Article

북동 적도 태평양에서 수층 기초 생산력과 심해저 퇴적물내
미생물 생산력과의 상관성

김경홍¹ · 손주원¹ · 손승규¹ · 지상범¹ · 현정호^{2*}

¹한국해양연구원 심해·해저자원연구부
(425-600) 경기도 안산시 상록구 해안로 787
²한양대학교 과학기술대학 해양환경과학과
(425-791) 경기도 안산시 사3동 1271

Potential Meso-scale Coupling of Benthic-Pelagic Production in the
Northeast Equatorial Pacific

Kyeong-Hong Kim¹, Ju-Won Son¹, Seung-Kyu Son¹, Sang-Bum Chi¹, and Jung-Ho Hyun^{2*}

¹Deep-sea & Marine Georesources Research Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Department of Environmental Marine Sciences, College of Science and Technology
Hanyang University, Ansan 425-791, Korea

Abstract : We determined potential meso-scale benthic-pelagic ecosystem coupling in the north equatorial Pacific by comparing surface chl-*a* concentration with sediment bacterial abundance and adenosine triphosphate (ATP) concentration (indication of active biomass). Water and sediment samples were latitudinally collected between 5 and 11°N along 131.5°W. Physical water properties of this area are characterized with three major currents: North Equatorial Current (NEC), North Equatorial Count Current (NECC), and South Equatorial Current (SEC). The divergence and convergence of the surface water occur at the boundaries where these currents anti-flow. This low latitude area (5~7°N) appears to show high pelagic productivity (mean phytoplankton biomass=1266.0 mgC m⁻²) due to the supplement of high nutrients from nutrient-enriched deep-water via vertical mixing. But the high latitude area (9~11°N) with the strong stratification exhibits low surface productivity (mean phytoplankton biomass=603.1 mgC m⁻²). Bacterial cell number (BCN) and ATP appeared to be the highest at the superficial layer and reduced with depth of sediment. Latitudinally, sediment BCN from low latitude (5~7°N) was 9.8×10^8 cells cm⁻², which appeared to be 3-times higher than that from high latitude (9~11°N; 2.9×10^8 cells cm⁻²). Furthermore, sedimentary ATP at the low latitude (56.2 ng cm⁻²) appeared to be much higher than that of the high latitude (3.3 ng cm⁻²). According to regression analysis of these data, more than 85% of the spatial variation of benthic microbial biomass was significantly explained by the phytoplankton biomass in surface water. Therefore, the results of this study suggest that benthic productivity in this area is strongly coupled with pelagic productivity.

Key words : bacterial cell number, ATP, water column structure, microbial biomass, Pacific Ocean

*Corresponding author. E-mail : hyunjh@hanyang.ac.kr

1. 서론

해양의 퇴적물 내에는 박테리아, 미세조류 및 원생동물과 같이 통상 미생물로 분류되는 다양한 생물들이 서식하고 있다. 저서생태계에서 박테리아는 퇴적물을 섭취하는 상위그룹 생물군(중형저서생물)의 먹이원으로서 중요한 역할을 담당한다(Montagna 1984; Rijken 1979). 또한 유기물의 분해, 영양염의 순환 등 생지화학적 원소순환에 핵심적인 역할을 담당하고 있으며 전체 심해저 저서생태계 내 탄소 생체량의 약 85% 정도를 차지하는 것으로 알려져 있다(Tietjen 1992). 따라서 저서생태계 내 에너지흐름, 물질순환을 이해하기 위해서는 미생물 생체량 측정은 필수적인 연구분야이다(현 등 2002).

대양저 해령과 같이 열수작용이 활발하여 화학적 생산에 의한 먹이망이 형성된 곳을 제외하면(Karl 1995) 심해저서생태계로 공급되는 먹이원은 대부분 표층수내 일차생산에서 기원한다. 직접적으로는 식물플랑크톤의 증식과정으로 간접적으로는 표층생태계의 먹이망을 통해 저층으로 유입된다(Smith et al. 2001). 시계열 퇴적물 포집장치를 이용한 연구들은 입자물질의 유입과 표층의 일차생산 사이에 유의한 상관관계가 있음을 제시하였고(Suess 1980; Berger et al. 1989; Smith et al. 1997), 상대적으로 크고 빠르게 침강하는 입자(동물플랑크톤의 분립, 배설물 혼합물, 그리고 큰 외양성 생물의 탄산질과 규질 외각 등)가 퇴적층으로 유입되는 물질유입의 대부분을 차지하는 것으로 밝혀지고 있다(Honjo 1980; Smith et al. 2001). 대양의 표층수에서 생성된 일차생산의 1% 정도가 퇴적층에 도달하고(Beger et al. 1989) 입자의 침강속도가 70~180 m day⁻¹로 나타나 5,000 m의 수심의 경우 퇴적시간은 대략 4~10주 정도 소요 될 것으로 판단된다(Honjo et al. 1995; Berelson 2002). 이렇게 수층으로부터 유입되는 유기물은 저서 생물 분포에 영향을 미치며(Gooday et al. 1996; Vanucci et al. 2001) 퇴적물내 미생물의 생체량을 조절하는 주요 요인으로 인식된다(Turley and Dixon 2002).

북동적도 태평양의 표층해류 순환체계는 북적도해류(North Equatorial Current, NEC)와 남적도해류(South Equatorial Current, SEC)가 서쪽으로 흐르고, 이들 해류사이에 북적도반류(North Equatorial Count Current, NECC)가 동쪽으로 흐르고 있다(Kessler 2006). 이들 해류의 영향으로 표층수의 발산(Divergence)과 수렴(Convergence)이 발생하고 이는 위도에 따라 상이한 수층 구조를 야기시키고(MOMAF 1998; 손 등 2001) 중규모 수층구조가 표층 생태계내 생물들의 생체량과 생태역할을 결정하는 주요 요인임을 밝힌 바 있다(Yang et al. 2004; Hyun and Yang 2005).

수층 생태계가 심해저 수심 5000 m 이하의 저층 생태

계에 미치는 영향에 대한 연구는 계속적으로 이루어져 왔지만 대부분 시계열 퇴적물 포집장치를 이용한 연구들(Rowe et al. 1991; Smith et al. 1997)이 주를 이루고 있으며 수층구조에 따른 표층수의 생산성과 저서 생물 분포와의 연관성을 규명한 연구는 극히 미약하다(Turley and Dixon 2002).

북동 적도 태평양에서 심해 환경연구의 일환으로 수행된 저서생물에 대한 보고들은 수층의 생산력이 저서생물의 분포에 영향을 주고 있다고 추정하였다(김 등 2000, 2004; 민 등 2004). 하지만 심해저 저서생태계에서 가장 생체량이 높다고 알려진 미생물에 대한 연구(현 등 1998, 2002)는 퇴적물내 분포특성에 초점을 두고 있어 수층구조와 저서 미생물의 분포특성과의 연관성을 밝히는 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 심해저 퇴적물내 미생물 생체량과 분포양상을 파악하고 중규모 수괴구조와의 연관성을 추적하고자 한다. 또한 유기탄소 등과 같은 심해저 퇴적물내 다른 환경인자들과의 상관관계를 통해 저서환경변화를 파악할 수 있는 지시자로서의 유용성을 살펴보고자 한다. 본 연구는 향후 망간단괴 상업 채광이 저서생태계에 미칠 수 있는 영향을 평가하기 위한 저층교란 실험(benthic impact experiment)에서 저서 미생물군집의 변화와 자연변화량 범위를 파악하기 위한 기초자료로 이용될 것이다.

