

해양 어류가두리양식장의 환경영향평가: I. 퇴적물 산소소모율 및 저서동물을 이용한 유기물 오염영향권 추정 및 유기탄소 순환

이재성 · 정래홍 · 김기현* · 권정노** · 이원찬*** · 이필용 · 구준호*** · 최우정***

국립수산과학원 남해수산연구소 자원환경팀, *충남대학교 해양학과
** 국립수산과학원 양식환경연구소, *** 국립수산과학원 환경관리팀

An Evaluation of the Environmental Effects of Marine Cage Fish Farms: I. Estimation of Impact Region and Organic Carbon Cycling in Sediment Using Sediment Oxygen Consumption Rates and Macrozoobenthos

JAE SEONG LEE, RAE HONG JUNG, KEE HYUN KIM*, JUNG NO KWON**, WON CHAN LEE***,
PIL YOUNG LEE, JUN HO KOO*** AND WOO JUNG CHOI***

South Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Yosu 556-823, Korea
*Department of Oceanography, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea
**Aquaculture Environment Institute, NFRDI, Tongyeong 650-940, Korea
***Marine Environment Management Team, NFRDI, Busan 619-920, Korea

해양 어류가두리 양식장이 주변 환경에 미치는 영향을 파악하기 위해 2003년 8월에 경남 통영시 미륵도에 설치된 해양 어류가두리양식장에서 거리를 증가시키면서 퇴적물로 유입되는 입자물질의 침강 플럭스, 퇴적물 내 유기탄소의 수직분포, 퇴적물의 산소소모율, 저서동물의 군집을 분석하였다. 입자 유기물 침강 플럭스, 표층 퇴적물의 유기탄소 농도 및 퇴적물의 산소소모율은 가두리에서 멀어질수록 점차 감소하는 양상을 보여 가두리양식장에서 유출된 유기물이 주변으로 확산되는 것을 나타냈다. 저서동물 중 다모류인 *Tharyx multifilis*, *Lumbrineris longifolia*, *Sigambra tentaculata*, *Capitella capitata*가 전체 군집에 88%를 차지하여 우점하였으며, 특히 오염지표종인 *Capitella capitata*는 반경 5 m 이내에서만 출현하였다. 퇴적물의 산소소모율 및 저서동물의 군집을 이용하여 추정한 유기물의 오염 영향권이 잘 일치하여 가두리양식장을 중심으로 반경 10 m 내외에 유기물이 집중적으로 퇴적되고 있으며 최소한 50 m까지 영향을 주는 것으로 파악되었다. 가두리양식장에서 퇴적물로 유입되는 유기탄소 플럭스는 $2.14 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 가두리양식장에서 50 m 떨어진 지점에 비해 약 2배 정도 큰 수치였다. 또한 유입된 유기물 중 약 50%($1.07 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)가 상부층에서 분해되었다. 반면 50 m 저점에서는 유입된 유기탄소 중 30%($0.30 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)가 재순환되며 나머지 70%는 퇴적되는 것으로 나타났다.

In order to understand the environmental impact of marine cage fish farms, we measured the vertical fluxes of particulate to the sediment, the distribution of organic carbon in core samples, sediment oxygen consumption rate (SOD), and macrobenthos with increasing distance from a fish cage in Miruk island located in Tongyeong. The experiment was performed in August 2003. Measured values gradually decreased with distance, indicating that the organic matter in the sediment derived from the fish farm. The dominant macrobenthos species were *Tharyx multifilis*, *Lumbrineris longifolia*, *Sigambra tentaculata*, and *Capitella capitata*, occupying 88% of the total population. *Capitella capitata*, an opportunistic polychaete species, were especially abundant between 0 to 5 m radius range. The estimated impact regions of organic matter enrichment based on sediment consumption rates and compositions of macrobenthos were in good agreement. Most organic matter derived from the fish farm was deposited within a 10 m radius and then dispersed horizontally to nearby (at least 50 m) surface sediment. The vertical organic carbon fluxes to the sediment at the fish farm were higher by a factor of two than those outside the area. The remineralization organic carbon in the upper sediment layer was estimated to be 50% ($1.07 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) at the fish farm. In contrast, outside the area, 30% ($0.30 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) of organic carbon was recycled and the remaining 70% was deposited to the deep sediment layer.

Key words: Fish farms, Sediment oxygen consumption rate, Macrozoobenthos, Oxygen microsensor, Organic carbon

*Corresponding author: leejs728@momaf.go.kr

서론

전 세계적으로 해양 생물 자원 감소와 인구 증가 때문에 양식 산업 산업은 가장 빠르게 성장하고 있다(FAO, 1992; WRI, 1998). 특히, 해상 어류가두리양식장은 육상 양식장에 비해 적은 시설투자비로 설치할 수 있어 반폐쇄성만에 집중적으로 설치되고 있다.

가두리양식장이 주는 환경적 문제는 1) 잉여먹이 및 양식 생물의 배설물에 의한 퇴적물의 유기물 오염, 2) 양식에 사용되는 항생제 및 약품의 배출, 3) 양식장에서 유출된 생물이 주변 생물과 교배하면서 발생하는 유전학적 문제, 4) 해양생물 질병의 전이 등이 있다(Heggberget et al., 1993; Hirata et al., 1994; Tsutsumi, 1995; Wu, 1995; Naylor et al., 2000; Youngson et al., 2001). 이 중 퇴적물의 유기물 오염은 해수의 과영양화(hypernutrification), 빈산소수괴 형성, 유독성인 황화수소가스를 배출하여 연안생태계에 악영향을 준다(Tsutsumi et al., 1991; Wu, 1995; EMECS, 1997).

가두리 퇴적물의 유기물 오염 조사는 잠수 조사(visual diving survey), 저서생물상 조사(benthic faunal analysis), 퇴적물의 화학적 분석(sediment chemistry), Sediment Profile Imagery(SPI) 등이 있다(Carroll et al., 2003). 특히, 퇴적물의 화학적 분석 및 저서생물상 조사는 유기물 오염 영향을 정량적이며 생태학적 해석을 가능하게 하여 널리 이용되고 있다(Pawar et al., 2001; Holmer et al., 2002; Yokoyama, 2002).

퇴적물의 화학적 조사방법 중 퇴적물의 산소소모율(sediment oxygen consumption rate)은 퇴적물/해수 계면에서 유기물의 분해에 따른 산소 소비 속도로 표층 퇴적물내 유기물의 상대적 농도에 의해 결정되며, 간접적으로는 유기물의 재광물화(reminerlization)를 나타낸다. 또한 입자 침강 유기물 플럭스 및 퇴적물의 유기탄소 수직분포를 함께 분석하면 퇴적층 상부에서의 유기물 순환을 파악할 수 있다. 이것은 퇴적층에서 유기물의 “유입-순환-제거”를 정량적으로 이해할 수 있는 장점이 있다. 그러나 퇴적물의 유기물 오염이 저서생물에게 어떠한 영향을 주고 있는가 하는 생태학적 관점에서의 결과 도출에는 부족함이 있다. 반면에 유기오염 지표종 및 저서 생물의 종 조성 등을 분석하는 생물학적 연구는 퇴적물에서 유기물의 오염상태 및 이들 오염이 저서 생태계에 미치는 영향 등을 파악하기에는 좋은 연구 방법이나 정량적인 해석을 하기에는 어려움이 있다.

이상의 두 가지의 연구방법은 남해 반폐쇄성 만의 가두리에 적용된 바 있다. 심 등(1997)은 통영지역 가두리양식장과 그 주변 해역에서 퇴적물/해수 계면에서 유기탄소와 영양염 순환에 대해 고찰했다. 그들은 가두리 퇴적물의 상부층에서 약 40% 이상의 유기물이 분해되며, 퇴적물로 축적된 유기물이 장기간에 걸쳐 연안환경에 악영향을 줄 수 있다고 보고했다. 또한 정 등(2002)은 저서동물의 군집구조를 이용하여 퇴적물의 유기물 오염이 환경에 미치는 영향을 검토하였다. 그리고 거리별 군집구조 변화를 이용하여 유기물의 확산 범위를 생물학적 관점에서 구분하였다. 이 두 연구결과와 공통점은 가두리 운영으로 생긴 유기물이 양식장을 중심으로 매우 제한된 범위에 집중적으로 퇴적되어 해양환경 및 저서 생태계에 문제를 일으킬 수 있다는 것이다.

