

동해 표층수 중 영양염과 Chlorophyll *a* 의 분포 특성

윤상철¹ · 윤이용^{2,†}

¹국립수산물과학원 기후변화연구과
²가톨릭관동대학교 공과대학 보건환경학과

Distribution of Nutrients and Chlorophyll *a* in the Surface Water of the East Sea

Sang Chol Yoon¹ and Yi Yong Yoon^{2,†}

¹Fishery and Ocean Information Division, NFRDI, Busan 46083, Korea
²Department of Health & Environment, Catholic Kwandong University, Gangnung 25601, Korea

요 약

2009년 7월 3일부터 7월 27일까지 러시아 조사선 R/V Lavrentyev를 이용하여 러시아 연안으로부터 4개의 Line(D, R, E, A)을 따라 표층 30 m 수심의 시료를 26개의 정점(울릉분지와 일본분지를 포함한 동해의 전 수역)에서 채수하여 영양염 및 엽록소-*a*의 농도를 분석하였다. 냉수역보다 난수역에서 1.4배 높은 질산염을 제외한 나머지 항목들은 모두 난수역보다 냉수역에서 높게 나타났다(NH₄, PO₄ 각 1.8배, Si(OH)₄ 1.2배, 엽록소-*a* 1.9배). 암모니아와 인산염, 엽록소-*a*의 수평분포는 매우 유사한 분포를 보이며, 한류와 저층수의 용승 영향권에 있는 러시아 근해에서 최대치를 보이고, 울릉분지에서 비교적 낮은 분포를 보인다. 반면, 질산염은 대마난류수의 직접적인 영향권에 있는 울릉분지에서 최대치를 보이며, 점차 북상할수록 감소한다. N/P 비는 한류수계보다 대마난류 중층수에서 가장 높은 값을 보이며, 대마난류수는 동해로 유입되는 질산염의 주요 공급원으로 작용하고 있다. 그러나 난수역에서 인산염의 평균 농도는 0.2 μM 이하로 식물플랑크톤 성장의 제한 요인으로 작용할 수 있는 반면, 냉수역에서의 높은 농도는 엽록소-*a*와 직접적인 상관성을 보이고 있다. 해양환경에 영향을 미치는 주요인을 분석하기 위한 주성분 분석결과 주성분 I은 수온에 의해 동해의 해양환경이 주로 영향을 받으며, 주성분 II는 영양염과 엽록소-*a*가 주요인으로 작용한다. 따라서 연구해역의 해양환경은 수온에 지배되며, 그에 따라 냉수역과 온수역으로 구분되는 특성을 보였다.

Abstract – During the period between July 3 and 27 of 2009, water samples were collected from the Russian coast at a depth of 30m from 26 stations (including Ulleung and Japan basins) onboard the Russian survey vessel R/V Lavrentyev following 4 lines (D, R, E, and A). The samples were analyzed for nutrients and chlorophyll *a* contents. All parameters exhibited higher values in warm waters than in cold waters (NH₄:1.8-fold, PO₄:1.8-fold, SiO₂:1.2-fold, and chlorophyll-*a*: 1.9-fold), except nitrates, which was 1.4-fold higher in cold waters than in warm waters. The horizontal distribution of ammonia, phosphate, and chlorophyll-*a* was very similar to each other and showed the highest values in the waters near Russia, where a upwelling influence of cold current and bottom water prevails, while relatively low distribution was observed at the Ulleung Basin. On the other hand, nitrates showed the highest concentration at the Ulleung Basin, which is under the direct influence of the Tsushima warm water, and showed a gradual decrease northward. The N/P ratio showed the highest value in the Tsushima middle water, rather than in the North Korean Cold Water, the Tsushima Warm Water was the primary source of nitrate flow into the East Sea. However, the average concentration of phosphate in the warm waters was < 0.2 μM, thereby limiting phytoplankton growth, while a high concentration of phosphate in cold waters showed a direct correlation with chlorophyll-*a*. The results of principal component analysis for the identification of primary factors that influence the marine environment showed that principal component I was water temperature and principal component II was influenced chlorophyll-*a* and nutrients. Therefore, Study area has greatest influenced by water temperature, and clearly distinct cold and warm water regions were observed in the East Sea.

Key words: nutrients(영양염), chlorophyll-*a*(엽록소-*a*), the East Sea(동해), coastal upwelling(연안용승), warm region(난수역), cold region(냉수역)

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

1. 서 론

동해는 북서태평양의 연해로서 한반도, 일본열도, 시베리아 대륙으로 둘러싸인 반폐쇄성 해양이며, 수심이 얕은 4개의 해협(소야해협, 타타르해협, 쓰가루해협, 대한해협)을 통해 외해와 연결되어 있다. 또한 동해는 공간적 크기가 대양에 비해 작으나 대양과 유사한 이중 대순환(Double gyre) 형태의 상층순환이 존재하며, 다양한 해양 현상들이 일어나 축소판 해양(Miniature Ocean)으로 간주되고 있다(Ichiye[1984]). 한류수와 난류수의 영향으로 극전선(Polar front)과 소용돌이(Eddy)가 형성되며(Moon *et al.*[1998]; Park *et al.*[1998]), 용승(Upwelling)이 발생한다(Rho *et al.*[2012]). 또한 북부해역의 Vladivostok 인근해역에서는 동계동안 바람에 의한 표층의 증발 때문에 염분이 증가되어 무거워진 수괴가 저층으로 유입되면서 심층수가 형성된다(Yanagi[2002]).

동해에 유입되어 열과 염을 공급하는 주요 해류는 대한해협을 통하여 유입되는 대마난류수이며, 동해의 해황은 대마난류와 바람, 대기와의 열교환 그리고 담수유입 등의 영향을 받는다(Seung[1992]). 이 해류는 동중국해를 통과하면서 양쯔강 유출수의 영양염을 공급받고 있으나 양쯔강 하류에 산사댐이 건설됨에 따라 영양염의 공급량이 감소하여 동해의 영양염 분포에 영향을 줄 수 있음을 시사한 바 있다(Yanagi[2002]). 또한 최근 동해는 지구온난화의 영향으로 수괴의 특성이 변하고 있다(Yoon *et al.*[2007]). 전 수괴의 수온이 지난 45년 동안 상승하고 있으며, 표층수의 염분은 0.29 psu 감소하였고, 용존산소농도도 전 수괴에서 감소하는 추세로 동해고유수의 용존산소 감소는 수온 증가와 더불어 동해 해양순환 시스템의 변화를 암시하며, 연안 수산생물의 서식환경 변화를 초래할 것으로 예측하고 있다.

동해 일부 해역에서 수행된 영양염 분포의 특징은 유광층에서 질산염의 순환시간이 0.2~1.6 day로 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 요인으로 작용할 수 있으며(Chung *et al.*[1989]), 하계에는 성층이 발달하여 저층에서 표층으로 영양염의 유입이 거의 없어 고갈되지만, 저층수는 표층에서 유입되는 유기물의 재광물화 작용으로 영양염의 축적이 일어나 영양염의 농도가 증가한다(Kim *et al.*[2000]). 또한 영양염류의 공간적 분포는 물리적 인자와 생물적 인자에 의해 조절되며, 특히 동해에서의 물리적 요인은 해류 및 수괴의 혼합에 의해 결정될 수 있다.

동해에서 영양염과 엽록소-*a*에 관한 연구는 동해의 일부 해역에서 다수 수행된 바 있으나(Chung *et al.*[1989]; Moon *et al.*[1996]; Cho *et al.*[1997]; Yang *et al.*[1997]; Rho *et al.*[2012]), 동해의 서남해역 또는 중부해역의 극전선역에 국한되어 있으며, 동해 전반에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 이번 연구를 통하여 울릉분지 뿐만 아니라 동해에서 가장 큰 면적을 차지하고 있는 일본분지를 포함한 동해 북부 해역에서 영양염과 엽록소-*a*의 수평 분포를 조사하고 분포의 특성과 물리화학적 인자와의 관계를 구명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2009년 7월 3일부터 7월 27일까지 러시아 조사선 R/V Lavrentyev를 이용하여 러시아 연안으로부터 4개의 Line(D, R, E, A)을 따라 26개의 정점에서 영양염 및 엽록소-*a* 분석을 위해 표층(조사선으로부터 영향을 최소화하기 위하여 수심 30 m) 시료를 채수하여 분석하였으며(Fig. 1), 연구 해역의 수질특성을 파악하기 위해 현장에서 CTD(SBE911 plus)를 이용하여 수온과 염분 그리고 용존산소의 수직분포를 연속 관측하였다. 영양염과 엽록소-*a* 측정을 위한 시료는 Go-Flo 채수기를 미리 산세척한 후 현장에서 나일론 로프에 장착하여 사용하였으며, 시료는 현장에서 0.45 μ m membran filter로 여과한 후 냉동 보관하였다. 영양염 농도는 실온에서 해동한 후 해양환경공정시험법에 의거하여 영양염 자동분석기(QuAatro, Germany)를 이용하여 DIN(질산염+암모니아), 인산염, 규산염을 분석하였으며, 엽록소-*a*의 분석은 해수를 여과한 0.45 μ m membran filter를 90% 아세톤으로 추출하여 Turner 형광광도계(10-AU)를 이용하여 분석하였다.

