

하계 동해 남서해역에서 영양염류 분포 특성

김태훈[†]

제주대학교 해양과학대학 지구해양학과

Distributions of Dissolved Inorganic Nutrients in the Southwestern East Sea in Summer

Tae-Hoon Kim[†]

Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

Received September 1, 2015/Revised September 18, 2015/Accepted September 21, 2015

Vertical and horizontal distributions of nutrients in the southwestern East Sea (ES) were investigated in the summer of 2006 (12-15 July). The ratio of dissolved inorganic nitrogen (DIN) to dissolved inorganic phosphate (DIP) (12.1) was much lower than the Redfield ratio (16) over the entire depth of the East Sea. The concentrations of DIN relative to those of DIP and dissolved inorganic silicate (DSi) decreased exponentially as the intensities of fluorescence, an index of chlorophyll *a*, increased in the surface layer (0-200 m). This result indicates that the ES is in a significantly DIN-depleted condition. The fluorescence intensity recorded the highest in the mixed layer (<10 m). Although the concentrations of nutrients in the mixed layer were much lower, a supply of nutrients for the growth of phytoplankton in the southwestern ES seems to be associated with physical processes, such as coastal upwelling and the mixed surface water between Changjiang Diluted Water (CDW) and Tsushima Surface Water. Relatively higher nutrient concentrations were observed in lower salinity waters in the range of 30.31~30.50. The intensities of fluorescence showed a negative correlation with salinity. These results suggested that nutrient inputs derived from CDW into the southwestern ES may play an important source for the growth of phytoplankton in summer.

Key words: East sea, Nutrient, Upwelling, Changjiang diluted water, Mixed layer

1. 서 론

동해는 유라시아 대륙과 일본열도에 의해 둘러싸여 있는 독특한 해양학적 특징을 가지고 있는 반 폐쇄적인 연안해(semi-enclosed marginal sea)이다. 고온, 고염의 대마난류수(Tsushima Warm Current Water)가 대한해협(Korea Strait)을 통하여 유입되고, 이 수괴는 울릉분지(Ulleung Basin)와 야마토분지(Yamato Basin)의 상부 150 m에 분포하며, 동해 북부에서 형성되어진 냉수괴와 동해의 중앙부 약 40°N 부근에서 만나 극 전선(polar front)를 형성한다.¹⁾ 극 전선을 기준으로 북부 해역은 수온과 염분이 낮고, 남부해역은 높은 수온과

염분의 특성을 보인다. 동해 북부에서 겨울철 표층 냉각에 의하여 대양과는 독립적인 열 염분순환이 일어나기 때문에 대양의 축소판이라 불린다.²⁾

일반적으로, 해양에서 기초생산력(primary production)과 식물플랑크톤 성장은 수온, 염분, 광량, 영양염류 및 수괴의 안정도와 같은 해양 환경의 주요 인자에 의해 조절 된다. 특히, 영양염류의 농도와 그 비 값은 해양의 기초생산력과 식물플랑크톤 군집 분포를 결정하는 중요한 역할을 한다고 알려져 있다.³⁻⁵⁾ 이와 관련하여, 동해에서 높은 기초생산력과 식물플랑크톤 군집구조를 조절하는 영양염류의 거동과 분포에 대한 많은 연구들이 진행되었다.⁵⁻⁷⁾ 동해 해수 중 용존 무기 질소(DIN;

[†]To whom correspondence should be addressed.

dissolved inorganic nitrogen)과 용존 무기 인(DIP; dissolved inorganic phosphorus) 비 값은 Redfield 비 값(16)보다 낮은 약 13을 보였고,^{7,8)} 동해 표층수 중 DIN의 농도(<2 μM)와 DIN:DIP비 값(<10)은 매우 낮은 수준을 보여, 질소가 상당히 제한된 환경으로 보고되었다.^{5,7)}

기존의 연구 결과에 의하면, Lee et al.⁹⁾는 동해 해수 중 낮은 DIN:DIP비 값은 탈질산화 과정(denitrification)에 의해 결정된다고 보고하였다. 하지만, 다른 대양에 비해 심층에서 높은 농도의 용존산소를 보여, 산소 고갈에 따른 탈질산화로 동해 심층의 낮은 DIN:DIP비 값을 설명하기에는 한계가 있다고 판단되어진다. 최근, Kim and Kim⁷⁾은 동해의 영양염류 수지를 통해, 심층의 낮은 DIN:DIP비 값은 DIN:DIP비 값이 낮은 표층수가 심층으로 침강하는 물리적 혼합과 생물학적 재광물화 과정(remineralization)만으로도 충분히 설명될 수 있다고 보고하였다.

Kim et al.¹⁰⁾은 인간 활동에 의해 발생한 질산염이 대기를 통해 해양으로 유입되어 해양 생태계의 변화를 초래할 수 있다고 제시하였고, 동해 역시 대기로부터 유입된 질산염으로 질소가 제한된 동해 환경이 인이 제한된 환경으로 변화할 것이라 예측하였다. 하지만, Kim and Kim⁷⁾은 지난 10년간 동해 해수 중 DIN:DIP비 값을 살펴보면 대기로부터 유입된 질산염으로 DIN:DIP비 값이 증가한 것을 살펴볼 수가 없었으며, 모델 결과에 의하면 향후 100년간 동해는 대기로부터 질산염이 공급됨에도 불구하고 질소가 제한된 환경으로 지속 될 것으로 예측하였다. 이와 같이, 동해 해수 중 영양염류에 관한 연구가 많이 진행되었음에도 불구하고, 다양한 경로를 통해 동해로 유입된 영양염류 거동에 대한 이해는 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 하계 동해 남서해역에서 영양염류의 분포 특성을 평가하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구해역