2. 재료 및 방법

연구지역

연구해역은 서경 131° 30' 측선상의 남북방향으로 북위 5°에서 11° 사이로 북동적도 태평양의 클라리온-클리퍼톤 균열대(Clarion-Clipperton Fracture zone, C-C 지역)내에 위치한 우리나라 망간단괴 광구(KODOS 지역)를 포함한다(Fig. 1). 연구측선의 수심은 북위 5~7° 해역에서 4,100~4,500 m로 얕고 북쪽으로 갈수록 수심이 약 5,000 m까지 점차 깊어진다(지 등 2003, Table 1). 대양저의 지속적인 해저확장으로 해저면에는 위도차이에 따른 상이한 퇴적상이 분포하게 되는데 클라리온-클리퍼톤 균열대 해역의 북쪽은 원양성 적점토(pelagic red clay), 중앙은 규질 연니(siliceous ooze), 남쪽은 석회질 연니(calcareous ooze)가 분포한다고 알려져 있다(Horn et al. 1973).

연구해역의 표층해류 순환체계는 북위 10° 북쪽의 북적도해류(North Equatorial Current, NEC)와 북위 4° 남쪽의 남적도해류(South Equatorial Current, SEC)가 서쪽으로 흐르고, 이들 해류사이에 북적도반류(North Equatorial Count Current, NECC)가 동쪽으로 흐르고 있다(Kessler, 2006). 이들 중 NECC의 위치는 계절 및 기후변동에 따라 남·북 방향으로 수백 km씩 이동하는 것으로 알려져 있다

Fig. 1. Map of the study area with sampling station. Blocks are the Korean contract areas for manganese nodule exploration

Table 1. Latitudinal variation of the depth-integrated (to 100 m water depth) of phytoplankton carbon biomass (PCB), Primary carbon production (PCP), bacterial carbon biomass (BCB), and the rate of bacterial carbon production (BCP)

Characteristic of Water column	Water Regime	Latitude (°N)	Water Depth (m)	SST (°C)	NO ₃ ⁻ -N (gN m ⁻²)	PCB (mgC m ⁻²)	PCP (mgC m ⁻² d ⁻¹)	BCB (mgC m ⁻²)	BCP (mgC m ⁻² d ⁻¹)
Well mixed	SEC	5	4,200	27.899	6.22	1,262.67	397.48	571.57	212.89
	SEC/NECC	6	4,084	27.720	4.56	1,460.89	510.52	545.47	238.43
	NECC	7	4,561	28.071	4.44	1,074.43	402.16	449.15	200.40
High Stratified	NECC/NEC	8	5,022	28.33	4.67	795.87	410.72	388.65	155.34
	NEC	9	4,828	28.403	2.49	703.84	368.51	298.24	95.67
	NEC	10	4,968	28.282	1.87	630.21	342.00	381.33	94.38
	NEC	11	5,150	27.843	2.91	475.12	363.24	288.61	88.00

Data from MOMAF (1998) and Kim (2009)

(손 등 2001; Kim 2009). 연구기간인 1998년 7월의 북동적도 태평양의 표층해류 체계는 서향류인 북적도 해류(NEC, 유속 10~20 cm s⁻¹)가 북위 8° 이상에서 위치하고 북위 6° 이하에서 남적도 해류(SEC, 유속 약 50 cm s⁻¹)가 나타났다. 동향류인 북적도 반류(NECC, 최고 유속 30~40 cm s⁻¹)는 북위 6.5°와 8° 사이에 나타나고 있지만 그 경계는 명확하지 않았다(MOMAF 1998; 손 등 2001). NECC와 NEC가 만나는 북위 8°에는 전향력에 의해 표층수의 발산(Divergence)이 발생하였고 NECC와 SEC가 만나는 북위 6~6.5° 사이에는 표층수의 수렴(Convergence)이 발생한 것으로 판단된다(손 등 2001).

시료채취

수괴 특성을 파악하기 위해서 CTD system(Sea-Bird 911 plus)을 이용해 수온, 염분 및 용존산소 분포를 파악하였고 용존산소는 현장에서 Winkler-Sodium Azide 방법을

이용하여 측정된 값으로 보정하였다(Parsons et al. 1984). 엽록소-*a*는 CTD에 장착된 fluorometer (Seatech)로부터 얻어진 형광값을 TD-700 fluorometer(Turner Design)로 측정된 엽록소 농도로 보정하였다. 식물플랑크톤의 탄소 생체량(phytoplankton carbon biomass, PCB)은 C:Chl 비율을 수심 30m까지는 60, 30~60 m 사이는 40, 수심 60 m 이하에서는 30으로 수심에 따라 비율을 다르게 적용해 구하였다(Caron et al. 1995)

퇴적물시료는 시료채취시 기계적인 교란이 적어 표층 퇴적물의 보존상태가 좋은 다중주상 퇴적물채취기(Multiple Corer, MC)를 이용하였다(현 등 1998). 퇴적물내 ATP, 유기탄소 그리고 박테리아 세포수 분석을 위해 직경 3.4 cm 크기의 플라스틱 관을 사용하여 각 정점당 4개씩의 퇴적물 부시료(sub core)를 채집하였다. 각각의 시료는 8개층(0~0.25 cm층, 0.25~0.5 cm층, 0.5~0.75 cm층, 0.75~1.0 cm층, 1~1.5 cm층, 1.5~2 cm층, 2~3 cm층,

그리고 3~4 cm층)으로 나누어 취한 후, 실험 목적에 따라 다음과 같이 전처리 및 분석을 하였다.

총탄소량 및 유기탄소량

채집된 퇴적물은 세척된 60 ml 플라스틱병(Nalgene, PP)에 담아 냉동건조기(일신랩, PVTED10R)로 이를 동안 건조시켰다. 건조된 시료는 마노유발(agate mortar)에서 곱게 간 다음 40°C 건조기에 하루이상 보관하였다. Superbalance(Mettler, AT21, 10^{-6} g)를 이용해 주석용기(Tin cup)에 시료를 10~15 mg 정도를 담아서 원소분석기(CHNS Analyzer, CE Instrument, EA1110)를 이용해 총탄소량을 분석하였다(Verado et al. 1990). 유기탄소 분석은 건조된 퇴적물시료 5~10 mg 정도를 450°C에서 4시간 동안 태운 은 용기(silver cup)에 담아 6% 아황산(Junsei Chemical Co. Ltd.)으로 산처리를 하고 40°C의 건조기에서 하루 정도 보관하였다. 탄산칼슘이 완전히 제거될 때까지 아황산의 양을 증가시키며 산처리를 반복한 후 은 용기를 밀봉하고 원소분석기로 탄소량을 분석하였다(김 등 2006). 이때 탄소량의 정량적인 계산은 Sulfanilamide(CE Instrument)를 이용하였으며, 빈 은 용기를 시료와 동일하게 전처리하여 분석시의 바탕시료(blank)로 사용하였다. 실험의 정확성은 BCSS-1 표준 퇴적물을 이용하여 검증하였다(김 등 2006).

ATP(adenosine 5'-triphosphate)

ATP 시료의 전처리를 위해 0.25~1 cm 간격으로 채집된 퇴적물 시료에 0.5 M 인산 용액 10 ml를 넣고 혼합기(vortex mixer)를 이용해 30초 동안 혼돈다. 4°C에서 10~15분간 ATP를 추출한 후, 2,500 rpm에서 20분간 원심분리기를 사용하여 추출된 ATP를 퇴적물로부터 분리시켰다. 분리된 ATP 용액 5 ml에 이온물질(예, Ca^{2+}) 및 중금속 이온에 의한 발광감소 효과를 방지하기 위해 phosphate buffer(60 mM; Sigma Chemical Co.)로 만든 0.048 M $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 용액 1 ml를 더한 후, 1 N NaOH 용액을 사용하여 pH를 7.4로 조정하였다. 마지막으로 phosphate buffer(60 mM)를 사용하여 총 시료량을 10 ml로 맞춘 후 실험실에서의 분석 때까지 -20°C에서 냉동 보관하였다(Karl 1993). 실험실에서의 ATP 분석은 Luciferine-luciferase 간의 발광작용시 분해되는 ATP양이 Luminometer(Turner designs model 20e)를 통해서 측정되는 빛의 세기와 비례하여 나타나는 점을 이용하여 측정하였다.