3. 결 과

3.1 조사수역의 수괴, 해류 및 용존산소의 분포 특성

동해로 유입되는 해류는 쿠로시오 해류 기원의 대마난류(TWC: Tsushima Warm Current)가 대한해협을 통해 동해로 유입되고, 대마난류의 일부는 우리나라 동해 연안(EKWC: East Korean Warm Current)과 일본 서해안을 따라 북상하며 동해에 열과 염을 공급한다. 동해 북부해역에서는 시베리아 연안을 따라 저온저염의 리만한류(LCC: Liman Cold Current)가 블라디보스토크까지 남하하며, 리만한류 기원의 수괴보다는 고수온의 특성을 가진 북한한류(NKCW: North Korean Cold Current)로 남하한다. 40°N 인근에서는 북상하는 동한난류(EKWC)와 남하하는 북한한류수(NKCW: North Korean Cold Water)가 서로 다른 수괴 특성에 따라 전선을 형성하며(Choi *et al.*[1993]; Cho *et al.*[1997]; Jeon *et al.*[2012]), 이 전선의 영향으로 동한난류는 북동방향으로 사행하며 쓰가루 해협, 소야해협, 타타르 해협을 통해 북서태평양과 오호츠크해로 유출된다(Kim and Lee[2004])(Fig. 1).

동해의 수괴에 대한 연구 결과는 조사해역과 시기에 따라 다소 차이가 있으나 1999년 하계에 나타난 수괴(Kim and Lee[2004])에서는 8개의 기원해수가 존재함을 밝혔다(TSW(Tsushima Surface Water), TSCW(Tatar Surface Cold Water), NKCW(North Korean Cold Water), TMW(Tsushima Middle Water), LCW(Liman Cold Water), ESIW(East Sea Intermediate Water), ESPW(East Sea Proper Water)).

본 연구의 조사기간 동안 전 정점의 수층에서 관측된 수온과 염분의 자료로부터 T-S diagram을 작성하여 조사정점별 수괴의 물리적 특성을 분석하여 제시한 바 있다(Yoon *et al.*[2014]; Yoon and Yoon[2015]). 용존산소의 자료로부터 T-DO diagram을 작성하여 Fig. 2에 도시하였으며, 동해 해역에서 보고된 각 수괴의 물리적 특

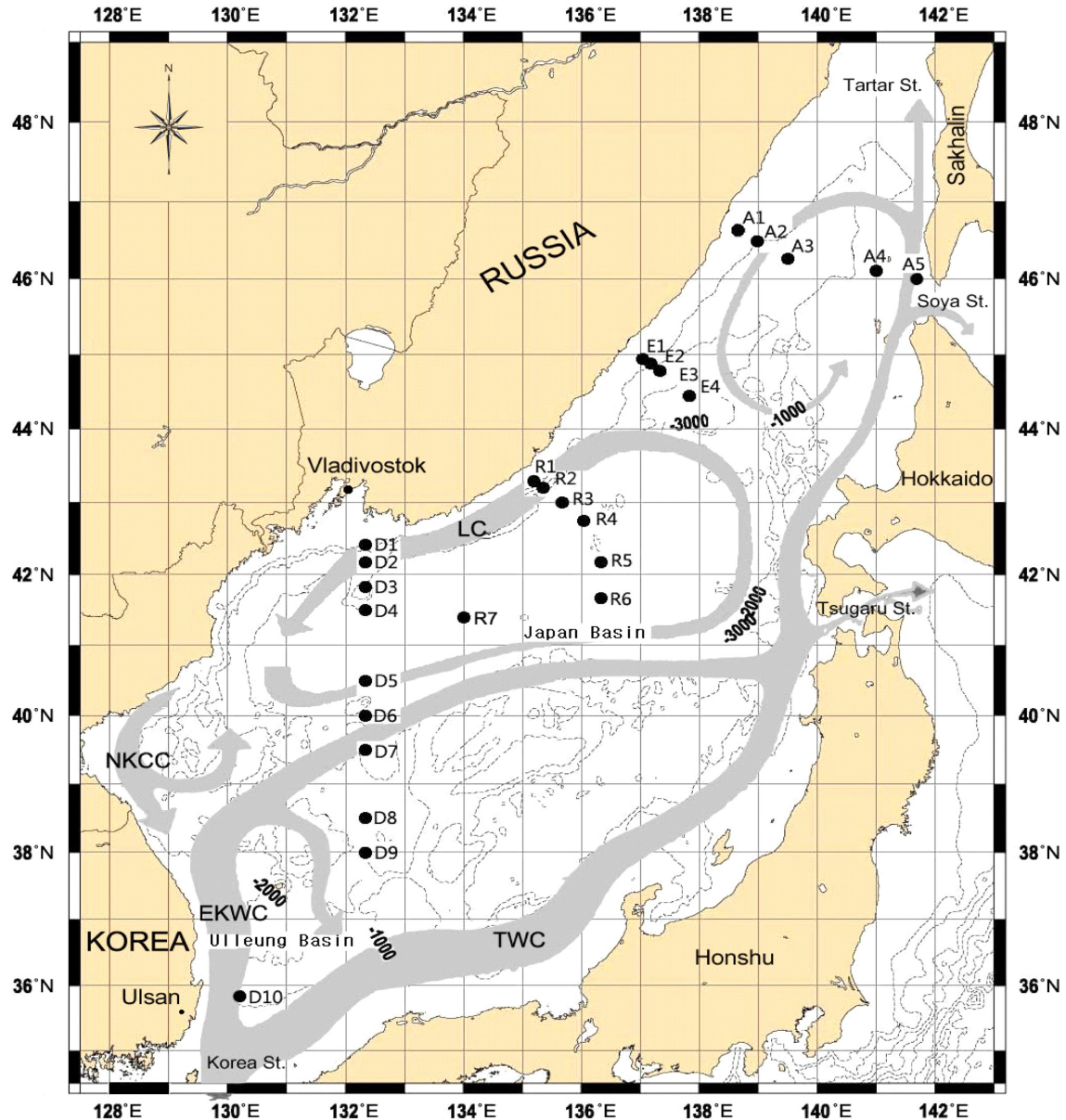


Fig. 1. Location of sampling stations and schematic map of the surface currents of the East Sea: LC: Liman Current, NKCC: North Korean Cold Current, EKWC: East Korean Warm Current, and TWC: Tsushima Warm Current (modified after Lee *et al.*[2009]).

성과 비교하여 Table 2에 나타내었다. Fig. 2에는 각 수괴의 영향권에 있는 용존산소의 분포 범위를 네모상자로 표시하였으며, 영양염과 엽록소-*a* 분석을 위하여 표층시료를 채취한 정점도 별도로 표시하였다.

본 연구를 위한 시료를 채수한 30 m 수층의 용존산소의 평면 분포를 보면(Fig. 3), 고온-저염, 낮은 용존산소의 대마난류표층수의 직접적인 영향을 받고 있는 정점 D10부터 용존산소는 점차 증가하다가 대마난류중층수의 영향권에 있는 정점 D6에서 최저치를 보이며, 전반적으로 수온과 상반된 분포 특성을 보이고 있다. 타타르 해협과 소야 해협에 인근한 A Line은 시베리아 연안과 사할린 연안 정점에서 서로 다른 용존산소의 특성을 보이고 있다. 한류의 영향

을 많이 받는 시베리아 연안에서는 난류의 영향권에 있는 사할린 연안 정점보다 용존산소가 높은 특성을 보이며, 전반적으로 온수대인 울릉분지보다 냉수대인 일본분지의 용존산소농도가 높다.

관측 Line에 따른 용존산소의 연직분포를 보면(Fig. 4), D Line에서 수심 800 m 이하의 저층과 대마난류중층수가 $3.5 \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$ 이하로 낮은 농도를 보인 반면, 냉수대 일본분지의 아표층수가 $4.5 \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$ 이상으로 높게 나타났다. D Line과 A Line의 수직 분포로부터 냉수대와 온수대에 의한 용존산소농도의 뚜렷한 차이를 보이며, A Line의 수직분포도 양쪽 해안이 다른 해류의 영향을 받고 있음을 나타낸다.