이 연구의 목적은 가두리에서 나온 유기물이 주변 퇴적물에 어떤 영향을 주는가를 파악하는데 있다. 이를 위해 우리는 1) 가두

리 양식장을 중심으로 거리별 입자 침강유기탄소의 플럭스, 퇴적물/해수 계면에서 산소소모율, 퇴적물의 유기탄소 수직분포, 대형저서동물군집의 종 조성 등을 분석한 후, 2) 산소소모율 및 대형저서동물군집의 종 조성 결과를 이용하여 유기물의 확산범위를 서로 다른 학계의 관점에서 추정하였고, 3) 유기탄소의 분화 플럭스를 계산하여 가두리양식장이 주변 환경에 미치는 잠재적 요인에 대해서 고찰하였다. 그리고 가두리양식장의 잠재적 유기물 오염 영향을 파악하기 위해 다양한 방법을 동시에 사용함으로써 결과의 객관적 검증을 시도했다.

재료 및 방법

연구대상 가두리

이 연구를 위해 경남 통영 산양면 미륵도에 설치된 가두리양식장을 조사대상으로 선정하였다(Fig. 1). 조사대상 가두리양식장은 12.5×12.5×7 m 크기의 가두리 7기, 6.2×12.5×7 m 크기의 2기로 총면적은 1,092 m² 이었다. 양식어류는 참돔(*Pagrus major*) 250,000마리(90.0 M/T), 돌돔(*Oplegnathus fasciatus*) 80,000마리(20.5 M/T), 우럭(*Sebastes schlegeli*) 120,000마리(43.0 M/T)로 양식어류의 평균 중량은 343 g, 총 양식 개체수는 450,000마리(154.3 M/T) 였다(Table 1).

일일 평균 사료 공급량은 2,386 kg으로 습사료 286 kg(16%), 생사료 2,000 kg(83%)의 사료를 공급하였다. 습사료는 맥아밀, 어분, 영양제를 혼합하여 pellet 형태로 공급하고 있었다. 생사료(fish trash)는 주로 멀치(*Engraulis japonicus*), 까나리 등 소형어류와 연근해 어선에서 잡아서 폐기한 냉동어류를 pellet 형태로 제조한 후 공급하고 있었다. 해수유동 특성은 최대 유속이 약 10.3 cm/s로 전반적으로 10 cm/s 이하의 유속을 나타냈으며, 관측기간 동안에는 남향류가 우세하였다.

공극수의 용존산소 측정 및 산소소모율 추정

해수흐름에 따른 유기물의 확산을 파악하고자 가두리양식장 계에서 수직으로 2개의 조사선(TS, TE)을 정하여 0 m, 5 m, 15 m, 30 m, 50 m씩 멀어지면서 표층이 교란되지 않은 코어를 채집하였다(Fig. 1). 채집된 시료는 이 등(2003)의 방법에 따라 산소 미세전극(oxygen microsensor)을 이용하여 공극수의 산소농도를 측정하였다. 간략히 설명하면, 코어 시료를 채집한 후 온도 변화를 최소화하여 실험실로 옮겼다. 실험실에서는 현장 온도를 유지하면서 산소 미세전극(Unisense, OX 25, 전극 크기: 25 μm)을 10 μm 해상도를 갖는 micromanipulator(Unisense, MM33)에 장착하여 수직으로 50 μm 간격으로 공극수의 산소 농도를 측정하였다. 측정할 때 전극에서 나오는 pA 범위의 전류는 picoammeter(Unisense, PA2000)와 A/D 변환기를 통해 휴대용 컴퓨터로 기록하였다. 산소 농도 검량은 현장 저층수의 산소 농도, 100% 포화농도, 무산소 농도와 전류의 선형 관계를 이용하였다. 또한 시료 채집에서 분석완료까지 소요되는 시간을 최소화(< 3 hour)하여 환경변화에 따른 공극수의 산소 농도 변화를 최소화하였다.

공극수의 산소 측정이 완료된 시료는 함수율(W)을 측정하고 공극율을 계산하기 위하여 냉장 보관하였다. 함수율은 건조기에서 60°C로 2일 이상 건조한 전후의 습 중량과 건조 중량의 차이로 계

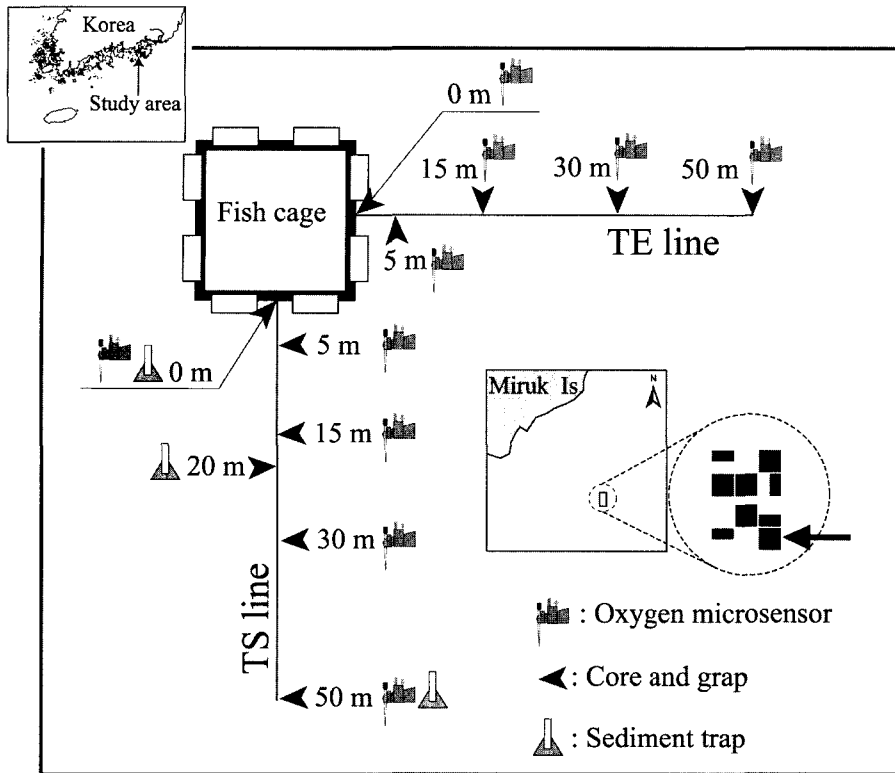


Fig. 1. Schematic representation of the sampling stations and two transects. The icons represent oxygen microsensors (to measure SOD) and sediment traps (to collect particulates). The arrow symbols represent sampling sites for both core and grab samples.

Table 1. Summary statistics at the marine cage fish farm

Species	Mean body weight (g)	No. of individuals	Total weight (M/T)
<i>Pagrus major</i>	360.0	250,000	90.0
<i>Oplegnathus fasciatus</i>	256.3	80,000	20.5
<i>Sebastes schlegeli</i>	364.6	120,000	43.8
sum	-	450,000	154.3

산하였다. 공극율(Φ)은 공극수 및 퇴적물의 평균밀도 (ρ_w : 1.02 g cm⁻³, ρ_s : 2.65 g cm⁻³)와 함수율을 아래 식에 대입하여 계산하였다(Louchouart *et al.*, 1997).

$$\Phi = \rho_s W / (\rho_w (1 - W) + \rho_s W) \quad (1)$$

산소소모율 추정에는 공극수의 산소 농도수직분포가 저층 해수와 공극수 사이의 농도 차이로 인한 분자 확산에 전적으로 결정되고 산소소비가 일정하다고 가정한 1차 확산-반응(1-dimension diffusion-reaction) 방정식의 일반해를 이용하였다. 즉, 1차 확산-반응 방정식의 일반해는 $y = Az^2 - Bz + C = 0$ 형태이다. 이 식을 최소자승법에 적용하여 각 항의 상수를 추정하였다. 이렇게 구해진 식을 1차 미분하여 Fick의 확산공식, $F = -\phi D_s (dO_2/dz)$ 에 대입하여 계산하였다(Bouldin, 1968; Cai and Sayles, 1996; Epping and Helder, 1997). 위 식에서 실제확산계수(D_s)는 온도와 tortuosity 영향을 보정한 값을 이용하였다(Broecker and Peng, 1974; Iversen and Jørgensen, 1993).