본 연구해역인 동해 남서연안은 하계에 남풍이 우세하고 이로 인하여 연안 용승(coastal upwelling)이 일어난다고 잘 알려져 있다.¹¹⁾ 하계 동해 남부해역에서 수괴 특성을 살펴보면, 중국 양자강 물과 해수가 만나 염분이 낮아진 양자강 희석수(Changjiang Diluted Water)가 우리나라 남해를 거쳐 대한해협을 통과한 후 동한난류를 타고 독도 주변해역까지 영향을 미치고 있는 것을

밝혀냈다.¹²⁾ 또한, 태화강, 낙동강, 형산강, 외황강등이 동해 연안해역에 위치하고 있어 하계 국지성 강우에 의하여 담수 유입의 영향을 받는다. 이와 같이, 하계 다양한 물리적 특성을 보이는 동해 남서해역에서는 다른 해역에 비해 높은 기초생산력을 보인다고 보고되었다.¹³⁻¹⁵⁾

2.2. 현장조사 및 시료분석

본 연구는 2006년 7월 12일부터 15일까지 동해 남서해역에서 동해와 후포 사이 정선 A(5개 정점)와 포항과 울산 사이 정선 B(5개 정점)를 대상으로 국립해양조사원 탐사선인 해양 2000호를 이용하여 해양조사를 실시하였다(Fig. 1). 수온과 염분은 CTD (SBE 911+, Sea-Bird electronics Inc.)을 이용하여 현장에서 측정하였고, 식물플랑크톤의 엽록소(chlorophyll-*a*) 농도를 나타내는 형광(fluorescence)은 형광센서(Seapoint sensors Inc.)로 측정하였으며, 용존산소는 CTD에 부착된 용존산소센서(SBE 43, Sea-Bird electronics Inc.)로 측정하였다. 수온과 염분을 고려한 포화된 산소 농도에서 현장에서 실제 측정된 산소 농도의 차 값으로 겉보기 산소 소비량(AOU; apparent oxygen utilization)을 계산하였다.

영양염류 시료는 다통채수기(Rosette sampler)를 이

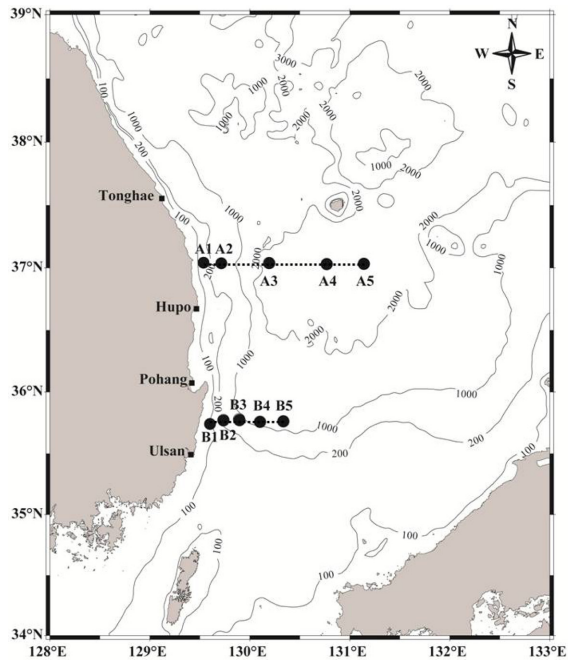


Fig. 1. A map showing sampling stations in the southwestern East Sea. Sampling was conducted from 12 to 15 July 2006.

용하여 정점별 최대수심을 고려하여 최대 13개 수층(0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 500, 1000, 2000 m)에서 채수하였으며, 채수된 시료는 0.7 mm 유리 섬유 여과지(GF/F)를 이용하여 현장에서 바로 여과시킨 후, 폴리프로필렌 병(Nalgene; 125 mL)에 옮겨 분석 전까지 냉동보관(-20°C)하였다. 냉동보관 된 영양염류는 실험실 상온에서 녹인 후, 영양염류 자동분석기(Alliance Instruments, FUTURA + II; Bran+Lubbe Co., TRAACS 2000)를 이용하여 측정하였다. 한편, 본 연구에서 DIN은 질산염 질소(NO_3^-), 아질산염 질소(NO_2^-), 암모니아 질소(NH_4^+)의 합을, DIP는 인산 인(PO_4^{3-})을, DSi (dissolved inorganic silicate)는 규산 규소($\text{Si}(\text{OH})_4$)로 정의하였다. 그리고, 본 연구에서 분석한 영양염류 농도의 신뢰성을 확보하기 위하여, 인증표준물질(CRM, Certified Reference Material)인 MOOS-1 (National Research Council, Canada)을 함께 측정된 결과 오차는 5% 미만이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 동해 남서 해역에서 수온, 염분 분포 특성

A1~A5 (A 정선) 정점들의 표층에서(0-200 m) 수온은 $1.2\sim 20.2^{\circ}\text{C}$ (평균: $9.0\pm 6.8^{\circ}\text{C}$), 염분은 32.00~34.05 (평균: 33.79 ± 0.54) 범위이며, B1~B5 (B 정선) 정점들의 표층에서 수온은 $1.5\sim 22.3^{\circ}\text{C}$ (평균: $13.3\pm 6.6^{\circ}\text{C}$), 염분은 30.31~34.08 (평균: 33.61 ± 0.98) 범위를 보였다. 혼합층(mixed layer)은 10 m 이내를 보

이고, 혼합층에서 200 m 수심까지 수온이 급격히 낮아지는 수온약층(thermocline)을 형성하고 있다(Fig. 2-3). A 정선의 심층에서(>200 m) 수온은 $0.1\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ (평균: $0.3\pm 0.2^{\circ}\text{C}$) 범위이며, B 정선의 심층에서 수온은 $0.2\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ (평균: $0.4\pm 0.2^{\circ}\text{C}$) 범위를 보였다. 모든 정점 심층에서 수온은 1°C 이하이고, 염분은 34.07로 균일한 분포를 보였다.

