

<Note>

## 북동태평양 KODOS지역 심해 퇴적물의 베인 전단강도 측정 방법에 따른 결과 비교

지상범 · 정희수 · 김현섭 · 문재운  
한국해양연구소 심해저자원연구센터

### Comparison of Vane-shear Strength Measured by Different Methods in Deep-sea Sediments from KODOS area, NE Equatorial Pacific

SANG-BUM CHI, HOI-SOO JUNG, HYUN-SUB KIM AND JAI-WOON MOON  
*Deep-sea Research Center, Korea Ocean Research & Development Institute,  
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

북동태평양 심해저 생물기원 퇴적물에서 서로 다른 두 종류의 측정기 그리고 선상 및 육상 실험실에서 획득한 베인전단강도(vane shear strength) 자료의 비교·연구를 위하여 다중주상시료 채취기(multiple corer)로 규질 및 탄산질 퇴적물 시료를 채취하였다. 전단강도는 2.0×2.0 cm의 베인(90° four blade vane)이 장착된 수동베인측정기(hand-held vane apparatus, 수동베인) 그리고 회전식 점도계(rotational viscometer)에 1.0×0.88 cm의 베인을 장착하여 구성한 전동베인 측정기(motorized shear vane system, 전동베인)로 측정되었다. 수동베인과 전동베인으로 측정된 전단강도 값들은 코어 깊이에 따라 증가하는 동일한 변화 양상을 보이며, 절대 값도 유의한 차이를 보이지 않는다. 그리고 선상에서 측정된 전단강도 값에 비하여 3개월 후 실험실에서 동일 장비에 의해 측정된 값들 또한 큰 차이를 나타내지 않는다. 한편, 실험실에서 전동베인으로 동일한 코어를 2~4회 반복 측정된 결과 동일한 깊이에서도 측정 지점(hole)에 따라 차이가 나타난다. 또한 한 정점 내에서 서로 다른 코어 시료중 전단강도 값은 상당한 차이를 보이는 경우도 있다. 이는 심해저 주상 퇴적물의 물리적 특성이 생물 교란 작용 등의 영향으로 국부적으로 다르기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 즉 심해저 퇴적물의 전단강도는 선상에서 또는 3개월이 지난 후 실험실에서, 그리고 두 종류의 기기를 사용하여도 깊이에 따른 유의한 차이를 보이지 않고, 오히려 한 코어 시료 내의 국부적 물성차이 또는 한 정점 내 지점별 물성차이에 의한 변화 폭이 더 크게 나타난다.

Siliceous and calcareous deep-sea core sediments were collected by a multiple corer from the KODOS (Korea Deep Ocean Study) area, northeast equatorial Pacific, to compare vane shear strengths measured by two different apparatuses and in different places of on-board and on-land laboratories. The apparatuses were 1) a hand-held vane with four blades of 2.0×2.0 cm, and 2) a motorized shear vane system with four blades of 1.0×0.88 attached on a rotational viscometer. Depth profiles of shear strengths of core samples determined by the apparatuses do not show any consistent difference. Also, there is no consistent difference between shear strength values measured on-board and on-land laboratories after storing the core samples for three months in a cold room by a motorized shear vane system. However, there are considerable differences between depth profiles of shear strengths measured at four different points (holes) of a core sample. Moreover, significant differences among the profiles of different tube samples from a multiple corer within a sampling station were observed. Heterogeneity in physical properties of each depth and sediment column, possibly due to bioturbation and bottom current flows, is likely responsible for the differences in the geotechnical properties.

#### 서 론

전단강도는 가장 중요한 퇴적물의 물리적 특성 중 하나로 해저구릉, 해저산 등 사면의 안정성 및 퇴적과정 연구 등에 필수적이다(Craig, 1979). 특히 망간단괴가 고밀도로 부존되어 있는 심

해저 퇴적물에 대한 전단강도 특성 연구는 상업생산시 해저면 위에서 단괴를 대량으로 채취하게 될 채광장비의 설계 및 운영에 필수 요건이다(Hirst and Richard, 1975; Tsurusaki and Hirota, 1977; Richard and Chaney, 1981; Tsurusaki *et al.*, 1994). 베인전단시험기기(vane shear test device, 베인측정기)는 스웨덴의

Cadling과 Odenstad가 1950년에 고안하였으며(Monney, 1974; Johnson *et al.*, 1977), 이 측정법은 1960년대 초부터 일반적으로 사용되고 있다(Moore, 1962). 특히 배인 측정기는 심해저 퇴적물과 같이 연약한 세립질 퇴적물에 대한 전단강도를 측정하기 위하여 널리 사용된다. 일반적으로 전단강도를 측정하는 좋은 방법 중 하나는 삼축압축시험(triaxial compression test)을 사용하는 것이다(Lee, 1985). 그러나 연성의 심해저 퇴적물 시료를 교란되지 않게 공시체로 형성하는 작업이 매우 어려우므로 전단강도 측정에 삼축압축 시험기를 적용하는 것은 상당히 까다로운 일이다. 한편, 자연상태의 심해저 퇴적물과 같이 해수로 포화된 실트(silt)와 점토(clay)로 구성된 세립질 퇴적물은 투수율이 극히 낮기 때문에 직각 4날 배인을 이용한 배인 측정기로 측정된 값은 비배수 조건(undrained condition)에서 삼축압축시험기로 측정된 값과 근사한 것으로 보고되었다(Arman *et al.*, 1975; Tsurusaki and Hirota, 1977). 또한 배인 측정기에 의한 전단강도 측정은 코어내의 작은 부분에서 측정되므로 따로 시료를 준비할 필요가 없으며, 측정에 의해 훼손되는 시료량이 매우 적다. 또한 측정이 빠르고 장비의 가격이 저렴하며, 시험에 특별한 기술이 불필요하므로 측정이 편리하다. 이외에도 일반적인 해저면에서 직접 측정하는 방법(in-situ measurement)과 동일한 방법(vane type)인 장점이 있다. 따라서 심해저 퇴적물과 같이 액성한계보다 높은 함수율을 갖는 연성 세립질 퇴적물의 전단강도 측정은 배인측정기를 사용하는 것이 적합하다(Craig, 1979; Dill and Moore, 1965; Johnson *et al.*, 1977; Monney, 1974). 그러나 해양퇴적물의 전단강도 측정시 가장 간편하게 사용하는 수동 배인(hand-held vane)은 회전속도의 측정이 어려우며, 내장된 스프링 장치가 배인을 회전시키므로 측정기가 일정한 속도로 회전하더라도 실제 퇴적물내의 배인 회전속도는 일정치 않음에 따라 자료의 신뢰성이 낮은 단점이 있는 것으로 알려져 있으며, 따라서 전단강도 측정치가 사용되는 국제적인 논문에는 배인 회전속도(vane shear rate)를 명시하고 있다(Table 1). 본 연구에서는 기존 수동배인으로 측정된 전단강도 측정치의 신뢰도를 확인하고자 위와 같은 인위적 오차요인의 제거를 위하여 PC를 이용한 회전식 점도계(rotational viscometer)에 배인이 부착된 전동배인(motorized shear vane)으로도 전단강도를 측정하였다.

