

## 가막만 소호해역에서 태풍 전후 수질 변동특성

이영식\* · 문성용<sup>1</sup>

\*국립수산과학원 양식환경연구소, <sup>1</sup>전남대학교 해양기술학부

### The Water Quality in the Soho Coastal Seawaters of Gamak Bay Before and After a Typhoon

YOUNG SIK LEE\* AND SEONG-YONG MOON<sup>1</sup>

\*Aquaculture Environment Institute, NFRDI, 361 Yongun-ri Sanyang-up Tongyeong-city Kyungnam, 650-943, Korea

<sup>1</sup>Division of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 556-823, Korea

유기물 증가원인의 파악과 근본적인 대책에 대한 연구의 일환으로 부영양화된 연안해역에 대하여 태풍 발생 전후의 수질변동에 대하여 조사하였다. 용존산소 포화도는 수온과 염분 약층이 형성된 시기에 저층에서 54% 이하로 관측되었다. 태풍이 지나간 직후에는 표층과 저층에서 거의 비슷한 용존산소 포화도(78~88%)가 조사되었다. 그리고, 태풍이 지나간 3일 후 식물플랑크톤이 대량으로 증식한 표층에서 용존산소 포화도가 234%로 아주 높은 값이 관측되었고, 저층(5 m)에서도 90%가 조사되었다. 염분이 가장 낮았던 시기에 표층에서 NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, SiO<sub>2</sub>-Si의 최고 농도가 각각 18.22, 38.90, 52.10 μM로 조사되었으며, NH<sub>4</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, SiO<sub>2</sub>-Si는 용존산소가 낮은 저층에서도 높게 나타났다. 클로로필은 최고 311.0 μg l<sup>-1</sup>가 태풍 후에 관측되었으며, 그 원인 생물은 *Scrippsiella trochoidea*(42,000 cells ml<sup>-1</sup>)였다. 조류성장잠재능력은 태풍발생 후에 아주 높게 조사되었으며, 항상 질소가 부족한 것으로 조사되었다. 화학적 산소요구량은 최고 10.55 mg l<sup>-1</sup>였으며, 태풍으로 저층 퇴적물로부터 부유되는 유기 오탁 물질이 화학적 산소요구량 증가에 미치는 기여도는 크지 않은 것으로 보이며, 화학적 산소요구량 증가의 대부분이 식물플랑크톤의 증식에 기인한 것(r<sup>2</sup>=0.612, p=0.000)으로 조사되었다.

The water quality before and after a typhoon was investigated as a part of a study on the increase of organic matter and on the fundamental measures to counter chemical oxygen demand (COD) in the eutrophic Soho coastal seawaters of Gamak Bay. The dissolved oxygen (DO) saturations were < 54% when water column was stratified. The DO saturation was similar at surface and in the bottom layer after a typhoon (78~88%), and a very high DO saturation (234%) was observed in the surface water after mass phytoplankton growth. The highest values of NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, and SiO<sub>2</sub>-Si were 18.22, 38.90, 1.58, and 52.10 μM, respectively, when freshwater entered after heavy rainfall events. In addition, high concentrations of NH<sub>4</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, and SiO<sub>2</sub>-Si were detected with low DO saturations in bottom water (> 5 m). A maximum chlorophyll (Chl.) concentration of 311.0 μg l<sup>-1</sup> was observed after typhoon, when a high-density *Scrippsiella trochoidea* red tide occurred with cell density of 42,000 cells ml<sup>-1</sup>. The algal growth potential (AGP) was high after the typhoon. Nitrogen was always a limiting nutrient for phytoplankton growth. The highest COD level was 10.55 mg l<sup>-1</sup>, and the main reason of the variation in COD was likely to be phytoplankton growth (r<sup>2</sup>=0.612, p=0.000). Organic matter, which entered the water column when the typhoon stirred the sediments, seems to have little effects on COD increase.

**Keywords:** Algal Growth Potential, Gamak Bay, Phytoplankton, Typhoon, Water Quality

### 서론

가막만은 북쪽으로 여수반도, 동쪽으로는 돌산도, 서쪽은 고돌산반도, 남쪽에는 개도 등 몇몇 섬들로 둘러 쌓여 있는 타원형 내만이다. 평균수심은 약 9 m인 천해로서 대조차는 약 3 m이고, 만내의 해수는 조류에 의해 여수항과 돌산도 사이의 북쪽의 좁은 수

로와 남쪽의 크고 작은 여러 수로로 흐른다. 만 내에는 굴, 홍합 등 패류양식장이 산재해 있고 비교적 청정한 내만해역으로 환경보전해역으로 지정되어 있다. 그러나, 가막만 북부의 소호 주변해역은 여천시의 생활하수 등이 유입되고, 빈산소 수층과 적조가 자주 발생하는 등 부영양화에 따른 여러 문제가 발생하고 있는 해역이다. 특히, 여름철에는 악취가 발생하여 심미적으로 사람에게 나쁜 영향을 미치고 있다.

연안해역을 효과적으로 관리하고 이용하기 위해서는 해당 해역

\*Corresponding author: leeys@momaf.go.kr

의 수질변동 특성에 대해 정확한 진단과 충분한 이해가 필요하다. 그러나, 만 전체의 수질변동특성에 대한 광역조사 연구 또는 계절 변동 조사 연구는 많지만(Cho *et al.*, 1998; Moon and Kwon, 1994), 적조, 호우, 태풍 등 이상 해황이 발생한 경우에 대한 해역의 수질변동 특성에 대한 연구는 많지 않고(Cho *et al.*, 2004), 그 변동 특성에 대해서도 잘 알지 못하고 있다.

이 연구에서는 유기물 증가원인과 근본적인 대책 연구의 일환으로 부영양화된 여수시 가막만 북부의 소호 주변해역에서 태풍 발생 전후의 수질변동 특성을 살펴보았다.

## 재료 및 방법

조사해역은 여수시 가막만 북부의 소호 인근해역을 대상으로 하였다(Fig. 1). 조사 시기는 강우량이 많고 태풍이 발생한 2005년 8월 22일부터 9월 15일까지이며, 2~6일 간격으로 현장을 조사하였다. 기상 자료는 조사해역과 가장 가까운 여수지방기상대에서 관측한 자료를 참고하였다(<http://www.kma.go.kr>).