A와 B 정선의 표층에서 수온과 염분은 연안 정점(A1, A2, B1, B2)에서 외양 정점(A3, A4, A5, B3, B4, B5)보다 낮았다. 특히, B 정선의 연안 정점(B1, B2) 0 m 에서 가장 낮은 염분(30.31)을 보였다(Fig. 2-3). 동해 염분의 변화는 국지적 강우량 및 양자강 담수 유출의 주 원인으로 잘 알려져 있다.¹⁶⁻¹⁷⁾ 특히, 하계 국지적 강우로 인한 양자강 범람으로 하구를 통해 유출된 강물이 동중국해 해역으로 흘러 들어와 고 염분 특성으로 보이는 대마난류와 섞여 북상하면서 동해로 유입되는데 염분이 급격히 낮아져 33.00이하가 되며 30.00까지 낮아지는 경우도 보고되었다.¹⁷⁾ 또한, 동해 연안해역에 위치한 강들(울산 대화강, 부산 낙동강, 포항 형산강)은 국지적 강우에 의한 담수의 유입으로 염분이 낮아질 가능성도 크다. 기상청 자료에 의하면, 2006년 7월 한 달간 총 강우량은 울산에서 543 mm, 부산에서 592 mm, 포항에서 577 mm을 보였고, 본 연구 조사시기 때 관측된 강우량은 울산에서 17 mm, 부산에서 8 mm, 포항에서 27 mm로, 7월 총 강우량에 5% 미만의 양이 내렸다. 이는, 국지적 강우에 의한 동해 연안으로 직접적인 담수의 유입은 크지 않을 것

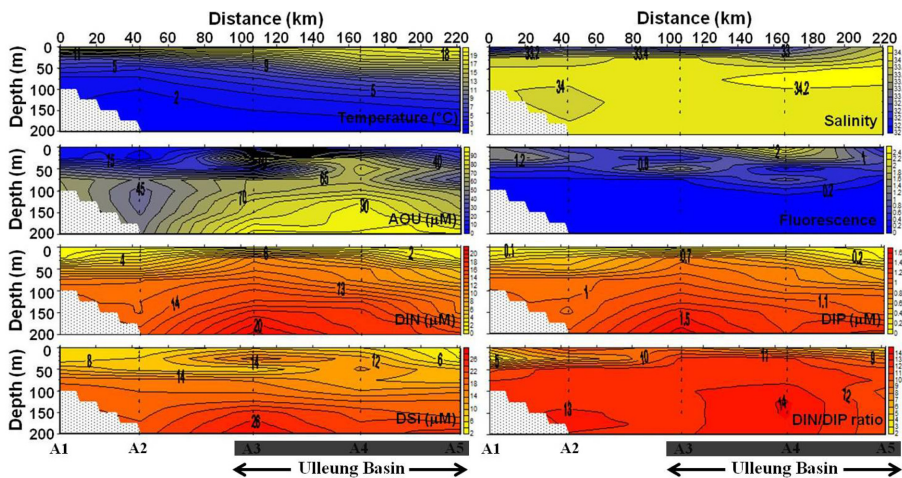


Fig. 2. Horizontal and vertical distributions of potential temperature, salinity, apparent oxygen utilization (AOU), fluorescence, dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolve inorganic phosphate (DIP), dissolved inorganic silicate (DSi), and DIN/DIP ratio along the A transect of the East Sea.

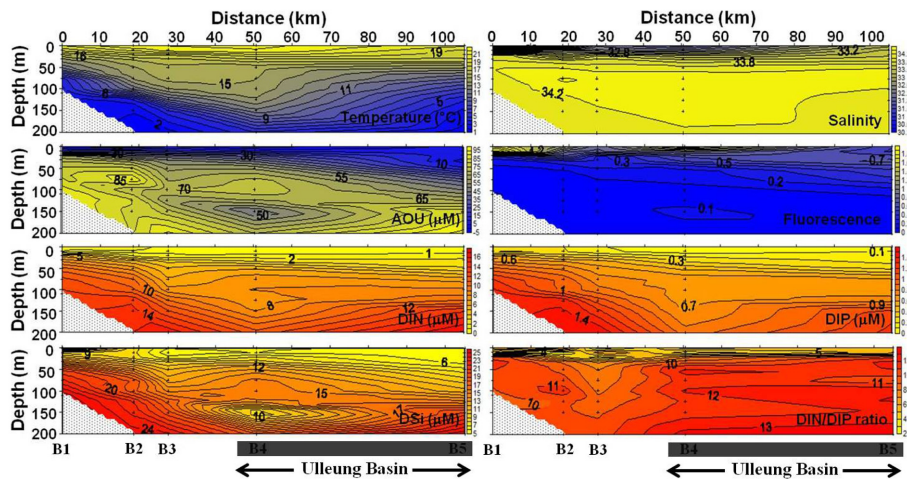


Fig. 3. Horizontal and vertical distributions of potential temperature, salinity, apparent oxygen utilization (AOU), fluorescence, dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolve inorganic phosphate (DIP), dissolved inorganic silicate (DSi), and DIN/DIP ratio along the B transect of the East Sea.