박테리아 세포수(bacterial cell number, BCN)

퇴적물을 50 ml 플라스틱 원심관에 0.25~1 cm 간격으로 채집하고 3.7% 포르말린을 포함한 여과-멸균(0.22 μm filter-sterilized) 저층수 10 ml를 첨가하여 혼합기(vortex

mixer)로 30초 동안 혼돈 다음 분석까지 냉동보관하였다. 냉동된 시료를 해동 후 혼합기로 균일하게 만든 다음 퇴적물을 0.3 g(wet wt.) 이하로 취해서 무게를 알고 있는 15 ml 원심관에 넣고 여과-멸균한 저층수를 첨가해 최종적으로 5 ml로 맞췄다. 퇴적물에 붙어있는 박테리아를 분리하기 위해 0.5 ml tetrasodium pyrophosphate(0.01 M; Sigma No. P8019)를 첨가하고 격렬히 혼돈 다음 15분간 기다린 후 Ultrasonic processor(VCX-400)를 이용해 180초 동안 초음파 처리하였다(20 kHz, 5 mm microtip, 18% amplitude). 시료가 열에 의해 손상되는 것을 막기 위해 9초 동안 초음파 처리를 하고 3초 동안 잠시 멈췄으며 시료는 항상 얼음속에 두면서 초음파 처리를 하였다. 초음파 처리된 시료는 혼합기로 격렬히 혼돈 다음 10분 동안 원심분리하여(500 G) 상등액 4 ml를 pipette으로 60 ml 플라스틱병에 담았다(Epstein and Rossel 1995; Fabiano and Danovaro 1998). 15 ml 원심관에 3.7% 포르말린을 포함한 여과 멸균된 저층수를 4 ml를 넣고 30초 동안 혼합기를 이용해 격렬히 혼돈 다음 다시 원심분리하였다. 이 과정을 8번 반복하여 총 32 ml의 상등액을 모아 냉동보관하였다. 분석을 위한 시료는 형광을 입히기 위해 상등액을 10분간 60 kHz에서 초음파처리를 하였다. 0.1 ml의 부시료를 취해 깔대기에 넣고 2 ml의 2% 포르말린을 포함한 멸균 저층수를 같이 첨가한 다음 DAPI(최종농도-5 $\mu\text{g/l}$; Porter and Feig 1980) 0.2 ml를 첨가해 10분간 형광을 착색시켰다. 박테리아 세포수는 형광현미경(Ziess, Axiophot)을 이용해 분석하였다. 박테리아 탄소생체량(bacterial carbon biomass, BCB)은 전환상수 12 fgC cell^{-1} (Fukuda et al. 1998)를 이용해 박테리아 세포수로부터 계산하였다.

3. 결 과

표층수내 생지화적 요인 특성

연구기간 동안 북동 적도 태평양의 표층해류 체계에 의해 북위 8°에서 표층수의 발산이 발생하였고 북위 6~6.5° 사이에는 표층수의 수렴이 발생하였다. 수렴과 발산이 일어나는 지역의 표층수에서는 수직적인 혼합이 발생하여 계절적 수온약층의 형성이 약하게 된다(Fig. 2). 수심 100 m까지 적분된 용존 무기질소성분(질산염)의 총량값을 살펴보면 북위 5°에서 6.22 gN m^{-2} 로 나타나 가장 높게 나타났으며 북위 10° 부근의 정점들에서는 3 gN m^{-2} 미만의 값을 나타내 혼합지역(SEC/NECC)에서 표층수로의 영양염 유입이 원활히 이루어지고 있음을 지시하고 있다(Table 1). 또한 수심 100 m까지 적분된 식물플랑크톤 탄소생체량(PCB)과 박테리아 탄소생체량(BCB)이 북위 5°에서 각각 1262.67 mgC m^{-2} 와 571.57 mgC m^{-2} 로 높게 나타난 반면 북위 10°에서는 630.21과 381.33

Fig. 2. Distributions of (a) water temperature (Temp.), (b) salinity (Sal.), (c) dissolved oxygen (D.O.) and (d) chlorophyll-*a* concentration (Chl-*a*) in the surface waters of northeast equatorial Pacific (July 1998). (redrawn from Hyun and Yang 2005)

mgC m⁻²로 나타나 상대적으로 낮게 나타났다. 그리고 표층 생산력 역시 혼합지역(SEC/NECC 지역)이 성층화된 지역(NEC 지역)보다 높게 나타남을 알 수 있다(Table 1). 따라서 SEC/NECC 해역에서는 수직혼합으로 증가된 영양염이 표층의 생체량과 생산력을 증가시키지만 NEC의 영향을 받는 북위 9° 이상의 고위도에서는 계절적 수온약층의 발달로 수직적인 혼합이 제한되어 표층수를 빈영양

상태로 유도하여 생체량과 생산력이 상대적으로 낮게 나타났다(Fig. 2; Table 1; Hyun et al. 1998; Yang et al. 2004; Hyun and Yang 2005).

미생물 생체량 분포

박테리아 세포수(BCN)는 저서미생물 생체량 분석에 널리 사용되고 있으며(Table 2) ATP 또한 BCN과 더불어 되

Table 2. Bacterial cell number (BCN) in marine sediments

		Depth (m)	Sediment depth (cm)	BCN (×10 ⁸ cells cm ⁻³)	Reference
Costal Sediment	Marsala lagoon, Italy	1	0 - 1	107 ^a	Manini et al. 2003
	Terra Nova Bay, Ross Sea, Antarctica	20	0 - 1	0.43 ^a	Baldi et al. 2010
	Wadden Sea, North Sea	2	0 - 10	4 - 33	Musat et al. 2006
	Saanich Inlet, British Columbia, Canada	200	0 - 1	50 ^a	Bird et al. 2001
Deep-Sea Sediment	Porcupine Abyssal plain, NE Atlantic	4,850	0 - 1	3.4	Eardly et al. 2001
	NE Atlantic	4,550	0 - 1	35.5-56.2	Poremba 1994
	Gulf of Mexico	3,700	0 - 1	8-18.9	Deming and Carpenter 2008
	Molloy hole, Greenland Sea	5,579	0 - 1	5.4	Queric et al. 2004
	WAST, Indian Ocean	4,050	0 - 1	20	Boetius and Lochte 2001
	Central Indian Basin, Indian Ocean	5,300	0 - 1	20 ^a	Raghukumar et al. 2006
	Tyrrhenian Sea, Western Mediterranean	3,430	0 - 1	2.07 ^a	Danavaro et al. 2009
	NE Pacific	4,084-5,150	0 - 1	2.4-17.3	This Study

^aValue expressed as BCN (×10⁸ cells) per g of dry sediment

적물내 미생물 생체량 분석에 많이 이용되는 도구로 알려져 있다(Table 3). ATP의 경우, 모든 생물에 존재하기 때문에 활성생체량을 의미하지만 심해저 퇴적물 내 박테리아가 전체 저서생태계 내 탄소생체량중 85% 정도 차지하기 때문에(Tietjen 1992) 심해 퇴적물 내에서는 미생물 생체량을 대표 할 수 있을 것으로 판단된다. 저서 미생물 생체량을 건조중량 단위(g^{-1})로 나타내는 것이 보편적인 방법이지만 퇴적상이 다른 퇴적층에서 미생물 생체량의 분포를 비교하고자 할 때 물과 퇴적물이 공존하는 단위공간 내 생체량을 파악하는 것이 실제 퇴적환경을 고려한 방법으로 사료되며 많은 해양환경에서 적용되었다(Table 2, 3).