수온, 염분, pH, 용존산소(DO), 클로로필(Chl.)은 다항목 수질 측정기(6920, YSI)로 현장에서 0.2, 1, 2, 3, 4, 5, 6 m 층에서 측정하였으며, 영양염( $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ )과 화학적 산소요구량(COD)의 시료는 0.2, 2, 4, 6 m 층에서 채수하였다. 영양염은 GF/F 여과지로 여과 후 분석하였으며, 화학적 산소요구량은 알칼리성 과망간산칼륨법으로 분석하였다(해양수산부, 2002).

현장 식물플랑크톤을 이용한 조류성장잠재능력은 표층해수(0.2 m)를 망목크기가 100  $\mu\text{m}$ 인 나일론 여과막으로 대기압에서 자연 여과하여 동물플랑크톤을 제거하였다. 영양염 첨가계는 영양염을 첨가하지 않은 대조구(control), 질소첨가계(+N), 인첨가계(+P) 및 식물플랑크톤 증식을 확인하기 위한 질소-인 혼합 첨가계(+N+P)를 설정하였다. 질소첨가계는 80 mg  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  l<sup>-1</sup>원액을 첨가하여 첨가 후의 농도를 20  $\mu\text{M}$ 로, 인첨가계는 27 mg  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  l<sup>-1</sup>원액을

첨가하여 첨가 후의 농도를 2.0  $\mu\text{M}$ 로 하였다. 동물플랑크톤을 제거한 해수 5 ml를 영양염 첨가 후의 시험관에 분주하고 silicon막 개로 뚜껑을 하였다. 배양은 15 ml의 시험관을 사용하였다. 온도  $23\pm 2^\circ\text{C}$ , 광도  $140\pm 10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{sec}^{-1}$  (12:12 h L:D cycle)에서 정지 배양하였으며(Lee *et al.*, 1996), 매일 1회 시험관 교반기를 사용하여 시험관 바닥에 침전한 식물플랑크톤을 교반시켰다. 증식량은 광합성효율 측정기(PHYTO-PAM chl fluorometer)로 모니터링 하였다(Schreiber *et al.*, 2002). 모든 조류성장잠재능력은 같은 시료에 대하여 3회 실시하여 그 평균치를 결과로 하였다.

## 결 과

여수지역의 강우량, 기온, 순간최대풍속, 운량을 Fig. 2에 나타냈다. 강우량은 8월 20일에 29.5 mm, 8월 24일에 61.5 mm가 관측되었다. 그 이후에는 하루 10 mm 이상의 비는 관측되지 않았다. 태풍 나비는 9월 5~7일에 여수에 영향을 주었으며, 비는 적게 오고 바람이 강함(여수지역의 순간 최대 풍속: 30 m sec<sup>-1</sup>) 태풍으로 관측되었다(Fig. 2).

조사 기간 동안 수온, 염분, pH, 용존산소의 시공간변동을 Fig. 3에 나타냈다. 수온의 변동범위는 23.81~28.20  $^\circ\text{C}$ (평균 25.62  $^\circ\text{C}$ )였다. 8월 22일에 표층(0.2 m)에서 27  $^\circ\text{C}$  이상으로 관측되었으며, 저층(5 m 이하)에서는 25  $^\circ\text{C}$  이하로 나타났다. 비가 많이 내린 25일에는 22일보다 표층에서 약간 낮게 관측되었다. 9월 1일에는 표층에서 26  $^\circ\text{C}$  이상으로 상승하였다. 태풍이 관측된 7일에는 표층에서 다시 25  $^\circ\text{C}$  이하, 저층에서는 24  $^\circ\text{C}$  이하로 관측되어 표, 저층의 수온 차가 많이 감소하였다. 태풍이 통과한 9월 12일에는 다시 표층에서 29  $^\circ\text{C}$  이상으로 관측되었으며, 저층에서는 26  $^\circ\text{C}$  이하로 조사되었다. 염분의 변동범위는 25.21~33.46 psu(평균 32.53 psu)였다. 8월 22일에 표층에서 32 psu 이상, 저층에서는 33 psu 이상으로 관측되었다. 많은 양의 강우가 관측된 직후의 25일에는 표층에서 25.21 psu까지 낮아졌으며, 표, 저층의 염분은 약 8.0 psu 차이를 나타냈다. 그 이후 표층에서는 다시 증가하여 29일에는 32 psu 이상으로 조사되었다. 태풍이 지나간 직후인 9월 7일에는 표, 저층에서는 각각 32.60, 32.70 psu로 조사되어 표, 저층간의 차이는 아주 낮게 나타났다. pH의 변동범위는 6.58~7.78(평균 7.08)이었다. 8월 22일에는 표층에서 7.3 이상으로 관측되었으며, 저층에서는 6.9 이하로 나타났다. 25일에는 표층에서 약간 낮은 7.1 이하로 관측되었다. 9월 1일에는 표, 저층에서 각각 7.39, 6.90으로 관측되었다. 태풍이 통과한 7일에는 표, 저층에서 6.9 이하로 나타났다. 그리고, 9일에는 표층에서 7.6 이상으로 높게 나타났다. 용존산소 포화도 변동범위는 31~243%(평균 102%)였다. 표층에서는 8월 22일, 9월 1일, 9월 9일에 높게 나타났으며, 저층에서는 8월 22~29일에 54% 이하로 낮은 용존산소 포화도가 관측되었다. 특히 태풍이 지나간 9월 7일에는 표, 저층 농도가 거의 비슷하게(78~88%) 조사되었으며, 식물플랑크톤의 농도가 아주 높았던 9월 9일에는 표층에서 234%로 아주 높은 값이 관측되었다.

