

Article

북동태평양 클라리온-클리퍼톤 균열대 KODOS 지역 심해저 퇴적물의 지질공학적 특성에 따른 유형분류

지상범* · 형기성 · 김종욱 · 김현섭 · 이근창 · 손승규

한국해양연구원 해저환경자원연구본부 심해저자원연구센터
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

Classification of Deep-sea Sediment by Geotechnical Properties from the KODOS Area in the C-C Zone of the Northeast Equatorial Pacific

Sang-Bum Chi*, Kiseong Hyeong, Jong-Uk Kim, Hyun-Sub Kim,
Gun-Chang Lee, and Seung-Kyu Son

Deep-sea Resources Research Center, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : Deep-sea surface sediments, acquired from 1997 to 2002 in the Clarion-Clipperton fracture zone of the northeast equatorial Pacific, were analyzed for index and geotechnical properties to provide background information for the design of manganese nodule minor. The sediments were classified into 16 types based on the measured properties and evaluated in terms of miner maneuverability and potential environmental impacts arising from mining activities. It was found that the middle part of the study area covered with coarse siliceous sediments is more favorable to the commercial production than the northern part of pelagic red clay. In particular, Area B2 in the middle part is considered the best mining site since it shows the highest abundance as well as it consists mostly of normally to over consolidated (types B,C,D) coarse siliceous sediments that are appropriate for effective minor movement and accompany weak environmental impacts. Taking account of all the analyzed core logs, the average shear-strength values are proposed as a practical guideline for movements of a manganese nodule miner: 6.0 kPa at 10 cm and 7.0 kPa at 40 cm below the seabed.

Key words : 심해저 퇴적물(deep-sea sediment), 지질공학적 특성(geotechnical properties), 심해 채광(deep-sea mining)

1. 서 론

클라리온-클리퍼톤 균열대(Clarion-Clipperton fracture zone, C-C지역) 사이 심해저 표층 퇴적물의 지표특성과 지질공학적 특성에 관한 연구는 주로 망간단괴의 채광기의 운영 및 채광에 따른 환경피해와 연관되어 이루어졌다(Richards and Chaney 1981; Oebius *et al.* 2001; Grupe *et al.* 2001). 특히 심해저 퇴적물의 지질공학적 특성은 해저

면 위에서 망간단괴를 대량으로 채취하게 될 채광장비의 설계 및 운영에 필수 요건으로 고려된다(Hirst and Richards 1975; Tsusaki *et al.* 1994). 채광기의 크기, 중량, 그리고 마력수에 따라 다르지만, 연성의 표층 퇴적물은 안전성과 이동성에 상당한 제약을 주게 된다(Noorany and Fuller 1982; Chautru *et al.* 1987). 한편, 퇴적물의 지질공학적 특성에 관한 자료는 매우 중요하지만(Hirst and Richards 1975; Tisort 1981; THETIS 1992), 지질공학적 특성을 파악하는 가장 중요한 항목인 전단강도조차 국제적으로 인정된 표준화된 측정방법이 없고(Grupe *et al.*

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

1994; Oebius 1998), 따라서 C-C지역과 주변지역에서 획득한 외국자료와 비교·검증이 어려운 상황이다.

한편, 대부분의 저서 생물이 서식하고 있는 표층퇴적물이 채광에 따라 인위적으로 교란되면 심해저 해양생태계가 파괴될 가능성이 크다(THETIS 1992). 즉, 채광기 움직임에 따라 발생하는 표층 퇴적물의 재부유(resuspension) 현상은 혼탁한 저층수를 발생시킬 것이며, 재동된 부유퇴적물은 인근지역에 재퇴적(resedimentation) 될 것이다(Lavelle et al. 1981). 따라서 심해저 채광 시스템의 설계 그리고 채광활동에 따른 환경 충격 예측을 위해서는 채광예정지역 표층 퇴적물의 지표특성과 지질공학적 특성에 대한 자세한 정보가 요구된다(Tisort 1981; THETIS 1992; Grupe et al. 2001).

실제로 망간단과 채광예정지역에 대한 지질공학적 특성은 단과를 채광할 수 있는 채광기의 설계와 시험을 위해 사용되었다(Noorany and Fuller 1982; Dorfler 1992; 최 등 2003). 또한, 퇴적물의 지표특성은 채광기 운영에 맞게 되는 환경충격예측에 관한 많이 활용되었다(Feung et al. 1997; Becker et al. 2001; Oebius et al. 2001). 이러한 노력은 획득한 자료의 평균값이 채광기를 제작에 사용되기도 하였다(IFREMER 1989; Grupe et al. 2001). 그러나 광범위한 면적의 심해저 퇴적물의 특성은 지리적 위치와 퇴적물 유형에 따라 현저히 다르다.

본 연구에서는 첫째, KODOS 지역 퇴적물의 지질공학적 특성과 지표특성을 외국의 주변연구지역 자료와 비교 분석하여 획득 자료의 신뢰도를 확인하고 둘째, 연구지역 퇴적물 깊이에 따른 전단강도의 수직적 변화를 파악하여 채광기 운용에 관한 정보를 제공하며, 마지막으로, KODOS 지역 퇴적물의 지질공학적 특성의 유형별 생성원인을 고찰해 보고자한다.

2. 지역개관

북동태평양 클라리온-클리퍼튼 균열대(Clarion-Clipper-ton fracture zone, C-C지역) 중앙에 위치한 연구지역은 대한민국 할당광구지역으로 북동태평양 C-C 지역에 위치하며, 다음과 같이 5개 지역으로 구성된다(Fig. 1). ① C-C지역의 북서부에 위치한 N1지역은 서경 134-130도, 북위 16-17도에 위치하며, ② 북동부의 N3지역은 서경 127-125도, 북위 16-17에 위치한다. 북부의 이 두개 지역은 클라리온 균열대에 인접해 있다. ③ C-C지역의 중서부에 위치한 A2 지역은 서경 136-135도, 북위 10-11도에 위치하며, ④ 중부 중앙의 B2지역은 서경 133-130.5도, 북위 9-12도에 위치한다. ⑤ 중동부의 C1지역은 서경 130-128도, 북위 10-12도에 위치한다. 이밖에 향후 채광시 인위적 환경 변화량을 규명하고자 서경 131.5도 선상에 북위 5도에서 북위 12도까

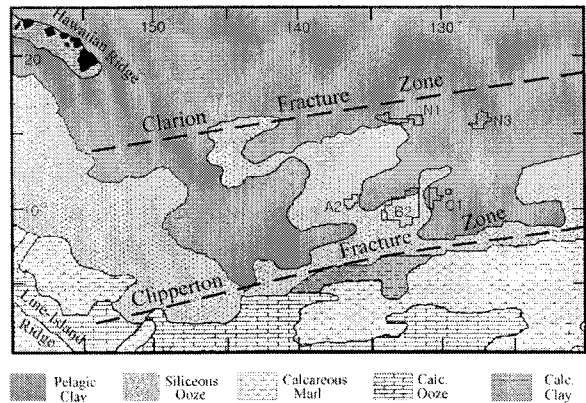


Fig. 1. Distribution of sea floor sediments in the north-eastern part of the equatorial Pacific (after Rawson and Ryan, 1978). The study area was marked as A2, B2, C1, N1, and N3.

지 설정한 남북방향의 연구 축선 지역도 포함된다(Fig. 1).

C-C 지역은 북쪽에 원양성 적점토(pelagic red clay), 중앙에 규질연니(siliceous ooze), 그리고 남쪽에 석회질연니(calcareous ooze)가 분포한다(Horn et al. 1973). 연구지역에서 채취된 주상 퇴적물에 의해 확인된 연구지역의 퇴적상은 북부의 N1과 N3지역에서 원양성 적점토, 중부의 A2, B2 그리고 C1지역에서 규질 퇴적물(siliceous sediment, very siliceous clay), 서경 131.5도를 중심축으로 북위 5-6도 지역의 퇴적상은 석회질연니가 지배적으로 분포하고 있다(지 등 2000, 2003).

연구지역 중앙(B2 지역)의 규질 퇴적물은 대부분 매우 높은 함수율, 낮은 투수율, 높은 전단강도를 갖는 소성이 높은 생물기원의 무기질 실트로 구성된 규질 원양성 점토(siliceous pelagic clay)로 이루어져 있다(Richards and Chaney 1981). 일부 정점의 상부 표층 퇴적물은 대부분 갈색의 규질 퇴적물로 덮여있으나 하부에서는 고화된 탄산질 퇴적물이 나타나기도 한다. 퇴적물의 구성물질은 생물기원의 규질 파편, 자생(authigenic) 그리고 육성(terri-geneous)기원의 점토광물, 장석류, 철-망간 산화물 등이다(박 등 1999). 퇴적물 입도조성은 실트와 점토가 우세하고(70-90%) 모래와 실트 크기의 입자는 대부분 방산층이나 구조류 잔해로 이루어져 있다.

한편, 남쪽의 북위 5-6도 지역은 수심이 4,200 m 이하로, 이 지역의 탄산염보상심도(CCD)인 4,400 m(Piper et al. 1979)보다 얕으며, 수층에서 공급되는 생물기원의 탄산염 입자들이 용해되지 않고 지속적으로 퇴적되어 탄산질 퇴적물이 출현한다. C-C 지역의 퇴적율(sedimentation rate)은 북쪽지역에서 1 mm/kyr 이하이며, 남쪽지역에서 약 3-10 mm/kyr 정도로, 남쪽지역의 퇴적율이 북쪽지역에 비하여 상대적으로 높다(Müller and Mangini 1980).

