

2013-2014년 한국 동해중부연안 해양환경특성의 시공간적 변화

이용우[†] · 박미옥 · 김성수

해양환경관리공단 해양수질팀

Spatiotemporal Variations of Marine Environmental Characteristics in the Middle East Coast of Korea in 2013-2014

Yong-Woo Lee[†], Mi-Ok Park and Seong-Soo Kim

Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan 49111, Korea

요 약

동해중부연안(후포~거진)에서 해수 중 해양환경특성의 시공간적 분포양상을 살펴보기 위해서 2013~2014년에 계절별로 현장조사를 실시하였다. 표층 수온과 염분은 하계에 고온·저염, 동계에 저온·고염의 분포 양상이 뚜렷하게 나타났다. 저층 수온은 약 2~7°C 범위로 겨울에 상대적으로 높았으며, 염분은 약 34로 계절별로 큰 차이를 보이지 않았다. 표층수 중 용존산소 농도는 약 7~12 mg L⁻¹의 범위로 다른 계절에 비해 5월(평균: 11.4±0.3 mg L⁻¹)에 상대적으로 높았다. 표층수에서 수온과 용존산소 농도는 가을과 겨울에 유의한 음의 상관관계를 보여 이 시기에 수온이 용존산소량을 조절하는 주요인자인 것으로 판단된다. 표층수 중 용존무기질소와 용존무기규소는 여름에 비해 겨울에 각각 약 11배, 7배 높았다. 표층수 중 DIN:DIP 비는 약 16이었으나 봄인 5월에 상대적으로 낮은 값을 보였다. 반면 여름에는 상대적으로 높은 비를 보여 봄에는 질소, 여름에는 인이 식물플랑크톤의 성장에 제한인자로서 작용했을 것으로 판단된다. 해수 수질은 조사기간동안 I(매우 좋음)~III(보통) 등급 수준이었으며, 상대적으로 낮은 저층 용존산소 포화도를 보인 가을에 일부 정점에서 IV 등급 수준으로 나타났다.

Abstract – In order to elucidate the spatiotemporal variations of marine environmental parameters, we collected seawater samples in the middle east coast of Korea in 2013-2014. A high temperature and low salinity were distinctively observed in the summer and a low temperature and high salinity pattern in the winter. The temperature of the bottom water was in the range of 2 °C to 7 °C, with the temperature being relatively high in the winter, while the salinity was measured to be around 34, with no large differences across the seasons. The dissolved oxygen concentrations were in the range of 7 mg L⁻¹ to 12 mg L⁻¹, and it was relatively high in May compared to other seasons. The seawater temperature and dissolved oxygen concentration at the surface layer showed a significant negative correlation in the autumn and winter seasons, based on which it is seemed that water temperature is the main factor controlling the amount of dissolved oxygen in the autumn and winter seasons. The dissolved inorganic nitrogen (DIN) and silicate (DSi) increased 11- and 7-fold, respectively, in the winter compared to the summer. The DIN to DIP (dissolved inorganic phosphorus) ratio for the surface seawater was approximately 16, but it was relatively low in the spring season. On the other hand, the DIN to DIP ratio was relatively high in the summer. Based on this, it is seemed that nitrogen and phosphorus were the growth-limiting nutrients for phytoplankton in the spring and summer, respectively. Water quality was I (excellent) ~III (medium) level at the most stations except for some stations (level IV) during the autumn season, having low dissolved oxygen saturations.

Keywords: Nutrient(영양염), Limiting factor(제한인자), Dissolved oxygen(용존산소), Water quality index(수질평가지수), middle east coast of Korea(동해중부연안)

[†]Corresponding author: wbluesea@koem.or.kr

1. 서 론

동해는 대양에서 일어나는 심층수 순환, 극전선, 용승, 외류 등이 관찰되어 작은 대양이라 불리며, 대양의 생지화학적 변화를 예측하기 위한 수단으로 동해에서 일어나고 있는 물리 및 생지화학적 환경 변화를 이해하기 위해서 많은 연구들이 진행되어 왔다(Yoo and Kim[2004]; Hyun *et al.*[2009]; Yoo and Park[2009]; Kim *et al.*[2010a]). 한국의 동해연안은 대한해협으로부터 유입되는 고온·고염의 대마난류와 북쪽으로는 연안을 따라 남하하는 저온·저염의 북한한류의 영향을 받고 있는 해역으로 두 해류가 만나 약 37~38°N 부근에서 전선대가 형성된다(Chang *et al.*[2002], [2004]; Kim and Min[2008]; Choi *et al.*[2009]). 동해연안에서 형성되는 전선대에서는 기초생산의 증가로 인하여 좋은 어장이 형성되며(Park *et al.*[1991], Kim *et al.*[2010b]), 전선대의 위치는 시기별로 변한다(Gong and Son[1982]).

동해는 기초생산력이 높은 해역으로 알려져 있으며, 동해의 높은 기초생산력에 영향을 주는 영양염은 주로 한국의 동해연안에서 공급되는 것으로 보고되고 있다(Onitsuka *et al.*[2007]; Yoo and Park[2009]). Yoo and Park[2009]은 동해남부해역에서 발생하는 연안용승에 의해서 표층으로 공급된 영양염이 동해의 기초생산에 영향을 미치는 것으로 보고하였다. 하계에 동해연안에서 풍부한 영양염을 가진 냉수대는 기장연안부터 속초연안까지 발생하고 있으며, 냉수대의 발생에 따라 공급된 영양염이 동해연안의 식물플랑크톤의 군집 조성 및 현존량에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Suh *et al.*[2001]; Kim *et al.*[2014]). Yang *et al.*[1991]은 동해중부 극전선역에서 용존산소의 수직 분포는 생물 또는 화학적 과정보다는 물리적인 혼합과정에 의해 주로 결정되는 것으로 보고하였다. Won and Lee[2015]는 동해남부해역에서 해양환경 인자들의 계절적 변화 양상을 조사하였으며, 봄에 용존무기질소가 식물플랑크톤 성장에 제한인자로 작용하고 있는 것으로 보고하였다. 반면 Choi *et al.*[2012]은 동해의 강원연안에서 계절별 수괴 분포와 영양염의 시공간적 특성을 파악하였으며, 대마난류수의 영향을 받는 8월에 표층에서 용존무기질소가 식물플랑크톤 성장의 제한인자로 작용하고 있는 것으로 보고하였다. Kim *et al.*[2012]은 동해연안에서 N:P 비가 전 계절에서 16 이하로 나타나 용존무기질소가 식물플랑크톤의 성장에 제한인자로 작용하는 것으로 보고하였으며, 동해연안의 영양상태는 oligotrophic~mesotrophic 수준이며, 유기오염지수 평가 결과, 동해연안 전 해역에서 수질 상태가 양호한 것으로 평가하였다. 한국의 동해연안에서 해황과 화학적 특성에 대한 연구는 주로 연안용승이 발생하는 동해남부연안을 중심으로 이루어지고 있다. 그러나 전선대가 형성되어 복잡한 수괴를 형성하고, 시공간적으로 해양환경특성이 역동적으로 변화하는 동해중부연안에서 물리·화학적 변화 특성에 대한 연구는 부족한 실정이다.

이 연구에서는 다양한 수괴의 영향을 받고 있는 동해중부연안에서 2013~2014년에 계절별로 실시한 해양환경인자들의 분석결과를 이용하여 해황 특성 및 영양염의 시공간적 변화 양상을 살펴보고 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 현장조사

동해중부연안(후포~거진)에서 시공간적 해양환경 변화 특성을 파악하기 위하여 27개 정점을 선정하여 2013년 9월, 11월 그리고 2014년 2월, 5월에 현장조사를 실시하였다(Fig. 1). 조사정점의 수심은 가장 얇은 곳이 약 20 m, 가장 깊은 수심이 약 210 m였다. 해수분석을 위한 시료는 표층과 저층에서 로켓샘플러를 이용하여 각각 채수하였다. 저층수는 해저 바닥으로부터 약 2~3 m 상부 수심에서 채수하였다.

2.2 시료분석

수온과 염분은 현장에서 CTD(Seabird 19plus, Sea-Bird electronics Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. pH는 해수를 시료병에 기포가 발생하지 않도록 천천히 옮겨 담은 후 휴대용센서(Orion Star A221, Thermo Fisher Scientific Inc, Germany)를 이용하여 측정하였다. 해수 중 용존산소(DO)는 원클러-아지드화나트륨 적정법을 이용하여 현장에서 측정하였다. 부유입자물질(SPM) 농도는 미리 건조하여 무게를 측정한 GF/F 여과지를 이용하여 여과한 다음 초순수 약

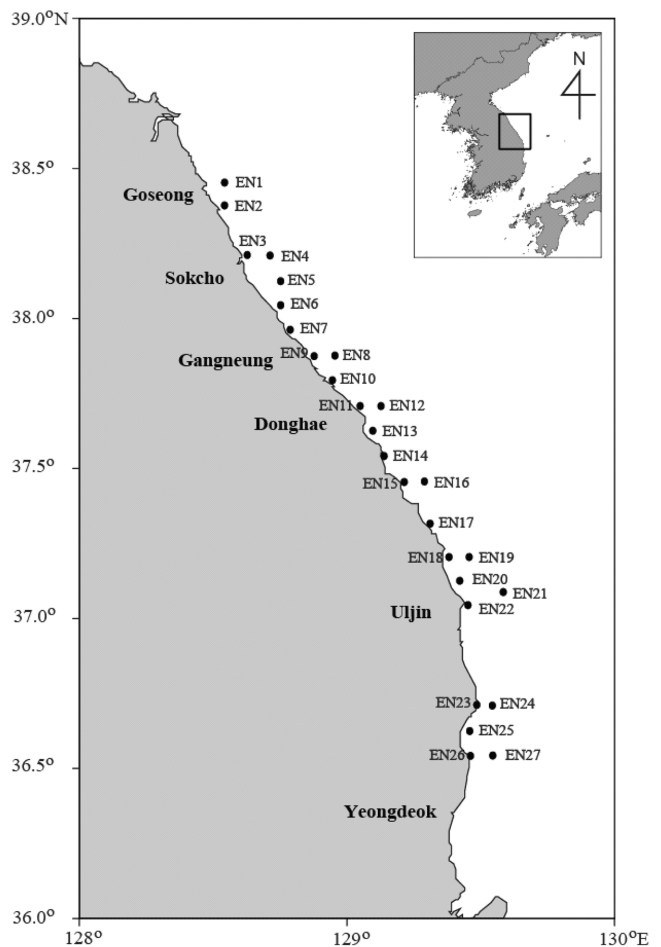


Fig. 1. A map showing the sampling locations in the middle east coast of Korea.

