

## 산소 미세전극을 이용한 강화군과 인천 북항 조간대 갯벌의 순 광합성률 측정

황청연 · 조병철\*

서울대학교 지구환경과학부 및 해양연구소

## Measurement of Net Photosynthetic Rates in Intertidal flats of Ganghwa-gun and Incheon North Harbor using Oxygen Microsensors

CHUNG YEON HWANG AND BYUNG CHEOL CHO\*

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

갯벌에서 순 광합성률의 시기적 변화를 살펴보기 위해 강화군의 서남단과 남단에 각각 위치한 장화리와 동막리의 조간대 갯벌과, 유기물 함량이 상대적으로 높은 인천 북항 조간대 갯벌을 대상으로 2003년 12월부터 2004년 6월까지 4회에 걸쳐 산소 미세전극을 이용하여 퇴적물 내 산소 농도의 수직 분포를 측정하였다. 조사 기간 동안 장화리와 동막리 갯벌에서 산소의 퇴적물 투과 깊이는 12월에 가장 컸으며(평균 4.0~4.1 mm), 이후 조사에서는 각각 평균 2.2~2.8 mm와 1.6~1.8 mm의 값으로 작아지는 경향을 보였다. 흥미롭게도 인천 북항 갯벌의 산소 투과 깊이는 시기에 관계없이  $0.8 \pm 0.3$  mm(평균  $\pm 1SD$ )의 작은 값을 나타냈다. 순 광합성률은 동막리 갯벌에서 3월에 최대값( $11.1 \pm 2.8$  mmol O<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)을 보였으며, 장화리와 인천 북항 갯벌에서는 5월에 각각  $6.1 \pm 4.1$  mmol O<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>와  $6.4 \pm 1.4$  mmol O<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>의 최대값을 보였다. 순 광합성률이 최대값을 보인 시기에, 퇴적물 내 공극수의 용존 산소 농도의 최대값은 깊이 0.1~0.5 mm 구간에서 관찰되었으며, 대기로 포화된 표층 해수의 용존 산소 농도에 비해 평균적으로 1.8~3.2배 높았다. 6월 조사 당일에 현장의 광량( $400 \mu\text{Einst m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )이 다른 조사 시기에 비해 낮았지만, 이를 감안하더라도 세 지역의 순 광합성률은 크게 감소하여  $0.2$  mmol O<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> 이하의 값을 나타냈다. 결론적으로, 순 광합성률의 시기적인 변화 양상은 연구 지역에 따라 다소 차이가 있었지만, 대개 봄철에 표층 0.5 mm 이내에 분포하는 저서 일차 생산자에 의해 광합성이 가장 활발하게 일어나는 것으로 나타났다. 본 연구는 산소 미세전극을 이용한 갯벌의 광합성 연구에 대한 국내에서의 첫 보고이며, 이 기술은 갯벌의 일차 생산력이나 표층 퇴적물의 산소 소모율 등을 추정하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 여겨진다.

To find out temporal variations of net photosynthetic rate (NPR) of intertidal flats, we measured oxygen microprofiles in sediments with oxygen microsensors 4 times from December 2003 to June 2004. The study areas were the intertidal flats in Janghwa-ri and Dongmak-ri, located on the southwestern and the southern parts of Ganghwa-gun, respectively, and in Incheon North Harbor where the content of organic matter was relatively high. During the investigation, oxygen penetration depths in the tidal flats of Janghwa-ri and Dongmak-ri were high in December (mean values of 4.0-4.1 mm). Thereafter, the oxygen penetration depths declined to mean values of 2.2-2.8 mm and 1.6-1.8 mm in the two tidal flats. Interestingly, the oxygen penetration depths in the Incheon North Harbor tidal flat showed a lower range ( $0.8 \pm 0.3$  mm; mean  $\pm 1SD$ ) over the period. The maximum NPR in the Dongmak-ri tidal flat was found in March ( $11.1 \pm 2.8$  mmol O<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), and those in Janghwa-ri ( $6.1 \pm 4.1$  mmol O<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) and Incheon North Harbor ( $6.4 \pm 1.4$  mmol O<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) were observed in May. During the period when NPR was most active, the highest oxygen concentration was found at 0.1-0.5 mm depth below the surface sediment, and was on average 1.8-3.2 times higher than the air-saturated oxygen concentration in the overlying seawater. Although we took into account of low *in situ* light intensity ( $400 \mu\text{Einst m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) during the investigation in June, NPR in the 3 study areas decreased significantly to less than  $0.2$  mmol O<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Thus, temporal variations of NPR were somewhat different among the tidal flats. Generally, benthic primary producers inhabiting in the uppermost 0.5 mm of the sediment showed a peak photosynthetic activity in the study areas in spring. This is the first domestic report on photosynthetic rates

\*Corresponding author: bccho@snu.ac.kr

of benthic microflora in the tidal flats with oxygen microsensors, and the use of the microsensor can be widely applied to measurements of benthic primary production of a tidal flat and the oxygen consumption rate of surficial sediments.

**Keywords:** Net Photosynthetic Rate, Benthic Microflora, Oxygen Microsensor, Intertidal Flat, Ganghwa, Incheon North Harbor

## 서 론

산소 미세전극(oxygen microsensor)은 개발 초기에 혈액이나 조직의 산소 농도를 측정하기 위한 목적으로 이용되었다(Clark *et al.*, 1953). 1978년에 Revsbech와 동료 연구진에 의해 산소 미세전극을 이용한 갯벌의 생태 및 생지화학적 연구가 시작되어(Revsbech and Jørgensen, 1986), 갯벌의 광합성을 측정에도 안정하게 사용할 수 있는 산소 미세전극이 완성되었고(Revsbech and Ward, 1983; Revsbech, 1989), 이 센서는 상업화되기에 이르렀다.

