

Data

북동태평양 대한민국 광구 KR5 지역 표층퇴적물의 물리적 특성

이현복^{1*} · 지상범¹ · 형기성¹ · 박정기¹ · 김기현¹ · 오재경²

¹한국해양연구원 해양자원연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29
²인하대학교 해양학과
(402-751) 인천광역시 남구 용현동 253

Physical Properties of Surface Sediments from the KR(Korea Reserved) 5 Area, Northeastern Equatorial Pacific

Hyun-Bok Lee^{1*}, Sang-Bum Chi¹, Kiseong Hyeong¹, Cheong-Kee Park¹,
Ki-Hyune Kim¹, and Jae-Kyung Oh²

¹Marine Resources Research Department, KORDI
Ansan, P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Department of Oceanography, College of Natural Science
Inha University, Incheon 402-751, Korea

Abstract : In order to reveal the vertical variation of physical properties in deep-sea sediments, deep-sea sediment cores were collected at 78 stations using a multiple corer in the KR5 area, one of the Korea contract areas for manganese nodule exploration, located in the northeast equatorial Pacific. Based on the color of sediments, sampled sediment cores were characterized into three lithologic units (unit 1, 2, and 3). In all sediment cores, three units appear systematically; unit 1 lies at the top of cores and unit 2 and/or unit 3 appear to underlie unit 1 or alternate with unit 1. Unit 1 layer from the top of cores shows dark grayish brown to dark brown with mean thickness of 10.2 cm. Unit 2 and 3 layers show very dark brown to black color and yellowish brown to brown color, respectively. According to the physical properties of the deep-sea sediment cores, sediment column can be divided into three sections. Section A (0~15 cm) in subbottom depth consists mostly of unit 1. Mean values of physical properties of section B (15~30 cm) in subbottom depth are similar to those of section C (>30 cm) in subbottom depth. However, the physical properties of section B were more variable than those of section C because of the high activity of bioturbation in section B. These results will provide valuable information for selecting suitable sites for mining manganese nodules in the Korea contract areas.

Key words : deep-sea sediment, physical properties, northeast equatorial Pacific

1. 서 론

북동태평양 클라리온-클리퍼톤 균열대(C-C 지역, Clarion-Clipperton fracture zone) 내에 위치한 대한민국

광구내의 표층퇴적물 연구는 한국심해연구(Korea Deep Ocean Study)를 통해 지난 십 수년 동안 이루어져왔다(정 등 1991; 정 1994; Jeong *et al.* 1994; 정 등 1997; Jung *et al.* 1998; 박 등 1999). 또한, 최근에는 망간단괴 채광시에 발생하는 퇴적물의 환경충격에 대비하기 위한 위·경도별 표층퇴적물의 물리적인 성질과 지질공학적인 연구가 활발

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

히 진행되었다(지 등 2000, 2003a, 2003b, 2004a, 2004b). 이러한 모든 표층퇴적물에 관한 연구는 일반적으로 색상 경계면에 따라 2~3개의 암상으로 구분하였으며, 구분된 암상을 기준으로 표층퇴적물의 광물·지화학적 및 물리적인 성질을 규명하였다. 그러나 채광지역 선정을 목표로 연구하기 위해서는 색상경계면 분류에 의해서 암상별로 연구하는 것도 중요하지만 각각의 퇴적물 특성이 깊이별로 어떻게 분포하고 있으며 각 깊이별로 퇴적물의 물성이 어떤 특색이 있는지도 연구해야 한다. 전단강도의 예를 들면 외국의 경우 독일은 망간단괴 채광기가 해저면에서의 움직임에 필요한 전단강도를 2.5~4 kPa로 예상하고 있으며, 채광기가 영향을 미치는 퇴적 깊이를 15~20 cm로 예상하고 있다(Grupe et al. 2001). 프랑스의 경우, 채광 예상지역에서 얻어진 퇴적물의 깊이별 전단강도 평균값에 근거하여 채광기 움직임에 필요한 전단강도의 기준을 10 cm

깊이에서 3.5 kPa, 40 cm 깊이에서 5.0 kPa로 설정하였다(IFREMER 1989).

본 연구에서는 채광 예상지역에 대한 평가작업의 일환으로 2004년과 2005년에 집중적으로 다중주상시료 채취기로 획득한 78개의 표층퇴적물에 대하여 깊이별로 물리적 지표들에 대한 최소, 최대, 평균값을 제시하였다. 이들 자료를 통하여 우리나라 채광 예상지역에 대한 각종 지표들의 기준을 마련할 때 유용한 정보를 제공하는데 목적이 있다.

2. 지역개관

연구지역은 북동 태평양 C-C 지역 내에 위치한 대한민국 광구중의 KR(Korea Reserved) 5 지역(9°05'~11°40'N, 130°30'~133°10'W)으로 심해저 망간단괴 사업을 위한 대