20 mL로 3회 반복 통과시켜 여과지에 남아있는 염분을 완전히 제거하였다. 여과지는, 105~110°C에서 2시간 이상 건조시킨 후 데시케이터에 넣어 방냉한 다음 여과지의 무게를 측정(항량으로 될 때까지 건조)하여 여과전 후의 무게차로 계산하였다. 영양염(NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , $\text{Si}(\text{OH})_4$) 분석을 위한 해수시료는 GF/F 여과지로 여과한 후, 여과된 해수 100 mL를 채취하여 냉동보관 하였으며, NH_4^+ 를 측정하기 위한 시료는 오염을 최소화하기 위해 여과를 하지 않고 100 mL를 취하여 즉시 냉동보관 하였다. 영양염은 영양염 자동분석기(QuAAtro, Seal Analytical GmbH, Germany)를 이용하여 실험실에서 분석하였다. 영양염 농도의 정확도 검증을 위하여 인증표준물질(MOOS-2와 MOOS-3, NRC-CNRC)과 함께 분석하였으며, NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , $\text{Si}(\text{OH})_4$ 의 회수율은 각각 102~106%, 98~99%, 95~107%, 96~98% 범위였다. 동해중부연안의 수질 상태를 파악하기 위하여 해양환경 기준(해양수산부 고시 제2013-186호, 2013) 생태기반 해수수질기

준을 이용하여 조사 정점별로 수질 등급을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 이화학 성분 분포(수온, 염분, SPM, pH, DO)

동해중부연안에서 2013년 9월(여름), 11월(가을), 2014년 2월(겨울), 5월(봄)에 표층수와 저층수 중 수온, 염분, SPM, pH, DO의 시공간적 분포 양상을 살펴보았다(Table 1). 표층수와 저층수 중 수온은 연중 각각 6.19~25.67°C, 0.90~19.11°C 범위였으며, 여름에 표층 수온은 평균 $23.01 \pm 1.00^\circ\text{C}$ 로 겨울(평균: $9.17 \pm 1.93^\circ\text{C}$)에 비해 약 2.5배 높았다. 저층 평균 수온(여름 평균: $7.06 \pm 5.84^\circ\text{C}$, 겨울 평균: $5.58 \pm 2.57^\circ\text{C}$)은 계절별로 큰 차이를 보이지 않았다(Table 1, Fig. 2). 동해중부연안에서 여름(9월)에 수온의 수직분포는 표층 혼합층의 두께가 얇고, 수온약층은 약 50 m 까지 형성되었다(Fig. 3).

Table 1. Maximum, minimum, and average contents of temperature, salinity, SPM, pH, DO, DO saturation, and chlorophyll *a* in surface and bottom seawater in the middle east coast of Korea

Sampling	Transparency (m)	Temperature (°C)	Salinity	SPM (mg L ⁻¹)	pH	DO (mg L ⁻¹)	DO (%)	Chl <i>a</i> (μg L ⁻¹)
Surface								
Sep. 2013	7.9-16.1 (11.2±1.9)	21.93-25.67 (23.01±1.00)	31.22-32.69 (32.10±0.36)	1.0-20.0 (5.1±3.6)	7.96-8.30 (8.17±0.08)	7.29-7.96 (7.66±0.17)	104-115 (108±2)	0.20-2.27 (0.59±0.38)
Nov. 2013	8.4-14.5 (11.8±1.7)	15.11-20.35 (17.31±1.56)	33.51-33.99 (33.76±0.13)	3.0-8.3 (5.0±1.6)	8.00-8.18 (8.09±0.04)	6.97-8.01 (7.50±0.30)	92-98 (96±2)	0.71-1.44 (1.16±0.20)
Feb. 2014	9.8-14.7 (12.6±1.1)	6.19-12.95 (9.17±1.93)	33.98-34.46 (34.22±0.14)	1.8-12.7 (5.2±2.4)	8.03-8.17 (8.11±0.03)	8.45-10.27 (9.52±0.46)	99-105 (103±1)	0.29-1.28 (0.83±0.33)
May 2014	4.5-12.0 (8.0±2.2)	8.32-15.80 (13.68±1.62)	34.00-34.31 (34.22±0.07)	3.2-20.0 (7.7±4.9)	7.95-8.24 (8.18±0.06)	10.54-12.04 (11.39±0.34)	114-144 (136±6)	0.10-4.02 (1.49±1.03)
Bottom								
Sep. 2013	-	1.10-19.11 (7.06±5.84)	32.91-34.35 (33.88±0.31)	2.9-27.6 (9.4±7.7)	7.78-8.14 (7.95±0.10)	6.18-10.39 (8.95±1.13)	65-108 (91±11)	0.03-1.81 (0.38±0.44)
Nov. 2013	-	0.90-16.47 (4.63±5.03)	33.56-34.29 (34.01±0.17)	2.3-8.3 (4.4±1.5)	7.75-8.10 (7.91±0.11)	5.22-8.72 (7.13±1.14)	47-97 (69±12)	0.03-1.35 (0.34±0.39)
Feb. 2014	-	1.66-10.23 (5.58±2.57)	33.86-34.31 (34.06±0.14)	0.6-7.9 (4.3±1.8)	7.94-8.18 (8.09±0.07)	8.46-10.16 (9.32±0.38)	83-104 (93±6)	0.05-2.03 (0.45±0.50)
May 2014	-	0.98-13.28 (4.40±3.54)	33.93-34.35 (34.07±0.10)	3.2-10.8 (4.8±1.6)	7.84-8.29 (8.01±0.11)	9.68-12.33 (10.93±0.71)	92-145 (106±13)	0.06-4.77 (1.46±1.71)

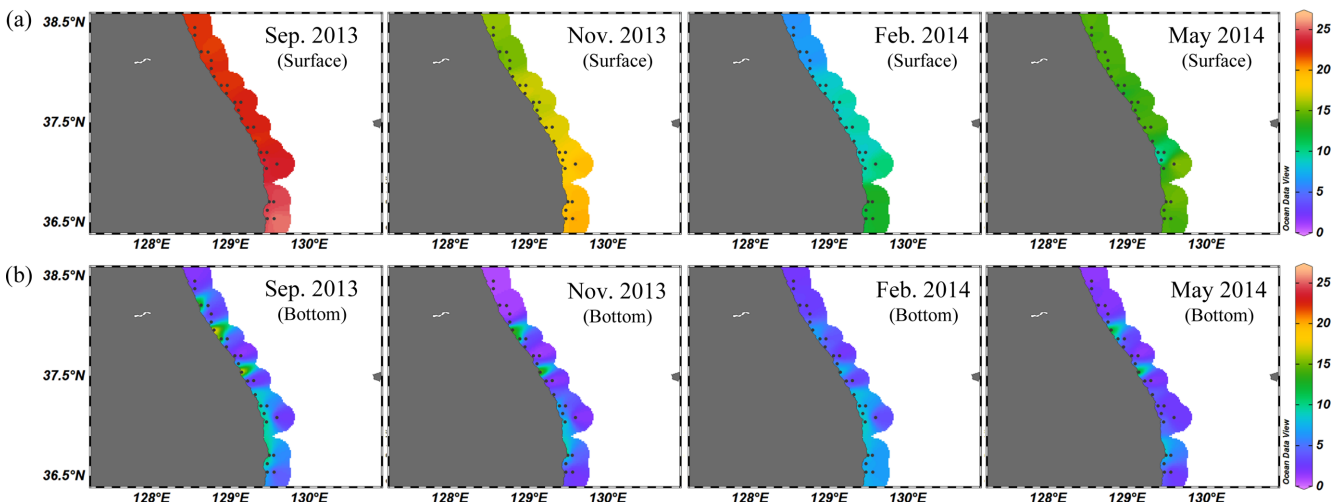


Fig. 2. The horizontal temperature (°C) distributions in (a) surface and (b) bottom seawater of the middle east coast of Korea.