3. 재료 및 방법

지질공학적 특성파악을 위해서는 교란되지 않은 표층 퇴적물 시료의 획득이 필수적이므로(Hagerty 1974; Almagor 1982; Baltzer *et al.* 1994) 물리적 훼손이 매우 적은 다중 주상시료 채취기(multiple corer, 규격: 직경 0.95 cm, 길이

60 cm, 8개 동시 채취)를 이용하여 주상시료를 채취하였다. 북쪽지역에서는 N1지역에서 7개 그리고 N3지역에서 4개 등 총 11개의 코어시료를 채취하였다. 중부지역에서는 A2지역에서 3개, B2 지역에서 33개, 그리고 C1 지역에 3개 등 총 39개의 코어시료를 채취하였다. 한편, 서경 131도 30분의 선상에서 북위 5도에서 12도까지 위도별 1도

Table 1. Locations, lengths, and sediment characteristics of the studied cores and water depths of the sampling stations.

Station number (Area)	Locations		Water depth (m)	Core length (cm)	Remarks
	Latitude (N)	Longitude (W)			
MC97-P-05(B2)	09°57'	131°49'	5,101	24	C.B.: 12 cm, Unit I/II
MC97-P-13(B2)	09°59'	131°47'	4,983	26	Unit II
MC97-I-01(B2)	10°30'	131°20'	4,953	22, 39	C.B.: 7 cm, Unit I/III
MC97-I-03(B2)	10°29'	131°20'	4,976	41	C.B.: 6 cm, Unit I/III
MC97-I-05(B2)	10°27'	131°20'	4,923	25, 27	C.B.: 7 cm, Unit I/III C.B.: 5 cm, Unit III/carbonate
MC97-I-11(B2)	10°30'	131°18'	4,921	17	C.B.: 8 cm, Unit I/III
MC97-I-13(B2)	10°29'	131°18'	4,999	29	C.B.: 5 cm, Unit I/II
MC97-I-15(B2)	10°27'	131°19'	5,044	35	C.B.: 10 cm, Unit I/II
MC97-I-21(B2)	10°30'	131°17'	4,908	35	C.B.: 21 cm, Unit I/II
MC97-I-25(B2)	10°27'	131°17'	4,848	36	C.B.: 11 cm, Unit I/II
MC98-N12	12°00'	131°29'	4,957	18	Unit, carbonate
MC98-N11(B2)	10°59'	131°32'	5,150	28	C.B.: 10 cm, Unit I/II
MC98-N10(B2)	09°59'	131°30'	4,968	34	C.B.: 12 cm, Unit I/II
MC98-N09	08°58'	131°32'	4,828	30	C.B.: 13 cm, Unit I/II
MC98-N08	08°01'	131°31'	5,022	46	C.B.: 17 cm, Unit I/II
MC98-N07	07°10'	131°42'	4,561	24	C.B.: 10 cm, Unit I/II C.B.: 20 cm, Unit II/III
MC98-N06	06°02'	131°30'	4,084	30	calcareous sediment
MC98-N05	05°00'	131°29'	4,200	28	calcareous sediment
MC98-G01(B2)	10°05'	131°47'	4,981	10	Unit III
MC98-G02(B2)	10°16'	131°48'	4,915	20	C.B.: 6 cm, Unit I/II
MC98-G03(B2)	10°25'	131°40'	4,871	10	C.B.: 2 cm, Unit I/II
MC98-G04(B2)	10°15'	131°40'	4,988	16	C.B.: 3 cm, Unit I, carbonate
MC98-G06(B2)	10°15'	131°29'	4,988	26	C.B.: 12 cm, Unit I/II
MC98-G07(B2)	10°14'	131°22'	4,779	12	C.B.: 4 cm, Unit I/II
MC98-G08(B2)	10°24'	131°23'	4,981	40	C.B.: 8 cm, Unit I/II
MC99-N11(B2)	10°59'	131°30'	5,089	12	C.B.: 6 cm, Unit I/III
MC99-N10(B2)	09°59'	131°30'	5,008	20	C.B.: 10 cm, Unit I/III
MC99-N09	09°01'	131°29'	4,900	30	C.B.: 14 cm, Unit I/II
MC99-N08.5	08°30'	131°28'	4,371	26	C.B.: 10 cm, Unit I/II
MC99-N08	07°58'	131°28'	5,007	36	C.B.: 12 cm, Unit I/II
MC99-N07.5	07°31'	131°28'	4,965	30	C.B.: 8 cm, Unit I/II
MC99-N07	06°59'	131°28'	4,697	22	C.B.: 6 cm, Unit I/II
MC99-N06	05°59'	131°30'	4,212	38	C.B.: 15 cm, calcareous sediment
MC99-N05	05°00'	131°31'	3,955	36	calcareous sediment

C.B.: Color Boundary.

Table 1. Continued.

Station number (Area)	Locations		Water depth (m)	Core length (cm)	Remarks
	Latitude (N)	Longitude (W)			
MC99-G01(B2)	10°18'	131°31'	4,870	8	Unit I/III
MC99-G02(B2)	10°19'	131°30'	5,110	26	Unit I/III
MC99-G03(B2)	10°20'	131°29'	4,996	18	Unit I/III
MC99-G04(B2)	10°21'	131°29'	4,998	10	Unit I/III
MC99-G06(B2)	10°24'	131°27'	5,024	16	Unit I/III
MC99-G07(B2)	10°17'	131°32'	4,828	12	Unit I/III
MC99-G08(B2)	10°26'	131°26'	5,033	12	Unit, carbonate
MC00-4-16(B2)	10°10'	131°30'	4,942	24	C.B.: 7 cm, Unit I/III
MC00-4-18(B2)	10°11'	131°26'	4,819	17	C.B.: 8 cm, Unit I/III
MC00-4-20(B2)	10°19'	131°24'	4,720	17	C.B.: 8 cm, Unit I/III
MC00-4-N07	07°00'	131°30'	4,596	27	calcareous & siliceous sediment
MC00-4-N7.5	07°30'	131°40'	4,944	50	siliceous & calcareous sediment
MC00-5-04(A2)	10°29'	135°41'	4,720	18	C.B.: 10 cm, Unit I/III
MC00-5-14(A2)	10°49'	135°35'	4,805	10	C.B.: 1 cm, Unit I/III
MC00-5-20(A2)	10°50'	135°05'	4,988	30	C.B.: 16 cm, Unit I/II
MC01-03-01(B2)	10°00'	131°50'	5,081	37.5	C.B.: 15 cm, Unit I/II C.B.: 27 cm, Unit II/III
MC01-03-02(B2)	10°30'	131°18'	4,883	45.3	C.B.: 10 cm, Unit I/II
MC01-03-03(C1)	11°18'	128°23'	4,830	54.5	C.B.: 20 cm, Unit I/II
MC01-03-04(C1)	11°15'	129°40'	4,833	50.0	C.B.: 15 cm Unit I/II
MC01-03-05(N1)	16°19'	131°25'	4,972	35.5	Dark Yellowish Brown, Unit I
MC01-03-06(N1)	16°17'	131°52'	5,091	36.0	Dark Yellowish Brown, Unit I
MC01-03-07(N1)	16°18'	132°17'	5,019	36.0	Dark Yellowish Brown, Unit I
MC01-04-01(N3)	16°18'	125°55'	4,555	43.0	Dark Yellowish Brown, Unit I
MC01-04-02(N3)	16°18'	125°18'	4,544	40.0	Dark Yellowish Brown, Unit I
MC01-04-03(N3)	16°18'	127°00'	4,689	37.5	Dark Yellowish Brown, Unit I
MC01-04-05(N1)	16°12'	130°33'	4,880	19.0	Dark Brown, Unit I
MC02-01-01(N1)	16°12'	130°09'	4,824	36.0	C.B.: 22 cm, Unit I/II
MC02-01-02(N3)	17°02'	126°00'	4,620	55.0	Dark Yellowish Brown, Unit I
MC02-01-04(N1)	16°12'	130°49'	4,512	47.0	Dark Yellowish Brown, Unit I
MC02-01-05(N1)	16°40'	133°32'	4,777	36.0	Dark Yellowish Brown, Unit I
MC02-02-02(B2)	10°30'	135°00'	4,876	45.0	C.B.: 14 cm, Unit I/II
MC02-02-03(B2)	10°30'	134°00'	4,843	28.0	C.B.: 15 cm, Unit I/II
MC02-02-04(B2)	10°01'	133°00'	5,084	24.0	C.B.: 12 cm, Unit I/II
MC02-02-05(B2)	10°30'	131°20'	5,029	34.0	C.B.: 12 cm, Unit I/II
MC02-02-06(C1)	10°39'	129°28'	4,799	30.0	C.B.: 16 cm, Unit I/II

C.B.: Color Boundary.

또는 30분 간격으로 채취한 시료는 총 19개이다. 연구대상 시료는 위에서 나타난 총 69개 지점에서 채취된 코어 시료이다(Table 1).