한편, 해양퇴적물의 전단강도 측정은 퇴적물 교란의 극소화를 위해 현장에서 실행하는 것이 바람직하며, 가능하다면 조사선에서 해저면으로 측정기를 하강시켜 해저면에서 측정하는 방법이 가장 이상적이다(Almagor, 1982; Baltzer *et al.*, 1994). 그러나 이 방법은 높은 압력의 심해저 환경에서 작동하는 측정기의 제작 그리고 한 지점에서 1회의 측정에 소요되는 장시간의 조사선 사용 등 막대한 비용이 소모되는 비현실적 작업이다(Fuller, 1975; Lee, 1980; Almagor, 1982). 또한 해저면에서 직접 측정된 전단강도는 교란되지 않은 시료(undisturbed samples)를 실험실에서 측정된 자료와 거의 동일한 것으로 알려져 있다(Keller and Bennett, 1970). 따라서 해저면에서 교란되지 않은 시료를 채취·회수한 후 즉시 선상에서 전단강도를 측정하는 것이 최선이다(Fuller, 1975; Almagor, 1982; Hargerty, 1974). 그러나 선상 측정은 육상 실험실 측정에 비하여 조사선의 진동 및 흔들림 등 측정 오차 요인을 내포하고 있으며, 반면 실험실 측정은 시

료를 보관하는 동안의 변질 그리고 실험실로 운반하는 도중 발생될 충격 등 또 다른 오차요인을 가지고 있다. 한편, 이러한 전단강도 측정방법에 따른 오차요인도 있지만 Hargerty(1974)는 동일한 지역의 퇴적물이라도 측정지점 및 시료채취의 위치에 따라 전단강도 값의 차이가 나타날 수 있다고 제시하였다. 본 연구에서는 두 가지 실험 기기, 즉 수동배인과 전동배인에 의하여 두 측정장소, 즉 선상 그리고 3개월 후 실험실에서 반복 측정된 각각의 전단강도 값을 비교·검토하여 측정 방법에 따른 전단강도 값의 유의한 차이 및 차이의 원인에 관해 고찰하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 시료의 채취

일반적으로 해저 퇴적물을 채취할 때 채취기가 퇴적물 내로 삽입될 때 발생하는 기계적 눌림(compaction)작용은 퇴적물의 지질공학적 특성을 변화시킨다(Baltzer *et al.*, 1994). 해저면에서 직접 측정된 전단강도 결과와 시료 채취기의 직경이 10 cm 미만인 피스톤식 퇴적물 주상시료 채취기(piston corer) 그리고 중력식 퇴적물 주상시료 채취기(gravity corer)로 채취하여 실험실에서 측정된 결과는 시료의 교란에 의하여 약 20% 오차를 갖는 것으로 보고되어 있다(Lee, 1980). 따라서 기계적인 교란(mechanical disturbance)을 받지 않은 시료의 채취는 해양 퇴적물의 지질공학적 특성 연구를 위하여 가장 중요한 작업이다(Hargerty, 1974; Lee, 1985). 본 연구에서는 8개의 주상시료(직경 10 cm, 길이 60 cm)를 동시에 채취하는 다중 주상시료 채취기(multiple corer)를 이용하였다. 이는 윈치 와이어에 연결하여 사용하는 채취기(wire-bound sampler)로서 주로 심해(수심 2,000 m 이상) 퇴적물의 지질학적, 생물학적 연구 목적의 시료채취를 위해 고안되었으며, 타 장비에 비하여 채취시 기계적인 퇴적물 교란작용이 적어 양질의 퇴적물이 채취된다(Barnett *et al.*, 1984). 채취관의 뚜껑은 퇴적물이 채취된 후 밀봉되어 퇴적물-해수간 접촉면이 교란되지 않고 안전하게 유지될 수 있도록 하므로 시료가 선상으로 회수될 때까지 퇴적물 시료는 교란되지 않고 회수된다. 또한 동시에 8개 시료가 채취되므로 동일한 지점과 깊이에서 반복실험이 가능한 장점이 있고, 따라서 표층퇴적물의 지질공학적 특성 연구에도 가장 적합한 채취기이다(Barnett *et al.*, 1984). 북동태평양 클라리온-클리퍼튼 균열대 지역(Clarion-Clipperton fracture zone; C-C 지역) 남서부에 위치한 연구지역(Fig. 1)의 15개 정점에서 투명 PVC 관에 채취된 퇴적물 시료 중 2~3개를 선택하여 한 코어 내 동일한 깊이의 2~4 지점(Fig. 2)에서 반복하여 전단강도를 측정하였다. 선상 전단강도 측정은 시료를 채취한 채취기가 선상에 도착한 후 즉시 측정하였고, 실험실에서의 반복실험을 위하여 채취한 분석용 코어 시료들은 PVC 관의 양끝을 막고 방수테이프로 감아 공극수가 새어 나오지 않고 건조되지 않도록 밀봉하였다. 밀봉된 시료는 조사선의 진동을 극소화하기 위하여 바닥 면에 완충장치를 하고 수직으로 세워 냉장실(4°C)에 보관 후 실험실로 운반하였다.

### 측정기기 및 방법

세립질 해저퇴적물의 전단강도 측정을 위한 배인 측정기는 토

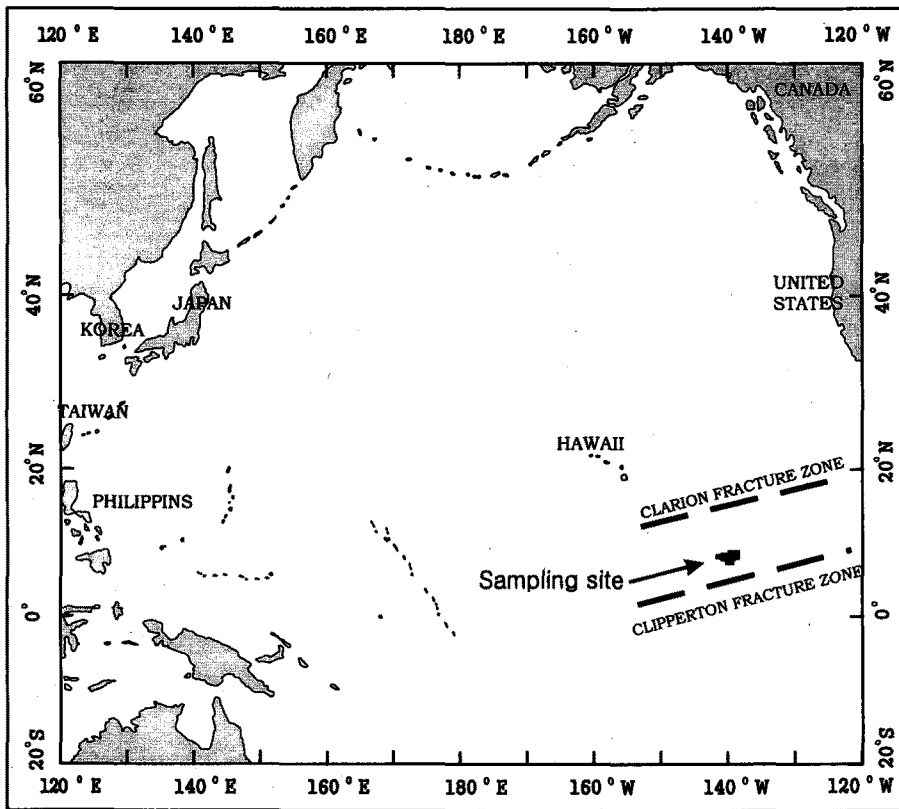


Fig. 1. Location map of sampling sites.

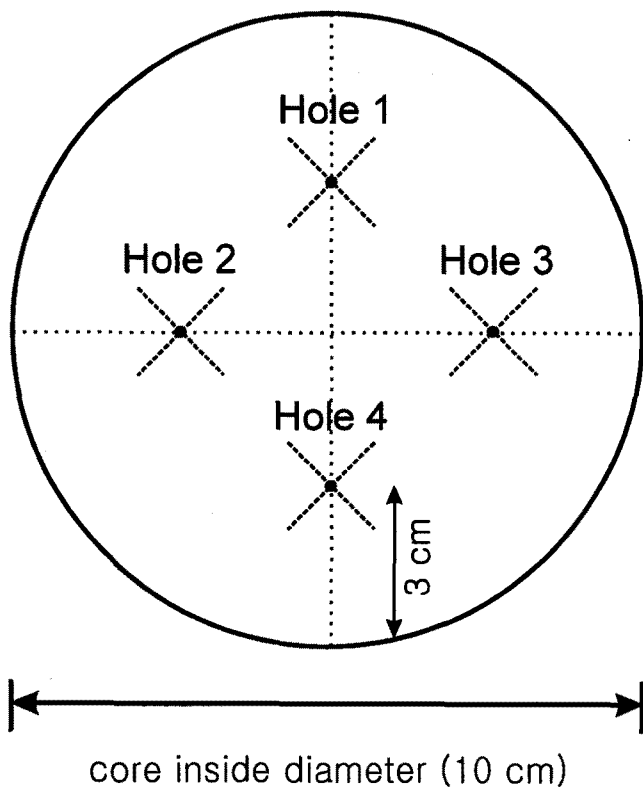


Fig. 2. Positions of vane shear testing holes in a core section.

