

황해의 무광대에서 식물플랑크톤에 의한 질소 섭취율은 상당한가?

박명길^{1,*} · 양성렬² · 심재형¹ · 정창수³ · 홍기훈³ · 배세진³ · 양동범³

¹서울대학교 지구환경과학부 및 해양연구소

²광주대학교 토목환경공학부

³한국해양연구원 지구환경연구본부

*현재 주소: 군산대학교 적조연구센터

Is Nitrogen Uptake Rate by Phytoplankton below the Euphotic Zone in the Yellow Sea Considerable?

MYUNG GIL PARK^{1,*}, SUNG RYULL YANG², JAE HYUNG SHIM¹, CHANG SOO CHUNG³, GI HOON HONG³,
SE JIN PAE³ AND DONG BEOM YANG³

¹School of Earth and Environmental Sciences and Research Institute of Oceanography, Seoul National University,
Seoul 151-742, Korea

²Division of Civil and Environmental Engineering, Kwangju University, Kwangju 503-703, Korea

³Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

*Current address: Red Tide Research Center, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

황해 대륙붕 해역의 전 수주(whole water column)의 질소 섭취율 중 무광대(aphotic zone)내 식물플랑크톤에 의한 질소 섭취율의 기여도를 파악하기 위하여 상부의 유광대(euphotic zone)와 하부의 무광대에서 식물플랑크톤에 의한 질소 섭취율의 크기를 측정하였다. 1997년 5월과 11월에 유광대와 무광대에서 일정량의 해수를 채취하여 선상에서 식물플랑크톤의 질산염과 암모늄 섭취율 측정을 ¹⁵N으로 표지하여 추적하였다. 전 유광대내의 질산염 및 암모늄 섭취율은 각각 1.8~15.3 mg N m⁻² d⁻¹과 5.0~132.2 mg N m⁻² d⁻¹의 범위이며, 대체로 암모늄 섭취율이 질산염 섭취율보다 우세하였다(1.9~19.4배). 전 수주내의 질산염 및 암모늄 섭취율은 각각 2.9~22.0 mg N m⁻² d⁻¹과 15.7~175.5 mg N m⁻² d⁻¹의 범위를 나타냈다. 전 수주내의 총 질소 섭취율 중 무광대의 식물플랑크톤에 의한 질소 섭취율이 차지하는 비율은 질산염의 경우에 13.0~86.2%, 암모늄의 경우에는 13.8~67.8%로서, 무광대에서 식물플랑크톤에 의한 질소 섭취가 상당함이 발견되었다. 본 연구의 결과는 무광대내에서 상당한 양으로 활발하게 질소를 섭취하는 식물플랑크톤이 물리적 작용들(예를 들면, 와류 혼합, 수온약층의 수직이동 등)에 의해 유광대로 다시 편입(entrainment)될 경우 유광대의 물질 순환에 크게 기여할 가능성이 있음을 시사한다. 그리고, 본 연구 결과는 황해에서 신생산(new production)의 크기가 질산염 섭취로만 추정될 경우 과소평가될 가능성이 있으며, 암모늄 섭취에 기초한 재생산(regenerated production)의 일부가 신생산에 포함되어야 함을 제시한다.

To determine whether nitrogen (N) uptake by phytoplankton below the euphotic zone in the Yellow Sea is considerable, we measured the uptake rates of nitrate and ammonium using ¹⁵N-labeled stable isotope K¹⁵NO₃ and ¹⁵NH₄Cl, in May and November 1997 at total 10 stations. Depth-integrated uptake rates of nitrate and ammonium over the euphotic zone during this study ranged from 1.8 to 15.3 mg N m⁻² d⁻¹ and from 5.0 to 132.2 mg N m⁻² d⁻¹, respectively, and ammonium uptake predominated at 9 of 10 stations (1.9–19.4 fold). Depth-integrated uptake rates of nitrate and ammonium over the whole water column ranged from 2.9 to 22.0 mg N m⁻² d⁻¹ and from 15.7 to 175.5 mg N m⁻² d⁻¹, respectively. The significant proportion of whole water column N uptake was attributed to uptake by phytoplankton below the euphotic zone, ranging from 13.0 to 86.2% for nitrate and from 13.8 to 67.8% for ammonium, indicating that phytoplankton N uptake below the euphotic zone is at times considerable in the study area. The results suggest that when phytoplankton below the euphotic zone in the Yellow Sea are again entrained into the euphotic zone by a certain physical forcing such as turbulent mixing and the vertical movement of thermocline, these episodic events may significantly affect the material fluxes within the euphotic zone. Furthermore, the results suggest that a portion of regenerated production estimated from ¹⁵N-ammonium uptake should be included in new production estimates, which otherwise could be underestimated in the Yellow Sea.

Key words: New production, Regenerated production, Yellow Sea, Aphotic zone, Nitrogen uptake

*Corresponding author: myungpark@kunsan.ac.kr

서 론

신생산(new production) 및 재생산(regenerated production)은 총 일차생산 중 주어진 해양의 유광대(euphotic zone)내의 외부로부터 공급되는 가용 질소원(주로 질산염)과 유광대내에서 재순환되는 질소원(주로 암모늄 및 요소 질소)에 의해 유지되는 각각의 일차생산으로 정의된다(Dugdale and Goering, 1967; Eppley and Peterson, 1979). 이러한 신생산과 재생산 개념은 질소계 영양염, 식물플랑크톤 일차생산 및 수출생산(export production) 등을 포함한 지구 표면의 화학원소들의 생지화학적 순환에서 서로간에 밀접한 연결고리를 이해하는데 있어서 중심적인 역할을 담당한다.

Dugdale and Goering(1967)에 의해 신생산 개념이 도입된 이후로 다양한 시, 공간적 규모에서 신생산 크기를 정확하게 추정할 수 있는 여러 방법들이 제시되고 그의 제한성 등이 토의되어 왔다(예를 들면, Eppley, 1989; Platt *et al.*, 1992). 그리고 식물플랑크톤에 의해 섭취된 질산염 및 암모늄이 용존유기질소(dissolved organic nitrogen)로 식물플랑크톤 체외로 배출되거나(Bronk *et al.*, 1994; Bronk and Ward, 1999), 질산염 섭취동안 아질산염(nitrite)으로 분비(Collos, 1998), 배양과정동안 위의 기작들로 인해서 생길 수 있는 ¹⁵N으로 표지된 안정동위원소의 희석(Glibert *et al.*, 1982), 그리고 식물플랑크톤의 질소 섭취의 일주기성(Cochlan *et al.*, 1991; Park *et al.*, 1997) 등과 같은 방법론적 혹은 자연 현상들에 대한 더 깊은 이해는 신생산의 크기를 정확하게 추정하는데 크게 기여하였다.