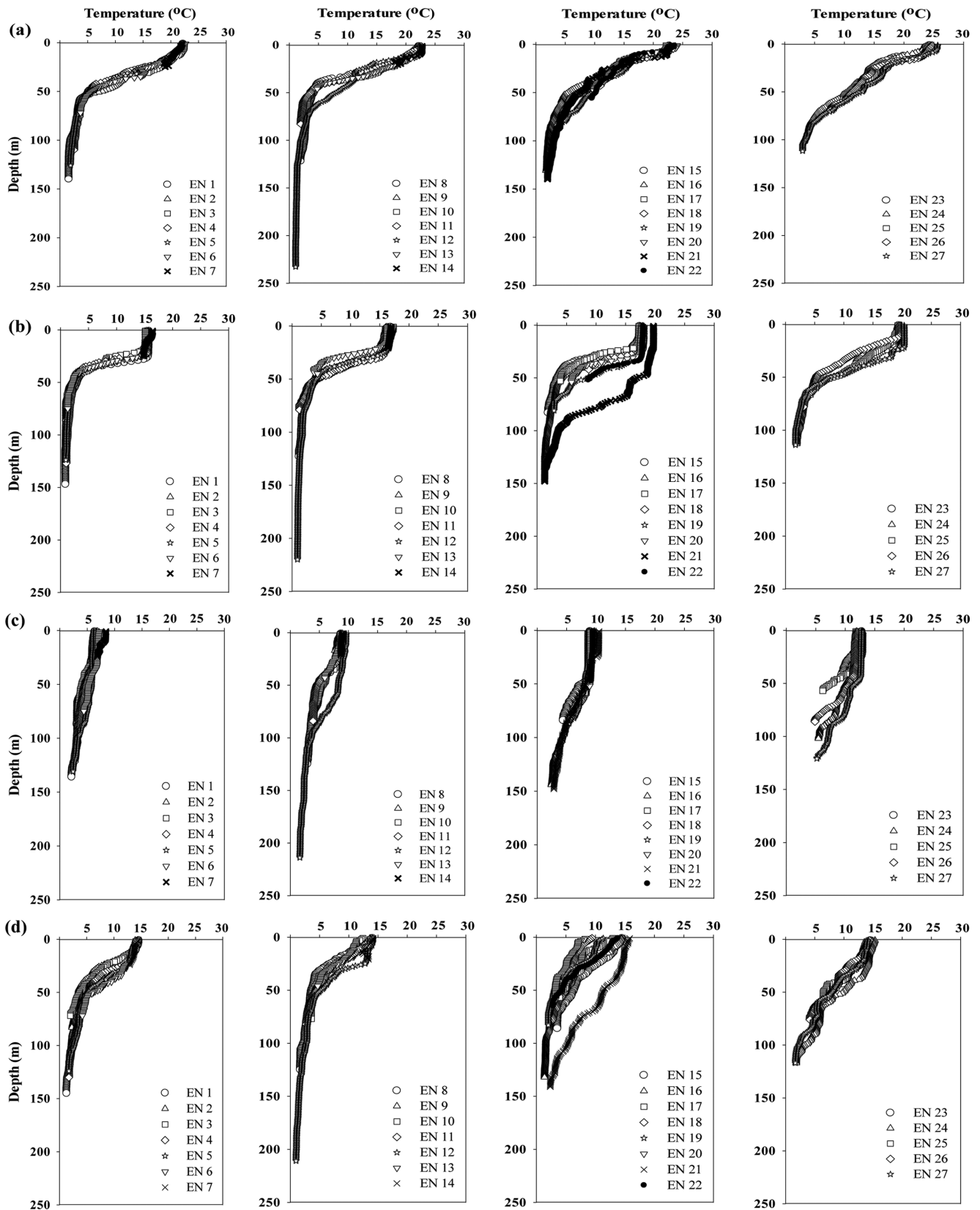


Fig. 3. The vertical profiles of temperature (°C) in the middle east coast of Korea in (a) September and (b) November 2013 and (c) February and (d) May 2014.

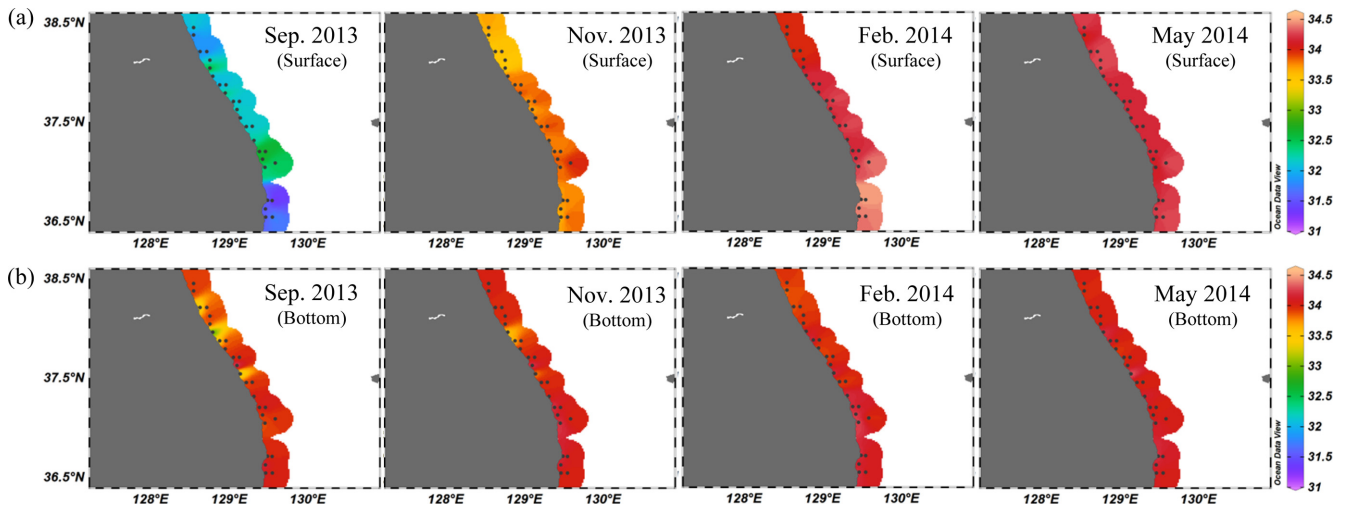


Fig. 4. The horizontal salinity distributions in (a) surface and (b) bottom seawater of the middle east coast of Korea.

동해남부연안에서는 여름에 연안용승이 활발하게 일어나는 것으로 알려져 있으나(Lee[1983]; Kim *et al.*[2010a]), 본 연구해역에서는 관찰되지 않았다. 가을에 수온의 수직분포는 표층에서부터 약 20~40 m 까지 표층 혼합층이 형성되었으며, 약 50~60 m 까지 수온약층이 형성되었다. 겨울에는 수온약층이 약화되면서 표층수와 저층수간 수온차가 작았다. 봄에 다시 표층 수온이 증가하면서 수온약층이 강화되었다. 표층 수온의 공간적 분포는 대마난류의 영향을 받는 남쪽에 위치한 후포와 울진연안에서 북쪽해역에 비해 상대적으로 높게 나타났다(Fig. 2)(Choi *et al.*[2012]).

표층수와 저층수 중 염분의 계절적 분포는 담수의 유입이 많은 여름(표층: 32.10 ± 0.36 , 저층: 33.88 ± 0.31)에 가장 낮았으며, 겨울(표층: 34.22 ± 0.14 , 저층: 34.06 ± 0.14)과 봄(표층: 34.22 ± 0.07 , 저층: 34.07 ± 0.10)에 가장 높았다(Table 1, Fig. 4). 여름에 염분의 수직분포는 수온과 유사하게 표층 혼합층은 얇았으며, 염분약층은 수심 약 30~50 m에서 형성되었다(Fig. 5). 일부 정점의 염분약층 아랫부분에서 간헐적인 고염수의 수괴 침입이 관찰되었으며, 약 50 m 이하의 수심에서는 염분(약 34)이 일정하였다. 여름에 표층 염분의 공간적 분포는 속초, 강릉, 울진연안에서 상대적으로 낮았다(Fig. 4). 저층 염분 역시 표층과 유사하게 속초, 강릉연안 정점에서 상대적으로 낮았다. 가을에는 수심 약 20 m 까지 표층 혼합층이 두꺼워졌다. 겨울에는 염분약층이 약하게 형성되었으며, 표층과 저층 사이에 염분차가 크지 않았다. 특히하게 표층 염분이 저층에 비해 상대적으로 높아지는 양상을 보였다. 반면 여름에 표층 염분은 약 32로 저층수에 비해 2 정도 낮았다. Kim and Rho[1994]는 하계(6~10월)에 양자강 유출수가 대마난류수와 혼합되어 대한해협을 통하여 동해로 이동한다고 보고하였다. 또한 여름에 대마난류 표층수가 동해중부해역까지 유입되었다가 겨울이 되면 대마난류의 영향이 서서히 줄어 북한한류가 강화되는 것으로 알려져 있다(Na *et al.*[2009]; Choi *et al.*[2012]). 따라서 본 연구 해역에서 여름에 표층에서 나타난 저염수는 양자강 유출수에서 기원한 것으로 판단된다.

SPM 농도는 연간 표층수와 저층수에서 각각 $1.0 \sim 20.0 \text{ mg L}^{-1}$, $0.6 \sim 27.6 \text{ mg L}^{-1}$ 범위였으며, 계절별로는 표층은 봄에 저층은 여름에 상대적으로 높았다(Table 1). 봄에 표층수와 저층수에서 각각 $3.2 \sim 20.0 \text{ mg L}^{-1}$ (평균: $7.7 \pm 4.9 \text{ mg L}^{-1}$), $3.2 \sim 10.8 \text{ mg L}^{-1}$ (평균: $4.8 \pm 1.6 \text{ mg L}^{-1}$)로 저층에 비해 표층에서 높았다. 여름에 표층수에서 SPM 농도는 $1.0 \sim 20.0 \text{ mg L}^{-1}$ (평균: $5.1 \pm 3.6 \text{ mg L}^{-1}$), 저층수에서는 $2.9 \sim 27.6 \text{ mg L}^{-1}$ (평균: $9.4 \pm 7.7 \text{ mg L}^{-1}$) 범위로 봄과 달리 여름에는 저층에서 높았다. 봄에 표층수에서 chlorophyll *a* 농도(평균: $1.48 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$)가 상대적으로 높게 나타나 식물플랑크톤의 번성에 의해서 SPM 농도가 높았던 것으로 판단된다(Table 1).

