

동해 남부 해역의 수괴 분포와 용존 무기 및 유기 영양염의 분포 특성: 2011년 9월 관측자료를 중심으로

권형규¹ · 오석진² · 박미옥² · 양한섭^{2,†}

¹부경대학교 해양과학공동연구소

²부경대학교 해양학과

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

Hyeong Kyu Kwon¹, Seok Jin Oh², Mi Ok Park² and Han-Soeb Yang^{2,†}

¹Korea Inter-University Institute of Ocean Science, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

²Department of Oceanography, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

요 약

2011년 9월에 동해의 수괴 분포와 용존 무기 및 유기 영양염의 분포 특성을 파악하였다. 수온, 염분, 용존산소의 분포를 통하여 연구해역의 수괴 기원은 WM(water mass)-I, WM-II, WM-III, WM-IV 등 4개의 대표적인 수괴로 구분되었으며, 그 성격은 각각 대마난류표층수, 대마난류중층수, 북한한류수, 동해고유수와 유사하였다. 용존 영양염의 경우, 용존 무기 질소(DIN; dissolved inorganic nitrogen)와 용존 무기 인(DIP; dissolved inorganic phosphorus)은 WM-IV에서 가장 높았으며, WM-III, WM-II, WM-I 순으로 나타났다. 반면에 용존 유기 질소(DON; dissolved organic nitrogen)와 용존 유기 인(DOP; dissolved organic phosphorus)은 무기 영양염과 상반되는 분포를 보였다. 연구해역에서 수괴 전체에 대한 DIN : DIP 비는 약 15.8로 Redfield ratio(16)에 근접한 수치를 보이고 있으나, 혼합층의 경우 5.3으로 무기질소가 식물플랑크톤 성장의 제한 요인으로 작용할 수 있는 것으로 보였다. 하지만 무기 질소가 제한된 혼합층에서 DON은 용존 총 질소(DTN; dissolved total nitrogen) 중 약 70%를 구성하였다. 따라서 풍부한 DON은 동해에서 식물플랑크톤의 성장을 위한 중요한 영양염 공급원으로 판단된다.

Abstract – Distribution characteristics of water masses, dissolved inorganic and organic nutrients were investigated in the southern part of the East Sea of Korea in September, 2011. On the basis of the vertical profiles of temperature, salinity and dissolved oxygen, water masses in the study area were divided into 4 major groups, such as WM (water mass)-I, WM-II, WM-III, WM-IV. Their characteristics were similar to Tsushima Surface Water (TSW), Tsushima Middle Water (TMW), North Korea Cold Water (NKCW) and East Sea Proper Water (ESPW), respectively. In the vertical profiles of dissolved nutrients, dissolved inorganic nitrogen (DIN) and dissolved inorganic phosphorus (DIP) concentrations were highest in the WM-IV, followed by WM-III, WM-II, WM-I. On the contrary, distribution of dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic phosphorus (DOP) were highest in the WM-I, followed by WM-II, WM-III, WM-IV. Although the DIN : DIP ratio in all of the water masses was similar to Redfield ratio(16), the DIN : DIP ratio in mixed layer was about 5.3, indicating that inorganic nitrogen is the limiting factor for the growth of phytoplankton. However, the DON proportion in dissolved total nitrogen (DTN) was about 70% in the mixed layer where inorganic nitrogen is limiting factor. Thus, enriched DON may play an important source of the nutrient for the growth of phytoplankton in the East Sea.

Keywords: East Sea(동해), Water mass(수괴), Dissolved inorganic nitrogen(용존 무기 질소), Dissolved inorganic phosphorus(용존 무기 인), Dissolved organic nitrogen(용존 유기 질소), Dissolved organic phosphorus(용존 유기 인)

†Corresponding author: hsyang@pknu.ac.kr

1. 서론

해양에서 식물플랑크톤의 성장을 조절하는 주요 인자는 수온, 염분, 빛, 영양염, 동물플랑크톤에 의한 섭식 및 수괴의 안정도 등이 있다. 특히, 이중에서 영양염 농도와 구성비가 중요한 역할을 한다고 보고되었다(Lehman *et al.*[1975]; Tilman[1982]; Arrigo[2004]). 해수 중의 영양염은 식물플랑크톤에 흡수·동화 되어 먹이 사슬을 통해 상위영양 단계로 이동되며, 생존에 필요한 물질이나 조건들이 충족되지 않은 성분에 따라 성장이 제한되는 Liebig's 최소량의 법칙(Lehman *et al.*[1975])에 따라 종 경쟁(species competition) 및 종 천이(species succession)에 영향을 준다. 또한 영양염 제한이 식물플랑크톤의 일차생산력뿐만 아니라 군집구조에도 영향을 미치며, 영양염의 절대적인 농도보다도 영양염의 구성비에 따라서 식물플랑크톤 종조성에 영향을 미치기도 한다(Tilman[1982]). 최근에는 식물플랑크톤 중에 따른 영양염 비에 대한 특이성이 보고되기도 하였다(Arrigo[2004]).

해수 중 영양염은 용존 무기 영양염과 용존 유기 영양염으로 구분되며, 전자는 용존 무기 질소(DIN; dissolved inorganic nitrogen)와 용존 무기 인(DIP; dissolved inorganic phosphorus)과 같은 제한 영양염이며, 후자는 여러 가지 분자량을 가지는 화합물이다. 해양에서 영양염의 pool로서 용존 유기 질소(DON; dissolved organic nitrogen)와 용존 유기 인(DOP; dissolved organic phosphorus)의 중요성이 강조되어 왔지만(Jackson and Williams[1985]; Orrett and Karl[1987]), 식물플랑크톤의 영양염 공급원으로 용존 유기 영양염에 대한 고려가 간과되어 왔다. 하지만 일부 외양역의 표층수 중 DON은 용존 총 질소(DTN; dissolved total nitrogen)의 89%(Berman and Bronk[2003]), DOP의 경우 용존 총 인(DTP; dissolved total phosphorus)의 75%(Benitez-Nelson[2000])의 성분비를 보여 오히려 용존 무기 영양염에 비해서 높은 함량을 보이기도 한다. 특히, 일부 식물플랑크톤은 성장을 위해서 용존 무기 영양염이 제한된 환경에서도 DON과 DOP를 영양염 공급원으로 이용할 수 있는 것이 밝혀졌다(Oh *et al.*[2010]; Kwon *et al.*[2013]). 따라서 해수중의 DIN과 DIP는 종종 기초생산에 제한을 주기 때문에 DON과 DOP는 식물플랑크톤의 성장에 중요한 영양염 공급원일 가능성이 있다. 실제, 빈 영양상태의 해역에서 식하는 식물플랑크톤은 용존 유기 영양염이 매우 중요한 영양염의 공급원으로 알려져 있다(Jackson and Williams[1985]).

한편, 동해는 북서태평양의 연해로서 지중해적인 성격을 지니고, 한반도, 일본열도, 시베리아 대륙으로 둘러싸인 반 폐쇄성 해양이다. 동해는 공간적인 크기가 대양에 비해 작으나 대양과 유사한 물리·화학적 특성들과 현상들이 일어나 대양의 축소판으로 불리어진다(Kim and Kim[1996]). 동해의 북쪽에서 리만해류와 북한한류와 같은 저온·저염의 해류가 남쪽으로 흐르고, 남쪽에서는 고온·고염의 쿠로시오의 분지류인 대마난류가 북쪽으로 흐르고 있으며 이 두 해류가 만나 아한대극전선(subpolar front)을 형성하여 생물생산이 높아 좋은 어장이 형성되기도 한다(Kim *et al.*[2010]). 또한, 동해에서는 겨울철 북부에서 표층수의 침강에 의한 심층수가 형성되

며(Gamo and Horibe[1983]), 동남부 연안에서는 여름철에 연안용승(coastal upwelling)이 일어나고 있으며(Byun[1989]), 난류와 한류가 만나는 전선대에서는 eddy가 형성(Chang[2004])되는 등 매우 다양한 물리적 특성을 보이고 있다.

이러한 다양한 물리적 변화를 보이는 동해의 DIN : DIP 비가 약 13으로 Redfield ratio(16)보다 다소 낮아 질소가 제한된 해역으로 보고된바 있다(Talley *et al.*[2004]). 또한 혼합층에서 DIN의 농도는 2 μM이하로 매우 낮은 농도를 보이며, DIN : DIP 비 역시 10 이하로 질소가 상당히 제한된 환경으로 보고되었다(Kim *et al.*[2010]; Kim and Kim[2013]). 그럼에도 불구하고 동해는 일차생산력이 높은 해역으로 보고되어 있지만(Jenkins[2008]; Kwak[2009]), 무기 질소가 부족한 환경에서 어떻게 높은 일차생산을 보이는지에 대한 이해가 필요하다. 따라서 본 연구는 이러한 이해를 돕고자 2011년 9월 동해에서 수온, 염분, 용존산소를 바탕으로 수괴 분포와 함께 용존 무기 및 유기 영양염의 공간적인 분포를 파악하고, 용존 무기 영양염의 제한 하에서 용존 유기 영양염의 중요성을 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구는 부경대학교 탐사선인 탐양호(R/V Tamyang)를 이용하여, 동해 남부해역에서 2011년 9월 26일부터 28일까지 A(7개 정점)와 B line(8개 정점)를 대상으로 관측을 실시하였다(Fig. 1). 수온과 염분은 CTD(SBE 911 plus, Sea-Bird Electronics Inc.), 용존 산소(DO; dissolved oxygen)는 CTD에 부착된 용존산소센서(SBE 43, Sea-Bird Electronics Inc.)로 500 m까지 측정하였으며, A line의 정점 6과 7에서 Winkler-Azid화 나트륨변법으로 병행 측정하여 보

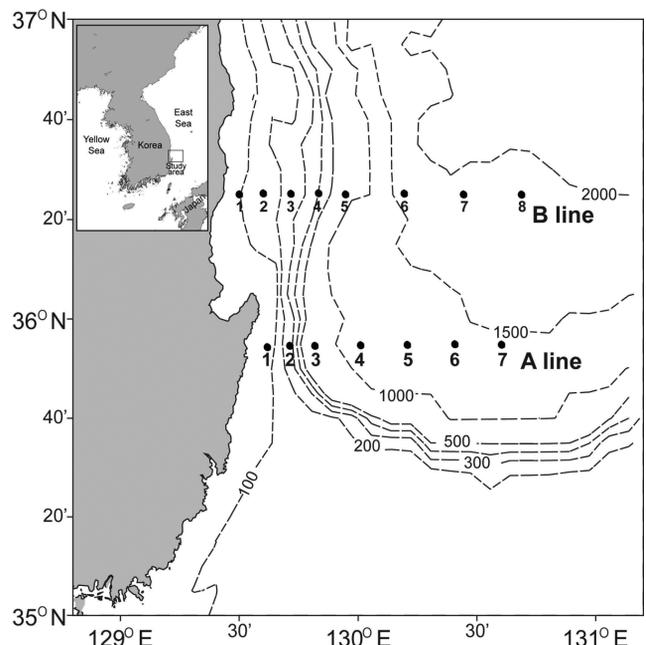


Fig. 1. Map of the study area showing locations of sampling station in the southern part of the East Sea of Korea.

