

남해안 통영지역 가두리양식장 해수-퇴적물 경계면에서의 chemical fluxes

심정희 · 강영철 · 최진우¹

한국해양연구소 극지연구소, ¹한국해양연구소 저서생물연구소

Chemical Fluxes at the Sediment-Water Interface Below Marine Fish Cages on the Coastal Waters off Tong-Young, South Coast of Korea

JEONG HEE SHIM, YOUNG-CHUL KANG AND ¹JIN-WOO CHOI

*Polar Research Center, Biological Oceanography Division, Korea Ocean Research
and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea*

1995년 6월, 남해안 통영지역 가두리양식장 해수-퇴적물 경계면에서 입자상유기물의 수직유입량과 용존산소의 소모량, 영양염류의 용출량을 관측하였다. 입자상유기물의 수직유입량은 저층고정식 sediment trap을 이용하였으며, 용존산소의 소모량과 영양염류의 용출량은 benthic chamber method로 측정하였다. 가두리양식이 연안부영양화에 미치는 영향과 가두리에서 유출된 입자상유기물의 확산강도를 정량하기 위해, 가두리 아래(수심 약 18 m, Cage Site)와 가두리에서 수평으로 약 100 m 가량 떨어진 곳(수심 약 32 m, Control Site)의 해수-퇴적물 경계면에서, 암모니아와 인산염, 규산염의 용출량을 비교하고, 탄소와 질소와 인의 mass balances를 추정하였다. 관측결과, 가두리정점(Cage Site)으로는 $6400 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 의 입자상유기물이 유입되었고, 동시에 $230 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 이상의 용존산소가 소모되었다. 따라서 탄소의 경우, 가두리 아래 해저면으로 공급되는 유기입자의 약 40%에 달하는 양이 해수-퇴적물 경계면에서 분해되며(ca. $2400 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$), 나머지 약 60%는 퇴적되어 매몰되는 것으로 보인다(ca. $4000 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$). 그러나 대비정점(Control Site)에서는 가두리정점에 비해 상대적으로 적은 양의 유기물유입과(ca. $4000 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$), 낮은 용존산소소모율이 관측되었다($75 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2}\text{d}^{-1}$). 관측결과는 가두리에서 투기되는 대부분의 입자상유기물이 가두리 아래 해저면에 집중적으로 퇴적되고 있음을 보여주며, 가두리 부근 해저면으로 확산되는 입자상유기물의 양은 가두리에서 멀어질수록 급속히 감소함을 시사한다.

Benthic respiration and chemical fluxes were measured at the sediment-water interface underlying the marine fish cages floating on the open coastal waters off Tong-Young, the South Coast of Korea. The effects of cage farming on coastal benthic environment and on mass balance of organic carbon in the benthic boundary layer under the marine fish cages are addressed. In a growing season of caged fishes of June, 1995, benthic chambers and sediment traps were deployed on the sediment-water interfaces of the two sites chosen for this study: 1) Cage Site, directly underlying the fish cages of the farm at 18 m water depth, and 2) Control Site, about 100 m away from the farm at 32 m water depth. Benthic respiration rates and chemical fluxes were calculated from the evolution of dissolved oxygen and chemicals in the chamber water, and mass balance of organic carbon in the benthic boundary layer was constructed based on the vertical flux of particulate organic matter (POM) and chemical fluxes out of the sediment. High organic dumping ($6400 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$) and high benthic respiration ($230 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2}\text{d}^{-1}$) were observed at the Cage Site. Equivalent to 40% of vertical flux of organic carbon into the Cage Site seemed to be decomposed concurrently and released back to overlying waters ($2400 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$). Consequently, up to $4000 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$ of organic carbon could be buried into the farm sediment (equivalent to 60% of organic carbon flux into the Cage Site). At the Control Site, relatively less input of organic carbon ($4000 \text{ mg C m}^{-2}\text{d}^{-1}$) and low benthic respiration rate ($75 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2}\text{d}^{-1}$) were observed despite short distance away from the cages. The influence of cage farming on benthic chemical fluxes might be restricted and concentrated in the sea bottom just below the fish cages in spite of massive organic dumping and high current regime around the fish cage farm.

서론

대륙주변 연안으로는 대양에 비해 많은 양의 유기물입자가 유입된다. 대기와 담수를 통해 인근 육지로부터 유입되는 입자들은 해수와 만나면 침전되어(염석, flocculation) 대부분 하구언을 비롯한 연안 저층에 퇴적된다. 또한 외양에 비해 표층의 높은 생산력으로 인해, 연안 퇴적층에 공급되는 유기물의 양도 상당하다. 그 외에 인간활동으로 발생하는 유기물 유입으로는 생활하수와 농·공폐수, 해안의 여가 및 위락시설로 인한 각종 쓰레기의 유입, 선박 및 유조선 사고로 인한 유류오염 그리고 양식활동 등이 있다. 과량의 유기물이 연안으로 유입되어 발생하는 연안의 부영양화와 오염현상은 이미 널리 알려져있다. 특히, 인간활동에서 유래된 오염물질은 비교적 짧은 이동 거리와 시간으로 인해 연안환경에 미치는 영향이 직접적이고 신속하며, 고농도라는 특징을 가진다. 한편, 연안의 특성으로 인해, 수층에서 제거되어 퇴적층으로 공급된 유기물입자와 재생산(regeneration)된 무기 영양염은 저층생태계뿐만 아니라 표층의 생산활동에도 상당한 영향을 끼친다(benthopelagic coupling). 따라서 과량의 유기물이 연안퇴적층으로 공급되는 경우, 그 영향이 퇴적층을 포함한 수층에 까지 광범위하게 나타나게 된다.

우리나라 삼면에 접한 연안에서 양식업이 많이 실시되고 있다. 최근들어, 간척산업, 배타적 경제구역(EEZ) 선포, 남획 등으로 인한 어장의 축소로 수산물의 공급이 수요에 미치지 못하고 있다. 따라서 잡는 어업에서 기르는 어업으로의 전환은 필연적인 것이며, 실제로 국내에 공급되는 수산물의 상당한 양이 양식에 의해 생산된 것이다(장, 1995). 한편, 남해안 곳곳에 설치된 가두리양식은 비용이 적게 들고 운영기술이 단순하여, 양식업자들이 선호하는 양식법이다. 그러나 모든 구조물이 연안 해안에 노출되어, 가두리 양식장에서 사용하는 이료(물고기먹이)와 양식어류의 배설물 등이 아무런 여과없이 주변 해양으로 유출되는 단점이 있다. 따라서 양식장이 과밀하게 들어선 경우에는 그 주변 환경이 양식장으로 인해 영향을 받게 된다. 양식장의 그물과 그외 설치물로 인한 해류흐름의 방해, 양식장에서 기인하는 유기물로 인한 인근해의 부영양화와 퇴적환경의 변화 등으로 인해, 결국 연안 및 저서생태계가 위협을 받게 된다. 이러한 영향은 결국 양식장의 어류 생산에도 직접적인 영향을 끼친다. 즉, 악화된 양식장의 수질로 인해 어병의 발생과 이로 인한 발육부진, 폐사량의 증가와 같은 현상이 나타나게 되는 것이다. 따라서 연안의 환경수용력(carrying capacity)과 양식장의 수질환경을 고려하여 양식의 규모와 방법을 설정해야만 할 것이다. 그리고 양식장에서 기인하는 유기물을 잘 활용할 수 있는 방법의 개발도 필요하다.