저서 일차 생산자(benthic primary producers)의 광합성률을 측정하는 방법으로는 방사성 동위 원소( $H^{14}CO_3^-$ )를 이용한 방법(Leach, 1970), Bell jar를 이용하여 용존 산소 농도의 변화를 측정하는 방법(Pomeroy, 1959), 산소 미세전극을 이용하는 방법(Revsbech *et al.*, 1981) 등이 이용되었다. 이상의 세 가지 방법을 비교한 연구 결과를 살펴보면(Revsbech *et al.*, 1981),  $200 \mu\text{Einst m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  미만의 광량 조건에서는 모두 유사한 광합성률을 보였지만, 그 보다 높은 광량 조건에서는 산소 미세전극을 이용한 방법이 다른 방법들에 비해 다소 낮은 광합성률 값을 보였다. 반면, 독일 Keitum 갯벌에서는 산소 미세전극을 이용한 방법이 방사성 동위 원소 고정법에 비해 평균 2배 정도 높은 일차 생산력을 보이기도 하였다(Wolfstein and Hartig, 1998). 이러한 차이는 퇴적물 내의  $HCO_3^-$ 에 의한 동위 원소 희석(isotope dilution)으로 방사성 동위 원소 고정법에 의한 생산력이 과소 평가되었거나(Revsbech *et al.*, 1981), 산소 미세전극을 이용한 방법에서 퇴적물 표층 해수를 stirring할 때 저서 미세 조류(benthic microalgae)의 일차 생산력이 증가되어(Gould and Gallagher, 1990) 생산력이 과대 평가되어 나타났을 가능성이 있다.

산소 미세전극을 이용하는 방법의 장점은 다른 방법들에 비해 짧은 시간 내(수 분 이내)에 광합성 측정이 가능하며, 전극의 tip의 지름이  $10 \mu\text{m}$  이내로 퇴적물의 광합성을 측정 시 퇴적물 시료의 교란을 최소화할 수 있다는 점이다(Revsbech and Jørgensen, 1986). 또한 실험 후 방사성 폐기물이 발생하지 않는다는 면에서 방사성 동위 원소 고정법에 비해 환경 친화적인 방법이라 할 수 있다. 반면, 산소 미세전극의 tip은 부러지기 쉽기 때문에 조립사(coarse sand)가 많이 포함된 퇴적물에 쉽게 적용하기 어려운 점, 대형 저서 동물(macrofauna)에 의해 생성된 생물 구멍(burrow) 부근에서 산소 농도의 수직 분포가 불안정하게 나타난다는 점 등은 갯벌에서 산소 미세전극의 이용을 제한하는 요인으로 여겨진다(Revsbech and Jørgensen, 1986).

저서 미세 식물(microphytobenthos)은 갯벌 환경에서 주요한 유기물 생산자로 갯벌 먹이망의 에너지 및 물질 흐름에 중요한 역할을 담당한다(Kuipers *et al.*, 1981; van Es, 1982). 또한 갯벌에서 단위 면적당 저서 미세 식물에 의한 일차 생산력이 수층과 비

교하여 유사하거나 오히려 더 높다는 연구 결과도 보고되었다(MacIntyre *et al.*, 1996; Goto *et al.*, 2000). 그럼에도 불구하고 국내에서는 갯벌에서의 일차 생산에 대한 연구가 미진한 실정이다(고, 2001). 따라서, 본 연구에서는 산소 미세전극을 이용하여 유기물 함량에서 특정적으로 구별되는 강화군 갯벌(장화리와 동막리 갯벌)과 인천 북항 갯벌을 대상으로 순 광합성률의 시공간적인 변화를 살펴보고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 연구 지역 및 시료 채집

본 연구는 인천광역시 강화군의 서남단에 위치한 장화리 갯벌( $126^{\circ}21'E, 37^{\circ}37'N$ )과 남단에 위치한 동막리 갯벌( $126^{\circ}27'E, 37^{\circ}35'N$ ), 그리고 강화군 갯벌보다 유기물 함량이 상대적으로 높은 인천 북항 갯벌( $126^{\circ}37'E, 37^{\circ}29'N$ )을 대상으로 수행되었다. 장화리와 동막리 갯벌에서는 연안으로부터 약 1 km 이내에 위치한 일직선 상의 2~4개 정점을 선정하였으며, 산소 미세전극을 이용하여 정점 당 2~3개의 퇴적물 내 공극수의 용존 산소 농도의 수직 분포 자료를 얻었다. 인천 북항 갯벌에서는 연안에서 약 20 m 거리에 위치한 1개의 정점을 대상으로 매 조사마다 2~3개의 용존 산소 농도의 수직 분포를 측정하였다.

조사는 2003년 12월 3~4일, 2004년 3월 17~18일, 5월 1~2일, 6월 10~11일에 걸쳐 총 4회 수행되었다. 갯벌 퇴적물 시료는 오전 8~10시 사이의 간조 시기에 채집되었고, 시료는 PVC(poly vinyl chloride) 재질의 코아(지름: 9 cm)를 이용하여 표층 5 cm 정도를 채집한 후 1시간 이내에 연구 지역 부근의 실험실로 옮겨졌다.

현장 해수를  $0.2 \mu\text{m}$  여과지로 여과한 후 수조에 채우고, 채집한 표층 퇴적물 코아를 조심스럽게 넣었다. 퇴적물 코아가 담긴 작은 수조를 크기가 큰 또 다른 수조에 넣은 후, 큰 수조와 작은 수조 사이의 공간에 냉수 또는 온수를 첨가하여 작은 수조에 담긴 여과 해수를 현장 수온으로 유지시켰다. 또한 여과 해수내의 용존 산소량을 포화시키기 위해, 대기를 이용한 기포 발생 장치를 여과 해수에 넣었다. 광도계(LI-COR, LI-1000)로 현장의 광량을 측정하고, 할로겐 램프를 이용하여 퇴적물 표면을 현장의 광량 수준( $400\sim 800 \mu\text{Einst m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )으로 30분 이상 광적응을 시킨 후 산소 미세전극을 이용하여 퇴적물 내 공극수의 용존 산소 농도를 측정하였다.