퇴적물 교란에 가장 민감한 전단강도(shear strength)는 육안 관찰을 통해 물리적으로 손상되지 않은 코어를 선택

하여 시료가 선상에 올라오는 즉시 전동베인 시스템 (motorized vane system)을 이용하여 코어표층에서 하부로 수직으로 내려가면서 2 cm 간격으로 측정하였다. 직경 1.0 cm, 높이 0.88 cm의 베인을 이용하여 30°/min(0.0167 rad/sec)의 회전속도로 측정하였다. 측정 후 실험실 분석을

위해 밀봉 비닐봉지에 깊이 2 cm 간격으로 부시료(sub-sample)를 채취하였다.

입도는 약 10 g의 퇴적물을 3-4 일간 증류수로 반복·세척하여 염분을 제거한 후, 0.5% 과산화수소수로 유기물을 제거하고, 자동입도분석기(Master Sizer)를 이용·분석하였다(해양수산부 1998).

함수율(% dry weight)은 약 30 g의 젖은 시료를 110°C로 24시간 동안 건조기(oven)에서 완전 건조시키고 건조통(desiccator)에서 실온으로 24시간 보관한 후, 평량·계산(% water content=100×(wet wt.-dry wt.)/dry wt.)하였다.

퇴적물의 전밀도를 정확히 계산하기 위하여 미국 Micromeritics사의 자동 밀도 측정기(AccuPyc 1330 Pycnometer)를 활용하여 퇴적물시료 입자의 비중(grain density, specific gravity)을 측정하였다. 전밀도(wet bulk density)는 입자의 비중과 함수율을 이용하여 시료가 해수에 100% 포화되어 있다는 가정 하에 계산하였다(지 등 2000). 연구에 이용된 퇴적물의 물리적 특성 측정 방법들은 이(1991), 지(1994), Lee and Clausner(1979), 그리고 해양수산부(1998)에 상세히 기술되어 있다.

4. 분석결과

퇴적물의 전단강도 특성

연구지역 퇴적물의 전단강도는 대부분 정점에서 표층에서 하부로 내려가면서 증가한다. 평균적으로 표층 1 cm 깊이에서는 1 kPa 미만의 낮은 전단강도 값을 보이지만, 퇴적층 하부로 가면서 지속적으로 증가하여 13 cm 깊이에서는 평균 7.0 kPa까지 증가한다. 그 하부의 13 cm에서 40 cm까지는 평균 6.6 kPa(5.9-7.2 kPa)로 일정한 값을 유지한다(Fig. 2A). 즉 준액상 상태의 최상부는 미고화 상태(under consolidated state)이나, 퇴적층 깊이 10 cm 이하의 하부는 단단한 상태다(Fig. 2A).

전체 연구지역 퇴적물의 깊이별 전단강도 평균값을 0-13 cm 깊이(식 1)와 13-40 cm 깊이(식 2)를 나누어 선형 회귀식(linear regression)으로 나타내면 다음과 같다(Fig. 2B).

$$\text{깊이별 전단강도 평균값} = (\sum \text{개별측정값}) / \text{전체 측정 시료 갯수}$$

$$\begin{aligned} \text{전단강도(kPa)} &= 0.41 + 0.50 \times \text{퇴적깊이(cm)}, \\ \text{상관계수} &= 0.99 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{전단강도(kPa)} &= 7.17 - 0.02 \times \text{퇴적깊이(cm)}, \\ \text{상관계수} &= 0.22 \end{aligned} \quad (2)$$

퇴적물 0-13 cm 깊이의 평균값에서 구한 식 (1)은 상관계수 0.99로 매우 높은 상관관계를 보인다. 그러나 이는

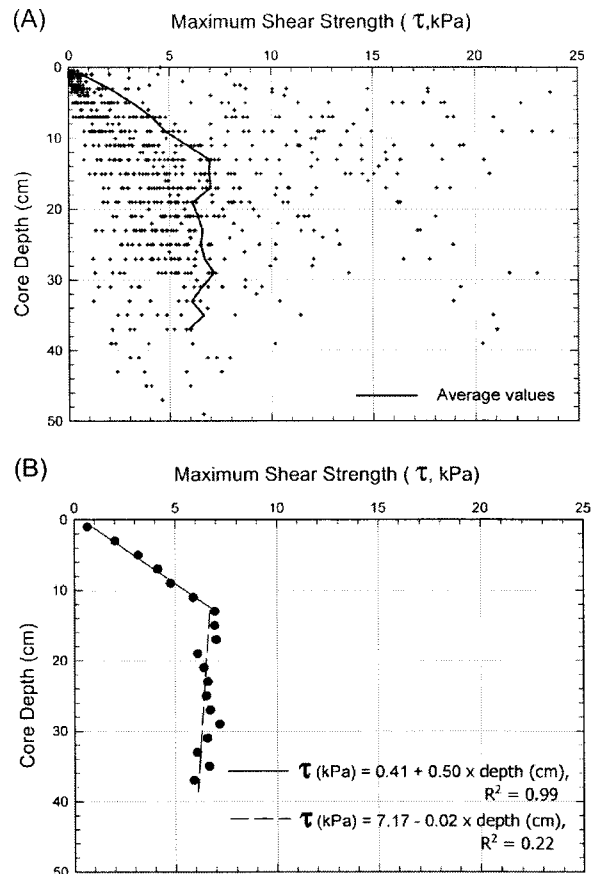


Fig. 2. Core log of maximum shear strengths of sediments, measured by motorized vane. (A) Plot of shear strengths of all the studied sediments against depth. The solid line represents the values averaged at a 2 cm interval. (B) Plot of average shear strengths taken from (A) against depth. Regression lines were drawn for the top (<13 cm) and bottom sediments (>13 cm). The measured maximum shear strengths of the top sediments increases rapidly with depth up to 13 cm, while those of the bottom sediments are rather uniform and vary in a narrow range.

전단강도의 평균값에 의한 상관계수이며, 실제 69개 코어 시료에서 측정된 코어별, 퇴적 깊이별 전단강도는 Fig. 2(A)에서 도시된 바와 같이 분산이 매우 심하다. 또한 퇴적물 13-40 cm 깊이의 평균값에서 구한 식 (2)의 경우 깊이에 따른 평균 전단강도의 변화가 매우 적으므로 낮은 상관관계를 보인다.

연구지역별로 살펴보면, 원양성 적점토가 분포하고 있는 N1지역 퇴적물 시료(0-33 cm)의 평균 전단강도는 4.7 kPa(2.7-10.5 kPa)이며, N3지역 시료(0-38 cm)의 평균 전단강도는 3.8 kPa(3.2-4.4 kPa)로 측정되었다(Table 2).

N1지역과 N3 지역의 퇴적 깊이에 따른 전단강도의 수

Table 2. Averages and ranges (maximum-minimum) of maximum shear strengths, residual shear strengths, and sensitivities (maximum shear strength/residual shear strength) of the surface sediments in the different blocks of the KODOS area.

Study Area	N1 Area	N3 Area	A2 Area	B2 Area	C1 Area
Location	134-130°W 16-17°N	127-125°W 16-17°N	136-135°W 10-11°N	133-130.5°W 9-12°N	130-128°W 10-11°N
Average core depth (cm)	33	38	18	24	40
Number of cores	7	4	3	39	3
Maximum shear strength (kPa)	4.7(2.7-10.5)	3.8(3.2-4.4)	6.8(4.4-9.1)	7.0(1.6-15.1)	5.0(3.0-8.5)
Residual shear strength (kPa)	1.9(1.4-2.8)	1.5(1.2-1.9)	1.3(1.0-1.5)	2.2(0.6-5.9)	1.8(1.2-2.7)
Max./Res. ratio	2.34(2.02-3.73)	2.55(2.23-2.68)	5.21(4.46-5.95)	3.66(2.31-6.82)	2.68(2.39-3.14)

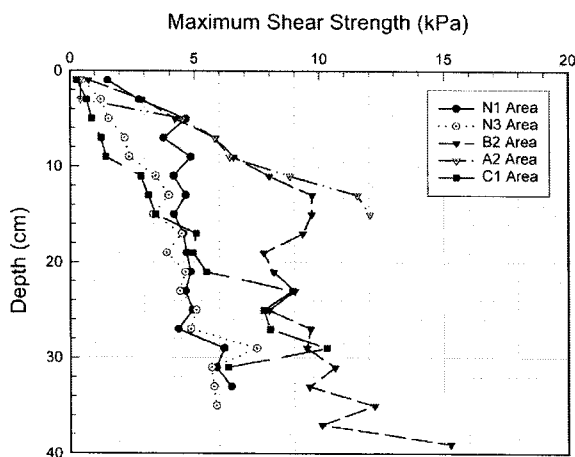


Fig. 3. Depth profiles of average shear strengths in each study area.

직적 변화는 상부 0-10 cm에서는 차이를 보이지만, 10-40 cm 깊이에서는 거의 비슷한 값을 보인다. 즉, N1지역과 N3지역 퇴적층 4-10 cm 깊이의 전단강도의 평균값은 N1 지역이 4.5 kPa로 N3지역(2.5 kPa)에 비해 높다. 이는 과 고화된 한 정점 MC 01-04-05(코어 길이: 0-10 cm)의 영향이며, 10-40 cm 부분의 전단강도는 두지역이 매우 잘 일치한다(Fig. 3).