연구 기간 동안  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 의 농도변화를 Fig. 4에 나타냈다.  $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 변동범위는 0.02~18.22  $\mu\text{M}$ (평균 2.17  $\mu\text{M}$ )였으며, 표층에서는 염분농도가 가장 낮았던 8월 25일에 18.22  $\mu\text{M}$ 로 가장 높게 나타났으며, 8월 29일 이후부터 9월 9일까지는 1  $\mu\text{M}$

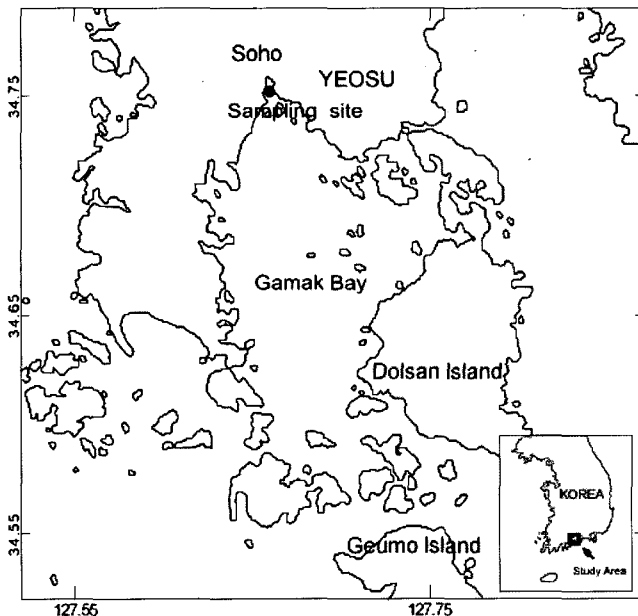


Fig. 1. Map of the sampling site at Soho coast of Gamak Bay, South Sea of Korea.

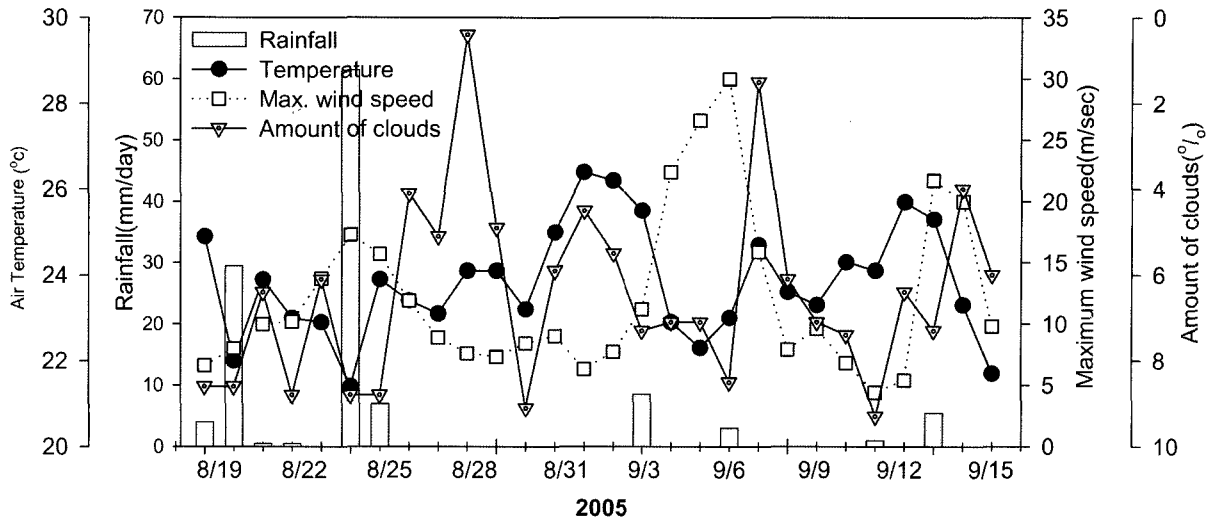


Fig. 2. Temporal variation of rainfall, air temperature, maximum wind speed, and amount of clouds in Yosu.

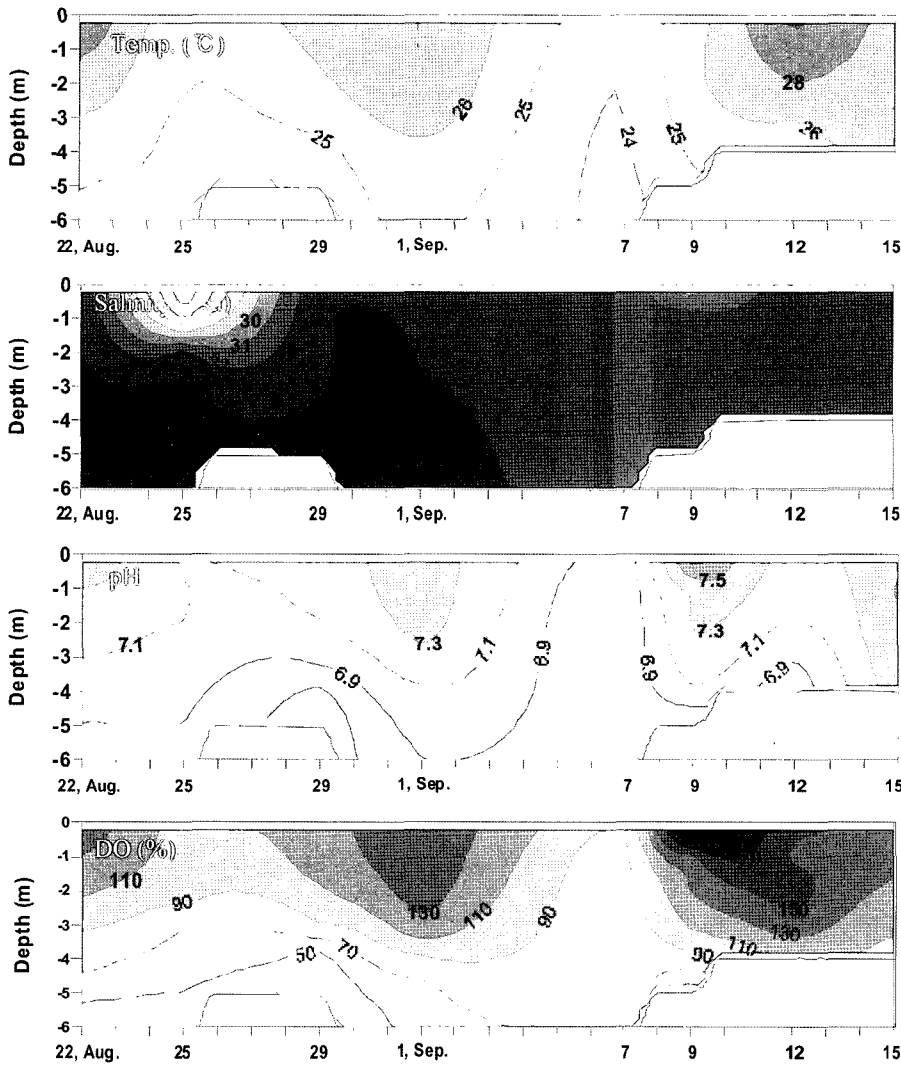


Fig. 3. Temporal variations of temperature(°C), salinity(psu), pH, and DO(%) at the Soho coastal seawaters of Gamak Bay.