으로 판단된다. 따라서, 본 연구지역인 하계 동해 남서해역에서 34보다 낮은 염분은 계절적 특성으로 나타나는 양자강 희석수에 의한 영향이 더 우세한 것으로 판단된다.

A와 B 정선의 연안정점(A1, B1) 20~100 m에서 다른 정점에 비하여 최대 10°C 낮은 수온을 보였고, 염분 역시 심층 평균값과 유사하였다(Fig. 2-3). 하계 동해에서는 동해의 지형적인 특성, 남서풍의 영향, 남동해역의 강한 해류의 요인으로 용승이 일어난다고 잘 알려져 있다.¹⁸⁻²⁰⁾ 이전 연구 결과를 토대로 본 연구해역의 연안정점에서 보여지는 낮은 수온은 용승에 의해 기인한 것으로 판단된다.

3.2. 동해 남서해역에서 AOU, fluorescence, 영양염류 분포 특성

A 정선의 표층에서 AOU는 -26~96 μM (평균: $45 \pm 32 \mu\text{M}$), fluorescence는 0.04~2.48 (평균: 0.60 ± 0.06) 범위이며, B 정선의 표층에서 AOU는 -4~97 μM (평균: $50 \pm 31 \mu\text{M}$), fluorescence는 0.04~2.12 (평균: 0.39 ± 0.39) 범위이다(Fig. 2-3). A 정선의 심층에서 AOU는 134~161 μM (평균: $150 \pm 12 \mu\text{M}$) 범위이며, B 정선의 심층에서 AOU는 123~159 μM (평균: $139 \pm 14 \mu\text{M}$) 범위를 보였다. AOU의 수직적 분포는 수심이 깊어질수록 농도가 증가하는 경향을 보인다. 이는 수심이 깊어질수록 유기물 분해에 따른 재광물화 과정이 활발히 일어나고 있음을 보여준다. 모든 정점 심층에서 fluorescence는 0.04로 균일한 분포를 보였다.

A 정선의 표층에서 DIN은 0.1~21.4 μM (평균: $8.5 \pm 6.3 \mu\text{M}$), DIP는 0.02~1.66 μM (평균: $0.70 \pm 0.47 \mu\text{M}$), DSi는 3~28 μM (평균: $13 \pm 7 \mu\text{M}$) 범위이며, B 정선의 표층에서 DIN은 0.1~17.2 μM (평균: $6.6 \pm 5.1 \mu\text{M}$), DIP는 0.04~1.50 μM (평균: $0.64 \pm 0.44 \mu\text{M}$), DSi는 5~26 μM (평균: $13 \pm 6 \mu\text{M}$) 범위이다(Fig. 2-3). A 정선의 심층에서 DIN은 21.9~23.9 μM (평균: $23.1 \pm 0.6 \mu\text{M}$), DIP는 1.90~2.09 μM (평균: $2.04 \pm 0.07 \mu\text{M}$), DSi는 41~90 μM (평균: $68 \pm 20 \mu\text{M}$) 범위이며, B 정선의 심층에서 DIN은 21.5~23.8 μM (평균: $22.6 \pm 1.0 \mu\text{M}$), DIP는 1.55~2.17 μM (평균: $1.84 \pm 0.23 \mu\text{M}$), DSi는 40~80 μM (평균: $56 \pm 16 \mu\text{M}$) 범위이다(Fig. 4). DIN, DIP, DSi의 농도는 수심이 깊어질수록 증가하는 경향을 보였고, 이는 일반적으로 대양에서 나타나는 수직적 분포와 일치하였다. DIN과 DIP의 농도가 수직적으로 급격하게 차이가 나는 수심과 수온약층과 잘 일치하였다. DSi는 상대적으로 DIN과 DIP에 비해 분해 속도(degradation rate)가 느리기 때문에, 수온약층 아래에서 더 급격한 농도변화를 보인다.

본 연구에서의 하계 동해 남서해역 전체 DIN:DIP비 값은 12.1로 Redfield 비(16)보다 낮은 값을 보였다(Fig. 5). 이전 연구 결과를 살펴보면, 동해 해수 중 DIN:DIP비 값은 11.3~15.8 범위로 시공간적 변화에 따라 다양한 값을 보였지만, Redfield 비 값보다는 낮은 값을 보였다.^{7,21-24)} 최근, Kim and Kim⁷⁾에 의하면, 기존의 확실한 탈질산화 과정에 의해 낮은 DIN:DIP비

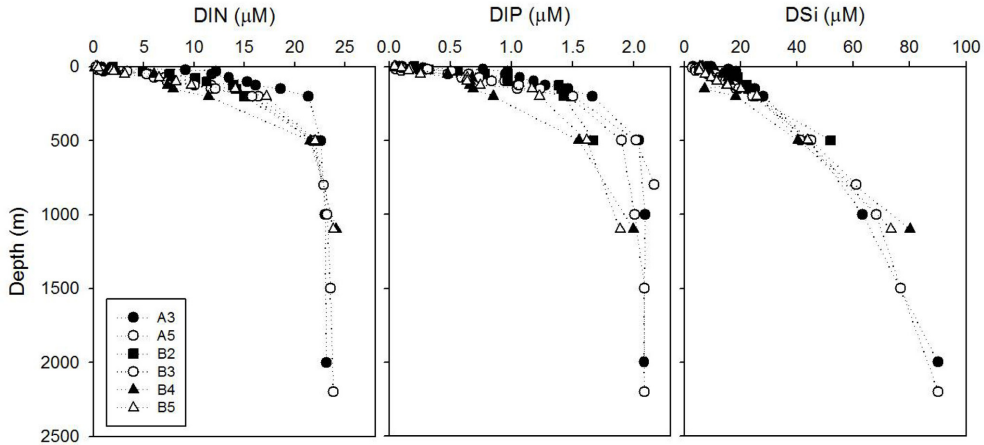


Fig. 4. Vertical profiles of dissolved inorganic nitrogen (DIN), phosphate (DIP), and silicate (DSi) for the entire depth of the southwestern East Sea.