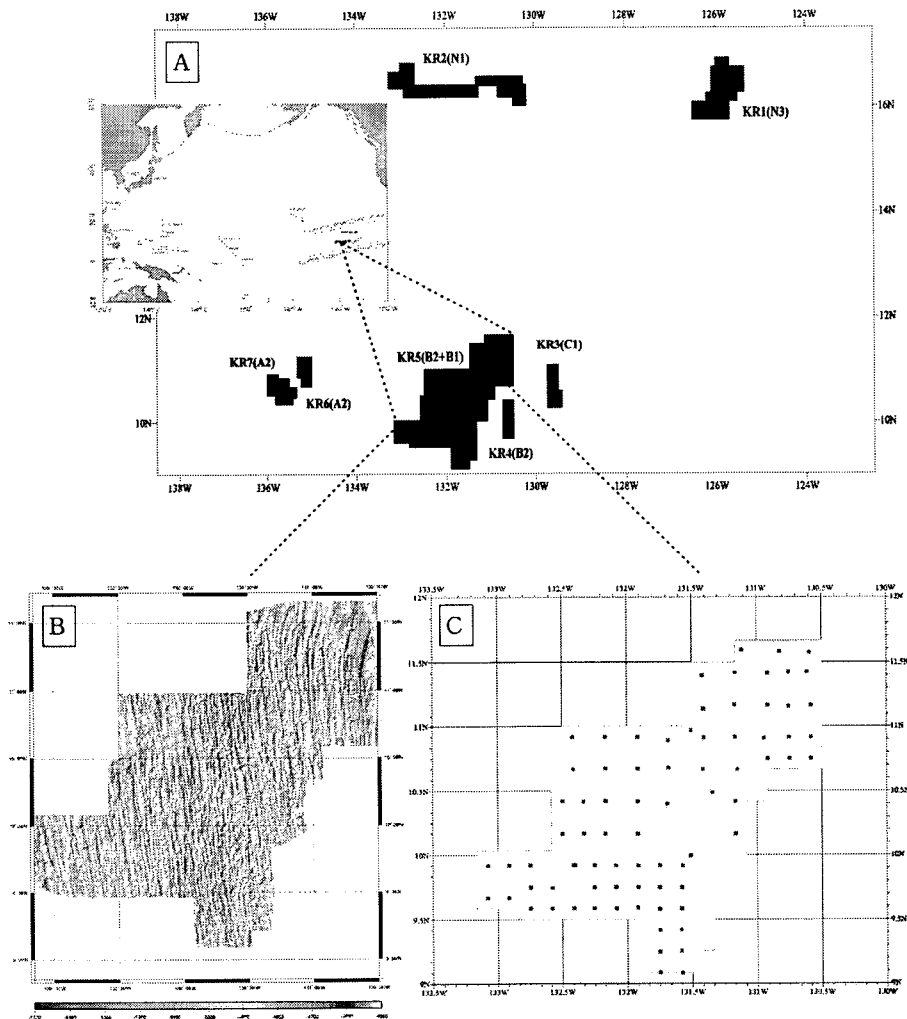


Fig. 1. Map showing (A) the location of study area, (B) bathymetry and, (C) sampling sites.

한민국 광구지역 중에서 현재 우선 채광지역 선정을 위한 채광조건 및 개발등급 분석을 위해 여러 분야에서 집중적으로 연구가 활발하게 진행 중인 지역이다(Fig. 1-A). 연구지역의 해저지형은 남북방향의 구조선 변화가 매우 다양하게 불연속적으로 나타났다. 연구지역 북동부(11°~11°40'N, 130°30'~131°30'W)의 주향방향은 북북동 방향을 이루고 있고, 시계방향으로 전이되고 있는 형태를 보이지만, 그 밖의 연구지역의 중앙부(9°05'~11°N, 131°30'~132°W)와 남서부(9°30'~10°30'N, 132°~133°10'W)의 해령들은 정북 혹은 북북서 방향으로 서서히 바뀌어 지는 형태를 보인다. 수심은 연구지역의 중앙부에서는 5,000~5,500 m로 나타났으며, 북동부와 남서부에서는 4,500~5,000 m로 나타났다(Fig. 1-B).

3. 시료채취 및 연구방법

탐사는 2004년과 2005년에 C-C 지역 내의 대한민국 단독광구 중 KR5 지역에서 한국해양연구원 소속 연구선인

은누리호에 의해 수행됐으며, 78개의 정점에서 퇴적물 시료의 물리적 훼손이 매우 적은 다중 주상시료 채취기(Multiple Corer, MC, 직경 0.95 cm, 길이 60 cm, 8개 동시 채취)로 획득하였다(Fig. 1-C). MC로 채취된 퇴적물 상층수를 사이펀을 이용하여 천천히 제거한 후, 코어커터기를 이용하여 종단면을 이등분하고, 사진촬영을 한 후, 깊이에 따른 색상변화 및 생물교란작용 등에 관해 기술하였다. 부시료는 1 cm 간격으로 획득하여 플라스틱 용기에 넣고 밀봉하였다. 함수율(% dry weight)은 현장에서 채취되어 온 젖은 시료의 무게를 잰 후 냉동건조기에서 48시간 건조시킨 후 건조통에서 실온으로 24시간 보관한 후, 무게를 0.0001 g까지 평량하여 계산(% water content=100 × (wet wt.-dry wt.)/dry wt.)하였다. 퇴적물의 전밀도와 공극률을 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% 포화되

Table 1. Location, length, and sediment characteristics of sediment cores.

Station No.	Latitude (N)	Longitude (W)	Depth (m)	Core length (cm)	Thickness (cm)				Carbonate layer	Remark
					unit 1	unit 2	unit 3	unit 1*		
MC 4101	9°44.931'	131°45.157'	4958	12	0-12					
MC 4102	9°34.900'	131°45.039'	4944	39	0-10	10-26, 34-39		26-34		unit 1&2 alternated
MC 4103	9°24.930'	131°44.981'	4989	45	0-14	14-45				
MC 4104	9°14.796'	131°45.070'	5010	53	0-12	12-40, 44-53		40-44		unit 1&2 alternated
MC 4105	9°05.081'	131°44.921'	4896	41	0-10		10-41			unit 2 missing
MC 4106	9°04.990'	131°34.681'	4885	63	0-15	15-36, 42-62		36-42		unit 1&2 alternated
MC 4107	9°15.312'	131°35.082'	4876	25	0-4	15-23	4-10	10-15, 23-25		
MC 4108	9°25.091'	131°35.073'	4868	26	0-10	10-23		23-26		unit 1&2 alternated
MC 4109	9°35.057'	131°34.965'	4939	32	0-14	14-32				
MC 4110	9°44.990'	131°34.837'	4871	35	0-10	10-30		30-35		unit 1&2 alternated
MC 4111	9°54.843'	131°34.476'	4962	42	0-11	11-42				
MC 4112	9°55.108'	131°44.893'	4993	31	0-12	12-31				
MC 4113	9°54.951'	131°54.966'	5066	28	0-16	16-28				
MC 4114	9°45.101'	131°54.787'	5089	65	0-11	11-31, 35-65		31-35		unit 1&2 alternated
MC 4115	9°35.492'	131°55.091'	5047	31	0-12	12-18	18-31			
MC 4116	9°35.034'	132°04.859'	4819	45	0-12	12-45				
MC 4117	9°35.168'	132°15.171'	4936	20	0-11	11-12	12-20		20-24	
MC 4118	9°35.243'	132°24.533'	4855	33	0-11	11-21, 22-33		21-22		unit 1&2 alternated
MC 4119	9°35.175'	132°34.810'	4943	43	0-15	15-31, 34-43		31-34		unit 1&2 alternated
MC 4120	9°35.202'	132°44.679'	4918	31	0-7	7-31				
MC 4121	9°44.942'	132°44.719'	4830	31	0-10	10-31				
MC 4122	9°55.029'	132°44.906'	4856	36	0-8	8-36				
MC 4123	9°44.825'	132°34.642'	4960	39	0-12	12-39				
MC 4124	9°55.104'	132°24.034'	4873	47	0-20	20-47				
MC 4125	9°45.013'	132°25.014'	4848	49	0-15	15-45		45-49		unit 1&2 alternated
MC 4126	9°44.948'	132°15.001'	4974	44	0-10	10-44				
MC 4127	9°54.996'	132°15.046'	4898	35	0-6	6-28	28-35			
MC 4128	9°54.927'	132°05.183'	4851	38	0-11		11-38			unit 2 missing
MC 4129	9°45.077'	132°05.041'	4913	27	0-5		5-27			unit 2 missing

