

북동적도 태평양 KODOS 97-2 해역 심해저 퇴적물 내의 ATP 분포양상

현정호 · 김경홍 · 지상범 · 문재운
한국해양연구소 심해저자원연구센터

Distribution of ATP in the Deep-Sea Sediment in the KODOS 97-2 Area, Northeast Equatorial Pacific Ocean

JUNG-HO HYUN, KYEONG-HONG KIM, SANG-BUM CHI AND JAI-WOON MOON

*Deep-Sea Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute,
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

심해저 망간단괴 채광에 따른 저층생태환경의 변화를 평가하기 위한 기초환경연구의 일환으로 북동적도 태평양 심해저 퇴적물 내의 총 ATP(T-ATP), 용존 ATP(D-ATP) 그리고 입자성 ATP(P-ATP)의 농도 및 수직분포양상을 연구하였다. T-ATP는 퇴적물 6 cm 깊이 내에서 4.4~40.6, D-ATP는 0.6~16.1, 그리고 P-ATP는 3.0~29.2 ng/g dry sediment의 범위로 변했다. T-ATP의 약 84%, D-ATP의 약 81% 그리고 P-ATP의 약 74%가 표층 퇴적물 2 cm 이내에 분포하는 것으로 나타났으며, 분포양상이 퇴적물 내의 함수율과 높은 상관관계를 나타냈다. 이러한 결과는 심해저 퇴적물 내의 미생물(P-ATP) 분포가 수층으로부터 전달되는 유기탄소에 의해 결정됨을 의미한다. 다중주상 시료채집기를 사용해 획득한 퇴적물에서 P-ATP 최대층이 0~0.5 cm 깊이 내에 존재하는 것으로 나타나, 표층이 교란되는 상자형 퇴적물 채집기보다는 다중주상 시료채집기가 심해저 퇴적물내 ATP의 미세수직구조의 연구를 위해서 더욱 효과적인 것으로 판명되었다. 결론적으로 ATP 농도가 퇴적물 깊이 6 cm 이내에서 뚜렷한 수직분포양상을 보이는 것으로 미루어, ATP 분포양상이 향후 심해저 광업에 따른 미생물 생체량 변화를 평가하기 위한 유용한 환경기초자료로 사용될 수 있는 것으로 나타났다.

Environmental baseline information is necessary in order to assess the potential environmental impact of future manganese-nodule mining on the deep-seabed ecosystem. Total ATP (T-ATP), dissolved ATP (D-ATP) and particulate ATP (P-ATP) were measured to estimate total microbial biomass and to elucidate their vertical distribution patterns in the seabed of KODOS (Korea Deep Ocean Study) area, northeast equatorial Pacific Ocean. Within the upper 6 cm depth of sediment, the concentrations of T-ATP, D-ATP and P-ATP ranged from 4.4 to 40.6, from 0.6 to 16.1, and from 3.0 to 29.2 ng/g dry sediment, respectively. Approximately 84% of T-ATP, 81% of D-ATP, and 74% of P-ATP were present within the topmost 2 cm depth of sediment, and the distributions of ATP were well correlated with water content in the sediment. These results indicate that the distribution of total microbial biomass was largely determined by the supply of organic matter from surface water column. Fine-scale vertical variations of ATP were detected within 1-cm thick veneer of the sediment samples collected by multiple corer, while no apparent vertical changes were observed in the box-cored samples. It is evident that the box-core samples were disturbed extensively during sampling, which suggests that the multiple corer is a more appropriate sampling gear for measuring fine-scale vertical distribution pattern of ATP within thin sediment veneer. Overall results suggest that the concentrations of ATP, given their clear changes in vertical distribution pattern within 6 cm depth of sediment, are a suitable environmental baseline parameter in evaluating the variations of benthic microbial biomass that are likely to be caused by deep-seabed mining operation.

서 론

육상의 자원이 고갈 되어감에 따라 심해저 면에 널리 분포하는 망간단괴는 미래의 잠재적인 광물자원으로서 많은 관심을 받

아왔다(Emery and Broadus, 1989; Earney, 1990). Ni, Co, Mn 및 Cu 등과 같은 전략금속광물들을 전량 외국으로부터의 수입에 의존하는 우리나라는 안정적인 전략금속광물의 확보를 위해, 1994년에 북동적도 태평양의 클라리온-클리퍼톤 균열대(Claron-

Clipperton Fracture Zone) 내의 약 150,000 km²(남한 면적의 약 1.5배) 지역에 심해저 망간단괴 채광을 위한 단독 광구를 UN으로부터 할당받은 이래 최종 개발 유망광구(75,000 km²)의 확보를 위한 정밀탐사를 실시해 오고 있다(상공자원부, 1994; 통상산업부, 1995; 해양수산부, 1996, 1997). 따라서 향후 망간단괴에 대한 보다 효과적인 탐사, 채광 및 제련기술의 개발 및 축적은 국가 경제적 측면에서 소홀히 할 수 없는 중요한 분야이다.

망간단괴 채광 및 제련에 있어 심각히 고려되어야 할 사항들 중의 하나로 환경문제를 들 수 있다. 채광 및 제련에 수반되어 일어날 수 있는 환경변화는 수층과 저층의 물리, 화학, 지질 및 생물적 환경요인에 광범위하게 영향을 미치게 된다(Curtis, 1982; Thiel and Schriever, 1993). 특히 저층의 경우, 채광기에 의한 직접적인 영향 외에 채광기 작동에 따른 부유퇴적물에 의한 저서생태환경의 변화를 들 수 있다. 환경교란 이전의 생태환경을 파악하는 것은 이러한 인위적인 활동에 따른 환경의 변화정도를 파악하기 위한 가장 기본적인 과정이며, 이는 연안역 개발에 따른 저서생태환경 영향평가를 위한 연구와 유사한 과제라 할 수 있다. 외국에서는 이미 미국, 러시아, 일본 및 독일에서 인위적인 환경교란을 통해, 채광에 따른 저층생태환경의 변화를 파악하기 위한 시도가 이루어져 왔다(Thiel et al., 1991; Bluhm et al., 1995; Kaneko et al., 1997; Schriever et al., 1997; Trueblood and Ozturgut, 1997). 현재까지 국내의 심해저 생물환경 연구로는 1995년 이래 연 1 회 실시하고 있는 심해연구과제(KODOS; Korea Deep Ocean Study) 중 환경기초연구의 결과로서 보고된, Hyun et al.(1997b)의 수층 미생물 생산력 및 성장제한 요인에 관한 연구와, Choi(1996)와 Kim(1997)에 의한 대형 및 중형 저서동물의 저층에서의 분포양상에 관한 연구가 있으나, 미생물 생체량 및 분포양상에 관한 연구는 현재까지 수행되지 않았다.