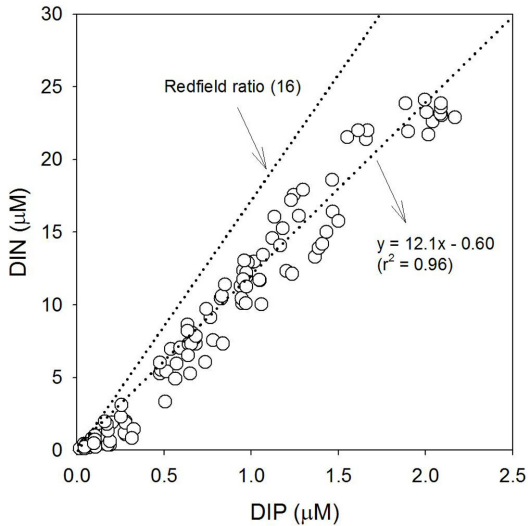


Fig. 5. Relationship between dissolved inorganic nitrogen (DIN) and phosphate (DIP) for the entire depth of the southwestern East Sea.

값을 설명하기에는 동해 심층에서 용존산소 농도가 다른 대양에 비해 높기 때문에 이러한 한계점을 인식하고, 물리적 혼합과정과 입자물질의 재결정과정만을 고려한 간단한 박스모델을 이용하여 DIN:DIP비 값을 계산하였고, 실제 관측된 값과 일치하는 결과를 보여줌으로써 동해의 낮은 DIN:DIP비 값을 설명하였다.

A와 B 정선의 혼합층 내에서의 DIN은 $2 \mu\text{M}$ 이내, DIP는 $0.3 \mu\text{M}$ 이내의 매우 낮은 농도 범위를 보여 영양염류가 고갈된 상태이지만, fluorescence은 매우 높은 수준을 보였다(Fig. 2-3). 영양염류에 따른 fluorescence의 상관관계를 살펴보면, DIN는 DIP와 DSi에 비해

fluorescence 농도가 증가할수록 지수함수적으로 감소하는 경향을 보였다(Fig. 6). 이는 DIN이 DIP와 DSi에 비해 상대적으로 생물활동에 의한 소모가 많음을 알 수 있다. 특히, DIN:DIP비 값이 감소할수록 fluorescence 농도가 증가하는 경향은 동해 남서 해역에서 DIN이 매우 고갈된 환경임을 제시한다(Fig. 6).

본 연구에서 혼합층 내에서 fluorescence 최대값을 보였다(Fig. 2-3). Rho et al.²⁵⁾는 여름철 동해 울릉 분지의 엽록소 최대층이 30~40 m에서 나타났다고 보고하였다. 이전 결과와 비교해 보았을 때, 본 연구 시기에는 상대적으로 낮은 수심에서 fluorescence 최대값이 관측되었다. 또한, Kwak et al.¹⁵⁾은 동해 울릉 분지에서 기초생산력($270 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)이 가장 높고, 계절적 변화를 살펴볼 때 여름철에 기초생산력이 다른 계절에 비하여 높음을 보고하였다. 여름철 동해 표층수에 영양염류가 고갈됨에도 불구하고 기초생산력이 높은 이유는 영양염류 공급이 계속 있기 때문이다. 이에 Rho et al. (2012)²⁵⁾는 대마난류표층수, 대마난류중층수, 동한난류, 북한한류수등과 같은 해류와 연안 용승, 그리고 울릉 난수성 소용돌이 등의 물리적인 현상들로 설명하였다.

본 연구에서 수온의 수평적, 수직적 분포를 보았을 때, 동해 남서 해역에서 연안 용승 현상이 뚜렷이 나타났다(Fig. 2-3). 연안 용승이 발생하는 곳에서는 AOU 농도가 상대적으로 높고, 영양염류 농도 역시 높아짐을 알 수 있다. Won and Lee²⁶⁾은 여름철 연안 용승에 의해서 표층수로 공급된 영양염류에 의해서 식물플랑크톤의 증식이 일어났다고 보고하였다. 따라서, 본 연