정하였다. 용존 무기 및 유기 영양염 분석을 위한 시료는 각 조사 정점에서 다통채수기(Rosette sampler)를 이용하여 정점별 최대수심을 고려하여 10개 수층(표층, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 200, 300, 500 m)에서 채수하였으며, 채수된 시료는 선상에서 즉시 유리 섬유 여과지(GF/F filter, Ø 47 mm, pore size 0.7 µm, Whatman)를 이용하여 식물플랑크톤 세포가 파괴되지 않는 30 mm Hg 이하의 낮은 압력 하에서 진공여과한 후 10% CuSO₄를 첨가하여 분석 전까지 냉동보관(< -20 °C)하였다.

용존 무기 영양염인 암모니아(NH₄-N; ammonium), 아질산염(NO₂-N; nitrite), 질산염(NO₃-N; nitrate) 그리고 인산염(PO₄-P; phosphate)은 해양환경공정시험기준(MLTM[2010])에 의거하여 영양염 자동 분석기(Bran+Luebbe, TRACCS 2000, Germany)를 이용하여 측정하였다. 용존 무기 영양염 중 PO₄-P은 용존 무기 인(DIP; dissolved inorganic phosphorus)로 고려하였으며, 용존 무기 질소(DIN; dissolved inorganic nitrogen)는 NH₄-N, NO₂-N 그리고 NO₃-N의 합으로 하였다. 그리고 용존 유기 영양염을 분석하기 위해서 용존 총 질소(DTN; dissolved total nitrogen)와 용존 총 인(DTP; dissolved total phosphorus)을 산화제 과황산칼륨(K₂S₂O₈)을 이용한 고온촉매산화법(high-temperature catalytic oxidation)을 바

탕으로 분석하였다(Grasshoff *et al.*[1999]). 즉, 해수시료에 산화제인 K₂S₂O₈을 첨가하여 가압분해(2 atm, 120 °C, 30 min) 하였으며, 최종 산화된 NO₃-N와 DIP를 해양환경공정시험기준(MLTM[2010])에 의거하여 분석하였다. DON과 DOP는 각각 DTN과 DTP에서 DIN과 DIP를 뺀 값이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수괴분포 특성

A line의 표층수온은 21.86~23.26 °C로 대체적으로 외양으로 갈수록 높아지는 수온구조를 보였다(Fig. 2). 혼합층은 연안정점(A1~A3)에서는 10~20 m에서 형성되어 있으며, A4부터 외양으로 갈수록 수심이 증가하여 50 m까지 깊어졌다. 그리고 수온약층 또한 혼합층과 유사하게 외양으로 갈수록 점차 깊어지는 양상을 보였다. 또한 동해고유수로 보이는 1 °C 이하는 300 m 이심에서 나타났다. 염분의 경우 표층의 연안정점(A1~A4)에서 32.8 psu 이하의 저염분을 보이지만 외양으로 갈수록 점차 증가하여 34.2 psu 이상의 고염분을 보이며 그 수심은 증가하였다(Fig. 2). 또한 수심이 깊어질수록 염분은 증가하여 200 m 이심에서는 34.0 psu로 균일하였다.

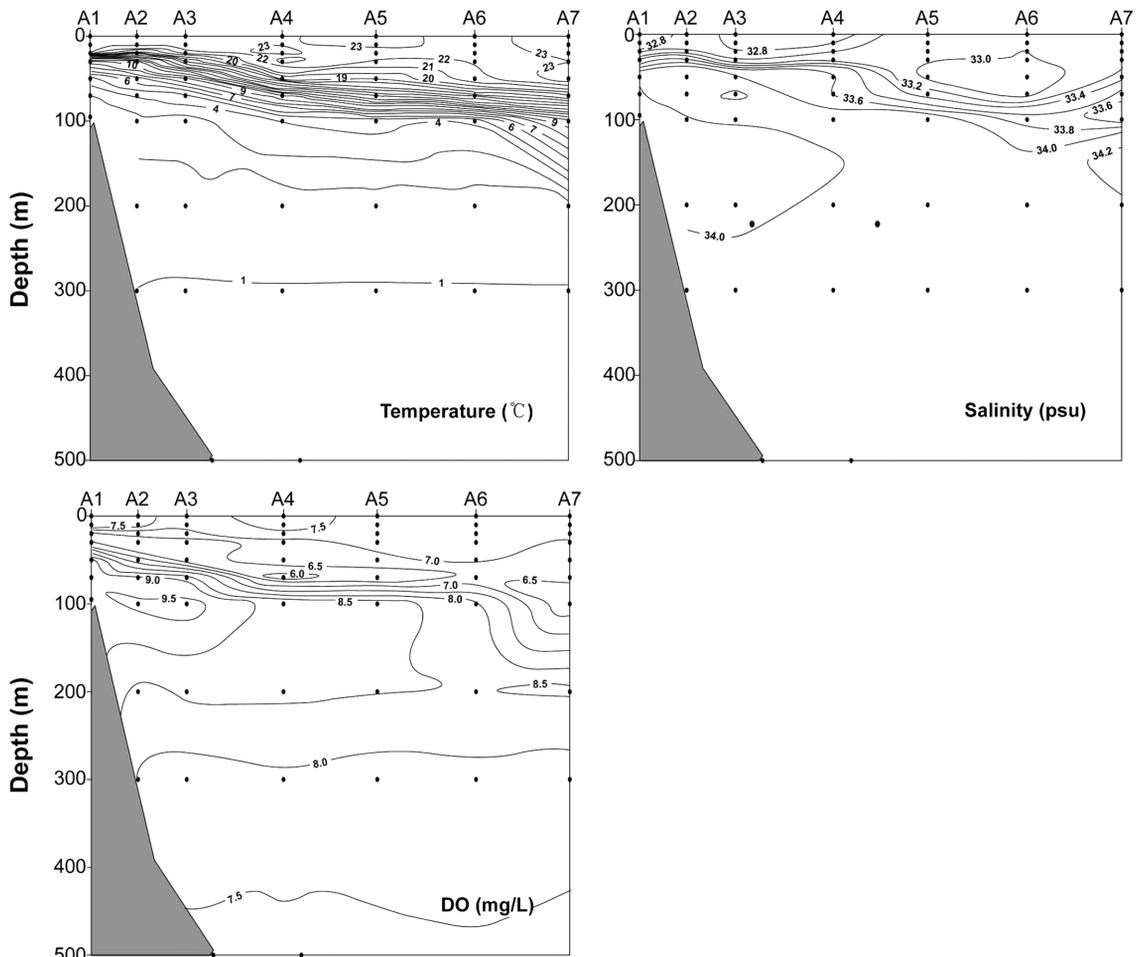


Fig. 2. Vertical cross sections of temperature, salinity and dissolved oxygen (DO) along the A line.

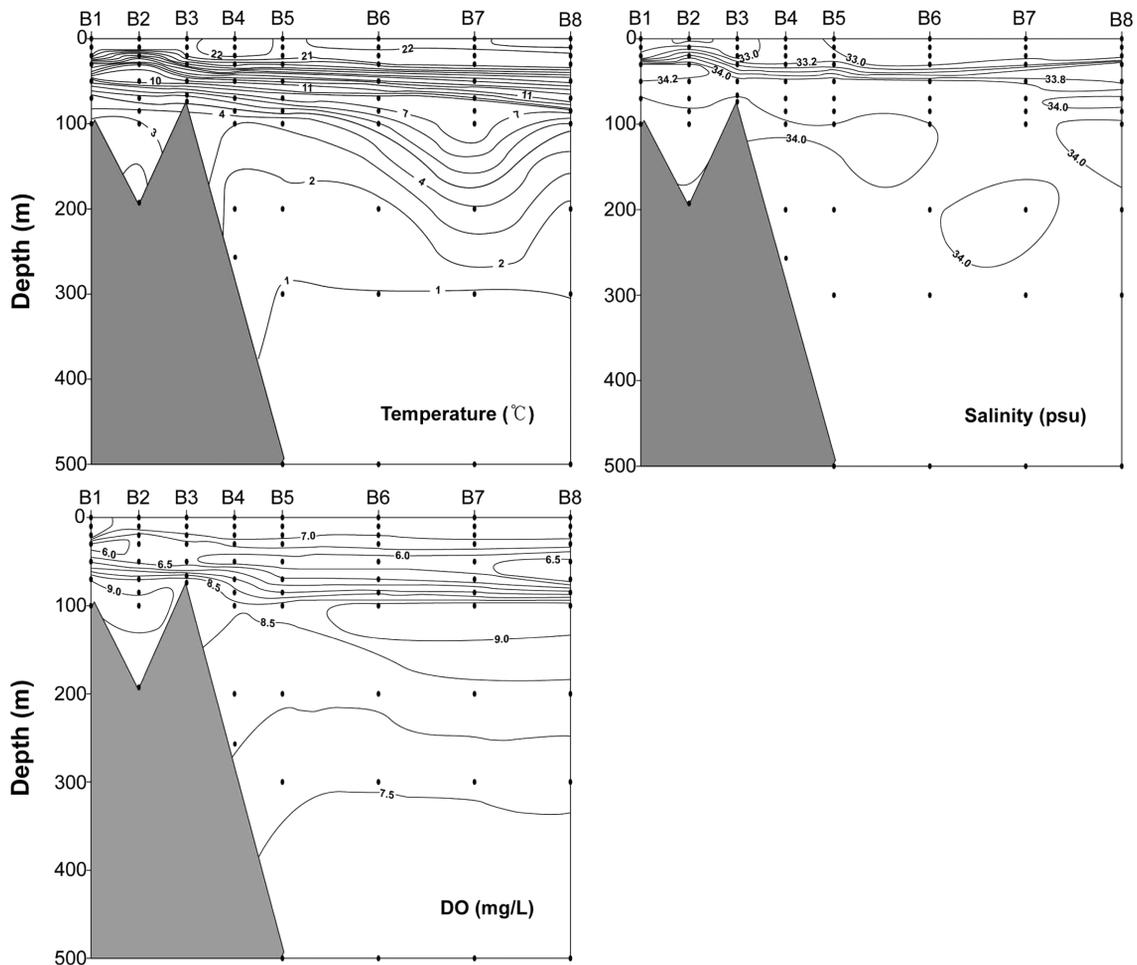


Fig. 3. Vertical cross sections of temperature, salinity and dissolved oxygen (DO) along the B line.

DO는 표층에서 7.0 mg/L 이상의 분포양상을 보였으며, 수심이 깊어질수록 감소하였다(Fig. 2). 특히, 연안정점에서 20~50 m 수심에서 6.5 mg/L 이하로 산소 극소층이 관찰되었으며, 외양으로 갈수록 그 수심이 점차 깊어지고 있었다. 또한 A1~A3의 100 m 수심 부근에서는 9.5 mg/L 이상으로 높은 DO를 보였다. 이후 300 m 이심에서는 8.0 mg/L 이하의 분포양상을 보였다.