따라서 본 연구에서 사용된 표층 시료는 주로 대마난류의 지류로서

Table 1. Definition of water masses in East Sea

Water mass	Temperature (°C)	Salinity	DO (ml·L ⁻¹)	Reference
TSW (Tsushima Surface Water)	>20.00	<33.80	5.05-5.45	Yang <i>et al.</i> [1991]
	17.60-20.30	33.39-33.86	5.04-5.57	Moon <i>et al.</i> [1996]
	19.47-21.51	32.39-33.71	3.87-5.50	Cho <i>et al.</i> [1997]
	>20.00	>34.0	-	Kim and Lee[2004]
	18.40-26.00	33.45-34.30	-	Yoon <i>et al.</i> [2007]
TMW (Tsushima Middle Water)	20.32-22.48	33.31-33.77	3.60-3.81	This study
	12.00-17.00	34.30-34.50	4.30-5.00	Yang <i>et al.</i> [1991]
	10.40-17.40	34.01-34.40	4.50-5.00	Moon <i>et al.</i> [1996]
	11.01-16.63	34.28-34.50	3.64-5.31	Cho <i>et al.</i> [1997]
	-	<34.50	-	Kim and Lee[2004]
TSCW (Tatar Surface Cold Water)	12.20-17.60	34.25-34.62	-	Yoon <i>et al.</i> [2007]
	10.17-15.73	34.05-34.31	2.95-4.64	This study
	<20.00	<33.50	-	Kim and Lee[2004]
NKCW (North Korean Cold Water)	8.99-15.53	32.85-33.49	3.94-4.59	This study
	1.00-7.00	34.06-34.20	6.00-6.45	Yang <i>et al.</i> [1991]
	1.00-7.42	33.98-34.18	5.98-8.44	Cho <i>et al.</i> [1997]
	2.00-7.00	33.90-34.10	-	Kim and Lee[2004]
	1.95-7.22	33.90-34.10	-	Yoon <i>et al.</i> [2007]
LCW (Liman Cold Water)	2.00-6.81	33.90-34.09	3.94-5.79	This study
	<2.00	<34.00	>7.0	Kim and Lee[2004]
	1.40-1.53	33.97	4.33-4.77	This study
ESIW (East Sea Intermediate Water)	1.20-5.00	34.00-34.07	<6.0	Moon <i>et al.</i> [1996]
	<2.00	>34.00	-	Kim and Lee[2004]
	1.00-1.98	34.01-34.08	3.73-4.91	This study
ESPW (East Sea Proper Water)	<1.00	34.02-34.16	5.40-5.90	Yang <i>et al.</i> [1991]
	0.20-1.00	34.06	5.16-5.60	Moon <i>et al.</i> [1996]
	0.37-0.93	34.05-34.07	5.00-6.10	Cho <i>et al.</i> [1997]
	<1.00	>34.00	<4.5	Kim and Lee[2004]
	0.00-1.05	33.90-34.18	-	Yoon <i>et al.</i> [2007]
	0.08-0.99	34.05-34.07	3.06-4.70	This study

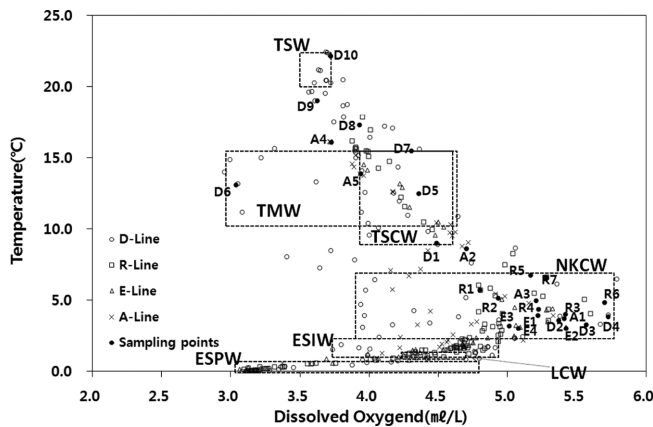


Fig. 2. T-DO diagram for all the stations on four transects in the East sea of Korea (TSW; Tsushima Surface Water, TSCW; Tatar Surface Cold Water, NKCW; North Korean Cold Water, TMW; Tsushima Middle Water, LCW; Liman Cold Water, ESIW; East Sea Intermediate Water, ESPW; East Sea Proper Water).

복상하는 대마난류표층수, 오후츠크해에서 타타르 해협을 통해 동해로 유입되는 타타르표층냉수, 리만한류수, 북한한류수의 표층수괴와 대마난류 중층수, 동해중층수의 중층수괴가 혼합된 수괴로서 정점별로 서로 다른 수괴가 상이하게 혼합된 특성을 보이고 있다.

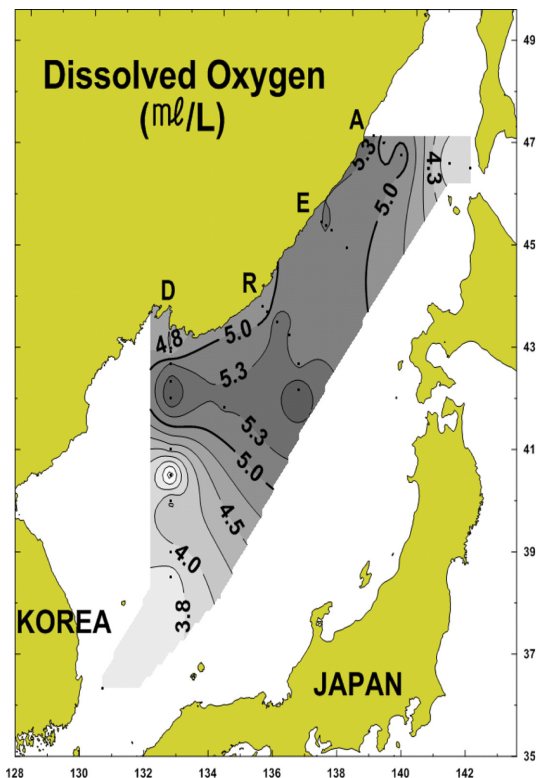


Fig. 3. Horizontal distribution of dissolved oxygen (ml·L⁻¹) at 30 m depth.

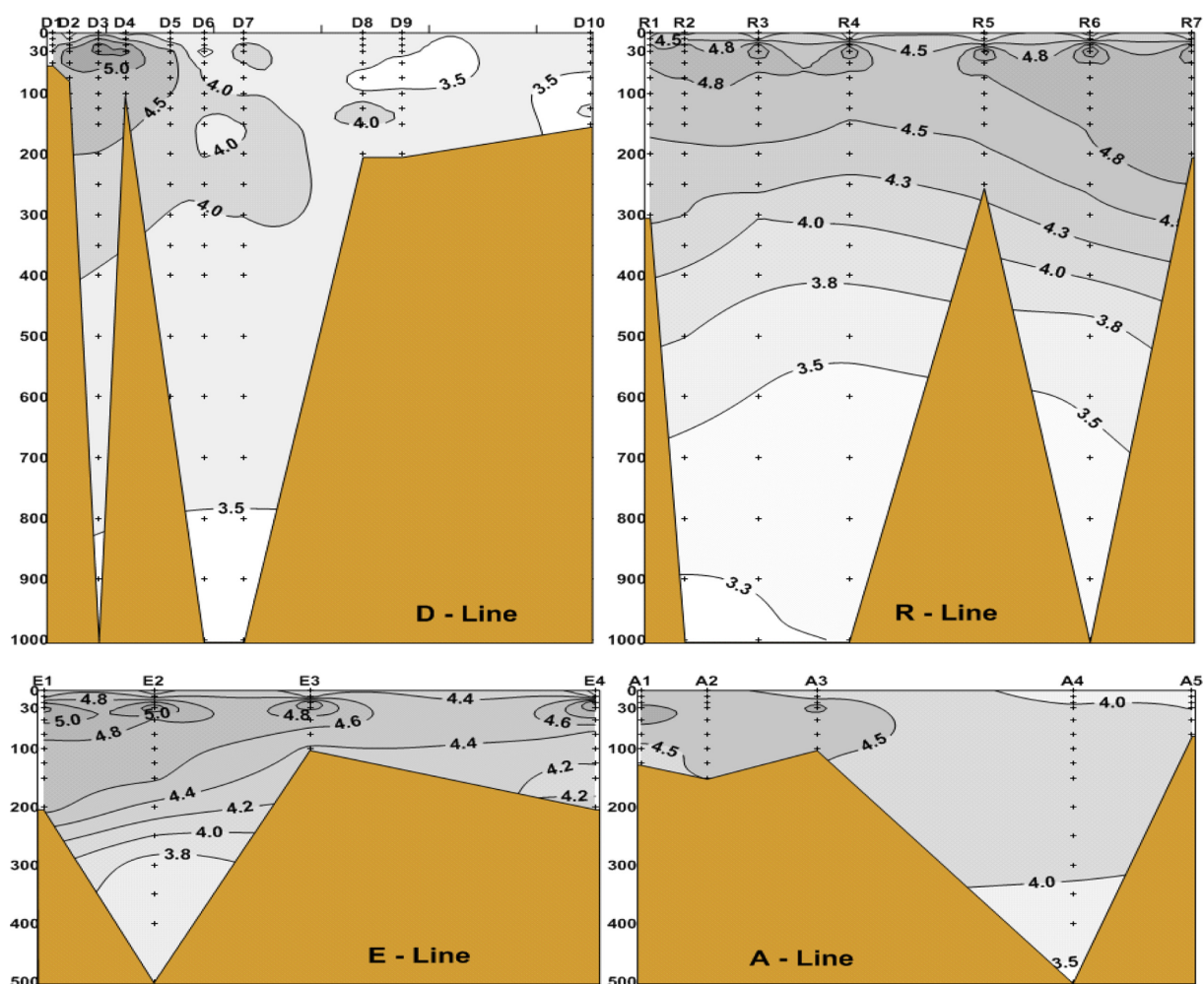


Fig. 4. Vertical distribution of dissolved oxygen ($\text{ml}\cdot\text{L}^{-1}$) at each study line.

