

동해 극전선역의 영양염류 순환과정 IV. Chlorophyll a 분포, 신생산 및 질산염의 수직확산

문창호 · 양성렬* · 양한섭 · 조현진 · 이승용 · 김석윤
부경대학교 해양학과, *광주대학교 환경공학과

Regeneration Processes of Nutrients in the Polar Front Area of the East Sea

IV. Chlorophyll a Distribution, New Production and the Vertical Diffusion of Nitrate

Chang-Ho MOON, Sung-Ryull YANG*, Han-Soeb YANG, Hyun-Jin CHO, Seung-Yong LEE and Seok-Yun KIM

Department of Oceanography, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea
*Department of Environmental Engineering, Kwangju University, Kwangju 502-703, Korea

A study on the biological and chemical characteristics in the middle East Sea of Korea was carried out at 31 stations in October 11~18, 1995 on board the R/V Tam-Yang. The chlorophyll a concentration, new and regenerated production, and the vertical diffusion of nitrate from the thermocline structure were investigated.

From the vertical distribution of chlorophyll a, subsurface maxima were observed near the thermocline at most stations including the frontal zone, except at the southern stations where the maximum chlorophyll a concentration occurred at the surface. The nanophytoplankton was the most dominant fraction comprising 83.5 % of total phytoplankton cell numbers, but netphytoplankton were common at the southern stations where the dominant species were Rhizosolenia sp.

Nitrogenous new production and regenerated productions were measured using the stable isotope ¹⁵N nitrate and ammonia uptake method. The vertically integrated nitrogen production varied between 8.470 and 72.945 mg N m⁻² d⁻¹. The f-ratio, which is the fraction of new production from primary production, varied between 0.03 and 0.72, indicating that 3% to 72% of primary production was supported by the input of nutrients from below the euphotic zone and the rest are supported by ammonia recycled within the euphotic layer. This range of f-ratio encompasses from extremely oligotrophic to eutrophic area characteristics. The differences in productivity and f-ratio among stations were related to frontal structure and the bottom topography. The values were high near the frontal zone and low outside of it, and the station near Ulleng Island showed the highest f-ratio.

Vertical diffusion coefficients were calculated from both the water column stability (Kz-1) of King and Devol's equation (1979) and new nitrogen requirement (Kz-2). The values of Kz-2 (0.11~0.55 cm²/s) were relatively low compared to the values reported previously.

Key words: East Sea, phytoplankton, chlorophyll, new and regenerated production, vertical diffusion of nitrate

서 론

한국 동해는 비록 규모는 작으나 원양역의 특징을 갖고 있는 소규모의 해양분지라 할 수 있다. 동해의 극전선역은 대한해협을 통하여 유입되는 대마난류와 북한한류, 동해고유수가 만나는 해역으로서 수직적인 수온 약층이 형성되고 있다 (Hong et al., 1984; Yang et al., 1991). 현재까지 국내에서 행해진 동해에 관한 생물·화학적인 과정에 관한 연구로는 Shim et al. (1985, 1989, 1992, 1995), Shim and Lee (1987), Shim and Park (1986), Lee and Shim (1990) 등이 한국 동해 서남해역에서 식물플랑

크톤의 기초생산과 현존량 및 군집구조와 환경요인에 관한 연구를 하였고, Chung et al. (1989)은 기초생산력과 질소계 영양염의 동적 관계에 관한 연구를 하였다. 그리고 Yang et al. (1991)은 동해 중부해역의 전선역에 출현하는 수괴의 화학적 특성을 밝히고자 하였으며, Park et al. (1991) 역시 전선역에서의 식물플랑크톤 군집구조와 분포에 관한 연구를 하였다. 그러나 동해의 극전선역에서 영양염의 순환과정에 대한 종합적인 연구는 아직 미약한 편이며 주로 연안에 가까운 정점에 국한되어 있다. 더욱이 현재까지 동해 해역에서의 신생산에 관한 연구보고는 Shimoto et al. (1996)이 일본연안의 Sanriku 부

근 warm core에서 측정된 것이 유일하다.

Dugdale and Goering (1967)에 의하여 도입된 신생산 (new production)의 개념은 기초생산 중 수직확산, 용승, 질소고정 (Carpenter and Romans, 1991), 강우 (Duce et al., 1991) 등의 기작에 의하여 새롭게 가용한 형태의 질소계 영양염에 의한 부분을 의미하며, Eppley and Peterson (1979)에 의하면 system이 소진되지 않고 수확되거나 표층으로부터 침강에 의하여 수출될 수 있는 생산을 의미한다. 반면에 재생산은 암모니아나 urea와 같이 유광층 내에서 순환되는 영양염에 의하여 유지되며, system이 유지되기 위하여는 외부로 수출될 수 없는 부분이다. 수층에서의 수직적인 물질수지를 측정하기 위하여는 신생산에 관한 정보가 필수적이다. 또한 신생산은 중요한 온실기체인 CO₂를 유기탄소로 전환시켜 대기로부터 제거하는 생물학적 pump (biological pump) 역할을 한다. 대양의 탄소 저장고는 화석연료의 연소에 의한 대기중 CO₂의 급격적 sink이기 때문에, 신생산은 시스템으로부터 CO₂를 제거함으로써 지구온난화의 완충작용의 역할을 할 수 있다 (Volk and Liu, 1988).