저층생태계에서 미생물은 상위그룹 생물군(중형저서생물)의 영양원으로서 전체 심해저 저서생태계 내 탄소생체량의 약 85% 정도를 차지하는 것으로 알려져 왔다(Tietjen, 1992). 따라서 미생물 생체량의 파악은 저서생태계의 에너지흐름 및 영양상태를 이해하기 위해 필히 연구되어야 할 중요한 분야의 하나이다. ATP는 모든 생물체 내에 존재하며, 생물학적으로 쉽게 분해(biologically labile)가 되나(Azam and Hodson, 1977; Hodson et al., 1981), 화학적으로는 안정한 형태를 이루어(Hulett, 1970) 추출 및 분석이 용이하며, 최저분석 한계가 낮아(10⁻¹²M) 연안역뿐 아니라 열수 및 심해저를 포함한 여러 해양환경에서 총 미생물 군집의 생체량측정 및 생태연구에 널리 사용되어 왔다(Holm-Hansen and Booth, 1966; Hyun et al., 1997a; Karl, 1978; LaRock et al., 1979; Haberstroh and Karl, 1989).

본 연구에서는 KODOS 97-2 기간중 북동적도 태평양 내에 위치한 대한민국 광구 내의 심해환경연구 지역에서, 상자형 퇴적물 시료 채집기(box corer)와 다중주상 퇴적물시료 채집기(multiple corer)를 사용하여 채취한 퇴적물 내의 ATP(adenosine 5'-triphosphate) 분석을 통해, 망간단괴 채광구역 내의 저층미생물 생체량(total microbial biomass)과 분포양상을 파악하고자 하였다. 본 연구의 결과는 일차적으로 향후 심해저 광업이 저층 미생물 생태계에 미치는 영향을 평가하기 위해 실시할 예정인 저층교란 실험(benthic impact experiment)시 발생 가능한 저서미생물 군집의

정량적 변동을 파악하기 위한 기초 환경자료로 이용될 것이다.

재료 및 방법

시료채취

연구해역은 북동적도 태평양의 클라리온-클리퍼톤 균열대 내에 자리잡은 한국의 심해저 망간단괴 채광구역 내의 환경연구 지역으로 북위 9° 50'~10° 30' 그리고 서경 131° 30'~132° 10'에 위치한다(Fig. 1). 시료는 KODOS 97-2 기간중 정점 I-1(131° 53'W; 10° 19'N), 정점 I-21(131° 17'W; 10° 30'N) 그리고 정점 I-25(131° 17'W; 10° 27'N)에서 상자형과 다중주상 퇴적물시료 채집기를 이용하여 채취하였다. 퇴적물 내의 함수율, 유기탄소, T-ATP(total ATP = 용존+입자성 ATP), 그리고 D-ATP(dissolved ATP) 측정을 위해 직경 3.6 cm 크기의 플라스틱 관을 사용하여 각 정점당 2 개씩의 퇴적물 부시료(subcore)를 채취하였다. 각각의 시료는 9~10 개층(0~0.25 cm층, 0.25~0.5 cm층(또는 0~0.5 cm층), 0.5~0.75 cm층, 0.75~1.0 cm층, 1~1.5 cm층, 1.5~2 cm층, 2~3 cm층, 3~4 cm층, 4~5 cm층 그리고 5~6 cm층)으로 나누어 취한 후, 실험 목적에 따라 다음과 같이 전처리 및 분석을 행하였다.

입도 및 함수율

퇴적물의 입도는 약 10 g의 퇴적물을 3~4 일간 증류수로 반복 세척하여 염분을 제거하고, 0.5%의 과산화수소수(H₂O₂)로 유기물을 제거한 후, 자동입도 분석기(Master Sizer)를 이용하여 분석하였다. 퇴적물의 함수율(W)은 퇴적물 내에 함유되어 있는 해수와 구성 입자간의 무게 비로 정의된다. 층별로 채집된 퇴적물시료 약 3~10 g(wet wt.)을 냉동건조기(일신랩, PVTFD 10R)에서 24 시간 동안 건조시켜 무게를 측정한 후, 다음 식에 의해 함수율을 계산하였다.

$$W(\%) = 100 \times (\text{wet wt.} - \text{dry wt.}) / \text{wet wt.}$$

여기서, wet wt는 원시료의 무게, dry wt는 건조된 시료의 무게

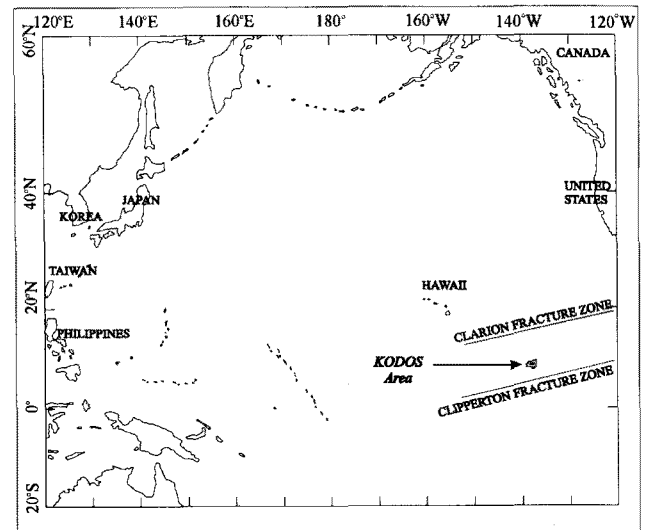


Fig. 1. A map showing Korea Deep Ocean Study (KODOS) area.