크감지기(torque sensor)의 구성이 정량화된 스프링(calibrated soft torsional spring)을 이용하는 것과 전자 토크셀(electronic

torque cell)을 이용하는 것으로 구분된다. 측정에 이용된 2FD형 수동배인 전단강도 측정기는 배인이 연결대(stainless steel shaft)에 부착되어 있으며, 정량화된 스프링 장치(calibrated spring units)가 내장된 토크 나사 돌리개(torque screw driver)로 구성되어 있다. 최대 토크는 2 kgf/cm<sup>2</sup>이며, 원 장비의 배인 규격은 직경 2 cm, 높이 4 cm로 최대 측정한계는 6.69 kPa로 비교적 고화된 심해저 퇴적물의 측정에는 용량이 부족하여 직경 2 cm, 높이 2 cm의 날을 제작·사용하였다. 이때 최대 측정한계는 11.70 kPa, 최소 측정 한계는 0.29 kPa이다.

전동배인은 독일 Haake사에서 제작된 기본 장치 RV 30, 측정기 M5로서 배인의 규격은 직경 1.0 cm, 높이 0.88 cm로 제작·사용하였다. 개인용 컴퓨터에서 작동 명령을 내리면 토크 변환기(torque transducer)는 명령된 속도로 회전을 시작하여 토크를 감지·측정하며, 측정된 토크 값을 저장하게 된다. 최대 측정 한계는 25.71 kPa, 최소 측정 한계는 0.01 kPa다. 30°/min (0.0167 rad/sec)의 회전속도로 측정하였으며, 측정깊이는 표층에서 내려가면서 1~2 cm 간격으로 측정하였다. 각 측정 지점별 측정 시간은 12분으로 하였다. 1회 측정시간 동안 얻어지는 토크의 값은 720개로, 초당 1개의 자료가 획득되었다(Fig. 3). 배인의 회전이 측정시간(12분) 동안 균일한 속도로 회전하며, 회전과 동시에 측정자료를 변환기가 감지·기록하기 시작하므로 30°/min의 느린 회전 속도로 측정하더라도 모두 60초 이내에 최대전단강도(maximum shear strength)가 측정된다(Fig. 3). 일반적으로 전단시험은 최대전단강도를 구하는 것을 목적으로 한다. 전단 시험에서 전단저항이 최대값(전단강도)을 넘어서 점차 낮아져 궁극적인 정상전단(steady shear) 상태에 도달할 때의 값을 잔류전

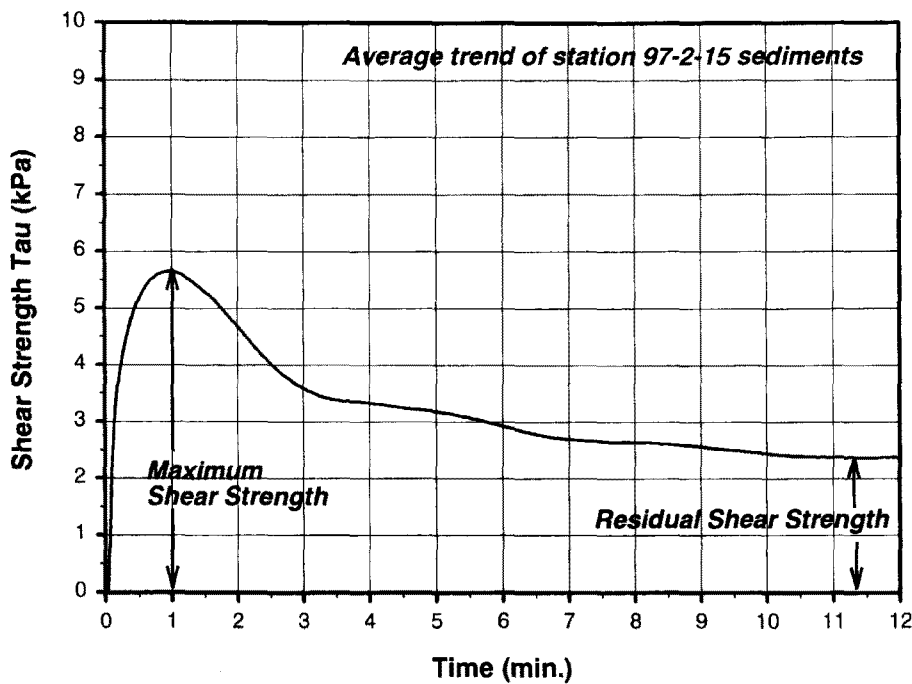


Fig. 3. A chart of shear strength measured by motorized vane vs. measuring time. Note maximum and residual shear strengths marked in the figure.

Table 1. Apparatuses for the measurement of vane shear strength in marine sediments, rotation speeds (shear rates), and their users

No.	Apparatus	User and Reference	Vane Size (D×H, cm)	Rotation Rate (°/min)
1	Diver-held vane shear apparatus	Dill and Moore, 1965	1.91×1.91	-
2	Lockheed hand-held vane	Simson <i>et al.</i> , 1977	2.50×2.50	approximately 180
3	Potable hand-held vane	①Tsurusaki & Hirota, 1977 ②Lee <i>et al.</i> , 1987	①: 2.00×4.00 ②: 2.00×4.00	①: 720 ②: 60
4	Miniature hand vane	Chassefiere & Monaco, 1987	unknown	approximately 6
5	Pilcon hand vane tester	Chassefiere & Monaco, 1987	unknown	approximately 6
6	Diversified Marine Corporation(D.M.C.) motorized vane system	Simson <i>et al.</i> , 1977	1.25×1.25	48
7	Motorized miniature vane shear a. calibrated spring units b. electrical torque transducer	ASTM, 1980	1.27×1.27 1.27×2.54 2.54×2.54	60~90
8	Wykeham-Farrance motorized vane-shear apparatus	① Kravitz, 1970 ② Monney, 1974 ③ Johnson <i>et al.</i> , 1977 ④ Keller and Lambert, 1979 ⑤ Lambert <i>et al.</i> , 1980 ⑥ Busch and Keller, 1981 ⑦ Reasoner & Hein, 1984 ⑧ Hein, 1985 ⑨ Lambert <i>et al.</i> , 1985 ⑩ Chassefiere & Monaco, 1987	①: 1.301.90 ②, ⑧: 1.25×1.25 ③: 2.50×2.50 ④, ⑩: unknown ⑤, ⑦: 1.27×1.27 ⑥, ⑨: 1.27×2.54 ⑥: 1.20×1.90	①, ②, ④, ⑩: 6 ③: 23 ⑤, ⑥: 60 ⑦: 90 ⑧: 1, 90 ⑨: 70
9	U. S. Naval Civil Engineering Laboratory(NCEL) miniature vane shear device	① Inderbitzen, 1970 ② Lee, 1971 ③ Rocker, 1972 ④ Noorany, 1985	①: unknown ②, ④: 1.27×1.27 ③: 1.04×1.27 ④: 1.27×2.54 ④: 2.54×2.54	①, ④: 6.0 ②: 83.0 ③: 8.3 ④: 60, 90
10	Motorized vane with electronic torque cell	Baraza <i>et al.</i> , 1990	1.27×1.27	90
11	Haake motorized shear vane	Simson <i>et al.</i> , 1977	1.00×1.00	360
12	Unknown vane-shear apparatus	① Bennett and Keller, 1970 ② Bachan <i>et al.</i> , 1972 ③ Perlow <i>et al.</i> , 1977 ④ Baraza <i>et al.</i> , 1992	①: 1.48×1.48 ②, ③: 1.27×1.27 ④: 1.30×2.54	①: unknown ②: 12 ③: approximately 80 ④: approximately 90

