Article

북동 태평양 심해저 C-C 해역의 퇴적 환경과 대형저서동물 분포와의 관계

박흥식^{1*} · 지상범² · 백상규¹ · 김웅서²¹한국해양연구원 해양생물자원연구본부²한국해양연구원 해저환경 · 자원연구본부

(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

Responses of Benthic Animals in Spatial Distribution to the Sedimentary Environments on the Deep-sea Floor, the Clarion-Clipperton Fracture Zone, Northeastern Pacific Ocean

Heung-Sik Park^{1*}, Sang-Bum Chi², Sang-Kyu Paik¹, and Woong-Seo Kim²¹Marine Living Resources Research Division, KORDI²Marine Geoenvironment and Resources Research Division, KORDI

Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : Relationships between sedimentary environments and abundance of benthic animals were examined on the deep-sea floor, the Clarion-Clipperton Fracture Zone, in the northeast equatorial Pacific Ocean. Specimens were collected using a box corer at 8 stations by sieving through 0.3 mm mesh screen. Sediments showed finer grain size ranged from 5.63 to 7.97 ϕ , 83.1% of mean porosity, 1.81 kPa of mean shear strength and organic carbon content in sediment ranged from 0.97 to 1.87 mg/cm³. Manganese nodules covered on the bottom layer from 4 to 57% of coverages. A total of 26 faunal groups in 6 phyla was sampled and comprised 1,467 individuals. Mean biomass were calibrated to 0.5 gWWt/0.06 m². Small-sized animals including foraminiferans and nematods were dominated among the faunal group which comprised 49.1% (892 ind.) and 11.5% (320 ind.), respectively. In SPI-analysis, vertical bio-disturbance marks were not observed except to Beggiatoa-type bacterial mats. As the results of relationship between environments and benthos, abundance of benthic animals, especially nematode, showed only a negative correlation to the coverage of nodules, and any other sedimentary factors analyzed in this study were rarely affected to the spatial distribution of benthic animals.

Key words : 저서동물(benthic animal), 심해저(deep-sea floor), 서식밀도(abundance), 공간분포(spatial distribution)

1. 서 론

심해지역 저서 생태계는 연안이나 대륙붕 해역보다 현저히 적은 생물량과 낮은 다양성을 나타내는 지역으로 알려져 있었지만, 이러한 가설 들은 열수 지역의 발견 등 본격적인 심해 환경연구가 수행되면서 나타난 다양한 결과

에 의해 사라지게 되었다(Rowe 1983). 특히, 심해 지역이 독특한 물리적, 지화학적 특성과 지형 구조 등의 영향으로 망간단괴 분포 지역이나 열수 지역, 협곡 등 다양한 서식처로 구성되어진 것이 알려진 이후, 심해 생물 연구는 더욱 본격화 되었다(Gage and Tyler 1991). 특히, 심해지역에 서식하는 저서생물의 분포특성과 서식밀도는 연안과는 현격한 차이를 나타냈다(Jumars and Eckman 1983). 1960년대부터 본격적으로 연구가 진행된 심해저 저서생물 연

*Corresponding author. E-mail : hspark@kordi.re.kr

구를 종합해 보면, 저층의 지질학적 구조와 먹이 공급원이 저서동물의 조성과 현존량에 영향을 주는 것으로 나타났다(Belyaev *et al.* 1973; Bernstein and Meador 1979). 최근 들어 중요한 광물 자원으로 부각되어진 심해 퇴적층에 축적된 망간 단괴 분포 지역에서의 잠재적인 생물 서식밀도는 심해저 평균 대형 저서동물(Macrobenthos)의 밀도로 산정된 40-200개체/m² 보다도 현저하게 적은 것으로 나타났다(Hessler and Jumars 1974; Thiel and Foell 1993). 이러한 수치는 저층에 잠입하거나 움직임이 둔한 저서동물의 경우 단괴의 분포가 행동과 서식환경에 상당한 제한요소로 작용하는 것으로 해석하였다(Gage and Tyler 1991). 한편, 적도 부근 남동 태평양에서 실시된 채광 실험에서 채광에 의해 발생한 퇴적물 교란으로 인해 조사지역은 물론이고, 교란되지 않은 인접한 인근 지역까지 대형저서곤집에 명백한 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다(Bluhm 1993). 심해 환경조사는 깊은 수심으로 인해 조사에 따른 시간과 경제적 문제에 직면해 있기 때문에, 제한된 조건하에 효율적인 조사를 수행하기 위해 다양한 종류의 장비를 시도하여 시료를 채취하였다. 그러나 아직까지는 제한된 시료 확보로 인해 연안에서와 같은 일반적인 저서동물 군집 연구가 수행되지 못하였으며, 심지어 생물 동정에 대한 기반도 부족하여, 조사 시기마다 신종이 나타나기도 한다. 오히려 선충류나 지각류 등 크기가 작은 중형동물연구

가 상대적으로 활발한 연구결과를 나타내고 있다(Hessler and Sanders 1967; Eckman and Thistle 1988). 따라서 효과적 심해 저서생물 연구를 위해서는 지속적인 자료 확보가 무엇보다 중요하다. 생물자료 축적을 통해 환경과 관련된 효율적인 생태 연구가 가능할 것이며, 특히 채광에 의한 환경 영향을 파악하기 위해서는 꾸준한 자료 확보가 필수적이다. 본 조사는 박스 코어를 사용하여 각 정점별로 정량 채집을 통한 저서동물의 분포와 서식양상을 비교하고, 퇴적환경과의 연관성을 파악하는데 목적을 두었다.

2. 재료 및 방법

연구 해역

연구 지역은 북동태평양 클라리온-클리퍼톤 균열대 중동부에 위치하며, 서경 131.5도, 연구 측선 상의 북위 5도에서 북위 17도까지 설정한 남북방향의 약 1,160 km에 이르는 광범위한 지역이다(Fig. 1). 북쪽으로는 클라리온 균열대에 인접해 있으며, 남쪽으로는 클리퍼톤 균열대 남부이며 적도 지역에 가깝게 위치하고 있다. 연구대상 측선(서경 131.5도)의 수심은 북위 5-7도 지역에서 4,100-4,500 m로 얕으나 북쪽(북위 7-8도)으로 갈수록 점차 깊어지며, 북위 8-16도 지역은 4,800-5,200 m 범위의 수심

Fig. 1. Distribution of seafloor sediments in the northern part of the equatorial Pacific Ocean (after Rawson and Ryan 1978). The sampling station was marked as filled circles.