### 퇴적물의 공극률 및 온도 측정

퇴적물의 공극률( $\phi$ )은 Bennett and Lamber(1971)의 식 (1)을 이용하여 측정하였다.

$$\phi = \frac{V_w + V_{ss}}{W_d/D_e + W_w} \times 100 \quad (1)$$

- $V_w$ : 물의 부피
- $W_w$ : 물의 무게
- $W_d$ : 염을 포함한 건조된 퇴적물의 무게
- $D_g$ : 평균 입자 밀도(average grain density)
- $V_{ss}$ :  $V_w$ 의 1.2%에 해당되는 부피(35 psu 해수의 경우)

퇴적물의 온도는 2 mm의 탐침(probe)을 갖는 전자 온도계(APPA Technology Corp., APPA 51)를 이용하여 측정하였다.

### 공극수의 용존 산소 측정

실험에 사용된 산소 미세전극은 전극 크기가 7~8  $\mu\text{m}$ 인 Clark type의 전극들이었다. 전극들의 stirring effect는 0.9~1.5%였으며, 90% 반응 시간(response time)은 0.7~0.8초였다(자료 미제시). 이러한 전극은 퇴적물의 표층 해수에서 일어날 가능성이 있는 자연적인 난류(natural turbulence)를 모의하는 실험에서 퇴적물 공극수의 용존 산소 농도를 신속하게 측정하는데 적합한 것으로 입증되었다(Revsbech *et al.*, 1980). 전극들의 전류는 무산소와 100% 산소 포화 농도(20°C)에서 각각 16~18 pA와 131~211 pA의 범위를 나타냈다. 전극의 검량선 깊이에 따라 더 이상의 전류 감소가 나타나지 않는 무산소 퇴적층에서의 전류값(산소 농도=0)과 산소에 100% 포화된 표층 해수에서의 전류값을 이용하였다(Revsbech and Jørgensen, 1983). 포화 용존 산소 농도는 측정된 현장 해수의 수온과 염분 자료로부터 계산되었다(Garcia and Gordon, 1992). 각 퇴적물 깊이에서의 용존 산소 농도는 검출된 전극의 전류와 산소 농도 간의 선형관계를 이용하여 계산하였다. 미세 전극은 10  $\mu\text{m}$ 의 수직 이동 해상도를 갖는 micromanipulator (Unisense, MM33)에 장착하여 100  $\mu\text{m}$  간격으로 표층 해수로부터 퇴적물에 삽입하며 산소 농도를 측정하였다. 전극에서 검출된 전류는 picoammeter (Unisense, PA2000)를 거쳐 strip-chart recorder(Linear Instrument Corp., 252A)에 기록되었다.

### 순 광합성을 추정 모델

순 광합성률(net photosynthetic rate)은 산소 농도의 미세 수직 분포로부터 추정되었다(Revsbech and Jørgensen, 1986; Kühl *et al.*, 1996). 퇴적물의 유효광층(photic zone)에서 광합성에 의해 생산된 산소는 확산에 의해 상층과 저층으로 수직 이동한다. 따라서 상부로 확산되는 산소 플럭스(flux,  $J_{up}(x)$ )와 하부로 확산되는 산소 플럭스( $J_{down}(x)$ )로부터 순 광합성률( $J_{up}(x)+J_{down}(x)$ )을 추정할 수 있다. 물질의 확산 플럭스( $J(x)$ )는 식 (2)와 같이 Fick의 확산 제1법칙으로 표현된다(Revsbech and Jørgensen, 1986; Kühl *et al.*, 1996):

$$J(x) = \phi D_s \frac{\delta C(x)}{\delta x} \quad (2)$$

여기서  $C(x)$ 는 특정 퇴적층 깊이  $x(\text{cm})$ 에서의 산소 농도( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ),  $\phi$ 는 공극률,  $D_s$ 는 산소의 겉보기 확산 상수(apparent diffusion coefficient,  $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ )이다. 산소의 겉보기 확산 상수는 현장의 수온과 염분에 따라  $1.58\sim 2.30 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 의 값을 이용하였다(Li and Gregory, 1974). 상부로 확산되는 플럭스( $J_{up}(x)$ ) 계산에서 공극률은 1을 이용하였다. 하부로 확산되는 플럭스( $J_{down}(x)$ )를 계산할 때

공극률은 깊이 0~1 cm의 퇴적물에서 실제로 측정된 공극률 자료를 이용하였으며, 퇴적물내 산소의 겉보기 확산 상수는  $\phi^2$ 을 곱한 값을 이용하였다(Ullman and Aller, 1982; Lorenzen *et al.*, 1998). 깊이에 따른 산소 농도의 변화( $\delta C(x)/\delta x$ )는 측정된 산소 농도의 미세 수직 분포로부터 계산되었다. 즉, 상부로 확산되는 플럭스( $J_{up}(x)$ )는 퇴적물과 해수의 계면(sediment/seawater interface) 바로 위에 존재하는 0.1~0.2 mm 두께의 확산경계층(diffusive boundary layer)에서의 산소 농도의 변화율을 이용하였고, 하부로 확산되는 플럭스( $J_{down}(x)$ )는 퇴적물의 유효광층 아래 부분에 산소 농도가 선형적으로 감소되는 구간에서 최소자승법을 이용하여 변화율을 계산하였다.