입자물질 침강플럭스 추정

수층에서 퇴적물로 유입되는 입자물질은 심 등(1997)의 것과 유사한 구조로 설계된 sediment trap(직경: 10 cm, 길이: 110 cm)을 이용하여 채집하였다. 이것은 가두리 중앙부에 3개, 경계면에 1개를 설치하였다. 그리고 입자 물질의 확산 영향을 파악하고자 가두리 경계면을 기준으로 20 m와 50 m 지점에 각각 1기씩 설치하였다. 퇴적물의 재부유에 따른 문제를 최소화하기 위해 잠수를 하여 sediment trap을 설치하였고, Trap의 시료 병은 약 1일 후에 장착하였다. 시료채집기간은 48시간 이상이었다.

회수한 입자 물질은 분석 전까지 -20°C에서 냉동보관 하였다. 보관된 시료 중 유기 탄소 분석용 시료는 미리 무게를 측정된 GF/C filter(Whateman, pore size: 1.2 μm)로 여과했다. 여과한 시료는 냉동 동결 건조한 후 건 중량을 측정한다 다음 CHN 분석기(Perkin-Elmer Model 2400 series)로 분석하였다.

주상 시료의 채집 및 유기물 분석

주상시료는 TS 조사선의 산소소모율을 측정할 동일한 지점에서 채집하였다. 채집 후, 즉시 1 cm 간격으로 절단한 후 용기에 넣어 냉장 보관하여 당일 실험실로 옮겼다. 실험실에서는 분석 전까지 냉동 동결 건조하여 보관하였다.

유기탄소 분석용 시료는 건조한 시료를 막대사발을 이용 분쇄한 후 원심분리관으로 옮겼다. 이것에 1 N 염산용액을 첨가하여 탄산염을 제거하였다. 탄산염을 두 번 이상 제거한 후 증류수로 세척, 건조하여 다시 분말형태의 시료를 만들었다. 분말 형태의 시료는 일정량을 주석용기에 옮겨 CHN 분석기(Perkin-Elmer Model 2400 series)로 측정하였다.

대형 저서동물상 조사

시료 채집 장소는 TE와 TS 조사선의 산소소모율을 측정한 곳과 동일한 곳에서 채집면적이 0.05 m²인 소형 채니기(van Veen grab)로 2회 채집하였다. 저서동물은 선상에서 망목 1.0 mm인 체를 이용하여 퇴적물과 분리하였다. 현장에서 분리된 저서동물 및 기타 잔존물은 10% 중성 포르말린에 고정한 후 실험실로 운반하였다. 실험실에서 분류군별로 선별한 후 저서다모류에 대하여 종 수준까지 동정하였으며, 완전한 개체나 머리가 있는 경우만을 계수하였다. 측정된 개체수는 평방미터당(m²) 개체수로 환산하였다. 군집구조를 파악하기 위해 종다양도(H')(Shannon and Weaver, 1949)지수를 구하였고, 조사점정간 군집조성의 유사성을 파악하기 위해 주성분분석(Principal component Analysis)을 실시하였다.

결 과

입자물질의 침강플럭스

가두리양식장 주변 퇴적물에 유입되는 입자물질의 침강플럭스는 가두리 경계로부터 멀어질수록 점차 감소하는 양상을 보였다(Table 2). 가두리 중심부에서는 입자 물질의 플럭스는 건중량으로 19 g m⁻² day⁻¹로 이 중 유기탄소가 3.2 g C m⁻² day⁻¹, 총 질소가 0.51 g N m⁻² day⁻¹였다. 이것은 심 등(1997)의 결과 중 입자물질은 약 30%, 유기탄소 및 총 질소는 약 50%에 해당하는 결과였다. 반면, 50 m 지점에서는 총 입자물질은 42 g C m⁻² day⁻¹, 유기탄소는 1.0 g C m⁻² day⁻¹, 총질소는 0.12 g C m⁻² day⁻¹로 가두리 중앙부에 비해 작은 플럭스를 나타냈다.

Table 2. Fluxes of particles, organic carbon and total nitrogen in sinking particles along the TS transect collected in a sediment trap

	Fish Cage	0 m	20 m	50 m
(g m ⁻² d ⁻¹)				
Particle	79	55	44	42
Organic Carbon	3.2	2.1	1.3	1.0
Total Nitrogen	0.51	0.29	0.17	0.12

퇴적물 내 유기탄소의 수직분포

Fig. 2는 TE 조사선에서 채집한 코어의 유기탄소 수직분포를 나타낸 그림이다. 모든 곳에서 퇴적물 상부층의 유기탄소는 높은 농도를 나타냈고 퇴적물이 깊어질수록 점차 감소하여 일정 깊이 아래부터는 농도가 일정하였다. 가두리 경계지점(x=0 m)의 상부 퇴적층(0~7 cm)에서 유기탄소는 약 12~19 mg C g⁻¹로 가장 높았고, 이후 거리가 멀어짐에 따라 점차 감소하여 30 m와 50 m 지점에서는 약 9.8~11.5 mg C g⁻¹ 정도였다. 0 m 지점 표층 퇴적물의 유기탄소 농도는 남해 근해 및 연안에 비해 약 2~3배 높은 농도였으나 기존의 통영지역 가두리 퇴적물 보다는 약 50% 정도 낮았다(조 등, 1994; Khim et al., 1997; 심 등, 1997; Han et al., 1997).

저서 동물의 종 수 및 밀도 분포

저서다모류는 두 조사선에서 총 44종이 나타났으며, 평균 출현 종수는 14종이었다. 가두리로부터 거리에 따른 종 수의 분포양상은 두 조사선 모두 0 m 지점에서 6종과 9종이 출현하여 최저 종수를 기록하였으며, 그 후 점차 증가하여 15 m 지점에서 약간의 피크를 보인 후 다시 평균 종 수 수준으로 감소하였다(Table 3). 다모류의 밀도는 평균 2,693 ind./m²이며, 거리에 따른 분포양상은 가두리로부터 5 m 지점에서 490 ind./m²과 540 ind./m²로 최저 밀도를 기록하였으며, 15 m 지점부터는 평균 이상의 비교적 높은 밀도를 보였다. 이런 밀도분포 양상은 종 수와 마찬가지로 두 조사선에서 모두 비슷하게 나타났다. 종다양도지수(H')의 경우 전 조사 정점에서 일반적인 연안역에 비해 모두 낮은 값을 보였다.

공극수 내 용존산소의 수직분포

저층수의 용존산소 농도는 121 mmol O₂ L⁻¹~171 mmol O₂ L⁻¹(평균: 147 mmol O₂ L⁻¹)로 TS 조사선 5 m에서 최소, TE 조사선 30 m에서 최대로 나타났다(Table 4, Fig. 3). 또한 산소 투과깊이는 0.65 mm에서 1.60 mm로 가두리 경계면 지점(x=0)에서 동일하게 가장 얕았고, 50 m에서 가장 깊었다.

2개 조사선에서 측정된 공극수의 용존산소 수직분포 중 0 m, 5 m, 30 m는 비슷한 분포를 보인 반면, 15 m 및 50 m에서는 다소 차이가 있었다. TS 15 m에서는 TE 15 m 지점보다 깊은 산소투과깊

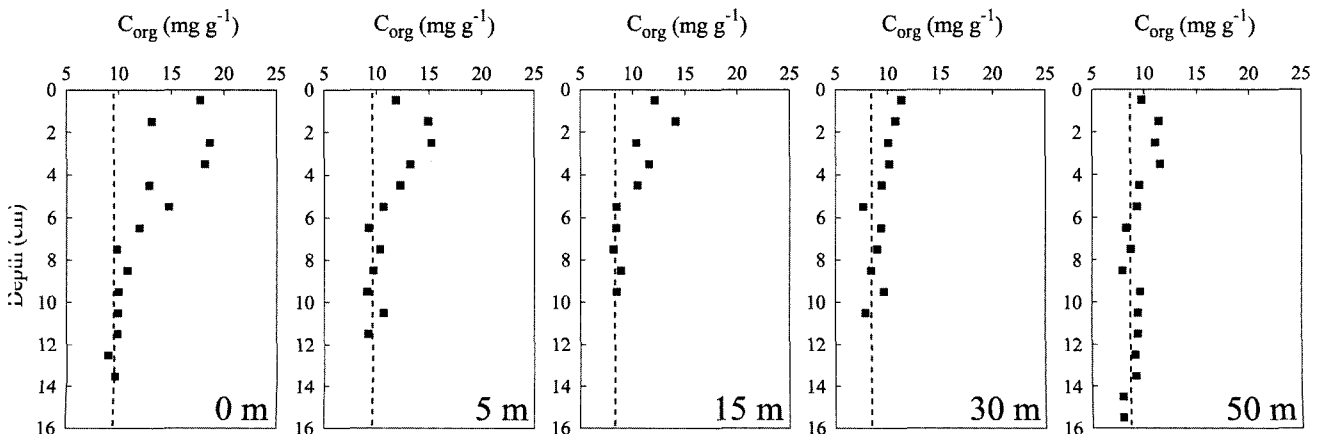


Fig. 2. Vertical distributions of organic carbon in core samples. The dashed lines and shade areas represent non-metabolic organic carbon contents (C_∞) and remineralization fraction (G_m) respectively.