을 보인다. 즉, 북위 16도에서 북위 8도까지 적도방향으로 가면서 큰 변화가 없으나 북위 7도 10분에서 북위 6도 50분 사이에서 수심의 기복이 심하다. 이러한 급격한 수심의 변화는 기존의 연구보고에서 알려진 클리퍼톤 균열대와 위치가 일치한다(van Andel *et al.* 1973; Craig 1979). C-C지역의 지각은 백악기말(약 8,000만 년전)에 동태평양 해령(East Pacific Rise, 11°S, 110°W)에서 생성된 후, 해저확장에 의해 북 또는 북서 방향으로 이동되어 에오세 중기(약 5,000만 년전)에는 표층해수의 생물 생산성이 높은 적도대(1.5°N, 126°W)에 위치하였으며, 해저면에는 유기질 퇴적물이 지배적인 퇴적층이 발달되었다(Berger *et al.* 1976; Francheteau *et al.* 1979). 적도 고생산대를 지난 이후에는 퇴적물이 급격히 감소하였고, 대양저 지각의 침강작용이 수반되었다. 따라서 마이오세 초기의(약 2,200만 년전)에는 수심 4,800 m로 탄산염 보상심도(Carbonate Compensation Depth, 약 4,600 m)보다 깊어져 탄산질 퇴적물은 용해되고 극히 낮은 퇴적속도(1-3 mm/천년)로 규질 및 적점토 퇴적층이 발달되었다(Theyer 1977; Kennett 1982). 이러한 대양저 지각의 지속적인 이동(현재 6-9 cm/년)으로 해저면에는 위도 차이에 따른 특징적인 퇴적층서가 대상으로 분포한다. 따라서 C-C 지역은 북쪽지역에 원양성 적점토(pelagic red clay), 중앙지역에 규질연니(siliceous ooze), 그리고 남쪽지역에 석회질연니(calcareous ooze)가 분포한다고 알려져 있다(Horn *et al.* 1973). 연구 지역에서 채취된 주상 퇴적물에 의해 확인된 연구지역의 퇴적상은 서경 131.5도를 중심축으로 북위 16-17도 지역에서 원양성 적점토, 북위 8-12도 지역에서 규질 퇴적물(siliceous sediment), 북위 5-6도 지역의 퇴적상은 석회질 연니가 지배적으로 분포하고 있다(Chi *et al.* 2003). C-C 지역의 퇴적율은 북쪽지역에서 1 mm/kyr 이하이며, 남쪽

지역에서 약 3-10 mm/kyr 정도로, 남쪽지역의 퇴적율이 북쪽지역에 비하여 상대적으로 높은 것으로 보고된다(Muller and Mangini 1980). 대형저서동물 조사로는 1995년부터 1999년까지 한국해양연구소에 의해 수행되었으며, 중형동물의 경우에는 1997년 이후 지속적으로 조사가 수행되었다. 주로 대형저서동물의 분포는 빈약한 것으로 나타났으며, 위도별로 종조성에서 차이를 나타냈다(Choi 1996; MOMAF 2002).

퇴적물 특성 분석

퇴적물은 동일 정점에서 사용한 MC(Multiple corer)에서 채집된 시료를 사용하였다. 인양된 기기에서 채집된 시료는 표층에서 1 cm 간격으로 잘라 분리, 보관하였다. 입도분석은 약 10 g의 퇴적물을 3-4일간 증류수로 반복·세척하여 염분을 제거한 후 실시하였으며, 0.5% 과산화수소수로 유기물을 제거하고 탄산염은 제거하지 않은 상태에서 균일하게 분산시킨 후 자동입도분석기(Master Sizer)를 이용하여 분석하였다(MOMAF 1998). 퇴적물의 전밀도와 공극율을 정확히 계산하기 위하여 미국 Micromeritics사의 자동 밀도 측정기(AccuPyc 1330 Pycnometer)를 사용하여 함수율 측정에 이용된 건조 퇴적물 시료 입자의 비중(grain density, specific gravity)을 측정하였으며, 입자의 비중과 함수율을 이용하여 시료가 해수에 100% 포화되어 있다는 가정 하에 전밀도(wet bulk density), 공극율(porosity)을 분석하였다(지 등 2003). 전단강도(shear strength)는 전동베인시스템(motorized vane system)을 사용하여 코어 표층에서 하부로 수직으로 내려가면서 측정하였다. 전동베인은 독일 Haake사에서 제작된 기본 장치 RV 30(base unit)와 측정기 M5(measuring system)를 사용하였다. 직경 1.0 cm, 높이 0.88 cm의 베인을 이용하여

Table 1. Location of each station and sampling conditions.

Station no.	Sampling date	Latitude (N)	Longitude (W)	Depth (m)	Sediment depth sampled by B.C. (cm)
N05	25, July	05°01'592"	131°29'688"	4,460	24
N06	24, July	06°03'865"	131°30'050"	4,114	25
N07	23, July	07°01'026"	131°31'288"	4,513	Failed
N08	22, July	07°59'637"	131°28'813"	4,960	52
N09	21, July	08°59'088"	131°31'289"	4,896	25
N10	19, July	10°01'142"	131°30'875"	4,954	Failed
N11	10, July	10°59'435"	131°31'345"	5,078	Failed
N12	11, July	11°59'158"	131°30'305"	4,994	42
N13	12, July	13°01'003"	131°29'441"	4,981	44
N14	12, July	13°59'454"	131°28'804"	4,322	35
N15	14, July	14°59'806"	131°29'667"	5,021	Failed
N16	14, July	15°58'314"	131°31'562"	5,080	Failed
N17	15, July	16°59'881"	131°31'222"	4,717	50

30°/min(0.0167 rad/sec)의 회전속도로 측정하였다(MOMAF 1996; Chi *et al.* 1999). 유기탄소함량은 유기탄소함량을 측정하기 위한 시료는 선상에서 급속 냉동하여 시료를 운반하였으며, 원소분석기(CE instrument, EA1110)를 이용하여 측정하였다.