## 결과 및 토의

### 연구 지역의 환경 특성

조사 지역 갯벌의 표층 온도와 공극률의 시기적 변화는 Fig. 1에 나타났다. 퇴적물의 표층 온도는 조사 갯벌들 간에 뚜렷한 차이가 없었으며, 겨울에 낮고(평균 3.7~6.4°C), 초여름(24.9~27.0°C)으로 갈수록 점차 증가하는 전형적인 계절 변화 양상을 보였다

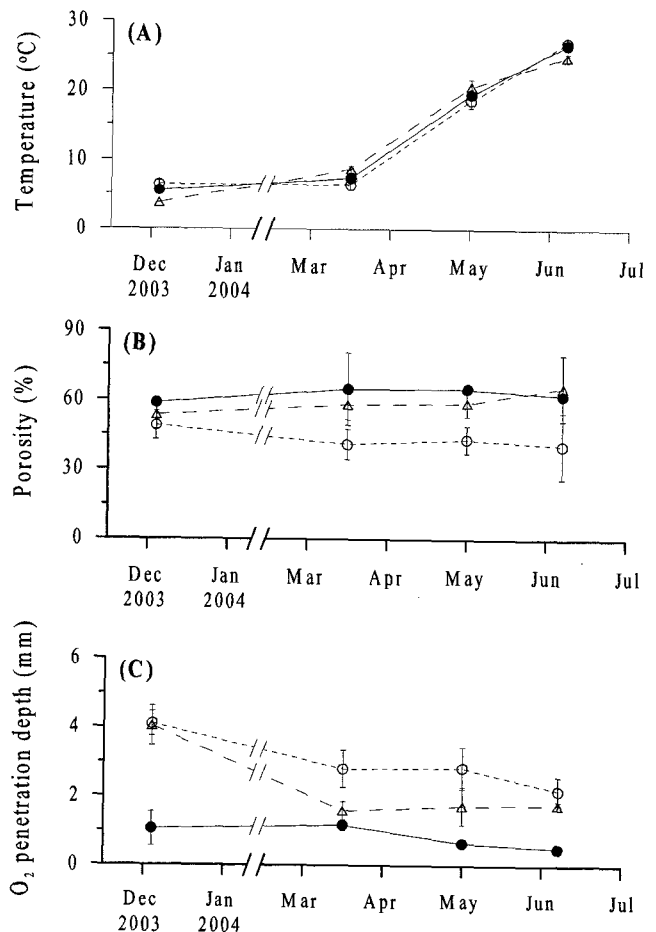


Fig. 1. Temporal variations in the tidal flats of Janghwa-ri (○), Dongmak-ri (△) and Incheon North Harbor (●). (A) Temperature of surface sediment, (B) porosity of sediment in the depth of 0-1 cm, and (C) O<sub>2</sub> penetration depth. Error bars represent 1 SD; no error bars denote that 1 SD is smaller than symbol size.

(Fig. 1A). 표층의 공극률은 40.3~65.4%의 범위로 시기에 따른 뚜렷한 변화를 보이지 않았다(Fig. 1B). 다만 인천 북항 갯벌의 공극률이 동일한 시기의 장화리 갯벌이나 동막리 갯벌의 공극률에 비해 유사하거나 다소 높은 경향(평균  $1.3 \pm 0.2$ 배)을 보였다(Fig. 1B).

### 산소 투과 깊이

산소 투과 깊이는 인천 북항 갯벌과 강화군 갯벌 간에 뚜렷한 차이를 보였다(Fig. 1C). 즉, 장화리와 동막리 갯벌에서 산소 투과 깊이는 겨울에는 평균 4.0~4.1 mm의 높은 값을 보이다가, 봄과 초여름에는 평균 1.6~2.8 mm의 범위로 낮아지는 경향을 보였다(Fig. 1C). 마찬가지로 인천 북항 갯벌의 산소 투과 깊이도 겨울보다는 초여름에 낮아지는 경향을 보였으나, 이 지역의 산소 투과 깊이는 조사 기간 동안 평균 0.5~1.2 mm의 범위를 보여, 장화리와 동막리 갯벌에 비해 항상 얕았다(Fig. 1C).

장화리와 동막리 갯벌에서 관찰된 산소 투과 깊이는 고염 염습지(hypersaline salt marsh)에서 알려진 값의 범위(2.5~4.1 mm; Glud and Kühl, 1999)와 유사하였다. 하지만 사질이 우세한 조간대에서 측정된 산소 투과 깊이(5.5~10 mm; Revsbech *et al.*, 1980)에 비해서는 작은 편이었는데, 이는 본 연구 지역의 퇴적상이 계절과 정점에 따라 차이는 있지만 니질 퇴적상이 우세(조 등, 2004)하게 나타났기 때문인 것으로 여겨진다. 또한 산소 투과 깊이는 퇴적물 유광층의 광합성(Nielsen *et al.*, 1990) 및 저서 미세 생물의 산소 호흡에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Revsbech *et al.*, 1980; Revsbech and Jørgensen, 1986). 사질로 구성된 조간대에서의 연구에 따르면(Revsbech *et al.*, 1980), 저서 미생물의 활동이 활발한 여름철의 산소 소모율(oxygen consumption)이 겨울철에 비해 약 7배 가량 컸고, 산소 투과 깊이도 10 mm에서 5.5 mm로 절반 수준으로 줄어드는 경향을 보였다. 본 연구에서 나타난 산소 투과 깊이의 변화도 대체로 이와 유사한 경향을 보였다(Fig. 1C).

흥미롭게도 저서 미세 생물의 활동도가 낮을 것으로 기대되는 겨울철에 인천 북항갯벌의 산소 투과 깊이는 평균  $1.1 \pm 0.5$  mm에 불과하였다. 이는 동일 시기의 강화군 갯벌에 비해 인천 북항 갯벌의 퇴적물 내 산소 호흡(aerobic respiration)이 높게 나타나고 있을 가능성을 보여주는 결과로 여겨진다. 실제로 인천 북항 갯벌에서 표층 0~1 cm 깊이에 분포하는 종속영양성 박테리아(heterotrophic bacteria)의 생산력은 단위 공극수 부피(ml) 당 평균  $5.4 \pm 1.3 \times 10^8$  cells d<sup>-1</sup>의 값으로 강화군 갯벌에 비해 3.4~14.6배 높은 수준이었다(조 등, 2004). 따라서 2003년 12월 조사에서 인천 북항 갯벌의 미생물에 의한 산소 소모가 강화군 갯벌에 비해 상대적으로 컸을 가능성을 보여준다.