를 나타낸다.

POC(particulate organic carbon) 함량

상지형과 다중주상 퇴적물시료 채집기를 이용해 채집된 퇴적물을 층별로 유리 비이커에 담아 냉동건조기로 이틀동안 건조시킨 후, 마노사발(agate mortar)로 분말화하였다. 분말화된 퇴적물시료는 40°C 건조로에 하루이상 보관하였다가 주석용기(tin cup)에 10~15 mg 정도를 담아서 원소분석기(CE Instrument, EA1110)를 이용해 분석하였다. 탄소함량의 분석을 위한 표준물질은 BCSS-1(Berman, 1987)을 이용하였다.

ATP 분석

총 ATP 시료의 전처리를 위해 층별로 채집된 퇴적물시료를 0.5M 인산 용액 10 ml에 넣고 4°C에서 10~15 분간 ATP를 추출한 후, 2,500 rpm에서 15 분간 원심분리를 사용하여 ATP를 퇴적물로부터 분리시켰다. 분리된 ATP 용액 5 ml에 이온물질(예: Ca²⁺) 및 중금속 이온에 의한 발광감소 효과를 방지하기 위해 phosphate buffer(60mM; Sigma Chemical Co.)로 만든 0.048M Na₂-EDTA 용액 1 ml을 더한 후, 1N NaOH 용액을 사용하여 pH를 7.4로 조정하였다. 마지막으로 phosphate buffer(60mM)를 사용하여 총 시료량을 10 ml로 맞춘 후, 실험실에서의 분석 때까지 -20°C에서 냉동 보관하였다(Karl, 1993). 용존 ATP는 층별로 채집된 퇴적물시료를 2,500 rpm에서 15 분간 원심분리시킨 후 상등액을 취하여 0.5M의 인산 용액에 넣고 위에 설명된 바와 같이 ATP를 추출하여 pH를 7.4로 조정한 후, 분석 때까지 -20°C에서 보관하였다(Karl, 1993). 실험실에서의 ATP 분석은 luciferine—luciferase 간의 발광작용시 분해되는 ATP 양이 Luminometer(Turner designs model 20e)를 통해서 측정되는 빛의 세기와 비례하여 나타나는 점을 이용하여 측정하였다.

결과 및 토의

입도 및 함수율

퇴적물의 입도는 전 정점의 깊이 6 cm 이내에서 입자의 평균

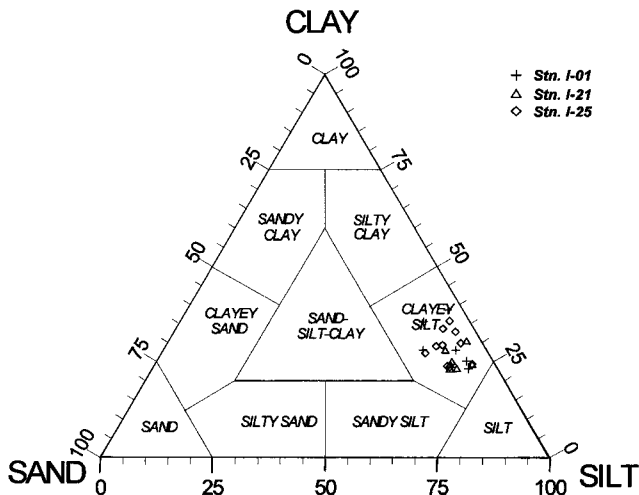


Fig. 2. Ternary sediment classification scheme based on sand-silt-clay ratios.

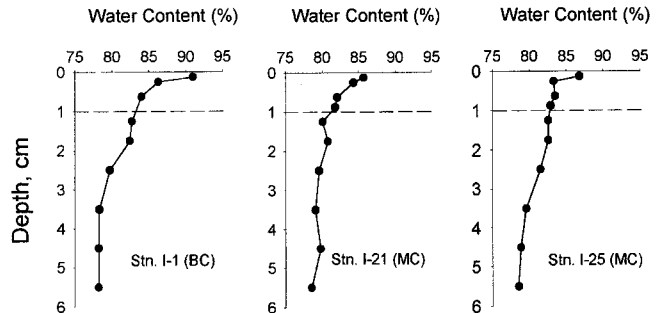


Fig. 3. Vertical profiles of water content in the sediment samples collected with box corer (BC) and multiple corer (MC).

직경이 19.17±5.77 μm(10.7~25.23 μm) 크기인 이질 실트(clayey silt)로서 전형적인 심해저 퇴적물의 입도특성을 나타냈다(Fig. 2). 함수율은 깊이 6 cm 이내에서 77% 이상의 높은 비율을 나타냈으며, 특히 0.25 cm 이내의 깊이에서 85% 이상의 높은 함수율을 나타냈다(Fig. 3). 미생물의 영양원(용존 또는 입자성 유기탄소)들이 수층을 통해서 심해저 면에 공급 되는 점을 감안할 때, 수분을 많이 함유한 심해저 퇴적물의 표층이 그 아래의 층과는 생물학적으로 다른 서식환경을 지니고 있음을 짐작할 수 있다. 이점에 관해서는 ATP의 수직적 분포양상과 연관지어 아래에서 토의하였다.