저서동물 채집 및 분석

시료 채취는 2003년 7월 10일부터 26일까지 북동태평양에 위치한 C-C 균열대(Clarion-Clipperton Fracture Zone)에서 실시하였다(Fig. 1). 총 13개 정점에서 정량적인 퇴적물 채취를 위해 박스코아(표면적, 30×20 cm)를 투입하였으나, 이 중에 5개 정점(N07, N10, N11, N15, N16)에서는 퇴적물 채취에 실패하여 8개 정점에서만 시료를 채취하였다(Table 1). 시료 채집 후 인양된 박스를 기기에서 분리한 다음 우선 교란을 최소화 한 상태로 표층수로 이동하거나 퇴적물 교란으로 이탈된 생물을 채집하기 위해 모두 300 μm 체에 걸러 배출하였다. 퇴적물 표층에 출현한 망간단괴의 피도를 산정하기 위해 디지털카메라(CZ-5050)를 이용하여 사진촬영을 실시하였다. 촬영 후, 단괴에 부착된 생물의 서식밀도를 파악하기 위해 단괴는 300 μm 체에서 세척을 한 후, 생물 부착 여부를 확인한 후, 부착물질은 모두 분리하였다. 또한 SPI(Sediment profiling imagery)분석을 위해 박스의 측면을 분리한 후, 디지털 카메라로 촬영을 하였다. 촬영된 자료는 이미지 분석 장치(Image pro⁺)를 통해 정점별로 표층을 점유하는 단괴의 피도를 산정하였으며, SPI 분석은 Rumohr and Karakassis(1999)의 방식을 토대로 실시하였다. 촬영된 시료는 채집된 깊이를 측정하였는데, 정점마다 채집된 시료의 수직분포가 차이를 보여서 정점간 깊이로 정상화하기 위하여 단괴가 완전히 제거되는 깊이인 상층부에서 20 cm 되는 부분을 잘라내어, 300 μm 의 체에 옮겨, 퇴적물을 걸러냈다. 걸러진 잔존물은 10% 중성포르말린에 고정하여 실험실로 운반하여 sorting을 실시하였다. 분류군별로 정리된 생물은 전자저울을 사용하여 생체량을 측정하였다. 정점별로 출현한 생물의 개체수는 박스 코아의 표면적인 0.06 m² 단위면적당으로 표현하였으며, 생물 서식밀도와 퇴적물 특성과의 상관성을 알아보기 위해 정점별로 분석된 자료는 SAS 프로그램을 사용하여 각 정점에서의 변동을 Kruskal-Wallis test를 이용하여 비모수 검정을 실시하였으며, 상관분석은 Spearman rank correlation을 적용하였다.

3. 결 과

퇴적 환경

8개 정점에서 표층에서 10 cm 깊이까지 1 cm 간격으로

Fig. 2. Comparison to the characteristics of sedimentary environments at each station.

Fig. 3. Results of two-dimensional PCA ordination based on the benthic environmental factors (Covariance bi-plot scaling with factors represented by arrow; O.C.: Organic carbon; S.S.: Shear strength).

채집된 퇴적물의 평균입도는 6.30 ϕ 로 나타났다. 정점 N05에서 5.63 ϕ 로 가장 조립한 입도조성을 나타냈으며, 정점 N17에서 7.97 ϕ 로 가장 세립한 퇴적상을 나타냈다. 각 정점마다 표층에서 10 cm 깊이까지 입도분포는 유사한 양상을 나타냈다(Fig. 2). 공극율의 경우 평균 83.1%를 나타냈으며, 저위도에 위치한 정점 N05, N06 등에서 전반적으로 낮게 나타났다. 정점 N08에서 89.9%로 가장 높은 공

극율을 나타냈다. 정점 N05와 N06의 경우 표층과 수심에 따라 상대적으로 공극률의 차이를 나타냈다. 전단응력의 경우 평균 1.81 kPa를 나타냈으며, 정점 N08, N09 등에서 각각 0.8 kPa로 낮게 나타났으며, 반면 N12에서는 4.09 kPa로 높은 값을 보였다. 퇴적물내 유기 탄소량의 경우 평균 1.44 mg/cm³을 나타냈으며, 분포 범위는 0.97-1.87 mg/cm³으로 나타났다. 전반적으로 표층에서 유기 탄소량

Table 2. Total abundance (ind./0.06 m²) and biomass (gWWt/0.06 m²) of benthic animal (>0.3 mm) collected in the study area.

Taxon./Station	N05	N06	N08	N09	N12	N13	N14	N17	Total
Sarcomastigophora									
Foraminifera									
Bathysiphon unid.1				17					17
Bathysiphon unid.2				3					3
Edgertonina unid.							11	4	15
Globigerina unid.				26		12		13	51
Hyperammina unid.	11		96	2		14		17	140
Hyperammina unid.							8		8
Pelosina unid.1			42		6				48
Pelosina unid.2		3					4		7
Rhabdammina unid.	69	78	194	11	85	96	27	43	603
Xenophyophore	1	2							3
Nematoda									
Nematoda unid.	32	28	72	13	26	12	11	26	220
Mollusca									
<i>Nuculana</i> sp.					2				2
Annelida									
Cirratulidae unid.					1				1
Paraonidae unid.			3						3
Flabelligeridae unid.	6								6
Lumbrineridae unid.	1								1
Maldanidae unid.								1	1
Arthropoda									
Ostracoda unid.1		238							238
Ostracoda unid.2	72								72
<i>Orchomene</i> sp.	1								1
Lysianasiidae unid.		2							2
Gammaridae unid.							1		1
Harpacticoida unid.1								4	4
Harpacticoida unid.2		3	2						5
Harpacticoida unid.3							1		1
Echinodermata									
Holothuroidea unid.		1							1
Uniden. Fauna			6	2	2	3			
Total abundance	193	355	415	74	122	137	63	108	1,467
Total biomass	0.73	1.34	0.85	0.74	0.11	0.08	0.07	0.07	3.99
Num. of Taxa.	7	7	6	7	6	5	6	6	26

