

북동태평양 대한민국 광구 KR1, 2, 5 지역 표층 퇴적물의 물리적 특성 비교

이현복* · 지상범 · 박정기 · 김기현 · 주세종¹ · 오재경²

한국해양연구원 심해-해저자원연구부

¹한국해양연구원 해양생물자원연구부

²인하대학교 해양과학과

Physical Properties of Surface Sediments of the KR(Korea Reserved) 1, 2, and 5 Areas, Northeastern Equatorial Pacific

HYUN-BOK LEE*, SANG-BUM CHI, CHEONG-KEE PARK, KI-HYUNE KIM, SE-JONG JU¹,
AND JAE-KYUNG OH²

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

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

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

망간단괴를 상업적으로 개발하기 위해 고려할 사항은 망간단괴의 부존량과 금속함량 외에 채광기의 주행성과 채광시 발생하는 환경충격의 최소화를 들 수 있다. 특히 환경충격의 최소화를 위해 우선 채광지역의 해저면 특성을 이해하는 것은 필수적이다. 해저면의 특성 중 해저퇴적물의 물리적 특성과 전단강도는 주행성과 환경변화를 예측하는 중요한 기준이 된다. 이들 특성을 파악하기 위하여 2004년부터 2006년 사이에 북동태평양 클라리온-클리퍼톤 균열대의 대한민국 광구에서 채취한 주상시료 퇴적물의 함수율, 입도, 밀도, 공극률 및 전단강도를 분석하였다. 분석결과, 퇴적물의 물리적인 특성은 경도 변화에 따른 동서간의 차이(KR1과 KR2 차이)보다 위도 변화에 따른 남북간의 차이(KR1 또는 KR2와 KR5 차이)가 뚜렷한 것으로 나타났다. 남쪽 지역의 함수율, 공극비, 공극률은 북쪽 지역보다 높게 나타난 반면에 입자밀도는 남쪽 지역이 북쪽 지역에 비해서 상대적으로 낮게 나타났다. 퇴적물 주상시료의 전단강도는 0~10 cm에서 북쪽 지역이 조금 높지만 10 cm 하부의 깊이에서는 남쪽지역이 뚜렷이 높게 나타났다. 또한 채광기의 정상주행에 필요한 전단강도를 5 kPa라고 가정하면 KR1, KR2, KR5 지역에서 평균적으로 5 kPa에 도달하는 깊이는 각각 18, 13, 10 cm로 나타났다. 채광기가 정상 주행하는 동안 같은 부피의 퇴적물이 교란된다면 함수율이 높은 퇴적물에서 교란되는 퇴적물의 양이 적을 것이다. 또한 채광기의 정상주행에 필요한 전단강도에 도달하는 퇴적층의 깊이가 얕을수록 교란되는 퇴적물의 부피가 작을 것으로 예상된다. 따라서 채광작업은 연구지역 중에서 함수율이 높고 10 cm 하부의 전단강도가 큰 남쪽 지역이 북쪽지역에 비해 유리할 것으로 판단된다.

Trafficability of a miner and potential environmental impacts due to mining activities should be considered in the selection of a commercial manganese nodule mining site. These two factors can be evaluated comparatively with physical properties and shear strength of sea-bed sediments. For the qualitative comparison of potential mining sites in terms of these two factors, physical properties such as water contents, void ratios, porosities, and grain densities, and shear strengths of surface sediments were determined for the three potential manganese nodule mining sites (KR1, KR2, and KR5) in the Korean manganese nodule contract area, northeast Pacific. For the study, sediment samples were collected from 107 stations from 2004 to 2006. The physical properties of surface sediments showed more significant differences between northern (KR1, KR2) and southern (KR5) blocks than between northern blocks (KR1 vs. KR2). Water content, void ratio, and porosity of sediments from KR5 were relatively higher than those from KR1 and KR2. Grain density of sediments from KR5 was relatively lower than those from KR1 and KR2. Shear strengths of the top 10cm sediments were higher in KR1 and KR2, whereas those of the deeper part were highest in KR5 block. Generally, sediments of high water contents are less suspendible than those of the low water contents by benthic disturbances, thus less disturbance is expected in the sediments of high water content by mining activities. In terms of trafficability, the shear strength of sediment below 10 cm deep is more important than shallower part because miner will disturb at least

*Corresponding author: hblee@kordi.re.kr

top 10 cm interval of the surface sediments. Base on these results, we conclude that KR5 area will be the best site for commercial mining among three investigated sites in this study.

Keywords: Physical Properties, Trafficability, Northeast Equatorial Pacific, Deep-sea Mining

서론

심해저 망간단괴는 태평양의 클라리온-클리퍼튼 균열대 (Clarion - Clipperton Fracture Zone, CCFZ)와 중앙 인도양 분지 (Central Indian Basin, CIB)에서 대량으로 발견된다. 이 망간단괴에는 구리, 니켈, 코발트, 망간과 같은 금속자원이 함유되어 있어 세계적인 관심을 받고 있다. 이러한 망간단괴 개발은 인위적인 해양환경 변화를 유발하기 때문에 상업적인 생산 이전에 망간단괴 채광에 따른 해양환경영향 평가가 반드시 이루어져야한다.

미국은 1975년부터 1980년까지 해양대기청 (NOAA)의 DOMES (Deep Ocean Mining Environment Study) 프로그램을 통하여 망간단괴 채광에 따른 기초 환경조사를 최초로 시도하였다(Burns *et al.*, 1980; Ozturgut *et al.*, 1980). 그 후 망간단괴 채광에 따른 저서 환경 변화를 정량적으로 평가하기 위하여 1990년대에 CIE (Controlled Impact Experiment)와 BIE (Benthic Impact Experiment) 등의 다양한 환경충격실험을 하였다(Trueblood, 1993).

독일은 1989년부터 DISCOL (Disturbance Recolonization Experiment) 프로그램을 통하여 페루 앞바다에서 저층충격실험을 하였다(Foell *et al.*, 1990). 또한 저층충격실험은 1990년대에 태평양의 클라리온-클리퍼튼 해역에서 JET (Japan Deep Sea Impact Experiment), IOM-BIE (Interoceanmetal Benthic Impact Experiment)와 인도양에서 INDEX (India Deep-sea Experiment) 프로그램이 진행되었다(Fukushima, 1995; Tkatchenko *et al.*, 1996; Sharma and Nath, 1997).

이러한 실험들은 망간단괴 채광이 저서생태계에 미칠 환경충격에 대한 많은 자료를 제공하였다(Radziejewska, 1997; Trueblood *et al.*, 1997; Shirayama, 1999; Ingole *et al.*, 1999). 그러나 모든 실험들은 각국의 사정에 따라 저층충격실험의 디자인이 다르고 퇴

적물의 물리적인 성질도 지역에 따라 차이가 있기 때문에 이들 실험에 의해 획득한 퇴적물 자료를 우리나라 광구에 직접 적용시킬 수는 없다. 따라서 우리나라 광구에서 망간단괴 채광이 저서생태계에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 외국의 경우처럼 우리나라 광구지역 퇴적층의 깊이별로 교란전의 상태에 대한 정보가 필요하다.

지금까지 우리나라 광구지역 내의 표층퇴적물에 대한 물리적, 지질공학적인 특성 연구는 주로 지역적 분포특성과 수직적 변화와 지질공학적 특성에 영향을 미치는 주요 요인들을 파악하기 위한 연구가 해양학적인 관점에서 진행되었다(지 등, 2004). 또한 채광기의 효과적인 운용 여부를 평가하기 위하여 약 40 cm의 주상시료의 전단강도와 입자크기에 대한 연구가 수행된 바 있다(지 등, 2003).

이번 연구는 우리나라 광구지역인 KR1, KR2, KR5 지역의 표층퇴적물의 깊이별 물리적 특성을 이미 저층충격실험을 실시한 지역과 비교하고 우리나라 광구에서 망간단괴 채광기의 주행에 유리한 지역과 퇴적물 교란에 의한 환경파괴가 적은 곳을 파악하기 위해 실시하였다.