A2지역의 규질 퇴적물 시료(0-18 cm)의 평균 전단강도는 6.8 kPa(4.4-9.1 kPa)이며, 가장 많은 시료가 분석된 B2지역 퇴적물 시료(0-24 cm)의 평균 전단강도는 7.0 kPa(1.6-15.1 kPa)로 측정되었다(Table 2). 또한 C1지역 규질 퇴적물 시료(0-40 cm)의 평균 전단강도는 5.0 kPa(3.0-8.5 kPa)로 상대적으로 낮다(Table 2). 전단강도와 잔류강도의 비를 나타내는 민감도는 A2 지역이 5.2로 가장 높으며, B2지역이 3.7로 타 지역에 비해 고화되어 있다. A2지역과 B2 지역의 전단강도 변화는 매우 유사하며, C1지역 0-20 cm 부분의 전단강도는 상대적으로 낮다(Fig. 3). 그러나 C1 지역에서는 3개 시료만이 분석되어 C1지역의 전

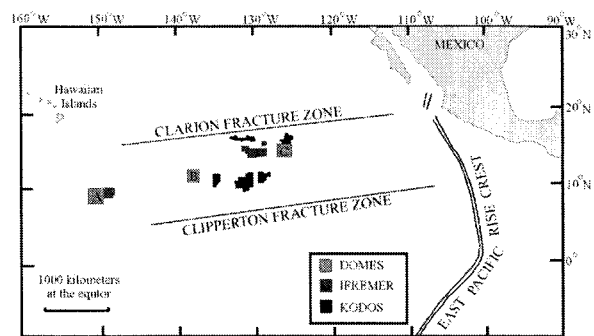


Fig. 4. Locations of the DOMES, IFREMER, and KODOS areas in the Clarion-Clipperton fracture zone of the northeast equatorial Pacific.

반적인 지질공학적 특성을 파악하기에는 수량이 부족하다.

퇴적물의 지표 특성

연구지역에서 채취한 전체 퇴적물의 평균입도는 15.0 μm (3.8-31.5 μm)로 평균 6.3 ϕ (5.1-8.0 ϕ)이다. Shepard (1954)의 분류에 따르면 거의 대부분 실트질 점토(silty clay) 또는 점토질 실트(clayey silt)에 해당되며, Folk (1968)의 분류에 따르면 이들 퇴적물은 모두 실트와 점토가 섞여 있는 펄(mud)에 해당된다(지 등 2000, 2003). 원양성 적점토가 분포하고 있는 북부의 N1지역과 N3지역에서의 평균입도가 각각 4.9 μm (7.7 ϕ)와 4.5 μm (7.8 ϕ)로 연구지역들 중에 가장 세립질이다. 규질퇴적물이 분포하는 중부의 서쪽에 위치한 A2지역은 17.6 μm (6.0 ϕ), 중앙에 위치한 B2지역은 15.6 μm (6.2 ϕ), 그리고 동쪽에 위치한 C1지역은 25.1 μm (5.4 ϕ)로 연구지역들 중 가장 조립질이다(Table 3).

퇴적물의 함수율은 전체 평균 246%(최소-최대: 83-415%)로 높다. N1지역의 평균 함수율은 148%(126-174%)이며, N3지역은 139%(124-148%)로 연구지역들 중에 가장 낮다. 중서부에 위치한 A2지역은 221%(206-240%), 중부중앙에 위치한 B2지역의 평균값은 281%(225-415%)이

Table 3. Index properties (grain size distribution, mean grain size, water content, grain density, bulk density, void ratio, and porosity) of the surface sediments in the different blocks of the KODOS area.

Study Area	N1 Area	N3 Area	A2 Area	B2 Area	C1 Area
Location	134-130°W 16-17°N	127-125°W 16-17°N	136-135°W 10-11°N	133-130.5°W 9-12°N	130-128°W 10-11°N
Number of cores	7	4	3	43	3
Mean grain size(μm)	4.9(3.8-8.2)	4.5(4.0-5.4)	17.6(11.2-21.6)	15.6(7.2-27.6)	25.1(20.6-31.5)
Mean grain size(ϕ)	7.7(7.0-8.0)	7.8(7.7-8.0)	6.0(5.5-6.7)	6.2(5.3-7.2)	5.4(5.1-5.6)
Water Content(%)	148(126-174)	139(124-148)	221(206-240)	281(225-415)	281(257-305)
Grain density(g/cm^3)	2.59(2.56-2.63)	2.59(2.57-2.65)	2.43(2.36-2.51)	2.44(2.32-2.54)	2.40(2.36-2.44)
Bulk density(g/cm^3)	1.37(1.34-1.40)	1.38(1.36-1.41)	1.25(1.25-1.26)	1.22(1.15-1.25)	1.22(1.20-1.24)
Plastic limit(%)	32(20-75)	29(17-34)	66(48-77)	87(37-176)	54(48-59)
Liquid limit(%)	151(107-294)	112(108-116)	188(171-203)	196(138-281)	168(157-187)

Comments: average value, (-) range; minimum-maximum.

다. C1지역은 281%(257-305%)로 B2지역과 거의 동일한 함수율을 보인다(Table 3).

퇴적물 입자의 밀도는 전체 평균 $2.47 \text{ g}/\text{cm}^3$ (최소-최대: $2.31\text{-}2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$)로 일반적인 육성기원 퇴적물 입자의 밀도 $2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$ 에 비하여 낮다. N1지역의 평균 입자밀도는 $2.59 \text{ g}/\text{cm}^3$ ($2.56\text{-}2.63 \text{ g}/\text{cm}^3$)이며, N3지역은 $2.59 \text{ g}/\text{cm}^3$ ($2.57\text{-}2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$)로 두지역이 서로 같다. 중서부에 위치한 A2지역은 $2.43 \text{ g}/\text{cm}^3$ ($2.36\text{-}2.51 \text{ g}/\text{cm}^3$), 중부중앙에 위치한 B2지역 퇴적물의 평균값은 $2.44 \text{ g}/\text{cm}^3$ ($2.32\text{-}2.54 \text{ g}/\text{cm}^3$)이다. 이밖에 C1지역은 $2.40 \text{ g}/\text{cm}^3$ ($2.36\text{-}2.44 \text{ g}/\text{cm}^3$)로 가장 낮은 입자밀도를 보인다(Table 3).

전밀도는 함수율과 퇴적입자 비중의 함수로 해수로 충전되어 있는 퇴적물의 밀도를 의미한다(지 등 2000). 연구지역 전체의 평균 전밀도는 $1.26 \text{ g}/\text{cm}^3$ (최소-최대: $1.15\text{-}1.54 \text{ g}/\text{cm}^3$)로 낮다. 그러나 N1지역의 평균값은 $1.37 \text{ g}/\text{cm}^3$ ($1.34\text{-}1.40 \text{ g}/\text{cm}^3$)이며, N3지역은 $1.38 \text{ g}/\text{cm}^3$ ($1.36\text{-}1.41 \text{ g}/\text{cm}^3$)로 서로 유사하게 비교적 높은 값을 보인다. 중서부에 위치한 A2지역은 $1.25 \text{ g}/\text{cm}^3$ ($1.25\text{-}1.26 \text{ g}/\text{cm}^3$), 중부중앙에 위치한 B2지역 퇴적물의 평균값은 $1.22 \text{ g}/\text{cm}^3$ ($1.15\text{-}1.25 \text{ g}/\text{cm}^3$)이다. 이밖에 C1지역은 $1.22 \text{ g}/\text{cm}^3$ ($1.20\text{-}1.24 \text{ g}/\text{cm}^3$)로 가장 낮은 전밀도를 보인다(Table 3).

액성한계는 액성상태에서 소성상태로 변화하는 한계의 함수비를 의미한다(지 등 2000). 연구지역 퇴적물의 액성한계는, 전체 평균 164%이며, N1지역의 평균값은 151%(107-294%), N3 지역은 112%(108-116)로 비교적 낮은 액성한계를 보인다. 중서부에 위치한 A2지역은 188%(171-203%)이며, B2지역의 평균값은 196%(138-281%)로 가장 높다. 이밖에 C1지역은 168%(157-187%)로 B2 지역에 비해 조금 낮은 액성한계를 보인다(Table 3).

소성한계는 소성에서 반고체의 상태로 변화하는 한계의 함수비를 의미한다(지 등 2000). 연구지역의 소성한계는

전체 평균 97%이며, N1지역의 평균값은 32%(20-75%), N3 지역은 29%(17-34%)로 낮은 값을 보인다. A2지역은 66%(48-77%)이며, B2지역의 평균값은 87%(37-176%)로 가장 높다. 이밖에 C1지역은 54%(48-59%)로 B2 지역에 비해 조금 낮은 소성한계를 보인다(Table 3).

결과적으로 연구지역 퇴적물은 원양성 적점토가 분포하는 북부지역(N1, N3 지역)과 생물기원의 규질 퇴적물이 분포하는 중부지역(A2, B2, C1 지역)으로 구분되며, 이들 퇴적물은 종류에 따라 뚜렷이 다른 지질공학적 특성을 보인다.

주변지역에서 도출된 타 연구결과와의 비교

분석된 지질공학적 특성 자료를 C-C 지역전체와 주변 연구지역에서 보고된 자료들과 비교·분석하였다. 그러나 해양 지질학적 연구목적으로 보고되는 국제학회지 논문에는 원시자료(raw data)가 대부분 포함되어있지 않으므로 정확한 비교가 어렵다. 따라서 신뢰도 있는 원시자료가 확보된 보고 자료를 선별·활용하였다. 비교 대상지역은 C-C 지역의 중서부에 위치한 DOMES(Deep Ocean Mining Environmental Study) A지역, 중부중앙에 위치한 DOMES B지역, 중동부에 위치한 DOMES C지역, 그리고 IFREMER에서 보고된 프랑스의 단독개발 예정지역이다(Fig. 4).