Table 3. The variation of the number of macrobenthos species, abundance and diversity with increasing distance from the edge of the fish farm net cage

	Transect	0 m	5 m	15 m	30 m	50 m
Number of species (0.1 m ²)	TS	6	13	18	15	16
	TE	9	14	20	19	13
Abundance (ind./m ²)	TS	1,400	490	5,990	3,720	1,730
	TE	810	540	3,310	4,780	4,160
Diversity (H')	TS	1.18	2.17	0.75	1.03	1.35
	TE	1.24	1.85	1.63	0.93	1.05

Table 4. Distance from the edge of the cage, oxygen concentration in the bottom water and oxygen penetration depth along the two transects. The oxygen consumption rates and net reaction rates were calculated using the one-dimensional diffusion-reaction models from vertical profiles of oxygen concentration in pore waters

Transect	Distance from the edge of cage (m)	O _{2(BW)} (μmol L ⁻¹)	OPD (mm)	F _{O₂} (mmol O ₂ m ⁻² day ⁻¹)	R (M day ⁻¹)
TS	0	150	0.65	53	9.97
	5	146	0.80	30	3.69
	15	133	1.10	13	1.16
	30	166	1.30	20	1.51
	50	146	1.35	23	1.92
TE	0	140	0.65	53	12.22
	5	121	0.65	27	2.72
	15	158	1.00	35	4.23
	30	171	1.55	19	1.15
	50	134	1.60	-	-

- Results for vertical profiles that may have been disturbed by macrozoobenthos activity were excluded.

이(oxygen penetration depth)와 작은 산소농도 기울기를 보였다. 그리고 TE 50 m 지점에서는 일반적인 산소 수직 분포에 벗어난 분포를 나타냈다.

토 의

퇴적물의 산소소모율

공극수 내 산소는 주로 미생물이 유기물을 분해하면서 소비함으로써 유기물의 양과 밀접한 관련이 있어 가두리양식장 퇴적물의 유기물 오염을 파악하는데 이용되고 있다(Hall *et al.*, 1990; Holmer and Kristensen, 1992; Christensen *et al.*, 1999; Holmer *et al.*, 2002). 이 연구에서 추정된 산소소모율은 13~53 mmol m⁻² day⁻¹로 양식장 경계면에서 최대였다. 양식장 경계면의 결과는 기존의 양식장 아래에서 측정된 결과보다 약 10%~50% 해당하는 수준이었다(심 등, 1997; Heilskov and Homer, 2001; Hargrave *et al.*, 1993; Nickell *et al.*, 2003).

이러한 차이를 유발시킬 수 있는 요인으로는 산소소모율 추정 방법과 유기물의 확산범위를 들 수 있다. 선행되었던 가두리 퇴적물의 산소소모율 추정에는 대부분 benthic chamber와 incubation 방법이 이용되었다. 이 중 benthic chamber는 일정용기를 장기간 해저면에 설치함으로써 용기 안에 있는 저서생물의 호흡이나 퇴적물에서 해수로 용출되는 환원무기물질의 재산화(re-oxidation) 때문에 미세전극 결과보다 과대평가(overestimate) 할 수 있다. Glud *et al.*(1994, 2003)은 심해저 퇴적물에서 저서생물의 영향으로 benthic chamber의 결과가 미세전극의 것보다 1.2~4.2배 높게 추정된다고 보고했으며, 연안 퇴적물의 경우에는 저서동물의 호흡

이 benthic chamber의 산소소모율 중 약 40%를 차지한다고 하였다.

그리고 가두리양식으로 발생하는 유기물은 매우 제한된 범위에 축적되는 것으로 보고되고 있다. 특히, 수심이 얇고 조류가 미약한 곳에서는 유기물이 넓게 확산되지 않아 가두리 밑 해저면에 퇴적될 수 있다. Hall *et al.*(2002)은 가두리양식장 퇴적물의 산소소모율은 유입되는 유기물의 플럭스와 매우 밀접한 상관관계(R²=0.94)를 나타내며, 가두리 양식장을 중심으로 매우 좁은 범위 안에서도 산소소모율이 약 4배 이상 차이가 난다고 보고했다. 우리가 기준 정점으로 설정한 가두리 경계면은 중앙부에서 약 6 m 떨어져 있고, 이곳의 입자물질 침강 플럭스는 중앙부에 비해 약 3분에 1로 작았다. 이상의 점을 고려한다면 가두리 양식장 아래 퇴적물의 산소소모율은 경계면에서 추정된 값보다 클 것으로 예상된다.

Fig. 4는 가두리 경계를 기준으로 두 조사선에서 거리에 따른 산소소모율을 나타낸 그림이다. 남향류가 우세한 조류 특성을 고려한다면 두 조사선의 거리에 따른 산소소모율에 다소의 차이를 기대할 수 있다. 그러나 결과는 15 m와 50 m 지점을 제외하곤 차이가 없었다. 이는 조류에 의한 유기물 확산 영향이 크지 않음을 시사하고 있다. 반면에 15 m 지점에서는 산소소모율이 약 3배 정도 큰 차이를 보였다. 이러한 차이를 유발시킬 수 있는 가장 큰 요인으로는 표층 퇴적물내 유기물 함량의 상대적인 차이가 있다(이 등 2003). 만약 두 지점에서 유기물의 농도가 달라서 공극수의 산소 수직분포가 달리 나타났다면 이들 지점의 유기탄소 함량으로 쉽게 파악할 수 있을 것이다. 그러나 본 연구에서는 두 지점의 유기탄소를 분석하지 않아 정확한 요인을 말하기는 어렵다. 이외에도 표층 퇴적물에 존재하는 유기물이 공간적 분포 특정, 즉 균일한 분포를 보이지 않는 경우에도 차이를 유발시킬 수 있을 것이다.