한편, 황해 중앙부 해역에서는 시공간적으로 수온약층(thermocline)이 잘 형성되어 온도가 높고 태양광이 풍부하고 영양염류 함량이 적은 상부혼합층(upper mixed layer)과 온도가 낮고 태양광이 거

의 도달하지 않고 영양염 함량이 많은 하부층(bottom layer)이 밑도차에 의하여 수직적으로 분리가 된다(Chung *et al.*, 1991; Hong *et al.*, 1993). 그리고, 표면혼합층 내부 또는 그 이하에 표면하 엽록소극대층(subsurface chlorophyll maximum layer)이 잘 발달하는 특성을 보인다. 그리고 수온약층 및 표면하 엽록소극대층이 종종 유광대의 하단 혹은 그 아래의 무광대(aphotic zone) 수심에서 발달하는 것이 보고되어 왔다(최, 1991; Chung *et al.*, 1991). 이러한 현상들은 무광대 수심에 존재하는 식물플랑크톤이 활발하게 질소를 섭취할 가능성을 시사한다고 볼 수 있는데, 현재까지 이에 대한 자세한 연구가 미흡한 실정이다. 본 연구의 목적은 춘, 추계에 황해의 유광대 및 무광대에서 식물플랑크톤에 의한 질산염 및 암모늄 섭취율을 측정함으로써, 전 수주(whole water column)의 질소 섭취율중 무광대내에 존재하는 식물플랑크톤에 의한 질소 섭취의 기여도를 파악하는 것이다.

재료 및 방법

연구해역 및 채수

계절적으로 성층이 발달하는 황해 중앙부 해역에서 1997년 5월과 11월 각각 5개의 정점에서(Fig. 1) 로켓트형 채수기에 부착된 CTD(SBE-911)와 10 l 니스킨 채수기를 이용하여 수온과 염분의 수직분포를 관측하였고, 해수중의 영양염류, 엽록소 *a* 및 식물플랑크톤 질소섭취 배양실험을 위한 해수를 채취하였다. 해수 시료는 유광대 하단의 깊이(Z_c)를 Secchi disc depth에 2.7을 곱하여 추정된 후(Poole and Atkins, 1929), 유광대와 무광대의 5-8개 수심에서 채취하였다. 상부 혼합층 하단의 깊이(Z_m)는 임의적으로 표층과 밀도차($\sigma-t$)가 0.05 이하인 깊이로서 정의하였다(Levitus, 1982).

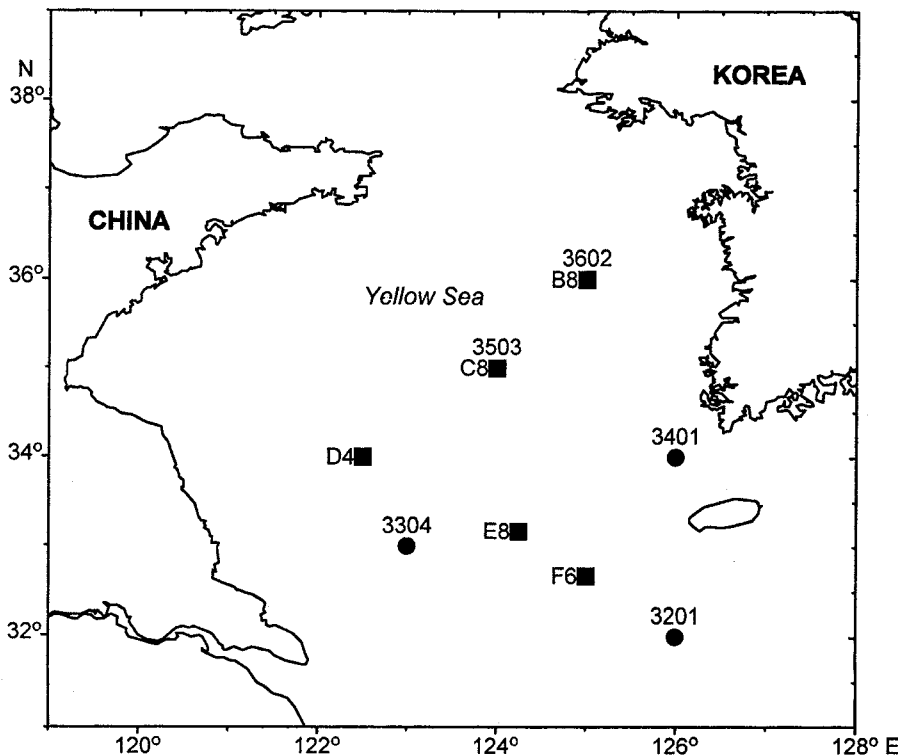


Fig. 1. Map showing the sampling stations(stns) in May(●) and November(■) 1997. Note that stns 3503 and 3602 in May are the same with stns C8 and B8 in November, respectively.

식물플랑크톤의 질산염 및 암모늄 섭취율 측정

식물플랑크톤에 의한 질산염 및 암모늄 섭취율은 안정동위원소 ¹⁵N을 추적자로 이용하여 측정하였다(Dugdale and Wilkerson, 1986). 해수 시료를 250 ml 폴리카보네이트 병(배양병)에 넣은 후 최종농도가 각각 1 μM과 0.2 μM이 되도록 K¹⁵NO₃ 또는 ¹⁵NH₄Cl(all 99.3 atom% ¹⁵N; Cambridge Isotope Lab., Woburn, MA, USA)를 첨가하였다. 해수시료가 채취된 수심의 빛 조건을 모사하기 위해 레이저 천공 니켈 스크린(Stork Veco, Bedford, MA, USA)이나 검정 테이프를 감쌌다. 배양병은 선상에 위치한 아크릴 재질의 배양수조에서 표면해수로 수온을 조정하면서 4시간동안 배양하였다. 본 연구에서 사용된 이 배양시간은 배양시간 동안 동위원소 희석 및 초기 빠른 섭취 효과 등과 관련된 문제들을 최소화하기 위해 채택되었다(Dugdale and Wilkerson, 1986).