DOMES A와 B지역은 규질연니가 우세하게 분포하고 있으며, 본 연구의 N3지역 바로 남측에 위치한 DOMES C지역은 규질 점토가 우세하게 분포하고 있다(USGS 1977; Richards 1978). 또한 IFREMER 연구지역 중 서측에 위치한 연구지역에는 규질연니가 분포하고 있으며, 본 연구지역인 N1 지역 아래 위치한 IFREMER 동측 연구지역에는 규질 점토가 분포한다(IFREMER 1989).

퇴적 깊이에 따른 전단강도의 수직 분포도에서 IFRA-

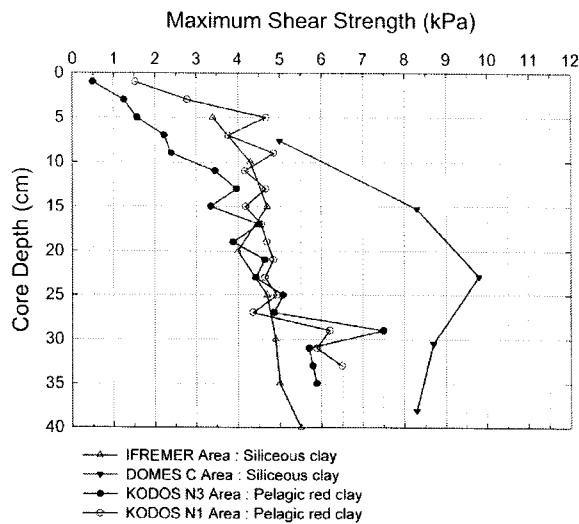


Fig. 5. Depth profiles of average shear strengths of under- to normally-consolidated siliceous clay and pelagic red clay in the IFREMER, DOMES C, and KODOS N1 and N3 areas. Note the differences in maximum shear strengths of DOMES C from others.

MER 연구지역의 규질점토와 인접한 N1, N3지역의 원양성 적점토 퇴적물이 퇴적 깊이에 따라 유사한 평균전단강도 변화를 보인다(Fig. 5). 특히 IFREMER 지역에 바로 인

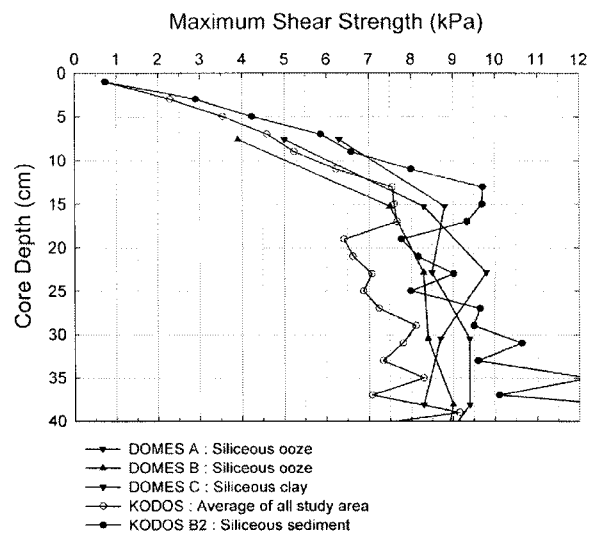


Fig. 6. Depth profiles of average shear strengths of slightly over- to over-consolidated siliceous ooze and siliceous sediments in the DOMES A, B, C, and KODOS areas. Note DOMES C data (siliceous clay) compared well to other data nevertheless of sediment composition different from others.

접해있는 N1 지역의 측정값은 거의 동일한 값을 보인다.

그러나 DOMES C의 규질점토는 앞의 두 지역 자료에 비하여 월등히 높은 전단강도를 보인다(Fig. 5). 이러한 원

Table 4. Geotechnical properties of sediments reported in the Clarion-Clipperton zone. Data of IFREMER area are from IFREMER (1989) and those of DOMES are from USGS (1977). Data for N1, N3, A2, B2, C1, and southern area are determined in this study.

Sytdy area	Sediment type	Water content (%)	Bulk density (g/cm ³)	Grain density (g/cm ³)	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)
IFREMER	Pelagic clay	130-150	-	-	-	-
	Siliceous clay	220	1.24	2.49	156	105
	Siliceous ooze	300-470	1.12	2.45	240	179
	Calcareous ooze	80	1.48	-	70	51
DOMES A	Siliceous ooze	263	1.22	-	193	83
DOMES B	Siliceous ooze	247	1.23	-	189	72
DOMES C	Siliceous clay	177	1.31	-	134	76
N1, N3	Pelagic clay	148	1.37	2.59	150	32
A2, B2, C1	Siliceous sediment	281	1.21	2.44	196	109
Southern Area	Calcareous sediment	88	1.52	2.64	40	24
C-C Zone	Pelagic clay	197	1.29	2.43-2.87	-	-
Andreev and Anikeeva, 1989	Siliceous clay	380	1.15	2.17-2.48	-	-
	Calcareous ooze	95	1.47	2.56-2.76	-	-
C-C Zone	Pelagic clay	180-300	-	-	160	108
Tisort, 1981	Siliceous ooze	315-400	-	-	239	178
	Calcareous ooze	70-80	-	-	70	52

인을 장비 및 측정방법에 따른 차이로 해석하기에는 너무 큰 차이이므로 이 지역의 특성에 대해 보다 면밀한 검토가 필요하다. DOMES A, B 지역은 규질연니가 분포하며, DOMES C 지역은 규질점토가 분포하는 지역이므로(Table 4) 다른 전단강도 값이 예상되나 서로 유사한 전단강도 특성을 보이는 점은 DOMES C 지역 퇴적물의 전단강도 특성이 특별함을 시사한다(Fig. 6).

한편, 규질 퇴적물이 분포하는 B2 지역 퇴적물의 깊이 에 따른 전단강도 변화양상은 규질 연니가 분포하는 DOMES A, B 지역과 잘 일치한다(Fig. 6). 이는 지역간의 상당한 거리가 있음에도 불구하고 퇴적물 유형이 유사하며, 지표 특성자료와 지질공학자료들이 잘 일치함을 나타낸다(Table 4). 지질공학적 특성을 결정짓는 퇴적물 유형별 함수율, 전밀도, 입자밀도 자료와 액성 및 소성한계 평균값을 비교한 결과, 각 항목별, 유형별 측정자료의 평균값들은 잘 일치한다(Table 4).

5. 고찰

측정결과와 해양학적 원인

원양성 적점토가 퇴적되어 있는 N1, N2 지역에서 측정된 결과와 마찬가지로 연성의 해양퇴적물에서 일반적으로 관찰되는 퇴적층 깊이의 증가에 따라 함수율이 감소하고 전단강도가 완만하게 증가하는 현상은 이미 많은 학자들이 보고하였다(Moore 1962; Inderbitzen 1970; Bennett *et al.* 1980; Tsurusaki *et al.* 1994). 이러한 특성은 퇴적물의 연령과 조적을 반영한 것이며(Keller and Yincan 1985; Lee *et al.* 1987), 전단강도의 증가는 퇴적 깊이 증가에 따른 일반적인 고화과정에 의한 함수율 감소의 결과이다(Baraza *et al.* 1992).

연구지역에서 10 cm 깊이 이하의 고화된 하부 퇴적층의 전단강도가 불규칙하게 증가하는데(Fig. 3). 이는 생물 교란작용과 연관되어있는 것으로 사료된다. 상부퇴적물(10-20 cm) 내에 서식하는 저서생물들은 입자들을 뭉치게 하는 효과(cementing effect)와, 반대로 교란작용으로 퇴적물 전단강도의 증감을 일으킨다(Grupe *et al.* 2001; Lambert *et al.* 1985).

대부분 규질 퇴적물(A2, B2 지역)은 10 cm 이하의 깊이에서 단단하게 고화되어 있다. 이와 같이 단단하게 고화된 퇴적물들은 높은 함수율(200-300%) 상태에서 10 kPa 이상의 높은 전단강도를 보인다(Table 3, Fig. 3). 이는 함수율이 높을수록 전단강도가 낮아지는 상관관계를 보이는 일반적인 해양퇴적물의 지질공학적 특성과는 상반되는 특이한 결과이다. 이러한 특징의 원인은 함수율이 높은 성긴 조직이지만 입자들은 관상의 점토광물과 입자의 내부에 공극이 크고 단단한 생물기원의 규질 입자들이 불

규칙하고 뒤섞여 단단하게 고화되어 있기 때문으로 판단된다(지 등 2003).

연구지역 퇴적물의 전단강도 변화의 또 다른 주요 요인은 퇴적 결층의 존재 유무로 판단된다. 과고화 상태를 보이는 대부분의 해양퇴적물은 상부퇴적물의 침식작용과 연관된다(Tisort 1981). 즉, 평균 10 cm 이하의 깊이에서 과고화 상태를 보이는 퇴적물은 과거에 해류 등 물리적 요인에 의해 상당히 깊은 깊이까지 퇴적되었던 고기퇴적층이 침식되어 표층으로 드러난 것이며, 그 이후에 현재와 같은 일반적인 퇴적작용에 의해 상부 10 cm 두께로 연성 퇴적물이 덮여있는 것으로 설명된다.