외국의 경우에는 이미 clean culture와 과학적인 양식에 관한 연구가 활발하다. 예를 들어 연안부영양화의 원인이 되는 양식장의 배설물처리에 조류(algae)를 이용하는 방법 연구(Krom et al., 1995), 인근 연안환경에 오염이 되지 않는 양식기술의 개발(Shpigel et al., 1993; Avnimelech et al., 1981), 양식장 저층의 유기물분해 기작에 대한 연구(Blackburn et al., 1988; Hall et al., 1990; Kaspar et al., 1988), 양식장 주변의 적조발생에 대한 연구(Honjo, 1994) 등이 진행되고 있다. 국내에서도 늘고 있는 양식

장과 그 주변에 빈번히 발생하는 적조의 원인을 규명하기 위해 서라도 양식장에서 유출되는 유기물의 양과 확산정도를 파악하고, 인근해역의 환경수용력에 대한 연구가 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 가두리양식장에서 유래하는 유기물이 연안환경에 미치는 영향을 파악코저, 통영의 한 가두리양식장에서 가두리그물아래와 100 m 떨어진 지점에 benthic chamber와 저층고정식 sediment trap을 설치하여, 퇴적층으로 유입되는 입자상 유기물의 양과 해수-퇴적물경계면에서의 chemical fluxes를 측정하였다. 이를 통해 양식장에서 방출되는 유기물의 성분과 이의 확산정도 그리고 해수-퇴적물 경계면에서의 탄소와 질소와 인의 mass balance를 정량하여, 양식장의 수질 및 퇴적환경을 파악하고 또한 연안의 환경수용력을 평가하는데 도움을 주고자 한다.

연구지역의 위치와 환경

본 연구가 수행된 가두리양식장의 위치는 경상남도 통영시 산양면 저도이다(Fig. 1a). 가두리양식장은 약 1200 m² 가량의

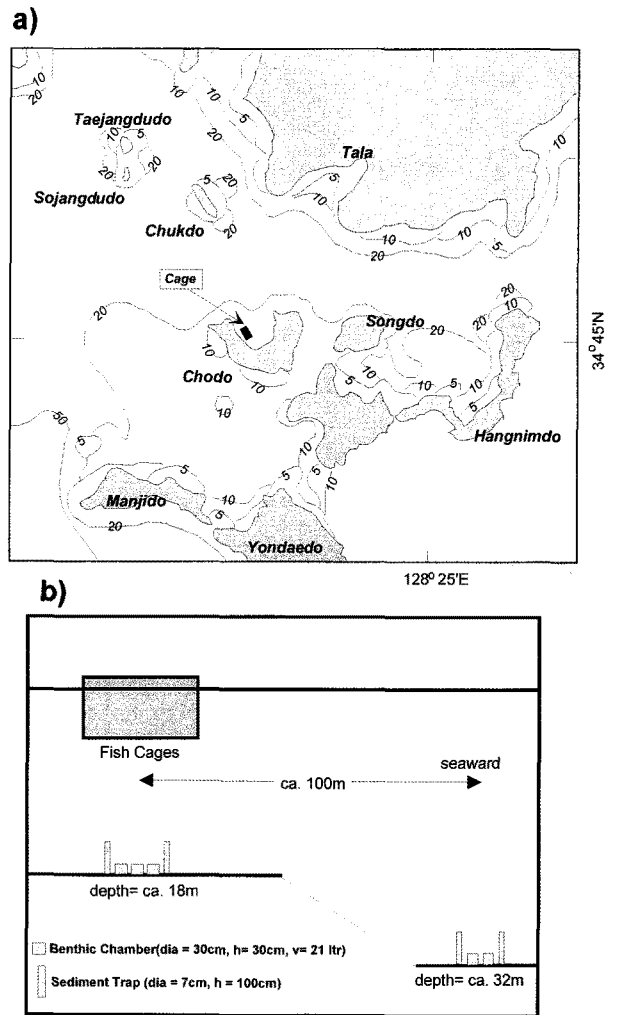


Fig. 1. a) Location of the fish cage farm at Chodo off Tong-Young, South Coast of Korea, and b) schematic diagram of in situ benthic chamber experiment at two sites in and around the fish cages (Cage Site & Control Site).

해수면을 점유하고 있었고, 가로와 세로 각각 10 m, 깊이 5 m인 가두리그물 10개와 냉동고와 창고, 관리인 숙소로 구성되어 있었다. 수심은 약 18~20 m이었다. 이곳에서 양식하는 어종은 넙치, 우럭, 볼락, 연어와 참돔류이며, 매년 10월에서 다음해 5월 사이에 집중적으로 사육된다. 이료(물고기의 먹이)는 주로 생사료와 배합사료를 1대1의 비로 섞은 moisture pellet을 사용하고 있었고, pellet의 크기는 직경이 약 3 cm가량이었다. 생사료는 냉동 고등어, 전갱이류를 분쇄한 덩어리이며, 배합사료의 성분비는 조단백질이 40%, 그 외에 조지방과 조섬유, 조회분이 각각 6, 8, 15%였다.

조사기간(1995년 6월 22일~26일) 매일 오전 11시에 측정된 가두리 주변의 수온은 18.1~19.3°C, 염분은 34.0~35.2‰, pH는 8.01~8.07 이었다. 현장작업시 해류가 매우 빠르게 흐르는 것을 알 수 있었고, 해수중에는 상당량의 부유물이 포함되어 시계가 50 cm를 넘지 않았다. 저층의 퇴적물은 혼합과각과 모래가 섞인 이토(mud)로서 다소 불량한 분급상태를 보였고, 이로써 공급한 생사료중의 생선뼈가 상당량 섞여 있어 표면이 거칠고 푸석 푸석한 느낌을 주는 회백색 퇴적물이었다.

퇴적물 표층에는 단 2종의 불가사리류, *Asterias amurensis*와 *Asterina pectinifera*만 접점이 포개져 patch형태로 존재하였고, 거미불가사리류가 가끔 눈에 떨 뿐 다른 저서동물은 보이지 않았다. 반면에 퇴적물 속에 서식하는 내서동물은 다모류에 속하는 오염지시종이며 기회종인 *Capitella capitata*가 우점하고 있었다. 그리고 저층에는 쓰고 버린 밧줄과 가라 앉은 가두리들,

식기류와 음료수병, 플라스틱, 비닐 등이 곳곳에 널려 있었다.