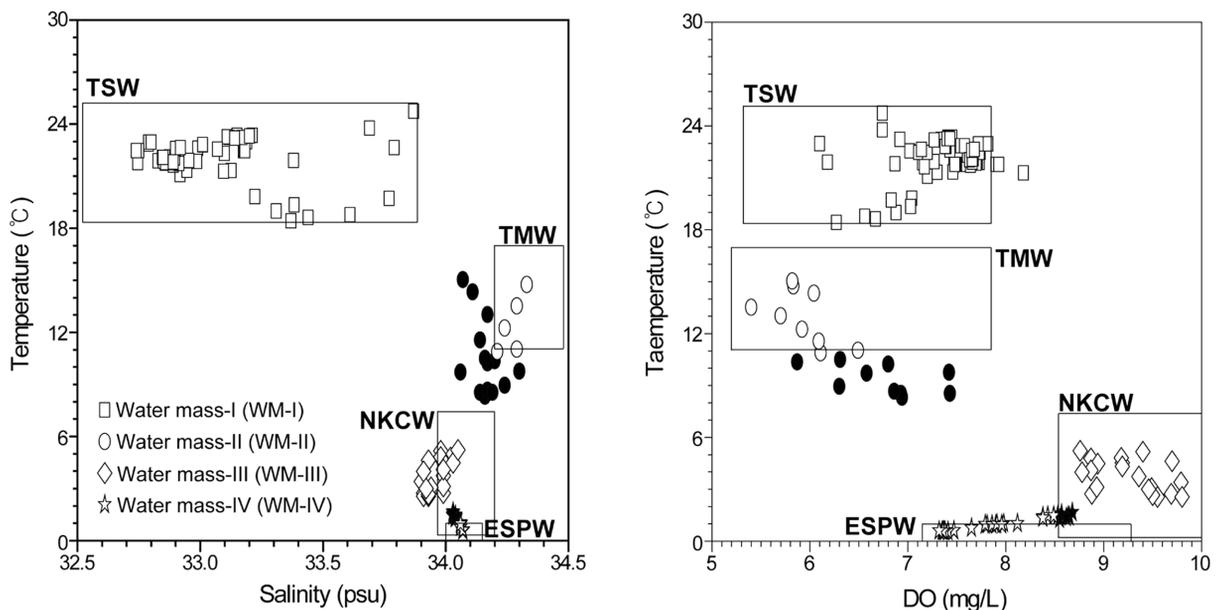
한편, B line의 표층수온은 21.75~23.31 °C의 범위로 A line과 유사하게 외양으로 갈수록 높아졌다(Fig. 3). 혼합층은 연안 정점(B1~B5)에서는 10~20 m에서 형성되어 있으며, B5부터는 30 m로, A line 보다 다소 낮은 수심에서 형성되었다. 수온약층은 외양으로 갈수록 점차 깊어지는 양상을 보였으며, 300 m 이심에서 1 °C 이하의 수온을 보이고 있었다. 특히, B line의 경우 B4와 B5의 저층에서는 미약하지만 저층수가 상층으로 용승되는 현상이 보였다. 염분의 경우는 A line과 상반되게 표층에서 33.0 psu 이하의 저염수가 균일하게 분포하고 있으며, 34 psu 이상의 고염수는 B7을 제외한 100 m 부근에서 분포하고 있었다(Fig. 3). 또한 200 m 이심에서는 34.0 psu로 유사한 염분분포를 보였다. DO는 A line과 유사하게 표층에서는 7.0 mg/L 이상의 분포양상을 보이며, 30~50 m 수심에서 6.5 mg/L 이하의 산소극소층이 나타났다(Fig. 3). 또한 비

교적 연안에 위치한 정점(B1~B3)과 외양정점(B6~B8)들의 100 m 부근에서 9.0 mg/L 이상의 농도분포를 보였다. 특히, 수온의 수직 분포에서도 관찰되었듯이 B4와 B5의 저층에서 용승현상이 보였다.

동해 남부해역의 수괴를 분석하기 위하여, 수온, 염분, DO 측정값을 이용하여 이전까지 동해 해역에서 보고된 각 수괴의 물리적 특성치(Table 1)와 비교 분석하였다. 그 결과 본 해역에서는 각 수괴별 특성에 맞추어 4개의 수괴로 구분되었다(Fig. 4). Water Mass-I (WM-I)의 경우 대마난류표층수(TSW; Tsushima Surface Water)와 유사하였다. WM-II는 그 기원은 대마난류중층수(TMW; Tsushima Middle Water)로 판단되었으나, 저온·저염의 북한한류수(NKCW; North Korea Cold Water)가 일부 혼합되어 있는 것으로 판단된다. WM-III은 NKCW 기원의 수괴와 유사한 특성을 보였으며, WM-IV는 동해고유수(ESPW; East Sea Proper Water)와 유사한 특성을 보이나, B line에서 관측된 용승현상(Fig. 3)으로 인해서 일부 NKCW와의 혼합수가 분포하고 있는 것으로 판단된다. 동해에서 계절적 수온약층 상부에 주로 나타나는 TSW는 동중국해의 장강 희석수가 고염인 TMW와 함께 유입된 해수로 보고되었다(Park[1978]). 조사해역에서는 TSW가 연안정점에서는 20 m 이내의 수심에 분포하고 있으며, 외해정점에서는 50 m 수심까지 분포하고 있었다. TSW 아래에

Table 1. Distinctive values of temperature, salinity and dissolved oxygen (DO) reported previously for water masses in the East Sea

Water Mass	Temperature (°C)	Salinity (psu)	DO (mg/L)	References
TSW (Tsushima Surface Water)	19.47~21.51	32.39~33.71	5.53~7.86	Cho <i>et al.</i> [1997]
	>20	<33.80	7.14~7.86	Park[1978]
	>20	<33.80	7.21~7.79	Yang <i>et al.</i> [1991]
	18.42~24.74	32.74~33.87	6.10~8.18	This study
TMW (Tsushima Middle Water)	11.01~16.63	34.28~34.50	5.2~7.56	Cho <i>et al.</i> [1997]
	14~17	34.30~34.60	6.00~6.71	Park[1978]
	13~17	34.20~34.40	7.14~7.86	Kim and Kim[1983]
	12~17	34.30~34.50	6.14~7.14	Yang <i>et al.</i> [1991]
NKCW (North Korean Cold Water)	8.32~15.03	34.06~34.33	5.40~7.43	This study
	1.00~7.42	33.98~34.18	8.54~12.06	Cho <i>et al.</i> [1997]
	0.2~4	34.00~34.05	9.29~10.71	Park[1978; 1979]
	1~6	<34.00	>9.71	Kim and Kim[1983]
ESPW (East Sea Proper Water)	1~7	34.06~34.20	8.57~9.21	Yang <i>et al.</i> [1991]
	2.56~5.22	33.90~34.05	8.76~9.80	This study
	0.37~0.93	34.05~34.07	7.14~8.71	Cho <i>et al.</i> [1997]
	0~1	33.96~34.10	7.43~8.57	Park[1978; 1979]
ESPW (East Sea Proper Water)	0~1	34.00~34.05	7.86~9.29	Kim and Kim[1983]
	<1	34.02~34.16	7.71~8.43	Yang <i>et al.</i> [1991]
	0.57~1.66	34.03~34.07	7.32~8.68	This study

**Fig. 4.** Diagrams of temperature-salinity and temperature-dissolved oxygen (DO) for all the stations on two transects in the southern part of East Sea of Korea. The box indicate range of temperature, salinity and DO reported previously for water masses. The closed symbol indicate mixed water by mixing between different water masses.

는 고온·고염의 TMW가 존재하였는데 상대적으로 DO가 낮으며 연안정점에서는 30 m, 외양정점에서는 70 m 수심까지 분포하였다. Yun *et al.*[2004]은 동해 북부 블라디보스토크 연안에서 겨울철에 발달한 NKCW가 봄철부터 강릉 외해에 영향을 미치기 시작하여 여름과 가을철에는 대한해협까지도 영향을 미친다고 보고하였으며, 본 연구해역에서는 저염과 비교적 높은 DO를 특징으로 하는 NKCW가 200 m의 수심까지 영향을 미치고 있었다. 그리고 200 m 이심에는 수온 0~1 °C, 염분 33.96~34.14 범위의 ESPW라고 일반적으로 알려져 있는 심층수가 분포하였다.

3.2 용존 영양염의 수직적 분포 특성

Fig. 5는 A line에서 DIN, DIP, DON 그리고 DOP의 수직 등농도 분포이다. DIN의 농도는 1.30~24.42 μM (평균 9.93 \pm 7.32 μM)로 수심이 깊어질수록 점차 증가하는 분포경향을 보였으며, DIN의 약층(nutricline)은 수온약층과 잘 일치하였고, 외양으로 갈수록 그 경향이 뚜렷하게 나타났다. 그리고 수심 약 200 m 이심에서는 15 μM 이상의 농도 분포를 보였다. DIP도 DIN의 수직분포와 같이 표층에서 저층으로 갈수록 증가하는 경향을 나타내었다. DIP 농도는 0.32~1.85 μM (평균 0.89 \pm 0.46 μM)로, 혼합층에서는 0.7 μM 내외