본 연구의 목적은 동해 중부 및 북부해역 (동경 133° 40'~135° 40', 북위 37° 00'~42° 10')의 극전선역에서 해수의 수온, 염분 및 용존산소로서 각 수괴의 물리적 특성을 파악하고 영양염 분포 및 수직확산, 화학적 성분의 상호 관계로서 각 수괴의 화학적 특성을 규명하고 또한 각 수괴의 일차생산계를 조사하여 이 해역에서 영양염 순환과정을 종합적으로 이해하기 위한 기초자료를 제공하는데 있다. 수괴와 영양염의 분포양상은 Cho et al. (1997)에 발표되었으며, 본 논문에서는 chlorophyll *a* 분포, 신생산 및 재생산, 질산염의 수직확산에 대한 결과를 다루었다.

재료 및 방법

본 연구는 1995년 10월 9일부터 19일까지 해양과학 공동연구소 탐사선인 탐양호를 이용하여 수행되었다. 연구해역은 동경 133° 40'~135° 40', 북위 37° 00'~42° 10'으로 A, C, D line 28개 정점에서 chlorophyll *a*의 농도 측정을 위한 시료를 Rossette sampler를 이용하여 표준수심에서 채취하였으며, 정점 A3, A12, B1, BP 그리고 울릉도 부근의 정점 U2에서 신생산력을 측정하였다 (Fig. 1).

chlorophyll *a* 농도 측정을 위하여 각 정점의 수심별로 채수한 해수 500 ml를 공경 0.45 μm Whatman membrane filter로 현장에서 여과하였고, 여과가 끝나기 직전 1%

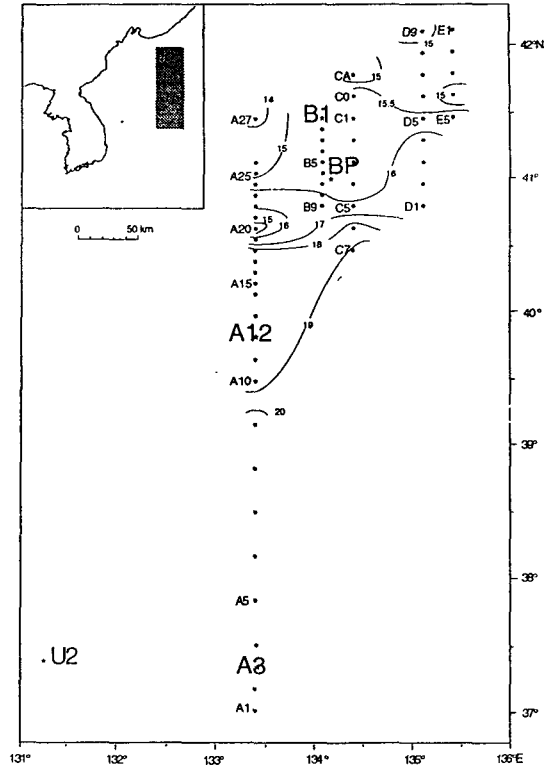


Fig. 1. Map of the study area showing sampling stations and the sea surface temperature.

(*: Stations where primary and new production were measured).

탄산마그네슘 1 ml를 가하였고, 여과지는 분석시까지 -20°C에서 냉동 보관하였다. 90% acetone 10 ml를 가하여 냉암소에서 24시간 동안 색소를 추출한 후, 2000 rpm으로 10분간 원심분리시켜 상등액을 형광측정기 (Turner Designs Model 10 Fluorometer)를 이용하여 5% 염산액 1~2방울을 첨가하기 전과 후의 형광값을 측정하여 다음식을 이용하여 계산하였다 (Yentsch and Menzel, 1963; Holm-Hansen et al., 1965).

$$\text{Chl. } a \text{ (ug/l)} = Fd \times \frac{T}{T-1} \times (Rb - Ra) \times \frac{v}{V}$$

Rb : fluorescence before acidification

Ra : fluorescence after acidification

T : ratio of *Rb/Ra* for pure chlorophyll *a*

Fd : appropriate calibration factor (*Cd/Rd*)

Cd : concentration D determined spectrophotometrically

Rd : fluorometer response for D

위 식에서 *T* 및 *Fd* 값은 순수 chlorophyll *a* (Sigma)를 이용하여 결정하였다.

식물플랑크톤의 우점종을 파악하기 위하여 각 정점의 표층에서 시료를 1 liter 폴리에틸렌 채수병에 취하여 Lugol 용액 5 ml를 넣어 고정시킨 후 시료의 광산화를 방지하기 위하여 알루미늄 박막으로 포장하여 광을 차단, 암소에서 보관하여 실험실로 운반하였다. 현미경 관찰은 시료를 침전관에서 48시간 이상 침강시킨 다음 상등액을 제거하여 10 ml로 농축한 다음 Sedgewick-Rafter chamber를 이용하여 100, 400, 1000배의 배율하에서 동정 계수하였다.