Table 1. Continued.

Station No.	Latitude (N)	Longitude (W)	Depth (m)	Core length (cm)	Thickness (cm)				Carbonate layer	Remark
					unit 1	unit 2	unit 3	unit 1*		
MC 5101	11°23.719'	131°25.129'	4864	24	0-7	7-20			20-24	
MC 5102	11°08.224'	131°24.650'	5028	20	0-4		4-20			
MC 5103	10°54.851'	131°24.559'	5085	34	0-9	9-34				
MC 5104	10°53.451'	131°40.855'	5146	40	0-13	13-40				
MC 5105	10°40.567'	131°40.726'	4961	25	0-11	11-25				
MC 5106	10°23.967'	131°41.516'	5023	8	0		0-8			
MC 5115	9°59.608'	131°30.653'	4935	40	0-12	12-40				
MC 5116	10°29.272'	131°20.656'	4948	38	0-9		9-38			
MC 5117	10°58.234'	131°30.336'	5076	11	0-11					
MC 5201	11°34.468'	130°35.672'	4849	41	0-15	15-41				
MC 5202	11°34.786'	130°49.326'	4766	13	0-4		4-13			4-13 unit 1&2 mixed
MC 5203	11°35.402'	131°06.825'	4827	43	0-11	11-43				
MC 5204	11°25.438'	130°36.847'	4727	41	0-2	4-13	2-4	13-15		
MC 5205	11°25.422'	130°45.243'	4846	17	0-10	10-17				
MC 5206	11°24.927'	130°54.999'	4873	39	0-14	14-39				
MC 5207	11°25.012'	131°09.981'	4848	26	0-8	8-26				8-26 unit 1&2 mixed
MC 5208	11°09.912'	130°35.007'	4920	44	0-18	18-44				
MC 5209	11°09.468'	130°45.364'	4732	40	0-12	12-19	19-40			
MC 5210	11°09.991'	130°55.044'	4824	37	0-11	11-16		16-37		unit 1&2 alternated
MC 5211	11°10.109'	131°10.321'	4847	44	0-11	11-44				
MC 5212	10°55.081'	130°35.051'	4774	19	0-6	6-10		10-19		11-19 unit 1 & carbonate layer mixed
MC 5213	10°54.953'	130°45.014'	4835	35	0-11	11-32	32-35			11-32 unit 1&2 mixed
MC 5214	10°54.622'	130°56.708'	4978	61	0-6				6-8	
MC 5215	10°55.057'	131°09.975'	4867	40	0-11	11-40				
MC 5216	10°55.016'	131°55.020'	5009	46	0-10	10-46				
MC 5217	10°55.039'	132°10.001'	5098	48	0-12	12-48				
MC 5218	10°54.978'	132°25.040'	4920	40	0-13	13-40				
MC 5219	10°45.078'	130°34.963'	4773	7	0-6		6-7			
MC 5220	10°45.016'	130°44.938'	4835	41	0-15	15-41				
MC 5221	10°44.955'	130°54.983'	4960	36	0-4	4-36				
MC 5222	10°40.019'	131°09.091'	4881	8	0-7		7-8			
MC 5223	10°39.993'	131°24.981'	4910	35	0-10		10-35			10-35 unit 2&3 mixed
MC 5224	10°40.199'	131°54.990'	5052	44	0-11	11-44				
MC 5225	10°40.334'	132°09.843'	4873	35	0-10	10-35				
MC 5226	10°39.993'	132°24.929'	4936	40	0-11	11-40				
MC 5227	10°25.106'	131°09.914'	5020	40	0-8	8-40				
MC 5228	10°25.066'	131°55.017'	5148	54	0-12	12-24, 30-54		24-30		
MC 5229	10°25.123'	132°09.914'	4796	33	0-11	11-25	25-32			
MC 5230	10°24.996'	132°20.031'	4740	35	0-8	8-35				
MC 5231	10°25.119'	132°29.909'	4814	11	0-6				6-11	
MC 5232	10°09.961'	131°09.858'	4937	49	0-11	11-49				
MC 5233	10°09.897'	131°54.958'	5072	23	0-2	4-23	2-4			4-23 unit 1&2 mixed
MC 5234	10°09.964'	132°10.028'	4905	40	0-7	7-22	22-40			7-40 unit 2&3 mixed
MC 5235	10°09.998'	132°20.002'	4907	39	0-13	13-39				
MC 5236	10°09.941'	132°29.916'	4875	46	0-7	7-46				
MC 5237	09°55.008'	132°54.912'	4860	32	0-8	8-24	24-32			
MC 5238	09°54.921'	133°04.994'	4833	18	0-13				13-18	
MC 5239	09°39.996'	132°55.076'	4927	38	0-11	11-38				
MC 5240	09°40.042'	133°05.020'	4865	42	0-12	12-42				

Unit 1* : Unit 1 layer except for uppermost unit 1 layer.