재료와 방법

본 연구를 위해 연구지역 가두리에서 2곳의 조사정점을 선정 하였다: 1) 가두리정점(Cage Site)은 가두리 바로 아래로서 수심이 약 18 m이며, 2) 대비정점(Control Site)은 가두리에서 수평으로 약 100 m 가량 떨어진 곳으로 수심이 약 32 m이다(Fig. 1b). 가두리정점에는 benthic chamber 3개(1번, 2번, 3번)와 sediment trap 2개를 설치하고, 대비정점에는 benthic chamber 2개(4번, 5번)와 sediment trap 2개를 설치하였다. 실험에 대한 구체적인 내용은 다음과 같다.

Benthic chamber 실험

현장관측에 사용한 benthic chamber는 PVC pipe를 잘라 만든 원통(직경 30 cm, 높이 40 cm)으로 뚜껑을 투명한 acryl로 만들어 안을 볼 수 있게 하였다. 뚜껑과 원통은 걸쇠(clip)로 걸어 열고 닫을 수 있게 하고, 사이에 o-ring을 넣어 새는 곳이 없게 하였다(Fig. 2). 원통을 먼저 퇴적물 속으로 10 cm를 박은 뒤, 하루 동안 부유물이 가라앉을 때까지 기다린 후, 뚜껑을 닫고 실험을 시작하였다(Fig. 3).

실험에 사용한 benthic chamber가 포획하는 해수는 약 21 liter이며, 700 cm² 가량의 퇴적물표면을 점유한다. 뚜껑에는 해류에 따라 chamber에 갇힌 해수도 유동할 수 있도록 수차와 프로펠러를 부착하였다. 2개의 고무호스를 연결하여 채수시에 이용하였는데, 한쪽 호스에 주사기를 연결하여 채수하면 다른 쪽 호

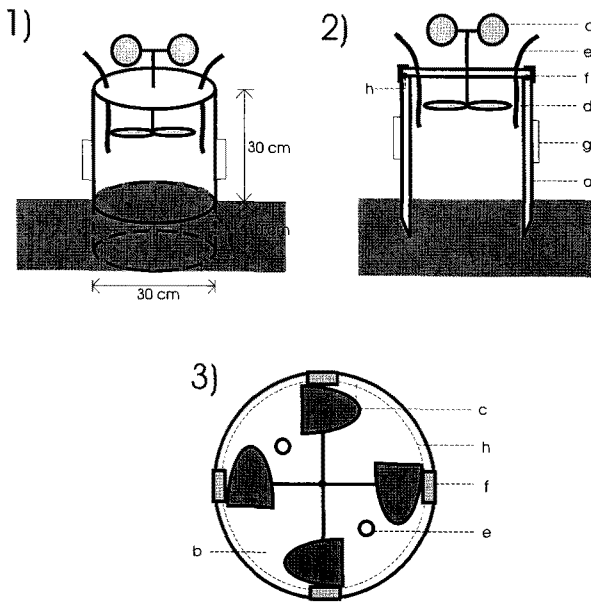


Fig. 2. The design for the benthic flux-chamber: 1) visualization of the chamber deployed on the bottom, 2) the cross-sectional view of the chamber, 3) the plane figure of the chamber cover. a. chamber body (PVC), b. chamber cover (acryl), c & d. vane and stirrer (stainless steel), e. tubings for sample suction (0.5 cm of inner diameter and 40 cm long), f. clips for fastening the chamber cover, g. knobs for grip, and h. o-ring. This chamber contains 21 liters of bottom water and covers 700 cm² of bottom sediment when adequately deployed with 10 cm digging depth (from Kang and Shim, 1997).

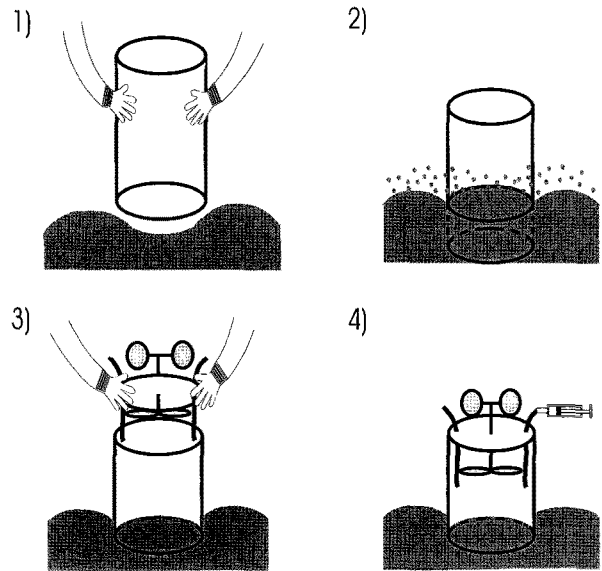


Fig. 3. The deployment of the benthic flux-chamber: 1) the chamber body (without chamber cover) should be deployed at first, 2) & 3) the pre-deployed chamber is covered carefully and tightened when the disturbed bottom layer is fully returned to its natural condition (about 1~2 days after the initial deployment), 4) experiment starts. Samples should be taken with syringes in time, and stirring of chamber water is recommended before sampling (from Kang and Shim, 1997).

스로 주변 해수가 chamber 안으로 자연히 흘러들 수 있게 하였다. 시료는 잠수하여 chamber water와 주변 해수를 각각 500 ml 씩 채수하였다.

가두리정점과 대비정점에 설치한 5개의 benthic chamber를 거의 같은 시간에 뚜껑을 덮고 실험을 시작하였고, 약 50시간동안 현장에 계류하였다(*in situ* incubation). 처음에는 5시간 간격으로, 나중에는 24시간 간격으로 채수하였다. 모든 chamber에서 각각 5회씩 시료를 채수하였고, chamber 3번의 경우에는 4회 채수되었다. 해수시료는 현장에서 pH와 온도를 측정하였고, 용존산소는 Winkler-azide변법으로 적정하여 측정하였다(Parsons *et al.*, 1984). 암모니아는 현장에서 고정된 시료를 실험실로 옮겨 흡광도를 측정하였다(Parsons *et al.*, 1984). 그외 영양염류는 시료의 일부를 여과하여 냉동한 뒤, 실험실에서 자동분석기(LaChart Automated Ion Analyzer)로 분석하였다.