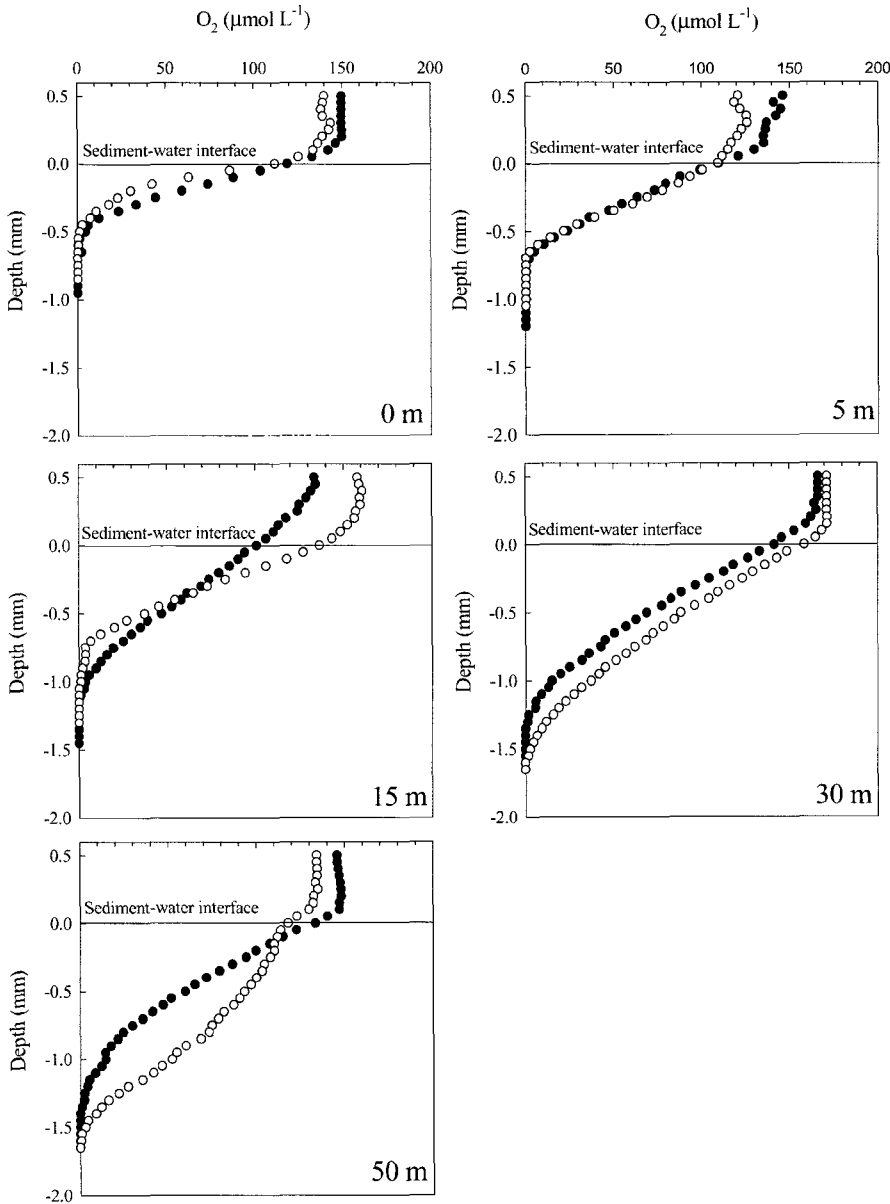


Fig. 3. Vertical profiles of oxygen concentrations in pore water of sediments. The solid and open circles represent TS and TE transects respectively.

TE 조사선의 50 m 지점에서는 비정상적인 산소수직분포를 나타냈다. TE 50 m 지점에서는 TS에 비해 저서동물의 밀도가 2.4 배 높았다. 특히, 시료채집 당시 표층에는 다모류인 *Lumbrineris 'ongifolia'*가 많이 관찰되었다. 따라서 이 곳의 이상적인 분포는 저서동물의 bioirrigation에 의해 수직분포가 변형되었을 가능성이 높다.

해수 유통이 불량한 해역에서 가두리의 고밀도 설치는 유기물의 확산범위를 중첩시켜 오염영향이 더 가중될 수 있다 (Pawar *et al.*, 2001). 따라서 유기물 확산범위(affect zone)의 파악은 가두리의 배치 및 운영, 유기물로 오염된 퇴적물의 정화 등 연안 어장 환경개선을 위해 우선적으로 고려해야 될 부분이다(Brown *et al.*, 1987; Weston, 1990; Yokoyama, 2002).

산소소모율이 표층 퇴적물 내 유기물 농도와 유입량에 의해 결정된다면 가두리와의 거리에 따른 산소소모율의 변화는 유기물의 확산범위를 표현할 수 있는 좋은 증거자료가 된다. 본 연구의 산

소소모율 대 거리의 관계는 $SOD=21.6+31.4\exp(-0.3001x)$ ($R^2=0.84$)를 보이고 있다(Fig. 4). 이 식에서 절편($53 \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)은 가두리 경계면에서, 점근값(asymmtotic value: $21.6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)은 가두리 주변 퇴적물의 산소소모율을 의미한다. 이 등(2003)은 남해 반폐쇄성 만에서의 산소 소모율은 $10.8 \sim 27.6 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위를 갖는다고 보고했다. 특히 여자만, 가락만, 광양만 및 여수연안의 유기물 유입이 많은 곳에서의 평균 산소소모율은 $20.1 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이다. 이것은 유기물의 부하량이 높은 해역의 산소소모율 보다 큰 값으로 최소한 반경 50 m 이상의 범위에서도 가두리 양식장에서 유출된 유기물의 영향을 받고 있음을 시사하고 있다. 또한 가두리 양식장 경계면의 산소소모율은 점근값에 비해 약 2배, 득량만에 비해 약 5배 높은 값이다.

초기 산소소모율과 점근값 차이가 50% 감소하는 거리는 약 2.3 m, 90% 감소하는 거리는 약 8.9 m로 나타났고 점근값에 도달하는 거

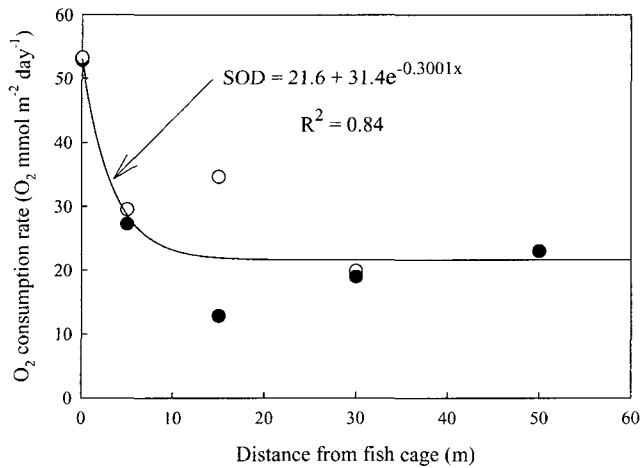


Fig. 4. The distribution of oxygen consumption rate with distance from the edge of the fish cage. The solid and open circles represent TS and TE transect, respectively. The solid line represents the curve-fitting results.

리는 약 44.5 m로 추정되었다. 이는 가두리에서 유입되는 대부분의 유기물이 가두리를 경계로 10 m 내외에 집중적으로 퇴적되는 것을 나타낸다.

저서동물을 이용한 유기물 오염영향 평가

각 정점간의 군집유사성을 통해 유기물의 확산 범위를 파악하기 위해 출현한 종들 중 2회 이상 나타난 28종의 개체수를 가지고 주성분분석을 실시하였다. 그 결과 첫 번째 축이 전체의 80%, 두 번째 축이 9%를 설명할 수 있는 것으로 나타났다(Fig. 5). 가두리 주변 다모류군집은 크게 두 개의 그룹으로 형성되었다. 첫 번째 그룹은 가두리로부터 5 m 이내의 4개 정점, 두 번째 그룹은 15m 에서 50 m 까지의 6개 정점으로 구성되었다. 각 그룹의 특징을 살펴보면, 첫 번째 그룹은 그룹 내에서 각각의 정점이 거리에 따라 높은 유사성을 보이고 있으며, 5 m 정점 군집이 0 m 군집에 비해 두 번째 그룹에 가까운 것으로 나타났다. 반면 두 번째 그룹은 정점들간에 거리에 따른 구배를 보이지 않고 혼재하는 결과를 보여주었다. 이와 같은 결과는 앞서의 산소소모율 조사 결과와 잘 일치하고 있다. 이는 저서다모류군집이 가두리에서 유입된 유기물의 영향을 받고 있음을 보여주는 결과이며, 특히 5 m 군집까지는 직접적으로 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

가두리 주변 저서다모류군집의 우점종은 *Tharyx multifilis*, *Limnineris longifolia*, *Sigambra tentaculata*, *Capitella capitata*

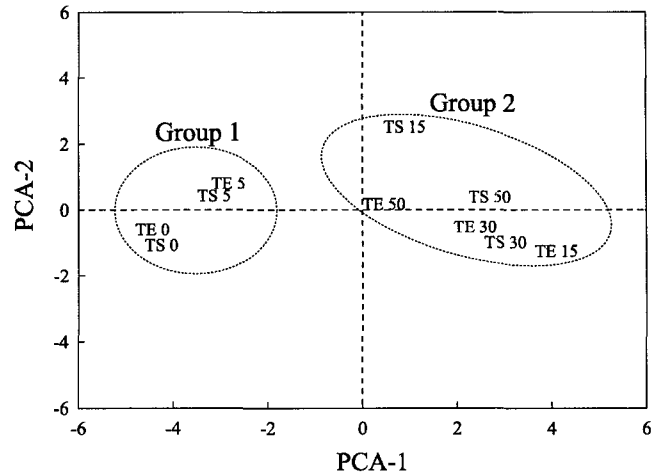


Fig. 5. Two dimensional PCA ordination of the sample abundances from the fish farm. PCA-1 and PCA-2 together accounted for 90% of the total sample variability. The results are divided into two groups: One group, between 0 and 5 m, represents those in the area severely polluted by organic matter. The other group is between 15 and 50 m, where organic matter is expected to be received from the fish farm.