이하로 조사되었으며, 그 이후 약간 증가하였다. 수심별 변동은 8월 22일부터 29일까지 용존산소 포화도가 낮은 4 m 이하의 수심에서

2.53  $\mu\text{M}$  이상으로 중층보다 높게 조사되었으며, 태풍이 통과한 9월 7일경에는 표, 저층의 농도는 거의 비슷하게 1  $\mu\text{M}$  이하로 조사되

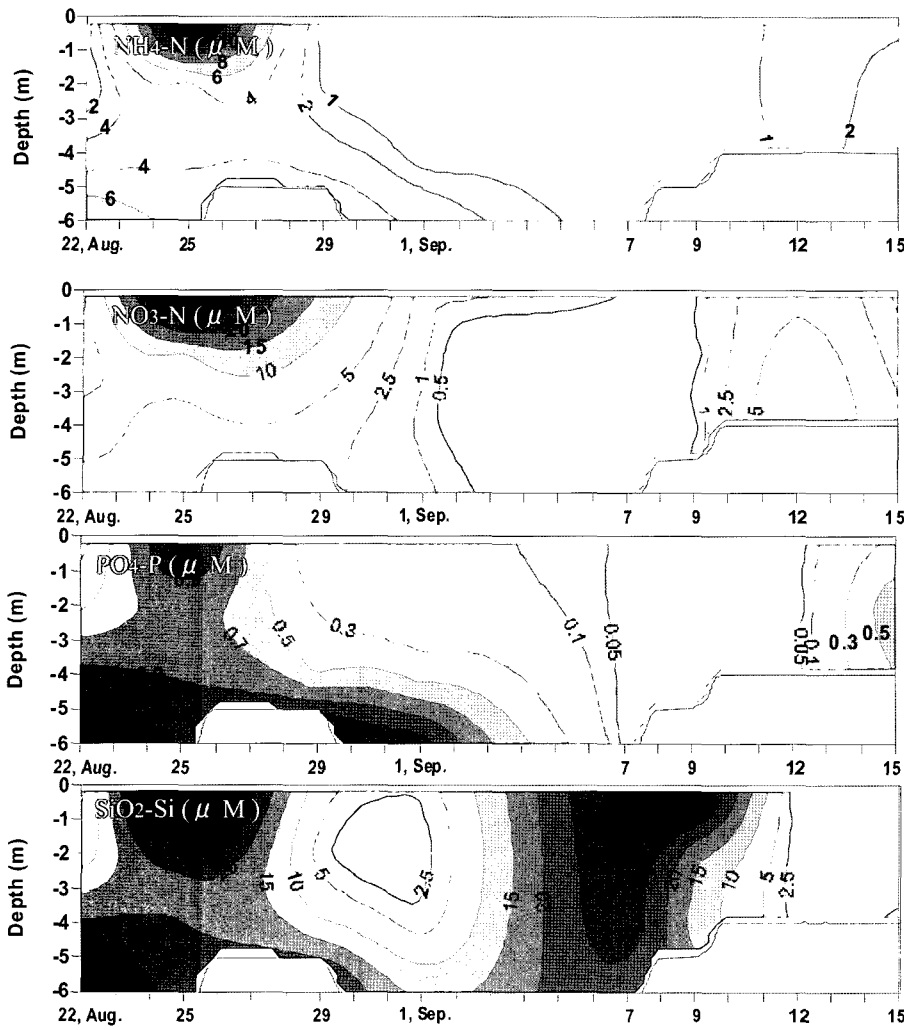


Fig. 4. Temporal variations of  $\text{NH}_4\text{-N}(\mu\text{M})$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}(\mu\text{M})$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}(\mu\text{M})$ , and  $\text{SiO}_2\text{-Si}(\mu\text{M})$  at the Soho coastal seawaters of Gamak Bay.

었다.  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 변동범위는  $0.12\sim 38.90 \mu\text{M}$ (평균  $4.39 \mu\text{M}$ )였으며,  $\text{NH}_4\text{-N}$ 와 같이 표층에서는 염분농도가 가장 낮았던 8월 25일에  $38.90 \mu\text{M}$ 로 가장 높게 나타났으며, 9월 1일 이후부터 9월 9일까지는  $2.5 \mu\text{M}$  이하로 조사되었으며, 그 이후 약간 증가하였다. 수심 별 변동은 8월 22일부터 29일까지는 수심이 증가할수록 그 농도는 낮아졌으며, 9월 1일부터 9월 9일까지는 수심 별 큰 차이는 없었고, 12일에는 저층에서 높게 나타났다.  $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 변동범위는  $\text{ND}\sim 1.58 \mu\text{M}$ (평균  $0.44 \mu\text{M}$ )였으며,  $\text{NH}_4\text{-N}$  농도와 비슷하게 변동하였다. 즉, 표층에서는 8월 25일에  $1.28 \mu\text{M}$ 로 가장 높게 나타났으며, 8월 29일 이후부터 9월 12일까지는  $0.3 \mu\text{M}$  이하로 조사되었으며, 그 이후 증가하였다. 수심 별 변동은 8월 22일부터 29일까지 용존산소 포화도가 낮은 4 m 이하에서  $0.9 \mu\text{M}$  이상으로 중층보다 높게 조사되었으며, 태풍이 발생한 9월 7일경에는 표, 저층의 농도는 거의 비슷하게  $0.1 \mu\text{M}$  이하로 조사되었으며, 그 이후에는 시간이 경과함에 따라 모든 조사 층에서 증가하였다.  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 의 변동범위는  $0.46\sim 52.10 \mu\text{M}$ (평균  $15.30 \mu\text{M}$ )였으며, 호우 후 8월 25일에 표층에서  $52.10 \mu\text{M}$ 로 아주 높게 조사되었다. 그리고, 9월 7일경 태풍이 발생한 후에도 표층에서 아주 높게 조사되었다. 저층에서는  $\text{PO}_4\text{-P}$ 와  $\text{NH}_4\text{-N}$ 와 마찬가지로 8월 22일부터 8월 29일까지 4 m 이하의 수심에서  $10.63 \mu\text{M}$  이상으로 높게 조사되었다.