북부지역의 원양성 적점토는 가장 세립질로 함수율은 낮으며, 입자의 밀도와 전밀도는 높다. 이러한 원인은 중부지역과 남부지역에 비해 적도 고생산대에서 가장 멀리 위치하므로 수층의 생산성이 낮으며, 따라서 생물기원의 입자들의 유입이 적은 반면, 지리적으로는 대륙과 가깝기 때문에 바람에 의해 유입되는 육성기원 입자들의 유입이 많기 때문으로 판단된다.

중부지역의 규질 퇴적물은 가장 조립질로 가장 높은 함수율을 보이며, 입자의 밀도와 전밀도가 낮다. 이러한 원인은 이 지역은 적도 고생산대의 최북단에 위치하며, 북적도 반류와 북적도 해류가 만나 용승류가 형성되는 지역으로 수층 표면에서 일차 생산력이 주변지역에 비하여 높고 CCD보다 수심이 깊으므로 비교적 용해가 느리고, 다공성 조립질의 규질입자들이 많이 유입되었기 때문으로 생각된다.

퇴적물의 유형분류

연구지역 퇴적물의 전단강도 특성 분석결과에 기초하여 퇴적물의 고화정도에 따라 4가지 유형으로 대분하고, 각각의 유형은 다시 입도와 함수율 차이에 따라 세분화하여 총 16종류로 분류하였다. 퇴적물의 지질공학적 유형분류는 망간단괴 상업생산에 필수적인 활동인 해저면에서의 채광기 운영에 요구되는 해저면 퇴적물의 고화상태에 관한 기본적인 자료의 필요성에 따라 시도되었다. 이러한 퇴적물 지질공학적 유형분류는 북서 지중해(northwest Mediterranean Sea) 해저사면 퇴적물의 지질공학적 특성분류(Cochonat *et al.* 1993)를 참고하였다.

전단강도 특성에 따른 분류

퇴적물 지질공학적 유형분류는 퇴적물의 고화상태에 따라 채광기 운영을 효과적으로 대처하기 위한 심해저 광업 개시이전에 준비되어야 하는 채광지역의 기본적인 자료이다.

이와 관련하여, 독일은 망간단괴 채광기가 해저면에서의 움직임에 필요한 퇴적물의 전단강도를 2.5-4 kPa로 예

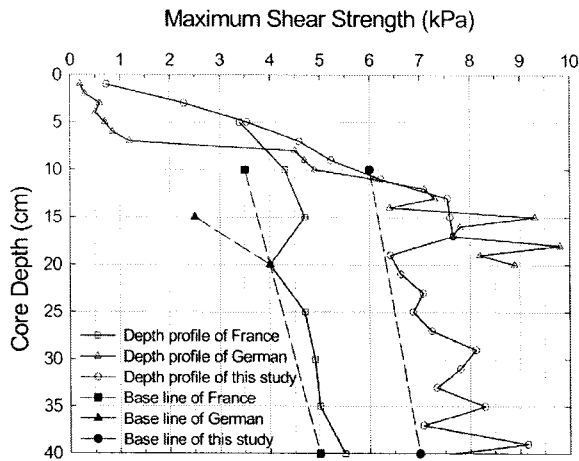


Fig. 7. Depth profiles of averaged shear strengths in the IFREMER (France) and KODOS (this study) in the C-C zone and in the Peru Basin (German). Dashed lines represents the base lines of maximum shear strength suggested by France, German and this study for collector vehicle design.

상하고 있으며, 채광기가 영향을 미치는 퇴적 깊이를 15-20 cm로 예상하고 있다(Fig. 7, Grupe et al. 2001). 또한 프랑스의 경우, 채광 예상지역에서 얻어진 퇴적물의 깊이 별 전단강도 평균값에 근거하여 채광기 움직임에 필요한 전단강도의 기준을 10 cm 깊이에서 3.5 kPa, 40 cm 깊이에서 5.0 kPa로 설정하였다(Fig. 7, IFREMER 1989). 이 밖에 THETIS(1992)는 채광기의 표준 설계자료에 기초를 하여 채광기 운동에 필요한 퇴적층의 전단강도를 최소 3.5 kPa로 정하였으며, 채광기가 퇴적층에 가해지는 힘은 3.5-5 kPa로 판단하고 있다. 프랑스의 기준 설정과 동일한 방법으로 전체 지역의 평균값에 근거하여 기준을 설정한다면, 채광을 위한 연구지역의 기준은 10 cm 깊이에서 6 kPa, 40 cm 깊이에서 7 kPa로 설정할 수 있다(Fig. 7).

그러나 퇴적물의 전단강도는 채광기의 주행성능을 좌우하게 되며(최 등 2003), 채광기의 주행성능은 망간단과 상업생산의 생산성을 결정하는 주요요소이므로 본 연구에서는 퇴적물의 특성에 따라 주행성능을 고려하여 연구지역 퇴적물을 4가지 유형으로 분류하였다.

연구지역의 퇴적물 중 표층 10-40 cm 깊이까지 평균 전단강도가 5 kPa 미만으로 채광기의 정상적인 주행이 어려울 것으로 예상하는 퇴적물은 미고화 상태 (under consolidated state)를 나타내는 Type A로 구분하였다. 그리고 표층 10-40 cm 깊이까지 평균 전단강도가 5 kPa 이상으로 채광기의 정상적인 운용이 가능하다고 예상되는 퇴적물에 대하여 전단강도 값에 따라 보통 고화(normally consolidated state), 약과고화(slightly over consolidated

Table 5. Four surface sediment (10-40 cm) types classified by average shear strengths.

Type	Consolidated state	Average shear strength
Type A	Under consolidated	≤ 5 kPa
Type B	Normally consolidated	5-7 kPa
Type C	Slightly over consolidated	7-10 kPa
Type D	Over consolidated	≥ 10 kPa

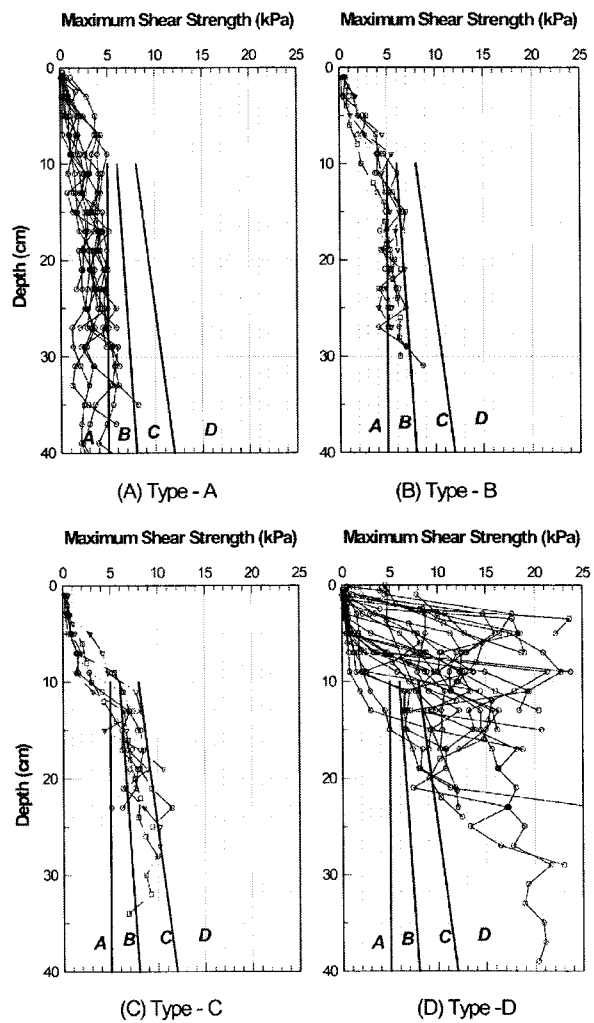


Fig. 8. Depth profiles of shear strengths of all the studied samples plotted with the consolidation state of sediments classified in Table 5 (see text for details). (A) under consolidated, (B) normally consolidated, (C) slightly over consolidated, (D) over consolidated sediments.

state), 그리고 과고화(over consolidated) 상태로 분류하였다.

즉, 표층 10-40 cm 깊이까지 평균 전단강도가 5 kPa 이상 7 kPa 미만인 퇴적물을 보통고화(Type B), 표층 10-40 cm 깊이까지 평균 전단강도가 7 kPa 이상 10 kPa 미만인 퇴적물을 약과고화(Type C)로 구분하였으며, 표층 10-40 cm 깊이까지 평균 전단강도가 10 kPa 이상인 퇴적물은 과고화(Type D)로 분류하였다(Table 5, Fig. 8).

단, 주상시료가 40 cm 깊이까지 채취되지 못한 경우, 측정된 주상시료 최하부의 값을 그 이하 40 cm까지 연장하여 동일한 값을 보인다는 가정 하에 분류하였다.

지표특성에 따른 분류

망간단괴가 놓여 있는 반액상의 최상부층은 채광기의 운동에 의해 부분적으로 또는 완전히 교란될 것이므로 세립질의 표층 퇴적물은 재부유(resuspension)되어 혼탁물

(sediment plum)을 형성하고, 발생된 혼탁물은 해류에 의해 주변지역에 재퇴적(resedimentation) 될 것이다(Lavelle *et al.* 1981). 이때 혼탁물의 확산(dispersal)범위와 수층에서의 잔류시간은 입자의 침강 속도와 해류의 이동에 의해 결정되므로 퇴적물의 입도 분포는 혼탁물의 확산을 좌우하는 주요 요소이다(Becker *et al.* 2001).