수층의 신생산과 재생산의 측정은 $^{15}\text{N-KNO}_3$ 과 $^{15}\text{N-NH}_4\text{Cl}$ 의 흡수실험을 행하였다. 배양을 위한 해수시료는 Rosette 채수기에 부착된 5 liter Niskin 채수병을 이용하여 100, 49, 30, 15, 3.5, 1% 광투과 수심 (LPD: Light penetration depth)에서 채수하였다. 소광계수 (E ; extinction coefficient)는 Sechi disk (직경 30 cm)를 이용하여 식 $E=1.7/Z_s$ (Poole and Atkins, 1929; Idso and Gilbert, 1974)으로 산출했으며 여러 광조건에 대한 값이는 Beer의 법칙 $I_0/I_z=e^{-Kz}$ (E :소광계수, z :수심, I_0 :표층광도, I_z :수심 z 에서의 광도)에 따라 계산하였다. 광도를 채수 수심의 광도로 조절하기 위하여 2 liter polycarbonate bottle를 천공된 nickel screen으로 포장하였다 (Stork Veco, Bedford, MA, U.S.A.). 배양은 표층해수로 냉각한 on-deck incubator에서 행하였다. 배양 시작전 $^{15}\text{N-KNO}_3$ (99%) and $^{15}\text{N-NH}_4\text{Cl}$ (99%; Cambridge Isotope Laboratory, Woburn, MA, U.S.A.)를 최종 농도가 각각 $1\ \mu\text{M}$ 및 $0.2\ \mu\text{M}$ 되도록 접종하였다. 배양은 정오를 기준으로 4시간 동안 자연광하에서 행하였다.

배양후 해수시료를 450°C 에서 4시간 동안 미리 유기물을 제거한 25 mm GF/F 여과지로 여과한 후 여과지를, 60°C 에서 건조하여 질량분석기 (mass-spectrometer)로 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 비와 PON 농도를 측정하였다 (Owens, 1988). 신생산과 재생산의 계산은 Wilkerson and Dugdale (1987)방법에 의하여 계산하였다. ρ_{NO_3} (R_{NO_3} ; 질산염 운반율; nitrate transport rate; $\mu\text{M h}^{-1}$)와 ρ_{NH_4} (R_{NH_4} ; 암모니아 운반율; ammonia transport rate; $\mu\text{M h}^{-1}$)은 단위시간 해수 단위 체적당 질산염과 암모니아의 흡수속도를 나타내며 신생산과 재생산에 해당한다. 생체비 흡수율인 V_{NO_3} (biomass specific nitrate uptake rate; h^{-1})와 V_{NH_4} (biomass specific ammonia uptake rate; h^{-1})는 시간의 역수로 나타내며, 지수성장을 가정하였을 때 암모니아와 질산염에 의한 식물플랑크톤의 성장속도에 해당한다.

기초생산중 신생산이 차지하는 비율인 "f-ratio"는 다음의 식을 이용하여 계산하였다 (Eppley and Peterson, 1979).

$$f\text{-ratio} = \rho_{\text{NO}_3} / (\rho_{\text{NO}_3} + \rho_{\text{NH}_4}).$$

1% 광투과수심 (LPD)까지 수직 적분한 생산성은 $\text{Int } \rho_{\text{NO}_3}$, $\text{Int } \rho_{\text{NH}_4}$ 와 $\text{Int } \rho$ (3+4)로 나타내었으며 각각 단위 면적당 신생산, 재생산, 질소기초생산을 의미한다. 일일 생산율은 시간당 흡수속도를 질산염의 경우 12를, 암모니아는 무광하의 흡수율을 고려하여 18을 곱하여 계산하였다.

수직 확산 계수 (K_z)는 두 가지 방법으로 계산하였는데, 첫째는 King and Devol (1979)의 식을 이용하여 혼합층내 수직 안정도 (E)로부터 구하였다.

$$K_z (\text{cm}^2/\text{s}) = 643.0 (10^6 E)^{-1.61}$$

$$E = \frac{d\sigma_t}{dz} \times 10^{-3}, \text{ the stability of water column}$$

$$\frac{d\sigma_t}{dz} : \text{density difference around the thermocline}$$

둘째는 신생산으로부터 계산한 질소 요구량을 이용하여 구하였는데, 편이상 정상상태를 가정하여 질산염은 오직 저층으로부터의 확산에 의해서만 표층으로 공급되고, 표층의 질산염 농도는 일정한 상태에 있으며, F_n 은 유광층 내에서 식물플랑크톤에 의해 흡수되는 질산염 양과 같다는 조건하에서 다음 식을 이용하여 계산하였다 (Shimoto et al., 1996).

$$F_n (\mu\text{g-at}/\text{m}^2/\text{h}) = K_z \times [dC/dz]$$

F_n : the upward flux of nitrate (new nitrogen requirement)

dC/dz : the slope of nitrate concentration at the pycnocline

결과 및 고찰

1. Chlorophyll *a*의 분포

chlorophyll *a*의 농도는 검출한계 이하에서 $0.71\ \mu\text{g}/\ell$ 의 범위 이었으며 A, C 및 D line의 대표적 정점에서 chlorophyll *a* 농도의 수직변화를 Fig. 2에 나타내었다. 정점 A3를 제외하고 수심 30~50 m 부근에서 최대농도를 보였으며, 100 m 이하의 수심에서는 검출한계이하의 값을 보였다. 정점 A3의 경우는 표층에서 chlorophyll *a* 농도가 최대이었다. Cho et al. (1997)에 의하면 정점 A1부터 A4 사이의 표층은 수온이 $21.47\sim 21.74^\circ\text{C}$ 의 고온이고 염분은 $31.87\sim 32.08\text{‰}$ 의 저염수로서 이 수괴의 근원이 양자강 유출수임을 시사하였다. 제주도 부근해역의 중국대륙연