질소섭취 실험전에 선상에서 질소계 영양염 농도를 분석할 수 없었기 때문에, 모든 시료에 동일하게 첨가된 동위원소로 표시된 질소 추적자의 양은 원래 해수 농도의 10%이내에 해당하는 소량으로 국한 할 수 없었다. 1997년 5월의 질산염 섭취율 실험에서는 동위원소로 표시된 질산염의 첨가량이 원래 해수 농도의 18%에서 100%이상까지를 나타냈고, 암모늄 섭취 실험에서는 15%에서 100%이상까지를 나타냈다. 1997년 11월에는 질산염 섭취 실험에서 원래 해수 농도의 9%에서 100%이상까지, 암모늄 섭취 실험에서는 11~44%까지 동위원소가 첨가되었다. 배양 후 450°C에서 4시간 동안 미리 연소시킨 Whatman GF/F 여과지(직경 25 mm)에 시료를 여과하여(<100 mm Hg) 여과지는 선상에서 60°C로 건조하여 보관하였다. 여과지에 걸린 식물플랑크톤의 ¹⁵N/¹⁴N비는

Europa Roboprep-Tracermass GC-MS로 분석(Owens, 1988)하였다. 절대 질소 섭취율(absolute N uptake rate)은 Dugdale and Wilkerson (1986)의 식을 이용하여 계산하였다. 본 배양실험중 일부 시료에 과잉으로 ¹⁵N으로 표시된 질소계 영양염이 첨가된 효과는 질소 섭취율 계산시 Eppley *et al.*(1977)를 따라서 질소 섭취율을 보정하였다. 또한, 시료의 배양시 본 연구에서는 해표면 해수로 수온을 조절하였기 때문에 수온이 해표면보다 낮은 일부 시료의 질소 섭취율을 Cho *et al.*(2001)를 따라서 현장 수온을 고려하여 보정하였다.

영양염 및 엽록소 a 농도 측정

영양염은 시료를 Whatman GF/F 여과지로 여과한 후, 그 여과를 냉동저장 보관한 다음 나중에 Parsons *et al.*(1984)를 따라서 Technicon II AutoAnalyzer 또는 Bran+Luebbe AutoAnalyzer (Model TRAACS 2000)를 이용하여 분석하였다. 엽록소 a 농도는 Whatman GF/F 여과지에 일정량의 시료를 여과한 후 분광광도법 (Parsons *et al.*, 1984)으로 분석하였다.

결 과

수리적 특성, 엽록소 a 및 영양염 농도

1997년 5월과 11월에 각 정점에서 수온과 염분의 수직분포를 Fig. 2에 나타내었다. 5월에는 수온약층은 발달되어 있으나 수온약층의 강도와 깊이는 정점별로 차이가 있었다. 두 정점 3201과 3401에서는 수온약층이 유광대내 10~20 m 수심역에 존재한 반면, 다른 3개 정점들에서는 유광대의 아래쪽 또는 유광대의 기저

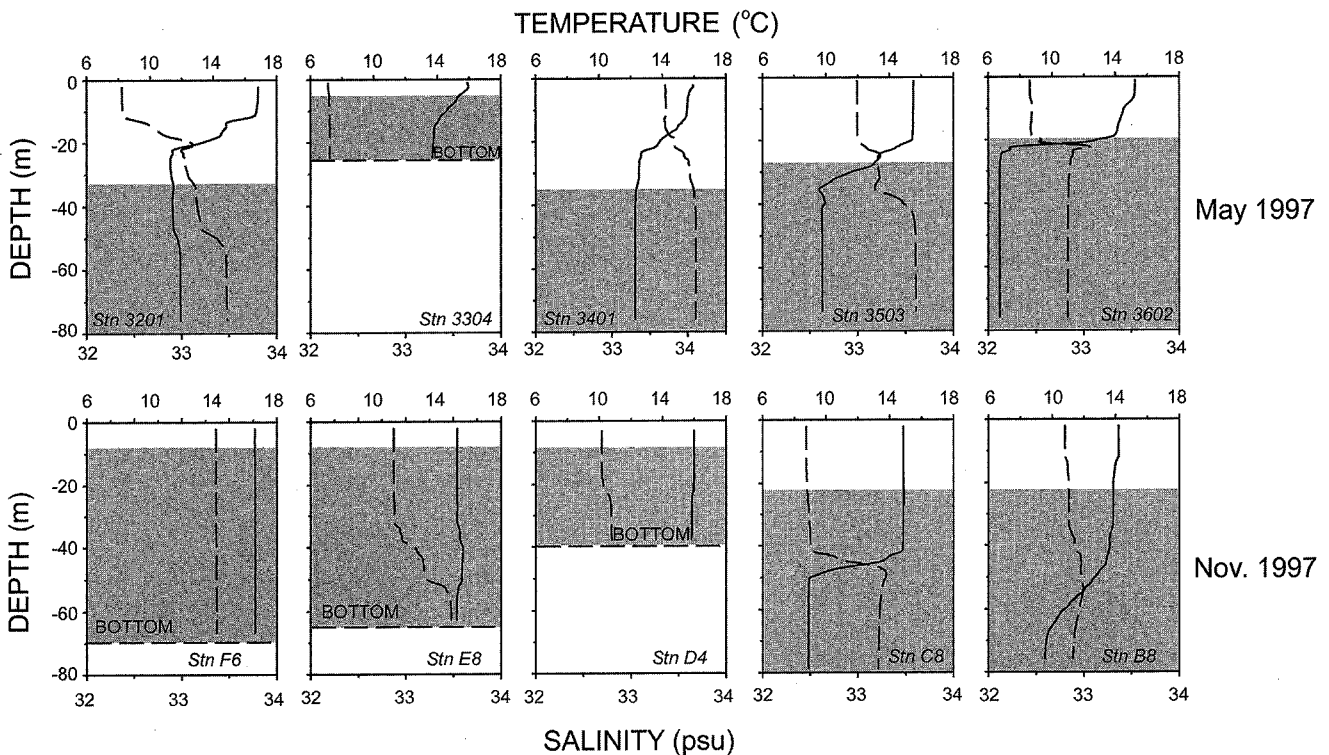


Fig. 2. Depth profiles of water temperature(solid lines) and salinity(dashed lines) in May(upper panels) and November(lower panels) 1997. Shaded areas represent the aphotic zone at each of stations.