### 산소 농도의 미세 수직 분포

조사 기간 동안 측정된 갯벌의 산소 농도의 미세 수직 분포 중 일부의 예를 Fig. 2에 나타냈다. 2004년 6월의 조사 시료 중 57% 정도는 퇴적물 층 내에서 뚜렷한 산소 농도의 증가를 관찰할 수 없었지만, 이 시기를 제외한 나머지 조사의 대부분 시료(>91%)에서는 표층 0.1~0.5 mm 깊이에서 용존 산소 농도의 최대값을 보였다(자료 미제시). 산소 농도의 최대값은 조사 시기와 정점에 따라 차이가 있었지만, 2004년 3월 조사에서 동막리 갯벌의 퇴적물 내에서 평균  $808 \pm 284 \mu\text{mol L}^{-1}$ 로 대기로 포화된 표층 해수의 용존

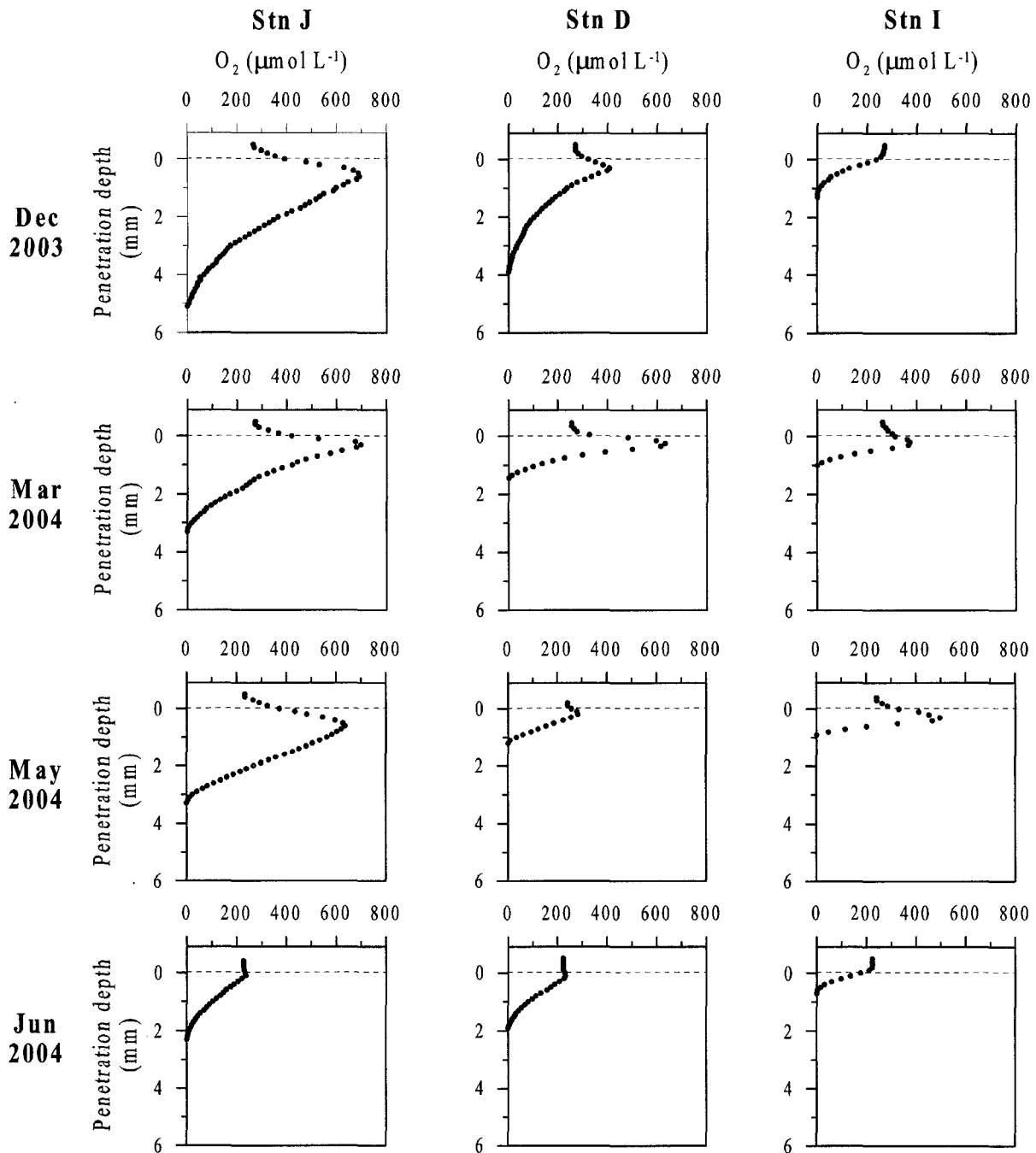
산소 농도에 비해 3.2배 높은 수준이었다. 봄철에 장화리와 인천 북항 갯벌의 퇴적물 내 최대 산소 농도는 평균  $409\text{--}553 \mu\text{mol L}^{-1}$ 의 범위를 보였는데, 이는 표층 해수에 비해 1.6~2.3배 높은 수준이었다.

공기에 노출된 퇴적물에서 유광층의 깊이는 퇴적물의 입자상 및 광원의 세기 뿐 아니라 퇴적물 표층에 우점하는 일차 생산자의 종류에 따라 영향을 받는다(Revsbech and Jørgensen, 1986; Kühl *et al.*, 1996). 즉, 시아노박테리아(cyanobacteria)가 우점하는 퇴적물에서 유광층의 깊이는 0.5~0.7 mm 였으나(Kühl *et al.*, 1996), 규조류(diatom)가 우점하는 경우에는 유광층의 깊이가 2~4 mm에 이르렀다(Revsbech and Jørgensen, 1986). 그러나 퇴적물 표면에 도달한 광원의 세기는 깊이에 따라 지수적으로 감소되기 때문에 광합성이 활발한 층(photosynthetically active layer)은 표층 1 mm 깊이가 이내로 여겨진다(Revsbech and Ward, 1983; Revsbech and Jørgensen, 1986). 미생물 층(microbial mat)이 형성된 퇴적물에서 산소 미세전극을 이용해 산소 농도의 수직 분포를 측정한 연구 결과를 살펴보면, 최대 산소 농도는 표층 0.1~0.5 mm 깊이에서 대부분 관찰되었는데(Revsbech and Ward, 1983; Revsbech *et al.*, 1983; Revsbech *et al.*, 1986; Nielsen *et al.*, 1990; Kühl *et al.*, 1996), 본 연구에서의 결과도 이와 유사하였다. 하지만 봄철에 본 연구 지역에서 측정된 퇴적물 내의 최대 산소 농도는 평균적으로 표층 해수의 포화 산소 농도의 1.6~3.2배였는데, 이는 기존의 연구들에서 측정된 최대 산소 농도(표층 해수의 포화 산소 농도의 평균 3.1~4.6배)에 비해서는 작은 편이었다(Revsbech and Ward, 1983; Revsbech *et al.*, 1986; Nielsen *et al.*, 1990; Kühl *et al.*, 1996). 이러한 차이는 퇴적물 표층을 구성하고 있는 일차 생산자의 종류, 광원의 세기, 퇴적물 내 영양염 농도 등에 따라 나타날 수 있을 것으로 추정된다.