어 있다는 가정 하에 전밀도(wet bulk density), 공극률(porosity), 공극비(void ratio)를 분석하였다. 퇴적물 교란에 가장 민감한 전단강도는 육안관찰을 통해 물리적으로 손상되지 않은 코어를 선택하여 시료가 선상에 올라오는 즉시 실험실에서 전동베인 시스템(motorized vane system)을 이용하여 코어표층에서 하부로 내려가면서 2 cm 간격으로 측정하였다. 직경 1.0 cm, 높이 0.88 cm의 베인을 이용하여 30°/min(0.0167 rad/sec)의 회전속도로 측정하였다.

4. 결과 및 토의

연구지역의 시료채취는 수심은 4,727~5,148 m 사이에서 이루어졌다. 또한, 시료의 길이는 7~65 cm의 범위로 나타났으며 대부분의 시료는 30 cm 이상 채취되었다(Table 1). 연구지역의 퇴적물은 색상의 차이에 따라 세 개의 암상으로 구별될 수 있다. Unit 1은 암회갈색(dark grayish brown, 10YR4/2, Munsell 1988) 또는 암갈색(dark brown, 10YR4/3), Unit 2는 노란갈색(yellowish brown, 10YR6/6) 또는 갈색(brown, 10YR5/3), 그리고 Unit 3은 대체로 흑갈색(very dark brown, 10YR3/2)으로 보인다.

연구지역의 주상시료에서 가장 많이 나타나는 암상의 형태는 Unit 1과 2가 깊이에 따라 반복적으로 산출되는 양상이며 이러한 일반적인 상분포 형태에 추가적으로 시료에 따라서 Unit 3가 관찰된다. 대부분 암상의 최상부는 Unit 1, 즉 함수율이 높은 암회갈색의 균질한(homogenous) 니질퇴적물로 구성되어 있으며, 직하부에 노란갈색의 Unit 2가 나타나는 경우에는 대부분 저서생물에 의해 형성된 것으로 보이는 다양한 크기와 모양을 가지는 구혈(burrows)들이 다수 관찰되어 퇴적물이 심하게 교란된 흔적이 나타나고 있으며, 구혈구조는 대부분 최상부 Unit 1의 퇴적물로 채워져 있다. 또한 구혈구조의 수는 대체로 하부로 가면서 감소하는 경향을 보여준다. 각 암상간의 색상경계는 시료에 따라서 뚜렷한 경계가 나타나기도 하고 점진적으로 변화하기도 한다. 또한, 몇몇 시료의 하부에서는 탄산염층이 나타나기도 한다. 최상부층 Unit 1의 두께는 평균 10.2 cm로 나타났다(Fig. 2). 그러나 연구지역에서 Unit 1의 두께는 위·경도에 의한 경향성이 나타나지 않는다.

망간단과 채광기가 해저면에서 원활하게 작동하기 위해서는 표층 퇴적물의 함수율과 전단강도와 같은 물리적인 성질을 정확하게 파악해야 한다. 최상부 Unit 1은 매우 높은 함수율과 매우 낮은 전단강도가 나타나는 암상으로 채광기가 원활하게 움직이는데 나쁜 조건이기 때문에 최상부 Unit 1의 두께와 분포양상은 채광지를 정할 때 매우 중

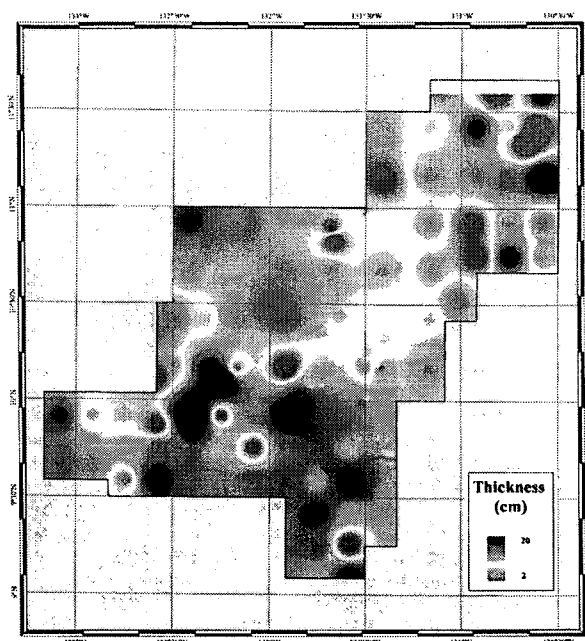


Fig. 2. Thickness of the uppermost layer in the KR (Korea Reserved) 5 area.

요한 요소가 된다. 그러나 연구지역에서 최상부 Unit 1의 두께와 분포 양상은 지역적으로 아무런 상관관계를 보여주고 있지 않으며 또한 채광시에는 암상별 자료 보다는 깊이별 자료가 더 유용하기 때문에 퇴적물의 깊이별 암상의 분포와 물리적인 성질의 연구가 필요하다. 본 연구지역에서는 깊이별로 퇴적물의 함수율, 입자밀도, 전밀도, 공극비, 공극률, 전단강도의 최소, 최대, 평균값을 구하였으며(Table 2), 함수율의 분포에 따라 약 15 cm와 30 cm에서 큰 변화가 나타남에 따라 15 cm와 30 cm를 기준으로 퇴적물의 깊이에 따라 A, B, C의 세 구간으로 나누었다(Fig. 3).

Section A(0~15 cm 구간)

Section A는 주로 함수율이 매우 높은 Unit 1이 우점하는 구간으로 나타났다. 이 구간에서는 최상부 Unit 1이 69.0%로 가장 많았으며 Unit 2는 22.6%, Unit 3는 6.5%, 하부 Unit 1은 1.1%, 탄산염층은 0.8%로 나타났다. Unit 1의 하부에는 대체로 Unit 2가 나타났지만 mc4107, mc4128, mc4129, mc5102, mc5116, mc5202, mc5204, mc5219, mc5222, mc5223, mc5233에서는 Unit 2가 생략된 채 Unit 3가 나타나기도 하고 mc5214와 mc5231에서는 Unit 1의 하부에 탄산염층이 나타났다. 예외적으로 mc4107, mc5204, mc5233의 경우는 Unit 3의 하부에 Unit 1 또는 Unit 2가 나타났다(Table 1).