3.2 표층에서 영양염과 엽록소-*a*의 수평분포

조사기간 동안 동해 표층수에서 조사된 영양염과 엽록소-*a*의 농도를 Table 2에 나타내었으며, 영양염의 수평분포를 Fig. 5에, 엽록소-*a*의 수평분포를 Fig. 6에 도시하였다.

일반적으로 동해를 40°N 부근에 발달하는 극전선(Polar front)을 경계로 난수역(Warm region)과 냉수역(Cold region)으로 구분하지만(Choi *et al.*[1993]; Lee *et al.*[2003]; Kim and Lee[2004]), 본 연구에서는 수온 10°C를 경계로 하여 난수역과 냉수역으로 구분하였으며, 난수역은 주로 울릉분지와 사할린 연안(D5-D10, A4, A5)에, 냉수역은 일본분지에 위치하는 수역이다.

냉수역보다 난수역에서 1.4배 높은 질산염을 제외한 나머지 항목들은 모두 난수역보다 냉수역에서 높게 나타났다(NH_4 , PO_4 각 1.8배, $\text{Si}(\text{OH})_4$ 1.2배, 엽록소-*a* 1.9배). 암모니아와 인산염, 엽록소-*a*의 수평분포는 매우 유사한 분포를 보이며, 한류의 영향권에 있는 러시아 근해에서 최대치를 보이고, 울릉분지에서 비교적 낮은 분포를 보인다(Fig. 5, 6). 반면, 질산염은 대마난류수의 직접적인 영향권에 있는 울릉분지에서 최대치를 보이며, 점차 북상할수록 감소한다. 조사가 실시된 30 m 수층은 아표층 엽록소 최대층(Subsurface chlorophyll

maximum, SCM)이 하계의 동해에서 광범위하게 관측되는 수층으로, Moon *et al.*[1998]은 냉수역에서 수온약층 부근인 주로 30~50 m 수층에서 엽록소-*a*의 최대 농도를 관측하였다. Rho *et al.*[2010]은 아표층에서 SCM이 형성되는 기작으로 대마난류중층수 등의 저층 수로부터 수온약층 상층으로 영양염 공급에 의해 유지되며, 20~50 m 수층의 질산염 농도, 7.5~10 μM 이 대마난류 중층수의 영향으로 설명하였다. 그러나 본 연구에서 대마난류 중층수는 질산염의 중요한 공급원이나 인산염과 암모니아의 공급원 역할을 하지 못하는 반면, 냉수역의 러시아 근해에서는 지형적 영향에 따라 저층수에 의한 인산염 공급과 그로 인한 엽록소-*a*의 최대치, 암모니아 농도의 최대치를 초래할 것으로 추론된다.

수괴별 영양염 농도를 비교하면 질산염은 대마난류중층수계에서 높은 농도를 보인 반면, 인산염, 암모니아, 엽록소-*a*는 한류수계에서 높은 농도를 나타내고 있다. 엽록소-*a*는 인산염의 농도가 가장 높은 북한한류수계에서 다른 수괴에 비해 약 2배 가까이 높은 분포를 보이고 있다. 규산 농도는 대마난류표층수에서 가장 낮은 반면, 대마난류 중층수에서 농도가 가장 높게 나타났다(Fig. 7).

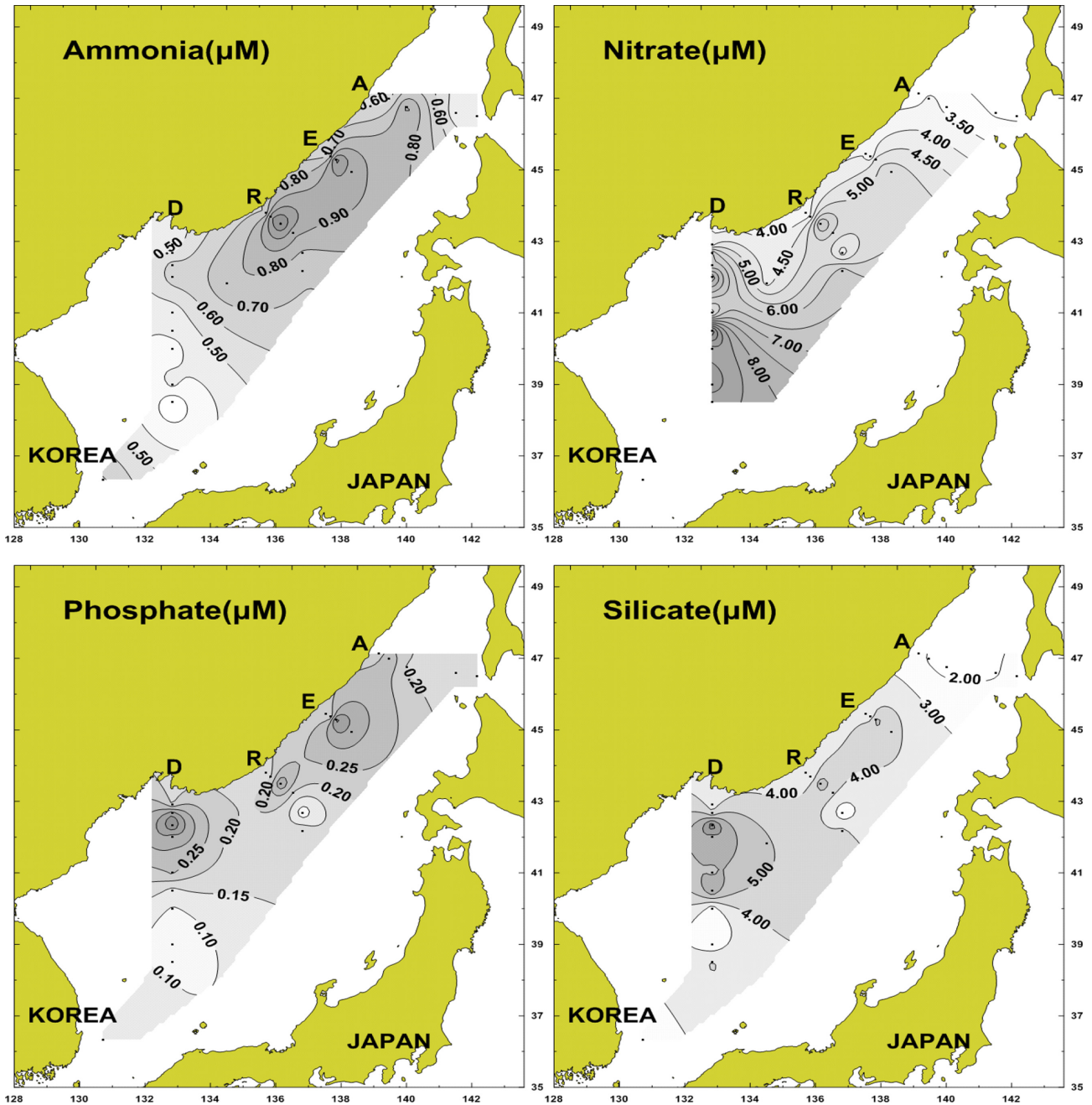


Fig. 5. Horizontal distribution of nutrients at 30 m depth.

4. 고 찰

동해에서 영양염과 엽록소-*a*에 관한 연구는 동해의 일부 해역에서 수행된 바 있으나(Chung *et al.*[1989]; Moon *et al.*[1996]; Cho *et al.*[1997]; Yang *et al.*[1997]), 동해의 서남해역 또는 중부해역의 극 전선역에 국한되어 있으며, 동해 전반에 대한 연구는 아직 미비한 실정으로 일본분지, 울릉분지를 포함한 광범위한 연구는 처음 실시되었다. 따라서 현재까지 조사된 연구의 모든 자료를 종합하여 수괴별 영양염과 엽록소-*a* 농도의 분포를 Table 3에 나타냈으며, Fig. 7에 도시하였다. 또한 수괴별 영양염의 구성비를 Fig. 8에 도시하였다.