따라서 고화정도에 따라 분류된 4가지 퇴적물 유형을 채광기의 운동에 따라 발생하는 혼탁물의 양, 해수 중 잔류시간, 혼탁물의 이동 등에 영향을 미치는 가장 중요한 요소로 고려되는 평균입도를 기준으로 하여 3가지 세부유형(sub-type)으로 나누었다. 또한 전체 지역 평균 함수율에 비해 약 40% 이하로 함수율이 매우 낮은($\leq 100\%$) 퇴적물은 입도에 상관없이 뚜렷이 다른 지질공학적 특성을 보이므로 1가지 세부유형을 추가하여 전체 4가지 세부유형으로 구분하였다(Table 6).

즉, 퇴적물의 평균입도를 기준으로 세립질(sub-type 1, 10 μm 이하), 중립질(sub-type 2, 10-15 μm), 조립질(sub-type 1, 15 μm 이상)로 구분하였다. 그리고 극히 낮은 함수율을 갖는 퇴적물(sub-type 4, 100% 이하) 추가적으로 구분하였다.

결과적으로 고화 정도에 따라 분류된 4가지 퇴적물 유형을 입도와 함수율 특성에 따라 다시 4가지로 구분하여 총 16가지 유형으로 세분하였으며, 이렇게 세분된 퇴적물 유형의 지리적 분포를 Table 8에 나열하였다. Type C-4와

Table 6. Four sub-types of the surface sediments (0-40 cm) classified based on mean grain size (sub-types 1-3) and water content (sub-type 4).

Sub-type	Characters	Range
1	fine	mean grain size: $\leq 10 \mu\text{m}^1$
2	medium	mean grain size: 10-15 μm^1
3	coarse	mean grain size: $\geq 15 \mu\text{m}^1$
4	very low	water content: $\leq 100\%$

*1water content: $\geq 100\%$.

Table 7. Average values of mean grain size, water content, porosity, bulk and grain density, and consistency limits of the sixteen sediment types.

Type	Mean grain size (μm)	Water content (%)	Bulk density (g/cm^3)	Grain density (g/cm^3)	Plastic limit (%)	Liquid limit (%)
Type A-1	4.4	151.7	1.36	2.60	25.7	126.0
Type A-2	13.5	285.1	1.20	2.35	67.7	142.5
Type A-3	22.8	295.9	1.21	2.39	60.9	154.1
Type A-4	12.2	89.0	1.52	2.63	21.2	34.5
Type B-1	4.4	134.8	1.38	2.60	27.2	118.0
Type B-2	11.7	248.5	1.23	2.41	58.8	171.9
Type B-3	20.1	259.3	1.23	2.42	70.8	145.1
Type B-4	14.4	86.4	1.53	2.65	26.3	46.0
Type C-1	5.4	123.6	1.40	2.57	31.4	108.1
Type C-2	13.3	255.8	1.24	2.45	75.2	150.4
Type C-3	18.9	285.2	1.21	2.42	75.1	187.4
Type C-4	-	-	-	-	-	-
Type D-1	8.2	226.9	1.27	2.47	82.9	221.1
Type D-2	12.3	275.7	1.22	2.44	84.8	199.6
Type D-3	19.2	305.2	1.21	2.45	90.3	203.5
Type D-4	-	-	-	-	-	-
Total average	14.3	244.9	1.26	2.47	66.8	163.9

Table 8. Occurrence frequency of the 16 sediment types in the study area.

Type	Sub-type	N1 Area	N3 Area	A2 Area	B2 Area	C1 Area	Other area	Sum
Type A (21%)	Type A-1	2	3					5
	Type A-2				2			2
	Type A-3				1	2	2	5
	Type A-4						2	2
Type B (25%)	Type B-1	4						4
	Type B-2				3			3
	Type B-3			1	4		2	7
	Type B-4						2	2
Type C (15%)	Type C-1		1					1
	Type C-2				2		1	3
	Type C-3				4		1	5
	Type C-4							
Type D (40%)	Type D-1	1			2			3
	Type D-2			1	11			12
	Type D-3				10	1		11
	Type D-4							
Total		7	4	2	39	3	10	65

Type D-4 유형의 시료는 아직까지 채취되지 않았으나 C-C지역 전반에 분포하는 퇴적물 특성을 보고한 외국 자료 (THETIS 1992; IFREMER 1989)에 근거할 때, 우리 연구 지역 내에서도 발견되리라 예상하여 분류에 포함시켰다.

지질공학적 특성에 따른 연구지역의 특징

5개 연구지역 퇴적물의 특성을 지질공학적 분류에 따른 16가지 유형으로 파악하였다(Table 7, 8). B2 지역을 제외한 지역들은 채취 시료가 10개미만으로 매우 부족하여 분류 결과에 따라 적절한 평가를 하기 어렵다.

N1, N3지역의 원양성 적점토 시료의 경우, 전반적으로는 미고화 또는 보통고화 상태의 시료가 우세하게 나타났다(Table 8). 이들 원양성 적점토는 평균입도가 $4.8 \mu\text{m}$ ($3.8\text{-}8.2 \mu\text{m}$)로 세립질이므로(Table 7) 퇴적물 교란시 발생하는 세립질입자의 재부유현상은 규모와 수층에서의 잔류시간이 상대적으로 조립질인 중부지역의 규질 퇴적물에 비해 클 것으로 판단된다.

규질 퇴적물이 분포하고 있는 A2, C1, B2 지역에서 채취되어 분류된 시료는 과고화 상태의 시료가 우세하게 나타났다(Table 8). 규질 퇴적물의 특성상 북부지역의 원양성 적점토에 비해 월등히 조립질($16.6 \mu\text{m}$)이므로(Table 8) 퇴적물 교란시 발생하는 조립질입자의 재부유현상은 규모와 수층에서의 잔류시간이 상대적으로 세립질인 북부지역의 원양성 적점토에 비해 월등히 적을 것으로 판단된다.

결과적으로 원양성 적점토가 분포하고 있는 북부 연구 지역은 미고화, 저함수, 세립 실트질 점토(Type A-1)와 보

통 고화, 저함수, 세립 실트질 점토(Type B-1)가 우세하게 나타나며, 반면에 규질 퇴적물이 분포하고 있는 중부연구 지역은 과고화, 중함수, 중립 점토질 실트(Type D-2)와 과고화, 고함수, 조립 점토질 실트(Type D-3)가 우세하게 나타난다. 따라서 북부 연구지역에 비하여 규질 퇴적물이 분포하고 있는 중부연구지역이 채광기의 주행 측면과 환경 피해 축소 측면에서 채광 작업에 유리한 것으로 판단된다.

특히 다른 연구지역에 비하여 상대적으로 세밀한 조사가 이루어진 B2 지역의 경우, 채광기의 정상적인 주행이 어려울 것으로 예상되는 미고화 퇴적물(Type A) 분포지역은 B2지역의 약 8%이며 나머지 92% 지역은 보통고화, 약 과고화 과고화 상태(Type B, C, D)에 따라 효과적인 주행이 가능할 것으로 판단된다. 채광기의 주행과 퇴적물 교란에 의한 환경영향 측면에서 가장 적합한 지역으로 판단되는 Type D-3의 유형은 B2지역의 25%를 점유하며, 다음으로 적합한 Type D-2의 유형은 28%를 점유하고 있다. 또한 B2지역에 분포하고 있는 규질 퇴적물은 그 특성상 원양성 적점토에 비해 조립질(평균 $15.6 \mu\text{m}$)이므로 채광에 따른 환경피해 축소 측면에서도 유리한 지역으로 판단된다.

6. 결 론

연구지역 퇴적물의 지질공학적 특성을 외국의 주변지역에서 도출된 연구결과와 비교 분석한 결과, 북부지역의 원양성 적점토는 타 연구결과와 잘 일치하며, 중부지역의 규질 퇴적물은 규질 연니와 규질 점토의 중간적 특성을 지

니고 있다.

원양성 적점토와 같이 퇴적결층이 존재하지 않고 상부 층과 하부층이 균질한 퇴적물은 퇴적층 하부로 가면서 완만한 전단강도 증가를 보인다. 이는 일반적인 고화 과정에 의한 함수율 감소에 의한 결과로 해석된다.

규질 퇴적물의 전단강도 변화의 가장 큰 요인은 고해양 시대에 형성된 퇴적결층으로 판단되며, 과고화 상태의 하부층은 높은 함수율과 공극률 값을 보이는데, 이는 퇴적물이 판상의 점토광물과 다공질의 단단한 생물기원 규질 입자들이 불규칙하게 뒤섞여 고화되었기 때문으로 판단된다.

원양성적점토와 규질퇴적물이 뚜렷이 다른 특징을 보이는 원인은 적도고생산대와 대륙과의 지리적 위치에 따른 생물기원입자와 육성기원입자의 유입차이, 탄산염포화도를 고려한 해수에 의한 생물기원입자의 용해 차이에 기인한다.

전체 연구지역에서 얻어진 퇴적물의 깊이별 전단강도 평균값에 근거할 때, 채광기 움직임에 필요한 전단강도 기준은 10 cm 깊이에서 6.0 kPa, 40 cm 깊이에서 7.0 kPa 이다.