이 구역은 표층에서부터 15 cm까지 평균 함수율이

Table 2. Minimum, maximum, and average values of sedimentary properties distinguished by down-core depth.

Core Depth (cm)	Water contents (%)				Grain density (g/cm ³)				Wet bulk density (g/cm ³)				Void ratio				Porosity (%)				Shear strength (kPa)						
	Min	Max	Average	S.D.*	Min	Max	Average	S.D.*	Min	Max	Average	S.D.*	Min	Max	Average	S.D.*	Min	Max	Average	S.D.*	Min	Max	Average	S.D.*	Min	Max	Average
0~1	310.1	535.7	404.0	37.5	2.294	2.530	2.370	1.124	1.190	1.155	7.40	12.57	9.57	88.1	92.6	90.5	0.07	9.66	0.74								
1~2	280.0	470.8	385.1	30.9																							
2~3	305.4	422.7	368.7	23.8													0.11	14.31	1.24								
3~4	261.8	411.7	357.1	31.0																							
4~5	238.8	472.4	349.9	39.1	2.319	2.518	2.383	1.136	1.235	1.175	6.02	11.09	8.30	85.8	91.7	89.1	0.21	16.41	1.80								
5~6	232.9	454.9	343.4	43.4																							
6~7	211.6	426.0	324.6	45.0													0.36	18.37	2.90								
7~8	130.3	417.6	306.8	43.9																							
8~9	106.9	481.0	295.4	49.9	2.293	2.500	2.396	1.146	1.275	1.196	4.95	9.93	7.26	83.2	90.8	87.8	0.81	20.31	4.03								
9~10	96.5	413.6	280.3	45.9																							
10~11	92.0	365.2	269.6	43.5													1.20	20.60	5.32								
11~12	184.2	352.6	260.2	34.3																							
12~13	154.8	333.4	253.0	33.6	2.329	2.507	2.432	1.183	1.252	1.224	5.29	7.37	6.24	84.1	88.1	86.1	1.35	17.36	5.91								
13~14	146.3	328.9	247.4	32.4																							
14~15	93.7	318.5	245.5	34.0	2.144	2.767	2.447	1.186	1.342	1.236	2.43	7.37	5.83	82.7	88.1	85.5	2.10	13.36	6.43								
15~16	82.8	305.2	241.1	37.6																							
16~17	80.8	328.9	242.1	38.9	2.353	2.518	2.435	1.180	1.389	1.232	3.06	7.78	6.06	83.5	88.6	86.0	2.55	22.52	6.94								
17~18	81.8	378.6	244.8	38.2																							
18~19	175.8	453.8	250.1	41.1													2.70	18.64	6.54								
19~20	169.1	422.6	245.0	33.9																							
20~21	121.5	417.3	242.2	36.5	2.377	2.520	2.442	1.153	1.393	1.235	3.01	10.10	6.02	83.2	91.0	85.8	1.16	16.97	6.98								
21~22	87.0	434.5	241.2	40.8																							
22~23	140.8	411.1	243.5	36.3	2.342	2.600	2.443	1.204	1.369	1.247	3.66	6.57	5.58	82.1	86.8	85.0	2.55	15.61	6.91								
23~24	111.7	416.0	240.9	36.5																							
24~25	124.3	420.1	241.0	37.9	1.981	2.519	2.429	1.151	1.305	1.232	2.46	10.08	6.05	83.3	91.0	85.9	2.85	22.44	7.19								
25~26	171.2	398.6	242.9	36.6																							
26~27	176.6	413.4	244.0	35.6													2.34	15.13	6.99								
27~28	186.9	414.4	242.8	33.3																							
28~29	186.4	322.5	240.1	23.7	2.265	2.524	2.437	1.187	1.267	1.234	5.06	7.85	5.92	83.5	88.7	85.5	3.22	11.61	6.78								
29~30	175.2	317.8	239.6	25.1	2.342	2.534	2.449	1.185	1.305	1.238	4.41	7.54	5.86	81.5	88.3	85.3											
30~31	184.4	324.3	240.6	25.8													3.30	11.61	6.51								
31~32	181.8	316.2	239.8	24.0																							
32~33	182.1	357.3	243.0	28.0	2.383	2.518	2.443	1.212	1.265	1.236	5.13	6.44	5.85	83.7	86.6	85.4	2.84	10.19	6.23								
33~34	180.2	316.7	240.6	22.7																							
34~35	180.4	488.4	245.8	43.4													3.22	9.59	5.96								