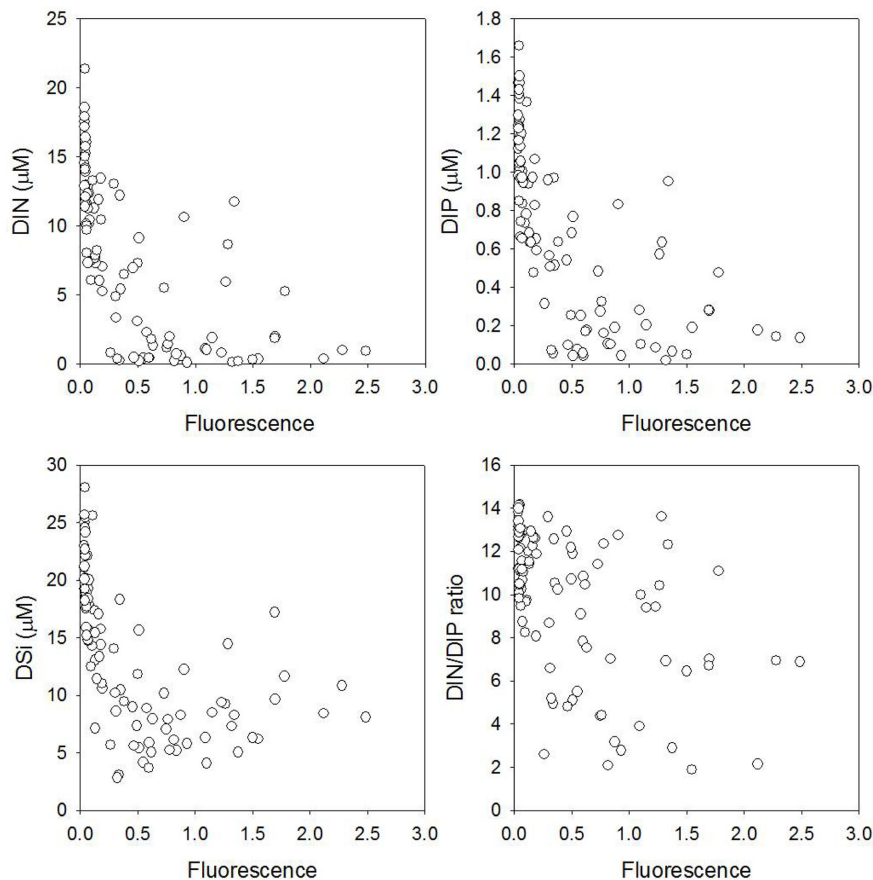


Fig. 6. Plots of fluorescence versus (a) dissolved inorganic nitrogen (DIN), (b) dissolve inorganic phosphate (DIP), (c) dissolved inorganic silicate (DSi), and (d) DIN/DIP ratio in the surface layer (0 - 200 m) of the southwestern East Sea.

구에서는 연안 용승이 고갈된 표층에 영양염류를 공급하여 연안의 일차생산을 강화시키는 것으로 생각된다.

이전의 연구결과에 의하면, 대마난류표층수의 수괴특성은 수온은 $>18.42^{\circ}\text{C}$ 범위를 보이고, 염분은 <33.87 범위를 보였다.^{21,24,27} 본 연구에서 수온과 염분의 표층 분포를 보았을 때 이전 연구결과와 매우 유사하므로, 동해 남서해역에서 대마난류표층수 영향을 보여준다. 일반적으로 동해 여름철 수온약층 상부에 나타나는 대마난류표층수와 섞여 유입된다고 잘 알려져 있다.²⁷ Onitusuka et al.²⁸은 동해의 표층수로 공급되는 영양염류의 주 기원은 동해남부해역에서 기인한다고 보고하였다. 여름철에 높은 DIN:DIP비 값(50~100)을 보이는 양자강 유출수에 의해 동해로 유입되는 해수의 DIN:DIP비 값은 높아질 수 있지만,⁶ 본 연구에서 혼합

층 내의 DIN:DIP비 값은 10이하인 값을 보였다. 이는 대한해협을 통과하여 동해로 유입되는 해수의 DIN:DIP비 값이 10이하이고,²⁹ 동해 혼합층 내에서도 역시 낮은 DIN:DIP비 값(<10)을 보인다는 결과와 유사하였다.⁷ 이와 같이, DIN:DIP비 값으로 보았을 때, 동해 해수 중 영양염류가 고갈된 상태임을 보여주지만, 염분 30~31 구간 내에서 DIN, DIP, DSI는 상대적으로 높은 농도 값을 보였다(Fig. 7). 이는 육상 기원의 영양염류의 유입이 있을 것으로 판단된다. 본 연구시기에 강우량이 낮을지라도 강으로부터 동해 남서해역으로 영양염류의 공급은 간과할 수 없다. 그렇지만 하계 동해 남서해역에서 30.31의 낮은 염분은 양자강 희석수의 가능성이 높기 때문에, 영양염류 역시 양자강으로부터 공급될 가능성이 더 높을 것으로 판단된다. 이와 연계하여, A와 B 정선에서 각각 염분과 fluorescence는 음의 상관관계