이 높은 것으로 나타났으며, 정점 N06과 N12에서 각각 1.8과 1.9 mg/cm³로 높게 나타났으며, 정점 N17의 경우 1 이하인 0.9 mg/cm³를 나타내 가장 작은 양을 기록하였다. 표층에 형성된 망간단괴의 피도는 정점 N12에서 57%로 표층의 절반가량을 차지하는 높은 피도를 나타냈으며, 반면 정점 N06의 경우 4%에 불과한 낮은 피도를 나타냈다. 정점별 환경 자료를 대상으로 한 주성분분석을 실시한 결과, 두 개의 축으로 68%의 해석력을 나타냈다. 정점 N09와 N13의 경우 공극율과 표층에 분포하는 단괴의 피도 등 환경요인과의 상관성을 나타냈으며, 정점 N05와 N06의 경우 전단응력과 유기탄소량이 상관성을 나타냈다 (Fig. 3).

종 조성

조사기간 중 채집된 저서동물은 총 6개 동물문(Phylum), 26개 동물군으로 나타났으며, 1,467개체가 채집되었다 (Table 2). 총 26개 동물군이 채집되었음에도 불구하고, 각 정점별로 5-7개 동물군만이 출현하였다. 가장 많은 개체가 채집된 동물군으로는 유공충(Foraminifera)으로 9개 동물군으로 구성되었으며, 총 892개체가 출현하여 전체 출현 개체수의 절반에 가까운 49.1%를 차지하였다. 절지동물(Arthropoda)의 경우도 8개 동물군으로 나누어졌으며, 이 중에는 지각류(Ostracoda)가 2종, 단각류(Amphipoda)가 3종, 저서성 요각류(Harpacticoida)가 3종이 출현하였다. 갑각류의 경우 중별로 일부 정점에서만 서식하는 것으로 나타났다. 그밖에, 극파동물이 정점 N05에서 1종, 이매패류가 정점 N12에서 1종 출현하였다. 정점별 출현 개체수는 정점 N08에서 유공충과 선충류가 집중 출현하여 6종이 출현하였음에도 415개체/0.06 m²으로 가장 높은 서식 밀도를 나타냈다. 정점 N09, N14의 경우 각각 74, 63개체/0.06 m²가 채집되어, 100개체 미만의 개체수를 나타냈다. 전반적으로 유공충인 *Rhabdammina unid.*와 선충류의 출현양상이 정점별로 서식밀도를 좌우하는 것으로 나타났다. 생체량의 경우 총 3.99 gWWt/0.06 m²으로 나타났으며, N08, N09에서 상대적으로 높은 생체량을 나타냈으며, 정점별 평균 생체량은 0.5 gWWt/0.06 m²으로 나타났다 (Table 2).

우점 동물군의 위도별 분포

유공충의 경우 전 정점에서 고른 출현양상을 보이면서, 우점하는 동물군으로 나타났다. 정점별 평균 111개체/0.06 m²가 출현하였으며, 정점 N08에서 많은 개체가 출현하였다. 이러한 양상은 정점별 생체량 비중에서도 나타났다 (Fig. 4). 유공충의 경우 *Rhabdammina unid.*이 모든 정점에서 출현하면서, 가장 높은 비중을 차지하였다. 선충류(Nematoda)의 경우도 정점 간 출현 개체수의 차이의 폭이

Fig. 4. Comparison to the abundance and biomass of the major taxonomical group at each station.

크지만 정점별 평균 27개체/0.06 m²가 출현하면서, 총 320개체/0.06 m²가 출현하여 11.5%를 차지하였다. 선충류의 경우도 정점 N08에서 비교적 높은 출현량을 나타냈다. 한편, 지각류(Ostracoda)의 경우 정점 N05와 N06에서만 각각 72,238개체/0.06 m²가 출현하였으며, 이들 정점에서는 생체량에서도 대다수를 차지하였다.

수직 단층 영상 분석(SPI)

퇴적물내 생물학적 교란 작용의 유무와 정점별 상대적 공간 범위를 조사하기 위해 4개 정점(N05, N06, N12, N17)에서 실시한 단층 영상 분석(SPI) 결과, 퇴적물 깊이 50 cm까지 산화·환원 경계층(RPD-layer)은 나타나지 않았다. 박스 코아로 채집된 퇴적물 깊이에서는 산화된 층만이 나타났다. 일부 정점에서는 채집조건으로 인해 표층 단면에서 교란이 발생하기도 하였지만 일부 정점에서 나타난 박테리아 서식층(Beggiatoa-type bacterial mats)을 제외하고는 생물서식에 따른 퇴적층 교란 작용은 관찰되지 않았다 (Fig. 5).

퇴적환경과 서식밀도와의 관계

각 조사 정점에서 측정된 퇴적 환경 자료와 출현한 동물군과의 상관분석에서 정점별 전체 서식 밀도는 표층 단괴 피도와 음의 상관관계(-0.737, p<0.05)를 나타냈다. 단괴의 표층 피도가 높을수록 저서동물의 서식밀도가 감소 경향을 보였다 (Fig. 6). 특히 선충류의 경우 단괴 피도와 상관성(-0.465, p<0.1)을 보이고 있었으며, 가장 우점하였던 유공충의 경우 서식밀도가 단괴 피도와는 상관성을 나타내지 않았다 (Table 3). 한편, 평균입도조성, 공극율, 전단응력, 유기탄소량 등의 퇴적환경은 저서동물의 서식밀도와 유의한 상관성을 나타내지 못하였다.

Fig. 5. Results of SPI (Sediment Profiling Imagery) images at four station (VO: void, RP: red particles, BG: Traces of white Beggiatoa-type bacterial mats, VR: vertical ruptures, GP: grey particles).

Fig. 6. Relationship between total abundance of benthic animals and coverage of nodules on the deep-sea floor at each station.