연구 지역개관

연구지역은 북동 태평양 CCFZ 내에 있는 대한민국 광구 중 KR (Korea Reserved) 1, KR2, KR5 지역으로 향후 저층충격실험의 유력 후보 지역이다(Fig. 1). 세 지역은 KR1 (15°44'~16°55'N, 125°20'~126°30'W)과 KR2 (16°00'~16°50'N, 130°10'~133°15'W)는 동일 위도 상에 있지만 경도 차이가 크며, KR2와 KR5 (9°05'~11°40'N, 130°30'~133°10'W)는 동일 경도 상에 있지만 위도 차이가 큰 특징이 있다.

광역지형탐사 연구결과 KR1 지역과 KR2 지역은 전체적으로 NNW-SSE 방향의 불연속적인 구조선이 반복적으로 나타나며, 이

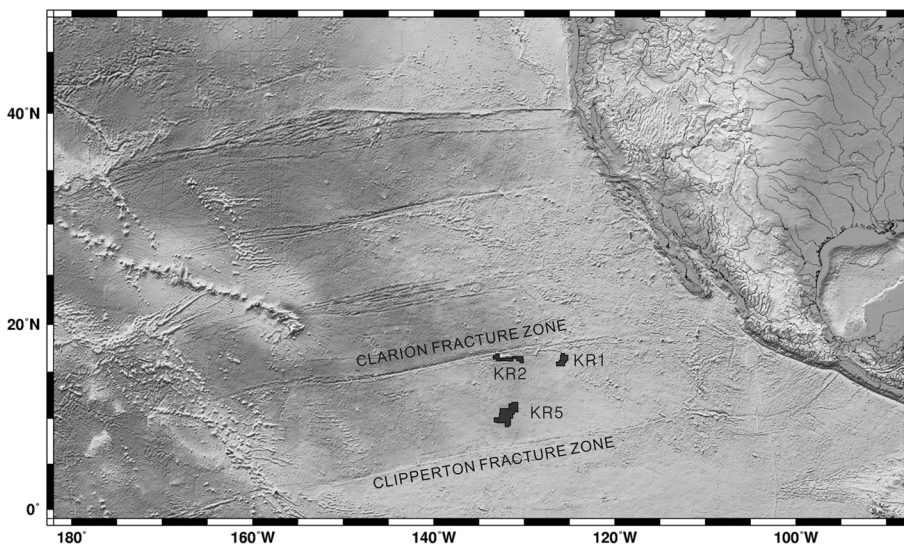


Fig. 1. Location map of the study area.

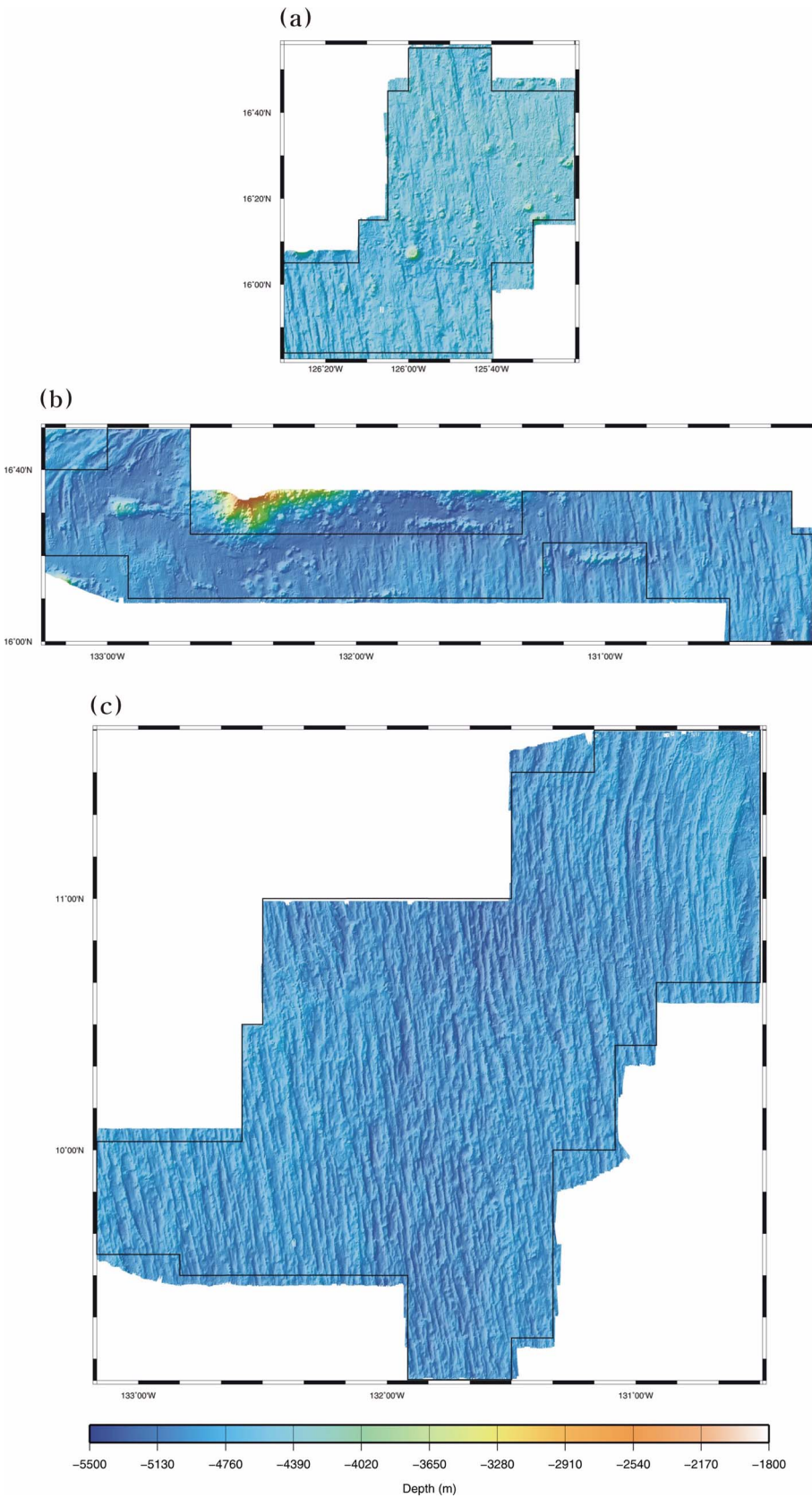


Fig. 2. Bathymetric maps of the KR1 (a), KR2(b), and KR5(c) blocks.

지역에서 규모가 다소 작은 해저산이 다수 나타난다(Fig. 2). KR1 지역의 수심은 4,300~4,800 m 범위로 나타나며 KR1 지역은 위

도 16°15'N을 기준으로 남쪽 지역의 수심이 북쪽 지역보다 약 200~300 m 더 깊게 나타난다. KR2 지역의 수심은 동쪽에서 4,900 m

이고 서쪽으로 가면서 점점 깊어져서 5,200 m까지 도달한다. 또한 KR2 광구의 북서쪽 지역에는 북동방향으로 발달한 구조선이 나타나는데 이것은 KR2 지역이 동서방향으로 발달해 있는 클라리온 균열대와 가까이 있어 그 영향을 받은 것으로 보인다. KR5 지역은 대체적으로 NNW-SSE 방향의 해저구릉과 해저곡이 반복적으로 발달되어 있지만, 남북방향의 구조선 변화가 매우 다양하게 불연속적으로 나타나고 있다. KR5 지역의 북동지역 주향방향은 북북동 방향을 이루고 있고, 방향이 시계방향으로 전이되고 있는 형태를 보이는 반면, 중앙부의 해령들은 정북 혹은 북북서 방향으로 서서히 바뀌는 형태를 나타내고 있다. 또한, 수심의 변화 폭은 4,800~5,300 m로 나타난다.

