.C., Lee, J.H. and Lie, H.J., 2000, "The origin of dissolved inorganic nutrients by Kuroshio Intermediate Water in the eastern continental shelf of the East China Sea", J. Kor. Soc., Vol.3, No.3, 13-23.
- [10] Gong, G.C., Chang, J., Chiang, K.P., Hsiung, T.M., Hung, C.C., Duan, S.W. and Codispoti, L.A., 2006, "Reduction of primary production and changing of nutrient ratio in the East China Sea: Effect of the Three Gorges Dam?", Geophysical Res. Lett., Vol.33, L07610, doi:10.1029/2006GL025800, 2006.
- [11] Gong, G.C., Wen, Y.H., Wang, B.W. and Liu, G.J., 2003, "Seasonal variation of chlorophyll a concentration, primary production and environmental conditions in the subtropical East China Sea", Deep Sea Res. II, Vol.50, 1219-1236.
- [12] Harrison, P.J., Hu, M.H., Yang, Y.P. and Lu, X., 1990, "Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China", J. Exp. Mar. Biol. Ecol., Vol.140, 79-87.
- [13] Hsueh, Y., 2000, "The kuroshio in the East China Sea", J. Mar. Sys., Vol.24, 131-139.
- [14] Hu, D.X., 1994, "Some striking features of circulation in Huanghai Sea and East China Sea", Oceanolog. China Seas, Vol.1, 27-38.
- [15] Humborg, C., Ittekkot, V., Cociasu, A. and Bodungen, B.V., 1997, "Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure", Nature, Vol.386, 385-388.
- [16] Hung, J.J., Chan, C.L. and Gong, G.C., 2007, "Summer distribution and Geochemical composition of suspended-particulate matter in the East China Sea", J. Oceanogr. Vol.63, 189-207.
- [17] Hur, H.B., Jacobs, G.A. and Teague, W.J., 1999, "Monthly variations of water masses in the Yellow and East China Seas, November 6, 1998", J. Oceanogr., Vol.55, 171-184.
- [18] Hwang, J.H., Van, S.P., Choi, B.J., Chang, Y.S. and Kim, Y.H., 2014, "The physical processes in the Yellow Sea", Ocean. Coast. Manag., 1-9.
- [19] Ito, T., Kaneko, A., Tsubota, H. and Gohda, N., 1994, "The