4. 고찰

퇴적물 특성

각 정점에서 나타난 평균 입도분포는 Shepard(1954)의 분류에 따르면 실트질 점토(silty clay) 또는 점토질 실트

(clayey silt)에 해당되며, Folk(1968)의 분류에 따르면 실트와 점토가 섞여 있는 펄(mud)에 해당된다. 조사해역에서 나타난 퇴적물의 입도 특성은 위도에 따라 물리적 환경 차이에 따라 탄산질, 규질, 원양성 적점토 등 퇴적물 유형에 따라 뚜렷한 차이를 보이고 있다(Horn *et al.* 1973). 탄산질 퇴적물의 경우 주로 북위 5-6도 지역에 분포하며, 적도 고생산대 부근에 위치하여 수괴내 기초생산성이 높아 수층으로부터 다량의 생물기원 물질이 해저 층으로 공급 된다(Chester 1990). 이번 연구에서도 정점 N05와 N06 등이 여기에 해당하는데, 퇴적물내 공극률이나 전단응력이 낮게 나타나면서 유기물 함량은 비교적 높게 나타나고 있다. 탄산질 퇴적물은 불규칙한 형태, 다공질, 그리고 조립질의 특성을 지닌 규질입자의 함량이 적은 반면에 상대적으로 세립질인 탄산질 입자로 구성되어 있고, 함수율이 높은 팽창성 점토광물인 smectite가 형성되지 않으므로 함수율은 상대적으로 낮게 나타나며, 유기물 함량은 다소 높은 경향을 보인다(Chi and Oh 2003). 또한 상대적으로 낮은 수심으로 인해 탄산염 입자들이 용해되지 않고 지속적으로 퇴적되므로 규질 퇴적물과 원양성 적점토분포 지역

Table 3. Results of Spearman rank correlation coefficients between benthic environments and abundance of benthic animals (: $P < 0.05$, *: $P < 0.1$).**

	Grain size (phi)	Porosity (%)	Shear strength (kPa)	Organic carbon (mg/cm ³)	Coverage of nodule (%)
Total Abundance (ind./0.06 m ²)	-	-0.310	-0.227	0.210	-0.737**
Abundance of Foraminifera	-0.293	-	-	0.283	-
Abundance of Nematoda	-	-0.216	-	-	-0.465*

에 비하여 월등히 높은 퇴적율(1.5 mm/kyr)을 나타낸다. 이러한 경우 빠른 퇴적율로 인해 단괴의 피도가 영향을 받게 될 것이다. 실제로 N06의 경우 가장 낮은 단괴 피도를 나타내고 있다. 북위 8-12도에 위치하고 있는 지역은 주로 규질퇴적물이 분포하고 있다. 정점 N08, N09, N12, N13등이 여기에 포함되는데, 비교적 조립한 퇴적상과 높은 공극율, 단괴 피도를 나타낸다. 이들 지역은 전반적으로 적도 고생산대의 끝부분에 위치하고 있으므로 수층으로부터 유입되는 생물기원입자의 양이 많고, 생물기원 규질입자가 대부분이므로 조립질로 구성된 퇴적상을 나타내기 때문이다(Jung et al. 2001). 한편, 원양성 적점토가 분포하고 있는 지역은 클라리온 균열대에 인접한 최북단(북위 16-17도)에 위치하고 있다. 적도 고생산대에서 멀리 떨어져 있으므로 수층으로부터 유입되는 생물기원입자의 양이 적으며, 퇴적율도 가장 낮은 특징을 갖는다(Chi 2003). 이번 조사에서 정점 N17이 위도상 여기에 해당하는 지역인데, 실제로 세립한 퇴적상과 상대적으로 낮은 유기탄소량을 나타내고 있다. 정점간 이러한 퇴적환경 특성은 주성분 분석에서도 나타나, 고위도 지역의 정점일수록 세립한 퇴적상을 나타내고 있으며, 저위도로 갈수록 낮은 밀도의 단괴 분포와 높은 유기탄소량을 나타내고 있다.

저서동물의 공간분포

심해 생물 연구에서 저서동물의 다양도와 서식밀도는 수심, 지형적인 특성 등 공간적 차이에 의해 달라질 수 있다(Jumars and Eckman 1983). 특히 시료 채취의 제한적 한계로 인해 채집 면적이나 기기에 따라 동일지역에서도 서식밀도나 종 다양성에서 상이한 도출되기도 하지만, 심해의 특수 환경 여건에 따른 생태적 적응 방안이 천해역과는 다르게 나타나고, 종 동정을 위한 자료 부족과 충분한 개체가 확보되지 않아서 조사시기마다 정점 간 동물군 비교로만 진행되고 있는 실정이다(Rex 1983; Rowe et al. 1982). 이번 연구에서 출현한 저서동물은 6개 동물문에 26개 동물군으로 나타났다. 이러한 결과는 1998년 조사된 유사해역에서의 채집된 11개 동물문(MOMAF 1998; Becker and Paul 1979) 보다 현저히 낮은 수치이다. 하지만 출현 밀도의 경우 오히려 높게 나타났다. 우점하는 동물군으로는 유공충과 선충류, 지각류 등으로 나타났으며,