Table 2. Continued

Core Depth (cm)	Water contents (%)			Grain density (g/cm ³)			Wet bulk density (g/cm ³)			Void ratio			Porosity (%)			Shear strength (kPa)			
	Min	Max	Average	S.D.*	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
35~36	183.4	316.3	243.3	23.2	2.358	2.520	2.429	1.206	1.269	1.233	4.97	6.49	5.89	83.3	86.6	85.4	3.15	11.16	5.99
36~37	184.2	317.3	243.5	21.7	2.342	2.496	2.428	1.183	1.262	1.228	5.32	7.47	6.08	84.2	88.2	85.8	3.22	8.02	5.22
37~38	210.5	320.4	245.6	19.9	2.387	2.511	2.434	1.213	1.259	1.230	5.26	6.52	6.02	84.0	86.7	85.7	3.30	5.86	4.92
38~39	208.3	319.4	244.6	21.5	2.372	2.492	2.428	1.207	1.262	1.231	5.28	6.72	5.96	84.1	87.0	85.6	3.30	5.79	4.54
39~40	203.0	319.1	245.0	21.8	2.397	2.442	2.419	1.211	1.228	1.221	6.09	6.48	6.24	85.9	86.6	86.2			
40~41	206.6	315.8	247.3	22.1	2.400	2.425	2.413	1.220	1.228	1.225	5.94	6.28	6.06	85.6	86.3	85.8			
41~42	205.4	312.9	246.7	22.3	2.410	2.426	2.418	1.229	1.229	1.229	5.91	5.97	5.94	85.5	85.7	85.6			
42~43	208.9	302.3	246.0	21.6															
43~44	217.0	304.9	248.8	22.3															
44~45	212.0	305.8	246.3	25.6															
45~46	213.0	305.0	248.8	22.5															
46~47	211.5	309.1	250.1	26.2															
47~48	209.1	308.6	251.5	26.1															
48~49	234.1	300.8	263.4	23.1															
49~50	234.1	298.7	260.7	24.4															
50~51	216.4	315.6	260.0	36.2															
51~52	240.7	314.8	266.6	28.2															
52~53	230.5	313.8	259.6	32.0															
53~54	230.0	306.7	259.7	33.2															
54~55	250.0	307.3	269.3	32.9															
55~56	243.6	305.2	264.2	35.5															
56~57	245.1	300.1	263.8	31.5															
57~58	240.8	296.1	262.9	29.3															
58~59	225.7	288.9	256.0	31.7															
59~60	196.0	285.2	245.9	45.5															
60~61	250.6	281.3	261.5	17.2															
min	80.8	281.3	239.6	17.2	1.981	2.425	2.370	1.124	1.190	1.155	2.43	5.97	5.58	81.5	85.7	85.0	0.07	5.79	0.74
max	310.1	535.7	404.0	49.9	2.413	2.767	2.449	1.229	1.393	1.247	7.40	12.57	9.57	88.1	92.6	90.5	3.30	22.52	7.19
average	189.1	357.9	264.6	31.8	2.325	2.515	2.425	1.187	1.277	1.223	4.88	7.84	6.34	84.2	88.3	86.2	2.09	14.34	5.28

S.D. : Standard deviation

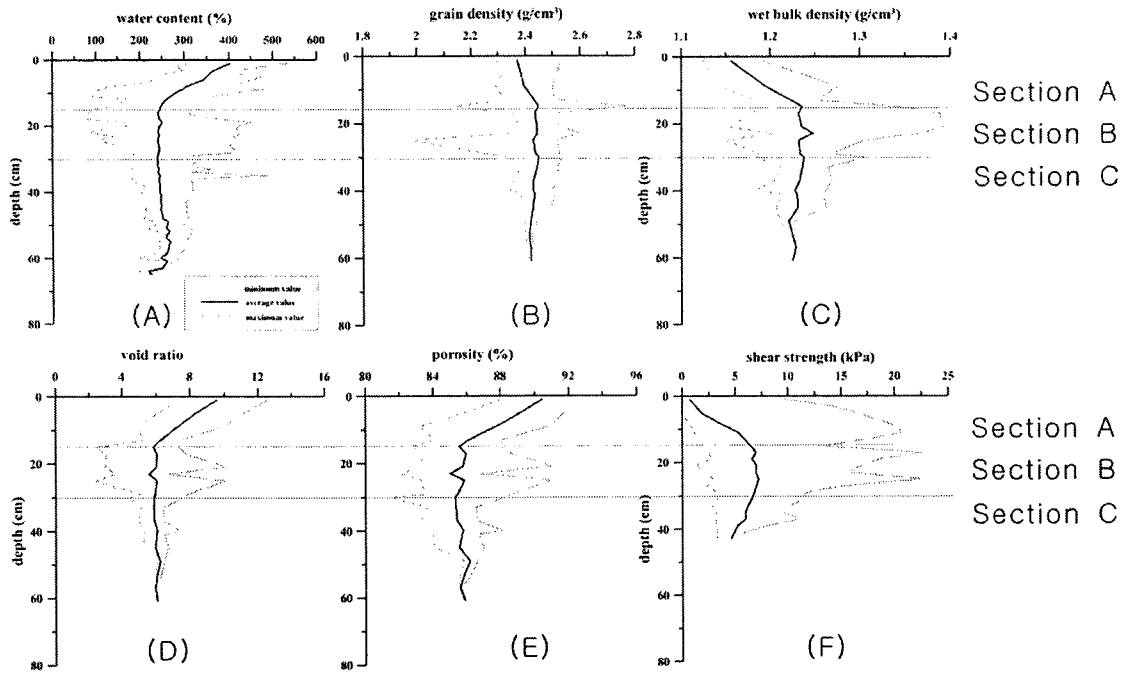


Fig. 3. Depth profiles of sediment properties based on minimum, maximum, and average values with depth. (A) water content, (B) grain density, (C) wet bulk density, (D) void ratio, (E) porosity, and (F) shear strength. Sediment column can be divided into three depth-related sections. Section A (0-15 cm) is characterized by high water content and low shear strength, and mostly consists of the uppermost Unit 1. Section B (15-30 cm) represents the interval showing various lithologic unit. Section C (>30 cm) represents the interval showing smaller variations than Section B because of difference of bioturbation.

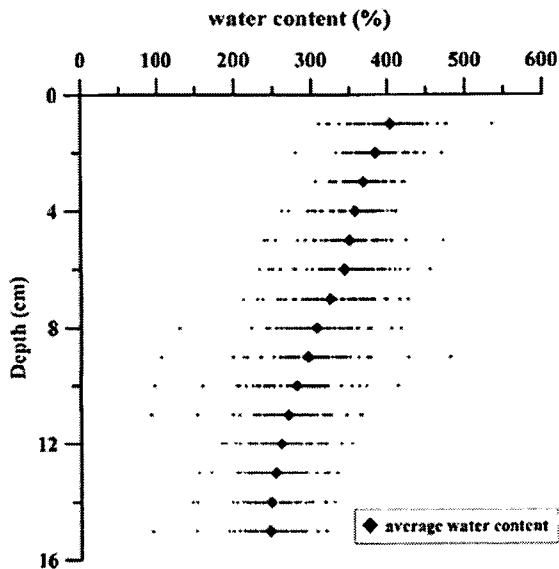


Fig. 4. Depth variations in water content of sediments from all cores in the uppermost 15 cm. Water content measured by following equation. % water content = 100×(wet wt. - dry wt.)/dry wt.