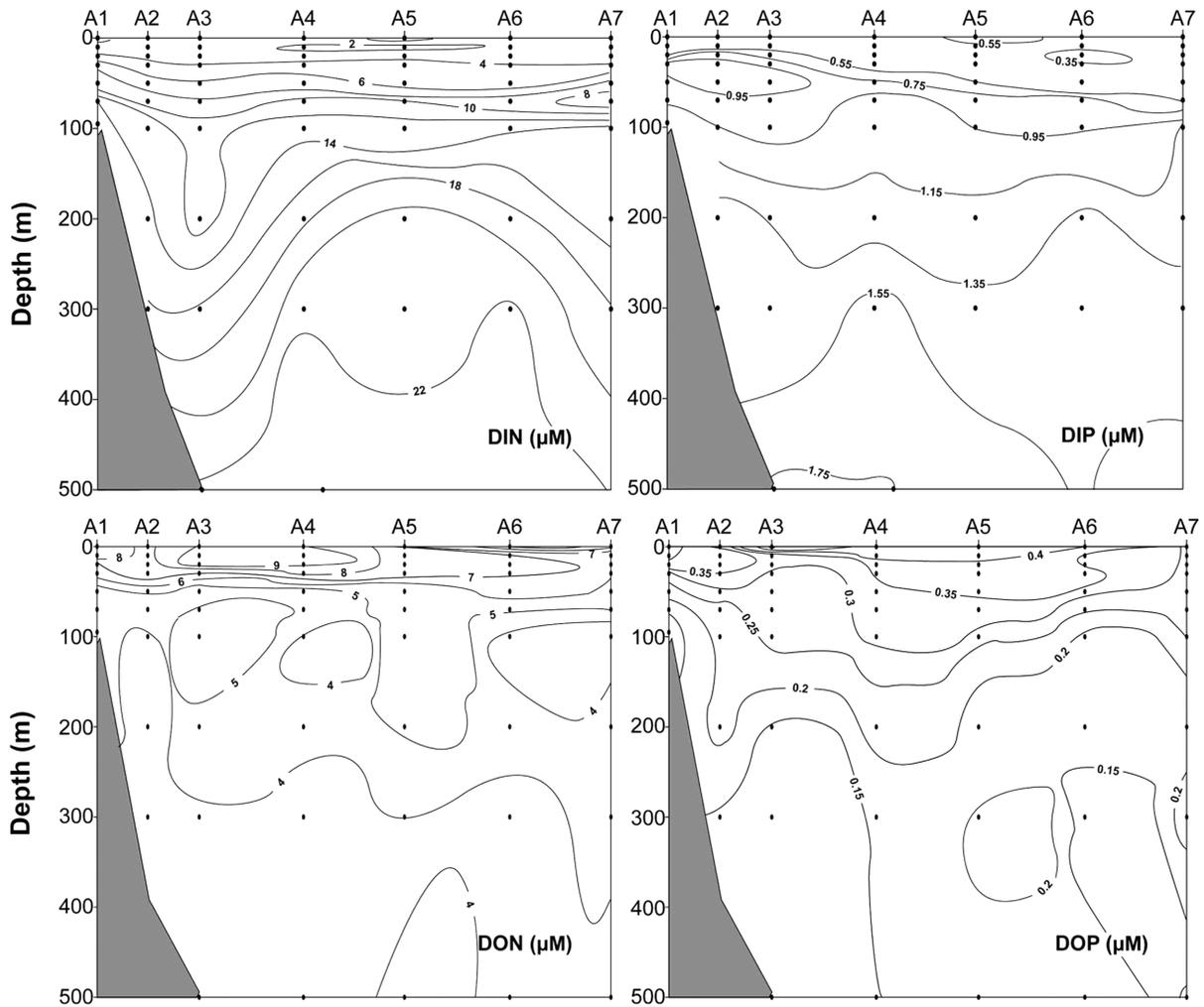


Fig. 5. Vertical cross sections of dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved inorganic phosphorus (DIP), dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic phosphorus (DOP) along the A line.

이며, DIP 약층은 수온약층과 유사한 경향으로 외양으로 갈수록 수심이 깊어지는 경향을 나타내었다. 200 m이심에서는 1.2 μM 이상의 농도를 보였다. DON의 수직농도분포는 무기 영양염과 다르게 표층에서 높고, 저층으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. DON 농도범위는 2.97~9.96 μM (평균 5.86 \pm 2.03 μM)이며, 혼합층에서 농도는 7 μM 이상이였다. 그리고 수온약층 부근에서 농도가 급격히 감소하였으며, ESPW로 보이는 WM-IV에서 5 μM 이하의 농도 분포를 보였다. DOP의 경우도 DON과 같이 표층에 높고 저층으로 갈수록 농도가 낮아졌으며, 농도범위는 0.09~0.50 μM (평균 0.28 \pm 0.09 μM)로 나타났다. 혼합층에서는 0.3 μM 이상, WM-IV는 0.2 μM 이하의 농도를 보였다.

Fig. 6은 B line에서 DIN, DIP, DON 그리고 DOP의 수직 등농도 분포이다. 무기 영양염은 A line과 유사하게 수심이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. DIN은 1.45~24.62 μM (평균 10.18 \pm 7.04 μM)로, 혼합층은 5 μM 내외의 농도분포를 보였으며, 미약하게 용승이 보였던 200~300 m에서 DIN도 용승과 유사한 현상이 관측되었다. DIP

농도는 0.21~1.81 μM (평균 0.76 \pm 0.41 μM)로 혼합층은 0.6 μM 내외이며, WM-IV는 1.4 μM 이상의 농도를 보였다. B line의 유기 영양염 역시 A line과 유사하게 표층에서 높고, 저층에서 낮았으며, DON과 DOP는 각각 2.08~9.82 μM (평균 5.90 \pm 1.98 μM), 0.12~0.59 μM (평균 0.30 \pm 0.12 μM) 범위로, A line과 유사한 농도분포를 보였다.

Fig. 7은 A와 B line의 가장 외양정점인 A7과 B8의 영양염 수직 분포도로, 대부분 다른 정점의 농도변화는 이들과 유사하였다. 여기서 혼합층에서 질소 계열의 경우 DON의 평균 농도는 DIN에 비해서 A7에서 약 2.3배, B8에서 약 2.5배 높았다. 반면에 인 계열의 경우는 DIP의 평균 농도가 DOP에 비해서 A7에서 약 1.2배 높았으며, B8에서는 DOP가 DIP에 비해서 약 1.1배 높았다.

수괴별 DIN과 DIP의 평균농도는 WM-IV에서 가장 높았으며, 다음으로 WM-III, WM-II, WM-I 순으로(Fig. 8), 각각의 수괴가 수심별로 위치하고 있기 때문에, 무기 영양염은 표층에서 식물플랑크톤에 의한 소비로 인해 가장 낮은 농도를 보인 후 수심의 증가에

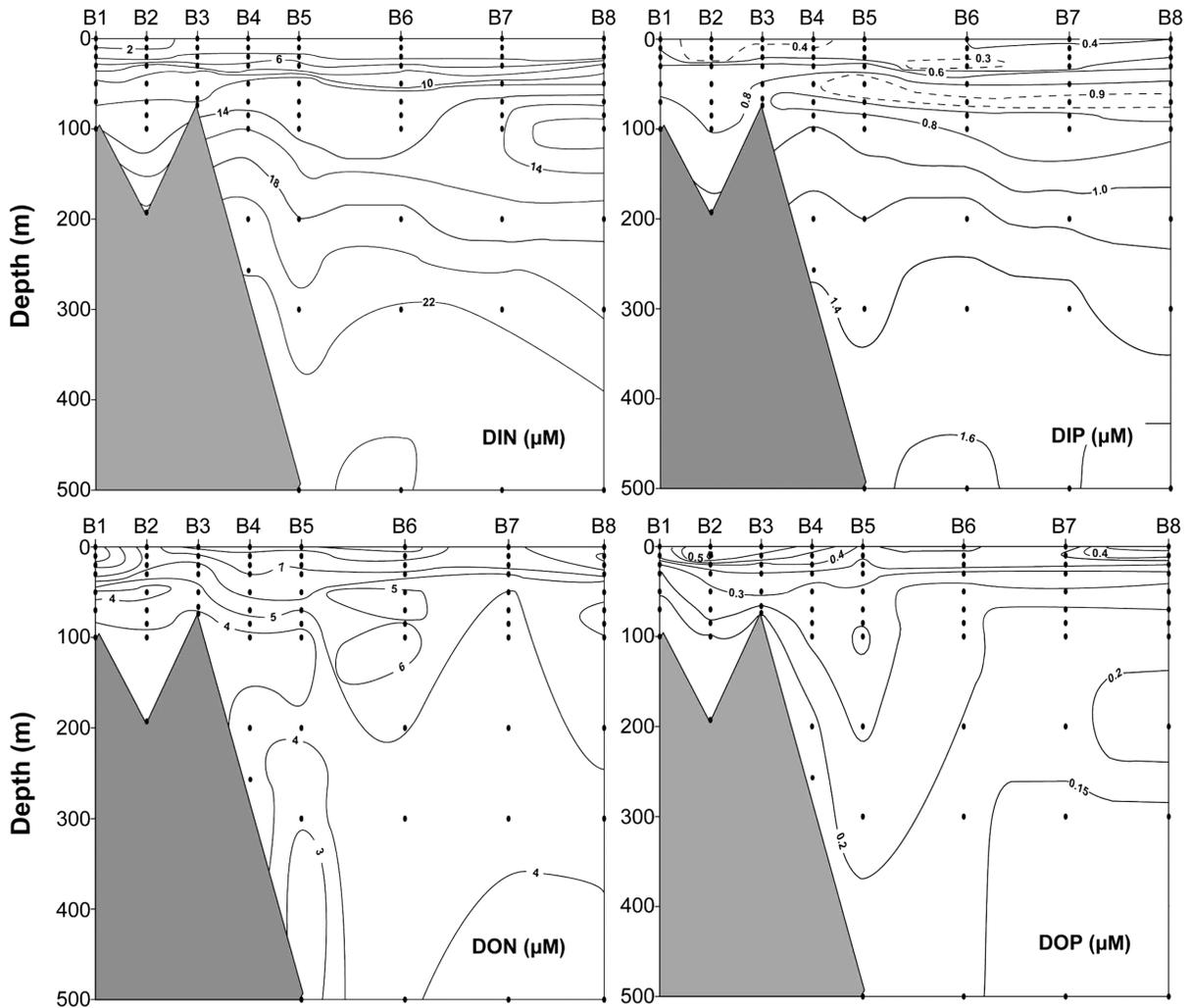


Fig. 6. Vertical cross sections of dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved inorganic phosphorus (DIP), dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic phosphorus (DOP) along the B line.

따라 생성된 유기물이 침강하고 재무기화로 인해 증가되는 것으로 보인다. 현재 분류된 수괴를 다른 시기에 조사된 대표적인 수괴들과 비교하면 평균에 있어 농도 차이를 보였다(Table 2). 이는 조사해역의 공간적인 차이에 따른 것 있을 수 있으나, 동해에는 대한해협 표층과 저층을 통해서 유입되는 대마난류표층수와 대마난류중층수, 한반도 동해안을 따라 북상하는 동한난류, 북쪽에서 남하하는 북한한류수, 연안용승, 그리고 울릉난수성 소용돌이 등과 같은 다양한 물리적인 외압들이 영양염 공급에 영향을 주는 것으로 알려져 있으며(Rho *et al.*[2012]), 이들 외압들의 계절에 따른 세력의 차이 때문으로 판단된다. 뿐만 아니라 계절별로 생물에 의한 소비 및 재무기화 정도 차이와 같은 생물학적 요인 등 복합적인 요인에 의해서 계절별 차이를 보인 것으로 판단된다. 수괴별 용존 유기 영양염인 DON과 DOP는 무기태 영양염과 상반되게 나타났다(Fig. 8). 이는 표층수에서 활발한 생물생산으로 인해서 다량의 유기물이 생성되어 높은 농도를 보이다가 유기물이 침강하면서 재무기화 되기 때문에 저층에서 낮은 농도를 보인 것으로 판단할 수 있다. 본

연구해역에서의 DON과 DOP의 농도 및 DTN과 DTP에 대한 함량비는 대서양과 태평양 등 외양역과 비교하여 유사한 분포를 보였으며, 함량비는 대서양에 비해서 다소 낮으나, 태평양과 유사하였으며, 일부 연안해역보다 비교적 높은 함량비를 나타내었다(Table 3). 또한 동해와 유사한 환경을 지니는 지중해에 비해서는 DON과 DOP의 평균 농도가 동해에서 높게 나타났다(Table 3).