클로로필과 화학적 산소요구량의 시공간변동을 Fig. 5에 나타냈다. 클로로필의 변동범위는  $4.2\sim 311.0 \mu\text{g l}^{-1}$ (평균  $22.5 \mu\text{g l}^{-1}$ )였으며, 태풍이 지나간 후의 9월 9일 표층에서 가장 높게 나타났으며, 9월 7일 저층에서 가장 낮게 나타났다. 수층 별 범위는 9월 12일을 제외한 기간 동안 표층에서 높았고, 저층으로 갈수록 낮게 나타났다. 9월 9일에 아주 높게 조사된 시기의 원인 생물은 *Scrippsiella trochoidea*였으며 농도는  $42,000 \text{ cells ml}^{-1}$ 였다. 화학적 산소요구량의 변동범위는  $0.79\sim 10.55 \text{ mg l}^{-1}$ (평균  $2.58 \mu\text{g l}^{-1}$ )였으며, 태풍이 지나간 직후인 9월 7일에 가장 낮았으며, 클로로필의 농도가 아주 높았던 9월 9일에 가장 높게 나타났다. 수심 별 농도는 대부분 저층에서 낮게 나타났다.

질소, 인을 첨가한 조류성장잠재능력의 조사결과를 Fig. 6에 나타냈다. 모두(8월 29일, 9월 1일, 9월 7일, 9월 9일) 질소-인 혼합 첨가계에서 증식량이 가장 크게 증가하였다. 우점종은 8월 29일, 9월 1일, 9월 7일에는 규조류였으며, 9월 9일에는 *S. trochoidea*로 조사되었다. 그리고, 시기별 조류성장잠재능력(AGP, 대조구)은 8월 29일, 9월 1일, 9월 7일, 9월 9일에 각각  $50, 53, 210, 590 \mu\text{g l}^{-1}$ (Phyto-pam Chl. a)로 태풍발생 후에 아주 높게 조사되어 강한 바람이 식물플랑크톤의 이상증식과 관련이 있는 것으로 나타났다. 또, 호우 후나 태풍 발생과 무관하게 대조구나 인 첨가계보다 질

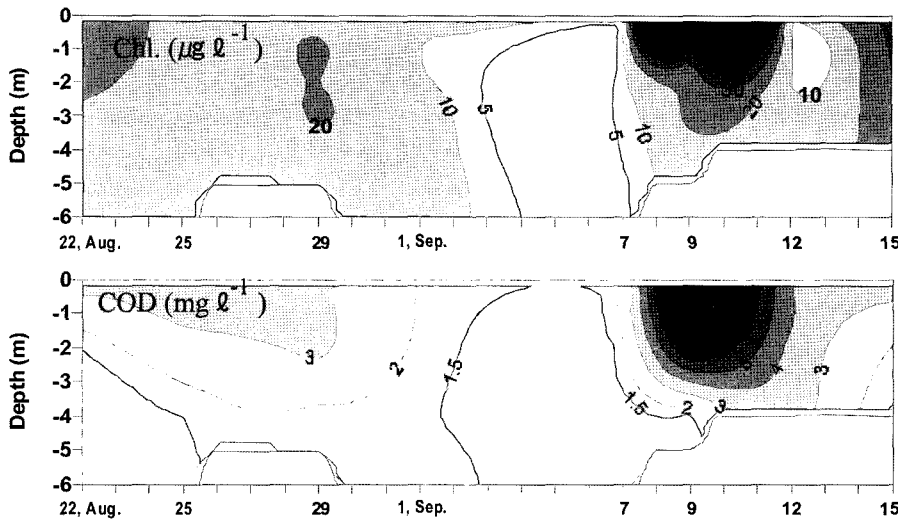


Fig. 5. Temporal variations of Chl.( $\mu\text{g l}^{-1}$ ) and COD( $\text{mg l}^{-1}$ ) at the Soho coastal seawaters of Gamak Bay.

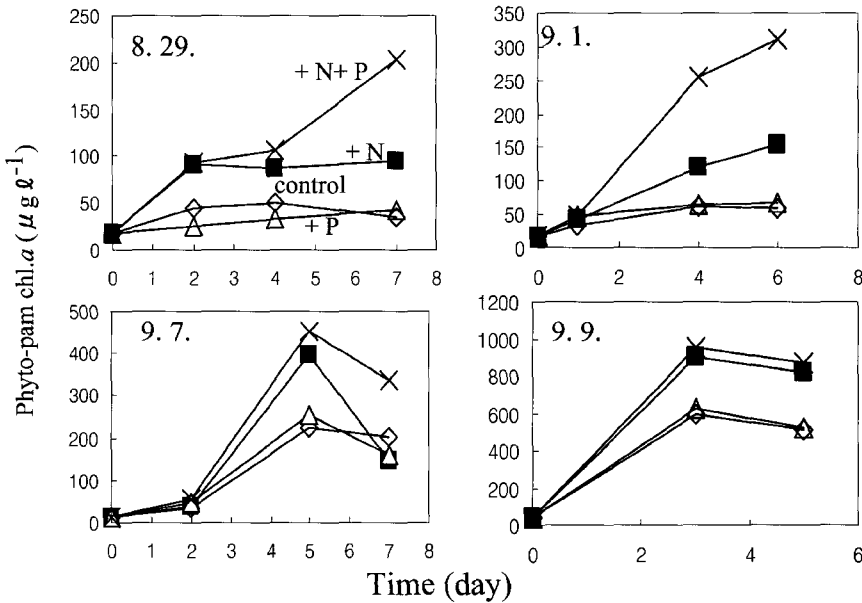


Fig. 6. Phytoplankton growth responses in nutrient addition bioassays with the indigenous phytoplankton assemblage in the Soho coastal seawaters of Gamak Bay, Yeosu (n=3).