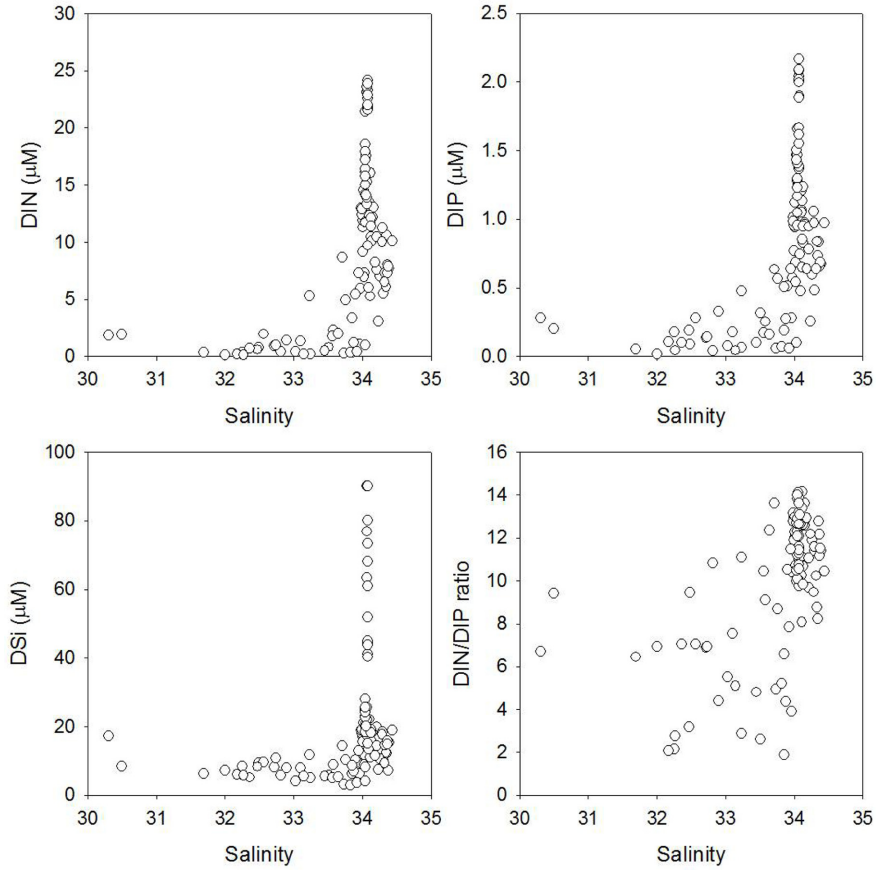


Fig. 7. Plots of salinity versus (a) dissolved inorganic nitrogen (DIN), (b) dissolve inorganic phosphate (DIP), (c) dissolved inorganic silicate (DSi), and (d) DIN/DIP ratio in the entire depth of the southwestern East Sea.

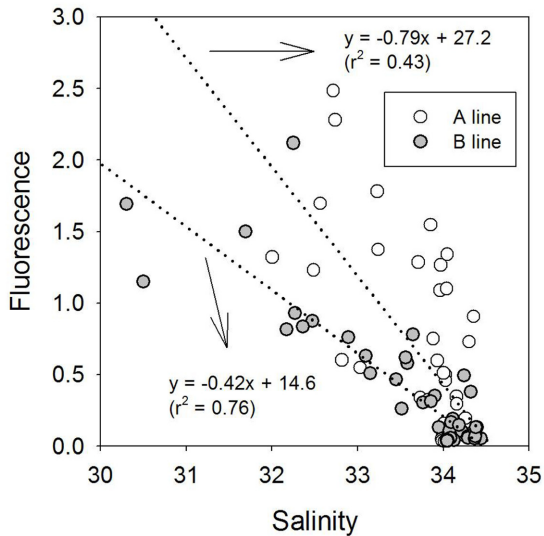


Fig. 8. Relationship between salinity and fluorescence in the surface layer (0-200 m) of the southwestern East Sea.

를 보였고(Fig. 8), 여름철 양자강에서부터 유입된 영양염류는 동해 남서해역의 높은 일차생산력을 유지할 수 있는 중요한 요인으로 판단된다.

4. 결 론

여름철 동해 남서해역에서 영양염류 분포 특성을 파악하였다. 영양염류의 수직적 분포는 다른 대양과 마찬가지로 수심이 깊어질수록 증가하는 일반적인 경향을 보였고, DIN:DIP비 값은 Redfield비 값에 비해 낮은 값(12.1)을 보였다. 동해 표층수 내에서 DIN농도가 DIP와 DSi농도에 비해 fluorescence 농도가 증가할수록 지수함수적으로 감소하는 경향을 보여, 동해는 질산염이 제한된 환경임을 보여준다. 혼합층 내에서 영양염류 농도가 매우 낮았음에도 불구하고 fluorescence 농도가 높았다. 이는, 연안 용승과 저염분의 특성을 보이는 대마난류표층수에 의해 영양염류가 지속적으로 공

급되어졌기 때문에 판단된다. 특히, 염분 30~31 구간에서 상대적으로 높은 영양염류의 농도를 보이고, 표층수 내에서 염분과 fluorescence는 음의 상관관계를 보여, 양자강 희석수 기원의 표층수가 여름철 식물플랑크톤 성장을 위한 영양염류의 중요한 공급원일 것으로 판단된다. 향후, 동해로 유입되는 영양염류의 기원을 정확히 파악하기 위해서 안정동위원소인 ^{15}N 과 ^{13}C 연 구도 함께 수행해야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 제주대학교 학술연구지원 사업에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. Y. H. Ahn, P. Shanmugam, J. E. Moon, and J. H. Ryu, "Satellite remote sensing of a low-salinity water plume in the East China Sea", *Annals of Geophysics*, **2008**, 26, 2019-2035.
2. K. Kim, K.-R. Kim, D. H. Min, Y. Volkov, J. H. Yoon, and M. Takematsu, "Warming and structural changes in the East (Japan) Sea: A clue to future changes in global oceans?", *Geophysical Research Letters*, **2001**, 28(17), 3293-3296.
3. D. Tilman, "Resource Competition and Community Structure". Princeton University Press, Princeton, New Jersey, **1982**, 296.
4. K. R. Arrigo, "Marine microorganisms and global nutrient cycles", *Nature*, **2004**, 437, 349-355.
5. T. H. Kim, Y. W. Lee, and G. Kim, "Hydrographically mediated patterns of photosynthetic pigments in the East/Japan Sea: Low N:P ratios and cyanobacterial dominance", *Journal of Marine Systems*, **2010**, 82, 72-79.
6. J. Y. Lee, D. J. Kang, I. N. Kim, T. Rho, T. Lee, C. K. Kang, and K. R. Kim, "Spatial and temporal variability in the pelagic ecosystem of the East Sea (Sea of Japan): A review", *Journal of Marine Systems*, **2009**, 78, 288-300.
7. T. H. Kim and G. Kim, "Factors controlling the C:N:P stoichiometry of dissolved organic matter in the N-limited, cyanobacteria-dominated East/Japan Sea", *Journal of Marine Systems*, **2013**, 115-116, 1-9.
8. L. D. Talley, P. Tishchenko, V. Luchin, A. Nedashkovskiy, S. Sagalae, D. J. Kang, M. Warner, and D. H. Min, "Atlas of Japan (East) Sea hydrographic prop-