표층수와 저층수 중 pH는 연중 각각 $7.95 \sim 8.30$, $7.75 \sim 8.29$ 의 범위에 분포하였으며, 표층수에 비해 저층에서 상대적으로 낮았다(Table 1). 표층수와 저층수간 pH차는 수직 혼합이 활발하게 일어나는 겨울에 비해 여름에 상대적으로 크게 나타났다.

표층수와 저층수 중 DO 농도는 연중 각각 $6.97 \sim 12.04 \text{ mg L}^{-1}$, $5.22 \sim 12.33 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위에 분포하였다. 표층수와 저층수 모두 11월에 가장 낮았고 5월에 가장 높았다. 여름(9월)에 표층수와 저층수 중 DO 평균 농도는 각각 $7.66 \pm 0.17 \text{ mg L}^{-1}$, $8.95 \pm 1.13 \text{ mg L}^{-1}$ 로 표층이 저층보다 오히려 낮았다(Table 1). 여름에 표층수 중 DO의 수평분포는 정점별로 큰 차이를 보이지 않았으나, 저층은 연안에서 낮고 외해로 갈수록 수심이 깊어짐에 따라 증가하는 양상을 보였다. 반면 DO 포화도는 표층에서 $104 \sim 115\%$ (평균: $108 \pm 2\%$), 저층에서 $65 \sim 108\%$ (평균: $91 \pm 11\%$)의 범위로 나타나 표층에 비해 저층에서 낮았다. 가을에 DO 농도는 표층수에서 $6.97 \sim 8.01 \text{ mg L}^{-1}$ (평균: $7.50 \pm 0.30 \text{ mg L}^{-1}$), 저층수에서 $5.22 \sim 8.72 \text{ mg L}^{-1}$ (평균: $7.13 \pm 1.14 \text{ mg L}^{-1}$)의 범위로 표층이 저층보다 높았다. 겨울에 DO 농도는 표층수에서 $8.45 \sim 10.27 \text{ mg L}^{-1}$ (평균: $9.52 \pm 0.46 \text{ mg L}^{-1}$), 저층수에서 $8.46 \sim 10.16 \text{ mg L}^{-1}$ (평균: $9.32 \pm 0.38 \text{ mg L}^{-1}$)의 범위로 사계절 중 표층수와 저층수간 DO 농도차가 가장 작았다. 겨울에 표층 DO 농도는 후포연안에서 낮았고 북쪽에 위치한 거진연안으로 갈수록 증가하는 양상을 보

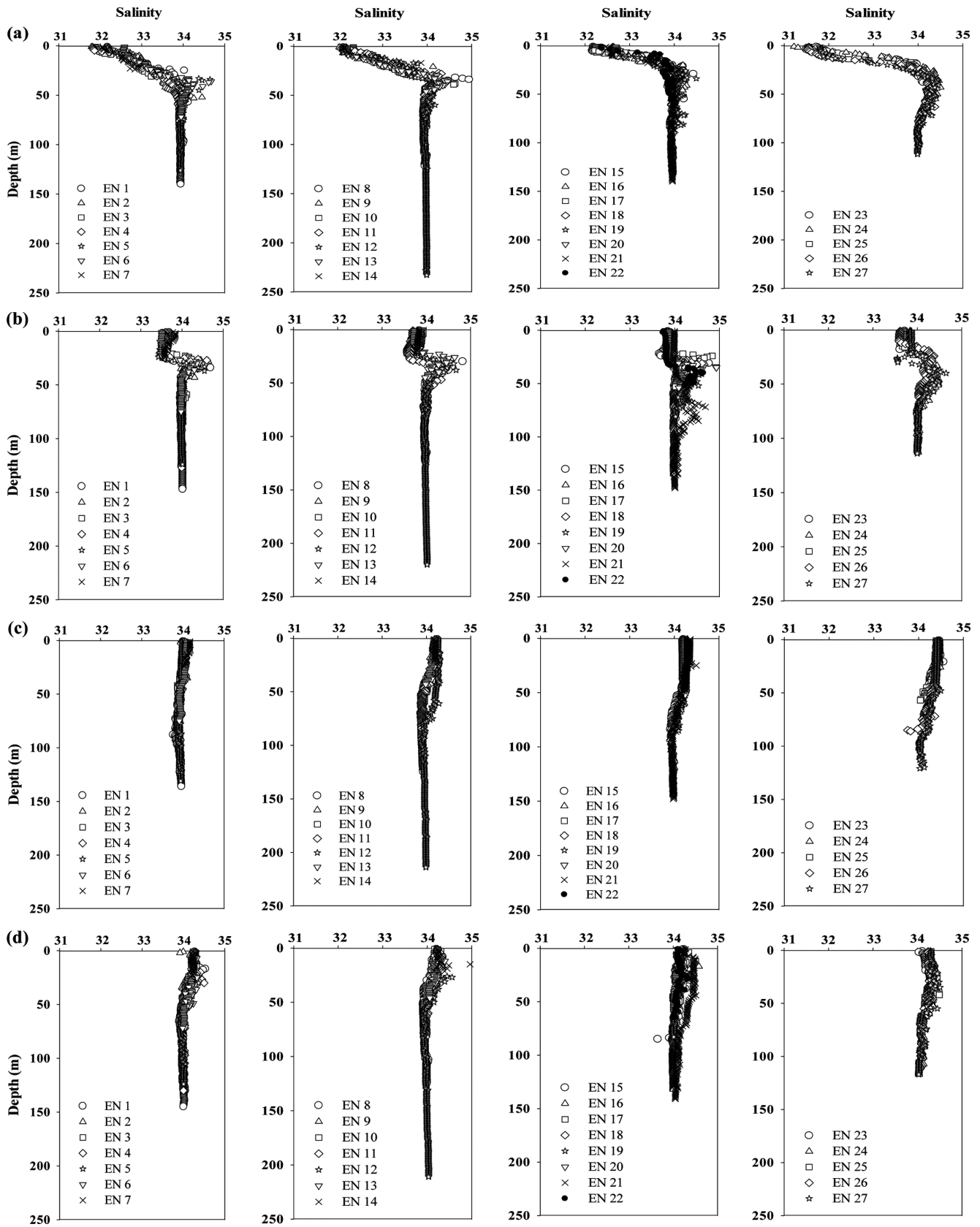


Fig. 5. The vertical profiles of salinity in the middle east coast of Korea in (a) September and (b) November 2013 and (c) February and (d) May 2014.

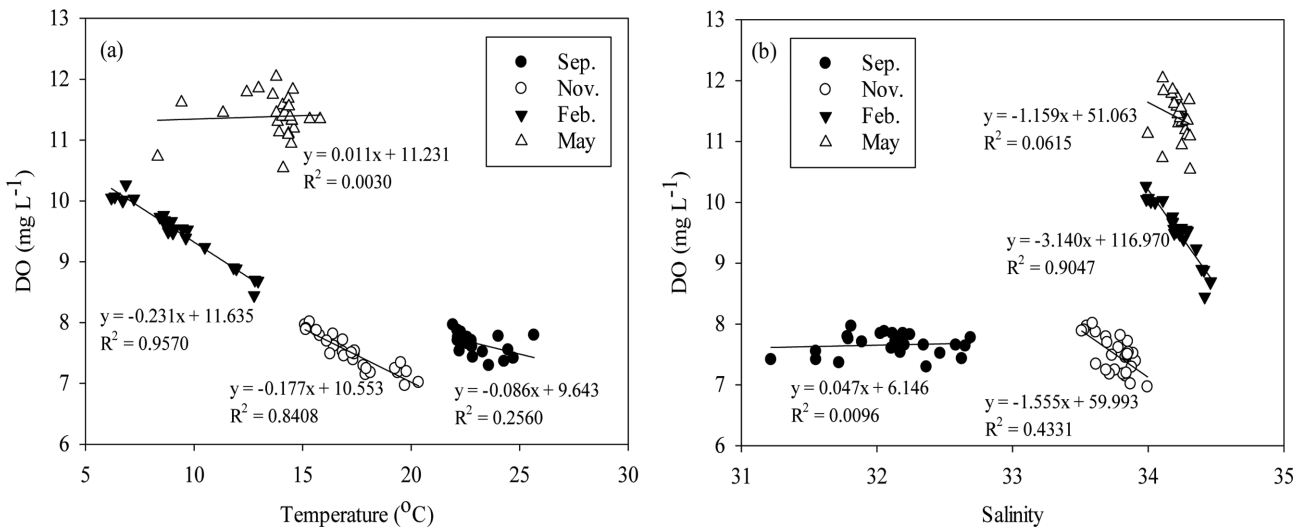


Fig. 6. The correlations of (a) temperature and dissolved oxygen and (b) salinity and dissolved oxygen in the surface layer of the middle east coast of Korea.