이러한 동물군별 분포 양상은 심해 생물군집에서 주로 나타나는 비율이다. 저서동물의 경우 심해지역에서도 천해역과 유사하게 다모류, 갑각류, 이매패류 등이 우점하는 것으로 보고되었다(Gage and Tayler 1991). 특히 1996년부터 1999년까지 연구결과에서도 다량의 다모류가 유사해역에서 채집되었다(MOMAF 2002). 하지만 이번 조사해역에서는 다모류 등 대형동물이 전반적으로 소량 채집되었다. 이러한 차이점은 퇴적학적 조건을 비교해야겠지만 우선적으로 시료 채집기구의 채집면적의 영향도 고려되어야 할 것이다. 일반적으로 대형저서동물의 기준은 1 mm 체로 걸러내어 잔존한 생물로 언급되었다. 선충류의 경우 대형저서동물이 아닌 중형 동물이므로 동일한 조건에서 서식밀도에 포함시켜 적용하기 어렵지만, 심해생물의 경우 서식밀도나 생체량이 매우 적고, 퇴적물 채취에서의 어려움으로 0.42, 0.3, 0.25 mm 등으로 점차적으로 작아졌으며, 중형동물의 기준도 0.06, 0.04, 0.03 mm로 감소하였다(Hulings and Gray 1971; Thiel 1983). 따라서 선충류나 미소 유공충류의 경우도 군집 구성원으로 분석하기도 한다. 서식밀도의 경우 m² 단위로 환산해 보면, 본 연구에서는 3,056개체/m²으로 나타나, 1998년 조사 당시 나타난 756개체/m² 보다 현저히 높은 개체를 나타냈다(MOMAF 1998). 이러한 양상은 정점 N06에서 지각류가, N08에서는 유공충이 대규모로 출현하였기 때문이다. 지각류의 경우 단괴의 분포가 저조한 지역에서만 집중적으로 나타났으며, 이외 지역에서는 전혀 출현하지 않았다. 이러한 특징은 국지적으로 나타났고, 유사한 단괴분포를 보인 정점 N08의 경우 오히려 출현하지 않고 있어서 단괴의 분포 영향 보다는 지역적인 특성에 의한 것으로 보여진다. 가장 우점하는 유공충의 경우 심해환경에서는 주로 퇴적물 표층이나 낮게 잠입하여 살아간다(Berstein et al. 1978). 이번 연구의 경우도 다양한 형태의 유공충이 출현하였다. 막대모양으로 마치 다모류의 서관과 유사한 모양으로 교착된 형태로 나타내거나(Rhabdammina unid., Hyperammina unid.), 투명하고 표면이 거친 구형 모양(Globigerina unid.)이 상호 약하게 연결된 사슬형태를 나타냈다. 이들은 주로 단괴 주변에 분포하고 있었다. 정점별 생체량은 평균 8.3 gWWt/0.06 m²으로 나타났다. 심해저에서 정량채집에 의한 대형저서동물의 생체량 분포는

극지방을 중심으로 평균 4 gWWt/m²로 가장 높게 나타난 반면, C-C 해역 등 단괴 분포밀도가 높은 해역의 경우 1-2 gWWt/m²로 나타나, 심해저 해역 중에 가장 낮은 생체량을 나타낸 곳이다(Rowe 1983). 하지만 이러한 분석치는 1960년대 실시된 자료를 토대로 정리된 것으로 지역적으로 조사 횟수와 채집기기에 따라 차이를 보일 수 있다. 본 연구에서 나타난 평균 생체량의 경우 한개 정점에서 나타난 지각류의 대량 서식에 의해 정점별 편차를 나타냈으며, 실제로 다 모류 등 대형저서동물이 저조한 상태에서 추정된 값으로 Rowe(1983)에 의해 제시된 추정치보다 더욱 높아질 가능성도 배제할 수 없다. 이번 조사 자료는 정점마다 채집된 시료의 깊이에 차이를 보이기 때문에 표층에서 10 cm 깊이의 퇴적물을 대상으로 생물을 채집하였다. 퇴적물의 깊이에 따라 서식하는 저서동물의 종수가 급격히 감소하는 것은 여러 연구를 알려 나타나고 있다(Jumars and Eckman 1983; Drazen *et al.* 1998). 실제로 Choi(1996)의 조사에서도 6 cm 이내에 95% 이상의 저서동물이 분포하는 것으로 나타났다. 따라서 채집면적에 의한 동물군이나 서식밀도의 차이는 나타날 수 있으나 깊이에 따른 오차는 적을 것으로 예상된다. 실제로 단층 영상 분석 결과에서도 10 cm 이하뿐 아니라 전체적으로 생물학적 교란활동이 전혀 나타나지 않았다. 단층 영상 분석 방식은 REMOTS라는 기기의 개발을 통해 교란되지 않은 퇴적층 단면을 촬영하여, 생물의 서관이나 교란활동 뿐 아니라 퇴적물의 지화학적 정보를 얻기 위해 개발되었다(Rhoads and Germano 1987; Rumohr and Schomann 1992). 특히 시료 채취가 어려운 대륙사면이나 심해저를 대상으로 활용되고 있으며, 영상 분석을 통해, 내서성 저서동물(infauna)의 교란 정도와 퇴적상의 수직적 변동을 평가하고 있다. 그러나 단면에 나타난 다양한 흔적을 파악하기 위해서는 대상해역에 서식하는 생물의 서식 특성 등에 관한 자료가 확보되어야 한다. 따라서 반복된 자료 축적을 통해서만 효율적인 결과를 양산할 수 있다. 이러한 기법을 반복하여 사용함으로써 단순한 서식밀도나 종조성 파악과 더불어 심해 내서성 저서동물의 서식유형 정보를 얻을 수 있다.

퇴적환경과 서식밀도의 관계

저서동물의 경우 수괴와 더불어 퇴적층을 매개로 살아가기 때문에 퇴적층의 특성이 종조성이나 군집구조에 중요한 영향을 미치게 된다(Fauchald and Jumars 1979). 퇴적층 구조의 경우도 해류의 속도와 같은 물리적 영향과 침강하는 입자의 구성원에 따라 입도조성이나 공극율, 유기탄소량이 차이를 보이는데, 이러한 물리적 요인 등은 저서동물에 있어서도 가입과 확산, 먹이공급 등에 영향을 주게 된다(Snelgrove and Butman 1994; Taghon and Green