재료 및 방법

이번 연구에 사용된 퇴적물 시료는 2006년에 한국해양연구원 소속 조사선인 온누리호를 이용하여 CCFZ 내의 대한민국 단독광구 중 KR1, KR2, KR5 지역에서 퇴적물 시료의 물리적 훼손이 매우 적은 다중 주상시료 채취기(multiple corer)로 획득하였다. 시료의 갯수는 KR1, KR2, KR5 지역에서 각각 11, 13, 5개를 채취했으며 KR5 지역의 경우는 통계 처리시에 신뢰도를 높이기 위하

여 이 등(2006)에 의해 발표된 2004년과 2005년에 채취한 78개의 주상시료를 포함하여 계산하였다(Table 1). 획득된 주상시료의 평균길이는 약 35 cm (6~67 cm)로 나타났다. MC로 채취된 퇴적물 상층수를 사이펀을 이용하여 천천히 제거한 후, 코어절단기를 이용하여 종단면을 이등분하였으며, 부시료는 1 cm 간격으로 획득하여 플라스틱 용기에 넣고 밀봉하였다. 함수율(% dry weight)은 현장에서 채취되어 온 젖은 시료의 무게를 쟀 후 냉동건조기에서 48시간 건조시킨 후 건조통에서 실온으로 24시간 보관한 후, 무게를 0.0001 g까지 평량하여 계산(% water content = 100 × (wet wt. - dry wt.) / wet 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% 포화되어 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 전동 베인 시스템(motorized vane system)을 이용하여 주상시료 표층에서 하루로 내려가면서 2 cm 간격으로 측정하였다. 직경 1.0 cm, 높

Table 1. Summary of core locations, water depth, core length, and sediment characteristics.

Station No.	Latitude (N)	Longitude (W)	Depth (m)	Core Length(cm)	Thickness (cm)			remark
					unit 1	unit 2	unit 3	
mc06-02-01	15°55.161'	125°46.993'	4546	47	0-47			
mc06-02-02	15°54.748'	126°04.211'	4490	35	0-35			
mc06-02-03	15°55.032'	126°23.081'	4630	36	0-36			
mc06-02-04	16°10.691'	125°38.194'	4450	42	0-42			
mc06-02-05	16°10.729'	126°03.486'	4539	40	0-40			
mc06-02-06	16°27.081'	125°23.327'	4391	67	0-67			KR1
mc06-02-07	16°21.377'	125°40.766'	4432	49	0-49			
mc06-02-08	16°26.900'	126°00.571'	4459	44	0-44			
mc06-02-09	16°42.931'	125°25.548'	4377	27	0-27			
mc06-02-10	16°42.689'	125°59.261'	4411	36	0-36			
mc06-02-11	16°51.297'	125°47.740'	4535	6	0-6			
mc06-02-12	16°04.562'	130°22.445'	4840	59	0-59			
mc06-02-13	16°13.417'	130°20.513'«	4918	38	0-38			
mc06-02-15	16°13.226'	132°05.546'	5041	35	0-16		16-35	
mc06-02-16	16°13.307'	132°44.335'	5019	36	0-36			
mc06-02-17	16°22.066'	132°30.484'	4983	35	0-35			
mc06-02-18	16°21.924'	131°37.724'	5180	34	0-34			
mc06-02-19	16°21.948'	130°28.632'	4978	31	0-10		10-31	KR2
mc06-02-20	16°30.563'	130°25.725'	4996	34	0-22		22-34	
mc06-02-21	16°30.457'	130°45.486'	4970	27	0-22		22-27	
mc06-02-23	16°30.375'	131°10.399'	5054	37	0-37			
mc06-02-25	16°30.388'	133°10.472'	5093	35	0-20		20-35	
mc06-02-26	16°44.466'	132°51.712'	5161	19	0-19			
mc06-02-27	16°37.761'	132°48.530'	5153	36	0-15		15-36	
mc06-01-13	10°30.007'	131°19.180'	5033	38	0-12	12-38		
mc06-01-14	9°59.873'	131°00.759'	4849	27	0-12	12-27		
mc06-01-15	10°00.756'	132°00.016'	4886	27	0-15	15-17	17-27	KR5
mc06-01-16	11°00.391'	131°00.503'	4954	40	0-10	10-40		
mc06-01-17	11°00.095'	131°58.574'	4969	35	0-12	12-35		

이 0.88 cm의 베인을 이용하여 30°/min (0.0167 rad/sec)의 회전 속도로 측정하였다.

결 과

KR1, KR2, KR5 지역 퇴적물의 깊이별 물리적 특성

퇴적층의 분석 깊이별 간격 결정: 표층퇴적물의 깊이별 분석 간격은 외국에서 연구된 결과와 비교할 수 있도록 설정하였다. 예를 들면 Yamazaki and Sharma (2001)는 저층충격실험에 의해 재부유되는 퇴적물의 부피를 계산하기 위하여 0~5 cm의 표층퇴적물의 평균 함수율 값을 이용하였다. 또한 Khadge (1999)는 CIB 지역에서 저층충격실험 전후의 표층퇴적물의 지질공학적인 성질의 변화를 연구하기 위해 표층퇴적물을 0~5 cm, 5~10 cm, 10~20 cm, >20 cm 층 등으로 구분하였다. 따라서 우리나라 광구에서 획득한 주상시료도 0~5 cm, 5~10 cm, 10~20 cm, >20 cm 층으로 구분하여 함수율, 전밀도, 입자밀도, 공극비, 공극률, 전단강도와 같은 퇴적물의 물리적 특성을 분석하였다(Table 2).

함수율: 함수율은 KR1, KR2, KR5 지역 모두 최상부 5 cm에서 가장 높고 하부로 갈수록 점차 낮아져서 > 20 cm 층에서 함수율이 가장 낮은 것으로 나타났다. 또한 깊이별 함수율 분포는 세 지역 모두 표층에서부터 약 10 cm 까지는 평균 함수율이 급격히 감소하지만 그 이하의 깊이에서는 완만하게 감소하는 것으로 나타났다. 평균 함수율은 전체적으로 KR5, KR1, KR2의 순서로 높게 나타났는데 KR1지역의 함수율은 KR2 지역 보다 약간 높은 수준인 반면에 KR5 지역의 함수율은 KR1과 KR2 지역보다 매우 높게 나타났다. 그 결과 KR5 지역의 > 20 cm 에서의 평균 함수율 (70.8%)까지도 KR1과 KR2의 최상부 5 cm의 평균 함수율(65.0, 63.9%) 보다 높은 것으로 나타났다(Fig. 3).

전밀도와 입자밀도: 전밀도는 세 지역 모두 깊이가 증가하면서 다소 증가하는 것으로 나타났다. 또한 연구지역의 북부에 있는

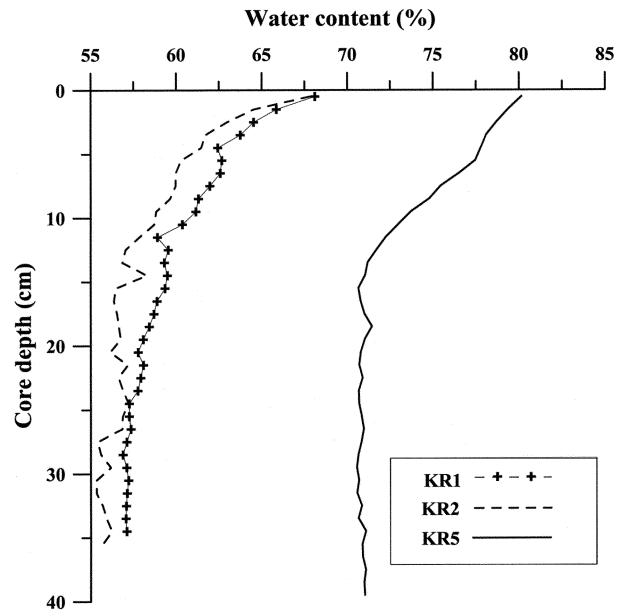


Fig. 3. Variation of water contents with depth in KR1, KR2, and KR5 sediments.