퇴적층내 ATP의 분포는 $0.2\sim114.5\text{ ng cm}^{-3}$ 의 범위로

대부분 표층이 가장 높게 나타나고 2 cm 깊이까지는 빠른 감소를 보이며 3 cm 이하의 깊이에서는 함량의 변화가 거의 없이 일정한 값을 나타냈다(Fig. 3). 표층 2 cm내에 존재하는 ATP함량은 퇴적물 전체 4 cm 깊이 내에 존재하는 ATP양의 67.5~88.5% 범위로 나타나며 평균 80.0%를 차지했다. 이 값은 현 등(1998, 2002)이 제시한 값과 유사하며 2 cm까지 ATP의 집중적인 분포는 수층으로부터 먹이원이 우선적으로 공급되는 퇴적 표층에 심해저 생물들의 서식환경이 조성되어 있음을 의미한다. 또한 남쪽에 위치한 정점들(SEC/NECC 해역)의 표층에서 높게 나타나고 깊이에 따른 감소도 크게 나타났다(Fig. 3).

BCN은 $2.4\sim17.3 \times 10^8\text{ cells cm}^{-3}$ 의 범위를 가지며 고위

Table 3. ATP concentrations in marine sediments

	Depth (m)	Sediment depth (cm)	ATP (ng cm^{-3})	Reference
Costal Sediment	Spaleo Island, GA	0-1	3750	Christian et al. 1975
	Newport River Estuary, NC	0-1	762	Ferguson and Murdoch 1973
	Spanish Sahara	0-1	550	Hodson and Azam 1977
	Youngjong tidal flat	0-2	1816	Hyun et al. 2002
	Baltic Sea	0-1	673-2843	Köster and Meyer-Reil 2001
Deep-Sea Sediment	Nares abyssal plain	0-1	2.4	Karl et al. 1976
	Black Sea	0-5	115	Karl 1978
	Guaymas Basin	1-5	100-200 ^a	Haberstroh and Karl 1989
	Northeastern Atlantic Ocean	0-1	84 ^a	Ernst and Goerke 1974
	East Pacific Ocean	0-1	4.9-7.2	Hyun et al. 1998
	East Pacific Ocean	0-1	0.18-114.4	this study

^aValue expressed as ATP per g of dry sediment

Fig. 3. Vertical profiles of sedimentary (a) ATP and (b) bacterial cell number (BCN) in the northeast equatorial Pacific, July 1998

도에 해당되는 정점들(NEC 해역)에서는 퇴적 깊이 4 cm 까지 농도 변화가 미미하게 나타나는 반면 남쪽에 위치한 정점들(SEC/NECC 해역)에서는 ATP와 유사하게 표층에서 높게 나타나고 퇴적 깊이의 증가에 따라 개체수가 감소하였다(Fig. 3). 퇴적층 내 미생물 생체량은 이용할 수 있는 유기물의 함량과 밀접한 관계를 가지며 박테리아 생체량과 입자성 유기물 유입량과는 유의한 양의 상관관계를 나타내는 것으로 알려져 있다(Rowe et al. 1991; Deming and Yager 1992). 퇴적층에서의 유기물함량은 퇴적층 깊이가 증가할수록 감소한다(Piper et al. 1987; Müller et al. 1988; Kim et al. 2008). 이는 유기물 유입이 많은 표층에 미생물 생체량이 집중되는 현상을 잘 설명해 준다.

4. 고 찰

미생물 생체량 분석 방법

해양환경에서 미생물 생체량을 분석할 수 있는 방법은 배양법, 현미경관찰법, 그리고 생화학적 방법이 있다(Karl 1986). 배양법은 자연계의 변화조건을 충족할 수 있는 배지 선정과 배양조건 조성이 어려워 해양환경에서 분리/배양할 수 있는 미생물은 전체의 0.01% 이하로 보고되고 있다(Amann et al. 1995). 현미경관찰법은 많은 연구자가 이용하지만 분석시간이 길며 정밀도가 높지 않고 주관성이 크다는 단점을 가지고 있다. 특히 퇴적물이나 부유입자가 많은 환경하에서는 입자와 세포를 분리해야 하는 어려움이 있다(Epstein and Rossel 1995). 이러한 어려움을 극복하고자 ATP나 인지질-인과 같은 생체물질을 이용해 미생물 생체량을 추정하는 생화학적 방법들이 고안되었다(Karl 1986; Dobby and Findlay 1993). 그 중 ATP 분석은 수층 및 저층에서 많이 이용되는 방법으로 다양한 해양환경에 적용되어왔다(Table 3). ATP 분석의 장점은 모든 생물체내에 존재하며, 생물학적으로 쉽게 분해되어 생태계에서 머무르는 시간이 짧고(Azam and Hodson 1977; Hodson et al. 1981), 화학적으로는 안정한 형태를 이루어 추출 및 분석이 용이하다(Hulett 1970). 또한 박테리아의 경우, C:ATP가 220~350 정도의 비교적 일정한 범위를 가지고 있으며, 최저분석 한계가 낮아(10^{-12} mol 이하) 다른 분석방법들보다 자료가 객관적이며 민감한 방법임이 보고되었다(Karl 1993; 현 등 1998).

ATP와 BCN을 비교하기 위해서 탄소생체량으로 전환하였고 여기에 이용된 C:ATP 비율을 250:1로 (Karl 1993) 가정하였으며 박테리아 탄소생체량(BCB)은 전환상수 12 fgC cell^{-1} (Fukuda et al. 1998)를 이용해 박테리아 세포수로부터 계산하였다. BCB는 최고값이 $20.74 \mu\text{gC cm}^{-3}$ 로 나타나고 최소값은 $2.82 \mu\text{gC cm}^{-3}$ 로 나타나 변화범위가

전체 평균($5.81 \mu\text{gC cm}^{-3}$)의 3배(308%)로 나타났다. ATP로 추정된 탄소생체량의 경우, 최고값은 $28.61 \mu\text{gC cm}^{-3}$, 최소값은 $0.05 \mu\text{gC cm}^{-3}$ 로 나타나 전체 평균($3.60 \mu\text{gC cm}^{-3}$)의 약 8배(793%)에 가까운 변화범위를 가지는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 BCB의 변화범위가 평균의 3배 이상으로 나타나 미생물 생체량 변화를 추정하기에 알맞은 도구로 판단된다. ATP로 추정된 탄소생체량은 평균의 8배 정도의 변화범위를 가지고 있어 BCB과 같이 전적으로 미생물 생체량을 대표하지는 못하는 단점은 있지만 변화의 범위가 커 BCB보다 환경에 민감하게 반응하는 것으로 판단된다. ATP는 활성 생체량을 지시하여 살아있는 생명체의 생체량을 나타내지만 BCN은 생명활동과 관계없이 세포내 염색체를 염색하여 현미경상에서 개체수를 측정하기 때문에 비활성 세포 역시 포함될 수 있다. 따라서 일반적으로 BCB가 ATP로 추정되는 탄소생체량보다 보다 높게 나타난다. ATP는 미생물 생체량이 전체 탄소생체량의 85% 정도를 차지하는 심해 저서환경에서는 미생물 생체량을 파악할 수 있는 유용한 도구이며 BCN 자료와 상호 보완이 가능하고 이 두 자료를 함께 얻는다면 저서미세환경 변화를 보다 정확히 해석할 수 있을 것으로 판단된다.

미생물 생체량의 위도별 분포

미생물 생체량의 위도별 분포를 파악하기 위해 퇴적층에서 미생물 생체량이 집중되어있는 표층 1 cm 이내의 ATP와 BCN 적분값을 이용하였다. ATP는 정점 N6에서 78.1 ng cm^{-2} 로 가장 높게 나타나며 정점 N9에서 2.4 ng cm^{-2} 로 가장 낮았다. 그리고 정점 N9에서 N11까지는 $2.4 \sim 4.3 \text{ ng cm}^{-2}$ 의 범위로 비교적 일정한 값을 보였다. 농도가 저위도에서 높고 고위도에서 낮은 경향은 BCN 분석의 결과에서도 나타났다. 정점 N6에서 $12.4 \times 10^8 \text{ cells cm}^{-2}$ 으로 가장 높았고 정점 N10에서 $2.7 \times 10^8 \text{ cells cm}^{-2}$ 로 가장 낮았다. 그리고 정점 N10에서 정점 N11까지는 $2.7 \times 10^8 \text{ cells cm}^{-2}$ 내외의 값으로 비교적 일정한 값을 보였다(Table 4, Fig. 4). ATP와 BCN의 회귀분석 결과는 지수함수적 관계($\text{ATP} = \exp(\text{BCN} \times 3.6 \times 10^{-9})$)를 보이며 R^2 값이 0.8403($p < 0.0001$)로 나타나 ATP 값이 박테리아 생체량을 반영하고 있는 것으로 판단된다(Table 5).