향후 효과적인 채광을 위해 연구지역을 지질공학적으로 분류한 결과, 북부의 원양성 적점토 분포지역은 미고화 또는 보통고화 상태를 보이므로 채광기의 주행측면에서 분리하며, 퇴적물의 구성입자가 세립질이므로 인위적 교란에 의해 발생하게 될 부유퇴적물의 양과 수층에서의 잔류시간이 크기 때문에 주변에 영향을 미치는 범위가 규질퇴적물에 비해 상대적으로 클 것이 예상된다. 반면에 중부의 규질 퇴적물 분포지역은 주로 과고화 상태를 보이며, 조립질이므로 채광기의 주행 측면과 환경피해 축소 측면에서 채광 작업에 유리하다.

특히, 고품위의 망간단괴가 분포하고 있으며, 가장 광범위한 면적의 B2지역은 채광기의 정상적인 주행이 어려울 것으로 예상되는 미고화 퇴적물(Type A) 분포지역은 약 8%에 불과하며, 나머지 92%지역은 보통고화, 약과고화 과고화 상태(Type B, C, D)를 보임에 따라 채광기의 효과적인 주행이 가능할 것으로 예측된다.

사 사

연구에 도움을 주신 한국해양연구원 심해저자원연구센터 연구원 여러분과 온누리호 승무원 여러분께 감사드립니다. 또한 세밀한 심사와 교정에 시간을 내주신 한국해양연구원의 이희준 박사님과 정희수 박사님께 진심으로 감사드립니다. 이 연구는 1997년부터, 2002년까지 수행된 심해저광물자원 개발사업(해양수산부)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 박승현, 정희수, 박찬영, 이경용, 김기현. 1999. 한국심해환경 연구(KODES) 지역 표층퇴적물 중 속성작용에 의한 금속의 분화. *한국해양학회지*, 3, 215-225.
- 이희준. 1991. 한국 주변해역 퇴적물의 지질공학적 성질과 퇴적작용과의 관계. 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 291 p.
- 지상범. 1994. 북적도 태평양 심해저 퇴적물과 망간단괴의 지질공학적 특성 및 음향특성. 인하대학교 석사학위논문, 85 p.
- 지상범, 김기현, 문재운, 이경용, 손승규, 오재경. 2000. 북동태평양 KODOS 지역 심해저 퇴적물의 지질공학적 특성. *한국해양학회지*, 5, 320-334.
- 지상범, 오재경, 이현복, 김기현. 2003. 북동태평양 클라리온-클리퍼톤 지역 심해저 표층 퇴적물의 지역적 지질공학적 특성 연구. *Ocean Polar Res.*, 25(2), 133-145.
- 최중수, 홍 섭, 김형우, 이태희. 2003. 해저연약지반 주행성능 실험기법연구(II): 직진주행성능시험. *한국해양공학회 춘계학술대회 논문집*, p. 116-120.
- 해양수산부. 1998. 심해저 광물자원 탐사 보고서(1). 해양수산부 보고서, BSPM98001-01-1117-7, 1209 p.
- Almagor, G. 1982. Marine geotechnical studies at continental margins: a review - Part I. *Applied Ocean Res.*, 4, 92-98.
- Baltzer, A., P. Cochonat, and D.J.W. Piper. 1994. In situ geotechnical characterization of sediments on the Nova Scotian Slope, eastern Canadian continental margin. *Mar. Geol.*, 120, 291-308.
- Baraza, J., G. Ercilla, and H.J. Lee. 1992. Geotechnical properties and preliminary assessment of sediment stability on the continental slope of the Northwestern Alboran Sea. *Geo-Mar. Lett.*, 12, 150-156.
- Becker H.J., B. Grupe, H.U. Oebius, and F. Liu. 2001. The behaviour of deep-sea sediments under the impact of nodule mining processes. *Deep-Sea Res.*, 48, 3609-3627.
- Bennett, R.H., G.L. Freeland, D.N. Lambert, W.B. Sawyer, and G.H. Keller. 1980. Geotechnical properties of surficial sediments in a mega-corridor: U.S. Atlantic continental slope, rise, and deep-sea basin. *Mar. Geol.*, 38, 123-140.
- Chautru, J.M., Y. Morel, and G. Herrouim. 1987. Geostatistical simulation of a commercial polymetallic nodule mining site. APCOM 87. p. 177-185. In: *Proc. Twentieth Int. Symp. on the Application of Computer and Mathematics in the Mineral Industries. V3: Geostatics*. Johannesbuurg, SAIMM.
- Cochonat, P., J.F. Bourillet, B. Savoye, and L. Dodd. 1993. Geotechnical characteristics and instability of submarine slope sediments, the Nice Slope(N-W Mediterranean Sea). *Mar. Geol. Geotech.*, 11, 131-151.

- Dorfler, G. 1992. Drawbar pull of a tracked vehicle on deep sea soil. p. 102-110. In: *ISTVS, Proc. 4th Regional North American Meeting*, Sacramento, CA, March 25-27.
- Feung, L., H.U. Oebius, B. Grupe, and H.J. Becker. 1997. Basic research on characteristics of deep-sea sediment clouds produced by marine mining. p. 109-126. In: *Int. Symp. Environmental Studies for Deep-Sea Mining Proc.* Japan.
- Folk, R.L. 1968. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill's Pub. Co., Austin, Texas, 170 p.
- Grupe, B., P. Halbach, M. Gronenberg, and H.U. Oebius. 1994. Bodenmechanische Eigenschaften von Tiefseesedimenten in Maganknollen-Feldern als Funktion des sedimentpetrographischen Aufbaus. Technische Universität Berlin, VWS, Eigenverlag, Germany.
- 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.
- Hagerty, R. 1974. Usefulness of spade cores for geotechnical studies and some results from the northeast Pacific. p. 169-186. In: *Deep-Sea sediments: physical and mechanical properties*. ed. by A.L. Inderbitzen, Plenum Press, New York.
- Hirst, T.J. and A.F. Richards. 1975. Analysis of deep-sea nodule mining - seafloor interaction, *Offshore Technol. Conf.*, No. OTC 2241, Dallas.
- 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. Geophysics, Honolulu.
- IFREMER. 1989. Evaluation et étude des moyens nécessaires à l'exploitation des nodules polymétalliques, Rapport final, TOME I, pp. 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.
- Keller, G.H. and Y. Yincan. 1985. Geotechnical properties of surface and near-surface deposits in the East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, 4, 159-174.
- 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.
- Lavelle J.W., E. Ozturgut, S.A. Swift, and B.H. Erickson. 1981. Dispersal and resedimentation of the benthic plume from deep-sea mining operations: A model with calibration. *Mar. Mining*, 3, 59-93.
- Lee, H.J. and J.E. Clausner. 1979. Seafloor soil sampling and geotechnical parameter determination-handbook, Technical Report Civil Engineering Laboratory, Naval Construction Battalion Center, Port Hueneme, California, 121 p.
- Lee, H.J., S.K. Chough, K.S. Jeong, and S.J. Han. 1987. Geotechnical properties of sediment cores from South-eastern Yellow Sea: Effects of depositional process. *Mar. Geotechnol.* 7, 37-52.
- Moore, D.G. 1962. Bearing strength and other physical properties of some shallow and deep-sea sediments from the North Pacific. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 73, 1163-1166.
- Müller, P.J. and A. Mangaini. 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.
- Noorany, I. and T. Fuller. 1982. Soil-machine interaction studies for manganese nodule mining. p. 445-456. In: *OTC 4261, Offshore Technol. Conf. Proc.*
- Oebius, H.U. 1998. Deep-sea mining and its environmental consequences. Technische Universität Berlin, VWS, Eigenverlag, Germany. 136 p.
- Oebius, H.U., H.J. Becker, S. Rolinski, and J.A. Jankowski. 2001. Parametrization and evaluation of marine environmental impacts produced by deep-sea manganese nodule mining. *Deep-Sea Res. II*, 48, 3453-3467.
- Piper, D.Z., H.E. Cook, and J.V. Gardner. 1979. Lithic and acoustic stratigraphy of the equatorial north Pacific: DOMES sites A, B, and C. p. 309-348. In: *Marine Geology and Oceanography of the Pacific Manganese Nodule Province*. ed. by Bischoff, J.L. and D.Z. Piper, Plenum Press, New York.
- Richards, A.F. 1978. Marine geotechnical data for North Pacific sediment: USGS open file report series. 78-231.
- Richards, A.F. and R.C. Chaney. 1981. Present and future geotechnical research needs in deep ocean mining. *Mar. Mining*, 2, 315-337.
- Shepard, F.P. 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *J. Sed. Petrol.*, 24, 151-158.
- THETIS. 1992. The environmental impact of deep sea mining, section I. Nodules and environment. ed. by Amann, H., 283 p.
- Tisort, J.P. 1981. Analysis of physical and mechanical properties of deep-sea sediments from potential manganese nodule mining areas in the north central Pacific. p. 139-146. In: *OTC 4132, Offshore Technol. Conf. Proc.*

Tsurusaki K., T. Yamazaki, and K. Handa. 1994. Geotechnical properties of deep-sea sediments and manganese nodules in the Penrhyn Basin, South Pacific. p. 225-240. In: *Marine Geology, Geophysics and Manganese Nodule Deposits in the Penrhyn Basin, South Pacific*. ed. by Usui A., Geological Survey of Japan Cruise Report No. 23.

USGS. 1977. Deep ocean environmental study: geology and geochemistry of DOMES sites A, B, and C, equatorial north Pacific. open file report 77-778. 527 p.

Received Oct. 31, 2003

Accepted Dec. 4, 2003