KR1과 KR2 지역이 매우 유사하게 나타났다. 이 두 지역의 평균 전밀도는 최상부층에서 하부로 가면서 1.30 g/cm³부터 1.39 g/cm³까지 점점 증가하는 것으로 나타났다. 남부에 있는 KR5 지역의 평균 전밀도 또한 최상부층에서 하부로 가면서 점점 증가하지만 1.16~1.24 g/cm³의 범위로서 북부지역에 비해 낮게 나타났다.

KR1 지역에서의 평균 입자밀도는 2.58~2.59 g/cm³로 가장 높게 나타났으며 KR2 지역은 2.56~2.58 g/cm³로 나타났다. 그리고 KR5 지역의 평균 입자밀도는 2.37~2.44 g/cm³로써 KR1과 KR2 지역보다 상대적으로 낮게 나타났다. 깊이별 입자밀도의 분포는 KR1과 KR2 지역은 전체적으로 큰 변화가 없지만 KR5 지역에서

Table 2. Summary of physical properties of surface sediments from KR1, KR2, and KR5 areas

Depth (cm)		KR1				KR2				KR5			
		0-5	5-10	10-20	>20	0-5	5-10	10-20	>20	0-5	5-10	10-20	>20
Water content (%)	Max.	68.0	65.6	61.9	59.6	65.8	64.5	60.7	64.5	81.2	80.5	76.0	75.9
	Min.	59.0	57.3	56.6	55.6	60.2	53.2	54.2	53.4	75.3	71.4	66.0	64.6
	Ave.	65.0	61.7	59.1	57.2	63.9	59.8	57.2	56.8	78.8	75.9	71.7	70.8
Bulk density (g/cm ³)	Max.	1.37	1.39	1.39	1.40	1.35	1.42	1.41	1.43	1.20	1.28	1.30	1.31
	Min.	1.27	1.29	1.33	1.36	1.29	1.30	1.35	1.30	1.12	1.14	1.19	1.19
	Ave.	1.30	1.33	1.36	1.38	1.31	1.35	1.38	1.39	1.16	1.20	1.23	1.24
Grain density (g/cm ³)	Max.	2.66	2.66	2.61	2.62	2.58	2.58	2.60	2.60	2.51	2.53	2.53	2.53
	Min.	2.55	2.55	2.57	2.57	2.54	2.54	2.52	2.47	2.16	2.29	2.34	2.35
	Ave.	2.58	2.58	2.58	2.59	2.56	2.56	2.58	2.57	2.37	2.40	2.43	2.44
Void ratio	Max.	5.4	4.9	4.2	3.8	4.9	4.6	4.0	4.5	12.6	11.5	7.7	7.7
	Min.	3.8	3.6	3.4	3.2	3.9	2.9	3.0	2.9	7.2	4.9	4.8	4.5
	Ave.	4.8	4.1	3.7	3.5	4.5	3.9	3.4	3.4	9.2	7.2	6.1	5.9
Porosity (%)	Max.	84.3	83.1	80.7	79.3	83.1	82.2	90.9	81.5	92.6	92.0	88.5	88.5
	Min.	79.2	78.1	77.1	76.5	79.1	74.4	75.3	74.6	87.5	83.2	82.7	81.5
	Ave.	82.5	80.4	78.8	77.5	81.6	79.0	77.3	76.9	90.1	87.7	85.8	85.5
Shear strength (kPa)	Max.	1.97	4.16	5.19	6.02	2.56	5.00	6.39	8.58	1.37	6.89	17.98	17.54
	Min.	0.30	0.60	1.46	1.80	1.05	2.68	4.01	4.51	0.15	0.44	2.59	3.28
	Ave.	1.42	3.19	4.36	5.03	1.84	3.93	5.22	6.03	0.60	2.39	6.58	7.23

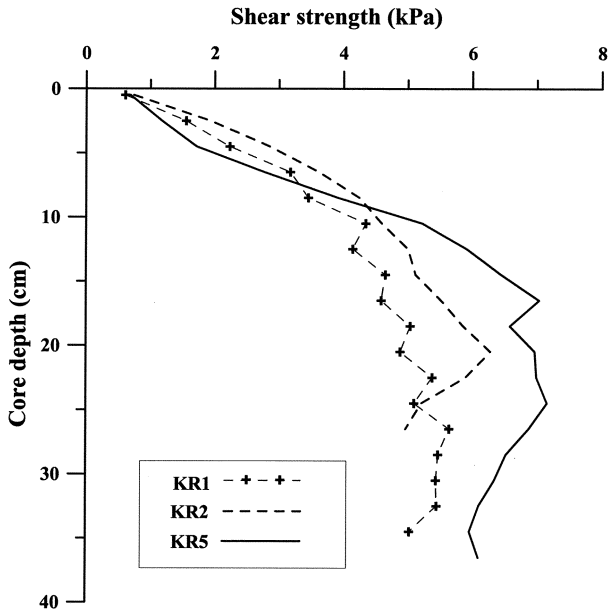


Fig. 4. Variation of shear strength with depth in KR1, KR2, and KR5 sediments.

는 표층에서 가장 낮고 깊이가 증가하면서 입자밀도가 다소 증가하는 것으로 나타났다.

공극비와 공극률: 공극비와 공극률은 세 지역 모두 깊이가 증가하면서 점점 감소하는 것으로 나타났다. 지역별 분포는 KR1과 KR2 지역의 공극비는 각각 3.5~4.8과 3.4~4.5로 나타났지만 KR5 지역의 공극비는 5.9~9.2로 상대적으로 높게 나타났다. 또한 KR1과 KR2 지역의 공극률은 각각 77.5~82.5%와 76.9~81.6%로 나타났지만 KR5 지역의 공극률은 85.5~90.1%로 높게 나타났다.

전단강도: KR1과 KR2 지역의 평균 전단강도는 0~5 cm에서는 각각 1.42 kPa와 1.84 kPa로 나타났으며 하부로 가면서 점점 증가하여 > 20 cm에서는 각각 5.03 kPa와 6.03 kPa로써 매우 유사한 경향이 나타났다. 그러나 동일한 깊이에서 평균 전단강도를 비교하면 대부분 KR1 지역보다 KR2 지역에서 약간 높게 나타났다 (Fig. 4). KR5 지역의 평균 전단강도는 북부의 두 연구지역과는 다른 경향이 나타났다. 최상부층 10 cm 까지 KR5 지역의 평균 전단강도는 0.60~2.39 kPa로 KR1 (1.42~3.19 kPa)과 KR2 (1.84~3.93 kPa) 지역보다 낮게 나타났다. 그러나 10 cm 보다 깊은 하부층의 평균 전단강도는 KR5에서 6.58~7.23 kPa로 KR1 (4.36~5.03 kPa)과 KR2 (5.22~6.03)에 비하여 오히려 높은 것으로 나타났다.

토 의

함수율과 전단강도의 관계

대부분 주상시료에서의 함수율은 하부로 가면서 점점 감소하는 경향이 나타났다. 그러나 감소하는 정도에 차이가 있어서 0~10 cm 구간까지는 함수율이 가장 높으면서 가장 급격하게 감소하며 그 하부 구간에서는 함수율의 차이가 거의 없거나 약간 감소하는 경향이 나타났다. 같은 깊이에서의 평균 함수율을 비교하면 구간에 관계없이 KR5 지역에서 뚜렷하게 높게 나타났다. 또한 북쪽광

구인 KR1과 KR2를 비교하면 함수율은 대부분의 깊이에서 약간 KR1 지역이 높게 나타났다. 반면에북쪽광구 (KR1, KR2)에 비해 남쪽광구 (KR5)의 함수율은 매우 높게 나타나서 KR5 지역의 > 20 cm의 평균 함수율(70.8%)이 KR1 (65.0%)과 KR2 (63.9%) 지역의 최상부 층보다도 높은 것으로 나타났다(Fig. 3).