### 연구 지역의 순 광합성률 및 다른 연구와의 비교

장화리와 동막리 갯벌에서 순 광합성률은 12월 조사에서 평균  $1.8\text{--}2.6 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 유사한 수준이었고, 봄철에 증가하는 경향을 보였다(Table 1). 조사 기간 중 동막리 갯벌에서는 3월에 가장 높은 순 광합성률을 보였으며(평균  $11.1 \pm 2.8 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ), 장화리 갯벌에서는 이보다 느린 5월 조사에서 최대 순 광합성률(평균  $6.1 \pm 4.1 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )을 나타냈다(Table 1). 인천 북항 갯벌의 순 광합성률은 12월 조사에서 검출되지 않았지만, 봄철(5월 조사)에는 강화군 갯벌에서와 유사한 수준으로 높게 증가하였다(평균  $6.4 \pm 1.4 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ; Table 1). 그러나 초여름(6월 조사)에서 모든 연구 지역의 순 광합성률은  $0.2 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  이하의 값으로 감소하는 경향을 보였다(Table 1).

6월 조사 시기에 날씨가 흐렸던 관계로 현장의 광량( $400 \mu\text{Einst m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )이 다른 조사 시기( $520\text{--}800 \mu\text{Einst m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )에 비해 낮은 편이었다(Table 1). 따라서 이 시기에 측정된 낮은 순 광합성률( $< 0.2 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )이 낮은 광량 조건에 기인하였을 가능성이 있다. 이를 확인하기 위해 동일한 시기의 장화리 갯벌 시료를 대상으로 광합성-광량 곡선(photosynthesis-irradiance curve; P-I curve) 실험을 수행하였는데,  $800 \mu\text{Einst m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 의 높은 광량 조건에서 순 광합성률이 평균  $2.5 \pm 0.1 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 의 값으로 증가하는 경향을 보였다(자료 미발표). 따라서 이 시기에 측정된 순 광합성률은 광량에 의해 제한을 받아 낮게 측정되었을 가능성이



**Fig. 2.** Typical examples of oxygen profiles obtained from the tidal flats of Janghwa-ri (Stn J), Dongmak-ri (Stn D), and Incheon North Harbor (Stn I) in each investigation. The horizontal dotted line and the uppermost datum in each panel represent the sediment-seawater interface and the air-saturated oxygen concentration in the overlying seawater, respectively.

있을 것으로 보인다. 하지만 이 시기의 순 광합성률은 5월 조사에 비해서는 낮은 수준인 것으로 판단된다. 왜냐하면 5월에 동막리 갯벌 시료는 현장의 광량 조건인  $800 \mu\text{Einst m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 순 광합성률(평균  $9.3 \pm 0.1 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )이 6월 조사에 비해 유의하게 높게 나타났기 때문이다( $t$ -test,  $p=0.008$ ,  $n=2$ ).

순 광합성률은 총 광합성률(gross photosynthetic rate)에서 호흡률(respiration rate)을 제외한 값으로(Revsbech and Jørgensen, 1986), 미국 Georgia 조간대 염습지에서 연간의 연구에 의하면 순

광합성률이 적어도 총 광합성률의 90%를 차지하고 있었다(Pomeroy, 1959). 그리고 규조류와 시아노박테리아의 생물막(biofilm)에 대한 연구에서는 순 광합성률이 총 광합성률의 57~83%의 범위를 차지하고 있다는 결과를 보고하였다(Glud *et al.*, 1992; Kühl *et al.*, 1996). 또한 2003년 6월에서 2003년 12월까지 강화리와 동막리 갯벌에서 연구한 자료의 결과에서도 순 광합성률은 총 광합성률의 42~91%의 범위를 보였다(자료 미발표).

니질 퇴적상의 조간대 갯벌에서 측정된 기존의 순 광합성률 연구

**Table 1.** Net photosynthetic rates (NPR) and conservative estimates of gross primary production (GPP) of tidal flats in Ganghwa (J, Janghwa-ri; D, Dongmak-ri) and Incheon North Harbor (I) measured with oxygen microsensors. Values are mean±1 SD. N: number of oxygen profiles measured during the investigation.

| Year   | Date   | Stn | <i>In situ</i><br>light intensity ( $\mu\text{Einst m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) | NPR<br>( $\text{mmol O}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) | GPP*<br>( $\text{mg C m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) | N  |
|--------|--------|-----|--|--|--|----|
| 2003   | Dec 3  | J   | 520  | 1.8±2.1  | 17.9±20.7                                      | 4  |
|        |        | D   |  | 2.6±1.5  | 26.1±15.4                                      | 16 |
|        |        | I   |  | nd**   | nd   | 2  |
| 2004   | Mar 17 | J   | 770  | 2.2±2.5  | 22.1±25.5                                      | 9  |
|        |        | D   |  | 11.1±2.8   | 111.3±28.0                                     | 7  |
|        |        | I   |  | 5.6±2.6  | 56.0±26.1                                      | 3  |
|        | May 17 | J   | 800  | 6.1±4.1  | 60.6±40.5                                      | 8  |
|        |        | D   |  | 5.0±3.7  | 49.5±36.6                                      | 6  |
|        |        | I   |  | 6.4±1.4  | 63.7±14.0                                      | 2  |
| Jun 10 | J      | 400 | 0.2±0.1  | 1.5±1.4  | 8  |    |
|        | D      |     | 0.1±0.2  | 1.2±2.4  | 41   |    |
|        | I      |     | nd   | nd   | 2  |    |