Table 1. Summary of the depth of the euphotic zone(Z_e), the depth of the upper mixed layer(Z_m), depth-integrated rates of nitrate(ρNO_3) and ammonium(ρNH_4) uptake over the euphotic zone and whole water column, and the percentage of nitrogen uptake below the euphotic zone to whole water column uptake(%Aphotic) on May and November 1997 in the Yellow Sea. The Z_m was arbitrary determined as depth where the difference in water density (as $\sigma\text{-t}$) against the surface was less than 0.05.

| Date | Station | Z_e (m) | Z_m (m) | Euphotic | | Whole water column | | %Aphotic | |
|-----------|---------|--------------|--------------|---|---|---|---|----------------|-----------------|
| | | | | ρNO_3 ($\text{mg N m}^{-2} \text{d}^{-1}$) | ρNH_4 ($\text{mg N m}^{-2} \text{d}^{-1}$) | ρNO_3 ($\text{mg N m}^{-2} \text{d}^{-1}$) | ρNH_4 ($\text{mg N m}^{-2} \text{d}^{-1}$) | Nitrate (%) | Ammonium (%) |
| May 1997 | 3201 | 33 | 12 | 8.5 | 22.7 | 22.0 | 27.7 | 61.5 | 17.9 |
| | 3304 | 5 | 6 | 5.4 | 5.0 | 10.1 | 15.7 | 46.2 | 67.8 |
| | 3401 | 35 | 13 | 12.0 | 36.5 | 18.5 | 46.3 | 35.0 | 21.2 |
| | 3503 | 27 | 21 | 15.3 | 28.7 | 19.3 | 38.4 | 21.0 | 25.4 |
| | 3602 | 19 | 8 | 10.6 | 48.1 | 12.5 | 55.8 | 15.5 | 13.8 |
| Nov. 1997 | F6 | 8 | 66 | 1.8 | 12.7 | 13.1 | 27.1 | 86.2 | 53.1 |
| | E8 | 8 | 41 | 5.1 | 29.9 | 11.6 | 61.3 | 55.8 | 51.2 |
| | D4 | 8 | 23 | 2.5 | 49.5 | 2.9 | 104.9 | 13.0 | 52.8 |
| | C8 | 22 | 42 | 3.6 | 42.2 | 6.2 | 56.4 | 42.5 | 25.2 |
| | B8 | 22 | 14 | 8.4 | 132.2 | 11.0 | 175.5 | 23.4 | 24.7 |

부와 겹치는 5~35 m 수심역에서 발달하였다. 11월에는 5개 정점 중 3곳에서 수온 및 염분이 수주 전체에 걸쳐 균일한 수직분포를 보였으나, 두 정점 C8과 B8에서는 무광대 아래의 매우 깊은 수심에서(50~70 m) 약하거나 강한 수온약층이 존재하였다.

본 연구기간 동안 황해 중앙부 해역의 유광대 하단의 수심(Z_e)은 5 m(5월에 정점 3304)에서 35 m(5월에 정점 3401)까지 큰 범위로 변화하였다(Table 1). 상부 혼합층 하단의 수심(Z_m) 또한 크게 변화하였는데, 5월에 정점 3304에서 6 m에서부터 11월에 바닥의 깊이까지 범위를 나타냈다(Table 1). 상부 혼합층 하단의 수심에 대한 유광대 하단의 수심의 비(Z_e/Z_m)는 5월에는 0.83~2.75,

11월에는 0.12~1.57의 범위를 나타냈다.

1997년 5월에 엽록소 a 농도는 한 정점(표층에서 최대 농도를 보인 정점 3304)을 제외한 4개 정점 모두에서 유광대 아래쪽 또는 기저부에서 표면하 엽록소 극대(subsurface chlorophyll maximum)를 나타내는 수직분포를 보였으며, 11월에는 유광대 아래에서 최대를 보이거나(정점 F6 및 E8) 수심이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 3). 질산염의 농도는 약하거나 강한 수온약층이 발달된 정점들(5월에 정점 3201, 3401, 3503, 3602; 11월에 정점 C8, B8)에서는 대개 유광대내에서는 고갈되거나 낮은 농도로 존재하고 수심이 증가함에 따라 최대 약 $12 \mu\text{M}$ 까지(11월에 정점