소침가계에서 그 증식량이 증가하여 인보다는 질소가 상대적으로 부족한 것으로 나타났다. 따라서 식물플랑크톤의 증식을 제어하기 위해서는 질소의 제어가 가장 중요한 것으로 판단할 수 있다.

### 고 찰

#### 영양염 농도 변동

이번 조사에서 8월 22일~9월 1일에 용존산소농도가 70% 이하인 저층에서  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 가 높게 조사되었으며, 9월 12일에는 저층에서  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도가 약간 높게 조사되었다. 여름철에 마산만에서도 용존산소농도가 낮은( $<6 \text{ mg l}^{-1}$ ) 시기에 저층에서  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도가 높게 조사되었으며, 이러한 농도변동의 원인으로는 낮은 용존산소농도 환경에서 저층의 유기물 등이 분해되어 용출된 것으로 보고하였다(Cho *et al.*, 1998). 이번 조사해역은 마산만과 같이 부영양화된 해역으로 여름철에는

적조가 자주 발생하고 악취가 발생하는 해역이다. 따라서, 이번 조사해역의 저층에서  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  농도가 높게 조사된 것은 다량으로 퇴적된 유기물이 분해되어 용출된 것으로 보인다.

이번 조사에서 호우 후 담수가 많이 유입된 8월 25일 표층에서  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  농도가 각각 18.22, 38.90, 1.28, 52.10  $\mu\text{M}$ 로  $\text{NO}_3\text{-N}$ 과  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 가 아주 높게 조사되었다. 이번 조사정점부근에는 넓은 면적의 농경지나 축산업이 없는 점을 고려하면,  $\text{NO}_3\text{-N}$ 과  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 의 주요기원은 생활하수, 산림, 시가지로부터 유입된 담수로 생각된다.

다음으로 9월 7일과 9일에  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 농도에는 큰 변화가 없는 반면  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  농도가 표층을 중심으로 아주 높게 조사되었다(9월 7일 : 32.67, 9일 : 37.20  $\mu\text{M}$ ). 이 시기에 특이한 환경변화는 태풍으로 강한 바람과 약간 낮은 염분농도가 관측된 점이다. 따라서, 강한 바람에 의한 파도 등의 영향으로 연안해역의 암석의 풍화작용으로 규산염이 용출(Moon and Kwon, 1994)된 것과 육지로부터 유입 등을

생각해 볼 수 있지만, 정확한 것은 집중조사가 필요하다.

### 용존 산소농도

Tsutsumi *et al.*(2003)의 연구에 의하면, Ariake만에서 여름철의 빈산소수괴형성은 장마로 많은 양의 담수가 유입되어 염분 성층이 형성되고, 장마가 끝나고 강한 일사조건으로 표층 수온이 상승하면서 수온성층이 발달하고, 표, 저층간의 밀도 차가 확대되어, 해수의 연직 혼합이 크게 억제되면서 발달하였다. 그러나, 이러한 조건은 Ariake만 외 다른 연안해역에서도 발생하는 현상으로 단순히 이러한 조건으로 빈산소수괴의 형성을 모두 설명하기는 부족하다고 보고하였고, Ariake만에서 빈산소수괴 형성은 해수의 정체나 해저에서 용존산소 소비량의 증가를 주요 원인으로 해석하고 있다(Tsutsumi *et al.*, 2003).

이번 조사에서 8월 22일에는 표, 저층간에 수온성층이 관찰되었으며, 이 시기에 수심 5m에서 54%의 낮은 용존산소값이 관측되었다. 그리고, 25일에는 많은 양의 담수가 유입되면서 표, 저층의 염분성층이 뚜렷하게 형성되면서 수심 5m에서 50%의 낮은 용존산소값이 관측되었다. 즉, 이번 조사에서 낮은 용존산소값이 관측된 시기의 수온이나 염분은 Tsutsumi *et al.*(2003)이 보고한 Ariake 만과 비슷하였다. 그리고, 이번 연구의 조사해역은 가막만에서 가장 해수의 흐름이 느리고 유기물이 많이 퇴적되어 적조 및 악취가 발생하여 준설을 하고 있는 해역이다. 따라서, 위에서 언급한 Tsutsumi *et al.*(2003)이 설명한 것과 같이 해수의 정체나 해저에서 용존산소 소비량의 증가가 이번 조사해역에서 빈산소수괴형성의 더 큰 원인으로 보인다.

이번 조사에서 9월 7일에는 모든 수심에서 용존산소값이 78% 이상이 관측되었다. 이 시기에 수온, 염분, pH의 변동이 용존산소의 변동과 비슷한 것으로 보아 태풍에 의한 강한 바람의 영향으로(Fig. 2) 해수가 혼합되면서 표, 저층의 용존산소농도가 비슷하게 나타난 것으로 보인다. 일반적으로 태풍은 강한 바람과 많은 양의 비를 동반하고 동시에 많은 피해가 발생하기 때문에 부정적인 이미지가 강하다. 그러나, 이번 조사에서 강한 바람을 동반한 태풍은 저층의 낮은 용존산소 농도를 상승시키는 긍정적인 역할을 한 것으로 보인다.

또 식물플랑크톤이 대량으로 증식한(9월 9일) 후의 9월 12일에는 4m 이하의 저층에서 포화도가 100% 이상인 것으로 조사되었다. 이것은 표층에서 식물플랑크톤의 활발한 광합성작용에 의한 것으로 보이며, 식물플랑크톤의 이상 증식이 수심이 낮은 해역에서 저층의 용존산소 농도를 높이는 작용을 한 것으로 보인다.