대부분의 퇴적층에서 깊이가 증가하면서 전단강도가 증가하는 양상이 나타났다. 또한 북쪽광구인 KR1과 KR2를 비교하면 전단강도는 KR2 지역이 약간 높게 나타났다. 그러나 남쪽지역의 전단강도는 북쪽지역과 경향성이 매우 다른 것으로 나타났다. 즉, 평균 전단강도는 최상부 약 7~8 cm 까지는 KR2, KR1, KR5의 순서로 높게 나타나지만 약 10 cm 보다 깊은 구간에서는 KR5, KR2, KR1의 순서로 높게 나타났다(Fig. 4).

함수율은 일반적으로 퇴적물, 퇴적물의 입도, 분급도, 퇴적물 입자의 형태, 퇴적물 입자의 극성, 퇴적후의 생물교란 정도, 시간에 따른 다짐작용 등의 요인에 의해 변화하며 정상적인 상태에서는 퇴적층의 깊이가 증가함에 따라 함수율이 감소한다(Berner, 1980). 또한 일반적으로 해양 퇴적물에서는 함수율과 공극률이 높으면 전단강도가 낮게 나타난다(Inderbitzen, 1970). 이러한 일반적인 경향은 KR1, KR2, KR5 지역에서 모두 일치한다.

같은 깊이에서의 평균 함수율은 KR1 지역이 KR2 지역보다 약간 높게 나타나고 평균 전단강도가 약간 낮게 나타나는 것은 두 지역에서 산출되는 암상의 차이 때문으로 생각된다. KR1 지역은 대부분 약 40 cm 정도의 주상시료에서는 Unit 1의 단일 암상의 퇴적상이 나타났다. 그러나 KR2 지역에서 일부 주상시료는 KR1 지역과 같은 Unit 1의 단일 암상 퇴적상이 나타났지만 일부의 경우 Unit 1 암상 하부에 Unit 3 암상이 나타났다. 이러한 암상의 차이는 지형과 관련 있는 지역적인 이유 때문으로 생각된다. 즉, KR1과 KR2 지역은 같은 위도에 있어서 전 지구적인 영향에는 차이가 거의 없을 것으로 판단되지만 KR1 지역이 KR2 지역보다 소규모 해저산과 같은 국부적인 지형 변화가 적고 또한 수심의 변동성이 적은 것으로 나타났다. 반면에 KR2 지역은 KR1 지역보다 클라리온 규얼대와 가깝고 지형 기복이 상대적으로 복잡하게 나타났다.

KR5 지역에서 함수율과 전단강도가 뚜렷이 높게 나타나는 이유는 광물 구성 성분의 차이 때문인 것으로 생각된다. 즉, KR1과 KR2 퇴적물은 주로 바람에 의해서 육상기원 물질이 공급된 것으로 주로 석영, 장석, 일라이트의 함량이 높은 반면에 KR5 지역 하부의 퇴적물은 주로 규질퇴적물과 스멕타이트의 함량이 높게 나타난다. 따라서 KR5 지역의 퇴적물은 입자와 공극이 커서 함수율이 높은 것으로 생각된다. 또한 성긴 조직을 갖는 규질퇴적물 사이에 판상의 팽창성 점토광물인 스멕타이트가 불규칙적으로 뒤섞여서 고화작용이 발생하여 전단강도가 커진 것으로 해석된다(지등, 2004).

연구지역에서의 평균 함수율과 평균 전단강도의 상관관계 분포도는 KR1, KR2, KR5의 지역과 깊이별 관계를 뚜렷하게 보여준다(Fig. 5). KR1은 검정색, KR2는 회색, 그리고 KR5는 흰색으로 표시하였으며, 0~5 cm, 5~10 cm, 10~20 cm, 그리고 > 20 cm 구역은 각각 사각형, 원형, 삼각형, 역삼각형으로 표시하였다.

0~5 cm에서는 3 지점 깊이의 평균(0.5, 2.5, 4.5 cm)을 나타냈고, 5~10 cm는 2 지점(6.5, 8.5 cm), 10~20 cm는 5 지점(10.5,

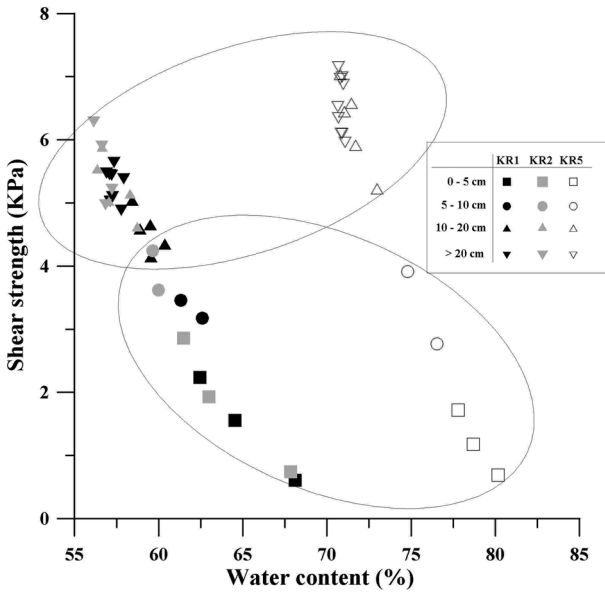


Fig. 5. Plot of maximum shear strength against water content.

12.5, 14.5, 16.5, 18.5 cm), 그리고 > 20 cm 구간은 20.5 cm부터 매 2 cm 간격으로 최대 36.5 cm 까지 깊이의 평균값을 나타냈다. 분석결과 KR1, KR2, KR5 지역에서 대체로 함수율과 전단강도가 반비례 하는 관계가 나타났다. 함수율과 전단강도가 반비례하는 것은 퇴적물 깊이에 따라 다짐작용이 증가하여 함수율이 감소하고 입자사이의 공극이 감소하여 전단강도가 증가하는 일반적인 현상으로 해석된다. 또한 KR5의 > 20 cm 지역의 함수율은 KR1과 KR2 지역의 0~5 cm 층보다도 높지만 전단강도는 KR5의 > 20 cm 지역이 4~5배 높은 것으로 나타났다. KR1, KR2, KR5 지역에서 같은 깊이에서의 함수율과 전단강도의 관계를 나타내기 위하여 두개의 타원으로 영역을 구분하였다. 하부 타원은 모든 지역의 0~10 cm 구간을 의미하고, 상부 타원은 > 10 cm 퇴적층을 의미한다. 0~10 cm 까지는 같은 깊이에서 KR5 지역이 KR1과 KR2 지역보다 전단강도가 낮지만 > 10 cm 깊이에서는 오히려 KR5 지역의 전단강도가 더 높게 나타났다.

입자밀도 분포 특성

KR1과 KR2는 동일 위도상이지만 입자밀도는 KR1 지역이 KR2 지역보다 약간 높게 나타났다. CCFZ 내의 표층 퇴적물에는 바람에 의해 운반되는 육성물질의 함량은 미대륙에서 멀어질수록 낮아진다(Hein et al., 1979). 따라서 동일 위도상이라도 미대륙에 더 가까운 KR1 지역에 상대적으로 밀도가 큰 육성기원 퇴적물의 비율이 KR2 지역에 비해 높기 때문일 가능성이 있다.

KR5 지역의 입자밀도는 표층에서 가장 낮고 깊이가 증가하면서 다소 높아지는 경향이 나타났다. 이러한 원인은 수층에서 형성되는 낮은 밀도의 규질입자(2.2 g/cm³)는 대부분 해저면에 도착전에 용해되지만 약 2% 정도는 퇴적되고 퇴적된 후에도 지속적으로 용해되기 때문이다(von Stackelberg, 1979).