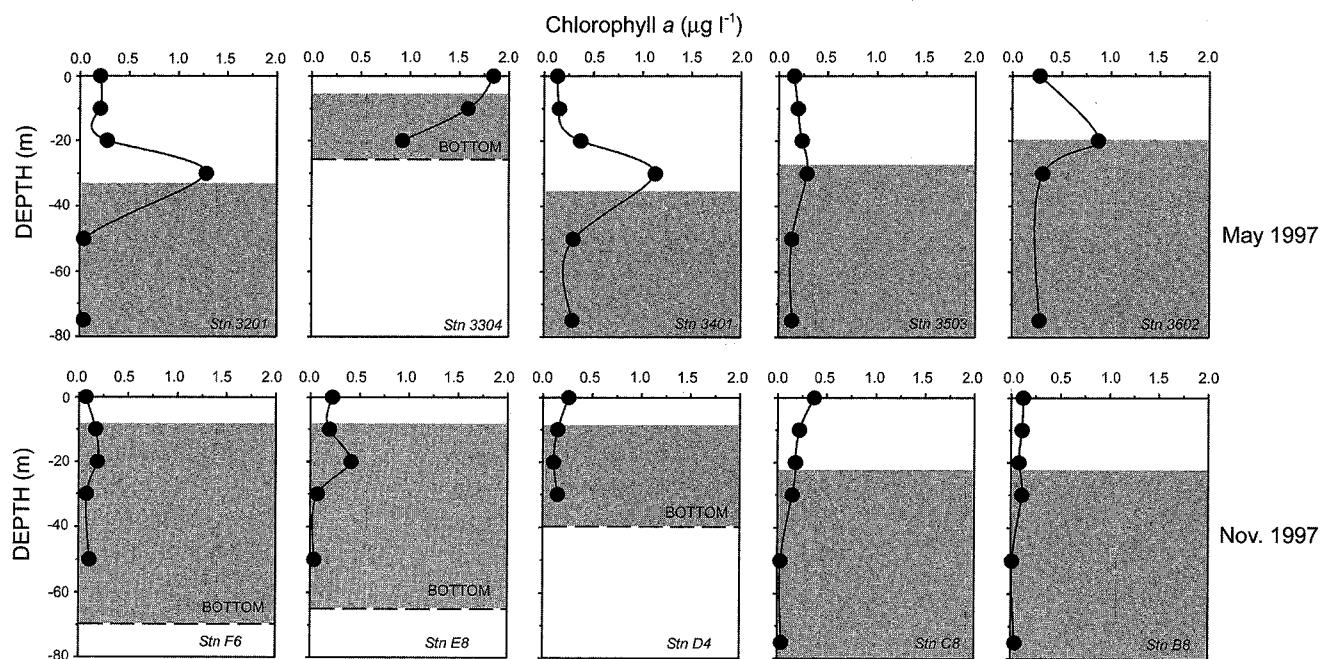


Fig. 3. Depth profiles of chlorophyll a concentration in May(upper panels) and November(lower panels) 1997. Shaded areas represent the aphotic zone at each of stations.

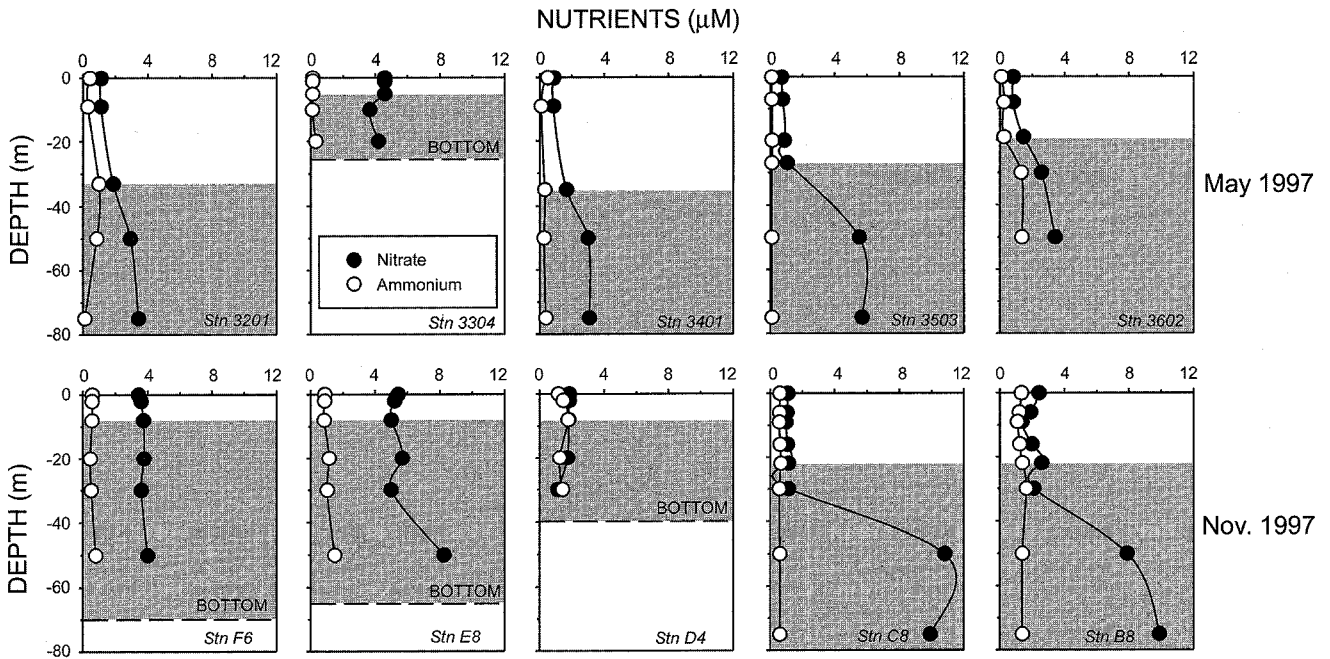


Fig. 4. Depth profiles of nitrate(●) and ammonium concentrations(○) in May(upper panels) and November(lower panels) 1997. Shaded areas represent the aphotic zone at each of stations.

C8의 50 m) 증가하는 수직분포 양상을 나타냈다(Fig. 4). 그러나 수심이 얇거나 수층의 혼합이 잘 이루어진 정점들에서는(5월에 정점 3304와 11월에 정점 F6, E8, D4) 수주 전체에 걸쳐서 2~6 µM의 질산염 농도를 유지하였다. 암모늄 농도는 대부분의 정점에서 수주 전체에 걸쳐 균일하나, 5월에 일부 정점들(정점 3201과 3602)에서는 유광대의 기저부 혹은 그 이하에서 약 1.5 µM이상의 농도를 나타냈고, 11월에 정점 D4와 B8에서는 수주 전체에 걸쳐 약

2 µM수준의 농도를 나타냈다.

질소 섭취율의 수직분포

연구정점의 질산염 및 암모늄 섭취율의 수직분포를 Fig. 5에 나타냈다. 본 연구해역에서 질소 섭취에 관해 특징적인 것은 정점 3304(1997년 5월)와 무광대의 몇 개 수심(예를 들면, 5월에 정점 3201의 50 m와 11월에 정점 F6의 20 m, 30 m)을 제외한 모든 수