였으며, 저층도 표층과 유사하게 북쪽에 위치한 정점에서 다소 높았다. 가을에 표층수 중 DO 농도는 수온($r=-0.84$)과 유의한 음의 상관관계를 보였으며, 겨울에는 수온($r=-0.96$) 및 염분($r=-0.90$)과 유의한 음의 상관관계를 보였다(Fig. 6). 따라서 가을과 겨울에 표층수 중 DO 농도 분포는 수온 또는 염분이 주요한 조절인자인 것으로 판단된다(Fig. 6). Won and Lee[2015]에 의해서 동해남부연안에서 조사된 결과에 의하면, 봄에 수온과 DO 농도 사이에 유의한 역의 상관관계를 보인 것으로 보고하였으나, 본 연구해역에서는 가을과 겨울에 유의한 역의 상관관계를 보였다. 본 연구결과에서는 봄에 식물플랑크톤의 번성이 표층 용존산소 농도 분포에 영향을 준 것으로 판단되며, Won and Lee[2015]에 의해서 동해남부연안에서 조사한 결과에서는 봄에 낮은 식물플랑크톤 현존량으로 인해 표층 수온이 용존산소 농도 분포에 주요 조절인자였던 것으로 판단된다. 봄에 DO 농도는 표층수와 저층수에서 각각 10.5~12.0 mg L⁻¹(평균: 11.4±0.3 mg L⁻¹), 9.7~12.3 mg L⁻¹(평균: 10.9±0.7 mg L⁻¹)의 범위로, 표층이 저층보다 약간 높았다. 표층의 DO 농도는 공간적으로 유사한 분포양상을 보였으며, 저층은 죽변연안을 기준으로 북쪽이

남쪽보다 높았다. 봄에 DO 포화도는 표층수에서 114~144%(평균: 136±6%), 저층수에서 92~145%(평균: 106±13%)의 범위였다. 봄에 표층수 중 DO 포화도는 거진, 울진연안(정점 EN18, 19, 20)을 제외하면 대체로 130% 이상으로 높게 나타났다. 동해중부연안에서 봄인 5월에 chlorophyll *a* 농도(표층 평균: 1.49±1.03 μg L⁻¹)가 다른 계절에 비해 상대적으로 높아 식물플랑크톤의 광합성에 의해서 공급된 산소에 의해 표층수 중 DO 포화도가 높았던 것으로 판단된다.

3.2 영양염과 chlorophyll *a*의 시공간적 분포

동해중부연안에서 기초생산을 조절하는 주요 인자인 영양염류(용존무기질소, 용존무기인, 용존무기규소)의 시공간적 분포 양상을 살펴보았다.

용존무기질소(DIN) 농도는 NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺ 농도의 총합으로 나타내었다. 표층수에서 DIN 농도는 수층 혼합이 활발한 겨울에 가장 높았고(평균: 5.03±0.45 μM) 성층이 형성되는 여름에 가장 낮았다(평균: 0.44±0.26 μM). 저층에서는 가을에 가장 높았고(평균: 11.90±5.52 μM) 겨울에 가장 낮았다(평균: 7.00±2.04 μM)(Table 2).

Table 2. Maximum, minimum, and average concentrations of DIN, DIP, and DSi in surface and bottom seawater in the middle east coast of Korea

	DIN (μM)	DIP (μM)	DSi (μM)
Surface			
Sep. 2013	0.06-1.39 (0.44±0.26)	0.001-0.036 (0.014±0.009)	0.54-3.59 (1.61±0.80)
Nov. 2013	0.68-4.98 (3.12±1.14)	0.010-0.303 (0.187±0.079)	4.41-8.13 (6.79±1.20)
Feb. 2014	3.57-6.26 (5.03±0.45)	0.244-0.396 (0.330±0.041)	7.21-10.84 (9.48±0.67)
May 2014	0.19-11.76 (1.26±2.36)	0.009-0.751 (0.104±0.150)	1.52-16.31 (4.27±3.42)
Bottom			
Sep. 2013	0.13-16.87 (7.84±5.32)	0.002-1.197 (0.578±0.301)	1.34-21.69 (11.09±5.61)
Nov. 2013	1.76-19.39 (11.90±5.52)	0.078-1.330 (0.823±0.408)	5.62-25.91 (16.64±6.21)
Feb. 2014	4.90-13.02 (7.00±2.04)	0.323-0.964 (0.508±0.171)	8.57-19.05 (11.72±2.61)
May 2014	0.09-15.47 (8.68±5.02)	0.035-1.232 (0.696±0.387)	1.70-25.21 (14.96±6.83)

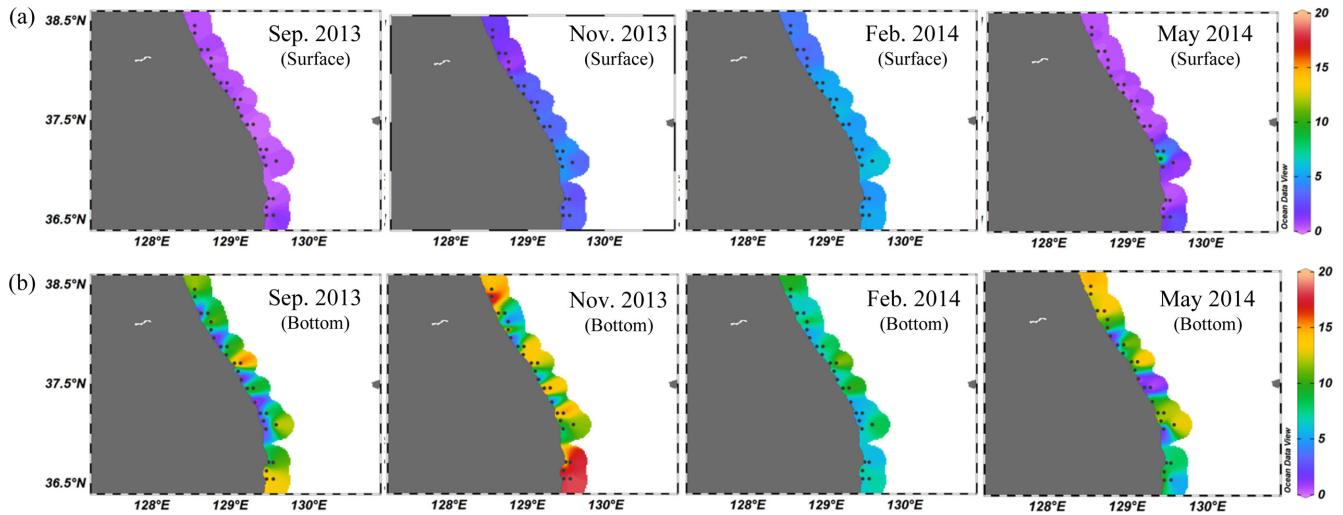


Fig. 7. The horizontal distributions of dissolved inorganic nitrogen (μM) in (a) surface and (b) bottom seawater of the middle east coast of Korea.

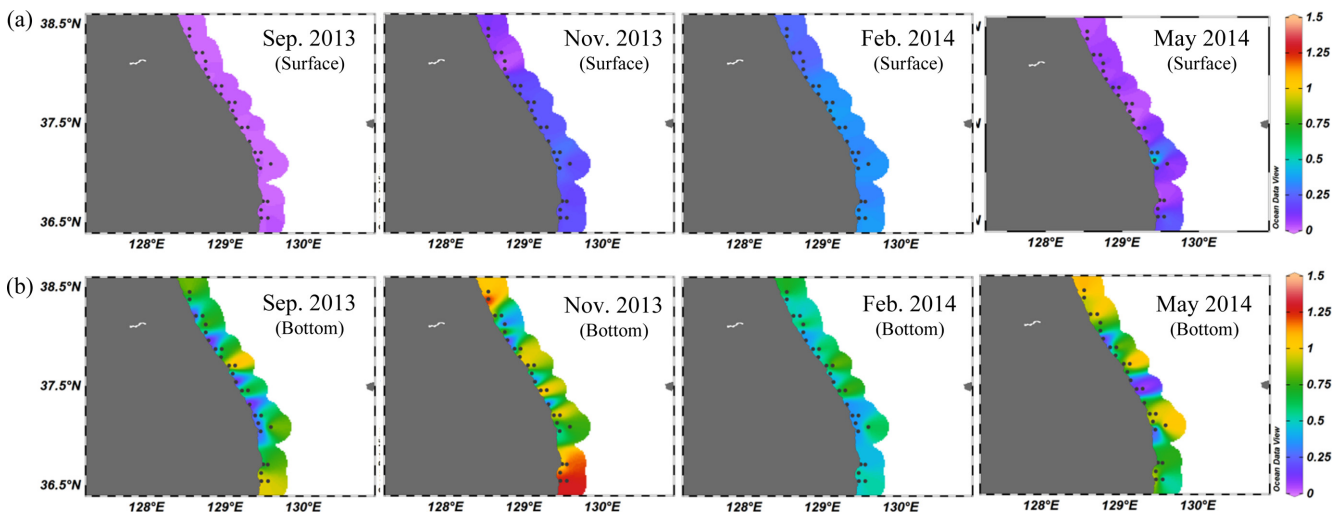


Fig. 8. The horizontal distributions of dissolved inorganic phosphorus (μM) in (a) surface and (b) bottom seawater of the middle east coast of Korea.