### 식물플랑크톤의 이상증식 원인

일반적으로 연안해역에 많은 양의 담수가 유입되면, 영양염 농도가 높아지고 이어서 식물플랑크톤이 대량으로 증식한다(Lee *et al.*, 1996; Lee, 2002). 히로시마만이나 여수의 돌산도 동부연안해역에서 낮은 염분이 관측된 후 4~10일 후에 식물플랑크톤이 대량 증식하였으며, 그 지속기간은 4~8일 이상이다(Lee *et al.*, 1996; Lee, 2002). 이번 조사에서 8월 25일에 많은 양의 담수가 유입되었으며, 동시에 질소, 인, 규소의 농도가 급격히 증가하였다. 따라서, 담수가 유입되고 4일이 경과한 8월 29일경에는 식물플랑크톤이 대량으로 증식할 수 있다. 그러나, 8월 29일에 중층에서 클로

로필 농도가 20.0~21.0  $\mu\text{g l}^{-1}$ 로 약간 높은 값이 조사되었을 뿐 식물플랑크톤이 대량으로 증식한 흔적은 없다. 그리고, Fig. 2에 나타난 것처럼 이 기간 동안 운량이 5% 이하로 일사량이 식물플랑크톤의 대규모 증식을 제한했다고 보기는 어렵다.

위에서 언급한 히로시마만이나 여수의 돌산도 동부연안해역은 상류에 유역면적이 큰 강이 있고 호우가 발생하면 담수가 몇 일 간 지속해서 유입된다. 그러나, 이번 조사해역은 주변에 큰 강이 없고, 호우가 발생하면 시가지를 경유한 담수가 일시에 유입된다. 따라서, 이러한 주변환경으로 보아 호우에 의한 식물플랑크톤의 대규모 발생 기간이 히로시마만이나 여수의 돌산도 동부연안해역보다 소호 주변 해역이 짧을 수 있다. 그리고, 이번 조사에서 호우 후에 대규모로 증식했을 식물플랑크톤의 종과 태풍 후 대규모로 발생한 *S. trochoidea*의 발생 메커니즘이 같다고는 볼 수 없고, 또 단지 증식만으로 대규모로 발생했다고 보기는 어렵지만, 그 *S. trochoidea*가 대규모로 관측되기까지 2일 소요되었으며, 대량 발생에서 3일 후에 클로로필 농도가 10  $\mu\text{g l}^{-1}$  이하로 낮아졌다(Fig. 5). 따라서, 이런 조사결과로부터 이번 조사해역에서 8월 27~28일에 현장에서는 식물플랑크톤이 대량으로 증식하였을 가능성이 있으며, 단지 조사가 이루어지지 않아 관측되지 않았을 수 있다. 물론 정확한 것은 더 많은 조사가 필요하며, 위에서 언급한 것처럼 큰 강이 없는 소호 주변해역과 같은 곳은 2일 간격의 집중 조사가 필요하다.

태풍으로 표, 저층의 해수가 혼합된 후 9월 9일에 클로로필의 농도가 아주 높게(311  $\mu\text{g l}^{-1}$ ) 조사되었으며, 그 원인 생물은 *S. trochoidea* (42,000 cells  $\text{m l}^{-1}$ )였다. 그리고, 이번 조사 정점에서 남쪽을 향하여 약 20m, 50m 지점에서도 클로로필의 농도는 각각 135, 57  $\mu\text{g l}^{-1}$ 로 조사되었으며, 우점 종은 *S. trochoidea*로 조사되어 *S. trochoidea*가 소호 주변해역에 넓게 분포하고 있었다.

식물플랑크톤은 증식하기 위해 여러 종류의 영양물질이 필요하며, 종에 따라 선호하는 증식환경이 조금씩 다르다. *Cochlodinium polykrikoides*는 주로 오염된 연안해역보다 덜 오염된 연안해역 또는 외해에서 대규모로 관찰되고(Lee *et al.*, 2001), 잘 증식하는 고유의 해수가 있다(Lee and Lee, 2006). *Heterosigma akashiwo*는 마산만과 같이 부영양화된 해역에서 대규모로 증식하며, 이러한 곳의 해수로 배양하면 계대 배양이 잘된다. 또 *Chaetoceros sp.*나 *S. costatum*은 담수가 많이 유입되는 곳에서 대규모로 증식한다(Lee, 2002). 그리고, 연안해역에는 여러 종류의 식물플랑크톤의 cyst가 있고 *S. trochoidea*도 cyst를 형성하는 종이다(Fukuyo *et al.*, 2003).

이번 조사에서 9월 1일부터 9월 9일에 비가 많이 왔거나, 규산염을 제외한 질소와 인의 농도가 크게 증가한 흔적은 없다. 그러나, 9월 9일에 표층의 염분이 30.61 psu로 9월 7일의 32.60 psu보다 낮게 조사되어, 9월 8일과 9월 9일에 육지로부터 약간의 담수가 유입된 것으로 보인다. 또 현장식물플랑크톤을 이용한 조류성장잠재능력에 대한 조사결과 대조구에서 *S. trochoidea*의 최대증식량이 9월 7일에 210  $\mu\text{g l}^{-1}$ 로 태풍발생전의 8월 29일과 9월 1일보다 높게 조사되어 *S. trochoidea*가 증식하기에 좋은 여러 화학물질이 태풍의 영향으로 공급되었음이 조사되었다. 그리고, 9월 9일에는 클로로필농도가 아주 높게(311  $\mu\text{g l}^{-1}$ ) 조사되었음에도 불구하고 조류성장잠재능력에서 대조구의 최대증식량이 590  $\mu\text{g l}^{-1}$ , 질소첨가계에서는 900  $\mu\text{g l}^{-1}$ (Phyto-pam Chl. a) 이상으로 조사되

어 태풍이 발생한 시기인 9월 7일보다 높게 조사되었다. 따라서, 9월 7일부터 9월 9일 사이에 담수 유입으로 식물플랑크톤이 증식하기 위해 필요한 물질이 유입되었음을 알 수 있다.

따라서, 이번 조사에서 *S. trochoidea*가 아주 높은 농도로 관측된 것은 태풍으로 부유한 *S. trochoidea* cyst와 낮은 농도로 있던 *S. trochoidea*의 영양세포가 태풍과 담수유입으로 저층 또는 육지로부터 유입된 영양염(특히 질소, Fig. 6)을 이용하여 증식하기에 좋은 환경이 조성되어 대규모로 증식함과 동시에 인근 해역으로부터 유입된 결과로 보인다. 하지만 정확한 것은 철저한 조사가 더 필요하다.