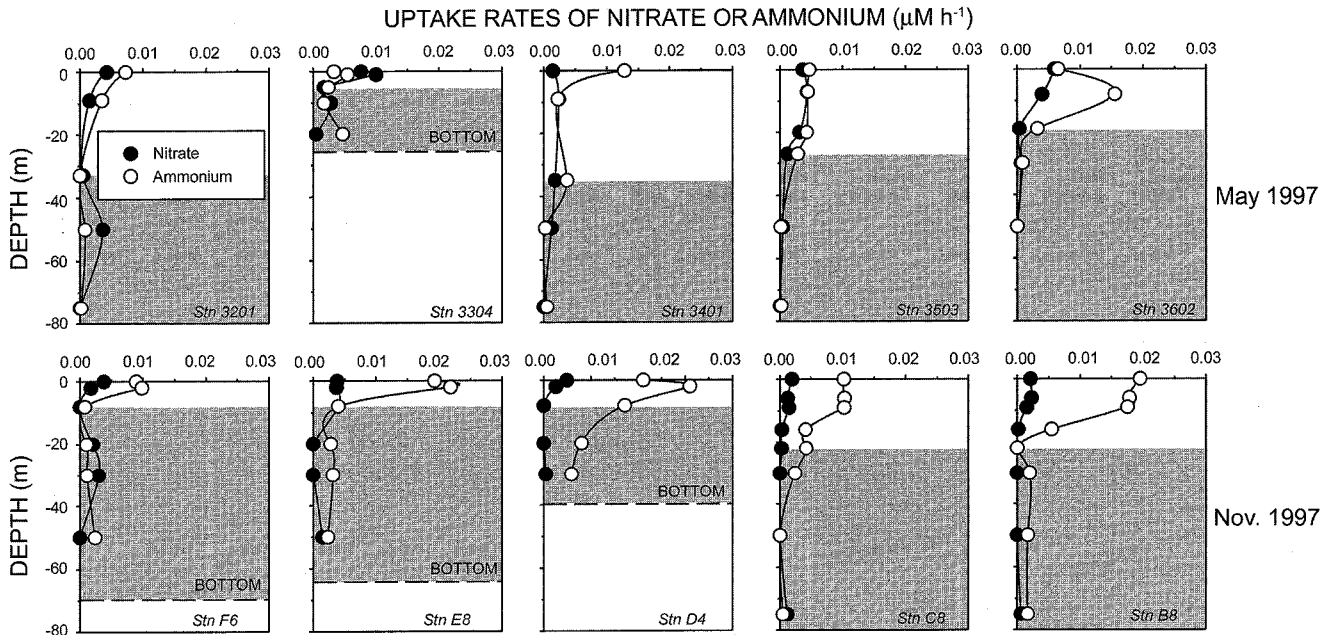


Fig. 5. Depth profiles of uptake rates of nitrate(●) and ammonium(○) in May(upper panels) and November(lower panels) 1997. Shaded areas represent the aphotic zone at each of stations.

심들에서 암모늄 섭취율이 질산염 섭취율과 유사하거나 더 높은 (최고 177배 까지) 경향을 나타낸 점이였다. 유광대를 포함한 전 수주에 걸쳐 질소 섭취율의 수직분포를 살펴보면, 일반적으로 질산염 및 암모늄 모두 표면 및 표면 아래 수 m 이내(유광대내 5~10 m 이내)에서 최대 섭취율을 보이고 수심이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 경향에도 불구하고, 5월에는 무광대에 속하는 정점 3201의 50 m와 정점 3304의 20 m에서 각각 질산염(표면 섭취율의 85.5% 수준) 및 암모늄(표면 섭취율의 141.4% 수준)의 높은 섭취율을 보였다. 11월에는 정점 F6의 20 m와 30 m 수심에서 질산염 섭취율이 암모늄 섭취율보다 높게 나타났고(표면 섭취율의 53.9~78.8%), 정점 E8, D4 및 B8의 무광대 수심들에서는 질산염 섭취율보다 높은 암모늄 섭취율을 나타냈다(표면 섭취율의 8.4~38.0%).

유광대 및 전 수주의 총 질소 섭취율

유광대에 대해 수심 적분한 질산염 및 암모늄 섭취율은 각각 1.8(11월에 정점 F6)-15.3(5월에 정점 3503) $\text{mg N m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 과 5.0(5월에 정점 3304)-132.2(11월에 정점 B8) $\text{mg N m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 의 범위를 보였다(Table 1). 총 10개의 정점중 한 정점(5월에 정점 3304)을 제외한 모든 정점에서 유광대에 대해 수심 적분한 암모늄 섭취율이 질산염 섭취율보다 1.9~19.4배 만큼 컸다. 질소 섭취율을 전 수주에 대해 수심 적분했을 때, 질산염 섭취율은 2.9(11월에 정점 D4)-22.0(5월에 정점 3201) $\text{mg N m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 의 범위를, 암모늄 섭취율은 15.7(5월에 정점 3304)-175.5(11월에 정점 B8) $\text{mg N m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 의 범위를 나타냈다. 전 수주에 대해 수심 적분한 질소 섭취율은 모든 정점에서 암모늄 섭취율이 질산염 섭취율보다 항상 컸다(1.3-35.9배).

전 수주에 대해 수심 적분한 총 질소 섭취율 중에서 무광대의 질소 섭취율이 차지하는 비율은 본 연구에서 시, 공간적으로 매우 큰 변화를 나타냈다(Table 1). 즉, 질산염 섭취율의 경우 13.0(11월에 정점 D4)-86.2%(11월에 정점 F6)가 전 수주의 섭취율 중 무광대에서의 섭취율에 의한 것이였다. 무광대에서의 암모늄 섭취율 또한 전 수층에 대한 값과 비교시 상당한 부분(13.8~67.8%)을 차지하였다. 전 수주에 대해 적분한 값과 비교시 무광대 섭취율이 차지하는 비율이 질산염의 경우는 같은 시기 내에서 정점별로 큰 변이를 보였다. 반면에 암모늄의 경우 5월에는 특이적으로 높게 67.8%를 차지한 정점 3304를 제외하면 나머지 정점들에서는 대개 25% 이내에서 무광대가 기여하였고, 11월에는 두 정점(B8, C8)에서는 약 25% 그리고 나머지 3개 정점들(D4, E8, F6)에서는 약 52%를 무광대가 차지하였다.

토 의

본 연구의 결과는 황해의 무광대 수심에서의 '식물플랑크톤에 의한 질소 섭취율'(이 부분의 토의를 위해서는 아래 참조)이 상당히 높다는 것을 보여주었다. 본 연구에서 전 수주에 대해 수심 적분한 질소 섭취율 중 무광대에 의한 질산염 및 암모늄 섭취율이 각각 13-86%와 14-68%를 차지한다는 점은 황해에서 무광대내 질소 섭취율이 상당함을 의미한다. 본 연구해역의 무광대 수심에서 질소 섭취율의 기여도는 타 해역에서 이루어진 이전 연구들과 비

교할 만한 양이다. 예를 들면, Lewis *et al.*(1986)은 빈영양(oligotrophic) 동대서양 해역(28°30'N, 23°0'W)에서 전 수주(약 180 m 수심까지 질산염 섭취율을 측정하여 수심 적분함)의 질산염 섭취 중 약 33%가량이 유광대 이하에서(유광대의 수심이 125 m) 일어난다고 보고한 바 있다. Probyn *et al.*(1996)은 남부 빙구엘라 용승해역에서 낮과 밤 동안(그들의 연구에서 밤 동안 채수 수심은 낮의 자료를 기초로 함) 각각 유광대 및 무광대 수심에서 질소 섭취율을 측정, 비교하였는데, 무광대 수심에서의 질산염 및 암모늄 섭취율이 유광대 및 무광대 수심을 포함한 전체에서 낮 시간동안에는 각각 6-79%와 4-55%를, 밤 동안에는 각각 3-86%와 28-49%를 차지한다고 보고하였다.