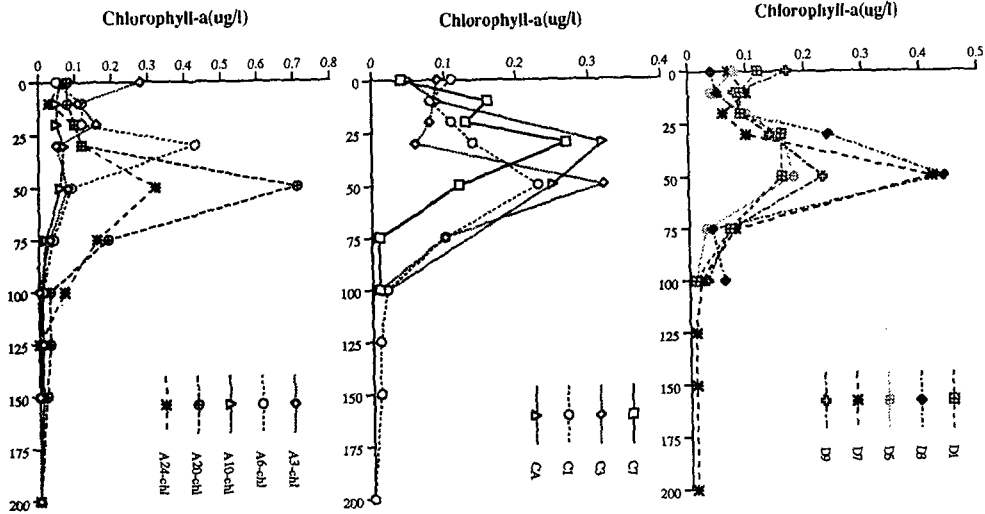


Fig. 2. The vertical profiles of chlorophyll a concentration at each station along the A, C, and D lines.

안수는 chlorophyll a 농도가 매우 높은 것으로 보고되고 있다 (Kim, 1987). 정점 A2 와 A3에서 우점종은 (Table 1) *Chaetoceros affinis* 및 *Rhizosolenia alata*를 포함한 *Rhizosolenia* sp. 로서 이들 종은 연안 수역에서 흔히 발견되고 있다. 또한 이들 정점에서는 총개체수 중 크기가 25 μm 이상의 netphytoplankton의 비율이 타정점들에 비하여 높았다 (Fig. 3).

표층수온과 영양염 농도의 급격한 변화로 표층에 형성된 전선역 (frontal zone)의 경계를 구분할 수가 있는데 (Laubscher et al., 1993) A line의 표층과 수심 50 m에서의 수온과 엽록소 농도 변화를 Fig. 4에 나타내었다. A line의 표층 온도구배 (temperature gradient)가 가장 큰 곳은 정점 A18에서 A20사이로 3.7°C/18.52 km 정도이었으며 따라서 A line의 표층에서 정점 A18과 A20사이 (북위 40° 30'~40° 40')에 전선이 형성되었다고 할 수 있다. 일반적으로 전선역에서는 생산력이 높다고 알려져 있으나, 표층의 chlorophyll a 농도는 정점 A1~A4에 높게 나타났고 전선 부근에서 뚜렷한 증가를 나타내지 않았다. 그러나 수심 50 m 부근의 수온약층에서는 chlorophyll a 농도가 전선부근에서 최대치를 보였다.

2. 신생산과 재생산

생산성 측정은 5개정점에서 행하여졌으며, 정점별 신생산 (ρ_{NO_3} ; nitrate transport rate) 값은 0.055~2.260 $\text{mg N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 의 범위를 나타내었으며, 재생산 (ρ_{NH_4} ; ammonia transport rate) 값은 0.434~2.546 $\text{mg N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 를 보였다 (Table 2). 신생산 및 재생산 공히 전선부근에 위치한 정점 BP에서 최대치를 보였다. 이 값으로 부터 계산된 근의 U2 정점에서 0.718, 그리고 전선부근의 BP정점에서 f-ratio 값은 정점 A12에서 0.030으로 가장 낮고 울릉도 부 0.470으로 높은 값을 보여 U2 정점의 매우 높은 f-

Table 1. Total percent dominance (%) represented by the dominant species which occupied more than 5% of the total standing crop of netphytoplankton at each station

species/st.	A2	A3	A6	A16	A24	C7	Total (%)
<i>Chaetoceros affinis</i>	4	1	-	-	-	-	5
<i>Rhizosolenia alata</i>	5	3	-	-	-	-	8
sp.	17	12	-	1	-	2	32
<i>Gymnodinium</i> sp.	-	5	1	1	1	1	9
Total (%)	26	21	1	2	1	3	54
Dominant species number	3	4	1	2	1	2	

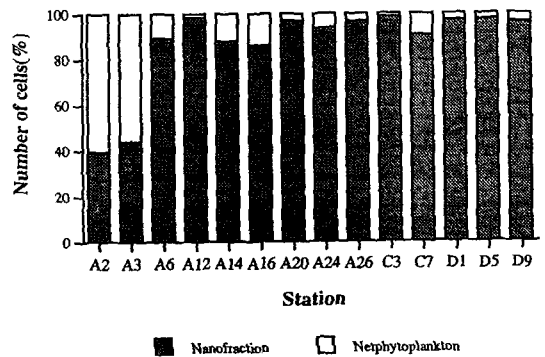


Fig. 3. The relative composition of size-fractionated phytoplankton density.