단강도(residual shear strength) 또는 잔류강도라 한다. 본 연구에서도 일정 시간이 경과한 후 나타나는 그래프 상에서 최대 토크를 교란되지 않은 최대전단강도로 하고, 조직이 파괴된 후 토크 값의 변화가 없이 거의 일정한 11~12분 사이의 평균값을 잔류 전단강도로 판단· 측정하였다(Fig. 3). 측정에 이용되는 배인의 크기에 따라 전단강도가 계산되므로 10여 가지의 규격이 이용되고 있으며, 측정기의 토크 용량에 따라서 단단한 시료의 경우 더 작은 크기의 배인을 사용하고 있다. 배인 회전속도는 많이 연구· 토의되었지만 지금까지도 규정된 회전속도는 없다. 보고된 회전속도는 1%/min에서 720%/min 까지 매우 광범위하다(Table 1). 본 연구에서는 전동배인의 회전속도를 문헌 조사에 의존하여 많은 학자들이 가장 선호하는 6%/min과 60~90%/min의 중간 값인 30%/min으로 측정하였으며, 또한 수동배인의 경우는 일반적 측정 속도인 60~90%/min으로 배인을 회전시키기가 현실적으로 어렵기 때문에 주로 약 360%/min 속도로 측정하였다.

**결과 및 토의**

15개 정점에서 채취한 코어시료를 선상에서 수동 및 전동배인을 이용하여 전단강도를 측정한 결과 퇴적물 깊이에 따른 전단강도의 전반적 변화양상은 동일하며, 4개 정점(Sta. 98-2-N12,

N11, N10, N8)에서는 전동 및 수동배인 측정치가 전반적으로 유사하다(Fig. 4). 그러나 대부분 정점에서 특징적으로 10 cm 이하의 깊이에서는 측정치간의 차이가 상부보다 크게 나타난다. 이는 대부분의 시료가 10 cm 까지는 매우 높은 함수율을 가진 균질한 층(homogeneous layer)으로 낮은 전단강도 값을 가지며, 따라서 전단강도 절대값의 차이도 작으나 10 cm 하부는 고화된 층으로 높은 전단강도 값을 보이고 따라서 전단강도 값의 차이도 크다.

2개 정점(Sta. 98-2-N6, N5)에서는 수동배인의 측정치가 약간 높게 측정된 반면 4개 정점(Sta. 98-2-N9, N7, G8, G6)에서는 전동배인의 측정치가 높다(Fig. 4). 또한 대부분 정점에서 깊이에 따른 측정값 변화는 전동배인으로 측정된 값이 수동배인 보다 민감하게 나타나 변화 폭이 크다. 따라서 전체적으로 두 가지 측정장비에 따른 측정치의 유의한 차이를 보인다고 하기는 어렵다.

국제적으로 발표된 전단강도 측정치는 배인의 회전속도(vane shear rate)를 명시하고 있다. 많은 학자들은 매우 느린 회전속도인 6%/min이 정밀한 속도이며(Bennett *et al.*, 1980), 많은 시료를 처리하기 위해서는 90%/min으로 측정하는 것이 타당하다고(Hagerty, 1974; Monney 1974) 보고하였다. 따라서 현재 널리 사용되는 회전속도는 2가지로 빠른 회전 속도인 60~90%/min와 느린 회전속도인 6%/min이다(Table 1). 또한 점토질 퇴적물과 같

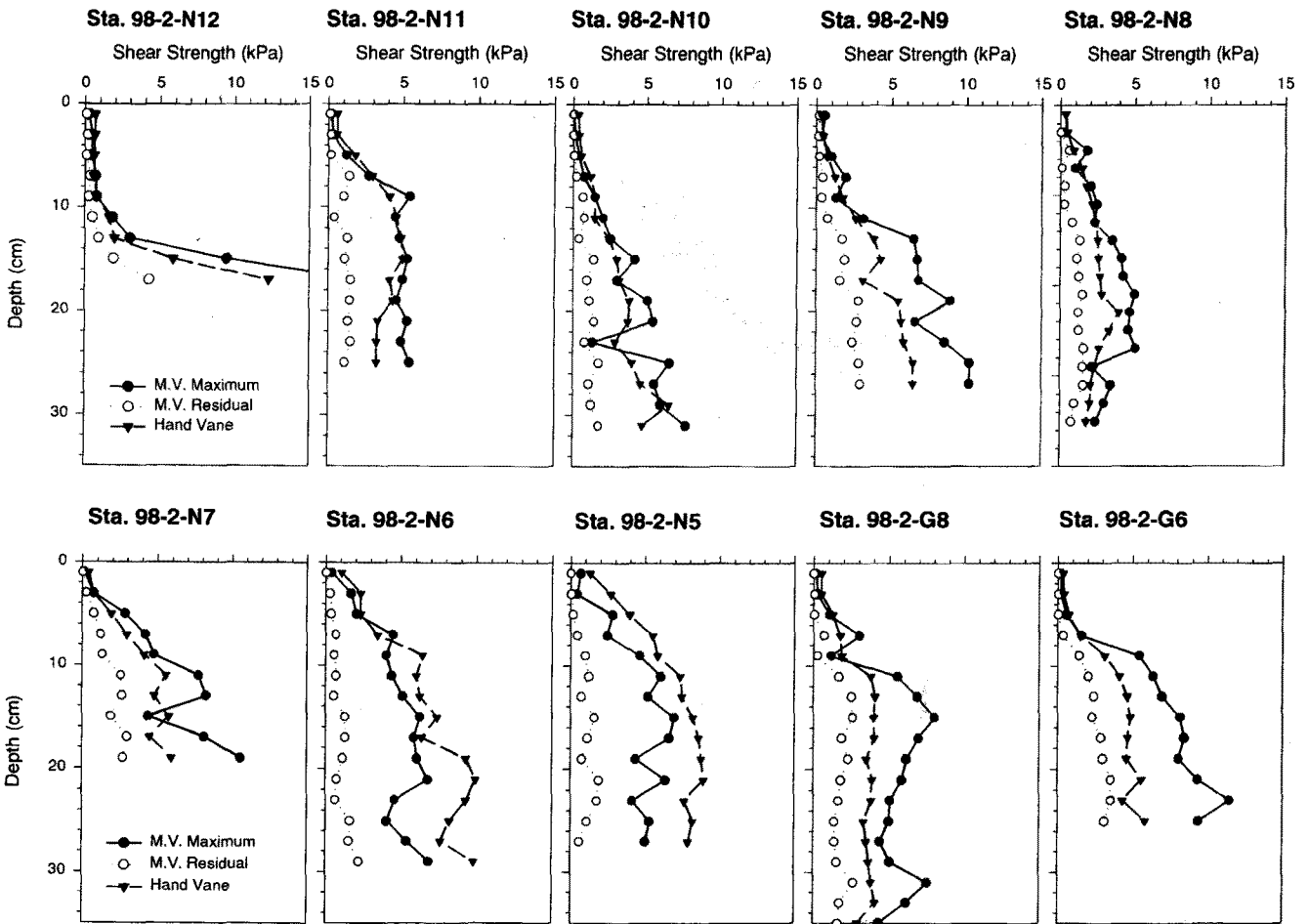
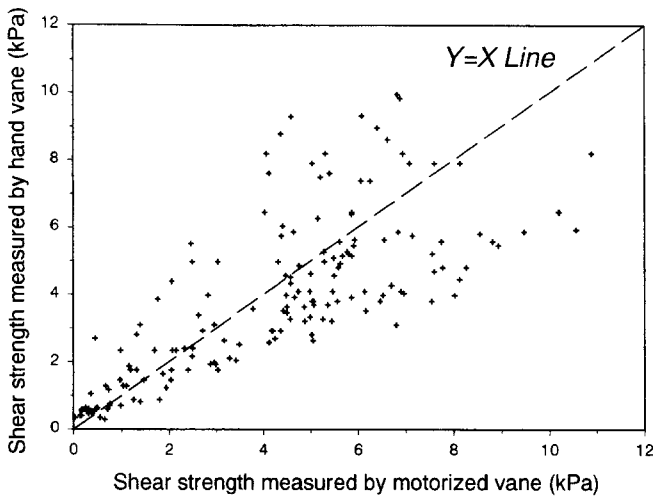


Fig. 4. Depth profiles of shear strength measured on board by hand-held vane and motorized vane. MV: motorized vane; Sta.: station.