표층 퇴적물내 유기탄소함량은 정점 N5에서 2.29 mg cm^{-2} 로 가장 높게 나타났고 정점 N8에서 1.18 mg cm^{-2} 로 가장 낮게 나타났다. 그리고 정점 N9~N11에서는 1.3 mg cm^{-2} 정도의 비교적 일정한 값을 보여줬다. 이것은 ATP와 BCN 분포와 유사한 결과이며 ATP와 유기탄소의 회귀분석에서 R^2 값이 0.9181($p = 0.0002$)로 나타나 유의한 양의 직선형 관계를 보였다(Table 5). 따라서 퇴적물 내 유기탄소함량은 ATP에 영향을 주고 있는 것으로 판단된다.

Table 4. Latitudinal variation of depth-integrated (to 1 cm surface sediment) bacterial cell number (BCN), organic carbon (Org C), and ATP

Station	BCN		Org C		ATP	
	($\times 10^8$ cells cm^{-2})	SD*	(mg cm^{-2})	SD*	(ng cm^{-2})	SD*
N5	10.3	2.4	2.29	0.51	75.1	27.7
N6	12.4	4.2	2.11	0.44	78.1	35.4
N7	6.7	0.9	1.46	0.22	15.2	5.6
N8	4.8	1.1	1.18	0.11	5.7	0.3
N9	3.6	0.9	1.36	0.07	2.4	1.7
N10	2.7	0.2	1.21	0.22	4.3	1.1
N11	2.8	0.6	1.50	0.34	3.2	1.4

SD* : $\pm$ standard deviation **Fig. 4. Latitudinal variation of depth-integrated (to 1 cm surface sediment) (a) bacterial cell number (BCN), (b) ATP, (c) organic carbon and depth-integrated (to 100 m water depth) of (d) Chlorophyll-a (Chl-a)**

표층 수괴특성에 따른 퇴적층 내 미생물 생체량의 변화를 파악하고자 표층 수괴특성을 반영하는 수심 100 m까지 엽록소-*a* 적분값과 표층 퇴적물 내 ATP, BCN간의 상관관계를 조사하였다(Table 5). ATP와 엽록소-*a*의 회귀분석에서 R^2 값이 0.8653($p < 0.0001$)이며, BCN과 엽록소-*a*의 회귀분석에서 R^2 값이 0.9202($p < 0.0002$)로 유의한 직선형 관계를 보였다. 이는 표층 해수내 존재하는 엽록소-*a*가 퇴적층 내 ATP와 BCN에 영향을 미치는 것으로 판단되며 표층 생산력이 높은 해역은 저층으로 유기물 유입이 커 퇴적층 내 유기탄소 농도가 높지만 생산력이 낮은 해역은 퇴적층 내 유기탄소 농도가 낮게 나타난다(김 등 2008; Hill and Wheeler 2002). 연구가 수행되었던 시기에는 수괴구조상 NECC와 SEC가 만나는 북위 6°와 NECC와 NEC가 만나는 북위 8°의 표층수에서는 각각 수렴과

발산이 일어났다(Fig. 2). 이러한 수괴특성은 표층수의 수직혼합을 유도하고 표층수내 생산력을 높인다고 알려져 있다(Hyun and Yang 2005). 이러한 수층내 생물생산성의 변화는 저층으로 유입되는 물질의 양에도 차이를 일으키게 된다(Smith et al. 1996, 1997; Hammond et al. 1996).

퇴적층으로 유입되는 입자플럭스를 살펴보면 1998년 KODOS 해역(북위 10.5°)에서 7월의 입자플럭스가 7.2 mg $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 으로 나타났고, Honjo et al. (1995)의 위도별 입자플럭스 조사에서 7월의 결과는 북위 9°에서 12.80 mg $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 북위 5°에서 59.8 mg $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 북위 2°에서 109.3 mg $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로 나타나 위도가 감소할수록 플럭스가 증가함을 알 수 있다(Table 6). Hammond et al. (1996) 역시 북위 5°에서 저층으로 유입되는 퇴적물의 양이 북위 11°에서 관측된 양보다 10배 이상 많음을 밝히고 있다. 그리고 방산

Table 5. Coefficient of determination (R^2) matrix among chlorophyll-*a* (Chl-*a*), bacterial cell number (BCN), ATP, organic carbon (OC), and total carbon (TC)

	Chl- <i>a</i>	BCN	ATP	OC	TC
Chl- <i>a</i>	1	0.9202 ^(b)	0.8653 ^(a)	0.6267	0.8727 ^(a)
BCN		1	0.8403 ^(a)	0.7903	0.9005 ^(c)
ATP			1	0.9181 ^(b)	0.9707 ^(a)
TOC				1	0.9401 ^(a)
TC					1

Note: All parameters $n = 8$. P (a) < 0.0001; (b) 0.0002; (c) 0.0003

Table 6. Latitudinal variations of mass flux to the surface sediment based on previous work

Latitude	Longitude	Mass Flux ($\text{mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	Reference
Eastern Pacific Ocean			
10° 30'N	131° 20'W	7.2	Kim et al. 2008
9° 13.5'N	146° 16'W	22-52.1	Harada et al. 1995
9° 19.3'N	146° 01.1'W	2.33	Müller et al. 1988
9° N	140° W	12.80	Honjo et al. 1995
5° N	140° W	59.8	Honjo et al. 1995
2° N	140° W	109.3	Honjo et al. 1995
1° 01'N	118° 20'W	1040	Yang et al. 1990

충연구자료로 추정된 퇴적을 역시 북위 5°(1.5 mm kyr^{-1})가 상대적으로 고위도인 북위 10.5° 지역(0.15 mm kyr^{-1})보다 높게 나타냈다(지 등 2003). 따라서 표층에서의 수괴 특성이 퇴적물 내 유기탄소의 위도 분포를 결정하는 주요 요인으로 작용하는 것으로 판단된다. 퇴적층 내 유기탄소 함량의 차이는 미생물 생체량을 포함한 저서 환경의 차이를 지시할 수 있지만 BCB(평균 $5.8 \mu\text{gC cm}^{-3}$)와 ATP로 추정되는 탄소생체량($3.6 \mu\text{gC cm}^{-3}$)에 비해 유기탄소의 함량(평균 1.5 mgC cm^{-3})이 매우 크기 때문에 유기탄소 함량이 극히 일부분인 미생물 생체량을 직접적으로 지시하지는 못한다. 하지만 유기탄소 함량의 차이는 퇴적물 내 미생물 생체량 분포에 영향을 주고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 5. Comparison of depth-integrated bacterial cell number (BCN), ATP, and organic carbon contents in surface sediments (top 1 cm depth) and Chlorophyll-*a* (to 100 m water depth) between SEC/NECC and NEC area in the northeast equatorial Pacific, 1998 (KODOS 98)