로서 이 종들이 군집 전체의 88%를 차지하였다. 이들 우점종 중 *C. capitata*는 대표적인 유기물 오염지표종이며(Bellan, 1970; Reish, 1972; Pearson and Rosenberg, 1978), 국내에서도 유기물 오염이 극심한 지역에서 높은 밀도를 보이는 것으로 보고되었다(신 등, 1992; 임 등, 1992; 홍 등, 1994; 홍 등, 1997; 박 등, 2000; 정 등, 2002). 이 종은 현 조사결과에서도 가두리로부터 5 m 거리 내에 제한적으로 분포하였으며, 특히 두 조사선의 0 m 지점에서 각각 520 ind./m²과 510 ind./m²의 높은 밀도로 출현하였다(Fig. 5). 이 종의 가두리 밑에서의 집중적인 분포 현상은 가막만의 가두리에서 조사된 정 등(2002) 및 박 등(2000)의 결과와 일치하나 출현밀도에 있어서는 상당히 낮았다. *T. multifilis*는 통영 가두리 주변 다모류군집에서 전체의 60%를 차지하여 가장 우점하는 종으로 나타났다. 이 종은 주로 가두리에서 15~50 m 지점에 분포하였으며, 두 조사선 모두 30 m 지점에서 3,000 ind./m² 이상의 높은 밀도를 보였다(Fig. 5). 두 번째로 우점하는 종인 *L. longifolia*는 전체의 19%를 차지하였으며, 가두리에서 15~50 m 지점에서 높은 밀도를 보여 *T. multifilis*와 유사한 분포를 보였으나 출현밀도 면에 있어서는 *T. multifilis*에 비해 상당히 낮았다(Fig. 6). *L. longifolia*와 *T. multifilis* 이 두 종은 잠재적인 유기물 오염지표종으로 알려

Table 5. Total organic carbon content (C_0) at the sediment/water interface, content of non-metabolic carbon (C_∞), vertical organic carbon fluxes (C_{in}), and partitioning of organic carbon fluxes in sediments. C_0 and C_∞ were determined by Eq. (2) applied to the vertical profiles of organic carbon contents in the core sediment. The vertical organic carbon fluxes were estimated from the collected sediment trap samples

Station	C_0	C_∞	C_{in}	$C_{benthic}^*$	C_{remin}^{**}	C_{burial}^{***}	$(C_{benthic}+C_{remin})/C_{in}$	C_{burial}/C_{in}
	(mg g ⁻¹)							
0 m	19.3	9.6	2.14	0.44	0.63	1.07	0.50	0.50
50 m	11.3	7.9	1.00	0.19	0.11	0.70	0.30	0.70

* $C_{benthic}$: Oxygen consumption rate×(110/170).

** C_{remin} : (J_{remin} fraction (%)× C_{in}) - $C_{benthic}$.

*** C_{burial} : J_{burial} fraction (%)× C_{in} .

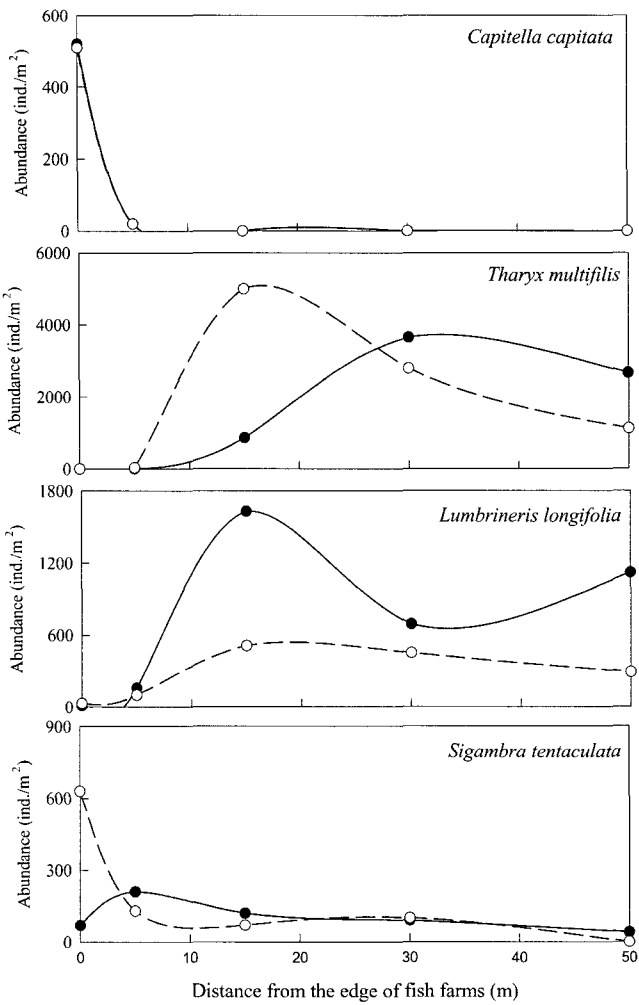


Fig. 6. Spatial variation in density of dominant macrobenthic fauna along the distance from the edge of the fish cage. The solid and open circles represent TE and TS transect, respectively.

져 있으며(Kitamori and Funae, 1959; 임과 최, 2001), 가막만
 가두리 주변해역에서도 가두리로부터 15 m 지점에서 높은 밀도
 로 출현하였다(정 등, 2002). 그 다음으로 *S. tentaculata*는 앞의 종
 들과는 달리 직접적으로 유기물 오염과 관련되어 보고된 적은 없
 으나, 기존의 정 등(2002)에서도 가두리 인접지역에서 높은 밀도
 로 출현하였으며, 이번 조사에서도 조사선 TS의 0 m 지점에서
*C. capitata*와 함께 우점하는 것으로 나타나 앞으로 이 종의 동태
 에 대한 주의가 요구된다.

가두리주변 저서 다모류군집에서 우점종의 출현양상과 주성분
 을 분석해 보면 5 m 지점까지는 가두리 양식으로 인한 유기물 오
 염의 영향을 직접적으로 받고 있으며, 5 m에서 15 m 사이의 지
 점에서 군집이 변하고 있는 것으로 판단된다. 또한 15-50 m 지점
 에서 잠재적 유기물 오염지표종들의 극우점과 낮은 다양도(H')도
 로 미루어 볼 때 이 지점 또한 과도한 유기물 공급으로 인한 부영
 양상태에 접어든 것으로 생각된다.

조사방법간의 비교

Carroll et al.(2003)은 노르웨이 연안에서 운영 중인 80개의 가
 두리 양식장을 대상으로 퇴적물의 화학적 변수(pH, sulfide, redox
 potential)와 저서동물의 군집을 조사하여 각각의 방법에 대한 장
 단점을 비교하였다. 특히, 저서동물의 군집을 이용한 방법은 가두
 리 양식장 반경 50 m 내외에서 퇴적물 유기물 오염 영향에 매우
 민감하게 반응하여 경우에 따라 반경 수백 m 까지 오염된 사실을
 파악할 수 있다고 하였다. 반면에 퇴적물 화학적 방법은 저서동물
 군집 방법보다 더 좁은 범위(< 10 m)에서만 유용한 방법이라고 했다.

이 연구에서 산소소모율 및 저서동물을 이용하여 추정된 퇴적
 물의 유기물 오염 영향권은 일치했다. Carroll et al.(2003)이 이용
 한 화학적 변수들은 산소와 접촉하면 매우 빠르게 변질되는 특성
 을 갖고 있다. 반면, 산소미세전극은 공극수의 산소수직분포를 현
 장에서 또는 빠른 시간 내에 분석할 수 있어 위에서 언급한 시료
 의 변질 문제를 최소화 할 수 있다. 또한 산소미세전극을 이용한
 산소소모율 조사결과는 저층수와 공극수간의 산소 농도차로 발생
 되는 확산성 산소 소모(diffusive oxygen uptake)를 의미하기 때문
 에(Glud et al., 2003) 유기물의 상대적 존재량을 잘 표현한다.