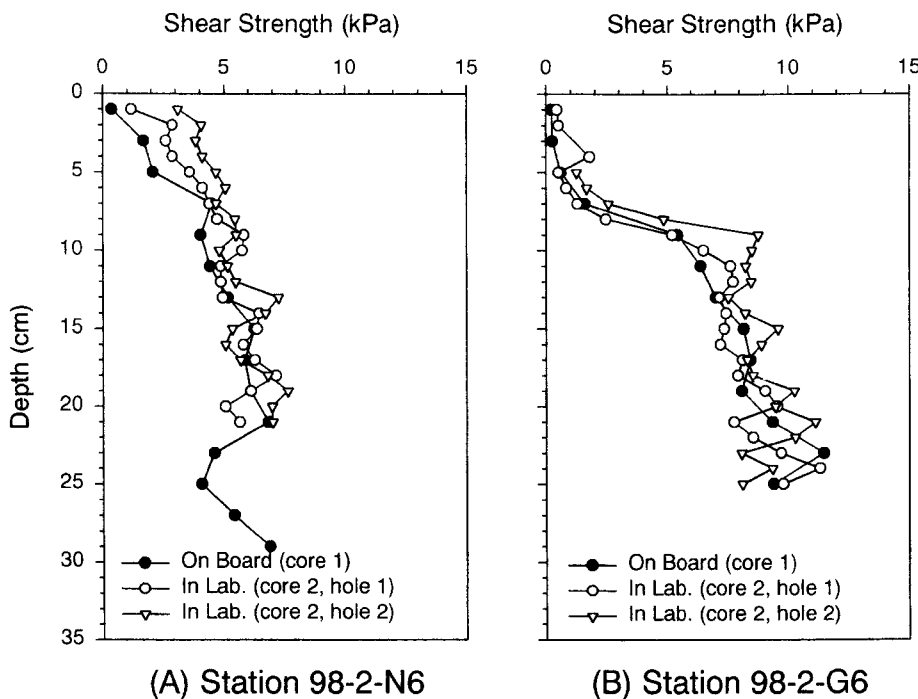


**Fig. 5.** A relationship between shear strength data measured by motorized vane (shear rate; 30/min) and hand vane (shear rate; 360/min) in KODOS cores. Note the large and non-systematic difference between the values measured by two different vanes for each sample.

이 연성 퇴적물은 일반적으로 배인의 회전속도가 빠르면 전단강도가 높게 나타나는 것으로 보고되어 있다. 기존 연구에 따르면 20%/min의 속도로 측정된 값에 비하여 79%/min은 약 27% 높게 측정되었으며 (Bennett *et al.*, 1980), Monney (1971, 1974)는 6%/min과 90%/min의 속도로 측정시 20~30% 가량의 차이가 발생함을 보고했다. 또한 Lee (1971)는 6%/min과 83%/min의 속도 차에 대한 차이를 약 10% 정도로 보고하였다. 그러나 본 연구 지역의 퇴적물에서는 약 360%/min으로 측정된 수동배인 전단강도를 30%/min으로 측정된 전동배인 전단강도와 비교하고자 하였으나 분산이 심하게 나타나며 회전속도에 따른 전단강도의 증가·감소 양상은 관찰하기 어려웠다 (Fig. 5).

전동배인으로 동일시료를 선상에서 시료를 채취한 즉시 측정 한 결과와 냉장고에 3개월 보관 후 실험실에서 측정 한 결과도 비교하였다. 하부로 가면서 전단강도는 동일한 증가 양상을 보이고, 두 측정치간 유의한 차이를 발견하기는 어렵다 (Fig. 6). 일반적으로 퇴적물 전단강도는 퇴적물 구성입자 내 공극수의 압력 감소에 따라 퇴적물 입자들이 분리되어 한정된 공간 내에서 입자간의 응력을 증가시키므로 결과적으로 전단강도가 증가되며, 반대로 공극수의 압력이 증가한다면 분리된 입자들이 서로 결합하게 되므로 전단 강도는 감소하게 된다 (Craig, 1979; Monney, 1974). 따라서 평균 수심 5,000 m인 심해저 면에서는 500 기압의 압력이 가해져 있으므로 심해저면 현장 (in-situ)에서의 전단강도 또는 이와 유사한 값을 보이는 선상 전단강도는 3개월 후 실험실에서 측정된 값보다 적을 가능성이 있다 (Keller and Bennett, 1970; Lee, 1974, 1980). 그리고 육상 실험실 측정을 위해 냉장고에 보관, 운반하는 과정에서 조사선의 진동 등에 따른 퇴적물 조직이 변화될 수 있으므로 전단강도가 변화 될 수 있다 (Craig 1979). 그러나 본 연구에서는 선상 측정치나 3개월 후 실험실 측정치가 큰 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다 (Fig. 6). 이러한 결과는 보관상태가 양호한 경우 약 7개월 후에 측정 한 자료도 선상에서 측정 한 자료와 유사한 측정값을 나타낸다고 주장한 Hagerty (1974)의 보고로 뒷받침된다. 따라서 앞에서 기술된 요인의 차이보다는 측정시 인위적 요인 또는 다른 요인에 의해 코어별 전단강도 차이가 조절되는 것으로 생각된다.

한편, 하나의 코어시료에서 전동배인으로 4회 반복하여 전단강도를 측정 한 결과 (Fig. 7), 전반적으로 깊이에 따른 변화양상은 유사하였지만 동일 깊이에서 약 ±3 kPa값의 차이를 보인다. 특히 Sta. 97-2-5에서는 이러한 변화의 폭이 다른 정점에 비해 크게 나타나 최대 10 kPa 값의 차이가 나타난다. 이러한 차이는 하나의 코어시료에서도 부위마다 다른 물성의 차이 때문으로 생



**Fig. 6.** Depth profiles of shear strength measured on board and in laboratory using motorized vane in KODOS cores. Profiles measured in different places do not show any consistent variation.