KR1, KR2, KR5 지역 퇴적물의 특성과 채광 적지와의 관계
망간단괴 채광은 채광기의 주행성이 고려되고 채광작업에 의해

발생하는 환경충격에 의한 환경과괴가 적은 곳이 유리할 것이다. 채광기는 망간단괴 채집의 효율을 높이기 위해 채광기의 부피, 공기와 수층에서의 무게, 퇴적물에 접촉하는 면적과 압력 등이 고려되어 설계된다. 이러한 채광기가 움직일 때는 표층 퇴적물의 전단강도에 따라서 교란되는 깊이가 달라질 것이고 이것은 채광기의 주행성능에 영향을 미칠 것이다.

전단강도 특성 연구에 의하면 독일은 망간단괴 채광기가 해저면에서 움직이는데 필요한 퇴적물의 전단강도를 2.5~4.0 kPa로 예상하고 있으며, 채광기가 영향을 미치는 퇴적 깊이를 15~20 cm로 예상하고 있다(Grupe et al., 2001). 그리고 프랑스의 경우 채광 예상지역에서 얻어진 퇴적물의 깊이별 전단강도 평균값에 근거하여 채광기가 움직이는데 필요한 전단강도의 기준을 10 cm 깊이에서 3.5 kPa, 40 cm 깊이에서 5.0 kPa로 설정하였다(IFREMER, 1989). 또한 채광기 표준 설계자료에 의한 전단강도 연구 결과에 의하면 채광기가 퇴적층에 가하는 힘은 3.5~5.0 kPa로써 채광기 운용에 필요한 퇴적층의 최소한의 전단강도는 3.5 kPa라고 하였다(THETIS, 1992). 그리고 우리나라에서는 전단강도가 5 kPa 이하에서는 채광기의 정상적인 주행이 어려울 것으로 판단하고 있다(최 등, 2003). KR1, KR2, KR5 지역에서 평균 전단강도가 5 kPa에 도달하는 깊이는 각각 약 18, 13, 10 cm 로 나타나서 전단강도에 의한 채광기의 주행에 유리한 지역은 KR5, KR2, KR1의 순서인 것으로 판단된다(Fig. 4).

일반적으로 표층퇴적물에서 함수율이 높으면 전단강도가 낮기 때문에 채광기가 주행할 때 안정된 전단강도를 갖는 더 깊은 퇴적층까지 교란시켜서 교란되는 퇴적물의 양을 증가시킬 가능성이 있다. 그러나 연구지역에서는 채광기가 움직이는데 필요한 전단강도인 5 kPa를 기준으로 보면 함수율이 낮은 KR1과 KR2 지역보다 오히려 함수율이 높은 KR5 지역에서 교란되는 깊이가 작을 것으로 예상된다. 더욱이 함수율이 높은 지역은 동일한 부피가 교란되었다고 가정하면 교란되는 퇴적물의 양이 적은 것으로 평가된다(Yamazaki and Sharma, 2001). 그러므로 KR5 지역은 상대적으로 KR1과 KR2 지역에 비해서 전단강도가 높아 교란되는 깊이가 작을뿐만아니라 함수율도 높아서 교란되는 퇴적물의 양도 적을 것으로 판단된다.

기본적으로 교란되는 퇴적물의 양이 적은 지역에서 저층환경변화가 적을 것으로 예상된다. 그러나 퇴적물의 입자의 크기나 형태, 광물화학적 성질, 저층해류의 강도등과 같은 요인에 따라 달라질 수 있는 퇴적물의 부유, 이동, 재퇴적에 관한 종합적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.

저층충격실험 연구결과에 의하면 교란된 표층퇴적물은 대부분 덩어리 형태로 교란지역의 인근에 재퇴적 되지만 일부 세립질의 부유퇴적물은 저층해류를 따라 움직인 후에 재퇴적 되는 것으로 나타났다(Feng et al., 1997). 또한 실제로 확산된 퇴적물은 배출된 퇴적물의 97% 정도가 100 m 또는 100분 이내에 재퇴적되고 그리고 나머지 3% 정도도 수 백 미터 내에 퇴적되고 미량의 부유 퇴적물이 그 이상 멀리 이동하는 것으로 나타났다(Tsuji et al., 1997). INDEX 실험에서는 저층충격실험 결과 점토크기의 세립 퇴적물의 이동은 충격을 가한 지역에서 대체로 20 km 내로 제한되며 45 km를 넘지 않을 것으로 예상하였다(Valsangkar, 2001). 또한 DISCOL 실험에서는 저층 플룸의 확산에 관한 모델링의 결과

6월 동안 15 km 정도 이동할 것으로 예측하였다(Zielke *et al.*, 1995).

우리나라 광구와 가까운 JET 지역에서 저층충격실험 후에 재퇴적되는 양을 수치모델링으로 계산한 결과 교란지역에서 약 2 km 떨어진 곳의 재퇴적율은 0.04 g/m²/day로 매우 미량이 퇴적되는 것으로 나타났다(Taguchi *et al.*, 1995). 그러나 상업생산시에 연간 300일 동안 채광을 한다면 교란지역의 약 2 km 밖에서도 일년 동안 약 12 g/m² 정도의 퇴적물이 쌓일 것이고 퇴적율은 약 0.5 cm/1000 yrs로 계산된다. 일반적으로 대양에서의 퇴적율을 감안하면 장기간동안 상업생산을 할 때 교란지역에서 2 km 밖의 지역도 환경변화가 발생하며 이 지역에 서식하는 저서생물에 영향을 미칠 지도 모른다.

더욱이 이런 결과는 저층충격실험의 규모로 연구된 내용이므로 상업 생산을 위한 규모로는 더 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 왜냐하면 저층충격실험을 수행한 시간은 DISCOL 실험은 2 주, 그 밖의 저층 실험에서는 18-88 시간으로 충격실험은 대규모의 상업 생산시 가동시간 (연간 300 일)에 비해서는 매우 짧은 시간이기 때문이다(Anonymous, 1987). 또한 실험의 면적은 0.32~10.8 km² 정도로 상업 생산시에 해마다 교란시키는 면적에 비해서는 매우 작은 면적이다(Sharma, 1993; Table 3). 그리고 퇴적물을 교란시킨 부피는 0.77 m³/min (BIE), 1.17 m³/min (JET), 1.4 m³/min (IOM-BIE), 1.35 m³/min (INDEX)로 상업 생산시에 교란될 것으로 평가되는 퇴적물의 부피 (37.5 m³/min)의 2~3.7% 수준에 불과하기 때문이다(Yamazaki and Sharma, 2001).

그러므로 비록 저층충격실험 결과로는 세립질 부유퇴적물의 이동과 확산을 통해 재퇴적되는 수준은 작았지만 상업생산의 규모를 고려하면 세립퇴적물의 함량이 높으면 퇴적물 교란시에 부유하고 이동하여 환경변화를 일으킬 가능성이 높을 것으로 판단된다.

우리나라 연구지역은 북부 연구지역(KR1, KR2) 최상부층 약 30 cm 퇴적물의 평균입도는 4.8 μm(3.8~8.2 μm)로 퇴적물 깊이에 따른 편차가 크지 않으면서 세립퇴적물의 함량은 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 반면에 남부 연구지역(KR5) 퇴적물의 평균입도는 16.6 μm(7.2~31.5 μm)로 나타났으며 표층 5 cm까지는 대체로 10~30 μm로 나타났고 그 이하 30 cm 까지는 대체로 5~15 μm 정도로 다소 세립해지지만 평균적으로 북쪽 연구지역에 비해서는 세립퇴적물의 함량은 작은 것으로 나타났다(지 등, 2006). 그러므로 세립퇴적물의 함량이 상대적으로 낮은 KR5 지역이 KR1과 KR2 지역 보다 퇴적물에 의한 환경교란이 적은 지역으로 판단된다.