POC 함량

본 연구에서는 총탄소 함량을 유기탄소 함량으로 간주하였다. 이는 본 연구지역의 수심이 평균 5,000 m 정도로 탄산염 보상수심(CCD; calcite compensation depth)보다 깊기 때문에 퇴적물 내에서 무기탄소(CaCO₃)함량이 극히 작을 것으로 사료되었기 때문이다. 실제로 본 연구 해역의 표층하 10 cm까지의 퇴적물 시료내 총탄소 함량과 유기탄소 함량(퇴적물 시료를 1N HCl로 산처리 하여 CaCO₃를 제거한 후 분석)을 동시에 분석, 비교한 결과 총탄소 함량에 대한 유기탄소 함량의 비가 평균 0.99±0.04로 두 값이 다르지 않은 것으로 나타났다(해양수산부, 1997).

유기탄소량은 4.6~6.2 mg C/g dry sediment의 범위로 나타났으며(Fig. 4), 역시 표층에서 깊어질수록 감소하는 양상을 나타내 유기영양원이 대부분 수층을 통해 표층에 축적된 후 분해되

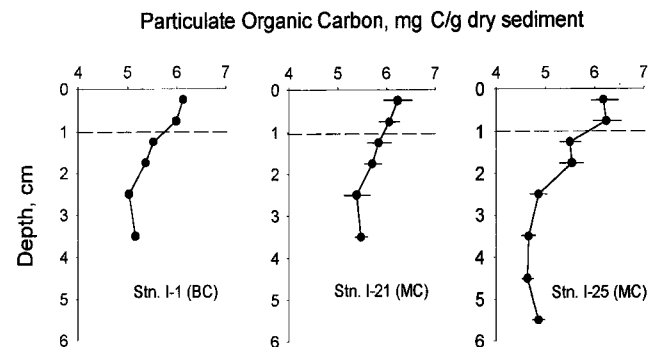


Fig. 4. Vertical profiles of particulate organic carbon (POC) in the sediment samples collected with box corer (BC) and multiple corer (MC). Bars indicate the range of standard deviation.

여 공급됨을 알 수 있다. 표층퇴적물 0~1 cm 깊이 내에서 정점간 분포양상은 6.1~6.2 mg C/g dry sediment의 작은 변화폭을 나타내 조사된 정점들이 균일한 환경을 나타내고 있음을 시사하였다. 입도, 함수율 및 POC 함량 등에서 나타난 일반적인 분석결과는 KODOS 지역내 표층퇴적층의 토질공학(입도 및 함수율 등) 및 지화학적(금속함량 및 POC 함량 등) 분포특성이 균일하다는 연구결과(Jung *et al.*, 1998)와 일치하는 것이다.

T-ATP(total ATP)

세 정점에서 T-ATP는 깊이 6 cm 이내에서 4.4~40.6 ng/g dry sediment의 범위로 나타났다. 퇴적물 6 cm 깊이 내에 존재하는 T-ATP 양의 60% 이상이 표층 1 cm 이내에 분포하였으며, 80% 이상이 표층 2 cm 깊이 내에 존재하는 것으로 나타났다(Fig. 5). 표층 0~1 cm 깊이 내에 T-ATP가 15.7~38.5 ng/g dry sediment의 범위로 변한 것은 열수부근 심해저 퇴적물 내의 98 ng ATP/g dry sediment(Karl *et al.*, 1984)나, 수층의 일차생산력이 높은 북동대서양의 심해저(4,897 m)의 표층 0~1 cm 깊이내의 84 ng ATP/g dry sediment(Ernst and Goerke, 1974: cited in table 11 of Karl, 1980)보다는 낮은 값이다. 이는 KODOS 지역의 수층이 상대적으로 빈영양 환경으로 심해저 퇴적물의 영양원(유기탄소)의 공급이 적기 때문이다. 그러나 표층 1~2 cm 깊이 내 T-ATP의 집중적인 분포는 수층으로부터 영양원이 공급되는 표층에 심해저 생물들의 서식환경이 조성되어 있음을 의미한다. 표층 퇴적물(0~0.5 cm층) 내 T-ATP의 정점간 분포는 22.3~38.9 ng/g dry sediment로 장기적으로 안정된 저서생물 서식 환경요인(입도, 함수율 및 퇴적물 내의 유기탄소함량)에 비해 다소 변화폭이 큰 것으로 나타났다. 이는 심해저의 미생물 분포가 수층으로부터의 불규칙한 먹이공급(episodic event)을 포함한 입자성 유기물의 유입율(POC flux)에 의해 영향을 받아(Deming and Yager, 1992), 지역적으로 분포양상이 심하게 변하고 있음을 의미한다.

D-ATP(dissolved ATP)

심해저 환경에서 D-ATP의 주요공급원은 수층 유기물들의 침강에 의한 것으로 보이며, 박테리아가 D-ATP를 유기탄소 및 에너지원으로 사용함으로써, D-ATP의 제거에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 왔다(Azam and Hodson, 1977; Hodson *et al.*,

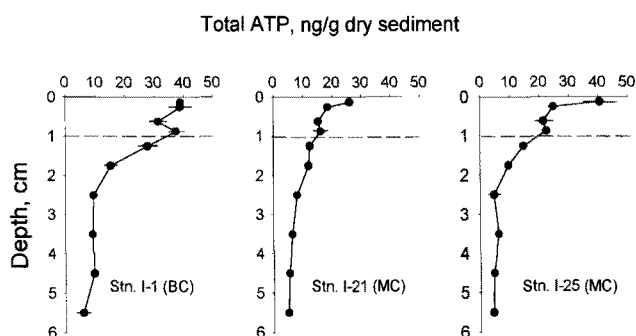


Fig. 5. Vertical profiles of total ATP in the sediment samples collected with box corer (BC) and multiple corer (MC). Bars indicate the range of standard deviation.