#### 화학적 산소요구량 변동

강한 바람으로 저층의 퇴적물이 부유하여 해수의 화학적 산소요구량이 증가할 수 있다. 그러나, 이번 조사에서 태풍이 발생한 직후(9월 7일)에 1.20~1.87 mg l<sup>-1</sup>로 태풍발생 전 9월 1일의 1.55~1.97 μg l<sup>-1</sup>과 큰 차이가 없었다. 따라서, 태풍으로 인해 해수가 혼합되면서 저층 퇴적물로부터 부유되는 유기 오탁 물질이 화학적 산소요구량 증가에 미치는 기여도는 크지 않은 것으로 보인다. 이번 조사에서 화학적 산소요구량 농도 변동과 클로로필간의 상관관계에서 r<sup>2</sup>=0.612(p=0.000)로 조사되어, 화학적 산소요구량 증가원인의 대부분이 식물플랑크톤의 증식에 기인한 것으로 보인다. 물론 유기물의 변동을 정확히 조사하기 위해서는 화학적 산소요구량의 총유기탄소 등을 측정해야 하며, 유기물 변동에 대한 보다 정확한 원인은 부유물질에 대한 보다 정밀한 현장조사 등이 필요하다.

## 요 약

유기물 증가 원인과 근본적인 대책에 대한 연구의 일환으로 부영양화된 연안해역에 대하여 태풍 발생 전후의 수질변동에 대하여 조사하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 용존산소 포화도는 수온과 염분 약층이 형성된 시기에 저층에서 54% 이하로 관측되었다. 태풍이 지나간 직후에는 표층과 저층에서 거의 비슷한 용존산소 포화도(78~88%)가 조사되었다. 그리고, 태풍이 지나간 3일 후 식물플랑크톤이 대량으로 증식한 표층에서 용존산소 포화도가 234%로 아주 높은 값이 관측되었고, 저층(5 m)에서도 90%가 조사되었다.

2) 염분이 가장 낮았던 시기에 표층에서 NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, SiO<sub>2</sub>-Si의 농도가 각각 18.22, 38.90, 52.10 μM로 아주 높게 조사되었으며, NH<sub>4</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, SiO<sub>2</sub>-Si는 용존산소가 낮은 저층에서도 높게 나타났다.

3) 클로로필은 최고 311.0 μg l<sup>-1</sup>가 태풍 후에 관측되었으며, 그 원인 생물은 *Scrippsiella trochoidea*(42,000 cells ml<sup>-1</sup>)였다. 조류 성장잠재능력은 태풍발생 후에 아주 높게 조사되었으며, 항상 질소가 부족한 것으로 조사되었다.

4) 화학적 산소요구량은 최고 10.55 mg l<sup>-1</sup>였으며, 태풍으로 저층 퇴적물로부터 부유되는 유기 오탁 물질이 화학적 산소요구량 증가에 미치는 기여도는 크지 않은 것으로 보이며, 화학적 산소요구량 증가의 대부분이 식물플랑크톤의 증식에 기인한 것(r<sup>2</sup>=0.612, p=0.000)으로 조사되었다.

## 감사의 글

이 연구는 국립수산과학원 유기오염연구 사업비(RP-2006-ME-006)로 수행되었으며, 연구비 지원에 이 자리를 빌려 감사의 말씀을 드립니다. 아울러 수질분석 및 자료작성에 도움을 준 연구원 조민희님과 김병만님께 감사의 말씀을 드립니다.

## 참고문헌

- 해양수산부, 2002. 해양환경공정시험방법. 해양수산부, 330pp.
- Cho, H.-S., D.-I. Lee, Y.-H. Yoon, M.-O. Lee and D.-M. Kim, 2004. Temporal variation of water quality the western Chinhae Bay in summer. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, **7**: 13-21.
- Cho, K.-J., M.Y. Choi, S.K. Kwak, S.H. Im, D.Y. Kim, J.G. Park and Y.E. Kim, 1998. Eutrophication and seasonal variation of water quality in Masan-Jinhae Bay. *The Sea Journal of the Korean Society of Oceanography*, **3**: 193-202.
- Fukuyo, Y., Y. Sako, K. Matsuoka, I. Imai, M. Takahashi and M. Watanabe, 2003. Biological character of red-tide organisms. In: *Red Tides*, edited by Okaichi, T., Terrapub/Kluwer, pp. 61-178.
- Lee, Y.S., 2002. An influence of inflowing freshwater on the diatom blooms in the eastern coast of Dolsan, Yosu, Korea. *J. of KSEE*, **24**: 477-488.
- Lee, Y.S. and S.Y. Lee, 2006. Factors Affecting Outbreaks of *Cochlodinium polykrikoides* Blooms in Coastal Areas of Korea. *Marine Pollution Bulletin*, **52**: 626-634.
- Lee, Y.S., T. Yamada, T. Seiki, T. Mukai, K. Takimoto and M. Okada, 1996. Effect of freshwater due to heavy rain on phytoplankton growth in Hiroshima Bay. *Jpn. Soc. Water Environ.*, **19**: 995-1003.
- Lee, Y.S., Y.T. Park, Y.S. Kim, K.Y. Kim, J. Park, W.-J. Go, Y.-J. Jo and S.Y. Park, 2001. Countermeasure and Outbreak Mechanism of *Cochlodinium polykrikoides* red tide, 1. Environmental characteristics on outbreak and disappearance of *C. polykrikoides* bloom. *J. of the Korean Society of Oceanography*, **6**: 259-264.
- Moon, C.H. and K.Y. Kwon, 1994. Seasonal Variations of Particulate Biogenic Silica in the Nakdong River Estuary. *The Journal of the Korean Society of Oceanography*, **29**: 5-16.
- Tsutsumi, H., E. Okamura, M. Ogawa, T. Takahashi, H. Yamaguchi, S. Montani, N. Kohashi, T. Adachi and T. Komatsu, 2003. Studies of the cross section of water in the innermost areas of Ariake Bay with the recent occurrence of hypoxic water and red tide. *Oceanography in Japan*, **12**: 291-305.
- Schreiber, U., R. Gademann, P. Bird, P.J. Ralph, A.W.D. Larkum and M. Kuhl, 2002. Apparent light requirement for activation of photosynthesis upon rehydration of desiccated beachrock microbial mats. *J. Phycol.* **38**: 125-134.

2006년 5월 12일 원고접수

2006년 8월 1일 수정본 채택

담당편집위원: 최만식