위도별 분포에서 가장 중요한 인자 중 하나인 표층해류와 그에 따른 수층구조에 따라 성층화된 NEC 해역(북위 9~11°)과 수직혼합이 활발한 SEC/NECC 해역(북위 5~7°)으로 구분하여 비교해 보았다. SEC/NECC 해역에서 ATP 적분값(표층 1 cm)은 평균 56.2 ng cm^{-2} 로 나타나 NEC 해역(3.3 ng cm^{-2})보다 17배 이상 크게 나타났다. 그리고 BCN 적분값은 SEC/NECC에서 $9.8 \times 10^8 \text{ cells cm}^{-2}$ 로 나타나고 NEC 해역에서는 $2.9 \times 10^8 \text{ cells cm}^{-2}$ 로 나타나 SEC/NECC 해역에서 3배 이상 크게 나타났다. 유기탄소의 적분값 역시 저위도인 SEC/NECC 해역에서 평균 1.95 mg cm^{-2} 로 나타나 평균 1.32 mg cm^{-2} 를 나타내는 NEC 해역보다 높았다(Fig. 5). 저위도인 SEC/NECC 해역에서 식물플랑크톤과 박테리아 생체량의 평균이 각각 1266.0, 522.1 mgC m^{-2} 으로 나타나 고위도인 NEC 해역(각각 603.1, 322.7 mgC m^{-2})보다 높게 나타나고 일차생산과 박테리아생산의 평균이 각각 436.7, 217.2 $\text{mgC m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 로 나타난 저위도 해역이 고위도 해역(각각 357.9, 92.7 $\text{mgC m}^{-2}\text{d}^{-1}$)보다 높게 나타났다(Table 1). 따라서 이 같은 저서 미생물 생체량의 위도별 차이는 수괴구조에 기인된 표층 생태계의 생산성의 차이로 판단된다. 일반적으로 표층에서 생성된 입자는 입자의 침강속도를 고려하면 4~10주 정도에 수심 5,000 m 저층으로 유입되는 것으로 알려져 있다(Honjo et al. 1995; Berelson 2002). 하지만 연구지역의 SeaWiFS 인공위성 영상자료에서 추출된 월별 표층 엽록소 농도자료와 시계열 퇴적물 포집장치로부터 얻어진 심해 저층의 총질량 플럭스 자료는 표층의 변화가 한 달 이내에 심해 저층의 물질 플럭스로 반영되고 있음을 나타내었고 이는 연구지역 내 수층과 저층의 생태계가 강하게 연결되어 있음을 시사한다(Kim et al. 2008; Kim et al. 2010).

망간단괴 채광의 영향 평가

심해저 광물자원인 망간단괴의 채광과정에서 유발될 수 있는 퇴적물의 교란과 부유퇴적물의 재퇴적 등과 같은 저서환경변화가 저서생태계에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 기초조사가 필요하다. 이러한 환경교란 이전의 생태환경을 파악하는 것은 인위적인 활동에 따른 환경의 변화를 파악하기 위한 기본 과정이다(현 등 1998). 외국의 경우, 인위적인 환경교란을 통해 채광의 영향을 파악하기 위한 조사가 수행되었다(Kaneko et al. 1995; Schriever et al. 1997; Trueblood and Ozturgut 1997; Raghukumar et al. 2001). 우리나라 망간단괴 등록광구지역 내에서 환경 기초연구의 일환으로 수행된 저서생물에 대한 연구는 대형저서생물(Choi et al. 1996; 최 등 2004; 박 등 2004) 및 중형저서동물(김 등 2000, 2004; 민 등 2004)의 연구가 있었다. 하지만 퇴적층 내 미생물에 대한 연구는 미약한 실

정이다(현 등 1998, 2002). 따라서 본 연구는 향후 망간단괴 상업 채광이 저서생태계에 미칠 수 있는 영향을 평가하기 위한 환경기초 연구의 일환으로 우리나라 망간단괴 등록광구지역(9~11°N)의 퇴적물내 미생물 생체량의 분포를 조사하였다.

BCN의 변화범위는 $2.4\sim6.0 \times 10^8 \text{ cells cm}^{-3}$ 로 나타나고 평균이 $3.3 \times 10^8 \text{ cells cm}^{-3}$ 로 나타났다. 그리고 미생물 생체량이 가장 높고 실제 채광시 환경영향을 많이 받게 되는 퇴적 표층(1 cm까지의 적분값)에서는 $2.7\sim3.6 \times 10^8 \text{ cells cm}^{-2}$ (평균, $3.0 \times 10^8 \text{ cell cm}^{-2}$)로 나타났다. 이러한 값들은 일본이 수행한 저층 충격시험(Japan Deep-Sea Impact Experiment, JET)에서 나타난 충격 실험 전(JET1)의 값인 $2.0 \times 10^8 \text{ cells cm}^{-3}$ 미만의 값들 보다 높게 나타났다(Kaneko et al. 1995). ATP의 경우는, $0.2\sim5.5 \text{ ng cm}^{-3}$ (평균, 2.3 ng cm^{-3})의 범위를 가지며 표층 1 cm까지의 ATP 적분값은 $2.4\sim4.3 \text{ ng cm}^{-2}$ (평균, 3.3 ng cm^{-2})으로 나타났다. 이 값은 인도의 심해 충격 실험(India Deep-sea environment experiment, INDEX)에서 나타난 충격 실험 전의 ATP 함량($50\sim140 \mu\text{gC g}^{-3}$)보다는 낮게 나타났다(Raghukumar et al. 2001). 우리나라 망간단괴 광구해역 퇴적물내 미생물 생체량의 보다 정확한 자연변화량을 알기 위해서는 보다 많은 자료가 필요하지만 BCN 값과 ATP 함량 범위는 저서 미생물군집의 변화와 자연변화량 범위를 파악하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구를 위하여 시료채취에 도움을 주신 온누리호 선장님 이하 전 승조원분들께 감사를 드립니다. 논문심사를 위해 귀하신 시간을 내어주시고 좋은 조언을 해주신 심사위원 두 분께도 감사의 마음을 전합니다. 본 연구는 국토해양부 R&D 연구과제인 “태평양 심해저 광물자원개발 사업(PM55653, PM55654)”의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김경홍, 손승규, 손주원, 주세종 (2006) 해양퇴적물내 총탄소 및 유기탄소의 분석기법 고찰. 한국해양공학회지 9:235-242
- 김동성, 현정호, 최진우, 이경용 (2000) 북동태평양 심해 퇴적물에 서식하는 중형 저서 생물군집의 위도별 특징. 한국해양학회지 「바다」 5:245-254
- 김동성, 민원기, 이경용, 김기현 (2004) 북동 태평양 심해저 C-C 해역에 서식하는 중형저서동물 군집. Ocean and Polar Res 26:265-272
- 김형직, 김동선, 형기성, 김경홍, 손주원, 황상철, 지상범, 김