본 조사해역의 수괴 전체 DIN : DIP 비는 15.8로 Redfield 비와 유사한 값을 보였으나, 실제 식물플랑크톤의 생물량이 높을 것으로 판단되는 혼합층의 경우 5.3으로 낮은 값을 보였다(Fig. 9). 또한 수괴별 DIN : DIP 비는 표층수괴인 WM-I에서 약 8로 가장 낮았으며, 심층수괴로 갈수록 점차 증가하여 Redfield ratio(16)와 유사하였다(Fig. 8). 따라서 표층수괴인 대마난류 수괴는 Redfield ratio 이하로 질소가 제한된 환경으로 판단된다. 하지만 Moon *et al.*[1996]과 Cho *et al.*[1997]의 연구결과에서는 본 연구와 상반되게 표층수괴에서 Redfield ratio를 초과하여 인 제한 환경으로 보고되었다. Dortch and Whitlege[1992]에 의하면 영양염 제한을 영양염 농도

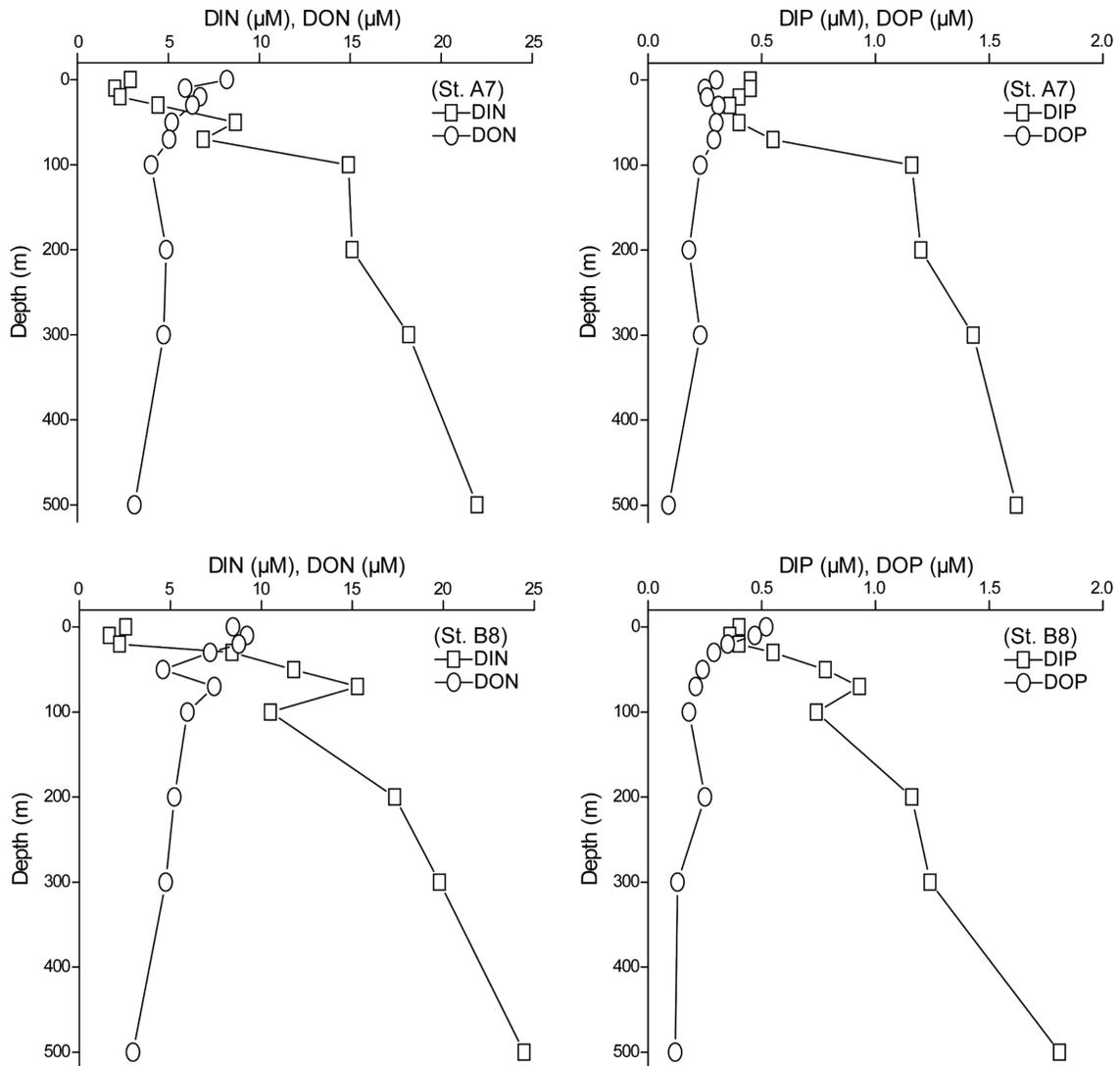


Fig. 7. Vertical profiles of dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved organic nitrogen (DON), dissolved inorganic phosphorus (DIP) and dissolved organic phosphorus (DOP) at station A7 and station B8.

와 영양염 비의 조합으로서 제시하였으며, 영양염 농도가 임계농도보다 높은 상태에서도 DIN : DIP 비가 30 이상이면 잠재적인 인산염 제한(P potential limitation), DIN : DIP 비가 10 이하이면 잠재적인 질산염 제한(N potential limitation)으로 규정하였다. 다수의 연구에서도 동해는 질소가 일차생산의 제한인자로 특징되는 것으로 보고되었다(Chung *et al.*[1989]; Kim *et al.*[2010]; Kim and Kim[2013]). Zhang *et al.*[2007]은 동중국해의 중앙해역에서 탈질소 작용에 따라 DIN : DIP 비가 10 이하로 낮으며, 이러한 해수는 대한해협을 통과하여 동해로 유입 되는 것으로 설명하였다. 또한 Lee *et al.*[2009]에 의하면 양자강 유출수의 DIN : DIP 비는 50~100으로 매우 높지만, 쿠로시오 해류가 영향을 미치는 해역의 아표층 및 중층의 경우 10이하로 보고되었다. 특히, 양자강 유출수는 하계(6월~10월)에 중국대륙 연안을 따라 남쪽으로 흐르다가 대마난류수와 혼합된 후 대한해협을 통과하여 동해로 이동하는 것으로 알려져 있다(Kim and Rho[1994]). 따라서 낮은 DIN : DIP 비의 해수

가 동해로 유입됨에 따라 DIN : DIP 비를 감소시키는 역할을 했을 것으로 판단된다.

Kim *et al.*[2010]은 동해의 DIN : DIP 비가 낮은 이유를 생지화학적 해수 체계를 바탕으로 설명하였다. 표층에서 내려보내기 생산은 Redfield ratio를 따르고, 용승이 원활하지 않으면 질산염은 탈질산염화 과정을 거치면서 Redfield ratio보다 낮아지게 된다. 이러한 원인으로 인해서 동해의 DIN : DIP 비가 낮은 것으로 설명하였다. 하지만 현 시스템이 유지되려면 아래층으로 빠져나간 영양염은 신생산으로 보충되어야 할 것이다. 그런 의미에서 대마난류는 동해 생태계에 큰 영향을 미칠 것이다. 최근 연구에 따르면 타이완에서 유입되는 수괴와 쿠로시오 해류에서 분주된 수괴의 계절적 변동이 대한해협으로 유입되는 대마난류의 특성을 결정하는 것으로 보고되었다(Guo *et al.*[2006]). 즉, 영양염이 풍부한 쿠로시오 해류 기원의 대마난류는 가을철부터 겨울철까지 영향을 미치고, 빈 영양수괴인 타이완난류 기원의 대마난류는 봄철부터 여름철까지 영향을

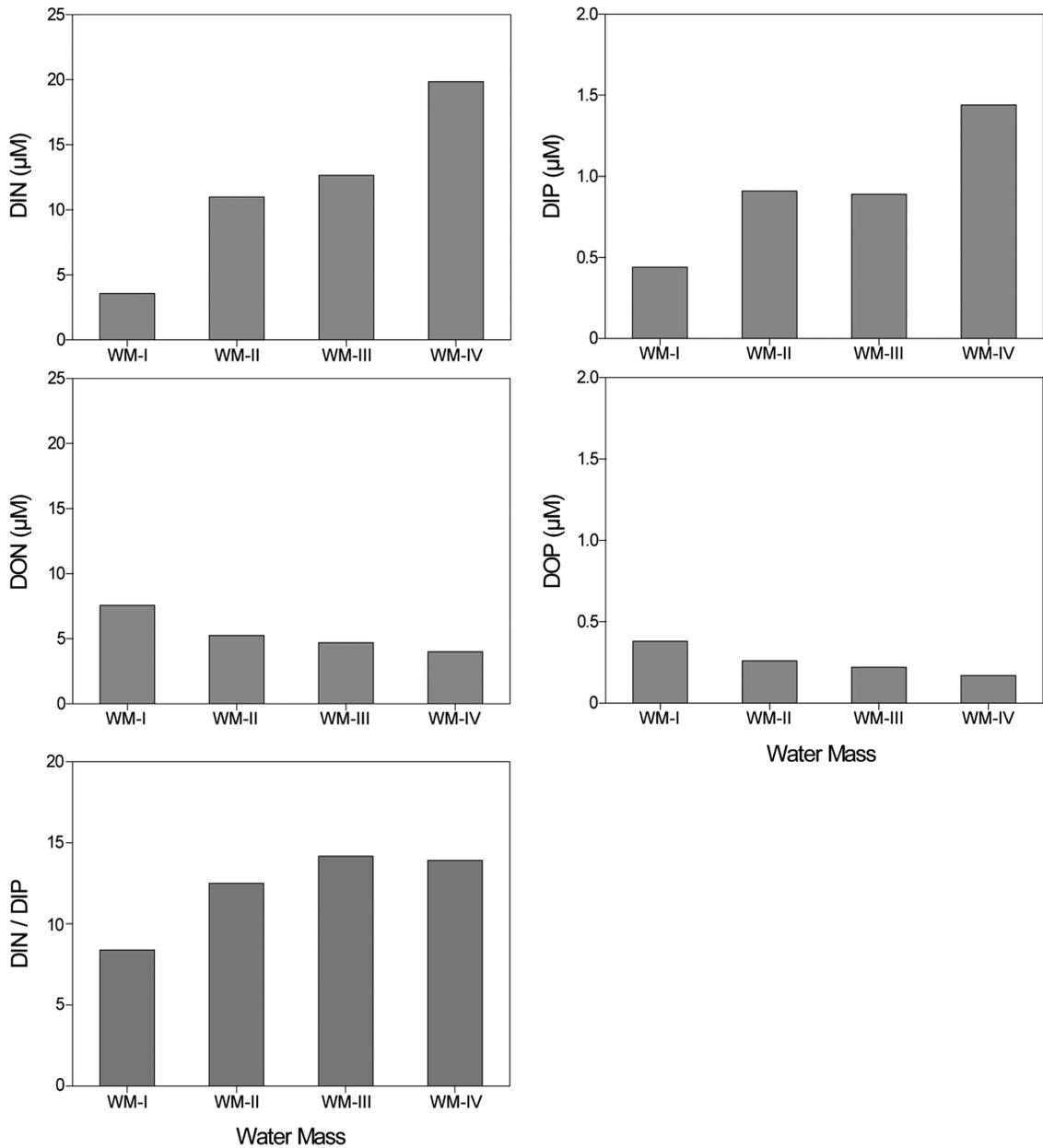


Fig. 8. Dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved organic nitrogen (DON), dissolved inorganic phosphorus (DIP), dissolved organic phosphorus (DOP) and DIN : DIP ratio at the each water mass type in the southern part of East Sea of Korea.