ratio를 제외하면 신생산 값과 f-ratio 공히 전선의 위치와 밀접한 관계를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 f-ratio 만 살펴볼 때에는 정점 U2는 부영양 해역, BP는 부영양에서 중영양 해역, 그리고 그 외 정점들은 빈영양 해역의 특성을 나타내고 있다 (Harrison et al., 1987; Dugdale

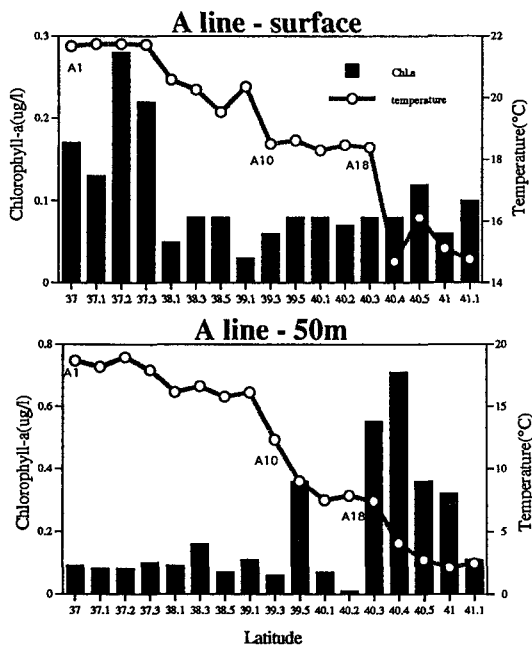


Fig. 4. Temperature and chlorophyll a concentration along the line A at the surface and 50 m depth.

and Wilkerson, 1992). U2 정점에서 기초생산은 측정되지 않았으며 신생산과 재생산만 측정되었다. 영양염의 수직분포를 보면 30 m 수심에서 질산염 (+아질산염)의 농도가 4.70 μM 로 다른 정점들의 1 μM 이하보다 매우 높게 나타났다. 즉 율동도와 관련된 해저지형의 변화로 인하여 영양염의 공급이 활발하게 일어나고 있음을 유추할 수 있다. 섬과 해저지형의 변화에 의한 생산성의 증가가 보고되고 있다 (Denman et al., 1981; Chang et al., 1995). 그러나 본 연구에서는 이러한 원인을 규명하기에는 기초생산과 해류유동에 관한 자료가 부족하여 이러한 기작에 대하여 명확한 설명이 힘들다.

일일 총 질소생산은 정점 B1에서 8.470 $\text{mg N m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로 가장 낮았고, 전선 부근의 정점 BP에서 72.945로 가장 높게 나타났다. 탄소와 질소 생산비는 전선 부근의 정점 BP에서 2.26으로 전통적인 Redfield ratio (Redfield, 1958)에 비하여 1/3정도의 낮은 값을 나타내었고, 다른 정점

에서는 9.53에서 21.28로 높은 값을 나타내었다. 전선부근에서 낮게 나타난 이유는 영양염 특히 질산염의 공급이 활발하여 질소계 영양염의 흡수 및 동화가 작아 탄소동화에 비하여 활발한 데서 기인한 것으로 보인다. 전선역 외부에서 C : N비가 높게 나타나는 이유는 질소와 탄소의 배양시간이 다름에도 부분적으로 기인하지만, 질산염의 농도가 낮아서 질산염의 흡수가 상대적으로 낮을 때 기인하는 생리적인 불균형이 더 큰 요인으로 생각된다. ^{15}N 흡수방법에 의한 f-ratio의 값 및 C : N 생산성비는 비교적 짧은 배양시간 (3~6 시간) 동안에 측정되어 하루주기의 평균값과 차이를 보일 수 있으며, 또한 질산염과 암모니아의 흡수가 일주변화를 보이기 때문에 (특히 암모니아의 경우 dark uptake가 상당한 값을 보임) 이에 대한 측정이 필요하다. Dauchez et al. (1996)에 의하면 특히 f-ratio가 0.2 이하인 경우는 신생산이 5 μM 이상의 식물플랑크톤에 의한 탄소고정 (carbon fixation)보다 작지만 그 이상의 경우에는 신생산이 높게 나타났으며, 신생산과 탄소고정은 하루주기의 짧은 시간대에서는 유의성 있는 상관관계가 없으나, 6개월 이상 평균값을 취하였을 경우에는 신생산과 탄소고정이 비슷한 것으로 보고되었다.

3. 수직확산계수

일차생산력과 신생산력이 측정된 정점 A3, A12, B1, BP, U2의 5개 정점에서 수주의 안정도 (King and Devol, 1979)를 이용한 방법과 신생산력을 이용한 방법으로 수직확산계수 (vertical diffusion coefficients)와 질산염의 상승 수지 (upward flux)를 계산하여 Table 3에 나타내었다. Eppley and Peterson (1979)은 해양에서 일차생산을 표층에서 영양염 순환에 따른 재생산 (regenerated production)과 외부로부터 공급된 영양염에 의한 신생산 (new production)으로 나누었다. Dugdale (1967)은 해양을 수온약층을 경계로 빛은 풍부하나 영양염이 고갈된 상부층과 영양염은 풍부하나 빛이 부족한 하부층으로 간단히 나누는 two box model을 제시하였는데, 표층 부근의 일차생산은 동물플랑크톤에 의한 영양염의 재생산에 의존하며 유광층 하부의 일차생산은 수온약층을 통한 영양염