Sediment trap을 이용한 침강입자 포집

현장관측에 사용한 sediment trap은 빠른 해류에 의해 흔들리거나 기울지 않도록, 퇴적물에 박는 고정식 sediment trap을 제작하여 사용하였다(Fig. 4). 본 실험에 사용된 sediment trap은 직경 7 cm, 길이 100 cm의 PVC pipe와 삼각대, sample bottle로 구성되어 있다. PVC pipe의 입구(trap mouth)는 바닥에서 1 m 가량 떨어져 있으며, sample bottle은 탈착식으로 제작되었다. 먼저 PVC pipe와 삼각대를 저층에 고정된 뒤, 부유물이 가라앉기를 기다렸다가(약 1일), sample bottle을 부착하였다. 가두리정점과 대비정점에 각각 2개씩의 sediment trap을 chamber 옆에 설치하고, 70시간 가량 계류한 뒤, 잠수하여 sample bottle만 PVC

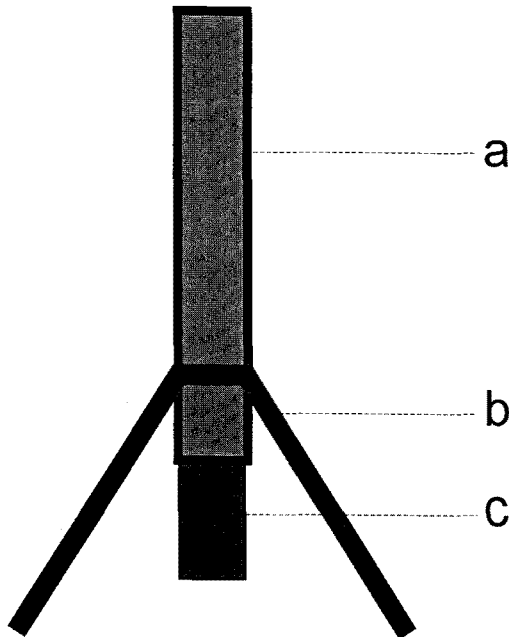


Fig. 4. The design for the modified sediment trap (plane figure): a. trap body (PVC), b. tripod for the stable standing on the bottom (stainless steel), c. sample bottle (PE). This modified trap can be fixed tightly into the sediment, and the sample bottle can be recovered in time from the trap body.

pipe로부터 분리하여 회수하였다. 시료는 냉동보관하여 실험실로 옮긴 뒤, GF/C filter로 여과하여 건중량을 측정하였다. 포집된 시료의 일부를 Carlo Erba CHN Analyzer로 탄소와 질소성분을 분석하였으며(Verardo *et al.*, 1990; van Iperen and Helder, 1985), 인성분은 Aspila *et al.*(1976)에 따라 분석하였다.

Sediment core 시료 분석

Sediment core는 직경 8 cm, 길이 30 cm의 PVC pipe를 사용하여 채취하였으며, 가두리정점에서 3개, 대비정점에서 3개, 그리고 거리에 따른 양식장의 영향을 가능하기 위해 두 지점의 중간지점에서도 3개의 sediment core 시료를 확보하였다. 코어는 절개하여 퇴적물의 함수율을 측정하고 Carlo Erba CHN Analyzer로 탄소와 질소성분을 분석하였고(Verardo *et al.*, 1990; van Iperen and Helder, 1985), 인성분은 Aspila *et al.*(1976)에 따라 분석하였다. 또한 퇴적물을 원심분리하여 공극수를 확보하였다.

결과와 토의

Chamber water의 성분변화와 chemical fluxes

pH: pH는 초기값 8.03~8.09에서 꾸준히 감소하여, 약 50시간 뒤 실험이 끝날 때 쯤에는 가두리정점에서는 7.23~7.4 사이값을, 대비정점에서는 약 7.80의 값을 보였다(Fig. 5). 가두리정점의 경우 유기물분해가 매우 활발하여 그 결과 chamber water가 산성화됨을 알 수 있다.

용존산소: 용존산소의 경우, 가두리정점에서는 초기에 20~23 mg O₂ liter⁻¹로 과포화되어 있던 chamber water의 용존산소가(Fig. 6) 하루가 지난 뒤 완전히 소모되어, 평균 -230 mmol m⁻²d⁻¹의 flux를 보였다(Table 1). 대비정점에서는 가두리정점보다는 다소 느린 용존산소 감소를 보여, 평균 -75 mmol m⁻²d⁻¹의 flux를 관찰할 수 있었다. 가두리정점의 용존산소 flux가 대비정점에 비해 세배나 많음을 알 수 있으며, 이것은 가두리정점에서 유기물분해와 생물호흡이 활발함을 알 수 있다.

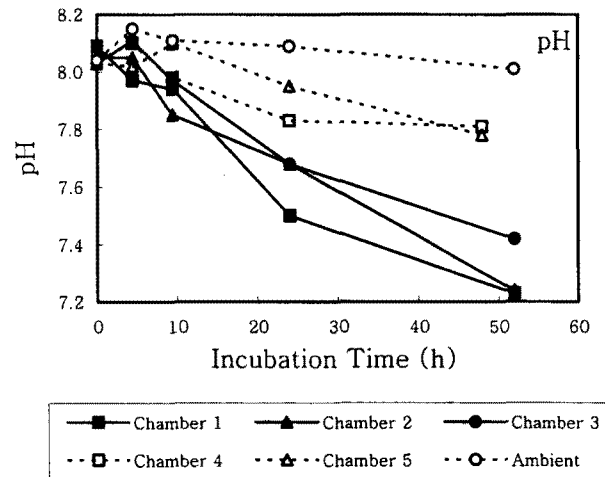


Fig. 5. Evolutions of pH of chamber waters during *in situ* incubation experiment on the farm sediments. Chambers 1, 2, and 3 were deployed at the Cage Site, and chambers 4 and 5 were deployed at the Control Site.

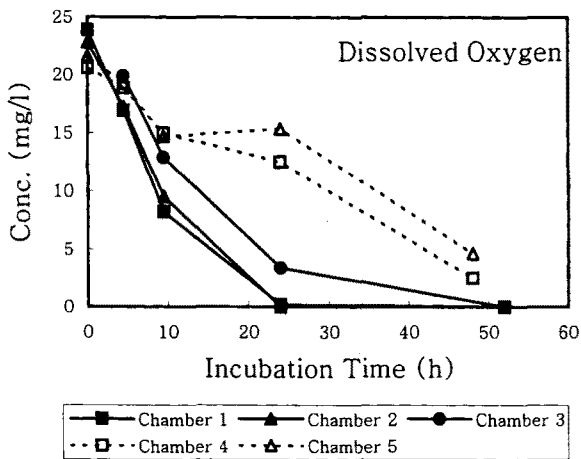


Fig. 6. Depletions of dissolved oxygen in the chamber waters during *in situ* incubation experiment on the farm sediments. Chambers 1, 2, and 3 were depolyed on the Cage Site, and chambers 4 and 5 were deployed at the Control Site.

Table 1. Benthic respiration rates and chemical fluxes out of the sediments in a fish cage farm off Tong-Young, the South Coast of Korea in June, 1995. Chambers 1, 2, and 3 were deployed on the Cage Site, and chambers 4 and 5 were deployed on the Control Site. (unit: mmol m⁻²d⁻¹)

Chamber	#1	#2	#3	#4	#5
Dissolved oxygen	-221.0	-304.0	-174.0	-81.0	-70.0
Ammonium	14.6	10.9	16.2	6.0	3.0
Phosphate	2.2	2.5	1.4	0.5	0.2
Silicate	1.0	4.5	1.9	18.4	8.4

Table 2. Benthic oxygen consumption rates of various coastal sediments.