우리나라 광구와 외국에서 저층충격실험을 실시한 지역 퇴적물의 물리적 특성 비교

저층충격실험은 망간단괴 채광이 해양환경에 미치는 영향에 관한 정보를 얻기 위하여 현장에서 인위적으로 표층퇴적물을 교란시킨 후에 퇴적물이 부유되어 이동하고 재퇴적되는 규모와 특성 변화를 연구하는 실험이다. 이 실험을 통하여 저서생태계를 포함하는 해저환경에 미치는 영향을 평가한다. 외국에서는 그동안 페루분지(DISCOL), 북동 태평양(BIE, JET, IOM-BIE), 인도양(INDEX)에서 활발한 연구가 진행되었다(Foell *et al.*, 1990; Trueblood, 1993; Fukushima, 1995; Tkatchenko *et al.*, 1996; Sharma and Nath, 1997). 각국에서 실시한 저층충격실험은 실험 횟수, 실험시간, 퇴적물을 교란시킨 거리와 면적이 서로 다르다. 그러므로 실험결과에 대한 자료의 상호비교는 매우 제한적이다. 그러나 저층충격 실험에서 공통적으로 제시된 표층 5 cm 이내 퇴적물의 물리적인 성질은 이번 연구를 통해 나타난 우리나라 광구 지역의 표층 5 cm 이내 퇴적물의 물리적인 성질과 비교할 수 있다(Table 3).

KR1과 KR2 지역 표층퇴적물의 함수율은 다른 지역에 비해서 매우 낮고, KR5 지역은 페루분지와 다른 국가가 CCFZ 내에서 실시한 결과와 유사하게 나타났으며, 인도양의 CIB는 우리나라 광구보다 함수율이 높은 것으로 나타났다. 입자밀도는 KR5 지역에서 가장 낮고 그 밖의 지역에서는 유사하게 나타났다. 전밀도는 함수율의 영향을 많이 받아 함수율이 낮은 KR1과 KR2 지역에서 가장 높게 나타났으며 입자밀도의 영향에 의한 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 표층 퇴적물의 전단강도는 KR5 지역과 페루분지에서 유사하게 나타났고 CIB의 경우는 높은 함수율에도 불구하고 상대적으로 높은 전단강도가 나타났다. 우리나라 광구가 포함되는 CCFZ 에서 연구된 BIE, JET, IOM-BIE 실험과도 퇴적물의 물리적인 성질이 다른 이유는 CCFZ의 5°~15°N의 범위에서 경도에 따라 원양성 적점도, 규질 퇴적물, 탄산질 퇴적물 등 다양한 퇴적물이 복잡하게 혼재하여 분포되어 있기 때문인 것으로 판단된다(Rawson and Ryan, 1978).

결 론

망간단괴 채광기의 주행에 유리한 지역과 퇴적물 교란에 의한 환경파괴가 적은 지역을 파악하기 위하여 대한민국 광구 KR1,

Table 3. Comparison of benthic impact experiments and this study for nodule mining in Pacific and Indian Oceans

Experiment name	No. of tows	Duration of disturbance	Distance covered (km)	Area covered (km ²)	Water content (%)	Grain density (g/cm ³)	Wet bulk density (g/cm ³)	Shear strength (kPa)
a. DISCOL	78	2 weeks	-	10.8	76.3	-	1.15	0.2-0.5
b. BIE	49	5290 mins	141.0	(150×3000 m) 0.45	73.0	2.7	1.21	-
c. JET	19	1227 mins	32.7	(2×100×1600 m) 0.32	78.5	2.7	1.16	-
d. IOM-BIE	14	1130 mins	35.0	(200×2500 m) 0.50	80.0	2.7	1.14	-
e. INDEX	26	2434 mins	88.3	(200×3000 m) 0.60	84.5	2.6	1.11	2.08
f. KODOS (KR1)	-	-	-	-	65.0	2.58	1.30	1.42
g. KODOS (KR2)	-	-	-	-	63.9	2.56	1.31	1.84
h. KODOS (KR5)	-	-	-	-	78.8	2.37	1.16	0.60

References from: a. Foell *et al.* 1990; Feng *et al.* 1997, b. Trueblood 1993; Nakata *et al.* 1997; Gluomov *et al.* 1997, c. Fukushima 1995, d. Tkatchenko *et al.* 1996, e. Sharma and Nath 1997; Sharma *et al.* 1997; Khadge 1999; Sharma *et al.* 2001, f, g, and h. this study

KR2, KR5를 대상으로 표층퇴적물의 물리적 특성을 비교하였다. 또한 외국에서 저층 충격실험을 했던 지역과 연구지역의 표층 퇴적물의 물리적인 성질을 비교하였다.

우리나라 광구 내에서 채광 적지를 선정하기 위해 퇴적물의 물리적인 성질을 비교해본 결과 KR5 지역은 KR1과 KR2 지역보다 채광기에 의해서 교란될 것으로 예상되는 10 cm 이하 깊이에서의 전단강도가 높게 나타나 채광기의 주행에 유리할 것으로 판단된다. 또한 KR5 지역은 함수율이 매우 높아서 동일한 부피로 퇴적물이 교란될 때 교란된 퇴적물의 양이 작고, 세립퇴적물의 함량이 상대적으로 낮아서 저층충격으로 인하여 퇴적물이 교란되었을 때 더 멀리 이동하지 못할 것으로 예상된다. 따라서 KR5 지역이 KR1과 KR2 보다 퇴적물 교란에 의한 환경파괴가 상대적으로 적은 지역으로 판단된다.

또한, 광역지형탐사자료에 의하면 KR1과 KR2 지역에는 소규모의 화산이 산재해 있는 반면에 KR5 지역에는 거의 나타나지 않으므로 채광기의 안전한 주행에 상대적으로 유리한 것으로 판단된다.

외국에서 저층 충격실험을 했던 지역과 연구지역의 표층퇴적물의 물리적인 성질을 비교하면 KR1, KR2 지역은 다른 지역에 비해 함수율이 낮고 전밀도가 높은 특징이 나타났다. 반면에 KR5 지역은 다른 지역과 함수율과 전밀도는 유사하게 나타났지만 입자밀도가 다소 낮은 것으로 나타났다.