Table 2. New and regenerated production, f-ratio, and C : N Productivity ratio

ST. #	Date (y/m/d)	1% LTD (m)	Inc. Time (hr)	ρ_{N}		f-ratio	ρ_{Tot} ($\text{mg N/m}^2/\text{d}$)	P.P ($\text{mg C/m}^2/\text{d}$)	C : N Prod. ratio
				ρ_{NO_3} ($\text{mg N/m}^2/\text{hr}$)	ρ_{NH_4} ($\text{mg N/m}^2/\text{hr}$)				
A3	95/10/11	46	4	0.101	1.323	0.071	25.039	336.5	13.44
A12	95/10/12	68	4	0.057	1.817	0.030	33.386	318.2	9.53
B1	95/10/13	65	4	0.055	0.434	0.112	8.470	180.2	21.28
BP	95/10/14	50	24	2.260	2.546	0.470	72.945	164.5	2.26
U2	95/10/18	46	4	0.615	0.241	0.718	11.720	-	-

Table 3. Diffusion coefficients and productivity parameters

Station	(1) Kz-1 (cm ² /s)	(2) upward nitrate flux (μg-at/m ² /h)	(3) f-ratio	(4) new nitrogen requirement (μg-at/m ² /h)	(5) Kz-2 (cm ² /s)
A3	0.58	27.35	0.07	12.40	0.26
A12	1.72	74.03	0.03	5.03	0.12
B1	0.60	56.59	0.11	10.42	0.11
BP	0.76	56.73	0.47	40.83	0.55
U2	0.48	69.98	0.72	-	-

(1) diffusion coefficient calculated from stability; by King and Devol's equation (1979) : $Kz = 643.0 (10^6 E)^{-1.61}$, $E = (d\sigma_t/dz) \times 10^{-3}$

(2) $(1) \times dC/dz$

(3) $f\text{-ratio} = \rho_{NO_3} / (\rho_{NO_3} + \rho_{NH_4})$; from ¹⁵N incubation

(4) primary production $\times (3)$

(5) diffusion coefficient calculated from (4)/dC/dz

* Primary production data obtained from Dr. J. G. Choi at Inha Univ. were used in calculating (4)

의 수직확산에 큰 영향을 받는다 (Shim and Park, 1986). 이들에 의하면 신생산에 필요한 질산염은 대기나 강물로부터 들어오거나 질소고정 (nitrogen fixation) 등에 의해 공급되며 수온약층을 통한 질산염의 수직적 확산이 가장 주요한 공급원이라고 보고하였다. 질산염의 상승 수지 (nitrate upward flux, F_n)는 식 $F_n = Kz \cdot dC/dz$ 으로 구할 수 있는데 여기서 Kz는 수직확산 계수이며 dC/dz는 질산염 약층의 기울기이다. 따라서 Kz값을 알면 질산염 농도의 수직 분포로부터 신생산을 계산할 수 있다 (Shimoto et al., 1996). 재료 및 방법에서의 가정을 전제하여 신생산력이 측정된 정점의 수직확산계수 (Kz-2)를 구해보면, 정점 A3의 경우 20~50 m에 수온약층이 형성되어 있어서 dC/dz는 0.131 mmol m⁻⁴ 이다. 질소에 대한 탄소의 흡수율을 Redfield ratio (6.6)와 같다고 가정하고 일일 일차생산 (daily primary production)으로부터 계산된 식물 플랑크톤에 의해 흡수된 질소량은 4.25 mg at-N m⁻² d⁻¹ 가 된다. 총일차생산에 대한 신생산의 비를 나타내는 f-ratio가 0.07이므로 F_n 은 0.2975 mmol m⁻² d⁻¹ 이며,

따라서 Kz-2는 0.26 cm² s⁻¹ 가 된다. 이와 같은 방법으로 나머지 정점들의 Kz-2를 계산하였다.

Kz-2와 new nitrogen 요구량을 살펴보면, Kz-2의 경우 0.11~0.55 cm²/s 로 정점 B1에서 가장 낮았고 전선부근의 정점 BP에서 가장 높았다. New nitrogen 요구량은 5.03~40.83 μ-at/m²/h로 정점 A12에서 가장 낮았고 전선역 부근인 정점 BP에서 가장 높았다. 한편 King and Devol (1979)의 수층의 안정도를 이용한 방법으로 계산한 확산 계수 (Kz-1)와 nitrate upward flux를 살펴보면, Kz-1의 경우 0.48~1.72 cm²/s의 범위로 정점 U2에서 가장 낮았고 정점 A12에서 가장 높았다. Nitrate upward flux는 27.35~74.03 μg-at/m²/h의 범위로 정점 A3에서 가장 낮았고 정점 A12에서 가장 높았다.

Table 4에 다른 해역에서 조사된 수직확산계수와 nitrate upward flux를 요약하였다. 본 조사해역에서 계산된 값과 비교해 보면, Kz-1은 King and Devol (1979)의 방법으로 계산한 값과 비슷하고 Kz-2는 Kz-1보다는 약간 작게 나타났으며 ²²⁸Ra의 수직적 분포로부터 수직확산계수를 구한 Lee (1995)의 값 (0.07~0.08 cm²s⁻¹)보다는 높게 나타났다. 따라서 수직확산계수 산정시 특정해역에서 얻어진 King and Devol (1979)의 식 뿐아니라 연구해역의 신생산을 측정하여 각 해역에 얻어진 계수도 고려하여야 할 것이다.