미친다. 결과적으로, 동해로 유입되는 외해수의 역학적 변동이 영양염 농도의 계절적 변화에 상당한 영향을 주고 있는 것으로 판단된다. 하지만 본 연구진의 조사결과에서 동계에도 DIN : DIP 비가 10 이하로 상당히 낮은 값을 보여(Oh *et al.* unpublished), 시기적으로 낮은 DIN : DIP 비가 단순히 동해로 유입되는 외해수의 영향인지 판단하기는 어려움이 있으며 동해의 물질 순환에 대한 더 활발한 연구가 필요할 것이다.

3.3 동해의 저차생태계에 있어 용존 유기 영양염의 중요성
동해는 무기 질소가 제한적인 환경임에도 불구하고 일차생산력

이 상당히 높은 해역으로 알려져 있다(Jenkins[2008]; Kwak[2009]). 일반적으로 일차생산은 수온, 염분, 광조건, 영양염, 식물플랑크톤 현존량 등 다양한 물리·화학적 요인에 의해서 결정되지만, 동해에서는 질소와 식물플랑크톤 현존량이 중요한 요인으로 작용하는 것으로 보고되었다(Kwak[2009]). 하지만, 식물플랑크톤의 현존량 및 일차생산력이 높은 수준을 유지하기 위해서는 식물플랑크톤의 성장에 필수적인 영양염이 지속적으로 공급되어야 할 것이다. Rho *et al.*[2010]에 의하면 상대적으로 영양염이 풍부하고 저온·고염의 대마난류중층수가 표층 아래를 통과하면서 대마난류중층수에 포함된 영양염이 상층으로 공급되기 때문에 식물플랑크톤의 지속적인 성

Table 2. Distinctive values of dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved inorganic phosphorus (DIP), DIN : DIP ratio, dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic phosphorus (DOP) reported previously for water masses in the East Sea

Water Mass	DIN (μM)	DIP (μM)	DIN : DIP ratio	DON (μM)	DOP (μM)	References*
TSW (Tsushima Surface Water)	1.37(0.27~2.98)	0.12(0.03~0.29)	18.56(6.13~52.00)	-	-	Moon <i>et al.</i> [1996 ^a]
	0.02(0.79~4.01)	0.25(0.05~0.61)	14.56(2.00~52.40)	-	-	Cho <i>et al.</i> [1997 ^b]
	0.10(0.03~0.29)	0.52(0.13~1.60)	3.52(2.10~4.80)	-	-	Kim <i>et al.</i> [2007 ^c]
	0.86(0.23~1.55)	0.10(0.09~0.10)	8.81(2.30~15.53)	-	-	Choi <i>et al.</i> [2012 ^d]
	3.57(1.30~8.69)	0.44(0.21~0.90)	8.39(2.88~27.21)	7.56(4.53~9.96)	0.38(0.25~0.59)	This study
TMW (Tsushima Middle Water)	12.34(9.95~15.73)	0.63(0.08~1.37)	29.99(9.02~129.87)	-	-	Moon <i>et al.</i> [1996 ^a]
	5.33(2.48~7.65)	1.00(0.28~1.84)	6.02(2.19~14.25)	-	-	Cho <i>et al.</i> [1997 ^b]
	1.93(0.39~3.25)	0.55(0.14~1.76)	8.16(1.85~5.33)	-	-	Kim <i>et al.</i> [2007 ^c]
	0.98(0.95~1.00)	0.16(0.15~0.17)	6.11(5.88~6.33)	-	-	Choi <i>et al.</i> [2012 ^d]
	10.99(5.04~15.27)	0.91(0.59~1.16)	12.50(4.48~18.82)	5.25(2.98~8.04)	0.26(0.15~0.35)	This study
NKCW (North Korea Cold Water)	17.73(10.18~29.42)	0.96(0.49~1.71)	19.87(8.26~40.47)	-	-	Moon <i>et al.</i> [1996 ^a]
	8.87(1.47~14.56)	1.62(0.38~3.88)	6.09(2.12~17.40)	-	-	Cho <i>et al.</i> [1997 ^b]
	18.28(6.12~31.44)	1.24(1.09~1.41)	14.46(9.58~22.33)	-	-	Kim <i>et al.</i> [2007 ^c]
	20.22(5.23~28.24)	1.42(0.60~1.77)	13.59(8.68~16.25)	-	-	Choi <i>et al.</i> [2012 ^d]
	12.65(8.45~18.93)	0.89(0.70~1.16)	14.18(10.32~18.07)	4.69(2.86~6.96)	0.22(0.12~0.32)	This study
ESPW (East Sea Proper Water)	23.58(15.57~25.45)	1.29(1.03~1.76)	18.71(13.68~24.37)	-	-	Moon <i>et al.</i> [1996 ^a]
	12.66(9.09~16.61)	2.63(1.47~4.16)	5.06(2.50~10.07)	-	-	Cho <i>et al.</i> [1997 ^b]
	31.83(23.38~40.33)	1.70(1.26~2.09)	19.37(11.19~23.12)	-	-	Kim <i>et al.</i> [2007 ^c]
	33.96(22.72~41.99)	2.34(1.70~3.06)	14.61(11.11~17.35)	-	-	Choi <i>et al.</i> [2012 ^d]
	19.87(11.24~24.62)	1.44(0.78~1.85)	13.92(8.31~17.23)	3.98(2.08~5.57)	0.17(0.09~0.26)	This study

*Survey was conducted in (a) November 1994, (b) October 1995, (c) April 2004 and (d) September 2009.

Table 3. Concentration and composition of dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic phosphorus (DOP) in the mixed layer of East Sea in comparison with that in other areas

Location	DON		DOP		References
	Concentration (μM)	Composition (%)	Concentration (μM)	Composition (%)	
Atlantic Ocean	5.0~6.0	90	0.2~0.3	70	Torres-Valdes <i>et al.</i> [2009]
East Pacific Ocean	5.5±0.7	70	-	-	Hansell and Waterhouse[1997]
North Pacific Ocean	4.6±0.3	-	0.18±0.03	-	Kaiser and Benner[2012]
Coastal North Sea	16.4±2.2	58	0.30±0.04	25	Sintes <i>et al.</i> [2010]
Changjiang River Estuary	10?20	60	0.05~0.5	-	Zhang <i>et al.</i> [2007]
Apalachicola Bay	14.8±1.0	64	-	-	Mortazavi <i>et al.</i> [2000]
Western	4.1~5.5(4.7±0.4)	-	0.02~0.09(0.06±0.02)	-	Pujo-Pay <i>et al.</i> [2011]
Mediterranean Eastern	3.5~6.3(4.7±0.6)	-	0.01~0.10(0.04±0.02)	-	Pujo-Pay <i>et al.</i> [2011]
North Western	4.0~4.2	-	0.12~0.14	-	Aminot and Kerouel[2004]
East Sea	2~7	-	0.1~0.4	-	Kim and Kim[2013]
	5.2~9.9(7.8±1.2)	71	0.25~0.59(0.38±0.08)	49	This study

장이 이루어 질 것으로 예측하였다. 하지만 Chung *et al.*[1989]에 의하면 동해에서 표층으로 연직확산에 의한 무기 질소 공급은 식물플랑크톤 질소요구량의 약 7% 정도만 설명할 수 있으며, 중형 동물플랑크톤의 재순환에 의한 무기 질소 공급은 추가적으로 약 7.3%가 공급되는 것으로 추정하였다. 또한 미세 동물플랑크톤에 의해 35%가 공급되는 것으로 설명하였다. 즉, 연직확산과 재순환 등의 과정을 통해서 식물플랑크톤 성장에 필요한 질소요구량의 50%만이 공급되는 것으로 설명되었다. 따라서 연직확산과 재순환 이외에 또 다른 질소 공급원이 있는 것으로 추정할 수 있다.

한편, Rho *et al.*[2010]은 2008년 하계 동해에서 식물플랑크톤의 주요 광합성 색소를 기초로 분석한 식물플랑크톤 군집구조는 영양

염이 풍부한 연안 용승 지역과 북한한류수의 영향을 받는 지역에는 규조류(diatom), 영양염이 고갈된 울릉난수성 소용돌이 지역에서는 빈 영양 해역에서 높은 생산성을 보이는 남조류(cyanobacteria)가 우점 분류군으로 출현하는 것으로 보고하였다. 또한 Kim *et al.*[2010]은 상대적으로 높은 DIN : DIP 비(<11)를 보이는 2004년 춘계에 규조류(40~80%)에 의한 우점현상이 두드러지며, 반면에 낮은 DIN : DIP 비(<6)를 보이는 2005년 하계와 추계에는 남조류(10~50%)에 의한 우점현상이 두드러지는 것으로 보고하였다. 뿐만 아니라 Kim and Kim[2013]에 의하면 2007년 춘계에 20 m 내외의 표층수 중 규조류에 의한 우점은 20~50%, 남조류에 의한 우점은 20~65%로, 동해에서 규조류와 남조류가 식물플랑크톤 군집 중

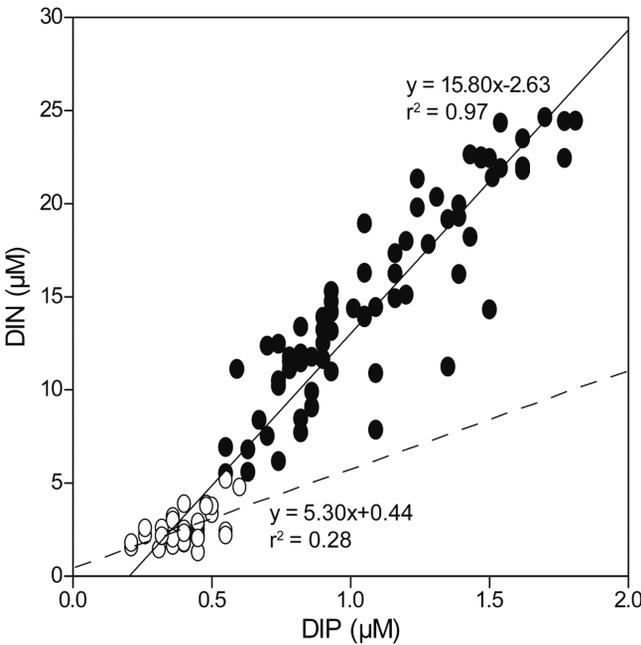


Fig. 9. Relationship between dissolved inorganic nitrogen (DIN) and dissolved inorganic phosphorus (DIP) in the southern part of East Sea of Korea. The solid line indicate the DIN : DIP ratio in the all of the water masses. The dashed line indicate the DIN : DIP ratio in the mixed layer.