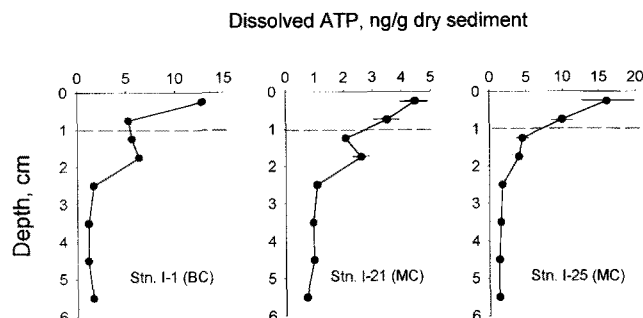


Fig. 6. Vertical profiles of dissolved ATP in the sediment samples collected with box corer (BC) and multiple corer (MC). Bars indicate the range of standard deviation.

1981). 따라서 D-ATP의 농도는 다른 용존 유기탄소의 지표로서 사용될 수 있으며, 저서생태계에서 미생물의 서식환경을 파악하는 데 유용하게 이용될 수 있다. 용존 ATP는 0.7~16.1 ng/g dry sediment의 범위로 나타났으며(Fig. 6), 수직적으로는 0~0.5 cm 층에서 최대값을 나타냈다가 이후 급격히 감소하여, 2 cm 깊이 이하에서는 일정하게 낮은 값을 나타냈다. 수직 분포양상에서 볼 수 있듯이 D-ATP는 수층으로부터 퇴적물로 전달되며, 이로부터 여러 용존 유기물들 역시 수층으로부터 심해저 퇴적층으로 공급됨을 짐작할 수 있다.

깊이 6 cm 이내의 퇴적물에서 D-ATP는 T-ATP의 12.0~49.3% (평균 25.3±11.1%)를 차지하는 것으로 나타났다(Table 1). 다른

Table 1. Concentrations (ng/g dry sediment) of total ATP (T-ATP) and dissolved ATP (D-ATP), and the percentage of D-ATP to T-ATP

| Station | Depth (cm) | T-ATP | D-ATP | (D-ATP/T-ATP)×100 |
|---------|------------|--------------------|-------|-------------------|
| I-1 | 0.0-0.5 | 38.91 ¹ | 12.81 | 32.93 |
| | 0.5-1.0 | 34.41 ² | 5.24 | 15.24 |
| | 1.0-1.5 | 27.82 | 5.59 | 20.08 |
| | 1.5-2.0 | 15.33 | 6.32 | 41.24 |
| | 2.0-3.0 | 9.55 | 1.68 | 17.57 |
| | 3.0-4.0 | 9.24 | 1.16 | 12.51 |
| | 4.0-5.0 | 9.63 | 1.16 | 12.00 |
| I-21 | 5.0-6.0 | 5.95 | 1.61 | 27.06 |
| | 0.0-0.5 | 22.29 ¹ | 4.47 | 20.06 |
| | 0.5-1.0 | 15.73 ² | 3.51 | 22.28 |
| | 1.0-1.5 | 12.43 | 2.07 | 16.64 |
| | 1.5-2.0 | 12.01 | 2.61 | 21.70 |
| | 2.0-3.0 | 8.05 | 1.09 | 13.50 |
| | 3.0-4.0 | 6.52 | 0.95 | 14.65 |
| I-25 | 4.0-5.0 | 5.40 | 0.99 | 18.26 |
| | 5.0-6.0 | 5.05 | 0.72 | 14.32 |
| | 0.0-0.5 | 32.74 ¹ | 16.14 | 49.29 |
| | 0.5-1.0 | 22.02 ² | 10.00 | 45.41 |
| | 1.0-1.5 | 14.73 | 4.47 | 30.37 |
| | 1.5-2.0 | 9.67 | 4.02 | 41.61 |
| | 2.0-3.0 | 4.78 | 1.77 | 37.01 |
| | 3.0-4.0 | 6.37 | 1.58 | 24.81 |
| | 4.0-5.0 | 4.72 | 1.38 | 29.28 |
| | 5.0-6.0 | 4.43 | 1.32 | 29.92 |

¹Average concentration from 0-0.25 and 0.25-0.5 cm in depth.

²Average concentration from 0.5-0.75 and 0.75-1 cm in depth.

심해저 퇴적물 내의 D-ATP와 T-ATP의 비율에 대한 보고는 발견할 수 없었으나, 이는 미국 미시간 호수 수층의 12%(Maki *et al.*, 1983) 및 미국 동남부 대륙붕 외곽 표층수의 평균 12%(Hodson *et al.*, 1981)보다는 높은 값이며, 남극 Bransfield 해협 표층 혼합층에서 D-ATP가 T-ATP의 약 30% 정도를 차지한다는 보고(Nawrocki and Karl, 1989)와 유사한 값이다. 결론적으로 심해저 퇴적물 내에서 D-ATP의 보정이 이루어지지 않으면 D-ATP의 농도가 최대값을 나타내는 표층 퇴적물(0~0.5 cm 깊이)의 생체량(living biomass)을 과대평가하는 결과를 야기하게 된다. 따라서 퇴적물내 미생물의 정확한 생체량(P-ATP)을 측정하기 위해서는 D-ATP의 양을 고려해야 한다.

P-ATP(particulate ATP)

현재까지 알려진 일반적인 미생물 생체량 측정 방법들은 (1) 배양법(culture methods), (2) 현미경 관찰법(direct microscopy), (3) 생화학적 방법(biochemical methods) 등을 들 수 있다(Karl, 1986). 일반적으로 배양법은 좁은 배양범위내(배양조건)에 적합한 세포들만 증식을 하므로 자연계 내의 생체량을 과소 평가하게 된다. 현미경을 이용한 방법은 세포수 계수를 통한 생체량 측정방법으로 기본적으로 널리 이용되어 왔으나, 퇴적물이나 부유성 입자가 많은 수서환경에서는 세포들을 입자들로부터 분리해 내야 하는 어려움이 내재되어 있다. 배양법 및 현미경 관찰법의 한계를 극복하기 위해 생화학적 방법들이 고안되어왔다. 이상적인 생화학적 생체량 측정방법이 되기 위해서는 (1) 측정대상물질이 관심있는 생물군들에 존재해야 하며, (2) 세포의 죽음과 함께 빠른 시간 내에 분해되어 환경에서 없어져야 하며, (3) 환경변화에 상관없이 세포 내에서 비교적 일정한 비율을 유지해야 하며, (4) 추출 및 정밀한 분석이 용이해야 한다(Karl, 1986). ATP는 모든 생물체 내에 존재하며, 추출 및 분석이 용이하며, 낮은 농도에서도(10^{-12} M) 분석이 가능하여 연안역 뿐 아니라 열수 및 심해저와 같은 여러 해양환경에서 총 미생물 군집의 생체량 측정에 널리 사용되어 왔다(Karl, 1980, 1995).