404%에서 245%까지 급격하게 함수량이 감소하는 구간으로 이 구간에서의 평균 표준편차는 37.9로 나타났다(Table 2). 연구지역 퇴적물중 0~15 cm 범위에 해당하는 1,061개의 함수율 자료를 분석한 결과 다음과 같은 관계식을 구하였다(Fig. 4).

$$water\ content\ (\%) = \left[\frac{core\ depth(cm) - 24.71}{0.05} \right], R^2 = 0.63$$

또한 각 깊이별 평균값을 이용하여 분석하면 보다 큰 상관계수를 얻을 수 있다.

$$water\ content\ (\%) = \left[\frac{core\ depth(cm) - 34.11}{0.08} \right], R^2 = 0.98$$

표층의 평균 입자밀도는 2.370 g/cm³이고 15 cm 깊이에서의 평균 입자밀도는 2.447 g/cm³로 점차 증가하는 것으로 나타났다. 표층의 평균 전밀도는 1.155 g/cm³이고 15 cm 깊이에서의 평균 전밀도는 1.236 g/cm³로 점차 증가하는 것으로 나타났다. 연구지역의 최상부 Unit 1의 평균 입자밀도가 가장 작은 이유는 연구지역의 입도조성인 모래와 실트 크기의 입자가 대부분 방산층이나 구조류 잔

해로 이루어져 있으며(박과 김 1997; 지 등 2000), 아직 용해되지 않은 현생 규질 퇴적물이 최상부 Unit 1에 많이 분포하기 때문인 것으로 판단된다(Richards and Chaney 1981). 표층의 평균 공극비는 9.57이고 15 cm 깊이에서의 평균 공극비는 5.83으로 Section A 구역에서의 공극비는 표층에서 하부로 갈수록 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 표층의 평균 공극률은 90.5% 이고 15 cm 깊이에서의 평균 공극률은 85.5%로 점차 감소하는 것으로 나타났다. 표층의 평균 전단강도는 0.74 kPa이고 15 cm 깊이에서의 평균 전단강도는 6.43 kPa로 점차 증가하는 것으로 나타났다, 최소값과 최대값은 각각 0.07 kPa과 20.60 kPa로 나타났다(Table 2).

Section B(15~30 cm 구간)

Section B은 대체로 Unit 2가 81.3%로 가장 많이 분포하고 있으며, 최상부 Unit 1은 0.5%, Unit 3은 13.3%, 하부 Unit 1은 3.9%, 탄산염층은 1.0%로 Section A에 비하여 매우 다양한 암상이 존재한다. 또한 저서생물에 의한 구형구조가 가장 뚜렷하게 관찰되는 구간이다. 이 구간에서 가장 우점하는 형태는 Section B의 전 구간이 Unit 2로 존재하는 경우이다. mc4124, mc5208, mc5212의 경우는 최상부 Unit 1이 Section B의 상부까지 연장된 경우이고, mc4102, mc4107, mc4108, mc5210, mc5228의 경우는 Unit 2의 하부에 Unit 1이 나타나는 경우이다. 그러나 이 구간에 나타나는 Unit 1은 단순히 색상에 의한 구별이며 퇴적물의 물성은 최상부의 Unit 1과는 많은 차이가 나타났다. Unit 2 또는 Unit 3의 값과 유사한 것으로 나타났다. 그러므로 최상부층 Unit 1에서 함수율이 높은 것은 Unit 1의 최상부층이 해수에 직접 접촉을 하기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. mc4105, mc4128, mc4129, mc5116, mc5223의 경우는 전 구간이 Unit 3로 Section A의 하부에서부터 이어지고 있다. mc4117과 mc5101은 약 20 cm 구간에서 탄산염층이 나타났다.

이 구역은 평균 함수율이 240%에서 250%까지 매우 일정한 함수량이 나타나는 구역으로 평균값은 242%이다. 이 구역에서의 평균 입자밀도는 2.439 g/cm^3 , 평균 전밀도는 1.236 g/cm^3 , 평균 공극비는 5.92, 평균 공극률은 85.6%로 나타났다. 이 구역에서의 평균 전단강도는 6.90 kPa로 나타났다. 최소값과 최대값은 각각 1.16 kPa 과 22.52 kPa로 나타났다.

Section C(30 cm 이하 구간)

Section C 구역의 암상은 Section B와 유사한 분포를 나타내어 Unit 2가 81.8%로 가장 많이 분포하고 있으며, Unit 3은 9.6%, 하부 Unit 1은 8.6%로 나타났다. 이 구역의 암상은 주로 Unit 2로 구성되어 있지만 mc4101,

mc4104, mc4105, mc4110, mc4114, mc4119 에서는 Unit 2 사이에서 하부 Unit 1층이 나타났으며, mc4105, mc4127, mc4128, mc5116, mc5229, mc5213, mc5223, mc5229, mc5234, mc5237 에서는 Unit 3이 Section A 또는 B에서부터 연장되어 나타났다.

Section C 구역의 대부분 지표들은 Section B와 유사한 평균값이 나타났지만 대체로 Section B에 비해서 편차가 작은것이 특징이다. Section C 구역 퇴적물의 물리적 성질이 Section B 구역과 유사한 평균값을 보이면서도 편차가 작은 이유는 Section B 구역과 Section C 구역은 모두 Unit 2가 우점하는 구역으로써 저서생물에 의해 형성된 것으로 보이는 다양한 크기와 모양을 가지는 구형들에 의해 퇴적물이 심하게 교란되어 있지만 하부로 갈수록 구형의 크기와 빈도수가 작아지는 것으로 보아 Section C 구역은 Section B 구역에 비하여 상대적으로 덜 교란된 구역이기 때문인 것으로 생각된다. 또한 퇴적물의 물리적인 성질이 가장 다른 최상부 Unit 1층이 Section C 구역에 거의 산출되지 않기 때문으로 생각된다. 이 구역에서의 평균 함수율은 252%로 나타났으며 Section B와 비교하면 비슷하지만 하부에서는 약간 평균 함수율이 높게 나타났다. Section C 구역의 평균 입자밀도는 2.426 g/cm^3 , 평균 전밀도는 1.229 g/cm^3 , 평균 공극비는 6.02, 평균 공극률은 85.7%로 나타났다. 이 구간에서의 평균 전단강도는 5.62 kPa로 나타났으며 최소값과 최대값은 각각 3.15 kPa과 11.61 kPa로 나타났다.