Location	Benthic respiration (mmol O ₂ m ⁻² d ⁻¹)	Reference
(Summer)		
Signy Is.	80~90	Nedwell & Walker (1995)
Long Is. Sound	81~137	Mackin & Swider (1989)
Marian Cove, Antarctica	13~27	Kang and Shim (unpublished)
Deukryang Bay, Korea	5~1	Shim (1994)
Chodo (Control Site), Korea	80	This study
(Annually)		
Signy Is.	12.3	Nedwell & Walker (1995)
North Sea sediment	2.8~4.6	Nedwell & Walker (1995)
(Fish cage)		
Bohuslan, Sweden	90~180	Holby & Hall (1991)
Chodo (Cage Site), Korea	220	This study

본 연구지역 가두리의 해수-퇴적물 경계면의 용존산소 소모율은 다른 해역에 비해 상당히 높다(Table 2). 일반적으로 생물체의 호흡과 유기물분해는 온도의 영향을 많이 받는다. 따라서 같은 해역에서도 여름에는 가장 높은 용존산소 소모율을 보이는

것이 일반적이다. 통영지역 가두리양식장의 용존산소 소모율은, Signy Is., Long Is.와 같은 연안해역 보다 약 2배 가량 높다 (Nedwell and Walker, 1995; Mackin and Swider, 1989). 남극의 Marian Cove에 비해서는 약 10배나 높으며(Kang and Shim, unpublished), 키조개 양식이 성행하는 남해의 득량만에 비해서도 아주 높은 값을 알 수 있다(심, 1994). 반면, Holby and Hall(1991)에 의해 실시된 스웨덴의 한 양식장의 산소소모율과 유사한 값을 보였다. 가두리에서 100 m 가량 떨어진 대비정점의 용존산소 소모율도, 남극이나 남해안의 득량만에 비하면 높은 값이다. 따라서 가두리에서 유출되는 유기물입자들이 비록 가두리 아래에 집중되어 퇴적되기는 하지만, 연안 저층에 지속적으로 유입되는 과량의 유기물입자는 가두리 주변의 광범위한 저서환경과 표층

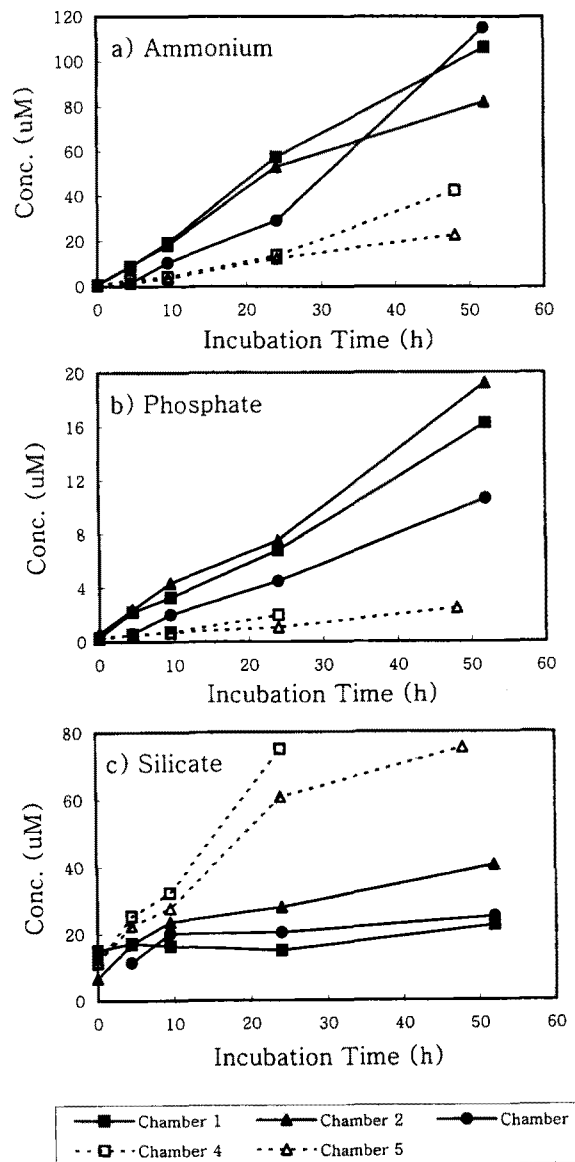


Fig. 7. Concentration changes of nutrients in the chamber waters during *in situ* incubation experiment on the farm sediments: a) ammonium, b) phosphate, c) silicate. Chambers 1, 2, and 3 were deployed at the Cage Site, and chambers 4 and 5 were deployed at the Control Site.

의 일차생산에 걸쳐 영향을 미칠 수 있을 것으로 보인다.

영양염류: 암모니아의 경우 모든 chamber에서 빠르게 농도가 증가하여, 약 50시간 뒤에는, 가두리정점에서는 100 μM 이상의 높은 값을, 대비정점에서도 23~43 μM 의 농도를 기록하였다 (Fig. 7a). 용출량으로 비교해보면, 가두리의 경우 13.9 $\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 대비정점의 경우 4.5 $\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 의 용출량을 보여 (Table 1), 가두리정점에서 약 3배 높은 용출량을 보였다. 인산염의 경우에도 가두리정점에서 최종적으로 약 10 μM 의 높은 값을 보였으며, 대비정점에서는 2.5 μM 의 값을 기록하였다 (Fig. 7b). 용출량은 가두리와 대비정점에서 각각 2 $\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 0.4 $\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 의 값을 보였다 (Table 1). 대비정점에 비해 가두리정점에 설치한 chamber에서 암모니아와 인산염의 용출량이 모두 높게 나타났다. 이것은 가두리정점에서 산소소모율이 높은 것과 아주 잘 일치하는 결과이다. 가두리정점에 설치한 chamber에서 산소소모가 많고, 암모니아와 인산염의 용출량이 많은 것은, 그곳의 표층퇴적물에 존재하는 유기물의 양이 많으며, 또한 활발히 분해 (regeneration)됨을 시사한다.

규산염의 경우 (Fig. 7c), chamber 실험이 끝날 때 쯤 가두리정점에서는 약 10~30 μM 을 나타내었고, 대비정점에서는 약 60 μM 까지 증가하였다. 그리고 용출량은 가두리정점에서 평균 2.5 $\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 이었으며, 대비정점에서는 이보다 2~6배나 많이 용출되는 것이 관측되었다 (Table 1). 암모니아와 인산염의 경우와 달리, 규산염의 경우는 가두리정점보다 대비정점에서 오히려 더 높은 용출량을 관찰하였다. 이것은 규소성분의 분해특성, 가두리와 대비정점의 퇴적입자성분, 그리고 두 지역의 퇴적물에 의한 결과로 고려된다. 즉, 가두리 바로 아래는 매일 양식어류에 공급되는 막대한 양의 이료로 인해, 규소성분이 미처 분해되기 전에 퇴적층에 매몰된다. 따라서 가두리에 비해 상대적으로 퇴적물이 낮은 대비정점에서는 규소성분입자가 퇴적표층에 오랫동안 노출되어, 더 많이 분해될 수 있음을 시사한다. 그리고

가두리에서 유출되는 생사료나 물고기의 배설물은 주로 탄소와 질소성분을 함유하고 있음을 유추할 수 있다.