해역에 따라 인산염의 농도를 비교하면 난수역에서는 인산염의 평균 농도가 $0.2 \mu\text{M}$ 이하로 식물플랑크톤 성장의 제한 요인으로 작용할 수 있는 수준이며(Brzezinski-Nelson[1990]; Ptacnik *et al.*[2010]), Justic *et al.*[1995]와 Wang *et al.*[2003]이 제시한 N/P, Si/P 비 기준에 의해서도 각각 22 이상을 초과하여 인산염이 제한요인으로 작용할 수도 있을 것이다(Table 3). N/P 비는 한류수계보다 대마난류중층수에서 가장 높은 값을 보이며, 대마난류수는 동해로 유입되는 질산염의 주요 공급원으로 작용하고 있다. 일반적으로 해양에서 N에 의해 식물플랑크톤의 성장이 제한되며, 동해의 일부 N/P비에 대한 연구에서도 N가 식물플랑크톤 성장의 제한 요인으로 보고된

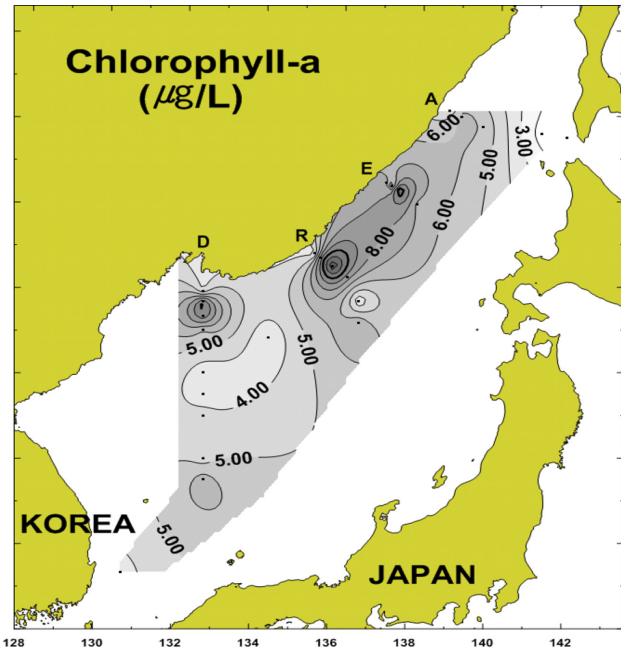


Fig. 6. Horizontal distribution of chlorophyll-*a* at 30 m depth.

바 있다(Chung *et al.*[1989]; Kwon *et al.*[2014]). Lee and Rho[2015]도 일반 해양에 비해 동해의 N/P 비가 낮으며, 동해 300 m 이심 N/P비가 12.7로서 P에 비해 N이 상대적으로 부족함을 제시하였다. 또한 Kim and Kim[2013]은 혼합층에서 N/P비는 10 이하, 200 m 이심에서 13으로 일정하게 유지되며, 향후에도 14 이하로 유지될 것이라고 예측했다. 하계 동해 중부연안 표층수에서도 본 연구와 유사한 낮은 인산염 농도(0.09~0.17 μM)가 관측되었으나 질산염의 농도도 1 μM 이하로 관측되어 질소가 제한인자로 작용할 수 있음을 시사했다(Choi *et al.*[2012]). 그러나 본 연구의 조사기간 동안에는 상대적으로 생산성이 높은 냉수역에 비해 난수역에서 높은 N/P와 Si/P비를 나타내며, 인산염도 일시적인 제한요인으로 작용할 가능성이 있음을 시사한다(Table 3). 2006년 하계 동해 연안에서 조사된 N/P비, 25는 본 연구의 결과와 유사하며, 이는 계절 변화에 따른 해양의 물리적 환경 차이로 설명하고 있다(Choi *et al.*[2010]). 이와 유사한 사례로 지중해 남동부, warm 또는 cold eddy가 발생한 해역의 표층 중심에서 식물플랑크톤의 대번식에 의한 인의 제거로 인이 제한인자로 작용할 수 있음을 제시하였다(Krom *et al.*[1991]). 동해에서 낮은 인산염의 농도는 동해로 열과 염을 공급하는 동중국해 북부해역의 인산염 농도가 최근 급격히 낮아지고 있는 현상과 연루될 수 있으며(Yoon *et*

Table 2. Nutrients and Chlorophyll-*a* in East Sea

Subareas	Station	NO ₃ (μM)	NH ₄ (μM)	PO ₄ (μM)	Si(OH) ₄ (μM)	Chl. <i>a</i> ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
Cold region	A1	3.14	0.50	0.23	2.32	4.25
	A2	3.64	0.57	0.29	1.89	6.46
	A3	3.36	0.93	0.19	1.75	5.81
	D1	4.21	0.43	0.19	3.67	3.92
	D2	6.64	0.50	0.39	4.14	10.30
	D3	6.57	0.64	0.45	8.84	9.81
	D4	8.43	0.64	0.32	6.52	5.98
	E1	4.00	0.64	0.23	3.81	7.55
	E2	3.43	0.79	0.19	3.02	4.68
	E3	4.79	1.14	0.42	5.33	11.2
	E4	5.29	0.93	0.32	4.27	6.62
	R1	3.57	0.71	0.16	3.02	3.67
	R2	4.07	1.07	0.19	3.08	8.97
	R3	6.64	1.21	0.36	5.69	13.00
	R4	5.43	0.93	0.19	4.16	8.43
	R5	4.21	0.79	0.07	2.28	3.12
	R6	6.36	0.71	0.19	4.32	6.94
	R7	4.36	0.79	0.19	5.12	3.21
	aver	4.90	0.77	0.25	4.07	6.88
Warm region	A4	2.93	0.43	0.16	1.91	1.54
	A5	2.93	0.43	0.16	2.45	1.30
	D5	5.21	0.43	0.26	5.85	3.42
	D6	10.43	0.43	0.13	7.04	3.49
	D7	8.79	0.36	0.10	2.33	4.36
	D8	9.36	0.43	0.07	2.33	4.48
	D9	8.57	0.21	0.10	4.11	6.53
	D10	-	0.71	0.13	2.37	3.63
	aver	6.89	0.43	0.14	3.55	3.59

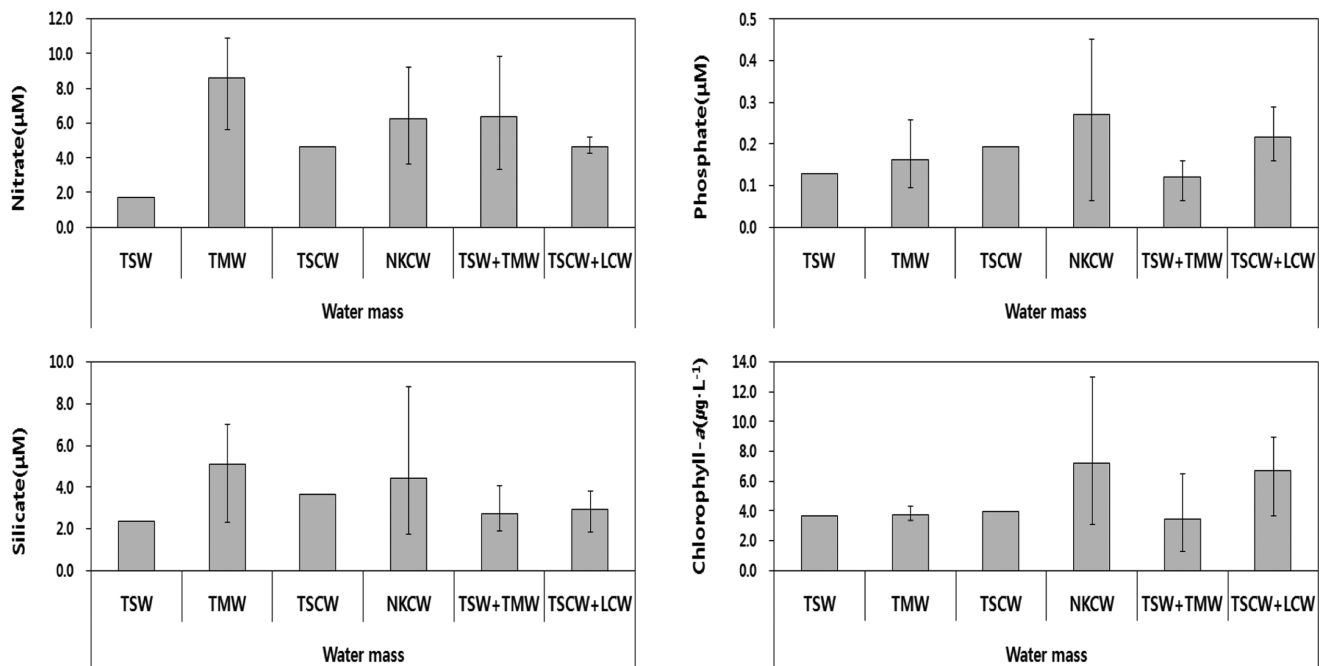


Fig. 7. Mean values of nitrate, phosphate, silicate, Chlorophyll-*a* according to water masses and stations in East Sea. DIN value of TSW was estimated by Moon *et al.* [1996].

al.[2015]), 대한해협을 통해 동해로 유입되는 해수는 하계 유광층에서 영양염이 모두 소비되어 유입되거나 빈영양 수괴인 대만난류(Taiwan Current Warm Water)가 유입되어 동해 표층의 영양염 분포에 영향을 줄 수 있다(Guo *et al.*[2006]; Lee and Rho[2015]). 최근 대기를 통해 동해로 유입되는 질소의 증가도 N/P 비 불균형에 영향을 줄 것으로 판단된다(Kim *et al.*[2011]). 이처럼 외부 유입량(외부수괴, 대기 등)이 더 많은 N에 비해 상대적으로 유입량이 적은 P가 일시적인 현상, 특히 하계 성층이 형성된 해역의 유광층을 중심으로 제거되어 나타나는 현상일 수 있을 것이다.