전단강도는 Section A에서는 하부 방향으로 갈수록 점차 증가하고 Section B에서는 대체로 일정한 것으로 나타났다. 최소, 최대값의 편차가 매우 큰 것으로 나타났다. Section B에서 고화된 하부 퇴적층의 전단강도가 불규칙적인 이유는 Section B 구역에 서식하는 저서생물들의 생물교란 작용에 원인이 있다(Grupe *et al.* 2001). 퇴적물(10~20 cm)에 서식하는 저서생물들의 활동은 경우에 따라 입자를 뭉치게 하는 효과(cementing effect)와 반대로 교란작용으로 퇴적물의 전단강도를 감소시키는 양면 효과가 있는 것으로 알려져 있다(Lambert *et al.* 1985). 지 등(2004b)은 C-C 지역 규질퇴적물의 연구를 통해 동일한 코어에서 반복측정한 결과 생물교란의 흔적은 모두 전단강도를 감소시키며, 단단하게 고화된 퇴적물에서 생물교란 흔적이 크고 뚜렷한 경우 전단강도는 38~53%까지 감소시킨다고 하였다.

본 연구는 채광 예상지역에서 퇴적물의 물리적인 성질을 깊이의 관점으로 최소, 최대, 평균값을 제시하였다. 또한, $9^{\circ}05' \sim 11^{\circ}40' \text{N}$, $130^{\circ}30' \sim 133^{\circ}10' \text{W}$ 의 상대적으로 매우 좁은 지역에서 많은 시료로 분석한 결과이다. 이번 연구 결과는 향후 위·경도가 현저하게 다른 또 다른 채광 예상지역에 대한 정밀 분석시에 유용한 정보를 제공하고 궁

극적으로 대한민국 광구지역에서 개발등급을 평가할 때 각종 지표들의 기준을 만드는데 기여할 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 해양수산부가 지원하는 “태평양 심해저 광물 자원 개발사업(PM38201, PM38202)”의 일환으로 수행되었다.

본 연구에 많은 도움을 주신 한국해양연구원 심해연구사업단 연구원 여러분과 온누리호 선장님과 승무원들께 감사드립니다. 그리고 세밀한 심사와 교정에 시간을 내 주신 두 분의 심사위원님께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 박승현, 정희수, 박찬영, 이경용, 김기현. 1999. 한국심해환경 연구(KODES) 지역 표층 퇴적물 중 속성작용에 의한 금속의 분화. *한국해양학회지 「바다」*, 4(3), 215-225.
- 박정희, 김기현. 1997. 북동태평양 한국심해연구지역의 방산층 생성서와 고환경. *한국고생물학회지*, 13, 119-136.
- 정희수. 1994. 북동태평양 KODOS 지역 퇴적물과 공극수 및 망간단괴의 지구화학적 특성. 이학박사 학위논문, 서울대학교. 282 p.
- 정희수, 강정극, 정갑식, 신동혁. 1991. KODOS-89 지역 표층의 황색 퇴적물과 그 하부 갈색 퇴적물의 지구화학적 특성. *한국해양학회지*, 26(3), 193-203.
- 정희수, 박승현, 김동선, 최만식, 이경용. 1997. 한국심해환경 연구(KODES) 지역 주상 퇴적물중 금속 및 희토류원소의 지구화학적 특성. *한국해양학회지 「바다」*, 2(2), 125-137.
- 지상범, 김기현, 문재운, 이경용, 손승규, 오재경. 2000. 북동태평양 KODOS 지역 심해저 퇴적물의 지질공학적 특성. *한국해양학회지 「바다」*, 5(4), 320-334.
- 지상범, 박정기, 손승규, 이경용, 이현복. 2004a. 북동태평양 심해저 퇴적물의 배인전단강도 측정에 관한 연구. *자원환경지질*, 37(2), 235-244.
- 지상범, 강정극, 김기현, 박정기, 손승규, 고영탁. 2004b. 북동태평양 클라리온-클리퍼튼 균열대 심해저 퇴적물의 전단강도 특성. *자원환경지질*, 37(2), 255-267.
- 지상범, 오재경, 이현복, 김기현. 2003a. 북동태평양 클라리온-클리퍼튼 지역 심해저 표층 퇴적물의 지질공학적 특성 연구. *Ocean and Polar Res.*, 25(2), 133-145.
- 지상범, 형기성, 김종욱, 김현섭, 이근창, 손승규. 2003b. 북동태평양 클라리온-클리퍼튼 균열대 KODOS 지역 심해저 퇴적물의 지질공학적 특성에 따른 유형분류. *Ocean and Polar Res.*, 25(4), 529-543.
- Grupe, B., H.J. Becker, and H.U. Oebius. 2001. Geotechnical and sedimentological investigations of deep-sea sediments from a manganese nodule field of the Peru Basin. *Deep-Sea Res. II*, 48, 3593-3608.
- IFREMER. 1989. Evaluation et etude des moyens necessaires a l'exploitation des nodules polymetalliques, Rapport final, TOME I, 1/1-5/10 unpublished.
- Jeong, K.S., J.K. Kang, and S.K. Chough. 1994. Sedimentary processes and manganese nodule formation in the Korea Deep Ocean Study (KODOS) area, western part of Clarion-Clipperton fracture zones, northeast equatorial Pacific. *Mar. Geol.*, 122, 125-150.
- 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.
- Lambert, D.N., P.J. Valent, M.D. Richardson, and G.F. Merrill. 1985. Spatial variability in selected geotechnical property measurements from three sedimentary provinces in the Venezuela Basin. *Mar. Geol.*, 68, 107-123.
- Munsell. 1988. Soil Color Chart. MacBeth Div., Kolmorgen Corp., Mayland.
- Richards, A.F. and R.C. Chaney. 1981. Present and future geotechnical research needs in deep ocean mining. *Mar. Mining*, 2, 315-337.

Received Oct. 31, 2006

Accepted Dec. 8, 2006