- erties in summer, 1999", *Progress in Oceanography*, **2004**, 61, 277-348.
9. T. Lee, I. N. Kim, D. J. Kang, and D. Kim, "Implications of deep nitrite in the Ulleung Basin", *Journal of the Korean Society of Oceanography*, **2007**, 12(3), 239-243.
10. T. W. Kim, K. Lee, R. G. Najjar, H. D. Jeong, and H. J. Jeong, "Increasing N abundance in the northwestern Pacific Ocean due to atmospheric nitrogen deposition", *Science*, **2011**, 334, 505-509.
11. S. K. Byun, "Sea surface cold water near the southeastern coast Korea: wind effect", *Journal of the Korean Society of Oceanography*, **1989**, 24(3), 121-131
12. H. D. Jeong, S. W. Kim, J. W. Lim, Y. K. Choi, and J. H. Park, "Time-series variation of sea surface salinity in the Southwestern East Sea", *Journal of the Korean Society of Oceanography*, **2013**, 18(4), 163-177.
13. K. Yamada, J. Ishizaka, and H. Nagata, "Spatial and temporal variability of satellite primary production in the Japan Sea from 1998 to 2002", *Journal of Oceanography*, **2005**, 61, 857-869.
14. S. Yoo and J. Park, "Why is the southwest the most productive region of the East Sea/Japan Sea", *Journal of Marine Systems*, **2009**, 78, 301-315.
15. J. H. Kwak, S. H. Lee, H. J. Park, E. J. Choy, H. D. Jeong, K. R. Kim, and C. K. Kang, "Monthly measured primary and new productivities in the Ulleung Basin as a biological "hot spot" in the East/Japan Sea", *Biogeosciences*, **2013**, 10, 4405-4417.
16. Y. Q. Kang and M. S. Jin, "Annual variation of salinity in the neighbouring seas of Korea", *Journal of the Korean Society of Oceanography*, **1984**, 19, 105-110.
17. NFRDI, "Oceanographic Handbook of the Neighbouring Seas of Korea, 4th edition", Yemooon Press, **2001**, 436.
18. J. C. Lee, "Variations of sea level and sea surface temperature associated with wind induced upwelling in the southeast coast of Korea in summer", *Journal of the Korean Society of Oceanography*, **1983**, 18, 149-160.
19. 이동규, "감포 울기 연안해역에서 발생하는 냉수대 현상과 해상풍과의 관계", *한국수산학회지*, **1998**, 31(3), 359-371.
20. 김대현, "한국 남동해역의 해류 구조와 연안용승", 이학박사학위논문, 부경대학교, **2008**, 72.
21. H. S. Yang, S. S. Kim, C. G. Kang, and K. D. Cho, "A study on sea water and ocean current in the sea adjacent to Korea Peninsula. . Chemical characteristics of water masses in the polar front area of the central Korean East Sea", *Journal of the Korean Fisheries Society*, **1991**, 24(3), 185-192.

22. T. Yanagi, "Water, salt, phosphorus and nitrogen budgets of the Japan Sea", *Journal of Oceanography*, 2002, 58, 797-804.
23. D. J. Kang, K. E. Lee, and K. R. Kim, "Recent development in chemical oceanography of the East (Japan) Sea with an emphasis on CREAMS finding: A review", *Geosciences Journal*, **2003**, 7(2), 179-197.
24. H. K. Kwon, S. J. Oh, M. O. Park, and H. S. Yang, "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", *Journal of the Korean Society for Marine Environment Engineering*, **2014**, 17(2), 90-103.
25. T. K. Rho, T. S. Lee, G. B. Kim, K. I. Chang, T. H. Na, and K. R. Kim, "Prevailing subsurface chlorophyll maximum (SCM) layer in the East Sea and its relation to the physico-chemical properties of water masses", *Ocean and Polar Research*, **2012**, 34(4), 413-430.
26. J. H. Won and Y. W. Lee, "Spatiotemporal variations of marine environmental parameter in the South-western region of the East Sea", *Journal of the Korean Society of Oceanography*, **2015**, 20(1), 16-28.
27. C. K. Park, "Chemical oceanographic aspect of the cold water mass in offshore of the east coast of Korea", *Bulletin of the Korean Fisheries Society*, **1978**, 11(2), 49-54.
28. G. Onitsuka, Y. Tetsuo, and J. H. Yoon, "A numerical study on nutrient sources in the surface layer of the Japan Sea using a coupled physical-ecosystem model", *Journal of Geophysical Research*, **2007**, doi:10.1029/2006JC003981.
29. J. Zhang, S. M. Liu, J. L. Ren, Y. Wu, and G. L. Zhang, "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", *Progress in Oceanography*, **2007**, 74(4), 449-478.