본 연구에서 냉수역의 주변 보다 수심이 낮고 저층수의 영향이 있는 정점(D2, D3, D4, E3, A3)은 주변 정점보다 영양염의 농도가 높게 관측되었으며(인산염 1.9배, 규산염 1.5배, 질산염 1.1배, 암모니아 1.2배, 엽록소-*a* 1.6배), N/P비는 저층수의 유입이 있는 정점은 19.0, 다른 정점은 32.1로 저층수를 통하여 질산염보다는 인산염이 상대적으로 많이 공급되며, 일차생산량의 증가를 초래한다. Si/P비도 저층수 유입이 있는 정점에서는 15.0, 그렇지 않은 정점은 19.2로 P가 상대적으로 많이 공급되고 있으며, Si/N 비는 저층수 유입이 있는 해역에서 0.8, 그렇지 않은 해역에서 0.6로 N 보다 Si의 유입량이 상대적으로 많다. 따라서 저층수로부터 P, Si, N의 순으로 많이 공급되고 있음을 알 수 있다.

조사기간 동안 전 해역에서 분석된 항목에 대한 상관관계를 분석하여 $P < 0.05$ 이하인 상관성만을 Table 4에 나타내었다. 수온은 용존산소, 암모니아, 인산염, 엽록소-*a*와 음의 상관성을 나타낸다. 이는 주로 저층의 용승과 한류의 영향권에 있는 냉수대에서 영양염이 풍부하여 식물플랑크톤의 현존량이 증가하고, 광합성으로 인한 용존산소의 농도 증가와 유기물의 직접적인 분해 산물인 암모니아의

농도 증가를 초래한다. 하계 울릉분지에서도 용승의 영향을 받는 정점의 15~40 m 수층에서 영양염의 농도가 풍부하며, 엽록소-*a*의 농도가 증가하는 현상이 관측된 바 있다(Rho *et al.*[2012]). 염분은 질산염의 농도가 비교적 높은 고염분의 대만난류수계의 영향으로 오직 질산염과 정의 상관성을 보이며, 엽록소-*a*는 모든 영양염과 정의 상관성을 보인다.

수역별로 비교하면, 동한난류의 사행에 의한 난수성 소용돌이가 형성되는 난수역(Fig. 9)에서는 냉수역보다 유의한 상관성을 보이는 항목이 적지만, 대만난류수계의 영향으로 수온과 염분의 음의 상관성이 현저하고, 엽록소-*a*와 질산염이 유의한 양의 상관성을 보인다. 냉수역에서는 육상기원과 저층수의 영향으로 수온과 염분이 음의 상관성을 보이며, 엽록소-*a*는 모든 영양염과 양의 상관성을 보인다. 특히 난수역과는 달리 인산염과 높은 상관성을 보인다.

조사 정점의 해양환경에 영향을 미치는 환경요인을 분석하기 위하여 8개의 조사 항목(수온, 염분, 용존산소, 질산염, 암모니아, 인산염, 규산염, 엽록소-*a*)에 대한 군집분석과 주성분 분석을 하였으며, 그 결과를 Table 5, 6, Fig. 10, 11에 각각 나타내었다. 군집분석 결과 각 정점은 크게 2개의 그룹으로 뚜렷이 구분되며(Fig. 10), 군집분석에 영향을 미치는 주요 환경요인을 파악하기 위해 주성분 분석을 실시하였다. 주성분 1은 72%의 설명력을 가지며 수온과 양의 상관성이 나타나고, 엽록소-*a*와 음의 상관성이 나타났다. 그룹 I은 상대적으로 높은 수온의 해역에서 엽록소-*a*가 낮은 특성을 나타내며, 그룹 II는 상대적으로 낮은 수온의 해역에서 엽록소-*a* 농도가 높은 특성으로 구분되었다. 17%의 설명력을 지닌 주성분 2는 질산염, 규산염 등 주로 영양염과 상관성이 나타났다. 특히 질산염이 높은 해역에서 엽록소-*a*의 농도는 낮은 특성을 보였고, 질산염에

Table 3. Nutrients, AOU(apparent oxygen utilization) and chlorophyll-a reported previously for water masses in East Sea. Values in parentheses are ranges

	DIN (μM)	Phosphate (μM)	Silicate (μM)	AOU (ml/L)	N/P	Si/P	Chl.- <i>a</i> (?/L)	Reference
TSW	1.74(0.41~4.27)	0.12(0.03~0.29)	2.26(0.29~4.23)	0.00(-0.36~0.95)	18.56(6.13~52.00)	21.18(3.22~65.4)	-	Moon <i>et al.</i> [1996]
	2.00(0.79~4.01)	0.25(0.05~0.61)	2.49(0.91~9.72)	0.20(-0.31~1.24)	14.56(2.00~52.40)	14.28(3.09~62.00)	-	Cho <i>et al.</i> [1997]
	0.86(0.23~1.55)	0.10(0.09~0.10)	3.07(2.15~5.22)	-	8.81(2.30~15.53)	31.38(22.52~52.20)	-	Choi <i>et al.</i> [2012]
	3.57(1.30~8.69)	0.44(0.21~0.90)	-	-	8.39(2.88~27.21)	-	-	Kwon <i>et al.</i> [2014]
	-	0.13	2.37	1.29	-	18.36	3.63	This study
TMW	12.54(10.05~16.17)	0.63(0.008~1.37)	9.39(0.31~14.13)	1.25(0.12~1.90)	29.99(9.02~129.87)	15.85(3.88~24.13)	-	Moon <i>et al.</i> [1996]
	5.33(2.48~7.65)	1.00(0.28~1.84)	11.92(2.78~27.04)	1.34(0.79~2.13)	6.02(2.19~14.25)	12.19(2.78~27.04)	-	Cho <i>et al.</i> [1997]
	0.98(0.95~1.00)	0.16(0.15~0.17)	5.40(5.00~5.80)	-	6.11(5.88~6.33)	33.73(33.33~34.12)	-	Choi <i>et al.</i> [2012]
	10.99(5.04~15.27)	0.91(0.59~1.16)	-	-	12.50(4.48~18.82)	-	-	Kwon <i>et al.</i> [2014]
	8.60(5.64~10.94)	0.16(0.10~0.26)	5.07(2.33~7.04)	1.97(1.35~2.90)	53.30(21.87~95.05)	31.45(22.67~54.55)	3.76(3.42~4.36)	This study
NKCW	8.87(1.47~14.56)	1.62(0.38~3.88)	16.55(0.96~40.18)	1.11(-1.62~1.88)	6.09(2.12~17.40)	10.96(1.68~32.96)	-	Cho <i>et al.</i> [1997]
	20.22(5.23~28.24)	1.42(0.60~1.77)	27.94(10.79~34.48)	-	13.59(8.68~16.25)	19.50(17.89~22.11)	-	Choi <i>et al.</i> [2012]
	12.65(8.45~18.93)	0.89(0.70~1.16)	-	-	14.18(10.32~18.07)	-	-	Kwon <i>et al.</i> [2014]
	6.21(3.64~9.23)	0.27(0.07~0.45)	4.44(1.75~8.84)	1.92(1.45~2.44)	22.94(14.33~78.11)	16.41(9.02~35.08)	7.18(3.12~13.00)	This study
TSCW	0.02	0.06	2.20	-	0.33	36.66	-	Kim and Lee[2004]
	4.64	0.19	3.67	1.24	23.93	18.92	3.92	This study
LCW	3.61	0.45	6.20	-	8.02	13.77	-	Kim and Lee[2004]
ESIW	17.89(10.20~29.76)	0.96(0.49~1.71)	15.64(4.90~26.06)	1.41(0.88~1.85)	19.87(8.26~40.47)	17.17(3.71~26.63)	-	Moon <i>et al.</i> [1996]
	11.44	0.91	16.80	-	12.57	18.46	-	Kim and Lee[2004]
ESPW	23.72(15.59~25.83)	1.29(1.03~1.76)	32.23(14.42~51.49)	2.56(2.15~2.96)	18.71(13.68~24.37)	25.16(12.32~36.30)	-	Moon <i>et al.</i> [1996]
	12.66(9.09~16.61)	2.63(1.47~4.16)	33.93(14.64~68.77)	2.44(1.29~3.01)	5.06(2.50~10.07)	13.63(5.40~30.98)	-	Cho <i>et al.</i> [1997]
	25.86	2.12	89.40	-	12.20	42.17	-	Kim and Lee[2004]
	33.96(22.72~41.99)	2.34(1.70~3.06)	-	-	-	-	-	Choi <i>et al.</i> [2012]
	19.87(11.24~24.62)	1.44(0.78~1.85)	54.47(33.47~96.78)	-	-	-	-	Kwon <i>et al.</i> [2014]
TSW+TMW	6.34(3.36~9.86)	0.12(0.07~0.16)	2.70(1.91~4.11)	1.75(1.54~1.92)	52.40(20.86~151.74)	22.32(11.85~42.41)	3.46(1.30~6.53)	This study
TSCW+LCW	4.63(4.29~5.22)	0.22(0.16~0.29)	2.95(1.89~3.81)	2.10(1.86~2.23)	21.26(14.80~26.90)	13.55(6.52~18.78)	6.66(3.67~8.97)	This study