심해저 퇴적물 내의 ATP 측정을 통한 미생물 생체량 측정시 고려되어야 할 사항은, ATP가 모든 생물에 존재하기 때문에 퇴적물 내에 같이 분포하는 중형저서 동물($32 \mu\text{m} < \text{개체크기} < 1 \text{ mm}$)에 의해 그 생체량이 과대평가될 수도 있다는 점이다. 실제 중형저서동물은 심해저 퇴적물 내에서 전체 생체량의 4~16%로 대형저서동물과 비슷한 생체량을 나타내나(Tietjen, 1992), 대수량에서는 대형저서동물을 능가하는 중요한 생물군으로 분류되고 있다(Gerlach, 1971).

본 연구지역에서 미생물 및 중형저서동물의 상대적인 탄소 생체량 조사가 이루어지지 않았으나, 여러 심해저 환경에서 미생물의 탄소 생체량이 저서생태계내 총탄소 생체량의 85% 정도를 차지한다는 보고(Tietjen, 1992)를 감안하여 본 조사의 P-ATP를 미생물 생체량으로 보고하였다. T-ATP에서 D-ATP를 뺀 값으로 나타난 미생물의 생체량(P-ATP)은 $3.0 \sim 29.2 \text{ ng/g dry sediment}$ (평균 10.2 ± 7.2)의 분포를 나타냈으며(Fig. 7), 이 값들에서 심해저 퇴적물내 중형저서동물의 탄소생체량 추정치(10%)(Tietjen, 1992)를 제거한 후 나타난 조사지역내 미생물 생체량은 $2.7 \sim 26.2 \text{ ng/g dry sediment}$ (평균 9.1)이다. 전체 생체량의 42~

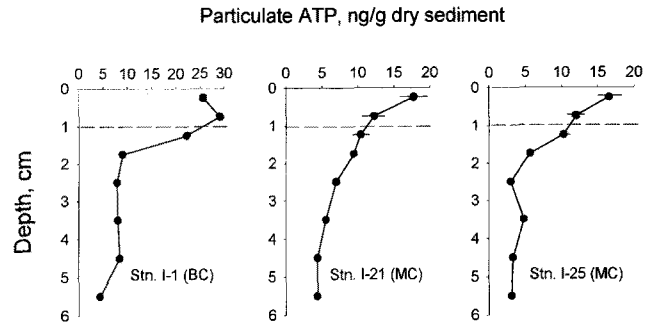


Fig. 7. Vertical profiles of particulate ATP in the sediment samples collected with box corer (BC) and multiple corer (MC). Bars indicate the range of standard deviation.

49%가 표층 1 cm 깊이 이내에 분포하는 것으로 나타났으며, 이러한 수직적 분포양상은 표층에서 탄소원으로 이용 가능한 D-ATP의 농도가 높게 나타난 것(Fig. 6)과 연관 있는 것으로 보인다. 본 연구에서 수층으로부터 영양원이 공급되는 표층 1 cm 깊이내 P-ATP의 집중적인 분포로부터 중형저서동물의 먹이원으로서의 미생물의 분포양상이 중형 및 대형저서동물의 분포양상에 직접적으로 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 본 조사지역에서 Kim(1997)은 중형저서동물이 0~1 cm 깊이 내에서 주로 분포한다는 연구 결과를 보고하였으며, 또한 Choi(1996)는 대형저서동물의 50% 정도가 표층 0~2 cm 내에 분포한다고 보고하였다. 결론적으로 표층에서 2 cm 깊이 내에 P-ATP가 뚜렷한 수직분포양상을 나타내어(Fig. 7), P-ATP의 측정은 환경 평가적인 관점에서 최소한 채광과 관련된 대규모의 저층환경 충격실험시 미생물 생체량 변동으로부터 저층의 생태환경 변화를 평가하기 위한 유용한 수단으로 사용될 수 있음이 명백하다.

함수율 및 POC의 영향

ATP 분포양상과 연관된 주요원인을 보다 명확히 파악하기 위해 ATP의 수직적 분포양상과 함수율 및 POC와의 상관관계를 분석한 결과, T-ATP 및 P-ATP가 함수율 및 퇴적물 내의 POC 분포와 유의성이 있는 것으로 나타났(Fig. 8). 이는 ATP가 수층으로부터 퇴적물내로 공급되는 수분에 포함된 용존유기물(e.g., D-ATP) 및 퇴적물 내의 POC의 영향을 받아 주로 표층 퇴적층에 분포하는 사실을 뒷받침하는 것이다. 한편, P-ATP가 퇴적물 내의 POC와의 상관관계($r^2=0.43$, $p < 0.05$, $n=12$)보다 함수율과 더 높은 상관관계($r^2=0.62$, $p < 0.05$)를 보였다. 이러한 양상은 D-ATP의 경우 더욱 뚜렷이 나타나, D-ATP 분포가 함수율과는 밀접한 관계($r^2=0.70$, $p < 0.05$)가 있는 것으로 나타난 반면 퇴적물 내의 POC 분포와는 유의성이 없는 것으로($r^2=0.37$, $p > 0.05$, $n=23$) 나타났(Fig. 8). POC의 경우, 생물학적으로 난분해성(refractory) POC의 존재로 인해 P-ATP 분포양상과의 직접적 연관성이 함수율보다 낮게 나타나는 것으로 사료된다. 따라서, D-ATP와 같은 용존유기물을 포함하는 퇴적물 내의 함수율이, 수층으로부터 공급되어 미생물에 의해 이용되는(labile) POC 양과 함께, P-ATP의 수직분포양상과 밀접한 관계가 있는 중요한 환경요인으로 나타났다.