결과적으로 해수유통이 불량하고 수심이 얕아 유기물이 좁은
 범위에서 축적되는 환경에서는 이 두 가지 방법을 동시에 적용하
 면 유기물의 확산범위를 정량적으로 추정할 수 있으며 자료의 신
 뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 다양한 학제간의 토
 의가 가능하므로 가두리에 의한 퇴적물의 유기물 오염이 주변 환
 경에 미치는 영향을 정확히 이해할 수 있을 것으로 생각된다.

퇴적물에서 유기탄소의 순환

가두리양식장 퇴적물로 유입된 유기물은 미생물 호흡에 의해
 분해되어 재광물화(remineralization) 과정을 거쳐 무기물 형태로
 수층으로 다시 공급된다. 이 재순환 부분은 해역의 영양단계(trophic
 level)를 결정하는 중요한 요인이 된다.

유기물은 분해정도에 따라 분해성(G_m)과 난분해성(G_{∞})으로 구
 분된다. 이중 분해성 유기물은 퇴적물/해수 계면 및 상부 퇴적층
 에서 분해가 되며 분해산물은 수층으로 다시 공급된다. 반면에 난
 분해성 유기물은 퇴적된다. 퇴적물 내 유기물의 분해율이 일정하
 고, 정상상태(steady state)라 가정하면 지배 방정식은 아래와 같다
 (Berner, 1980).

$$G_z = G_m^0 \exp[(-k/w)z] + G_{\infty} \tag{2}$$

여기서, G_z 는 퇴적층에서 유기물의 농도($mg\ g^{-1}$), k 는 1차 유기
 물 분해상수($year^{-1}$), w 는 퇴적속도($cm\ year^{-1}$), z 는 퇴적물 깊이
 (cm), G_m^0 는 표층 퇴적물($z=0$)에서 분해성 유기물의 농도($mg\ g^{-1}$),
 G_{∞} 는 난분해성 유기물의 농도이다($mg\ g^{-1}$).

식 (2)에서 재순환된 유기물은 표층 퇴적물의 유기물 농도(G_0)
 와 난분해성 유기물 농도(G_{∞}) 차이로 식 $G_m^0 = G_0 - G_{\infty}$ 로 표현 할
 수 있다. 또한 퇴적물로 유입된 유기물이 퇴적물/해수 계면과 상
 부 퇴적층에서 분해 과정을 거치는 부분의 백분율(100% fraction)
 은 식 $\% J_{rem.} = 100((G_0 - G_{\infty})/G_0)$, 퇴적층 속으로 축적되는 부분은
 식 $\% J_{burial} = 100(G_{\infty}/G_0)$ 로 표현된다(Klump and Martens, 1987).

우리는 식 (2)를 퇴적물내 유기탄소의 수직분포에 적용하여 G_0 ,
 G_{∞} 상수를 추정하였다. 이들 상수를 유기탄소의 분화 백분율 식

에 대입하여 계산한 후 침강 유기탄소 플럭스를 곱해 퇴적물 상부층에서의 분해($C_{remn.} + C_{benthic}$)와 퇴적되는 유기탄소(C_{burial})의 플럭스를 추정하였다. 여기서 상부 퇴적층에서 분해 부분은 퇴적물/해수 계면에서 유기물 산화($C_{benthic}$)를 포함하게 된다. 따라서 퇴적물 상부층 내에서 일어나는 실질적인 재광물화 부분은 퇴적물/해수 계면에서의 유기물 산화를 감한 값이다(Reimer and Suess, 1983). 퇴적물/해수 계면에서 유기탄소 산화 플럭스는 산소소모율에 산소 대 유기탄소의 비(170/117)를 적용하여 계산하였다(Anderson and Samiento, 1994).

이 연구결과에서 추정된 초기 유기탄소의 농도(C_0)는 11.3~19.3 mg g⁻¹로 가두리양식장 경계면($x=0$ m)에서 최대, 양식장에서 50 m 떨어진 지점에서 최소였고 난 분해성 유기탄소(C_{∞}) 역시 가두리양식장 경계면에서 9.6 mg g⁻¹, 50 m 떨어진 지점에서 7.9 mg g⁻¹로 나타났다. 0 m 지점에서는 유입된 유기탄소 중 50%(1.07 g C m⁻² day⁻¹)가 퇴적물 상부 층에서 분해되고 나머지는 퇴적층으로 퇴적되고 있었다. 또한 퇴적물/해수 계면에서의 유기물분해($C_{benthic}$)는 41%(0.44 g C m⁻² day⁻¹)를 차지하고 있었다. 반면 50 m 떨어진 곳에서는 탄소의 유입량 중 30%(0.30 g C m⁻² day⁻¹)가 퇴적물 상부 층에서 재순환되고 70%는 퇴적되는 것으로 계산되었다. 그리고 재순환 부분 중 약 63%(0.19 g C m⁻² day⁻¹)가 퇴적물/해수 계면에서 분해되는 것으로 나타났다. 이것은 가두리양식장 퇴적물에서 재순환 유기탄소 플럭스가 주변 퇴적물보다 최소한 약 3배 많다는 것을 보여주고 있다.

사 사

이 연구는 국립수산과학원 연안어장 환경용량산정연구 및 남해 해양환경측정망 연구지원에 의한 것입니다. 연구수행을 위해 시료 채집 및 분석에 많은 도움을 주신 국립수산과학원 환경관리팀 및 양식환경연구소 직원 여러분들께 진심으로 감사드립니다. 논문을 검토하고, 세밀하게 지적해주신 두분의 심사위원께 감사를 드립니다.

참고문헌

- 심정희, 강영철, 최진우, 1997. 남해안 통영지역 가두리 양식장 해수-퇴적물 경계면에서의 chemical fluxes. *바다*, **2**: 151-159.
- 신현출, 최성순, 고철환, 1992. 영일만 다모류 군집의 계절별, 공간적 변화. *한국해양학회지*, **27**(1): 44-54.
- 이재성, 김기현, 유준, 정래홍, 고태승, 2003. 산소미세전극을 이용한 남해연안 퇴적물/해수 계면에서 산소소모율 및 유기탄소 산화를 추정. *바다*, **8**(4): 392-400.
- 임현식, 최진우, 2001. 남해안 소리도 주변 연성저질 해역의 저서동물 분포. *한국수산학회지*, **34**(3): 225-237.
- 임현식, 최진우, 제종길, 이재학, 1992. 진해만 양식장 밀집해역의 저서동물 분포. *한국수산학회지*, **25**(2): 115-132.
- 조영길, 이창복, 최만식, 1994. 남해 대륙붕 표층퇴적물 중 중금속 원소의 분포 특성. *한국해양학회지*, **29**: 338-356.
- 정래홍, 임현식, 김성수, 박종수, 전경암, 이영식, 이재성, 김귀영, 고우진, 2002. 남해안 가두리 양식장 밀집해역의 대형저서동물 군집에 대한 연구. *바다*, **7**: 235-246.
- 홍재상, 서인수, 유재원, 정래홍, 1994. 인천 북항 주변해역의 해양저서동물상. *자연보존*, **88**: 34-50.
- 홍재상, 정래홍, 서인수, 윤건택, 최병미, 유재원, 1997. 시화방조제의 건설은 저서동물군집의 시·공간 분포에 어떠한 영향을 미쳤는가? *한국수산학회지*, **30**(3): 882-895.
- 박홍식, 최진우, 이형근, 2000. 통영 인근 가두리 양식장 지역의 저서동물군집구조. *한국수산학회지*, **33**(1): 1-8.
- Anderson, L.A. and J.L. Sarmiento, 1994. Redfield ratios of remineralization of determined by nutrient data analysis. *Global Biogeochemical Cycles*, **8**: 65-80.
- Bellan, C., 1970. Pollution by sewage in Marseilles. *Mar. Pollut. Bull.*, **1**: 59-60.
- Berner, R.A., 1980. Early diagenesis: A Theoretical Approach. Princeton University Press, 241pp.
- Broecker W.S. and T.H. Peng, 1974. Gas exchange rates between air and sea. *Tellus*, **72**: 248-254.
- Brown, J. R., Gowen, R. J. & McLusky, D. S. (1987). The effect of salmon farming on the benthos of a Scottish sea loch. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **109**: 39-51.
- Bouldin, D.R., 1968. Models describing the diffusion of oxygen and other mobile constituents across mud-water interface. *J. Ecol.*, **56**: 77-87.
- Cai, W.J. and F.L. Sayles, 1996. Oxygen penetration depths and fluxes in marine sediments. *Mar. Chem.*, **52**: 123-131.
- Carroll, M.L., S. Cochran, R. Fieler, R. Velvin, and P. White, 2003. Organic enrichment of sediments from salmon farming in Norway: environmental factors, management practices, and monitoring techniques. *Aquaculture*, **226**: 165-180.
- Christensen, P.B., S. Rysgaard, N.P. Sloth, T. Dalsgaard, and S. Schwærter, 1999. Sediment mineralization, nutrient fluxes, denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium in an estuarine fjord with cage trout farms. *Aquat. Microb. Ecol.*, **21**: 73-84.
- EMECS, 1997. The environmental management of enclosed seas (EMECS) report. The international EMECS Center, Kobe, Japan.
- Epping E.H.G. and W. Helder, 1997. Oxygen Budgets calculated from in situ oxygen microprofiles for Northern Adriatic sediments. *Con. Shelf Res.*, **17**: 1737-1764.
- FAO, 1992. Aquaculture production, 1984-1990. Fisheries Circular NO. 815, 206 pp. Rome.
- Glud. R.N., J.K. Gundersen, B.B Jø rgensen, N.P. Revsbech, and H.D. Schultz. 1994. Diffusive and total oxygen uptake of deep-sea sediments in the eastern south-atlantic ocean-in-situ and laboratory measurement. *Deep-Sea Res., Part 1*, **41**: 1767-1788.
- Glud. R.N., J.K. Gundersen, H. Röy, and B.B Jörgensen, 2003. Seasonal dynamics of benthic O₂ uptake in a semienclosed bay: Importance of diffusion and faunal activity. *Limnol. Oceanogr.*, **48**(3): 1265-1276.
- Hall, P.O.G., L.G. Anderson, O. Holby, S. Kollberg, and M. Samuelsson, 1990. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm I: Carbon. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **61**: 61-73.
- Han, M.W., I.H. Lee, K.H. Kim and I. Noh, 1997. The partitioning of organic carbon cycle in coastal sediments of Kwangyang Bay. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **32**: 103-111.