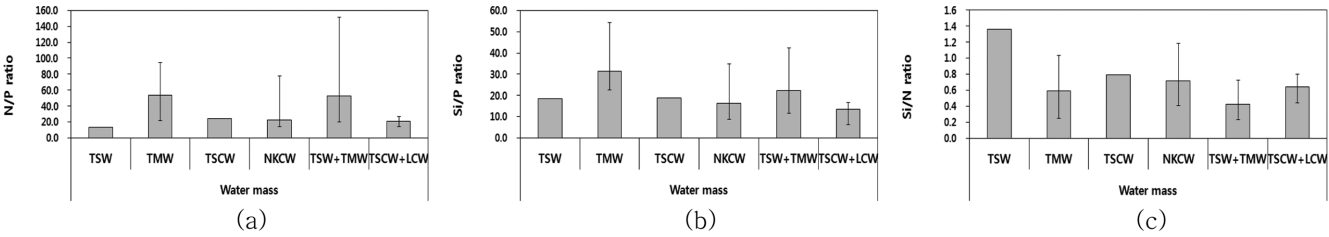


Fig. 8. Mean values of N/P(a), Si/P(b), N/P(c) ratios according to water masses and stations in East Sea. DIN value of TSW was estimated by Moon *et al.*[1996].

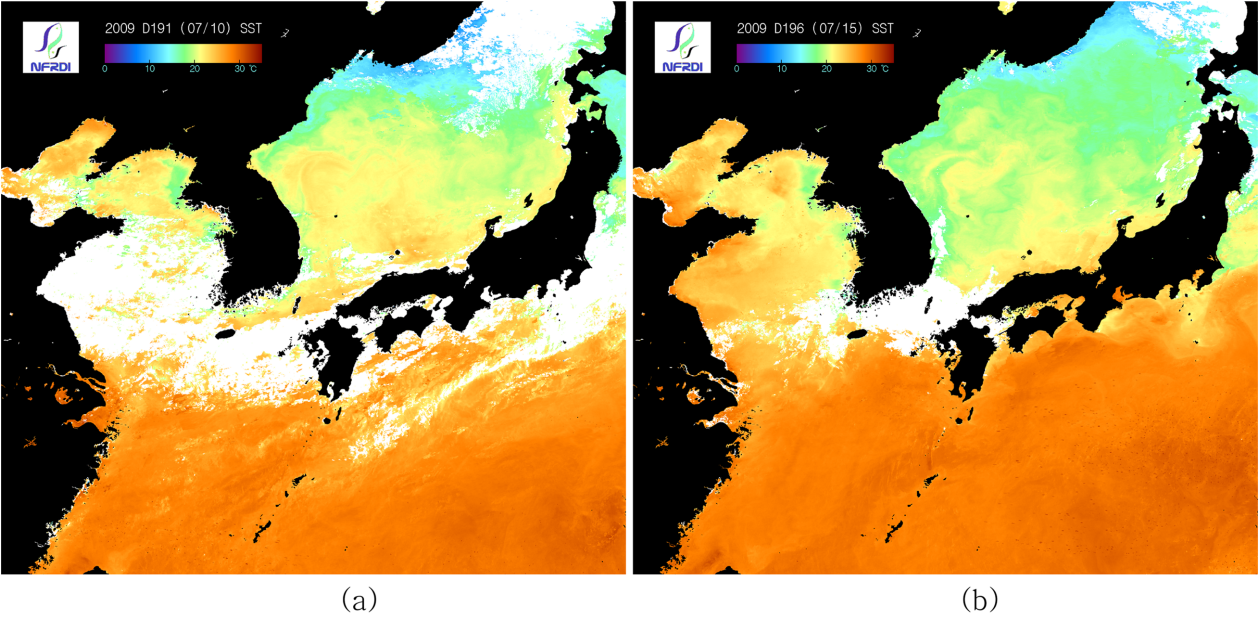


Fig. 9. SST (Surface sea temperature) of East Sea (2014.07.10. (a), 2014.07.15 (b)).

Table 4. Person's Coefficient Correlation of all parameters measured in East Sea

	Temp.	Sal.	DO	NO ₃	NH ₄	PO ₄	SiO ₂	Chl. <i>a</i>
Temp.	1	-	-0.88**	-	-0.61**	-0.63**	-	-0.54**
Sal.		1	-	0.47*	-	-	-	-
DO			1	-	0.56**	0.56**	-	0.52**
NO ₃				1	-	-	0.48*	0.72
NH ₄					1	0.40*	-	0.58**
PO ₄						1	0.58**	0.70**
SiO ₂							1	0.42*
Chl. <i>a</i>								1

P*<0.05, *P*<0.01.

Table 5. Eigenvalue and cumulative percentages corresponding to the principal components

Principal component	Eigenvalue	Proportion (%)	Cumulative (%)
1	37.58	72	72
2	8.71	17	89
3	4.09	7	96

의한 해역 구분은 명확하게 나타나지 않았다. 따라서 조사해역의 환경은 수온과 엽록소-*a*에 의해 크게 영향을 받으며, 특히 수온 10 °C를 기준으로 난수역과 냉수역으로 나누어 분석하였던 결과와 잘 일치한다.

Table 6. Eigenvectors of parameters correspond-ing to the principal components

	Eigenvectors		
	PC 1	PC 2	PC 3
Temperature	0.935	0.228	-0.236
Salinity	-0.009	0.027	0.047
DO	-0.106	-0.034	-0.011
NO ₃ -N	0.005	0.696	0.554
NH ₄ -N	-0.027	-0.007	-0.051
PO ₄ -P	-0.012	0.009	-0.012
Si(OH) ₄ -Si	-0.107	0.381	0.244
Chlorophyll <i>a</i>	-0.319	0.563	-0.757

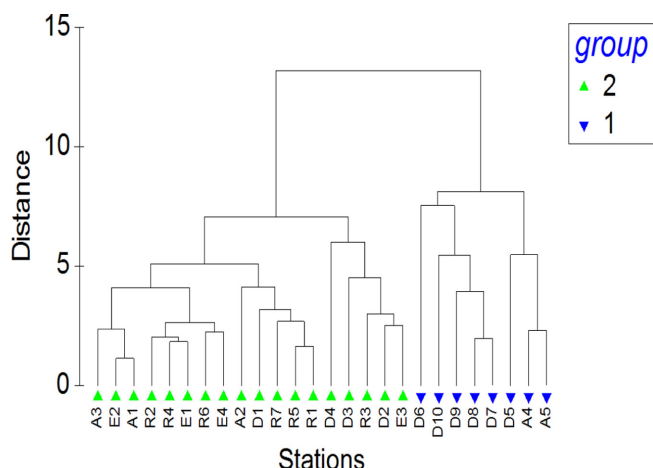


Fig. 10. Cluster analysis dendrogram of each stations based on the environmental data in the East Sea. Group I is warm and Group II is cold region.

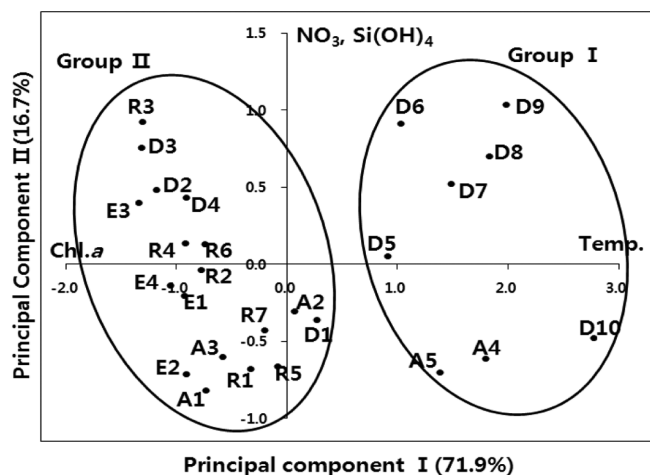


Fig. 11. Scores of sampling sites on the plane defined by the first two rotated principal components. Group I is warm and Group II is cold region.