사 사

연구 항해기간중 도움을 준 탐양호 선장과 선원에게 감사드립니다. 본 연구는 1995년도 교육부 해양/수산과 학분야 학술연구 조성비의 지원에 의하여 수행되었다.

요 약

한국 동해 중부해역의 생·화학적 특성에 대한 조사가 1995년 10월 11일부터 18일까지 동해 중북부해역의 31개 정점에서 연구선인 탐양호를 이용하여 수행되었다.

Table 4. Comparison of diffusivity and nitrate upward flux with others

Kz (cm ² /s)	Upward Flux (μg-at N/m ² /h)	Study Area	Source & Remarks
0.05~1.10	11.2 ~111.8	eastern tropical Pacific	King and Devol(1979) (1)
2.2	208.3	Japan Sea (warm core ring)	Shimoto et al. (1996) (1)
0.13~0.72	5.5 ~ 36.2	southeastern sea of Korea	Shim and Park (1986) (2)
0.22~0.96	13.48~ 92.58	East Sea of Korea	Chung et al. (1989) (2)
0.66~1.43	73.38~182.43	∕	Moon et al. (1996) (2)
0.07~0.08	-	∕	Lee (1995) (3)
0.58~1.72	27.35~ 74.03	∕	This study (2)
0.11~0.55	5.03~ 40.83	∕	∕ (1)

(1) from ¹⁵N new production; (2) by king and Devol, equation (1979); (3) from ²²⁴Ra and ²²⁸Ra

chlorophyll *a*의 농도분포 및 신생산과 수온약층으로부터의 질산염의 수직확산이 측정되었다.

chlorophyll *a*의 농도 범위는 검출한계 이하에서 0.72 $\mu\text{g}/\ell$ 로서 대부분의 정점에서 최대농도는 수온약층부근에서 발견되었으나, 조사 해역의 남쪽 부분에서는 표층에서 나타났다. 이곳은 상대적으로 netphytoplankton의 비율이 높았고 우점종으로는 연안에서 종종 출현하는 *Rhizosolenia* sp.이었다.

^{15}N 질산염과 암모니아 흡수방법을 이용하여 측정된 질소 신생산과 재생산은 유광층의 적분한 질소생산은 $8.470\sim 72.945 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 값을 보였으며 기조생산 중 신생산이 차지하는 비율인 f-ratio의 범위는 0.03~0.72로, 기조생산의 3~72%가 수직확산 등에 의하여 공급되는 질산염에 의해서 유지되고 나머지 28~97%가 수층 내에서 순환되는 암모니아에 의하여 유지된다는 것을 보여 주었다. 이러한 f-ratio 값은 극도의 빈영양 해역에서 부영양 해역의 특징을 포함한다. 정점간 생산성과 f-ratio의 차이는 전선의 위치와 섬(울릉도)와 연관된 해저지형에 관계되어 있는 것으로 보인다. 즉 전선역에서는 생산성과 f-ratio가 높게, 밖에서는 낮게 나타났으며 울릉도 부근에서 가장 높은 f-ratio를 보였다.

수직확산계수는 두 가지 방법으로 구하였는데, King and Devol (1979)의 식에 나타난 수직 안정도로부터 계산한 Kz-1과 new nitrogen 요구량으로부터 계산한 Kz-2이다. Kz-2는 $0.11\sim 0.55 \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 범위로 이전의 다른 연구들에 의해 보고된 값에 비해서 낮았다.

참 고 문 헌

- Carpenter, E.J. and K. Romans. 1991. Major role of the cyanobacterium *Trichodesmium* in nutrient cycling in the North Atlantic Ocean. *Science* 254, 1356~1358.
- Chang, F.H., J.M. Bradford-Grieve, W.F. Vincent and P.H. Woods. 1995. Nitrogen uptake by the summer size-fractionated phytoplankton assemblages in the Westland, New Zealand, upwelling system. *N. Z. J. Mar. Freshwat. Res.* 29, 147~161.
- Cho, H.J., C.H. Moon, H.S. Yang, W.B. Kang and K.W. Lee. 1997. Regeneration processes of nutrients in the polar front area of the East Sea III. Distribution pattern of water masses and nutrients in the middle-northern East Sea of Korea in October, 1995. *Bull. Korean Fish. Sci.*, 30, 393~407. (in Korean)
- Chung, C. S., J. H. Shim, Y. C. Park and S. G. Park. 1989. Primary productivity and nitrogenous nutrient dynamics in the East Sea of Korea. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 24, 52~61. (in Korean)
- Dauchez, S., L. Legendre, L. Fortier and M. Levasseur. 1996. New production and production of large phytoplankton ($>5 \mu\text{m}$) on the Scotian Shelf (NW Atlantic). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 135, 215~222.
- Denman, K.L., D.L. Mackas, H.J. Freeland, M.J. Austin and S.H. Hill. 1981. Persistent upwelling and mesoscale zones of high productivity off the west coast of Vancouver Island, Canada. In *Coastal Upwelling*, Richards, F.A. ed. pp. 514~521.
- Duce, R.A., P.S. Liss, J.T. Merrill, P. Buar-Menard, B.B. Hicks, J.M. Miller, J.M. Prospero, R. Arimoto, T.M. Church, W. Ellis, J.N. Galloway, L. Hanson, T.D. Jickells, A.H. Knapp, K.H. Riehnart, B. Schneider, A. Soudine, J.J. Tokos, S. Tsunogai, R. Wollast and M. Zhou. 1991. The atmospheric input of trace species to the world ocean. *Global Biogeochemical Cycles* 5, 193~259.
- Dugdale, R.C. 1967. Nutrient limitation in the sea: dynamics, identification, and significance. *Limnol. Oceanogr.* 12, 685~695.
- Dugdale, R. C. and J. J. Goering. 1967. Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. *Limnol. Oceanogr.*, 12, 196~206.
- Dugdale, R.C., F.P. Wilkerson, 1992. Nutrient limitation of new production in the sea, pp 107~122. In P.G. Falkowski and A.D. Woodhead [eds.], *Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea*. Plenum Press, New York.
- Eppley, R.W. and B.J. Peterson, 1979. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. *Nature*, 282, 677~680.
- Harrison, W. G., T. Platt and M. R. Lewis. 1987. f-Ratio and its relationship to ambient nitrate concentration in coastal waters. *J. Plank. Res.*, 9, 235~248.
- Holm-Hansen, A.E., C.J. Lorenzen, R.W. Holms and J.D.H. Strickland. 1965. Fluometric determination of chlorophyll. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.* 30, 3~15
- Hong, C. H., K. D. Cho and S. K. Yang. 1984. On the abnormal cooling phenomenon in the coastal areas of East Sea of Korea in summer, 1981. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 19, 11~17.
- Idso, S.B. and R.G. Gilbert, 1974. On the universality of Poole and Atkins secchi-light extinction equation. *J. Appl. Ecol.*, 11, 399~401.
- Kim, S. S. 1987. A study on chemical characteristics of seawater in the neighbouring sea of Cheju Island in summer, M. S. thesis, Cheju Nat. Univ. (in Korean)
- King, F. D. and A. H. Devol. 1979. Estimates of vertical eddy diffusion through the thermocline from phytoplankton nitrate uptake rates in the mixed layer of the eastern tropical Pacific. *Limnol. Oceanogr.*, 24, 645~651