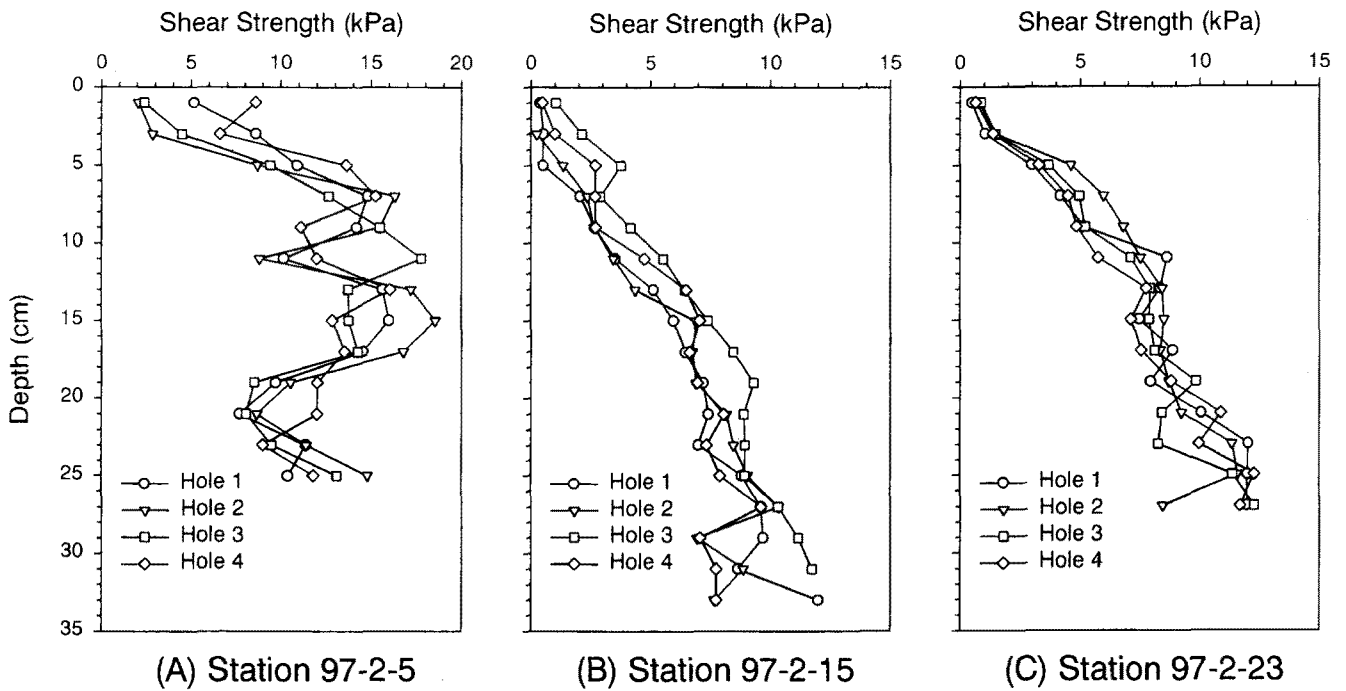


Fig. 7. Depth profiles of shear strengths measured at four different holes from a core using motorized vane in laboratory. Note the gap between the profiles from different holes in a core.

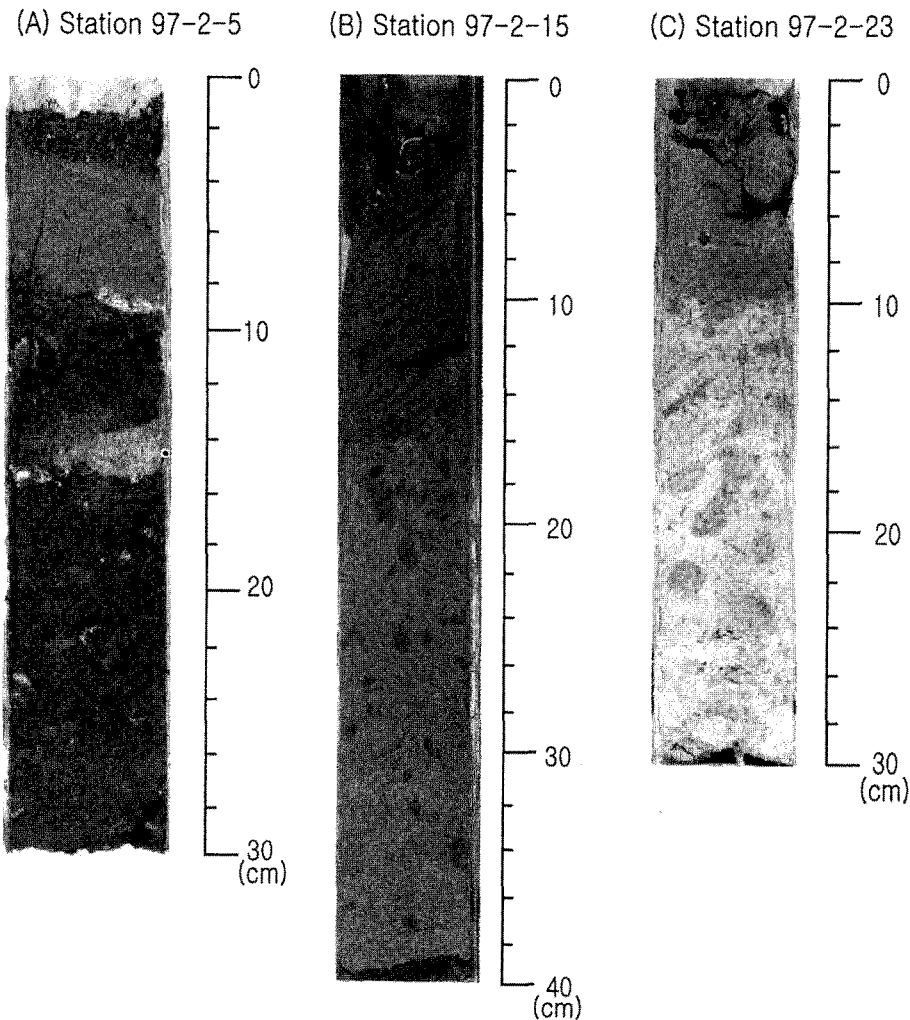
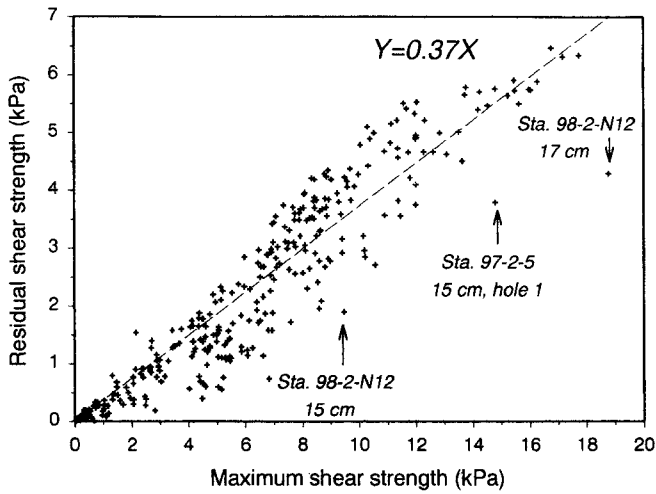


Fig. 8. Photographs showing the highly bioturbated core samples from the KODOS area. Note the scattered bioturbation traces in all cores, calcareous layer at the bright side of 15 cm depth in station 97-2-5, a burrow hole at the left side of about 13 cm depth in station 97-2-15, and another hole at the right side of about 6 cm depth in station 97-2-23. The upper surfaces of the cores were disturbed during the removal of manganese nodules and measuring vane shear strengths.



**Fig. 9.** A relationship between residual and maximum shear strengths in sediments from the KODOS area. Scattered data marked in the figure are likely due to the different sediment facies from surrounding sediments in a core (see text).

각되는데 코어를 깊이별로 절개 할 때 나타난 각 퇴적층간의 경계면 들이 수평을 이루지 않고 경사져있으며, 또한 국부적인 생물교란에 의한 흔적, 즉, 반점(mottle)과 구멍(burrow), 국부적으로 고화된 물질(consolidated material)과 탄산질 퇴적물의 존재 등 깊이별 코어시료의 육안 특성차이가 이러한 가능성을 뒷받침한다(Fig. 7, 8).