5. 결 론

울릉분지와 일본분지를 포함한 동해의 전 수역에서 표층수 중 영양염과 엽록소-*a*의 수평분포를 조사하고 물리적인 인자와의 관계를 구명하고자 하였다. 냉수역보다 난수역에서 1.4배 높은 질산염을 제외한 나머지 항목들은 모두 난수역보다 냉수역에서 높게 나타났다 (NH_4 , PO_4 각 1.8배, Si(OH)_4 1.2배, 엽록소-*a* 1.9 배). 암모니아와 인산염, 엽록소-*a*의 수평분포는 매우 유사한 분포를 보이며, 한류와 저층수의 용승 영향권에 있는 러시아 근해에서 최대치를 보이고, 울릉분지에서 비교적 낮은 분포를 보인다. 반면, 질산염은 대마난류수의 직접적인 영향권에 있는 울릉분지에서 최대치를 보이며, 점차 북상할수록 감소한다. N/P 비는 한류수계보다 대마난류중층수에서 가장 높은 값을 보이며, 대마난류수는 동해로 유입되는 질산염의 주요 공급원으로 작용하고 있다. 그러나 난수역에서 인산염의 평균 농도는 $0.2 \mu\text{M}$ 이하로 식물플랑크톤 성장의 제한 요인으로 작용할

수 있으며, 냉수역에서의 높은 농도는 엽록소-*a*와 직접적인 상관성을 보이고 있다.

후 기

본 논문을 세밀하게 검토해주신 심사자들에게 감사드립니다. 본 연구는 East Asian Seas Time series-I (EAST-I)사업과 가톨릭관동대학교 학술연구비, 2016년도 국립수산물관리원 한국근해 해양변동 모니터링 및 생태계 연구(R2016050) 지원으로 수행된 연구 결과임을 밝히며, EAST-I 공동조사에 도움을 주신 모든 분들에게 감사드립니다.

References

- [1] Benitez-Nelson, C.R., 2000, "The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems", *Earth-Sci. Reviews*, Vol. 51, 109-135.
- [2] Cho, H.J., Moon, C.H., Yang, H.S., Kang, W.B. and Lee, K.W., 1997, "Regeneration processes of nutrients in the polar front area of the East Sea", *J. Kor. Fish. Soc.*, Vol. 30, No. 3, 393-407.
- [3] Choi, Y.-K., Jeong, H.-D. and Kwon, K.-Y., 2010, "Water distribution at the east coast of Korea in 2006", *J. Environ. Sci.*, Vol. 19, No. 4, 399-406.
- [4] Choi, Y.K., Yang, S.K., Cho, K.D., Lee, J.C. and Hong, C.H., 1993, "Possible Formation Area of the Japan Sea Proper Water I. Subareas by the Polar Front", *J. Kor. Environ. Sci. Soc.*, Vol. 2, No. 1, 27-42.
- [5] 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 Korea East Sea in 2009", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, Vol. 15, No. 2, 76-88.
- [6] Chung, C.S., Shim, J.H., Park, Y.C. and Park, S.G., 1989, "Primary productivity and nitrogenous nutrient dynamics in the East Sea of Korea", *J. Oceanolog. Soc.*, Vol. 24, No. 1, 52-61.
- [7] Guo, X., Miyazawa, Y. and Yamagata, T., 2006, "The Kuroshio onshore intrusion along the shelf break of the East China Sea: The origin of the Tsushima Warm Current", *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 36, No. 12, 2205-2231.
- [8] Ichiye, T., 1984, "Some problem of circulation and hydrography of the Japan Sea and Tsushima current. In: *Ocean hydrography of the Japan Sea and China Seas*, edited by Ichiye, T.", Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 15-54.
- [9] Jeon, H.D., Rho, T.K. and Lee, T.S., 2012, "Spatial distribution of transparent exopolymer particles (TEP) and their relation to carbon species in the euphotic layer of the Northern East Sea", *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol. 17, No. 2, 33-44.
- [10] 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", *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 40, 339-356.

- [11] Kim, I.N. and Lee, T.S., 2004, "Summer Hydrographic Features of the East Sea Analyzed by the optimum multiparameter method", *Ocean and Polar Res.*, Vol. 26, No. 4, 581-594.
- [12] Kim, K.H., Hyun, J.H., Lee, J.H., Shin, K.S., Pae, S.J., Yoo, S.J. and Chung, C.S., 2000, "Springtime distribution of inorganic nutrients in the Yellow Sea: Its relation of water masses", *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol. 5, No. 3, 224-232.
- [13] Kim T.-H. and Kim, G., 2013, "Changes in seawater N:P ratios in the northwestern Pacific Ocean in response to increasing atmospheric N deposition: Results from the East (Japan) Sea", *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 58, No. 6, 1907-1914.
- [14] Kim, T.-W., Lee, K., Najjar, R.G., Jeong, H.-D. and Jeong, H.J., 2011, "Increasing N abundance in the northwestern Pacific Ocean due to atmospheric nitrogen deposition", *Science*, 334: 505-9, doi 10.1126/science. 1206583.
- [15] Krom, M.D., Brenner, S. and Gordon, L.I., 1991, "Phosphorus limitation of primary productivity in the eastern Mediterranean sea", *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 36, No. 3, 424-432.
- [16] Kwon, H.K., Oh, S.J., Park, M.O. and Yang, H.S., 2014, "Distribution of water masses and distribution characteristics of dissolved inorganic and organic nutrients in the southern part of the East Sea of Korea: Focus on the observed data in september, 2011", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, Vol. 17, No. 2, 90-103.
- [17] Lee, C.I., Cho, K.D. and Choi, Y.K., 2003, "Spatial variation of the polar front in relation to the Tsushima Warm Current in the East Sea", *J. Environ. Sci.*, Vol. 12, No. 9, 943-948.
- [18] Lee, J.Y., Kang, D.J., Kim, I.N., Rho, T.K. and Lee, T.S., 2009, "Spatial and temporal variability in the pelagic ecosystem of the East Sea (Sea of Japan): A review", *J. Mar. Syst.*, 78, 288-300.
- [19] Lee, T. and Rho, T.K., 2015, "Seawater N/P ratio of the East Sea", *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol. 20, No. 4, 199-205.
- [20] Moon, C.H., Yang, H.S. and Lee, K.W., 1996, "Regeneration processes of nutrients in the polar front area of the East Sea", *J. Korean Fish. Soc.*, Vol. 29, No. 4, 503-526.
- [21] Moon, C.H., Yang, S.R., Yang, H.S., Cho, H.J., Lee, S.Y. and Kim, S.Y., 1998, "Regeneration processes of nutrients in the polar front area of the East Sea", *J. Korean Fish. Soc.*, Vol. 31, No. 2, 259-266.
- [22] Park, C., Lee, C.R. and Kim, J.C., 1998, "Zooplankton community in the front zone of the East Sea (the Sea of Japan), Korea : 2. Relationship between abundance distribution and seawater temperature", *J. Korean Fish. Soc.*, Vol. 31, No. 5, 749-759.
- [23] 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.
- [24] Rho, T.K., Kim, Y.B., Park, J.I., Lee, Y.W., Im, D.H., Kang, D.J., Lee, T.S., Yoon, S.T., Kim, T.H., Kwak, J.H., Park, H.J., Jeong, M.K., Chang, K.I., Kang, C.K., Suh, H.L., Park, M.W., Lee, H.J. and Kim, K.R., 2010, "Plankton community response to physico-chemical forcing in the Ulleung basin, East Sea during summer 2008", *Ocean and Polar Res.*, Vol. 32, No. 3, 269-289.
- [25] 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. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol. 17, No. 2, 45-58.
- [26] Rho, T., Lee, T., Kim, G., Chang, K.-I., Na, T. and Kim, K.-R., 2012, "Prevailing subsurface chlorophyll maximum (SCM) layer in the East Sea and its relation to the physico-chemical properties of water masses", *Ocean and Polar Res.*, Vol. 34, No. 4, 413-430.
- [27] Seung, Y.H., 1992, "Water masses and circulations around Korean Peninsula", *J. Oceanol. Fish. Soc.*, Vol. 27, No. 4, 324-331.
- [28] Wang, B.D., Wang, X.L., and Zhan, R., 2003, "Nutrient conditions in the Yellow Sea and the East China Sea", *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 58, 127-1363.
- [29] 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.
- [30] Yang, J.S., 1997, "Vertical distributions of dissolved Cu and Ni in the central East Sea", *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol. 2, No. 2, 117-124.
- [31] Yanagi, T., 2002, "Water, salt, phosphorus and nitrogen budgets of the Japan Sea", *J. Oceanogr.*, Vol. 58, 797-804.
- [32] Yoon, S.C. and Yoon, Y.Y., 2015, "Distributions of dissolved Pb and Cd in the surface water of East Sea, Korea", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, Vol. 18, No. 2, 64-73.
- [33] Yoon, S.C., Yoon, Y.Y. and Suh, Y.S., 2014, "Dissolved copper and nickel in the surface water of East Sea, Korea", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, Vol. 17, No. 4, 257-267.
- [34] Yoon, S.C., Yoon, S.H., Whang, J.D., Suh, Y.S. and Yoon, Y.Y., 2015, "Long-term variation in ocean environmental conditions of the northern East China Sea", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, Vol. 18, No. 3, 189-206.
- [35] Yoon, Y.Y., Chong, S.J. and Yoon, S.C., 2007, "Characteristics and long term variation trend of water mass in offshore of the east coast of Korea", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, Vol. 10, No. 1, 59-65.

Received 15 September 2015

1st Revised 30 October 2015, 2nd Revised 12 April 2016

Accepted 21 April 2016