1992). 따라서 퇴적 특성을 파악한다면 저서동물의 서식 환경 및 생태 특성까지도 추론할 수 있다. 심해저의 경우 높은 압력으로 인해 서식하는 생물이 능동적으로 움직이거나 이동하는데 있어, 연안 보다는 상당한 어려움을 가지고 있다. 서관을 만들거나 잠입을 해야 하는 경우에도 능동적인 운동력 보다는 퇴적물의 침강이나 저탁류에 의한 이동에 주로 영향을 받게 된다(Butman 1987). 먹이활동에 있어서도 능동적인 행동에 의한 섭식보다는 충분한 먹이 공급이 일어날 경우 더욱 용이할 것이다. 따라서 저서동물 서식에 있어 천해역 보다는 환경조건에 민감한 상관관계를 가지고 있다. 그러나 채집된 저서동물의 서식밀도와 퇴적 환경자료와의 상관분석에서 단괴의 표층 피도를 제외한 대부분의 변수가 위도별로 다양한 특성을 나타내고 있음에도 불구하고, 상관성을 가지지 못하는 것으로 나타났다. 정점별 전체 서식밀도의 경우 단괴 분포량과 높은 음의 상관관계를 나타내고 있으며, 특히 선충류의 경우 상관성이 높게 나타났다. 이러한 결과는 단괴의 경우 부착성 동물을 제외하고는 서식공간을 좁게 만드는 역할을 하기 때문으로 보인다. 유공충의 경우는 이러한 경향이 전혀 나타나지 않고 있지 않은 것으로 보면, 이동 반경이나 먹이 확보 등과 같은 요인을 생각해 볼 수 있다. Fig. 6에 의하면, 저서동물 서식밀도는 단괴 분포량과 지수 함수적인 상관관계를 보임으로서 표층에 단괴의 피도가 일정량 이상인 경우 서식생물이 급격한 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다. 이번 연구 결과에서 유기탄소량이나 입도조성과 밀접한 상관성을 가지는 1차 소비자의 영양단계를 가지는 대형저서동물의 채집이 저조한 것도 원인으로 볼 수 있다. 이러한 결과가 이미 알려진 단괴분포 해역이 낮은 생물량과 서식밀도를 나타낸다는 결과와 대비한다면, 유사한 결론을 나타낸 것으로 볼 수 있으나 이번 연구에서 나타난, 채집 면적이 적은 기기 사용, 적은 수의 조사 정점 등을 고려해 볼 때, 향후 지속적인 조사를 통한 자료 확보가 필요하다.

5. 결 론

2003년 북동태평양 C-C 해역에서 위도별로 8개 정점을 대상으로 실시한 조사에서 퇴적물의 평균입도분포는 6.30φ(5.63-7.97φ)로 나타났다. 공극율의 경우 평균 83.1%로, 전단응력의 경우 평균 1.81 kPa로 나타났다. 퇴적물내 유기 탄소량은 평균 1.44 mg/cm³으로, 정점별 0.97-1.87 mg/cm³의 범위를 보였으며, 표층에서 유기 탄소량이 높았다. 표층에 형성된 망간단괴의 피도는 정점 N12의 경우 57%를 나타냈으며, 정점 N06의 경우 4%에 불과하였다.

총 6개 동물문, 26개 동물군, 1,467개체가 채집되었다.

유공충이 892개체(49.1%)가 출현하여, 가장 많은 개체가 채집된 동물군이며, 전 정점에서 고른 출현 양상을 보였다. 선충류는 총 320개체(11.5%)가 출현하였으며, 정점별 출현 개체수의 차이가 높게 나타났다. 지각류의 경우 정점 N05와 N06에서만 각각 72, 238개체가 출현하였다. 전반적으로 다모류, 갑각류, 연체동물 등 대형저서동물이 정점당 평균 3개체 이하의 적은 개체수를 나타냈다. 정점별 출현 개체수는 정점 N08에서 유공충과 선충류가 집중 출현하여, 가장 높은 서식밀도를 나타냈다. 유공충인 *Rhabdammina unid.*와 선충류의 출현양상이 정점별로 서식밀도를 좌우하는 것으로 나타났다. 생체량의 경우 정점별 평균 0.5 gWWt/0.06 m²으로 나타났다. 단층 영상 분석(SPI) 결과, 퇴적물 깊이 50 cm까지 산화·환원 경계층(RPD-layer)은 나타나지 않았으며, 일부 정점에서 나타난 박테리아 서식층(Beggiatoa-type bacterial mats)을 제외하고는 생물서식에 따른 퇴적층 교란 작용은 관찰되지 않았다.

퇴적 환경 자료와 출현한 동물군 서식밀도와의 상관분석에서 평균입도조성, 공극율, 전단응력, 유기탄소량 등의 퇴적환경은 저서동물의 서식밀도와 유의한 상관성을 나타내지 못하였다. 다만, 정점별 서식밀도는 표층 단괴 피도와 음의 상관관계(-0.737 , $p<0.05$)를 나타냈다. 단괴의 표층 피도가 높을수록 저서동물의 서식밀도가 감소 경향을 보였다. 특히 선충류의 경우 단괴 피도와 상관성(-0.465 , $p<0.1$)을 보이고 있었으며, 가장 우점하였던 유공충의 경우 서식밀도가 단괴 피도와는 상관성을 나타내지 않았다.

사 사

현장조사에 협조해주신 온누리호 승조원 분들과 심해저 자원연구센터 연구원분들, 바다목장 원기식 연구원께 감사드립니다. 본 연구는 해양수산부의 '2003 심해저 광물 자원 개발' 용역사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Becker, B. and A.Z. Paul. 1979. Abyssal community structure of the benthic infauna of the Eastern Equatorial Pacific; DOMES site A, B and C. p. 287-308. In: *Marine Geology and Oceanography of the Pacific Manganese Nodule Province*. eds. by J.L. Bischoff and D.Z. Piper. Plenum Press, New York.
- Belyaev, G.M., N.G. Vinogradov, N.G. Levenshityeyn, F.A. Pasternak, M.N. Sokolova, and Z.A. Filatova. 1973. Distribution patterns of seep water bottom fauna-related to the idea of the biological structure of the ocean. *Oceanology*, 13, 114-120.
- Bernstein, B.B., R.R. Hessler, R. Smith, and P.A. Jumars. 1978. Spatial distribution of benthic foraminifera in the central North Pacific. *Limnol. & Oceanogr.*, 23, 401-416.
- Bernstein, B.B. and J.P. Meador. 1979. Temporal persistence of biological patch structure in an abyssal benthic community. *Mar. Biol.*, 51, 179-183.
- Bluhm, H. 1993. Effects of the deep-sea mining for manganese nodules on the abyssal megabenthic community. p. 521-529. In: *Proc. 25th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May, 1993, OTC Paper 7139*.
- Butman, C.A. 1987. Larval settlement of soft-sediment invertebrates: the spatial scales of pattern explained by active habitat selection and the emerging role of hydrodynamical processes. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 25, 113-165.
- Chester, R. 1990. Marine geochemistry. Unwin Press, London. 698 p.
- Chi, S.B., H.S. Jung, H.S. Kim, and J.W. Moon. 1999. Comparison of vane-shear strength measured by different methods in deep-sea sediments from KODOS area, NE Equatorial Pacific. 'The Sea' *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 4, 390-399. (in Korean)
- Chi, S.B. 2003. A study on geotechnical properties of deep-sea sediments and manganese nodule occurrence in Clarion-Clipperton Fracture Zone, NE Equatorial Pacific. Ph. D. Thesis, Inha University, Korea. 185 p. (in Korean)
- Chi, S.-B., J.K. Oh, H.B. Lee, and K.H. Kim. 2003. Classification of deep-sea sediment by geotechnical properties from the KODOS area in the C-C Zone of the Northeast Equatorial Pacific. *Ocean Polar Res.*, 25(2), 133-145. (in Korean)
- Chi, S.-B. and J.K. Oh. 2004. A study of mass physical properties in deep-sea sediment from the Clarion-Clipperton Fracture Zone, Northeast Equatorial Pacific. *Kor. Earth Sci. in press*.
- Choi, J.-W. 1996. Macrobenthic community in the deep sea soft-bottom of the KODOS 96-1, northeastern Pacific Ocean. 'The Sea' *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 1(2), 73-79. (in Korean)
- Drazen, J.C., R.J. Baldwin, and K.L. Smith, Jr. 1998. Sediment community response to a temporally varying food supply at an abyssal station in the NE Pacific. *Deep-Sea Res. II* 45(4-5), 893-913.
- Eckman, J.A. and D. Thistle. 1988. Small-scale spatial pattern in meiobenthos in the San Diego Trough. *Deep-Sea Res.*, 39, 361-374.
- Fauchald, K. and P.A. Jumars. 1979. The diet of worms: a study of polychaete feeding guilds. *Oceanogr. Mar. Biol.*