Sediment trap에 포집된 침강입자의 성분함량과 포집율

Sediment trap에 포집된 침강입자의 포집율은 가두리정점에서는 건중량으로 약 211 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 이었고, 가두리에서 100 m 가량 떨어진 대비정점에서는 이보다 적은 약 151 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 이었다 (Table 3). 포집된 입자 중 총탄소성분은 가두리정점과 대비정점에서 각각 3.8%와 3.2%였으며, 유기탄소는 각각 3.0%와 2.6%의 값을 보였다. 유입량으로 살펴보면, 총탄소가 가두리와 대비정점 각각 8.0 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 4.8 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 유기탄소는 각각 6.3 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 3.9 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로서 대비정점에 비해 가두리정점에 약 2배 높은 유입량을 관찰할 수 있었다.

한편 질소의 경우도, 가두리정점에서 1.1 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 대비정점에서 약 0.7 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 의 유입량을 보였으며, 총인인 경우는 가두리정점에서 1.0 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 대비정점에서 0.1 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로서 가두리정점에서 약 10배 높은 유입량을 보였다. 유기인의 경우도 각각 0.2 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 와, 0.05 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 를 차지하여 가두리정점이 대비정점에

Table 3. Partical fluxes and the composition of the particles measured in a fish cage farm off Tong-Young, the south coast of Korea in June, 1995.

	Cage Site	Control Site
Particle fluxes ($\text{g dry wt. m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	220.0	151.0
Compositions of particles (%)		
Total Carbon	3.8	3.2
Organic Carbon	3.0	2.6
Total Nitrogen	0.54	0.44
Total Phosphorus	0.49	0.08
Organic Phosphorus	0.11	0.03

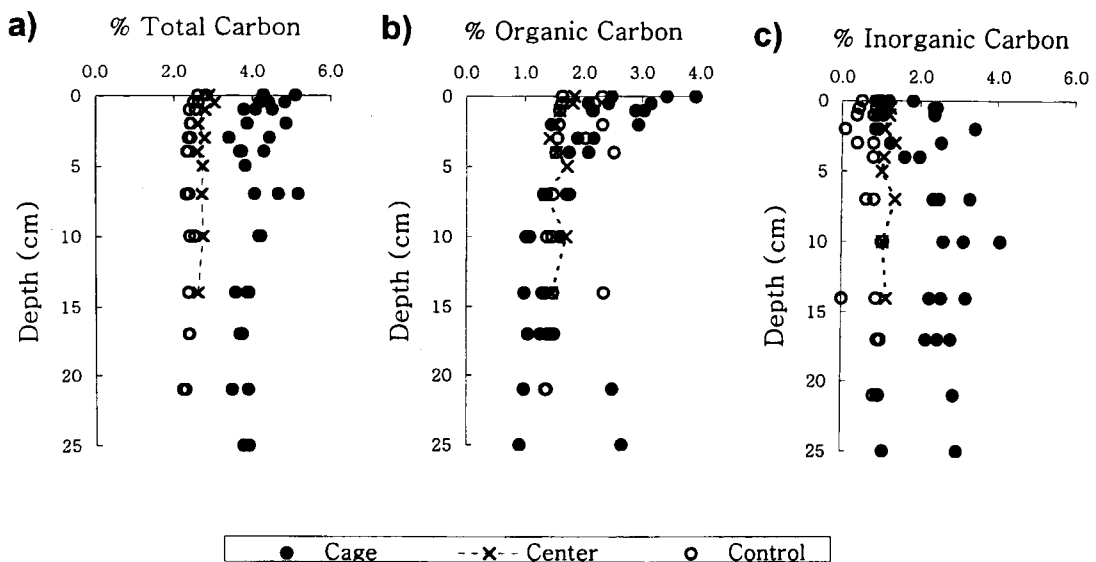


Fig. 8. Carbon contents of the farm sediments taken from the Cage Site (Cage) and from the Control Site (Control); a) total carbon, b) organic carbon, and c) inorganic carbon. Carbon contents of the sediments taken from the mid point between the two sites (Center) are also plotted and connected as reference for contrast (dashed line).

비해 약 5배 높은 값을 보였다.

이상에서 살펴보았듯이 가두리정점이 대비정점에 비해 저층으로의 총입자유입량이 약 1.4배 높으며, 또한 성분에 따라 2~10배 높은 유입량을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과는 가두리에서 기인한 물질이 입자의 유입량뿐만 아니라 그 성분에도 상당히 영향을 끼침을 알 수 있었다. 즉, 가두리에서 사용되는 이료, 물고기의 배설물, 등에는 유기탄소, 질소, 유기인 등의 유기물이 상당량 포함되어 있음을 알 수 있다.

Core 퇴적물의 깊이에 따른 성분함량과 분포

탄소함량: 가두리정점의 경우, 퇴적물 표층에서 총탄소량이 약 4~5%의 아주 높은 값을 보이다가, 깊이에 따라 감소하여 퇴적물 약 20 cm 깊이에서는 3.5%의 값을 보였다(Fig. 8a). 대비정점과 중간지점(가두리와 대비정점의 중간: 가두리에서 약 50 m 떨어진 지점)에서는 표층에서 2.5~3%의 낮은 값을 보였으며, 깊이에 따른 감소가 크지 않았다. 유기탄소함량은 가두리정점의 표층에서만(약 3~3.5%) 두 지점(약 2.5~1.5%)에 비해 높은 값을 보였으며, 5 cm 이심에서는 대비정점과 중간지점의 값과 비슷한 약 1.5%의 함량값을 보였다(Fig. 8b). 반면에 무기탄소함량은 퇴적물 전 깊이에 걸쳐 가두리정점이 대비정점과 중간지점보다 2~3배 높은 값을 보였다(Fig. 8c). 가두리정점의 퇴적물이 대비정점과 중간지점의 퇴적물에 비해 무기탄소의 함량이 높은 것은, 퇴적물에 포함되어 있는 이매패(특히 담치류)의 폐각과 양식장 이료의 생선뼈에서 유래한 탄산칼슘의 영향으로 보인다. 이와 같이 다른 유기성분에 비해 무기탄소의 함량이 퇴적물 깊은 곳에 까지 높게 나타난 원인으로 가두리 아래의 높은 퇴적율과 가두리 생성이전에 탄산칼슘의 막대한 공급 등을 유추할 수 있지만, 명확한 원인규명을 위해서는 좀 더 많은 자료와 연구가 필요하다.

질소와 인함량: 질소함량의 경우, 표층 5 cm까지는 가두리정점(약 0.4~0.6%)이 대비정점(약 0.2%)에 비해 높은 값을 보였지만, 그이하의 퇴적층에서는 다른 두 지점과 유사한 함량(0.1~0.

2%)을 보였다(Fig. 9a). 인의 경우, 가두리정점에서는 총인의 함량이 퇴적물 깊이 20 cm까지 서서히 감소하는 반면, 유기인은 퇴적물 깊이 5 cm까지 급격한 감소를 보였으며, 대비정점과 중간지점에서는 총인과 유기인의 깊이에 따른 변화가 적었다(Fig. 9b,c).