본 연구결과에서 얻은 황해의 무광대에서 상당한 질소 섭취율은 유광대와 무광대 수심역간에 식물플랑크톤 생체량(biomass)의 차이에서 기인할 가능성이 있다. 그러나 생체량으로 표준화한 질소 섭취율(chl *a*-specific N uptake rate)을 비교할 경우에도 절대 질소 섭취율(absolute N uptake rate)과 유사한 경향을 나타내어서(Park, in preparation), 이는 무광대 수심에서의 상당한 질소 섭취율이 단지 식물플랑크톤 생체량의 차이에 기인하는 것이 아님을 시사한다. 둘째, 종속영양 박테리아에 의한 질소 섭취(Wheeler and Kirchman, 1986; Kirchman, 1994; Kirchman *et al.*, 1994)가 본 연구해역의 무광대 수심에서의 질소 섭취율에 기여할 가능성이 있다. 본 연구동안 질소 섭취율을 측정하기 위해서 GF/F 여과지(명목상 구경 0.7 μm)를 사용하였기 때문에, 박테리아에 의한 질소 섭취가 본 연구에서 얻은 '식물플랑크톤 질소 섭취율'에 포함될 가능성이 있다. 그러나 불행하게도 본 연구동안 박테리아에 의한 질산염 및 암모늄 섭취에 대한 측정이 이루어지지 않아서 본 연구에서 얻은 '식물플랑크톤 질소 섭취율'에 얼마만큼 기여했는지 현재로서는 정확하게 파악할 수 없다. 앞으로 황해의 유광대 및 무광대에 존재하는 박테리아가 얼마만큼 질소원으로 질산염 및 암모늄을 사용하는지 측정할 필요가 있으며, 박테리아에 의한 질소 섭취가 유광대와 무광대에서 모두 같은 크기로 일어나는지 혹은 유광대보다는 무광대에서 더 크게 섭취하는지에 대한 연구 등은 황해의 질소계 영양염의 순환과 생태계 영향을 보다 심도있게 이해하는데 있어서 크게 기여할 것으로 판단된다(사실, 기존 문헌들에서 보고된 박테리아에 의한 질소 섭취의 기여도를 본 연구해역의 유광대 및 무광대에 일률적으로 적용할 경우, 본 연구에서 얻은 식물플랑크톤의 질소 섭취율의 크기가 상대적으로 작아지는 경향이 있으나, 질소 섭취율의 수직적인 분포양상은 보정 전과 후 모두 같다). 그러므로 이 부분이 해결될 때까지 무광대에서 질소 섭취를 본 연구에서는 잠정적으로 '식물플랑크톤에 의한 질소 섭취'로 간주하였다.

그러면 본 연구 결과로부터 얻어진 황해 무광대 수심에서의 상당한 식물플랑크톤 질소 섭취율은 무엇을 의미하는가? 어느 주어진 해역에서 신생산 및 재생산을 측정할 때 흔히 사용되는 안정 동위원소법(^{15}N 으로 표지한 질산염 및 암모늄)에서는 기술적으로 질산염 섭취율을 신생산, 암모늄 섭취율을 재생산으로 간주하여 왔다(Dugdale and Goering, 1967; Platt *et al.*, 1992). 그러나 황해를 포함한 100 m 이내의 수심이 얇은 대륙붕 해역에서는 다양한 기원(source)의 질소계 영양염이 유광대에 공급될 수 있기 때문에 이러한 신생산 및 재생산 개념을 그대로 적용하기가 어렵다

(Paasche, 1988). 예를 들면, 일시적인 바람이나 조류에 의해 와류 혼합(turbulent mixing) 또는 수온약층 자체의 수직적인 이동 등과 같은 물리적 작용(physical forcing)들로 인해서 무광대에 존재하는 식물플랑크톤이 유광대로 다시 편입(entrainment)될 가능성이 존재한다. 이와 같은 산발적인 물리적 작용이 황해에서 빈번하게 일어난다면 질산염에만 기초해서 평가된 신생산의 크기가 더욱 커질 가능성이 있다. 즉, 암모늄 섭취에 기초해서 단순히 재생산으로 간주되었던 부분들 중 일부는 본래 의미의 재생산이라기 보다는 신생산에 포함되어야 할 것이다. 한편, 전통적으로 황해가 수산업적으로 중요한 해역인 것으로 인식되어 왔으며(Liu and Chen, 1998), 신생산의 크기가 궁극적으로는 수산업과 관련이 있다는 점을 감안하면(Home *et al.*, 1989; Iverson, 1990; Nielsen and Richardson, 1996), 본 연구에서 유광대의 총 암모늄 섭취율(재생산)이 총 질산염 섭취율(신생산)보다 겉보기에 더 우세하였다는 점(Table 1)은 서로 상충되는 것으로 보여지나, 위에서 언급한 물리적 기작(mechanism)들에 의해 무광대내 상당한 질소 섭취능력을 가진 식물플랑크톤이 다시 유광대로 편입될 경우 이러한 역설적인 상황을 어느 정도 설명하는데 도움을 줄 것으로 판단된다. 그러나 무광대에서 식물플랑크톤이 질소(질산염과 암모늄 중 어느 형태간에)를 섭취한 다음, 위에 언급한 것과는 다른 경로, 즉 해저로 가라앉았 경우에는 유광대내의 질소 생산력에는 크게 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 장, 단기적으로 황해의 물질순환을 정량화하고 모델링하는데 있어서 무광대 수심에서 일어나는 식물플랑크톤에 의한 질소 섭취율의 크기에 대해 더 많은 연구와 고려가 필요하다는 점을 제시한다.