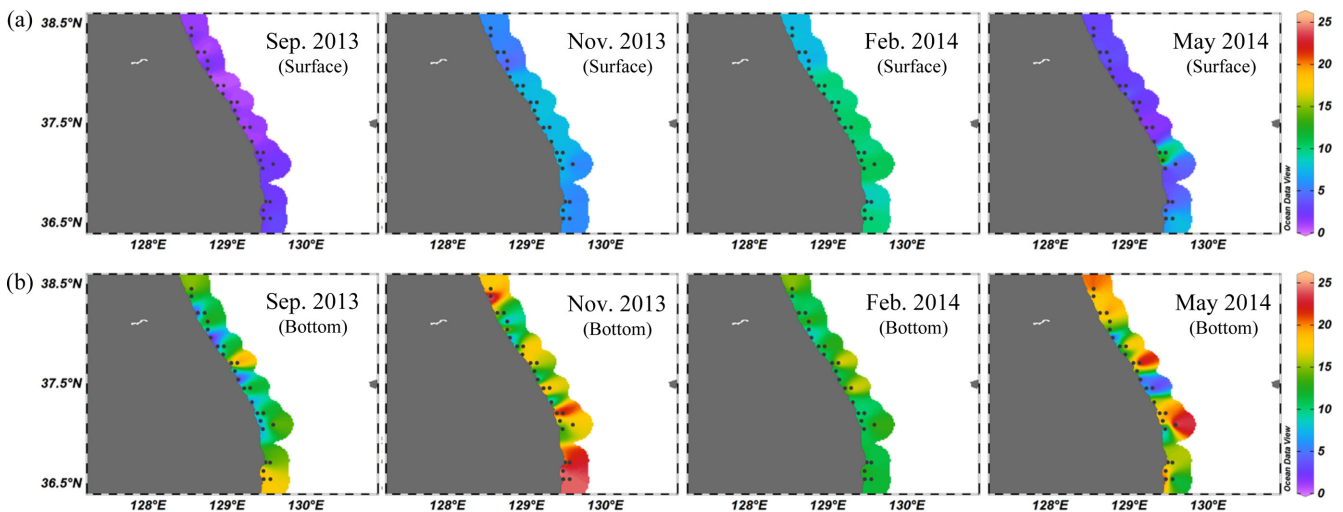


Fig. 9. The horizontal distributions of dissolved inorganic silicate (μM) in (a) surface and (b) bottom seawater of the middle east coast of Korea.

DIN 농도는 표층수에 비해서 저층수에서 상대적으로 높았으며, 표층수와 저층수간 농도차는 성층이 형성되는 여름에 약 18배로 가장 크게 나타났다. 저층수 중 DIN의 농도(연평균: $8.86 \pm 2.14 \mu\text{M}$)는 표층수(연평균: $2.46 \pm 2.05 \mu\text{M}$)에 비해서 계절별 변동이 상대적으로 작았다. 봄과 여름에 성층이 형성되면서 저층수 중 영양염이 축적되어 가을에 상대적으로 높은 농도를 보이고 겨울에 성층이 약화되면서 다시 표층수로 영양염이 공급되어 저층수 중 영양염의 농도가 낮아진 것으로 판단된다(Jeong *et al.*[2013]; Won and Lee [2015]).

표층수와 저층수 중 용존무기인(DIP)의 월평균 농도는 각각 $0.014 \sim 0.330 \mu\text{M}$ (평균: $0.159 \pm 0.134 \mu\text{M}$), $0.508 \sim 0.823 \mu\text{M}$ (평균: $0.651 \pm 0.138 \mu\text{M}$) 범위였으며, 연평균 농도가 저층에서 표층에 비해 약 4배 높았다(Table 2). 계절별 표층수 중 DIP 농도는 여름(평균: $0.014 \pm 0.009 \mu\text{M}$)에 가장 낮았고 겨울(평균: $0.330 \pm 0.041 \mu\text{M}$)에 가장 높았으며, 여름에 비해 겨울에 약 24배 높았다. 저층수 중 DIP 농도는 가을에 평균 $0.823 \pm 0.408 \mu\text{M}$ 로 가장 높았고, 겨울에 평균 $0.508 \pm 0.171 \mu\text{M}$ 로 가장 낮았다. 겨울에 표층수와 저층수에서 DIP 농도는 각각 $0.244 \sim 0.396 \mu\text{M}$ (평균: $0.330 \pm 0.041 \mu\text{M}$), $0.323 \sim 0.964 \mu\text{M}$ (평균: $0.508 \pm 0.171 \mu\text{M}$) 범위로 다른 계절에 비해 표-저층간 농도차가 가장 작았다.

용존무기규소(DSi)의 월평균 농도는 표층수와 저층수에서 각각 $1.61 \sim 9.48 \mu\text{M}$ (평균: $5.54 \pm 3.37 \mu\text{M}$), $11.09 \sim 16.64 \mu\text{M}$ (평균: $13.60 \pm 2.64 \mu\text{M}$)범위로 저층수에서 표층수에 비해 약 2.5배 높았으며, 표층수에 비해 저층수에서 상대적으로 계절적 변화가 작았다(Table 2). 계절별로는 표층수에서는 여름에 가장 낮았고 겨울에 가장 높았으며, 저층에서는 DIN의 분포와 유사하게 여름에 가장 낮았고 가을에 가장 높은 농도를 보였다. DSi의 표층수와 저층수간 농도차는 여름에 약 7배로 가장 컸으며 겨울에 약 1.2배(표층 평균: $9.48 \pm 0.67 \mu\text{M}$, 저층 평균: $11.72 \pm 2.61 \mu\text{M}$)로 가장 작았다.

동해중부연안 표층에서 영양염 농도의 계절변동은 대체로 봄, 여름에 비해 가을, 겨울에 높게 나타났으며, 저층에서는 가을에 가장 높았다. 영양염류의 공간적 분포는 표층수의 경우 대체로 전 조사해역의 농도 분포가 유사하게 나타난 반면, 저층수의 경우 연안에서 외양으로 갈수록 수심이 깊어짐에 따라 증가하는 양상을 보였다(Fig. 7, 8, 9). 동해중부연안에서 영양염의 시공간적 분포 양상을 살펴보면 표층수 중 계절별 농도변화는 육상으로부터 공급되는 영양염의 영향보다는 수층 혼합에 의한 아표층으로부터 영양염 공급의 영향을 더 많이 받는 것으로 판단된다. 조사해역의 영양염 농도는 표층수에서는 봄과 여름에 낮았고 가을과 겨울에 대체로 높은 경향을 보였다. 봄과 여름에는 식물플랑크톤의 대량 번식으로

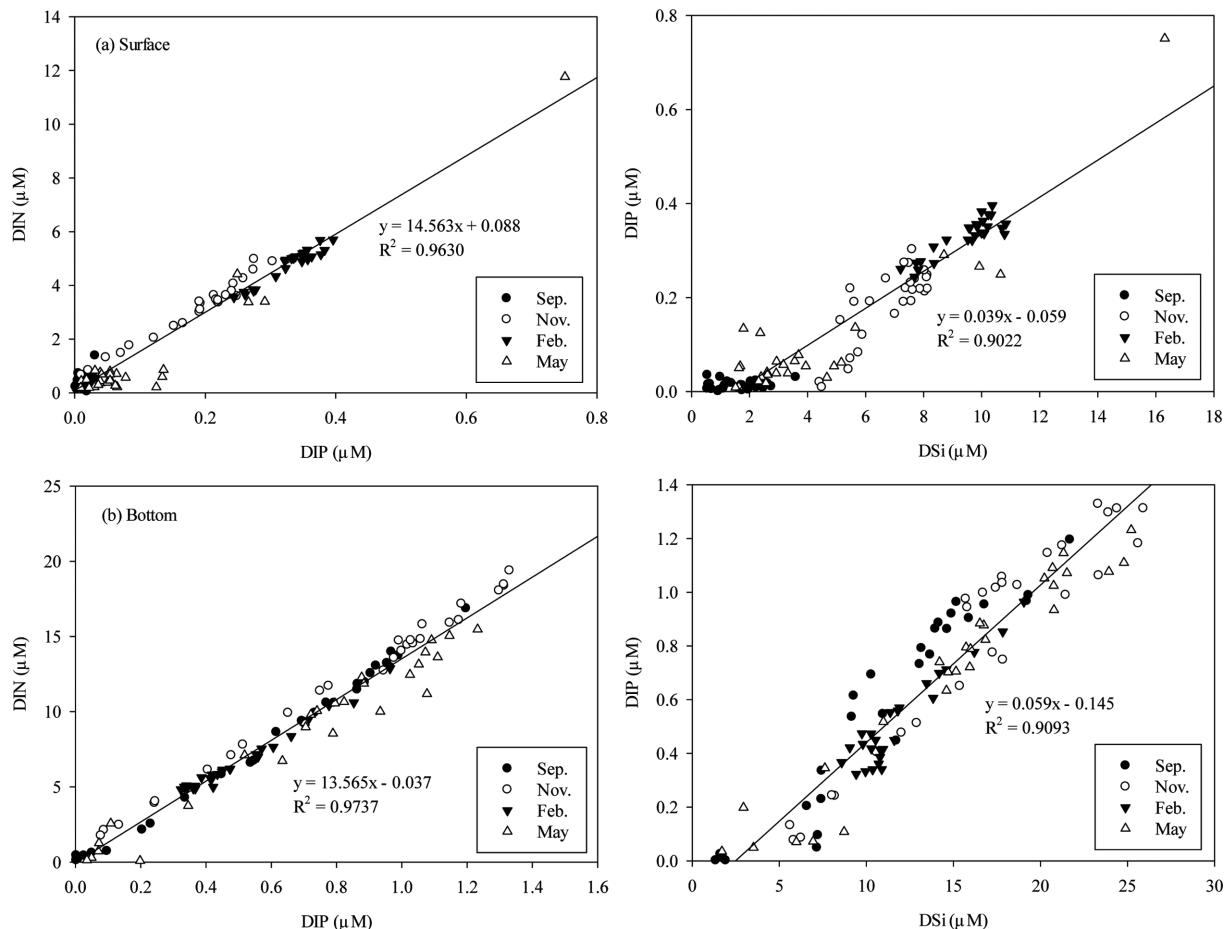


Fig. 10. The correlations of DIN:DIP and DIP:DSi in (a) surface and (b) bottom seawater of the middle east coast of Korea.