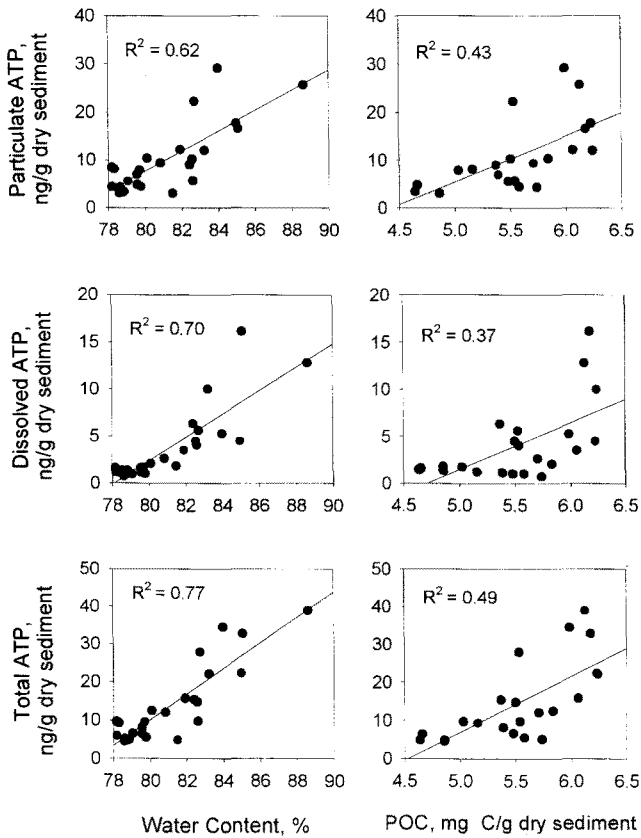


Fig. 8. Relationship of ATP vs. water content and ATP vs. particulate organic carbon (POC) in the sediment samples.

시료채취 방법에 따른 분포양상

본 연구에서 나타난 ATP 수직분포의 가장 큰 특징의 하나는 다중주상 퇴적물시료 채집기로 채취한 시료에서(정점 I-21, I-25) 깊이에 따른 ATP의 변화가 깊이 0~0.5 cm 층에서만 30% 이상(28.9~38.8%)의 차이를 보여 미생물의 분포가 표층 0.25 cm 깊이 내에 집중적으로 존재하는 것으로 나타났다. 반면, 상자형 퇴적물시료 채집기로 채집된 퇴적물시료(정점 I-1)의 ATP는 0~0.5 cm 사이의 깊이에서 균일하게 나타났으며, 0~1 cm 깊이 내에서도 약 4% 정도밖에 감소하지 않았다(Fig. 5). P-ATP의 수직분포에서도 상자형 퇴적물시료 채집기와 다중주상 퇴적물시료 채집기로 채취된 시료의 수직분포 양상이 뚜렷이 구분되어 나타났다(Fig. 7). 이는 상자형 퇴적물시료 채집기를 사용한 시료의 채집시 최소한 1 cm 이내의 퇴적층이 심하게 교란되었음을 의미한다. 향후 채광에 따른 저층교란 및 저서생태계 변화정도를 정확하게 평가하기 위해서는 환경충격 이전의 교란되지 않은 표층 퇴적물 시료내 미생물 생체량의 미세한 수직분포 양상을 파악하고 있어야 한다. 결론적으로 심해저 퇴적층 내에서의 미생물의 분포는 표층 0.5 cm 깊이 내에서 급격한 분포변화를 나타내기 때문에 미생물 생체량의 정확한 수직분포 양상을 파악하기 위해서는 다중주상 퇴적물시료 채집기의 사용이 필수적이다.

감사의 글

본 연구를 위한 시료채취를 도와주신 온누리호 선장님 및 승

조원, 그리고 해양연구소 심해저자원 연구센터 연구원들의 노고에 감사를 드립니다. 논문의 심사를 맡아 귀중한 시간을 내주신 조병철 교수님과 다른 한분의 심사인계도 감사의 마음을 전합니다. 본 연구는 '97 심해저광물자원 탐사사업(해양수산부) 및 심해저광물자원 개발기술 및 환경보전연구과제(과학기술처)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