- 기현, 김부근 (2008) 북동태평양 심해에서 관측된 퇴적물 입자 플럭스의 계절적 변동. 한국해양학회지 「바다」 13:200-209
- 민원기, 김동성, 김웅서 (2004) 북동태평양 심해저에 서식하는 중형저서동물 군집의 위도별 분포특성. *Ocean and Polar Res* 26:255-263
- 박홍식, 지상범, 백상규, 김웅서 (2004) 북동 태평양 심해저 C-C 해역의 퇴적환경과 대형저서생물 분포와의 관계. *Ocean and Polar Res* 26:311-321
- 손승규, 현정호, 박정기, 지상범, 김기현 (2001) 북동적도태평양 표층 수온변화에 따른 화학적 환경특성. 한국환경공학회지 4:24-37
- 지상범, 강정극, 오재경, 손승규, 박정기 (2003) 북동태평양 한국 심해저 연구지역 망간단괴의 지역적 분포와 퇴적환경. *Ocean and Polar Res* 25:257-267
- 최진우, 김동성, 현정호, 이창훈 (2004) 북동태평양 심해저 퇴적물에 서식하는 대형저서동물의 군집. *Ocean and Polar Res* 26:367-376
- 현정호, 김경홍, 지상범, 문재운 (1998) 북동적도 태평양 KODOD 97-2 해역 심해저 퇴적물내의 ATP 분포. 한국해양학회지 「바다」 3:142-148
- 현정호, 김경홍, 권개경, 이정현, 이흥금, 김상진, 김기현 (2002) 아데노신 3인산(ATP; Adenosine-5' triphosphate)을 이용한 심해저 및 연안퇴적토의 총 미생물 생체량 측정. 미생물학회지 38:119-126
- Azam F, Hodson RE (1977) Dissolved ATP in the sea and its utilization by marine bacteria. *Nature* 267:696-698
- Amann RI, Ludwig W, Schleifer KH (1995) Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation. *Microbial Rev* 59:143-169
- Baldi F, Marchetto D, Pini F, Fani R, Michaud L, Giudice AL, Berto D, Giani M (2010) Biochemical and microbial features of shallow marine sediments along the Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica). *Cont Shelf Res* 30:1614-1625
- Berelson WM (2002) Particle settling rates increase with depth in the ocean. *Deep-sea Res II* 49:237-251
- Berger WH, Smetacek VS, Wefer G (1989) Ocean productivity and paleoproductivity-An Overview. In: Berger WH, Smetacek VS, Wefer G (eds) *Productivity of the ocean: present and past*. John Wiley & Sons, New York, pp 1-34
- Bird DF, Juniper SK, Ricciardi-Rigault M, Nartineu P, Prairie YT, Calvert SE (2001) Subsurface viruses and bacteria in Holocene/Late Pleistocene sediments of Saanich Inlet, BC: ODP Holes 1033B and 1034B, Leg 169S. *Mar Geol* 174:227-239
- Boetius A, Lochte K (2000) Regional variation of total microbial biomass in sediments of the deep Arabian Sea. *Deep-sea Res II* 47:149-168
- Caron DA, Dam HG, Kremer P, Lessad EJ, Madin LP, Malone TC, Napp JM, Pele ER, Roman MR, Youngbluth MJ (1995) The contribution of microorganisms to particulate carbon and nitrogen in surface waters of the Sargasso Sea near Bermuda. *Deep-Sea Res II* 42:943-972
- Choi JW (1996) Macrozoobenthic community in the deep sea soft-bottom of the KODOS 96-1 area, northeastern Pacific Ocean. *J Korean Soc Oceanogr* 1:73-79
- Christian RR, Bancroft K, Wiebe WJ (1975) Distribution of microbial adenosine triphosphate in salt marsh sediments at Sapelo Island, Georgia. *Soil Sci* 119:89-97
- Danovaro R, Corinaldesi C, Luna GM, Magagnini M, Manini E, Pusceddu A (2009) Prokaryote diversity and viral production in deep-sea sediments and seamounts. *Deep-sea Res II* 56:738-747
- Deming JW, Yager PL (1992) Natural bacterial assemblages in deep-sea sediments: towards a global view. In: Rowe GT, Pariente V (eds) *Deep-sea food chains and the global carbon cycle*, Kluwer Academic Publishers Co., Norwell, pp 11-27
- Deming JW, Carpenter SD (2008) Factors influencing benthic bacterial abundance, biomass, and activity on the northern continental margin and deep basin of the Gulf of Mexico. *Deep-sea Res II* 55:2597-2606
- Dobbs FC, Findlay RH (1993) Analysis of microbial lipids to determine biomass and detect the response of sedimentary microorganisms to disturbance In: Kemp PF, Sherr BF, Sherr EB, Cole JJ (eds) *Handbook of methods in aquatic microbial ecology*. Lewis Publishers, Boca Raton, pp 347-358
- Eardly DF, Carton MW, Gallagher JM, Patching JW (2001) Bacterial abundance and activity in deep-sea sediments from the eastern North Atlantic. *Prog Oceanogr* 50:245-259
- Epstein SS, Rossel J (1995) Enumeration of sandy sediments bacteria: search for optimal protocol. *Mar Ecol Prog Ser* 117:289-298
- Ernst W, Goerke H (1974) Adenosine-5'-triphosphat (ATP) in sedimenten und nematoden der nordostatlantischen Tiefsee. "Metor" Forschungsergeb. Reihe C 18:35-42
- Fabiano M, Danovaro R (1998) Enzymatic activity, bacterial distribution, and organic matter composition in sediments of the Ross Sea (Antarctica). *Appl Environ Microbiol* 64:3838-3845
- Ferguson RL, Murdoch MB (1975) Microbial ATP and organic carbon in sediments of the Newport River

- estuary. North Calolina. *Estuar Res* **1**:229-250
- Fukuda R, Ogawa H, Nagata T, Koike I (1998) Direct determination of carbon and nitrogen contents of natural bacterial assemblages in marine environments. *Appl Environ Microbiol* **64**:3352-3358
- Gooday AJ, Pfannkuche O, Lamshead PJD (1996) An apparent lack of response by metazoan meiofauna to phytodetritus deposition in bathyal north-eastern Atlantic. *J Mar Biol Soc UK* **76**(2):297-310
- Hammond DE, McManus J, Berelson WM, Kilgore TE, Pope RH (1996) Early diagenesis of material in equatorial Pacific sediments: stoichiometry and kinetics. *Deep-sea Res II* **43**:1365-1412
- Haberstroh PR, Karl DM (1989) Dissolved free amino acids in hydrothermal vent habitats of the Guaymas Basin. *Geochim Cosmochim Acta* **53**:2937-2945
- Harada K, Shibamoto Y, Kokubun H (1995) Chemical and radiochemical studies of sediment samples from the JET site. In: Yamazaki T, Aso K, Okano Y, Tsurusaki K (eds) *Proceedings of the ISOPE-ocean mining symposium*. ISOPE, Tsukuba, Japan, 21-22 November 1995 pp 187-192
- Hill JK, Wheeler PA (2002) Organic carbon and nitrogen in the northern California current system: comparison of offshore, river plume, and coastally upwelled water. *Prog Oceanogr* **53**:269-387
- Hodson RE, Azam F (1977) Determination and biological significance of dissolved ATP in sea water. In: Borun GA (ed) *Second bi-annual ATP methodology symposium*, SAI Technology Co, San Diego, Calif. pp 127-140
- Hodson RE, Maccubbin AE, Pomeroy LR (1981) Dissolved adenosine triphosphate utilization by free-living and attached bacterioplankton. *Mar Biol* **64**:43-51
- Honjo S (1980) Material fluxes and modes of sedimentation in the mesopelagic and bathypelagic zones. *J Mar Res* **38**:53-97
- Honjo S, Dymond J, Collier R, Manganini SJ (1995) Export production of particles to the interior of the equatorial Pacific Ocean during the 1992 Eqpac experiment. *Deep-sea Res II* **42**:831-870
- Horn DR, Horn BM, Delach MN (1973) Copper and Nickel content of ocean ferromanganese deposits and their relation to properties of the substrate. In: Morgenstein M (ed) *The origin and distribution of manganese nodules in the Pacific and prospects for exploration*, Hawaii Inst. Geophysics, Honolulu, pp 77-83
- Hulett HR (1970) Non-enzymatic hydrolysis of adenosine phosphates. *Nature* **225**:1248-1249
- Hyun JH, Choi JK, Yang EJ, Kim KH (1998) Biomass and productivity of bacterioplankton related to surface water divergence in the northeast equatorial Pacific Ocean. *J Microbiol* **36**(3):151-158
- Hyun JH, Yang EJ (2005) Meso-scale spatial variation in bacterial abundance and production associated with surface convergence and divergence in the NE equatorial Pacific. *Aquat Microbiol Ecol* **41**:1-13
- Kaneko T, Ogawa K, Fukushima T (1995) Preliminary results of Meiofauna and bacteria abundance in an environmental impact experiment. In: Yamazaki T, Aso K, Okano Y, Tsurusaki K (eds) *Proceedings of the ISOPE-ocean mining symposium*, Tsukuba, Japan, 21-22 Nov 1995, pp 181-186
- Karl DM, LaRock PA, Morse JW, Sturges W (1976) Adenosine triphosphate in North Atlantic Ocean and its relationship to the oxygen minimum. *Deep-sea Res I* **23**:81-88
- Karl DM (1978) Distribution, abundance, and metabolic states of microorganisms in the water column and sediments of the Black Sea. *Limnol Oceanogr* **23**:936-949
- Karl DM (1980) Cellular nucleotide measurements and applications in microbial ecology. *Microbiol Rev* **44**:739-796
- Karl DM (1986) Determination of in situ microbial biomass, viability, metabolism, and growth. In: Poindexter JS, Leadbetter ER (eds) *Bacteria in nature*, Plenum Press Co, pp 85-176
- Karl DM (1993) Total microbial biomass estimation derived from the measurement of particulate adenosine-5'-triphosphate. In: Kemp PF, Sherr BF, Sherr EB, Cole JJ (eds) *Handbook of methods in aquatic microbial ecology*, Lewis Publishers, pp 359-368
- Karl DM (1995) Ecology of free-living, hydrothermal vent microbial communities. In: Karl DM (ed) *The microbiology of deep-sea hydrothermal vents*, CRC Press, pp 36-110
- Kessler WS (2006) The circulation of the eastern tropical Pacific : a review. *Prog Oceanogr* **69**:181-217
- Kim HJ, Hyeon KS, Yoo CM, Chi SB, Khim BK, Kim DS (2010) Seasonal variations of particle fluxes in the northeastern equatorial Pacific during normal and weak El Niño periods. *Geosci J* **14**(4):415-422
- Kim KH (2009) Biogeochemical and microbiological response associated with the global climatic disturbance in the northeast equatorial Pacific. Ph.D. Thesis, Inha University, 158 p
- Kim KH, Hyun JH, Son SK, Son JW (2008) Distribution patterns of carbon and nitrogen contents in the sediments of the northeast equatorial Pacific Ocean. *J Korean Soc*