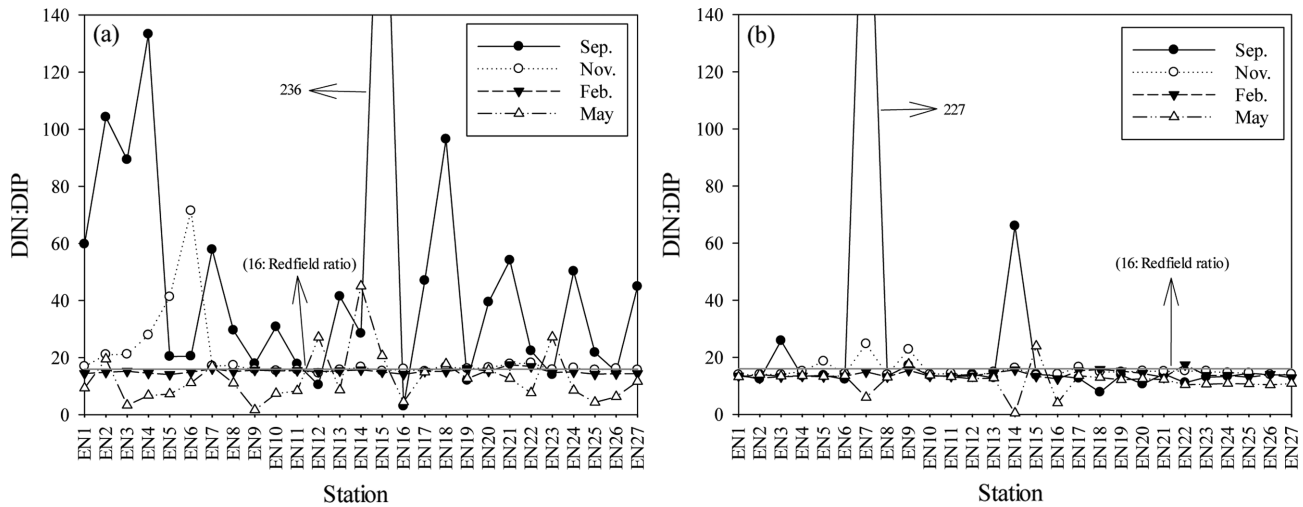


Fig. 11. The seasonal variations of DIN:DIP in (a) surface and (b) bottom seawater of the middle east coast of Korea.

영양염의 소비량이 많아 그 농도가 감소하고, 이후 가을과 겨울에는 아표층으로부터 영양염 공급의 증가 및 식물플랑크톤의 감소로 인하여 영양염의 소비가 작아 그 농도가 높았던 것으로 판단된다.

조사해역에서 식물플랑크톤의 성장 및 군집조성에 영향을 미칠 수 있는 영양염류의 요소별 상관관계를 살펴보았다. 표층수와 저층수에서 측정된 DIN과 DIP, DSi와 DIP 사이에 유의한 양의 상관관계를 보였다(Fig. 10). 해양에서 식물플랑크톤의 성장에 필요한 DIN:DIP는 일반적으로 약 16:1로 알려져 있다. 조사기간동안 DIN:DIP 비는 표층수와 저층수에서 각각 2~236(평균: 24±29), 0.5~227(평균: 16±21)였고, 여름에 삼척연안 주변(정점 EN15) 표층수에서 DIN:DIP가 236으로 가장 높았다(Fig. 11). 봄(5월)에 표층수에서 DIN:DIP 비는 일부 정점을 제외하고 16 이하로 나타나 봄에 동해중부연안 표층수에서는 식물플랑크톤의 성장에 DIN이 제한인자로 작용하는 것으로 판단된다. 영양염의 농도가 상대적으로 낮았던 여름에 표층수에서 DIN:DIP 비는 대부분의 정점에서 16 이상이였으며, 정점별로 큰 차이를 보였다. 저층수 중 DIN:DIP 비는

일부 정점을 제외하고 대체로 16 이하였으며, 계절별 및 정점별로는 큰 차이를 보이지 않았다.

동해에서 chlorophyll *a* 농도는 일반적으로 봄인 4~5월에 높은 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*[2000]). 동해중부연안에서 chlorophyll *a* 농도는 연중 표층수와 저층수에서 각각 0.10~4.02 $\mu\text{g L}^{-1}$ (평균: $1.01 \pm 0.66 \mu\text{g L}^{-1}$), 0.03~4.77 $\mu\text{g L}^{-1}$ (평균: $0.65 \pm 1.02 \mu\text{g L}^{-1}$) 범위에 분포하였다(Table 1). 표층수에서는 봄인 5월에(평균: $1.49 \pm 1.03 \mu\text{g L}^{-1}$) 가장 높았으며, 여름인 9월에(평균: $0.59 \pm 0.38 \mu\text{g L}^{-1}$) 가장 낮았다. 봄에 높은 식물플랑크톤의 농도는 겨울에 아표층으로부터 표층수로 공급된 영양염과 광량의 증가로 인한 것으로 판단된다.

3.3 수질등급평가

동해중부연안에서 계절별로 조사한 27개 정점에 대해서 해역별 수질등급기준(해양수산부 고시 제2013-186호)을 이용하여 수질을 평가하였다(Table 3). 동해중부연안의 계절별 수질등급은 가을을 제외하면 대부분 I~III 등급 수준이었으며, 여름에 후포연안에 위

Table 3. Seasonal distribution of water quality grade at each station in the middle east coast of Korea

St.	Sep. 2013	Nov. 2013	Feb. 2014	May 2014	St.	Sep. 2013	Nov. 2013	Feb. 2014	May 2014
EN1	II	III	II	I	EN15	I	IV	I	II
EN2	I	III	I	II	EN16	II	III	II	I
EN3	I	III	I	I	EN17	I	III	I	II
EN4	I	IV	II	II	EN18	I	IV	I	II
EN5	II	III	II	I	EN19	II	IV	I	II
EN6	I	III	I	I	EN20	I	IV	I	II
EN7	I	I	I	I	EN21	II	IV	II	I
EN8	II	III	II	I	EN22	I	III	I	II
EN9	I	I	I	I	EN23	II	IV	I	II
EN10	I	III	I	III	EN24	II	III	II	II
EN11	II	IV	I	I	EN25	III	IV	II	III
EN12	II	III	II	II	EN26	IV	IV	I	II
EN13	I	IV	I	I	EN27	II	III	II	II
EN14	I	I	I	II					

*I: Excellent, II: Good, III: Medium, IV: Bad, V: Very bad

치한 정점 26과 가을에 11개의 정점에서 수질 IV등급 수준이었다. 위 정점들에서 등급 저하 요인을 살펴본 결과, 저층수 중 DO 포화도(가을 평균: $69 \pm 12\%$)가 낮았기 때문이며, 원인물질인 DIN, DIP, 일차반응물질인 chlorophyll *a*와 투명도는 모두 1등급에 해당하는 수준이었다. 2012~2013년 동해남부연안에서 Won and Lee[2015]에 의해서 분석한 결과를 이용하여 수질등급을 평가한 결과 역시 가을에 총 6개 정점에서 저층 DO 포화도가 수질등급 저하에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 국내 해양환경 특성에 적합한 수질평가 기준을 설정하기 위해서 5개의 생태구로 구분하여 기준을 선정하였다(Rho *et al.*[2012]). 해양환경기준 수질평가를 위한 평가항목은 부영양화의 원인항목인 표층 DIN, 표층 DIP와 일차반응항목인 표층 chlorophyll *a*, 투명도 그리고 이차반응항목인 저층 DO 포화도로 구분된다. 저층 DO 포화도의 경우 외양역 정점에서 계절별 평균값 중 최소 포화도 값인 90%를 생태구별 기준값으로 정하였다. 원인항목, 일차반응 항목, 이차반응 항목 순으로 큰 가중치를 부여하여 수질지수를 계산한다. 그 중 저층 DO 포화도의 기여가 약 50%를 차지하고 있다. 동해중부해역 저층 DO 농도는 가을에 $5.22 \sim 8.72 \text{ mg L}^{-1}$ (평균: $7.13 \pm 1.14 \text{ mg L}^{-1}$)의 범위였으며, 겨울(평균: $9.32 \pm 0.38 \text{ mg L}^{-1}$)에 비해 평균 약 23% 낮은 것으로 나타났다. DO 포화도 농도는 가을에 46.7~96.8%(평균: $69.1 \pm 12.3\%$) 범위에 분포하였으며, 45.0~67.5% 수준일 때 항목별 점수 4점을 획득해 수질등급이 나빠진다. 그러나 동해중부연안에서 가을에 저층 DO 농도(5 mg L^{-1} 이상)는 동해의 경우 수심의 급격한 변화에 따라 저층으로 DO의 공급이 원활하지 않아 저층수 중 DO 포화도가 낮은 것으로 판단된다. 봄과 여름에는 외래 및 자생기원의 유기물들이 저층에서 분해되는 과정에서 저층 DO의 농도가 감소한 것으로 판단된다. 저층 DO의 농도는 저서생물의 생리활동에 영향을 줄 수 있는 수준은 아닌 것으로 판단되며, 수질이 나쁨(IV등급) 수준으로 표현하기에는 어려움이 있다. 따라서 향후 동해연안에서 해수수질 기준 설정과 관련된 좀 더 세밀한 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