주요한 분류군으로 제시하였다. 따라서 동해에서 영양염 환경의 변화는 식물플랑크톤의 군집구조에 상당한 영향을 미치는 것으로 보이며, 동해에서는 규조류뿐만 아니라 남조류가 일차생산자로서 중요한 위치에 있는 것으로 판단된다.

일부 규조류와 남조류의 성장 동력학 및 흡수 동력학으로부터 도출된 질산염과 인산염에 대한 반포화상수(half-saturation constant; K_s)의 경우(Table 4), 남조류 *Synechococcus* sp.는 일부 규조류에 비해서 인산염에 대한 경쟁에서는 우위에 있으나 질산염에 대해서는 불리한 위치에 있는 것을 알 수 있다. 특히, *Synechococcus* sp.의 세포 내 N : P 함량비는 Redfield 비보다 높은 21~33을 보이며, 성장속도가 증가할수록 N : P 함량비가 낮아져(Bertilsson *et al.*[2003]; Fu *et al.*[2006]), 인에 대한 요구량은 낮으며 상대적으로

질소에 대한 의존성이 높은 생리학적 특성을 갖는 것으로 추정할 수 있다. 하지만, 무기 질소가 제한요인으로 작용하는 동해에서 남조류가 우점 분류군으로서 높은 생물량을 유지하기 위해서는 이러한 환경을 극복하기 위한 생리학적 기작이 필요할 것이다.

남조류는 질소가 제한된 환경에서 피코빌린 단백질(phycobiliprotein)의 분해, 남조소(phycoeyanin) : 이질남조소(allophycocyanin) 비의 변화, 틸라코이드 막(thylakoid membrane)의 분해, 엽록소(chlorophyll) 함량의 감소, 카로티노이드(carotenoid) 또는 카로티노이드 : 엽록소 비의 증가, 글리코젠(glycogen) 함량의 증가와 같은 다양한 생리학적 반응을 일으키는 것으로 알려져 있다(Yamanaka and Glazer[1980]; Stevens *et al.*[1981]). 특히, 이러한 생리학적 기작들을 바탕으로 질소와 관련된 단백질의 합성 및 분해를 조절함으로써 질소의 제한을 극복하는 것으로 판단된다. 질소 제한 환경에서 또 다른 생리학적 기작으로 남조류의 유기 질소 화합물의 이용능력을 들 수 있다(Moore *et al.*[2002]; Zubkov and Tarran[2005]). *Synechococcus* sp.는 질산염, 아질산염, 암모니아와 같은 무기 질소뿐만 아니라 아미노산(amino acids), 퓨린(purines) 및 요소(urea)와 같은 유기 질소 화합물 역시 성장을 위한 중요한 질소 공급원이다(Moore *et al.*[2002]). 또한 온대해역에서 *Synechococcus*와 같이 흔히 관찰되는 남조류 *Prochlororococcus* sp. 역시 요소와 아미노산을 질소 공급원으로 이용 가능한 것으로 보고되었다(Zubkov and Tarran[2005]). 특히 조사해역의 혼합층 내에서 DON은 DTN 중 약 70%의 성분비를 보이고 있기에(Table 3), 이처럼 무기 질소가 제한된 환경에서 일차생산자의 생물량을 유지하기 위해서는 비교적 높은 비율을 점유하고 있는 DON 이용은 필수적으로 판단된다. 하지만 동일종이라도 분리된 해역이 지리적으로 다르면 생리학적 특성이 차이를 보일 수 있기에(Gallagher[1982]), 향후 동해에서 분리한 우점종에 대하여 DON의 가수분해 효소인 요소분해효소(urease)와 아미노산 산화효소(amino oxidase)의 활성능력을 비롯하여 DIN과 DON에 대한 흡수 동력학 및 이용성 등의 생리적인 데이터의 축적이 필요할 것이다. 이와 병행하여 동해의 자연해수를 대상으로 DON 중 생물학적으로 이용가능한 한 성분(labile fraction)과 난분해성(refractory)에 대한 검토도 필요할 것으로 판단된다.

Table 4. Half-saturation constant (K_s) for nitrate and phosphate uptake by cyanobacteria *Synechococcus* sp. and diatoms

Species	K_s (μM)		References
	Phosphate	Nitrate	
Diatom			
<i>Skeletonema costatum</i>	0.68	0.40	Eppley <i>et al.</i> [1996], Lomas and Glibert[2000]
<i>Chaetoceros</i> sp.	0.36	0.98	Oh <i>et al.</i> [2010], Sunlu <i>et al.</i> [2010]
<i>Ditylum brightwellii</i>	-	0.60	Eppley <i>et al.</i> [1969]
<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	-	1.26	Auro and Cochlan[2013]
<i>Coscinodiscus wailesii</i>	0.39	1.40	Nishikawa and Hori[2004a]
<i>Eucampia zodiacus</i>	0.31	0.86	Nishikawa and Hori[2004b]
Cyanobacteria			
<i>Synechococcus</i> sp.	0.014	2.64	Timmermans <i>et al.</i> [2005]

4. 결 론

2011년 9월 동해의 수괴 분포와 용존 무기 및 유기 영양염의 분포 특성을 파악하였다. 수온, 염분, DO를 바탕으로 수괴분석을 실시한 결과 서로 다른 성격을 보이는 4가지 유형의 수괴 즉, WM-I, WM-II, WM-III, WM-IV로 구분되었으며, 그 기원은 각각 대마난류표층수(TSW), 대마난류중층수(TMW), 북한한류수(NKCW) 그리고 동해고유수(ESPW)와 유사하였다. 하지만 일부 TMW와 NKCW의 혼합수와 NKCW와 ESPW의 혼합수가 분포하였다. 수괴별 용존 영양염의 경우 무기영양염인 DIN, DIP는 가장 저층 수괴인 WM-IV에서 가장 높았으며, WM-III, WM-II, WM-I 순으로 나타났다. 반면에 유기 영양염인 DON, DOP는 무기 영양염과 상반되는 분포를 보였다. DIN : DIP 비는 수괴 전체에서 15.8로 Redfield ratio(16)에 근접한 수치를 보이고 있으나, 실제 식물플랑크톤 생물량이 높을 것으로 보이는 혼합층의 경우 약 5.3으로 이러한 질소 제한 환경임에도 불구하고 동해는 일차생산력이 높은 해역으로 알려져 있으며, 식물플랑크톤 군집에서 남조류가 중요한 우점 분류군으로 보고되었다. 남조류는 다양한 생리학적 기작을 바탕으로 질소 제한 환경을 극복하며, 그 중 질소 제한 환경에서 유기 질소를 이용하여 성장을 유지할 수 있는 것으로 알려져 있다. 특히, 본 연구해역의 혼합층에서 DON은 DTN 중 약 70%를 구성하고 있기에 남조류가 높은 생물량을 유지하기 위해서는 DON의 이용은 필수적인 것으로 생각된다. 하지만, 향후 동해에서 분리한 우점종에 대하여 DIN과 DON에 대한 흡수 동력학 및 이용성 등의 생리학적 자료와 동해의 DON 중 생물학적으로 이용가능한 성분(labile fraction)과 난분해성(refractory)에 대한 검토가 필요할 것이며, 이렇게 축적된 자료는 향후 동해의 질소 제한 환경에서도 높은 일차 생산력을 유지하는 것에 대한 중요한 정보를 제공할 것이다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년: C-D-2013-0596)에 의하여 연구되었습니다.

References

- [1] Aminot, A. and Kerouel, R., 2004, "Dissolved organic carbon, nitrogen and phosphorus in the N-E Atlantic and the N-W Mediterranean with particular reference to non-refractory fractions and degradation", *Deep Sea Res.*, Vol.51, No.12, 1975-1999.
- [2] Arrigo, K.R., 2004, "Marine microorganisms and global nutrient cycles", *Nature*, Vol.437, No.7057, 349-355.
- [3] Auro, M.E. and Cochlan, W.P., 2013, "Nitrogen utilization and toxin production by two diatoms of the *Pseudo-nitzschia pseudodelicatissima* complex: *P. cuspidata* and *P. fryxelliana*", *J. Phycol.*, Vol.49, No.1, 156-169.
- [4] Benitez-Nelson, C.R., 2000, "The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems", *Earth Sci. Rev.*, Vol.51, No.1, 109-135.
- [5] Berman, T., and Bronk, D.A., 2003, "Dissolved organic nitrogen: A dynamic participant in aquatic ecosystems", *Aquat. Microbial Ecol.*, Vol.31, No.3, 279-305.
- [6] Bertilsson, S., Berglund, O., Karl, D.M. and Chisholm, S.W., 2003, "Elemental composition of marine *Prochlorococcus* and *Synechococcus*: Implications for the ecological stoichiometry of the sea", *Limnol. Oceanogr.*, Vol.48, No.5, 1721-1731.
- [7] Byun, S.K., 1989, "Sea surface cold water near the southeastern coast of Korea: Wind effect", *J. Oceanol. Soc. Kor.*, Vol.24, No.3, 121-131.
- [8] Chang, K.I., Teague, W.J., Lyu, 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, No.2, 105-156.
- [9] Cho, H.J., Moon, C.H., Yang, H.S. and Kang, W.B., 1997, "Regeneration processes of nutrients in the polar front area of the east sea III. Distribution patterns of water masses and nutrients in the middle-northern last sea of Korea in October, 1995", *Kor. Fish. Soc.*, Vol.30, No.3, 442-450.
- [10] 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. Kor. Soc. Mar. Environ. Eng.*, Vol.15, No.2, 76-88.
- [11] Chung, C.S., Shim, J.H., Park, Y.C. and Park, S.G., 1989, "Primary productivity and nitrogenous dynamics in the East Sea of Korea", *J. Oceano. Soc. Kor.*, Vol.24, No. 1, 52-61.
- [12] Dortch, Q. and Whittedge, T.E., 1992, "Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions?", *Cont. Shelf Res.*, Vol.12, No.11, 1293-1309.
- [13] Eppley, R.W., Rogers, J.N. and McCarthy, J.J., 1969, "Half-saturation constants for uptake of nitrate and ammonium by marine phytoplankton", *Limnol. Oceanogr.*, Vol.14, No.6, 912-920.
- [14] Fu, F.X., Zhang, Y., Feng, Y. and Hutchins, D.A., 2006, "Phosphate and ATP uptake and growth kinetics in axenic cultures of the cyanobacterium *Synechococcus* CCMP 1334", *Eur. J. Phycol.*, Vol.41, No.1, 15-28.
- [15] Gallagher, J.C., 1982, "Physiological variation and electrophoretic banding patterns of genetically different seasonal populations of *Skeletonema costatum* (Bacillariophyceae)", *J. Phycol.*, Vol.18, No.1, 148-162.
- [16] Gamo, T. and Horibe, Y., 1983, "Abyssal circulation in the Japan Sea", *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, Vol.39, No.5, 220-230.
- [17] 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.
- [18] Grasshoff, K., Kremling, K. and Ehrhardt, M., 1999, "Method of seawater analysis", Wiley-VCH, Weinheim, 160 pp.