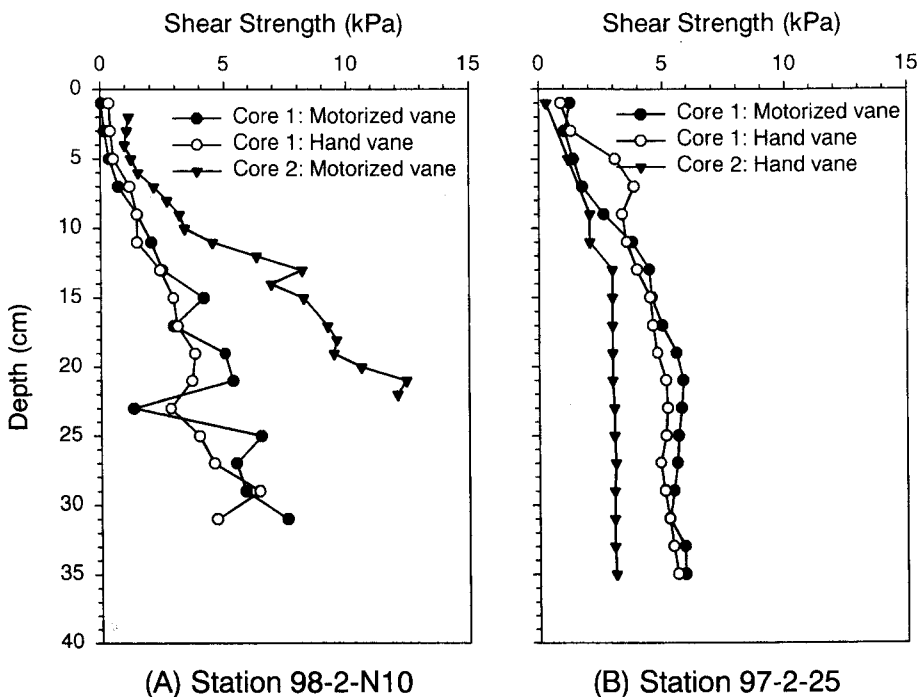
심해저 퇴적물은 다양한 퇴적과정을 거쳐 쌓이므로 넓은 범위의 전단강도를 가지며 퇴적상(sediment facies)의 변화에 따라 지질공학적 특성도 큰 변화를 보인다(Bennett *et al.*, 1980). 사진에 나타난 바와 같이 Sta. 97-2-5 코어의 15 cm 깊이와 Sta. 98-2-N12 코어의 하부에서도 탄산염 퇴적물이 나타난다(해양수

산부, 1998). 이러한 탄산질 퇴적물의 전단강도는 다른 퇴적물에 비하여 높은 변화량을 보이고(Bennett *et al.*, 1980). 탄산질의 함량 증가에 따라 전단강도도 급격히 증가한다(Kenter and Schlager, 1989). 이들 탄산질 퇴적물은 Marquesas 층과 같이 오래된 에오신(Eocene) 시기의 고기층으로(해양수산부, 1998) Sta. 98-2-N5, N6에서 나타나는 비교적 낮은 전단강도 값(Fig. 4)의 현생 탄산질 퇴적물과는 구분된다(해양수산부, 1998).

한편, 북위 5~6° 지역은 수심 4,084~4,200 m 지역으로 이 지역의 탄산염 보상심도(CCD)인 4,400 m(Piper *et al.*, 1979) 보다 수심이 얕은 지역이며, 수층 생산성이 높으므로 퇴적되는 입자들의 퇴적속도가 10-30 mm/yr.로 매우 높고(Kennett, 1982) 또한 이 지역 표층퇴적물은 현생의 제 4기 상부 퇴적물(해양수산부, 1998)로 고기 탄산질 퇴적물보다는 덜 고화되어 탄산질 퇴적물임에도 불구하고 고기 탄산질 퇴적물과는 달리 전단강도가 낮다.

전동배인으로 측정된 사면활동 등의 안정해석에 필요한 중요한 특성인 잔류전단강도 값은 최대전단강도의 평균 37.2%로 변화양상은 최대전단강도의 변화와 동일하게 나타난다(Fig. 9). 그림 상에 화살표로 표시된 값들은 최대전단강도가 잔류전단강도에 비하여 훨씬 큰 값들이다. 이러한 값들의 의미는 퇴적물이 매우 고화되어 있음을 의미하거나 또는 퇴적상이 주변 퇴적물과 확연히 다름을 시사한다. 특히, Sta. 98-2-N12는 퇴적층 중간에 협재된 고기 탄산질 퇴적물(해양수산부, 1998)로 이러한 생각을 뒷받침한다.

위와 같이 하나의 코어 내에서 시대에 따른 퇴적상 변화 및 이에 따른 측정 지점별 전단강도 차이가 나타남은 물론이고, 한정점 내에서도 전단강도의 차이가 빈번히 나타난다(Fig. 10). 이 시료들은 다중주상시료 채취기로 채취된 8개의 코어시료 중 2개를 취하여 각각 동일한 장비로 측정된 값으로 시료간 측정값이



**Fig. 10.** Comparison of depth profiles of shear strength measured in two different core sample tubes in a station. Note the large difference between the values from different tubes.



현저히 다르다. 이러한 차이는 앞에서 설명한 바와 같이 한 코어 시료에서 수동베인과 전동베인으로 측정된 값의 차이보다 월등히 큰 차이이다. 이러한 차이는 코어시료 1개 내에서의 깊이에 따른 물성변화는 물론이고(Fig. 7) 나아가 동일한 정점에서도 그 값의 차이가 더 커질 수도 있음을 나타낸다. 상부퇴적물(10~20 cm)에서 저서생물의 활동은 전단강도의 증감을 일으키는 것으로 알려져 있다(Lambert *et al.*, 1985). 퇴적물 내에 사는 저서생물들은 입자들을 뭉치게 하는 효과(cementing effect)가 있으며, 반대로 교란작용은 퇴적물 전단강도를 감소시키기도 한다. 즉, 태평양 C-C지역 한 지점 나아가 한 정점 내의 연성 심해저 퇴적물에서 깊이에 따른 전단강도 변화 양상은 한 코어시료 내 측정 지점 또는 한 정점 내 시료채취 위치에 따라 나타나는 변화 폭이 베인의 회전 속도차이, 선상과 실험실에서 이루어진 채취된 후 수개월간의 보관에 의한 변화에 따른 차이 등에 의한 변화 폭 보다는 훨씬 큼을 알 수 있다. 동일 코어내의 동일 깊이에서도 관찰되는 퇴적물의 생교란작용에 의한 물성차이가 깊이에 따른 전단강도의 변화를 조절하는 주된 요인으로 판단된다.

## 결 론

수동베인(shear rate; 약 360 %/min)과 전동베인(shear rate; 30 %/min)을 이용하여 선상에서 전단강도를 측정된 결과, 코어 시료의 깊이에 따른 변화양상은 거의 동일한 결과를 보인다. 그리고 전동베인으로 선상에서 측정된 값과 3개월 후 실험실에서 측정된 값 또한 거의 유사하게 나타났다. 한편, 한 코어시료에서 전동베인으로 4회 반복 측정된 결과, 깊이에 따른 전반적인 변화 양상은 유사하지만 동일 깊이에서 측정 지점(hole) 별로 전단강도 값의 차이(3~10 kPa)가 나타났다. 또한 한 정점에서 채취된 8개의 코어시료 중 2개를 선정하여 깊이에 따른 전단강도 변화를 측정된 결과 그 값의 차이가 현저하였다. 이러한 결과로 판단할 때 태평양 C-C 지역 한 정점의 연성 심해저 퇴적물에서 깊이에 따른 전단강도 변화 양상은 상당한 변화 폭을 지니고 있으며, 또한 한 코어시료 내에서도 전단강도 측정 지점에 따른 변화 폭이 베인의 회전 속도차이 또는 선상과 실험실에서 이루어진 채취된 후 수개월간의 보관에 따른 차이 등에 의한 영향보다는 훨씬 큼을 알 수 있다. 이러한 차이의 원인은 심해저면의 시·공간적 퇴적작용이 일정치 않았으며, 재동작용(reworking)과 재퇴적과정(resedimentation) 그리고 생물교란 작용에 따라 국부적 퇴적상 및 퇴적물 물성이 변화했기 때문으로 사료된다.