동해중부연안에서 시공간적 해양환경특성을 파악하기 위해서 해수 중 주요 해양환경인자들에 대해서 2013년 9월부터 2014년 5월 까지 계절별로 해양환경조사를 실시하였다. 조사해역에서 연중 표층과 저층 수온은 각각 $6.19 \sim 25.67^\circ\text{C}$, $0.90 \sim 19.11^\circ\text{C}$ 범위였다. 여름에 평균 표층 수온은 $23.01 \pm 1.00^\circ\text{C}$ 로 겨울(평균: $9.17 \pm 1.93^\circ\text{C}$)에 비해 약 2배 이상 높았으며, 저층수 중 수온의 계절 변화는 표층에 비해 상대적으로 작았다. 염분은 표층수와 저층수에서 연중 각각 $31.22 \sim 34.46$, $32.91 \sim 34.35$ 의 범위로 표층수의 염분은 여름에 가장 낮고 겨울과 봄에 상대적으로 높았다. 저층수의 염분은 약 34 내외로 연중 유사한 농도 분포 양상을 보였다. 수온과 염분의 수직분포는 여름에 표층혼합층이 얇고 겨울에 깊어지는 양상을 보였다. 표층수 중 DO 농도는 연중 약 $7 \sim 12 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위로 5월에 상대적으로 높았고, 가을과 겨울에 표층수 중 DO 농도는 수온과 유의한 음의

상관관계를 보여 이 시기에는 수온이 표층수 중 DO 농도를 조절하는 주요인자인 것으로 나타났다. 표층수의 DIN 농도는 여름에 비해 겨울에 약 11배, DS는 약 7배 높았다. 표층수 중 DIN:DIP는 가을과 겨울에는 약 16이었으나 여름에는 대부분의 정점에서 16 이상이었으며, 봄에는 16 보다 낮았다. 따라서 여름과 봄에는 각각 DIP와 DIN이 식물플랑크톤의 성장에 제한인자로 작용했을 것으로 판단된다. 해수수질은 대부분 I~III 등급 수준이었으며, 가을에 일부 정점에서 IV 등급 수준으로 나타났다. 가을에 저층 DO 포화도가 낮아 수질등급이 나쁜 것으로 나타났으나, 향후 동해연안에서 수질평가 기준에 대한 심도있는 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 해양생태계 기본 조사 사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 현장조사 및 시료 분석에 도움을 주신 해양측정분석센터 직원들께 감사드립니다.

References

- [1] Chang, K.I., Hogg, N., Suk, M.S., Byun, S.K., Kim, Y.G. and Kim, K., 2002, "Mean Flow and Variability in the Southwestern East Sea", *Deep-Sea Res. I*, Vol. 49, 2261-2279.
- [2] Chang, K.I., Teague, W.J., Lyn, S.J., Perkins, H.T., Lee, D.K., Watts, D.R., Kim, Y.B., Mitchell, D.A., Lee, C.M. and Kim, K., 2004, "Circulation and Currents in the Southwestern East/Japan Sea: Overview and Review", *Prog. Oceanogr.*, Vol. 61, 105-156.
- [3] Choi, B.J., Haidvogel, D.B. and Cho, Y.K., 2009, "Interannual Variation of the Polar Front in the Japan/East Sea from Summertime Hydrography and Sea Level Data", *J. Mar. Syst.*, Vol. 78, 351-362.
- [4] Choi, M.Y., Moon, D.S., Jung, D.H. and Kim, H.J., 2012, "Seasonal Distribution of Water Masses and Spatio-Temporal Characteristics of Nutrients in the Coastal Areas of Gangwon Province of the Korean East Sea in 2009", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Engineer.*, Vol. 15, No. 2, 76-88.
- [5] Gong, Y. and Son, S.J., 1982, "A Study of Thermal Front in the Southwestern Japan Sea" *Bull. Fish. Res. Dev. Agency*, Vol. 4, 69-91.
- [6] Hyun, J.H., Kim, D., Shin, C.W., Noh, J.H., Yang, E.J., Mok, J.S., Kim, S.H., Kim, H.C. and Yoo, S., 2009, "Enhanced Phytoplankton and Bacterioplankton Production Coupled to Coastal Upwelling and Anticyclonic Eddy in the Ulleung Basin, East Sea", *Aquat. Microb. Ecol.*, Vol. 54, 45-54.
- [7] Jeong, D.H., Shin, H.H., Jung, S.W. and Lim, D.I., 2013, "Variations and Characters of Water Quality during Flood and Dry Seasons in the Eastern Coast of South Sea, Korea", *Korean J. Environ. Biol.*, Vol. 31, 19-36.
- [8] Kim, S.W., Go, W.J., Kim, S.S., Jeong, H.D. and Yamada, K., 2010a, "Characteristics of Ocean Environment Before and After

- Coastal Upwelling in the Southeastern Part of Korean Peninsula using an in-situ and Multi-Satellite Data”, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, Vol. 16, 345-352.
- [9] Kim, Y.S., Lee, Y.H. and Choi, H.G., 2012, “Water Quality Assessment at Coastal Area of the East Sea of Korea”, *J. Korean Soc. Mar. Environ. and Saf.*, Vol. 18, No. 1, 12-24.
- [10] Kim, T.H., Lee, Y.W. and Kim, G., 2010b, “Hydrographically Mediated Patterns of Photosynthetic Pigments in the East/Japan Sea: Low N:P Ratios and Cyanobacterial Dominance”, *J. Mar. Syst.*, Vol. 82, 72-79.
- [11] Kim, Y.H. and Min, H.S., 2008, “Seasonal and Interannual Variability of the North Korean Cold Current in the East Sea Reanalysis Data”, *Ocean and Polar Res.*, Vol. 31, No. 1, 21-31.
- [12] Kim, I.O. and Rho, H.K., 1994, “A Study on China Coastal Water Appeared in the Neighbouring Seas of Cheju Island”, *Bull. Korean Fish. Soc.*, Vol. 27, No. 5, 515-528.
- [13] Kim, S.W., Saitoh, S.I., Ishizaka, J., Isoda, Y. and Kishino, M., 2000, “Temporal and Spatial Variability of Phytoplankton Pigment Concentrations in the Japan Sea Derived from CZCS Images”, *J. Oceanogr.*, Vol. 56, 527-538.
- [14] Kim, A.R., Youn, S.H., Chung, M.H., Yoon, S.C. and Moon, C.H., 2014, “The Influences of Coastal Upwelling on Phytoplankton Community in the Southern Part of East Sea, Korea”, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, Vol. 19, No. 4, 287-301.
- [15] Lee, J.C., 1983, “Variation of Sea Level and Sea Surface Temperature Associated with Wind-Induced Upwelling in the Southeast Coast of Korea in Summer”, *J. Oceanogr. Soc. Korea*, Vol. 18, 149-160.
- [16] Na, H., Isoda, Y., Kim, K., Kim, Y.H. and Lyu, S.J., 2009, “Recent Observations in the Straits of the East/Japan Sea: A Review of Hydrography, Currents and Volume Transports”, *J. Mar. Syst.*, Vol. 78, 200-205.
- [17] Onitsuka, G., Tetsuo, Y. and Yoon, J.H., 2007, “A Numerical Study on Nutrient Sources in the Surface Layer of the Japan Sea using a Coupled Physical-Ecosystem Model”, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2006JC003981.
- [18] Park, J.S., Kang, C.K. and An, K.H., 1991, Community Structure and Spatial Distribution of Phytoplankton in the Polar Front Region off the East Coast of Korea in Summer, *Bull. Korean Fish. Soc.*, Vol. 24, No. 4, 237-247.
- [19] Rho, T.K., Lee, T.S., Lee, S.R., Choi, M.S., Park, C., Lee, J.H., Lee, J.Y. and Kim, S.S., 2012, “Reference Values and Water Quality Assessment Based on the Regional Environmental Characteristics”, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, Vol. 17, No. 2, 45-58.
- [20] Suh, Y.S., Jang, L.H. and Hwang, J.D., 2001, “Temporal and Spatial Variations of the Cold Waters Occurring in the Eastern Coast of Korean Peninsula in Summer Season”, *J. Korean Fish. Soc.*, Vol. 34, No. 5, 435-444.
- [21] Won, J.H. and Lee, Y.W., 2015, “Spatiotemporal Variations of Marine Environmental Parameters in the South-Western Region of the East Sea”, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, Vol. 20, 16-28.
- [22] Yang, H.S., Kim, S.S., Kang, C.G. and Cho, K.D., 1991, “A Study on Sea Water and Ocean Current in the Sea Adjacent to Korea Peninsula”, *Bull. Korean Fish. Soc.*, Vol. 24, No. 3, 185-192.
- [23] Yoo, S. and Kim, H.C., 2004, “Suppression and Enhancement of the Spring Bloom in the Southwestern East Sea/Japan Sea”, *Deep-Sea Res. II*, Vol. 51, 1093-1111.
- [24] Yoo, S. and Park, J., 2009, “Why is the Southwest the most Productive Region of the East Sea/Sea of Japan?”, *J. Mar. Syst.*, Vol. 78, 301-315.

Received 4 July 2016

1st Revised 16 August 2016, 2nd Revised 15 November 2016

Accepted 17 November 2016