- Characteristic distribution of silica over the East China Sea shelf slope”, *J. Oceanogr.*, Vol.50, 465-477.
- [20] Jang, S.T., Lee, J.H., Kim, C.H., Jang, C.J. and Jang, Y.S., 2011, “Movement of cold water mass in the Northern East China Sea in summer”, *The Sea*, Vol.16, No.1, 1-13.
- [21] Jiao, N., Zhang, Y., Zeng, Y., Gardner, W.D., Mishonov, A.V., Richardson, M.J., Hong, N., Pan, D., Yan, X.H., Jo, Y.H., Chen, C.T.A., Wang, P., Chen, Y., Hong, H., Bai, Y., Chen, X., Huang, B., Deng, H., Shi, Y. and Yang, D., 2007, “Ecological anomalies in the East China Sea: impacts of the Three Gorges Dam?”, *Water Res.*, Vol.41, 1287-1293.
- [22] Justic, D., Rabalais, N.N., Turner, R.E. and Dortch, Q., 1995, “Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: Stoichiometric nutrient balance and its consequences”, *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.*, Vol.40, 339-356.
- [23] Kim, D.S., Choi, S.H., Kim, K.H., Shim, J.H., Yoo, S.J. and Kim, C.H., 2009, “Spatial and temporal variation in nutrient and chlorophyll a concentrations in the northern East China Sea surrounding Cheju Island”, *Cont. Shelf Res.*, Vol.29, 1426-1436.
- [24] Kim, D.S., Shim, J.H. Lee, J.A. and Kang, Y.C., 2005, “The distribution of nutrients and chlorophyll in the Northern East China Sea during the spring and summer”, *Ocean and Polar Res.*, Vol.27, No.3, 251-263.
- [25] Kim, D.S., Kim, K.H., Shim, J.H. and Yoo, S.J., 2007, “The effect of anticyclonic eddy on nutrients and chlorophyll during spring and summer in the Ulleung Basin, East Sea”, *The Sea*, Vol.12, No.4, 280-286.
- [26] Kim, K.H. and Kim, S.S., 2009, “Radium isotope ratio as a tracer for estimating the influence of Changjiang outflow to the Northern part of the East China Sea”, *J. Kor. Sci. Mar. Environ. Engineer.*, Vol.12, No.3, 133-142.
- [27] Kim, K., Kim, K.R. Rhee, T.S. and Rho, H.K., 1991, “Identification of watermasses in the YS and the East China Sea by cluster analysis”, In *Oceanography of Asian Marginal Seas*, ed. by K. Takano, Elsevier, Amsterdam.
- [28] Kim, S.K., Choi, Y.C. and Kim, J.S., 2008(a), “Distribution of dissolved and particulate organic carbon in the East China Sea in summer”, *J. Environ. engineer.*, Vol.11, No.3, 124-131.
- [29] Kim, S.W., Lim, J.W. and Jang, L.H., 2008(b), “Temporal and spatial variability of chlorophyll a in the Northern East China Sea using ocean color images in summer”, *J. Environ. Sci.*, Vol.17, No.1, 85-95.
- [30] Lee, J.H. and Kim, C.H., 2013, “Long-term variability of sea surface temperature in the East China Sea: A review”, *Ocean and Polar Res.*, Vol.35, No.2, 171-179.
- [31] Li, G., Han, X., Yue, S., Wen, G., Rongmin, Y. and Kusky, T.M., 2006, “Monthly variations of water masses in the East China Seas”, *Cont. Shelf Res.*, Vol.26, 1954-1970.
- [32] Lin, C., Ning, X., Su, J., Lin, Y. and X, B., 2005, “Environmental changes and the responses of the ecosystems of the Yellow Sea during 1976-2000”, *J. Mar. Sys.*, Vol.55, 223-234.
- [33] Li, M., Xu, K., Watanabe, M. and Chen, Z., 2007, “Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem”, *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.*, Vol.71, 3-12.
- [34] Lim, S.M., Yeh, S.W. and Kim, G.R., 2012, “Analysis on the relationship between the Korean Temperature and the Atmospheric circulation over the northern hemisphere during Winter”, *Atmosphere. Kor. Meteorological Soc.*, Vol.22, No.2, 187-197.
- [35] Liu, S.M., Zhang, J., Chen, S.Z., Chen, H.T., Hong, G.H., Wei, H. and Wu, Q.M., 2003, “Inventory of nutrient compounds in the Yellow Sea”, *Cont. Shelf Res.*, Vol.23, 1161-1174.
- [36] Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2006, “Prediction of the marine ecosystem variation in the East China Sea due to the long term climate change”, pp. 47-61.
- [37] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009, “The study of oceanographic environmental impact in the South Sea(East China Sea) due to the Three Gorges Dam”, pp. 7-175.
- [38] Min, S.H., Kim, D.H. and Yoon, H.J., 2010, “Temporal and spatial analysis of SST in the Northeast Asian Seas using NOAA/AVHRR data”, *J. Kor. Institute Information and Communication Engineer.*, Vol.14, No.12, 2818-2826.
- [39] Ning, X., Lin, C., Su, J., Liu, C., Hao, Q. and 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.*, Vol.67, 59-75.
- [40] Oh, H.J., Kang, Y.S. and Park, J.H., 1999, “Distributional characteristics of chlorophyll a and oceanographic conditions in the Northern Part of East China Sea”, *J. Kor. Fish.* Vol.32, No.1, 88-97.
- [41] Ptacnik, R., Andersen, T. and Tamminen, T., 2010, “Performance of the redfield ratio and a family of nutrient limitation indicators as thresholds for phytoplankton N vs. P limitation”, *Ecosystems*, Vol.13, 1201-1214.
- [42] Rebstock, G.A. and Kang, Y.S., 2003, “A comparison of three marine ecosystems surrounding the Korean Peninsula: Responses to climate change”, *Progress in Oceanogr.*, Vol.59, 357-379.
- [43] Seung, Y.H., 1992, “Water masses and circulations around Korean Peninsula”, *J. Oceanolog. Soc. Kor.*, Vol.27, No.4, 324-331.
- [44] Son, Y.B., Ryu, J.H., Noh, J.H., Ju, S.J. and Kim, S.H., 2012, “Climatological variability of satellite-derived sea surface temperature and chlorophyll in the south sea of Korea and East China Sea”, *Ocean and Polar Res.*, Vol. 34, No. 2, 201-218.
- [45] Son, Y.B., Lee, T.H., Choi, D.L., Jang, S.T., Kim, C.H., Ahn, Y.H., Ryu, J.H., Kim, M.K., Jung, S.K. and Ishizaka, J., 2010, “Spatial and temporal variations of satellite-derived 10-year surface particulate organic carbon(POC) in the East China Sea”, *Kor. J. Remote Sensing*, Vol.26, No.4, 421-437.
- [46] Tian, R.C., Hu, F.X. and Martin, J.M., 1993, “Summer nutrient fronts in the Changjiang(Yantze River) estuary”, *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.*, Vol. 37, 27-41.
- [47] Wang, B.D., Wang, X.L., and Zhan, R., 2003, “Nutrient conditions

- in the Yellow Sea and the East China Sea”, *Estuarine, Coastal and shelf Sci.*, Vol. 58, 127-136.
- [48] Wong, G.T.F., Gong, G.C., Liu, K.K. and Pai, S.C., 1998, “Excess nitrate’ in the East China Sea”, *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.*, Vol.46, 411-418.
- [49] Yanagi, T., 2002, “Water, salt, phosphorus and nitrogen budgets of the Japan Sea”, *J. Oceanogr.*, Vol.58, 797-804.
- [50] Zhu, Z.Y., Zhang, J., Wu, Y., Zhang, Y.Y., Lin, J. and Liu, S.M., 2011, “Hypoxia off the Changjiang(Yangtze river) estuary: oxygen depletion and organic matter decomposition”, *Mar. Chem.*, Vol.125, 108-116.

Received 6 July 2015

Revised 29 July 2015

Accepted 6 August 2015