- Hargrave, B.T., D.E. Duplisea, E. Pfeiffer, D.J. Wildish, 1993. Seasonal changes in benthic fluxes of dissolved-oxygen and ammonium associated with marine culture Atlantic salmon. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **96**: 249-257.
- Heggberget, T.G., B.O. Johnsen, K. Hinder, B. Jonsson, L.P. Hansen, N.A. Hvidsten, and A.J. Jensen, 1993. Interaction between wild and cultured Atlantic Salmon - a review of the Norwegian experience. *Fish. Res.*, **18**: 123-146.
- Heilskov, A.C., and M. Homer, 2001. Effects of benthic fauna on organic mineralization in fish-farm sediments: importance of size and abundance. *ICES J. Mar. Sci.*, **58**: 427-434.
- Hirata, H., S. Kadowaki, and S. Ishida, 1994. Evaluation of water quality by observation of dissolved oxygen content in mariculture farms. *Bull. Natl. Res. Inst. Aquacult.*, **1**: 61-65.
- Hisashi Yokoyama, 2003. Environmental quality criteria for fish farms in Japan. *Aquaculture*, **226**: 45-56.
- Holmer, M., and E. Kristensen, 1992. Impact of marine fish cage farming on sediment metabolism and sulfate reduction of underlying sediments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **80**: 191-201.
- Holmer, M., N. Marba, J. Terrados, C.M. Duarte, and M.D. Fortes, 2002. Impacts of milkfish (*Chanos chanos*) aquaculture on carbon and nutrient fluxes in the Bolinao area, Philippines. *Mar. Pollut. Bull.*, **44**: 685-696.
- Horsen, N., and B.B. Jørgensen, 1993. Diffusion coefficients of sulfate and methane in marine sediments: Influence of porosity. *Geochimica et Cosmochimica Acta.*, **57**: 571-578.
- Kim B., D.H. Shin, and S.J. Han, 1997. Organic carbon, calcium carbonate, and clay mineral distributions in the Korea Strait region, the southern part of the East Sea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **32**: 128-137.
- Kitamori, R. and K. Funae, 1959. The benthic community in polluted coastal water. (III) Osaka Bay. *Bull. Nakai Reg. Fish. Res. Lab.*, **12**: 215-221.
- Klump, J.V. and C.S. Martens, 1987. Biogeochemical cycling in an organic-rich coastal marine basin. 5. Sedimentary nitrogen and phosphorus budgets based upon kinetic models, mass balances and the stoichiometry of nutrient regeneration. *Geochimica et Cosmochimica Acta.*, **51**: 1161-1173.
- Louchouart, P., M. Lucotte, E. Duchemin, and A. de Vernal, 1997. Early diagenetic processes in recent sediments of the Gulf of St-Lawrence: phosphorus, carbon and iron burial rates. *Marine Geology*, **139**: 181-200.
- Nickell, L.A., K.D. Black, D.J. Hughes, J. Overnell, T. Brand, T.D. Nickell, E. Breuer, and S.M. Harvey, 2003. Bioturbation, sediment fluxes and benthic community structure around a salmon cage farm in Loch Creran, Scotland. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **285-286**: 221-233.
- Naylor, R.L., R.J. Goldberg, J.H. Primavera, N. Kautsky, M.C.M. Beveridge, J. Clay, C. Folke, J. Lubchenco, H. Mooney, and M. Troell, 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, **405**: 1017-1024.
- Paul Read and Fernandes T., 2003. Management of environmental impacts of marine aquaculture in Europe. *Aquaculture*, **226**: 139-163.
- Pawar, V., O. Matsuda, T. Yamamoto, T. Hashimoto, and N. Rajendran, 2001. Spatial and temporal variations of sediment quality in an around fish cage farms: A case study of aquaculture in the Seto Inland Sea, Japan. *Fisheries Science*, **67**: 619-627.
- Pearson, T.H. and R. Rosenberg, 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.*, **16**: 229-311.
- Reimers, C.E. and E. Suess, 1983. The partitioning of organic carbon fluxes and sedimentary organic matter decomposition rates in the ocean. *Marine Chemistry*, **13**: 141-168.
- Reish, D.J., 1972. The use of marine invertebrates as indicators of varying degrees of marine pollution. In Marine pollution and sea life, edited by Ruivo, M., R.A.O. Fishing News (Books) Ltd., London, pp. 404-411.
- Shannon, C.E. and W. Weaver, 1949. The mathematical theory of communication. Univ. of Illinois Press, Urbana, 125pp.
- Takeoka, H., and K. Omori, 1996. Methods of determining the limit suitable fish culture based on the oxygen consumption rate by the sediment. *Bull. Jpn. Soc. Fish. Oceanogr.*, **60**: 45-53.
- Tsutsumi, H., T. Kikichi, M. Tanaka, T. Higashi, K. Imasaka, and M. Miyazaki, 1991. Benthic faunal succession in a cove organically polluted by fish farming. *Mar. Pollut. Bull.*, **23**: 233-238.
- Tsutsumi, H., 1995. Impact of fish net pen culture on the benthic environment of a cove in south Japan. *Estuaries*, **18**: 108-115.
- Weston, D. (1990). Quantitative examination of macrobenthic community changes along an organic enrichment gradient. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **61**: 233-244.
- WRI, 1998. World Resources 1998-1999. Oxford University Press, Oxford.
- Wu, R.S.S., 1995. The Environmental Impact of Marine Fish Culture: Towards a sustainable future. *Mar. Pollut. Bull.*, **31**: 159-166.
- Yokoyama, H., 2002. Impact of fish and pearl farming on the benthic environments in Gokasho Bay: Evaluation from seasonal fluctuations of the macrobenthos. *Fisheries Science*, **68**: 258-268.
- Youngson, A.F., A. Dosdat, M. Saroglia, and W.C. Jordan, 2001. Genetic interactions between marine finfish species in European aquaculture and wild conspecifics. *J. Appl. Ichthyol.*, **17**: 153-162.

2003년 11월 25일 원고접수

2004년 2월 17일 수정본 채택

담당편집위원: 신현출