- Ann. Rev.*, 17, 193-284.
- Folk, R.L. 1968. Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphills' Pub., Austin, Texas. 170 p.
- Gage, J.D. and R.A. Tyler. 1991. Deep-sea biology, a natural history of organisms at the deep sea floor. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 504 p.
- Hessler, R.R. and H.L. Sanders. 1967. Faunal diversity in the deep sea. *Deep-Sea Res.*, 14, 65-78.
- Hessler, R.R. and P.A. Jumars. 1974. Abyssal community analysis from replicate box cores in the central North Pacific. *Deep-Sea Res.*, 21, 185-209.
- Horn, D.R., B.M. Horn, and M.N. Delach. 1973. Copper and Nickel content of ocean ferromanganese deposits and their relation to properties of the substrate. p. 77-83. In: *The Origin and distribution of manganese nodules in the Pacific and prospects for exploration*. ed. by M. Morgenstein. Hawaii Inst. of Geophysics, Honolulu, Hawaii.
- Hulings, N.C. and J.S. Gray. 1971. A manual for the study of Meiofauna. *Smithsonian Contrib. Zool.*, 28, 1-79.
- Jumars, A. and J.E. Eckman. 1983. Spatial structure within deep-sea benthic communities. p. 399-452. In: *The Sea*, Vol. 8. ed. by G.T. Rowe. Wiley-Interscience, New York.
- Jung, H.S., K.S. Jung, Y.S. Chu, S.H. Park, and K.H. Kim. 2001. Role of siliceous fossil dissolution in downcore variations of grain size and water content: western margin of Clarion-Clipperton fracture zone, NE equatorial Pacific. *Mar. Georesour. Geotechnol.*, 19, 181-195.
- MOMAF. 1996. A report on '96 deep seabed mineral resources exploration. MOMAF, Seoul. 954 p.
- MOMAF. 1998. A report on '98 deep seabed mineral resources exploration. MOMAF, Seoul. 1209 p.
- MOMAF. 2002. A report on '02 deep seabed mineral resources exploration. MOMAF, Seoul. 683 p.
- Muller, P.J. and A. Mangini. 1980. Organic carbon decomposition rates in sediments of the Pacific manganese nodule belt dated by Th-230 and Pa-231. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 51, 94-114.
- Rex, M.A. 1983. Geographic patterns of species diversity in the deep-sea benthos. p. 453-472. In: *The Sea*. Vol. 8. ed. by G.T. Rowe. Wiley-Interscience, New York.
- Rhoads, C. and D. Germano. 1987. Interpreting long-term changes in benthic community structure; a new protocol. *Hydrobiologia*, 142, 291-308.
- Rowe, G.T., P. Polloni, and R.L. Haedrich. 1982. The deep sea macrobenthos on the continental margin of the north-west Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res.*, 21, 641-650.
- Rowe, G.T. 1983. Biomass and production of the deep-sea macrobenthos. p. 97-121. In: *The Sea*. Vol. 8. ed. by G.T. Rowe. Wiley-Interscience, New York.
- Rumohr, H. and H. Schomann. 1992. REMOTS sediment profiles around an exploratory drilling rig in the southern North Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 91, 303-311.
- Rumohr, H. and I. Karakassis. 1999. Comparison of multivariate patterns: different taxonomic levels in macrofaunal analysis versus sediment profiling imagery(SPI). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 190, 125-132.
- Shepard, F.P. 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *J. Sediment. Petrol.*, 24, 151-158.
- Snelgrove, P.V.R. and C.A. Butman. 1994. Animal-sediment relationships revised: cause versus effect. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 32, 111-177.
- Taghon, G.L. and R.B. Green. 1992. Utilization of deposited and suspended particulate matter by benthic "interface" feeders. *Limnol. Oceanogr.*, 37, 1370-1391.
- Thiel, H. 1983. Meiobenthos and nanobenthos in the deep sea. p. 167-230. In: *The Sea*. Vol. 8. ed. by G.T. Rowe, Wiley-Interscience, New York.
- Thiel, H. and E.J. Foell. 1993. Environmental risk assessment for manganese nodule mining and the application of the precautionary principle. p. 226-233. In: *The Marine Environment and Sustainable Development. Law, Policy and Science*. ed. by A. Couper and E. Gold. The Law of the Sea Institute, Honolulu, Hawaii.

Received Apr. 28, 2004

Revised May 28, 2004

Accepted Jun. 8, 2004