\*: GPP was estimated from NPR, assuming a photosynthetic quotient of 1.2 (Asmus, 1982)

\*\* : not detected

자료가 총 광합성률 연구 자료에 비해 상대적으로 적은 관계로 (Pomeroy, 1959; Wolfstein and Hartig, 1998), 본 연구에서 측정된 순 광합성률 자료를 기존의 총 광합성률 연구 결과들과 비교하였다. 순 광합성률을 탄소 단위로 전환하기 위하여, photosynthetic quotient를 1.2로 가정하여(Asmus 1982) 탄소 생산을 추정하였다. 광합성이 가장 활발한 시기에 추정된 일차 생산력은 강화군 갯벌과 인천 북항 갯벌에서 각각 22~111  $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 와 64  $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 의 값을 보였다(Table 1). 이는 방사성 동위원소( $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$ )를 이용하여 일본 Isshiki 조간대 갯벌(18  $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ; Goto *et al.*, 2000)과 스코틀랜드 Tarty 조간대 갯벌(23  $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ; Leach, 1970)에서 측정된 최대 일차 생산력에 비해서 다소 높은 편이었다. 하지만 방사성 동위원소( $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$ ) 방법으로 독일 Wadden Sea의 조간대 갯벌(60~180  $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ; Cadée and Hegeman, 1974)과 산소 교환(oxygen exchange) 방법으로 미국 Georgia 조간대 갯벌(150  $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ; Pomeroy, 1959)과 미국 Barataria 만의 조간대 갯벌(150  $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ; Shaffer, 1988)에서 관찰된 최대 일차 생산력에 비해서는, 순광합성률이 총 광합성률에서 차지하는 비중을 고려하더라도, 다소 낮은 편이었다. 또한 일차 생산력의 계절적 변화 양상도 연구 지역에 따라 차이가 있었다. 즉 일본 Isshiki 갯벌에서의 저서 일차 생산력은 본 연구 결과와 유사하게 봄철에 높고, 여름철에 감소하는 경향을 보였다(Goto *et al.*, 2000). 하지만 스코틀랜드 Tarty 갯벌에서는 여름철에 높은 일차 생산력을 보였으며(Leach, 1970), 미국 Georgia 갯벌에서는 오히려 겨울철에 높은 일차 생산력을 보였다(Pomeroy, 1959). 갯벌의 일차 생산력을 측정하는 방법이 동일하지 않고, 배양 시간이나 사용된 광원의 세기가 다르기 때문에 일반화에는 한계가 있겠지만, 위에서 살펴본 여러 지역 갯벌들의 일차 생산력의 변이(variation)는 어느 정도 온도와 관련이 있을 것으로 보인다.

요약하면, 2003년 12월부터 2004년 6월까지 강화군 갯벌과 인천 북항 갯벌에서 산소 미세전극을 이용하여 순 광합성률을 측정 한 결과, 지역에 따라 순 광합성률의 변화 양상은 다소 차이가 있었지만, 대체로 봄철에 가장 높은 순 광합성률(2.2~11.1  $\text{mmol O}_2 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )을 보였다. 이 시기에 측정된 순 광합성률은 22~111  $\text{mg C}$

$\text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 의 일차 생산력에 해당하며, 이는 니질 퇴적상의 조간대 갯벌들에서 보고된 18~180  $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 의 범위와 비교할 때 유사하거나 다소 작은 편이었다. 광합성이 높은 봄철에 퇴적물 내 산소의 최대 농도는 깊이 0.1~0.5 mm에서 관찰되었고, 농도는 409~808  $\mu\text{mol L}^{-1}$ 의 범위를 보여 대기로 포화된 표층 해수의 용존 산소 농도와 비교할 때 1.6~3.2배 높은 수준이었다. 퇴적물에서 산소의 투과 깊이는 강화군 갯벌의 경우 1.6~4.1 mm의 범위를 보이며 시기적인 변화가 뚜렷이 나타났는데 반해, 유기물 함량이 상대적으로 높은 인천 북항 갯벌에서는 특징적으로 0.5~1.2 mm의 좁은 변화 범위를 보였다. 이러한 결과는 퇴적물의 유기물 오염을 판단하는데 있어서, 퇴적물에서의 산소 투과 깊이가 하나의 지표(index)로 이용될 수 있는 가능성을 보여주는 것으로 여겨진다.

## 감사의 글

산소 미세전극 제작에 필요한 기술을 전수해주신 덴마크 Århus 대학의 Revsbech 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 본 논문을 세심하게 검토해 주시고 좋은 지적을 해주신 국립수산과학원의 이재성 박사님께 진심으로 감사를 드립니다. 연구 기간 동안 실험실을 사용할 수 있게 허락해 주신 인천광역시 해양환경탐구수련원 원장님과 관계자 분들께도 감사의 말씀을 드립니다. 본 연구는 해양수산부의 수산특정연구 개발사업(20010021)과 서울대학교 지구환경과학부 BK21 사업단의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

- 고철환, 2001. 한국의 갯벌. 서울대학교 출판부, 103 pp.  
 조병철, 최중기, 이동섭, 안순모, 현정호 등, 2004. 갯벌에서 미생물에 의한 생지화학적 오염 정화능 판정기술 개발-경기만 갯벌을 중심으로. 해양수산부 보고서, 174 pp.  
 Asmus, R., 1982. Field measurements of seasonal variation of the activity of primary producers on a sandy tidal flat in the Northern Wadden Sea. *Neth. J. Sea. Res.*, **16**: 389-402.  
 Bennett, R.H. and D.N. Lambert, 1971. Rapid and reliable technique