이와 같이 퇴적물 깊이 약 5 cm 이내에서 질소와 인의 함량이 가두리정점에서 월등히 높은 것은 가두리에서 유래된 유기물입자가 가두리바로 아래의 퇴적층에 많이 퇴적되기 때문임을 알 수 있었고, 또한 탄소에 비해, 질소와 인은 선택적으로 빨리 분해됨으로 인해, 거리에 따라 그 농도가 급속히 감소함을 알 수 있었다.

탄소, 질소 그리고 인의 mass balances

퇴적물 표층으로 유입되는 입자상유기물의 일부는 재생산과정(regeneration)을 거쳐 다시 해수-퇴적물 경계면을 통해 해수로 유출되지만, 미처 분해되지 못한 또는 난분해성 물질들은 퇴적층 깊숙이 매몰된다. 본 연구에서는 가두리 주변 해수-퇴적물 경계면에서의 물질흐름이 정상상태(steady state)라는 가정하에 퇴적물 표층으로 유입되는 물질들의 mass balances를 다음과 같은 식으로 구하였다(Klump and Martens, 1987).

$$J_{in} = J_{out} + J_{bur}$$

J_{in} : 표층 퇴적물로 유입되는 물질의 양

J_{out} : 표층 퇴적물에서 유출되는 물질의 양

J_{bur} : 난 분해성 잔류물의 양

이때, 퇴적표층으로 유입되는 물질의 양, J_{in} 은 sediment trap에 포집된 퇴적물의 양과 성분비를 이용하였으며, 해수-퇴적물 경계면을 통해 유출되는 물질의 양, J_{out} 은 질소와 인의 경우는 chamber실험에서 구한 각 성분의 flux를 이용하고, 탄소는 산소소모와 호흡지수로 계산하였다(e.g. Rowe *et al.*, 1994). 그 결과는 Table 4에 나타내었다.

가두리 정점(Cage Site)의 경우, 공급되는 유기탄소입자의 양

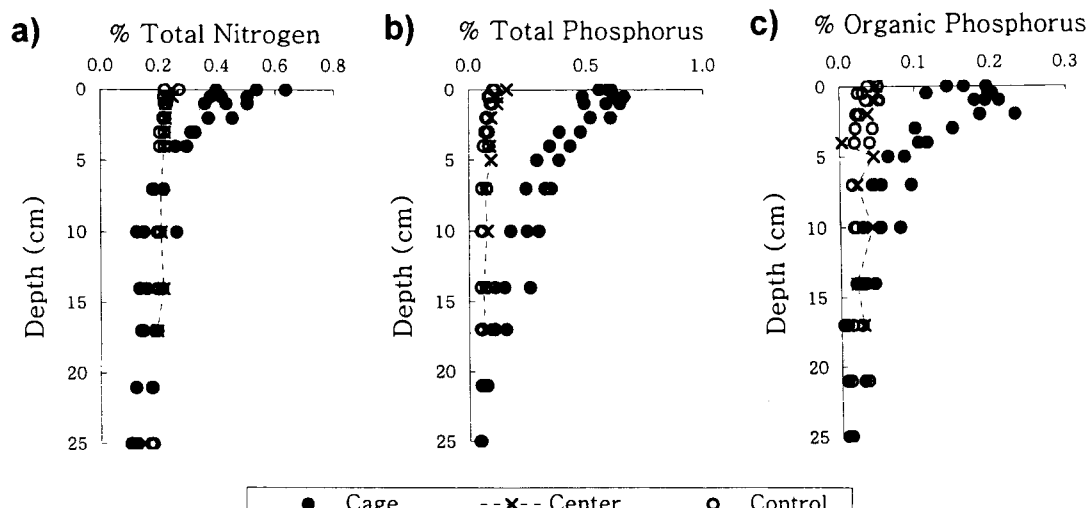


Fig. 9. Nitrogen and phosphorus contents of the farm sediments taken from the Cage Site (Cage) and from the Control Site (Control); a) total nitrogen, b) total phosphorus, c) organic phosphorus. Nitrogen and phosphorus contents of the sediments taken from the mid point between the two sites (Center) are also plotted and connected as reference for contrast (dashed line).

Table 4. Mass balances of carbon, nitrogen, and phosphorus in the Sediment-water interfaces of a fish cage farm off Tong-Young in June 1995. (unit: mmol m⁻²d⁻¹)

	J _{in} (influx)	J _{out} (efflux)	J _{bur} (burial flux)
Cage Site			
organic carbon	527.5	198.1	329.4
sedimentary nitrogen	81.0	13.9	67.1
organic phosphorus	7.5	2.0	5.5
Control Site			
organic carbon	327.2	64.2	263.0
sedimentary nitrogen	47.5	4.7	42.8
organic phosphorus	1.5	0.4	1.1

은 527.5 mmol m⁻²d⁻¹였으며, 그 중에서 198.1 mmol m⁻²d⁻¹이 분해되고, 나머지 329.4 mmol m⁻²d⁻¹이 퇴적되어 매몰되는 것으로 계산되었다. 이값은 공급되는 유기탄소입자의 각각 38%와 62%에 해당하는 값이다. 질소는 유입량(81 mmol m⁻²d⁻¹)의 17%가 분해되고, 나머지 83%에 해당하는 67.1 mmol m⁻²d⁻¹이 퇴적되어 매몰되는 것으로 계산되었다. 인은 유입되는 양의 약 28%(2.0 mmol m⁻²d⁻¹)가 분해되었다. 대비정점(Control Site)에서는, 탄소의 경우 유입량의 약 20%인 64.2 mmol m⁻²d⁻¹가 분해되었고, 질소의 경우는 유입량의 10%에 해당하는 4.7 mmol m⁻²d⁻¹, 인은 유입량의 약 27%인 0.4 mmol m⁻²d⁻¹가 각각 해수-퇴적물경계면에서 분해되는 것으로 나타났다.

스웨덴의 한 양식장에서 관측한 결과를 살펴보면(Hall *et al.*, 1990; Hall *et al.*, 1992; Holby and Hall, 1991), 탄소의 경우에는 양식장 저층으로 총 4680 kg C이 퇴적되어 그중 20%에 해당하는 약 945 kg C이 분해되어 유출된다고 하였으며, 질소의 경우는 퇴적되기 이전에 이미 용존형태로 유기물들이 유출되기 때문에 퇴적되는 양이 적어서 약 11%만이 퇴적경계면을 통해 유출된다고 하였으며, 인의 경우에는 우리의 경우보다 다소 낮은 유입량의 10% 이하만이 분해되어 유출된다고 하였다. 일반적으로 해수-퇴적물 경계면에서 물질의 flux와 mass balances는, 연안환경과 현장관측 시기, 퇴적물의 특성 등에 의해 많은 차이를 보인다. 그러나 스웨덴 양식장에서 나타난 유기물의 분해율은 본 연구결과와 상당히 유사한 값을 보인다. 이와 같은 결과는 Aure and Stigebrandt(1990)의 연구에서도 살펴볼 수 있다. 이들은 노르웨이 근해 가두리양식장에서 실시된 상당히 많은 관측 결과로, 양식장퇴적물(farm sediment)에서의 유기물분해량은 10% 수준에서 일정하게 유지되는 경향을 보인다고 하였다. 따라서 본 연구지역과 스웨덴의 양식장의 경우에도 해수-퇴적물 경계면으로 유입되는 유기물의 양이 다름에도 불구하고, 분해되어 유출되는 비율은 상당히 유사함을 알 수 있다. 이와 같이 만약 양식장퇴적물로 유입되는 유기물의 약 10%만이 매년 분해된다면, 모든 양식시설을 철수한 뒤에도 수십년이 지나야 퇴적된 유기물이 모두 분해되고, 본래의 상태로 돌아갈 수 있음을 시사한다. 이상의 결과에서 양식장에서 유래하는 고농도의 유기입자는 가두리아래에 집중적으로 퇴적되며, 또한 연안환경에 오랜 시간에 걸쳐 영향을 끼침을 알 수 있다.