상공자원부, 1994. '94 심해저 광물자원 탐사사업 보고서. 1권, 708 pp.
 통상산업부, 1995. '95 심해저 광물자원 탐사사업 보고서. 1권, 763 pp.
 해양수산부, 1996. '96 심해저 광물자원 탐사사업 보고서. 1권, 954 pp.
 해양수산부, 1997. '97 심해저 광물자원 탐사사업 보고서. 1권, 843 pp.
 Azam, F. and R.E. Hodson, 1977. Dissolved ATP in the sea and its utilization by marine bacteria. *Nature*, **267**: 696-698.
 Berman, S., 1987. Marine Sediment Reference Materials for Trace Metals and Other Constituents. National Research Council, Ottawa, KIAOR 6, 4 pp.
 Bluhm, H., G. Schriever and H. Thiel, 1995. Megabenthic recolonization in an experimentally disturbed abyssal manganese nodule area. *Mar. Georesour. Geotechnol.*, **13**: 393-416.
 Choi, J.W., 1996. Macrozoobenthic community in the deep sea soft-bottom of the KODOS 96-1 area, northeastern Pacific Ocean. *The Sea, J. Korean Soc. Oceanogr.*, **1**: 73-79.
 Curtis, C., 1982. The environmental aspects of deep ocean mining. *Oceanus*, **25**: 31-36.
 Deming, J.W. and P.L. Yager, 1992. Natural bacterial assemblages in deep-sea sediments: towards a global view. In: *Deep-sea Food Chains and the Global Carbon Cycle*, edited by Rowe, G. T. and V. Pariente, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 11-27 pp.
 Earney, F.C.F., 1990. *Marine Mineral Resources*. Routledge, London, 387 pp.
 Emery, K.O. and J.M. Broadus, 1989. Overview: marine mineral reserves and resources—1988. *Mar. Mining*, **8**: 109-121.
 Gerlach, S.A., 1971. On the importance of marine meiofauna for benthos community. *Oecologia*, **6**: 176-190.
 Haberstroh, P.R. and D.M. Karl, 1989. Dissolved free amino acids in hydrothermal vent habitats of the Guaymas Basin. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **53**: 2937-2945.
 Hodson, R.E., A.E. Maccubbin and L.R. Pomeroy, 1981. Dissolved adenosine triphosphate utilization by free-living and attached bacterioplankton. *Mar. Biol.*, **64**: 43-51.
 Holm-Hansen, O. and C.R. Booth, 1966. The measurement of adenosine triphosphate in the ocean and its ecological significance. *Limnol. Oceanogr.*, **11**: 510-519.
 Hulett, H.R., 1970. Non-enzymatic hydrolysis of adenosine phosphates. *Nature*, **225**: 1248-1249.
 Hyun, J.-H., B.W. Bennison and P.A. LaRock, 1997a. The

- formation of large bacterial aggregates at depth within the Louisiana hydrocarbon seep zone. *Microb. Ecol.*, **33**: 216—227.
- Hyun, J.-H., K.-Y. Lee, J.-M. Moon and K.-H. Kim, 1997b. Some results from environmental baseline study at KODOS (Korea Deep Ocean Study) area. Proceedings of International Symposium on Environmental Studies for Deep-Sea Mining, Tokyo, November 20—21, pp. 91—108.
- Jung, H.-S., C.-B. Lee, K.-S. Jeong and J.-K. Kang, 1998. Geochemical and mineralogical characteristics in two-color core sediments from the Korea Deep Ocean Study (KODOS) area, northeast equatorial Pacific. *Mar. Geol.*, **144**: 295—309.
- Kaneko, T., Y. Maejima and H. Teishima, 1997. The abundance and vertical distribution of abyssal benthic fauna in the Japan deep-sea impact experiment. Proceedings of the 7th International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, May 25—30, pp. 475—480.
- Karl, D.M., 1978. Distribution, abundance, and metabolic states of microorganisms in the water column and sediments of the Black Sea. *Limnol. Oceanogr.*, **23**: 936—949.
- Karl, D.M., 1980. Cellular nucleotide measurements and applications in microbial ecology. *Microbiol. Rev.*, **44**: 739—796.
- Karl, D.M., 1986. Determination of in situ microbial biomass, viability, metabolism, and growth. In: *Bacteria in Nature*, edited by Poindexter, J.S. and E.R. Leadbetter, Plenum Press, New York, pp. 85—176.
- Karl, D.M., 1993. Total microbial biomass estimation derived from the measurement of particulate adenosine-5'-triphosphate. In: *Handbook of Methods in Aquatic Microbial Ecology*, edited by Kemp, P.F., B.F. Sherr, E.B. Sherr and J.J. Cole, Lewis Publishers, Boca Raton (Florida), pp. 359—368.
- Karl, D.M., 1995. Ecology of free-living, hydrothermal vent microbial communities. In: *The Microbiology of Deep-Sea Hydrothermal Vents*, edited by Karl, D.M., CRC Press, Boca Raton (Florida), pp. 36—110.
- Karl, D.M., D.J. Burns, K. Orrett and H.W. Jannasch, 1984. Thermophilic microbial activity in samples from deep-sea hydrothermal vents. *Mar. Biol. Lett.*, **5**: 227—231.
- Kim, D.S., 1997. The faunal composition of meiobenthic community in the deep-sea sediment, northeastern Pacific Ocean. *The Sea, J. Korean. Soc. Oceanogr.*, **2**: 42—47.
- LaRock, P.A., R.D. Lauder, J.R. Schwarz, K.K. Watanabe and D. A. Wiesenburg, 1979. Microbial biomass and activity distribution in an anoxic, hypersaline basin. *Appl. Environ. Microbiol.*, **37**: 466—470.
- Maki, J.S., M.E. Sierszen and C.C. Remsen, 1983. Measurements of dissolved adenosine triphosphate in Lake Michigan. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **40**: 542—547.
- Nawrocki, M.P. and D.M. Karl, 1989. Dissolved ATP turnover in the Bransfield Strait, Antarctica during a spring bloom. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **57**: 35—44.
- Schriever, G., A. Ahnert, H. Bluhm, C. Borowski and H. Thiel, 1997. Results of the large scale deep-sea environmental impact study DISCOL during eight years of investigation. Proceedings of the 7th International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, May 25—30, pp. 438—444.
- Thiel, H. and G. Schriever, 1993. Environmental consequences of deep-sea mining. *Int. Challenges*, **13**: 54—70.
- Thiel, H., E.J. Foell and G. Schriever, 1991. Potential environmental effects of deep seabed mining. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berichte aus dem Zentrum für Meeresund Klimaforschung der Universität Hamburg No. 26, Hamburg, 243 pp. (in English).
- Tietjen, J.H., 1992. Abundance and biomass of metazoan meiobenthos in the deep sea. In: *Deep-Sea Food Chains and Global Carbon Cycles*, edited by Rowe, G.T. and V. Pariente, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 45—62.
- Trueblood, D.D. and E. Ozturgut, 1997. The benthic impact experiment: a study of the ecological impacts of deep seabed mining on abyssal benthic communities. Proceedings of 7th International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, May 25—30, pp. 481—487.

1998년 1월 8일 원고 접수

1998년 4월 6일 수정본 채택