감사의 글

본 연구의 재정지원의 일부는 ‘황해 해류 순환 및 물질흐름에 대한 한국·중국 공동연구’와 ‘황해 종합 해양관측’(과제번호 PN97357-03)의 부분으로 수행되었습니다. 본 해양관측과 선상실험에 협조해주신 한국해양연구원의 연구선 ‘온누리호’의 선장 및 승무원께 감사를 드립니다. 본 논문을 세밀하게 검토하고 심사해주신 익명의 심사위원께 감사드립니다.

참고문헌

- 최중기, 1991. 황해 중동부 연안 수역의 조석전선이 식물 플랑크톤 생산력과 분포에 미치는 영향. *한국해양학회지*, **26**: 223-241.
- Bronk, D.A. and B.B. Ward, 1999. Gross and net nitrogen uptake and DON release in the euphotic zone of Monterey Bay, California. *Limnol. Oceanogr.*, **44**: 573-585.
- Bronk, D.A., P.M. Glibert and B.B. Ward, 1994. Nitrogen uptake, dissolved organic nitrogen release, and new production. *Science*, **265**: 1843-1846.
- Cho, B.C., M.G. Park, J.H. Shim and D.H. Choi, 2001. Sea-surface temperature and *f*-ratio explain large variability in the ratio of bacterial production to primary production in the Yellow Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **216**: 31-41.
- Chung, C.S., S.H. Kim, D.J. Kang, G.H. Hong, 1991. Primary productivity and dynamics of nutrients and dissolved oxygen in summer in the central Yellow Sea. *Yellow Sea Res.*, **4**: 89-102.
- Cochlan, W.P., P.J. Harrison and K.L. Denman, 1991. Diel periodicity of nitrogen uptake by marine phytoplankton in nitrate-rich environments. *Limnol. Oceanogr.*, **36**: 1689-1700.
- Collos, Y., 1998. Nitrate uptake, nitrite release and uptake, and new production estimates. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **171**: 293-301.
- Dugdale, R.C. and F.P. Wilkerson, 1986. The use of ¹⁵N to measure nitrogen uptake in eutrophic oceans; experimental considerations. *Limnol. Oceanogr.*, **31**: 673-689.
- Dugdale, R.C. and J.J. Goering, 1967. Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. *Limnol. Oceanogr.*, **12**: 196-206.
- Eppley, R.W., 1989. New production: history, methods, problems. In: *Productivity of the Ocean: Present and Past*, edited by Berger, W.H., V.S. Smetacek and G. Wefel, John Wiley & Sons, New York, pp. 85-97.
- Eppley, R.W. and B.J. Peterson, 1979. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. *Nature*, **279**: 210-215.
- Eppley, R.W., J.H. Sharp, E.H. Renger, M.J. Perry and W.G. Harrison, 1977. Nitrogen assimilation by phytoplankton and other microorganisms in the surface waters of the central North Pacific Ocean. *Mar. Biol.*, **39**: 111-120.
- Glibert, P.M., F. Lipschultz, J.J. McCarthy and M.A. Altabet, 1982. Isotope dilution models of uptake and remineralization of ammonium by phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, **27**: 639-650.
- Hong G.H., C.S. Chung, D.J. Kang, S.H. Kim and J.K. Choi, 1993. Synoptic distribution of nutrients and major biogeochemical provinces in the Yellow Sea. In: *Proceedings of ISEE'93*, Inha University, Incheon, pp. 85-99.
- Home, E.P.W., J.W. Loder, W.G. Harrison, R. Mohn, M.R. Lewis, B. Irwin and T. Platt, 1989. Nitrate supply and demand at the Georges Bank tidal front. *Scient. Mar.*, **53**: 145-158.
- Iverson, R.L., 1990. Control of marine fish production. *Limnol. Oceanogr.*, **35**: 1593-1604.
- Kirchman, D.L., 1994. The uptake of inorganic nutrients by heterotrophic bacteria. *Microb. Ecol.*, **28**: 255-271.
- Kirchman, D.L., H.W. Ducklow, J.J. McCarthy and C. Garside, 1994. Biomass and nitrogen uptake by heterotrophic bacteria during the spring phytoplankton bloom in the North Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res.*, **41**: 879-895.
- Levitus, S., 1982. *Climatological Atlas of the World Ocean*. NOAA Professional Paper 13. National Oceanic and Atmospheric Administration, Rockville, 173 pp.
- Lewis, M.R., W.G. Harrison, N.S. Oakey, D. Herbert and T. Platt, 1986. Vertical nitrate fluxes in the oligotrophic ocean. *Science*, **234**: 870-873.
- Liu, Q. and D. Chen, 1998. The fisheries and the fisheries resources in the Yellow Sea. In: *Health of the Yellow Sea*, edited by Hong, G.H., J. Zhang and B.K. Park, Earth Love Publication Association, Seoul, pp. 331-342.
- Nielsen, E. and K. Richardson, 1996. Can changes in the fisheries yield in the Kattegat (1950-1992) be linked to changes in primary production? *ICES J. Mar. Sci.*, **53**: 988-994.
- Owens, N.J.P., 1988. Rapid and total automation of shipboard ¹⁵N

- analysis: examples from the North Sea. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **122**: 163–171.
- Paasche, E., 1988. Pelagic primary production in nearshore waters. In: Nitrogen Cycling in Coastal Marine Environments, edited by Blackburn, T.H. and J. Sorensen, John Wiley and Sons, New York, pp. 33–57.
- Park, M.G., J.H. Shim, S.R. Yang, S. Lee and B.C. Cho, 1997. Diel cycles of nitrogen uptake by marine phytoplankton in NO_3^- -high and -low environments. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **32**: 191–201.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press, New York, 173 pp.
- Platt, T., P. Jauhari and S. Sathyendranath, 1992. The importance and measurement of new production. In: Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea, edited by Falkowski, P.G. and A.D. Woodhead, Plenum Press, New York, pp. 273–284.
- Poole, H.N. and W.R.G. Atkins, 1929. Photo-electric measurement of submarine illumination throughout the year. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **16**: 297–324.
- Probyn, T.A., H.W. Waldron, S. Searson and N.J.P. Owens, 1996. Diel variability in nitrogenous nutrient uptake at photic and sub-photic depths. *J. Plankton Res.*, **18**: 2063–2079.
- Wheeler, P.A. and D.L. Kirchman, 1986. Utilization of inorganic and organic nitrogen by bacteria in marine systems. *Limnol. Oceanogr.*, **31**: 998–1009.

2002년 3월 12일 원고접수

2002년 5월 1일 수정본 채택

담당편집위원: 강창근