결론

남해안 통영지역 가두리양식장에서 관측한 입자상유기물의 확산강도와 해수-퇴적물 경계면에서의 chemical fluxes 관측결과를, 가두리에서 투기되는 대부분의 유기물입자가 가두리 아래 해저면에 집중적으로 퇴적되고 있음을 보여주며, 가두리 부근 해저면으로 확산되는 유기물입자의 양은 가두리에서 멀어질수록 급속히 감소함을 시사한다. 그러나, 가두리에서 유출되는 과량의 유기물입자는 저층환경의 물리, 화학, 생물상을 변화시키며, 주변 연안환경에 광범위하게 또 지속적으로 영향을 미칠 가능성이 크기 때문에(Holmer, 1991), 양식방법의 개선과 양식 환경에 대한 과학적인 환경관리가 필요하다. 따라서, 양식장의 환경지표와 오염지시종에 대한 탐색이 필요하며, 꾸준한 환경감시(environmental monitoring)가 필요하다. 이를 위해 양식장 해수-퇴적물 경계면의 유기물 flux에 대한 정량자료를 양식장의 환경지표(environmental indicator)로 이용하고, 퇴적층에 서식하는 저서생물을 양식장의 오염지시종(indicator species)으로 이용하려는 시도가 필요하다(Tsutsumi *et al.*, 1990; Chareonpanich *et al.*, 1994).

사사

본 연구는 한국해양연구소 해양목장화사업의 연구비지원으로 이루어졌습니다. 가두리 현장에 실험공간과 작업공간을 마련해 주신 박용주씨에게 감사드립니다. 잠수작업을 도와준 서울대학교 수중탐사대의 허윤, 변종화 두분께 감사드립니다. 논문을 심사해 주신 두분의 심사위원님께 감사드립니다. 두분이 지적하신 문제들을 검토하면서 본 논문의 의미와 benthic flux-chamber의 효용을 다시 정리하는 계기가 되었습니다.

참고문헌

심정희, 1994. 득량만 표층퇴적물에서 유기물 분해와 인산염의 생지화학적 순환. 부산대학교 석사학위 논문, 70 pp.
 강영진, 1995. 남해안 수산개발 방안. 새어민, 33: 84-89.
 Aspila, K.I., H. Agemian and A.S.Y. Chau, 1976. A semi-automated method for determination of inorganic, organic and total phosphate in sediments. *Analyst*, 101: 187-197.
 Aure, J. and A. Stigebrandt, 1990. Quantitative estimates of the eutrophication effects of fish farming on fjords. *Aquaculture*, 90(2): 135-156.
 Avnimelech, Y., M. Lacher, A. Raveh and O. Zur, 1981. A method for the evaluation of conditions in a fish pond sediment. *Aquaculture*, 23: 361-365.
 Blackburn, T.H., B. Aa. Lund and M.D. Krom, 1988. C- and N-mineralization in the sediments of earthen marine fishponds. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 44: 221-227.
 Chareonpanich, C., H. Tsutsumi and S. Montani, 1994. Efficiency of the decomposition of organic matter, loaded on the sediment, as a result of the biological activity of *Capitella* sp. I. *Marine Pollution Bulletin*, 28(5): 314-318.

- Hall, Per O.J., L.G. Anderson, O. Holby, S. Kollberg and M.-O. Samuelsson, 1990. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. I. Carbon. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **61**: 61-73.
- Hall, Per O.J., O. Holby, S. Kollberg and M.-O. Samuelsson, 1992. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. IV. Nitrogen. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **89**: 81-91.
- Holby, O. and Per O.J. Hall, 1991. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. II. Phosphorus. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **70**: 263-272.
- Holmer, M., 1991. Sediment metabolism and sulphate reduction in marine sediments influenced by organic waste from a marine fish farm. In: *Aquaculture and the Environment*, edited by N. Depauw and J. Joyce.
- Honjo, T., 1994. The biology and prediction of representative red tides associated with fish kills in Japan. *Rev. Fish. Sci.*, **2**(3): 225-253.
- Kang, Y.C. and J.H. Shim, 1997. A device for the *in situ* measurement of benthic chemical fluxes in a shallow coastal environment: a benthic flux chamber for diver operation. *Ocean Research*, **19**(1): 63-70.
- Kaspar, H.F., G.H. Hall and A. Jan Holland, 1988. Effects of sea cage salmon farming on sediment nitrification and dissimilatory nitrate reductions. *Aquaculture*, **70**: 333-344.
- 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.
- Krom, M.D., S. Ellner, J. van Rijn and A. Neori, 1995. Nitrogen and phosphorus cycling and transformations in a prototype 'non-polluting' integrated mariculture system, Eilat, Israel. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **118**: 25-36.
- Mackin, J.E. and K.T. Swider, 1989. Organic matter decomposition pathway and oxygen consumption in coastal marine sediments. *J. Mar. Res.*, **47**: 681-716.
- Nedwell, D.B. and T.R. Walker, 1995. Sediment-water fluxes of nutrients in an antarctic coastal environment: influence of bioturbation. *Polar Biol.*, **15**: 57-64.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press.
- Rowe, G.T., G.S. Boland, W.C. Phoel, R.F. Anderson and P.E. Biscaye, 1994. Deep-sea floor respiration as an indication of lateral input of biogenic detritus from continental margins. *Deep-Sea Research II*, **41**(2/3): 657-668.
- Shpigel, M., A. Neori, Van Iperen, J. and H. Gordin, 1993. A proposed model for "environmentally Clean" land-based culture of fish, bivalves and seaweeds. *Aquaculture*, **117**: 115-128.
- Tsutsumi, H., S. Fukunaga, N. Fujita and M. Sumida, 1990. Relationship between growth of *Capitella* sp. and organic enrichment of the sediment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **63**(2-3): 157-162.
- van Iperen, J. and W. Helder, 1985. A method for the determination of organic carbon in calcareous marine sediments. *Marine Geology*, **64**: 179-187.
- Verardo, D.J., P.N. Froelich and A. McIntyre, 1990. Determination of organic carbon and nitrogen in marine sediments using the Carlo Erba NA-1500 Analyzer. *Deep-Sea Research*, **37**(1): 157-165.