- for determining unit weight and porosity of deep-sea sediments. *Marine Geol.*, **11**: 201–207.
- Cadée, G.C. and J. Hegeman, 1974. Primary production of the benthic microflora living on tidal flats in the Dutch Wadden Sea. *Neth. J. Sea. Res.*, **8**: 260–291.
- Clark, L.C., R. Wolf, D. Granger and A. Taylor, 1953. Continuous recording of blood oxygen tension by polarography. *J. Appl. Physiol.*, **6**: 189–193.
- Garcia, H.E. and L.I. Gordon, 1992. Oxygen solubility in seawater: better fitting equations. *Limnol. Oceanogr.*, **37**: 1307–1312.
- Glud, R.N. and M. Kühl, 1999. Heterogeneity of oxygen production and consumption in a photosynthetic microbial mat as studied by planar optodes. *J. Phycol.*, **35**: 270–279.
- Glud, R.N., N.B. Ramsing and N.P. Revsbech, 1992. Photosynthesis and photosynthesis-coupled respiration in natural biofilms quantified with oxygen microsensors. *J. Phycol.*, **28**: 51–60.
- Goto, N., O. Mitamura and H. Terai, 2000. Seasonal variation in primary production of microphytobenthos at the Isshiki intertidal flat in Mikawa Bay. *Limnology*, **1**: 133–138.
- Gould, D.M. and E.D. Gallagher, 1990. Field measurement of specific growth rate, biomass, and primary production of benthic diatoms of Savin Hill Cove, Boston. *Limnol. Oceanogr.*, **35**: 1757–1770.
- Kuipers, B.R., P.A.W.J. de Wilde and F. Creutzberg, 1981. Energy flow in a tidal flat ecosystem. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **5**: 215–221.
- Kühl, M., R.N. Glud, H. Ploug and N.B. Ramsing, 1996. Microenvironmental control of photosynthesis and photosynthesis-coupled respiration in an epilithic cyanobacterial biofilm. *J. Phycol.*, **32**: 799–812.
- Leach, J.H., 1970. Epibenthic algal production in an intertidal mudflat. *Limnol. Oceanogr.*, **15**: 514–521.
- Li, Y.H. and S. Gregory, 1974. Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediment. *Geochim. Cosmochim.*, **38**: 703–714.
- Lorenzen, J., L.H. Larsen, T. Kjær and N.P. Revsbech, 1998. Biosensor determination of the microscale distribution of nitrate, nitrate assimilation, nitrification, and denitrification in a diatom-inhabited freshwater sediment. *Appl. Environ. Microbiol.*, **64**: 3264–3269.
- MacIntyre, H.L., R.J. Geider and D.C. Miller, 1996. Microphytobenthos: the ecological role of the “Secret Garden” of unvegetated, shallow-water marine habitat. I. Distribution, abundance and primary production. *Estuaries*, **19**: 186–201.
- Nielsen, L.P., P.B. Christensen and N.P. Revsbech, 1990. Denitrification and photosynthesis in stream sediment studied with microsensors and whole-core techniques. *Limnol. Oceanogr.*, **35**: 1135–1144.
- Pomeroy, L.R., 1959. Algal productivity in salt marshes of Georgia. *Limnol. Oceanogr.*, **4**: 386–397.
- Revsbech, N.P. and B.B. Jørgensen, 1983. Photosynthesis of benthic microflora measured with high spatial resolution by the oxygen microprofile method: capabilities and limitation of the method. *Limnol. Oceanogr.*, **28**: 749–756.
- Revsbech, N.P. and B.B. Jørgensen, 1986. Microelectrodes: their use in microbial ecology. *Adv. Microb. Ecol.*, **9**: 293–352.
- Revsbech, N.P. and D.M. Ward, 1983. Oxygen microelectrode that is insensitive to medium chemical composition: use in an acid microbial mat dominated by *Cyanidium caldarium*. *Appl. Environ. Microbiol.*, **45**: 755–759.
- Revsbech, N.P., 1989. An oxygen microsensor with a guard cathode. *Limnol. Oceanogr.*, **34**: 474–478.
- Revsbech, N.P., B. Madsen and B.B. Jørgensen, 1986. Oxygen production and consumption in sediments determined at high spatial resolution by computer simulation of oxygen microelectrode data. *Limnol. Oceanogr.*, **31**: 293–304.
- Revsbech, N.P., B.B. Jørgensen and O. Brix, 1981. Primary production of microalgae in sediments measured by oxygen microprofile,  $H^{14}CO_3^-$  fixation and oxygen exchange methods. *Limnol. Oceanogr.*, **26**: 717–730.
- Revsbech, N.P., B.B. Jørgensen, T.H. Blackburn and Y. Cohen, 1983. Microelectrode studies of the photosynthesis and  $O_2$ ,  $H_2S$ , and pH profiles of a microbial mat. *Limnol. Oceanogr.*, **28**: 1062–1074.
- Revsbech, N.P., J. Sørensen, T.H. Blackburn and J.P. Lomholt, 1980. Distribution of oxygen in marine sediments measured with microelectrodes. *Limnol. Oceanogr.*, **25**: 403–411.
- Shaffer, G.P., 1988. K-systems analysis for determining the factors influencing benthic microfloral productivity in a Louisiana estuary, USA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **43**: 43–54.
- Ullman, W.J. and R.C. Aller, 1982. Diffusion coefficients in near-shore marine sediments. *Limnol. Oceanogr.*, **27**: 552–556.
- van Es, F.B., 1982. Community metabolism of intertidal flats in the Ems-Dollard estuary. *Mar. Biol.*, **66**: 95–108.
- Wolfstein, K. and P. Hartig, 1998. The photosynthetic light dispensation system: application to microphytobenthic primary production measurements. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **166**: 63–71.

2004년 10월 26일 원고접수

2004년 12월 8일 수정본 채택

담당편집위원: 정익교