- Laubscher, R. K., R. Perissinotto, C.D. McQuaid. 1993. Phytoplankton production and biomass at frontal zones in the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Polar Biol.*, 13, 471~481.
- Lee, J. S. 1995. ^{224}Ra and ^{228}Ra : Application to mixing studies of estuarine and coastal waters. M.S. Thesis, Chungnam Univ.
- Lee, W. H. and J. H. Shim. 1990. Distribution of phytoplankton standing crop and the associated T-S properties in the southwestern East Sea (Sea of Japan). *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 25, 1~7.
- Owens, N.J.P. 1988. Rapid and total automation of shipboard ^{15}N analysis: examples from the North Sea. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 122, 163~171.
- Park, J. S., C. K. Kang and K. H. An. 1991. Community structure and spatial distribution of phytoplankton in the polar front region off the east coast of Korea in summer. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 24, 237~247. (in Korean)
- Poole, H.H. and W.R.G. Atkins, 1929. Photo-electric measurement of submarine illumination throughout the year. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, 16, 297~324
- Redfield, A.C. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Sci.*, 46, 205~221.
- Shim, J. H., S. R. Yang, and W. H. Lee. 1989. Phytoplankton and the vertical pattern of nitracline in the southern waters of the Korean East Sea in early spring. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 24, 15~28. (in Korean)
- Shim, J. H., H. G. Yea and J. G. Park. 1992. Primary production system in the southern waters of the East Sea, Korea (1) (Biomass and Productivity). *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 27, 91~100. (in Korean)
- Shim, J. H., H.G. Yea and J.G. Park. 1995. Primary production system in the southern waters of the East Sea, Korea (2) (The structure of phytoplankton community). *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 30, 163~169. (in Korean)
- Shim, J. H., W. H. Lee and S. Y. Bak. 1985. Studies on the plankton in the southwestern waters of the East Sea (Sea of Japan) (2) (phytoplankton-standing crop, nanofraction, and primary production-). *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 20, 37~54. (in Korean)
- Shim, J. H. and Y. C. Park. 1986. Primary productivity measurement using carbon-14 and nitrogenous nutrient dynamics in the southeastern sea of Korea. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 21, 13~24 (in Korean).
- Shim, J. H. and W. H. Lee. 1987. Distribution of phytoplankton and associated environmental factors in the southern waters of the East Sea (Sea of Japan), Korea: A canonical correlation analysis. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 22, 34~42. (in Korean)
- Shimoda, A., K. Sasaki and T. Shimoda. 1996. Primary production and contribution of new production in the warm core ring and the cold streamer off Sanriku in May 1990. *La mer*, 34, 1~9.
- Volk, T. and Z. Liu, 1988. Controls of CO_2 sources and sinks in the earth scale surface ocean: Temperature and nutrients. *Global Biogeochem. Cycles*, 2, 78~89.
- Wilkerson, F.P. and R.C. Dugdale, 1987. The use of large shipboard barrels and drifters to study the effects of coastal upwelling on phytoplankton nutrient dynamics. *Limnol. Oceanogr.*, 32, 368~382.
- Yang, H. S., S. S. Kim, C. G. Kang and K. D. Cho. 1991. A study on sea water and ocean current in the sea adjacent to Korea Peninsula. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 24, 185~192. (in Korean)
- Yentsch, C. S. and D.W. Menzel. 1963. A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep-Sea Res.*, 10, 221~231.

1997년 9월 12일 접수

1998년 3월 9일 수리