사 사

이 연구는 해양수산부가 지원하는 “태평양 심해저 광물자원 개발사업(PM51101, PM51102, PM51103)”의 일환으로 수행되었다. 본 연구에 많은 도움을 주신 한국해양연구원 심해·해저자원연구부 연구원 여러분과 온누리호 선장님과 승무원들께 감사를 드립니다. 그리고 세밀한 심사와 교정에 시간을 내 주신 두 분의 심사위원님께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 이현복, 지상범, 형기성, 박정기, 김기현, 오재경, 2006. 북동태평양 대한민국 광구 KR5 지역 표층퇴적물의 물리적 특성. *Ocean and Polar Res.*, **28**(4): 475-484.
- 지상범, 형기성, 김종욱, 김현섭, 이근창, 손승규, 2003. 북동태평양 클라리온-클리퍼톤 균열대 KODOS 지역 심해저 퇴적물의 지질공학적 특성에 따른 유형분류. *Ocean and Polar Res.*, **25**(4): 529-543.
- 지상범, 강정극, 김기현, 박정기, 손승규, 고영탁, 2004. 북동태평양 클라리온-클리퍼톤 균열대 심해저 퇴적물의 전단강도 특성. *자원환경지질*, **37**(2): 255-267.
- 지상범, 이현복, 김종욱, 형기성, 고영탁, 이경용, 2006. 북동태평양 클라리온-클리퍼톤 균열대 심해저 퇴적물의 물리적 특성에 관한 연구. *자원환경지질*, **39**(6): 739-752.
- 최중수, 홍섭, 김형우, 이태희, 2003. 해저연약지반 주행성능 실험 기법연구(II): 직진주행성능시험. 한국해양공학회 춘계학술대논문집. pp. 116-120.
- Anonymous, 1987. Delineation of mine-sites and potential in different areas. Seabed mineral series, United Nations Ocean Economics and Technology Branch, pp. 4-79.
- Berner, R.A., 1980. Early diagenesis-A theoretical approach. Princeton University Press. 241 pp.
- Burns, R.E., B.H. Erickson, J.W. Lavelle. and E. Ozturgut, 1980. Observation and measurements during the monitoring of deep ocean manganese nodule mining tests in the North Pacific, Match-May 1978, NOAA Technical Memorandum ERL MESA-47, National Oceanic and Atmospheric Administration, Colorado (USA), 63 pp.
- Feng, L., H.U. Oebius, B. Grupe, and H.J. Becker, 1997. Basic research on characteristics of Deep-sea sediment clouds produced by marine mining. Proc. of Int. Symposium Environmental Studies for Deep-sea Mining, Metal Mining Mineral Agency of Japan, Tokyo, Japan, pp. 109-126.
- Foell, E. J., H. Thiel, and G. Schriever, 1990. DISCOL: A long-term, large-scale, disturbance-recolonization experiment in the abyssal eastern tropical Pacific Ocean. Proc. Offshore Technology Conference. Houston, USA, OTC 6328. pp. 497-503.
- Fukushima, T, 1995. Overview “Japan Deep-Sea Impact Experiment = JET.” Proc. of the ISOPE Ocean Mining Symposium. Tsukuba, Japan. pp. 47-53.
- Gloumov, I., E. Ozturgut, and M. Pilipchuk, 1997. BIE in the Pacific: concept, methodology and basic results. Proc. of Int. Symposium Environmental Studies for Deep-sea Mining, Metal Mining Mineral Agency of Japan, Tokyo, Japan, pp. 45-47.
- 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.
- Hein, J.R., H. Yen, and E. Alexander, 1979. Origin of iron-rich montmorillonite from the manganese nodule belt of the north equatorial Pacific. *Clays and Clay Minerals*, **27**(3): 185-194.
- IFREMER, 1989. Evaluation et etude des moyens necessaires a l'exploitation des nodules polymetalliques, Rapport final, TOME I, 1/1-5/10 unpublished.
- Inderbitzen, A.L., 1970. Empirical relationships between mass physical properties for recent marine sediments off Southern California. *Mar. Geol.*, **9**: 311-329.
- Ingole, B.S., Z.A. Ansari, S.G.P. Matondkar, and N. Rodrigues, 1999. Immediate response of meio and macrobenthos to distribution caused by benthic disturber. Proc. of the third ISOPE Ocean Mining Symposium, Goa, India, pp. 191-197.
- Khadge, N.H., 1999. Effects of benthic disturbance on geotechnical characteristics of sediment from nodule mining area in the Central Indian Basin. Proc. of the third ISOPE Ocean Mining Symposium, Goa, India, pp. 138-144.
- Nakata, K., M. Kubota, S. Aoki, and K. Taguchi, 1997. Dispersion of resuspended sediments by ocean mining activity-modeling study. Proc. of Int. Symposium Environmental Studies for Deep-sea Mining, Metal Mining Mineral Agency of Japan, Tokyo, Japan, pp. 169-186.
- Ozturgut, E., J.W. Lavelle, O. Steffin, and S.A. Swift, 1980. Environmental investigation during manganese nodule mining tests in the North Equatorial Pacific in November 1978. NOAA Technical Memorandum ERL MESA-48, National Oceanic and Atmo-

- spheric Administration, Colorado (USA), 50 pp.
- Radziejewska, T., 1997. Immediate responses of benthic meio- and megafauna to disturbance caused by polymetallic nodule miner simulator. Proc. of Int. Symposium Environmental Studies for Deep-sea Mining, Metal Mining Mineral Agency of Japan, Tokyo, Japan, pp. 223–236.
- Rawson, M.D. and W.B.F. Ryan, 1978. Oceanic floor sediment and polymetallic nodules. World oceanic floor panorama, Lamont-Doherty Geol. Obs., Palisades (Map).
- Sharma, R., 1993. Quantitative estimation of seafloor features from photographs and their application to nodule mining. *Marine Georesources and Geotechnology*, **11**: 311–331.
- Sharma, R. and B.N. Nath, 1997. Benthic disturbance and monitoring experiment in Central Indian Ocean Basin. Proc. of the second ISOPE Ocean Mining Symposium, Seoul, Korea, pp. 146–153.
- Sharma, R., G. Parthiban, K.M. Sivakholundu, A.B. Valsangkar, and A. Sardar, 1997. Performance of benthic disturber in Central Indian Ocean. National Institute of Oceanography, Goa, India, Tech. Report NIO/TR-4/97, 22 pp.
- Sharma, R., B.N. Nath, G. Parthiban, and S.J. Sankar, 2001. Sediment redistribution during simulated benthic disturbance and its implications on deep seabed mining. *Deep-Sea Research II* **48**: 3363–3380.
- Shirayama, Y., 1999. Biological results of JET project: an overview. Proc. of the third ISOPE Ocean Mining Symposium, Goa, India, pp. 185–190.
- Taguchi, K., K. Nakata, and S. Aoki, 1995. Environmental study on the Deep-Sea mining of manganese nodules in the northeastern tropical Pacific. Proc. of the ISOPE Ocean Mining Symposium. Tsukuba, Japan. pp. 167–174.
- THETIS., 1992. The environmental impact of deep sea mining, section I. Nodule and environment. ed. by Amann, H. 238 pp.
- Tkatchenko, G. G., T. Radziejewdka, V. Stoyanova, I. Modilitba, and Parizek. 1996. Benthic impact experiment in the IOM pioneer area: Testing for effects of deep seabed disturbance. Proc. of Int. Seminar on Deep Seabed Mining Technology. Beijing, China, pp. C55–C68.
- Trueblood, D.D., 1993. US cruise report for BIE II cruise. NOAA Technical Memorandum no. OCSRS 4, National Oceanic and Atmospheric Administration, USA.
- Trueblood, D.D., E. Ozturgut, M. Pilipchuk, and I.F. Gloumov, 1997. The ecological impacts of the joint U.S.-Russian benthic impact experiment. Proc. of Int. Symposium Environmental Studies for Deep-sea Mining, Metal Mining Mineral Agency of Japan, Tokyo, Japan, pp. 237–243.
- Tsuji, M., B.G. Barnett, and K. Ogawa, 1997. Resedimentation of discharged sludge by advection and dispersal analysis. Proc. of Int. Symposium Environmental Studies for Deep-sea Mining, Metal Mining Mineral Agency of Japan, Tokyo, Japan, pp. 271–285.
- Valsangkar, A.B., 2001. Implications of post-disturbance studies on the grain size of sediments from Central Indian Basin. *Current Science*, **81**(10): 1365–1373.
- von Stackelberg, U., 1979. Sedimentation, Hiatus, and Development of Manganese nodules: VALDIVIA Site VA-13/2. Northern Central Pacific. In: Marine geology and oceanography of the Pacific manganese nodule province. ed. by Bischoff, J.L and D.Z. Piper. Province, Plenum Press, New York. pp. 529–557.
- Yamazaki, T. and R. Sharma., 2001. Estimation of sediment properties during benthic impact experiments. *Marine Georesources and Geotechnology*, **19**: 269–289.
- Zielke, W., J.A. Jankowski, J. Sndermann, and J. Segscheider., 1995. Numerical modelling of sediment transport caused by deep-sea mining. Proc. of the first ISOPE-Ocean Mining Symposium, Tsukuba, Japan, pp. 157–162.

2008년 3월 31일 원고접수

2008년 7월 10일 수정본 채택

담당편집위원: 이경용