- Oceanogr **13**:210-221
- Köster M, Meyer-Reil LA (2001) Characterization of carbon and microbial biomass pools in shallow water coastal sediments of the southern Baltic Sea (Nordrügensch Bodden). *Mar Ecol Prog Ser* **214**:25-41
- Manini E, Fiordelmondo C, Gambi C, Pusceddu A, Danovaro R (2003) Benthic microbial loop functioning in coastal lagoons: a comparative approach. *Oceanol Acta* **26**:27-38
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries (1998) A report on '98 Deep Sea Bed Mineral Resources Exploration. MOMAF, 1209 p
- Montagona PA (1984) In situ measurement of meiobenthic grazing rates on sediment bacteria and edaphic diatoms. *Mar Ecol Prog Ser* **18**:119-130
- Müller PJ, Hartmann M, Suess E (1988) Environment of manganese nodule. In: Halbach P, Friedrich G, von Stackelberg U (eds) *The manganese nodule belt of the Pacific Ocean*, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, pp 70-141
- Musat N, Werner U, Knittel K, Kolb S, Dodenhof T, van Beusekom JEE, de Beer D, Dubilier N, Amann R (2006) Microbial community structure of sandy intertidal sediments in the North Sea, Sylt-Rømø Basin, Wadden Sea. *Syst Appl Microbiol* **29**:333-348
- Parsons TR, Maita Y, Lalli CM (1984) *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press, 173 p
- Piper DZ, Rude PD, Monteith S (1987) The chemistry and mineralogy of holed burrows in pelagic sediment at DOMES site A: the equatorial north Pacific. *Mar Geol* **74**:41-55
- Poremba K (1994) Simulated degradation of phytodetritus in deepsea sediments of the NE Atlantic. *Mar Ecol Prog Ser* **105**:291-299
- Porter KG, Feig YS (1980) The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnol Oceanogr* **25**:943-948
- Quéric NV, Soltwedel T, Arntz WE (2004) Application of a rapid direct viable count method to deep-sea sediment bacteria. *J Microbiol Meth* **57**:351-367
- Raghukumar C, Laka Bharathi PA, Ansari ZA, Shanta Nair, Ingole B, Sheelu G, Mohandass C, Nagender Nath B, Nimi Rodrigues (2001) Bacterial standing stock, meiofauna and sediment-nutrient characteristics: indicators of benthic disturbance in the central Indian Basin. *Deep-sea Res II* **48**:3381-3399
- Raghukumar C, Nagender Nath B, Sharma R, Bharathi PAL, Dalal SG (2006) Long-term changes in microbial and biochemical parameters in the Central Indian Basin. *Deep-sea Res I* **53**:1695-1717
- Rijken M (1979) Food and food uptake in *Arenicola marina*. *Neth J Sea Res* **13**:406-421
- Rowe G, Sibuet M, Deming J, Khripounoff A, Tietjen J, Macko S, Theroux R (1991) 'Total' sediment biomass and preliminary estimates of organic carbon residence time in deep-sea benthos. *Mar Ecol Prog Ser* **79**:99-114
- Schriever G, Ahnert A, Bluhm H, Borowski C, Thiel H (1997) Results of the large scale deep-sea environmental impact study DISCOL during eight years of investigation. In: *Proceedings of the 7th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Honolulu, USA, 25-30 May 1997, pp 438-444
- Smith CR, Hoover DJ, Doan SE, Pope RH, DeMaster DJ, Dobbs FC, Altabet MA (1996) Phytodetritus at the abyssal sea floor across 10° of latitude in central equatorial Pacific. *Deep-sea Res II* **43**:1309-1338
- Smith CR, Berelson W, DeMaster DJ, Dobbs FC, Hammond D, Hoover DJ, Pope RH, Stephens M (1997) Latitudinal variations in benthic processes in the abyssal equatorial Pacific: control by biogenic particle flux. *Deep-sea Res II* **44**:2295-2317
- Smith KL Jr, Kaufmann RS, Balawin RJ, Carlucci AF (2001) Pelagic benthic coupling in the abyssal eastern North Pacific: an 8-year time-series study of food supply and demand. *Limnol Oceanogr* **46**:543-556
- Suess E (1980) Particulate of organic carbon flux in the ocean: surface productivity and oxygen utilization. *Nature* **288**:260-263
- Tietjen JH (1992) Abundance and biomass of metazoan meiobenthos in the deep sea. In: Rowe GT, Pariente V (eds) *Deep-sea food chains and global carbon cycles*, Kluwer Academic Publishers Co, pp 45-62
- Trueblood DD, Ozturgut E (1997) The benthic impact experiment: a study of the ecological impacts of deep seabed mining on abyssal benthic communities. In: *Proceedings of the 7th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Honolulu, USA, 25-30 May, pp 481-487
- Turley CM, Dixon JL (2002) Bacterial numbers and growth in surfacial deep-sea sediments and phytodetritus in NE Atlantic: relationships with particulate organic carbon and total nitrogen. *Deep-Sea Res I* **49**:815-826
- Vanucci S, Dell'Anno A, Pusceddu A, Fabiano M, Lampitt RS, Danovaro R (2001) Microbial assemblages associated with sinking particles in the Porcupine Abyssal Plain (NE Atlantic Ocean). *Prog Oceanogr* **50**:105-121
- Verardo DJ, Froelich PN, McIntyre A (1990) Determination

of organic carbon and nitrogen in marine sediments using the Carlo Erba Na-1500 Analyzer. Deep-Sea Res II **37**:157-165

Yang EJ, Choi JK, Hyun JH (2004) Distribution and structure of heterotrophic protest communities in the northeast equatorial Pacific Ocean. Mar Biol **146**:1-15

Yang YL, Elderfield H, Ivanovich M (1990) Glacial to

Holocene changes in caronate and clay sedimentation in the equatorial Pacific ocean estimated from thorium-230 profiles. Paleoceanography **5**:789-809

Received Oct. 18, 2010

Revised Nov. 20, 2010

Accepted Dec. 21, 2010