- [19] Hansell, D. and Waterhouse, T., 1997, "Controls on the distributions of organic carbon and nitrogen in the eastern Pacific Ocean", *Deep-Sea Res.*, Vol.44, No.5, 843-857.
- [20] Jenkins, W.J., 2008, "The biogeochemical consequences of changing ventilation in the Japan/East Sea", *Mar. Chem.*, Vol.108, No.3, 137-147.
- [21] Jackson, G.A. and Williams, P.M., 1985, "Importance of dissolved organic nitrogen and phosphorus to biological nutrient cycling", *Deep-Sea Res.*, Vol.32, No.2, 223-235.
- [22] Kaiser, K. and Benner, R., 2012, "Organic matter transformations in the upper mesopelagic zone of the North Pacific: Chemical composition and linkages to microbial community structure", *J. Geophysical Res.*, Vol.117, No.C1, C01023.
- [23] Kim, B.G., Lee, T.S. and Kim, I.N., 2010, "Phosphate vs. silicate discontinuity layer developed at mid-depth in the East Sea", *Ocean and Polar Res.*, Vol.32, No.3, 331-336.
- [24] Kim, C.H. and Kim, K., 1983, "Characteristics and origin of the cold water mass along the east coast of Korea", *J. Oceanol. Soc. Kor.*, Vol.18, No.1, 73-83.
- [25] Kim, I.O. and Rho, H.K., 1994, "A study on China Coastal Water appeared in the neighbouring seas of Cheju Island", *Bull. Kor. Fish. Soc.*, Vol.27, No.5, 515-528.
- [26] Kim, K.R. and Kim, K., 1996, "What is happening in the East Sea (Japan Sea)? : Recent chemical observations during CREAMS 93-96", *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol.31, No.4, 15-22.
- [27] Kim, T.H., Lee, Y.W. and Kim, G.B., 2010, "Hydrographically mediated patterns of photosynthetic pigments in the East/Japan Sea: Low N:P ratios and cyanobacterial dominance", *J. Mar. Sys.*, Vol.82, No.1, 72-79.
- [28] Kim, T.H. and Kim, G.B., 2013, "Factors controlling the C:N:P stoichiometry of dissolved organic matter in the N-limited, cyanobacteria-dominated East/Japan Sea", *J. Mar. Sys.*, Vol.115-116, 1-9.
- [29] Kim, Y.S., Hwang, J.D., Youn, S.H., Yoon, S.C., Hwang, U.G., Shim, J.M., Lee, Y.H. and Jin, H.G., 2007, "Distribution of water masses and chemical properties in the East Sea of Korea in spring 2005", *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Eng.*, Vol.10, No.4, 235-243.
- [30] Kim, Y.S., Park, K.W., Park, J.W., Jeune, K.H. and Kim, M.K., 2010, "Vertical variations of water environments and phytoplankton community during the 2009 autumn in the coast of Dokdo, Korea", *Kor. J. Environ. Biol.*, Vol.28, No.4, 202-211.
- [31] Kwon, H.K., Park, J.A., Yang, H.S. and Oh, S.J., 2013, "Dominance and survival strategy of toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense* and *Alexandrium catenella* under dissolved inorganic nitrogen-limited conditions", *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Energy*, Vol.16, No.1, 25-35.
- [32] Kwak, J.H., 2009, "Spatial variations of primary, new and regenerated production in summer in the Tsushima Warm Current system", M.sc. Thesis, Busan National University, Busan, 63 pp.
- [33] Lee, J.Y., Kang, D.J., Kim, I.N., Rho, T., Lee, T., Kang, C.K. and Kim, K.R., 2009, "Spatial and temporal variability in the pelagic ecosystem of the East Sea (Sea of Japan): A review", *J. Mar. Sys.*, Vol.78, No.2, 288-300.
- [34] Lehman, J.T., Botkin, D.B. and Likens, G.E., 1975, "The assumptions and rationales of a computer model of phytoplankton population dynamics", *Limnol. Oceanogr.*, Vol.20, No.3, 343-363.
- [35] Lomas, M.W. and Gilbert, P.M., 2000, "Comparisons of nitrate uptake, storage, and reduction in marine diatoms and flagellates", *J. Phycol.*, Vol.36, No.5, 903-913.
- [36] Ministry of Land, Transportation and Marine Affairs (MLTM), 2010, "Standard methods for marine environmental analysis", Seoul, 495 pp.
- [37] Moon, C.H., Yang, H.S. and Lee, K.W., 1996, "Regeneration processes of nutrients in the polar area of the East Sea I. Relationship between water mass and nutrient distribution pattern in autumn", *J. Kor. Fish. Soc.*, Vol.29, No.4, 503-526.
- [38] Moore, L.R., Post, A.F., Rocap, G. and Chisholm, S.W., 2002, "Utilization of different nitrogen sources by the marine cyanobacteria *Prochlorococcus* and *Synechococcus*", *Limnol. Oceanogr.*, Vol.47, No.4, 989-996.
- [39] Mortazavi, B., Iverson, R.L., Landing, W.M., Lewis, F.G. and Huang, W., 2000, "Control of phytoplankton production and biomass in a river-dominated estuary: Apalachicola Bay, Florida, USA", *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol.198, 19-31.
- [40] Nishikawa, T. and Hori, Y., 2004a, "Effects of nitrogen, phosphorus and silicon on a growth of a diatom *Coscinodiscus wailesii* causing *Porphyra* bleaching isolated from Harima-Nada, Seto Inland Sea, Japan", *Nippon Suisan Gakkaishi*, Vol.70, No.6, 872-878.
- [41] Nishikawa, T. and Hori, Y., 2004b, "Effects of nitrogen, phosphorus and silicon on the growth of the diatom *Eucampia zodiacus* caused bleaching of seaweed *Porphyra* isolated from Harima-Nada, Seto Inland Sea, Japan", *Nippon Suisan Gakkaishi*, Vol.70, No.1, 31-38.
- [42] Oh, S.J., Kwon, H.K. and Yang, H.S., 2010, "Alkaline phosphatase activity and utilization of dissolved organic phosphorus by phytoplankton isolated from Korean coastal waters", *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol.15, No.1, 16-24.
- [43] Orrett, K. and Karl, D.M., 1987, "Dissolved organic phosphorus production in surface seawaters", *Limnol. Oceanogr.*, Vol.32, No.2, 383-395.
- [44] Park, C.K., 1978, "Chemical oceanographic aspect of the cold water mass in offshore of the east coast of Korea", *Bull. Kor. Fish. Soc.*, Vol.11, No.2, 49-54.
- [45] Park, C.K., 1979, "On the distribution of dissolved oxygen off the east coast of Korea", *J. Oceano. Soc. Kor.*, Vol.14, No.2, 67-70.
- [46] Pujo-Pay, M., Conan, P., Oriol, L., Cornet-Barthaux, V., Falco, C., Ghiglione, J.F., Goyet, C., Moutin, T., Prieur, L., 2011, "Integrated survey of elemental stoichiometry (C, N, P) from the western to eastern Mediterranean Sea", *Biogeosci.*, Vol.8, 883-899.
- [47] 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.
- [48] Rho, T.K., Lee, T.S., Kim, G.B., Chang, K.I., Na, T.H. 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.
- [49] Sintes, E., Stoderegger, K., Parada, V. and Herndl, G.J., 2010, "Seasonal dynamics of dissolved organic matter and microbial activity in the coastal North Sea", *Aqua. Microb. Ecol.*, Vol.60, No.1, 85-95.
- [50] Stevens Jr., S.E., Balkwill, D.L. and Paone, D.A.M., 1981, "The effect of nitrogen limitation on the ultrastructure of the cyanobacterium *Agmenellum quadruplicatum*", *Arch. Microbiol.*, Vol.130, No.3, 204-212.
- [51] Sunlu, F.S., Kutlu, B. and Buyukisik, H.B., 2010, "Comparison of growth kinetics of *Chaetoceros gracilis* isolated from two different areas in the Aegean Sea (The Bay of Izmir and the Homa Lagoon)", *J. Anim. Vet. Adv.*, Vol.9, No.13, 1796-1803.
- [52] Talley, L.D., Tishchenko, P., Luchin, V., Nedashkovskiy, A., Sagalaev, S., Kang, D.J., Warner, M. and Min, D.H., 2004, "Atlas of Japan (East) Sea hydrographic properties in summer, 1999", *Prog. Oceanogr.*, Vol.61, No.2, 277-348.
- [53] Tilman, D., 1982, "Resource Competition and Community Structure", Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 296 pp.
- [54] Timmermans, K.R., van der Wagt, B. Veldhuis, M.J.W., Maatman, A. and de Baar, H.J.W., 2005, "Physiological responses of three species of marine pico-phytoplankton to ammonium, phosphate, iron and light limitation", *J. Sea Res.*, Vol.53, No.1, 109-120.
- [55] Toress-Valdes, S., Roussenov, V.M., Sanders, R., Reynolds, S., Pan, X., Mather, R., Landolfi, A., Wolff, G.A., Achterberg, E.P. and Williams, R.G., 2009, "Distribution of dissolved organic nutrients and their effect on export production over the Atlantic Ocean", *Global Biogeochemical Cycles*, Vol.23, No.4, GB4010.
- [56] Yamanaka, G. and Glazer, A.N., 1980, "Dynamic aspects of phycobilisome structure: phycobilisome turnover during nitrogen starvation in *Synechococcus* sp.", *Arch. Microbiol.*, Vol.124, No.1, 39-47.
- [57] 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- III. Chemical characteristics of water masses in the polar front area of the central Korean East Sea", *Kor. Fish. Soc.*, Vol.24, No.3, 185-191.
- [58] Yun, J.Y., Magaard, L., Kim, K., Shin, C.W., Kim, C. and Byun, S.K., 2004, "Spatial and temporal variability of the North Korean Cold Water leading to the near-bottom cold water intrusion in Korea Strait", *Prog. Oceanogr.*, Vol.60, No.1, 99-131.
- [59] Zhang, J., Liu, S.M., Ren, J.L., Wu, Y. and Zhang, G.L., 2007, "Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang (Yangtze River) Estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets for the East China Sea Shelf", *Prog. Oceanogr.*, Vol.74, No.4, 449-478.
- [60] Zubkov, M.V. and Tarran, G.A., 2005, "Amino acid uptake of *Prochlorococcus* spp. in surface waters across the South Atlantic Subtropical Front" *Aquat. Microb. Ecol.*, Vol.40, No.3, 241-249.

2014년 1월 20일 원고접수

2014년 3월 4일(1차), 2014년 3월 17일(2차) 심사수정일자

2014년 3월 21일 게재확정일자