## 감사의 글

분석과정에서 도움을 주신 한국해양연구소 심해저 연구센터 연구원 여러분과 시료채취를 도와주신 온누리호 승조원 여러분께 감사드립니다. 그리고 세밀한 심사와 교정에 귀중한 시간을 내주신 두 분의 심사위원께 깊이 감사드립니다. 본 연구는 '97, '98 심해저광물자원 탐사사업(해양수산부)과 심해저 광물자원 개발기술 및 환경보전 연구 2단계(과학기술처) 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 해양수산부, 1998. 심해저 광물자원 탐사 보고서. 1권, BSPM 98001-01-1117-7, 1209 pp.
- Arman, A., J.K. Poplin and N. Ahmad, 1975. Study of the vane shear. In: Proceedings of the conference on In-situ measurement of soil properties. edited by America Society of Civil Engineers. 1: 93-120.
- Almagor, G., 1982. Marine geotechnical studies at continental margins: a review-Part I, *Applied Ocean Res.* 1982, 4: 92-98.
- ASTM, 1980. Annual book of ASTM standards, part 19, natural building stones: Soil and rocks. American Society for Testing Materials, Philadelphia, 632 pp.
- Bachan S., D.M. McCann and D.T. Smith, 1972. Relations between the acoustic and geotechnical properties of marine sediments. *Jl Engng Geol.* 5: 265-284.
- 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.
- Barnett, P.R.O., J. Watson and D. Connelly, 1984. A multiple corer for taking virtually undisturbed samples from shelf, bathyal and abyssal sediments. *Oceanol. Acta*, 7: 399-408.
- Baraza, J., Lee, H.J., Kayen, R.E. and M.A. Hampton, 1990. Geotechnical characteristics and slope stability on the Ebro margin, western Mediterranean. *Mar. Geol.*, 95: 379-393.
- 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-marine Letters*, 12: 150-156.
- Bennett, R.H. and G.H. Keeler, 1970. Mass property variability in three closely spaced deep-sea sediment cores. *J. Sedi. Petrol.*, 40: 1038-1043.
- 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.
- Busch, W.H. and G.H. Keller, 1981. The physical properties of Peru-Chile continental margin sediments-The influence of coastal upwelling on sediment properties. *J. Sed. Petrol.*, 51: 0705-0719.
- Chassefiere, B. and A. Monaco, 1987. Geotechnical properties and sedimentological processes of the Rhone continental margin. *Mar. Geol.*, 74: 225-235.
- Craig, J.D. 1979. Geological investigation of the equatorial north Pacific seafloor: a discussion of sediment redistribution. In: Marinegeology and oceanography of the Pacific manganese nodule province. edited by Bischoff, J.L. and D.Z. Piper. Plenum Press, New York, pp. 529-557.
- Dill, R.E. and D.G. Moore, 1965. A Diver held vane-shear apparatus. *Mar. Geol.*, 3: 323-327.
- Fuller J.T., 1975. Behavior of Mechanical Elements in submerged clays of lower shear strength, Off. Tech. Conf., No. OTC2242, Dallas.
- Hagerty, R., 1974. Usefulness of spade cores for geotechnical studies and some results from the northeast Pacific. In: Deep-Sea Sediments: physical and mechanical properties. edited by Inderbitzen,

- A.L., Plenum Press, New York, 169–186 pp.
- Hein, F.J., 1985. Fine-grained slope and basin deposits, California continental borderland: Facies, depositional mechanisms and geotechnical properties. *Mar. Geol.*, **67**: 237–262.
- Hirst, T.J. and A.F. Richird 1975. Analysis of deep-sea nodule mining-seafloor interaction, Off. Tech. Conf., No. OTC2241, Dallas.
- Inderbitzen, A.L., 1970. Empirical relationships between massphysical properties for recent marine sediments off Southern California. *Mar. Geol.*, **9**: 311–329.
- Johnson, T.C., E.L. Hamilton and W.H. Berger, 1977. Physical properties of calcareous ooze: control by dissolution at depth. *Mar. Geol.*, **24**: 259–277.
- Keller, G.H. and R.H. Bennett, 1970. Variation in the mass physical properties of selected submarine sediments. *Mar. Geol.*, **9**: 215–223.
- Keller, G.H. and D.N. Lambert, 1979. Variation of sediment geotechnical properties between the Greater Antill Outer Ridge and the Nares Abyssal Plain. *Mar. Geotechnol.*, **4**: 125–143.
- Kenter, J.A.M. and W. Schlager 1989. A comparison of Shear Strength in calcareous and siliciclastic marine sediments. *Mar. Geol.*, **88**: 145–152.
- Kennet J.P., 1982. Marine geology. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., 813 pp.
- Kravitz, J.H., 1970. Repeatability of three instruments used to determine the undrained shear strength of extremely weak, saturated, cohesive sediments. *J. Sed. Petrol.*, **40**: 1026–1037.
- Lambert, D.N., Bennett R.H., Sawyer W.B. and G.H. Keller 1980. Geotechnical properties of continental upper rise sediments-Veatch Canyon to Cape Hatters. *Mar. Geotechnol.*, **4**: 281–306.
- 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.
- Lee, H.J., 1971. Measurements and estimates of engineering and other physical properties, Leg 19. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, **19**: 701–719.
- Lee, H.J., 1974. The roll of laboratory testing in the determination of deep-sea sediment engineering properties, In: Deep-Sea sediments: physical and mechanical properties. edited by Inderbitzen, A.L., Plenum Press, New York, pp. 111–127.
- Lee, H.J., 1980. Offshore soil sampling and geotechnical parameter determination. *J. Petrol. Technol.*, pp. 891–898.
- Lee, H.J., 1985. State of the art: Laboratory Determination of the Strength of marine soils, Strength testing of marine sediments and In-situ measurements, ASTM STP 883, R.C. Chaney and K.R. Demars, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 181–250.
- Lee, H.J., S.K. Chough, K.S. Jeong and S.J. Han, 1987. Geotechnical properties of sediment cores from Southeastern Yellow Sea: Effects of depositional process. *Mar. Geotechnol.* **7**: 37–52.
- Monney N.T., 1971. The Engineering Properties of Marine Sediments. *Mar. Technol. Soc.*, **5**: 21–30.
- Monney N.T., 1974. An analysis of the vane shear test at varying rates of shear. In: Deep-Sea sediments: physical and mechanical properties. edited by Inderbitzen, A.L., Plenum Press, New York, pp. 151–167.
- Moore, D.G., 1962. Bearing strength and other physical properties of some shallow and deep-sea sediments from the North Pacific. *Geolog. Soc. America Bull.* **73**: 1163–1166.
- Noorany, I., 1985. Laboratory determination of soil properties. In: Handbook for Marine Geotechnical Engineering. edited by Karl R. Jr., Naval Civil Engineering Laboratory Port Hueneme, pp. 3/1–3/19.
- 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. In: Marine Geology and Oceanography of the Pacific Manganese Nodule Province. edited by Bischoff, J.L. and D.Z. Piper, Plenum Press, New York, 309–348 pp.
- Perlow, M. and A.F. Richards, 1977. Influence of shear velocity on vane shear strength, Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of civil Engineer Proceedings, pp. 19–32.
- Reasoner, M.A. and F.J. Hein, 1974. Sedimentology and geotechnical properties of surficial bottom sediments, Baffin Islands Fjords. In: Syvtski, J.P.M.: HU83–082. Sedimentology of Arctic Fjords Experiment. pp. 11/1–11/4.
- Richards, A.F. and R.C. Chaney, 1981. Present and future geotechnical research needs in deep ocean mining. *Mar. Mining*, **2**: 315–337.
- Rocker, K., 1972. Vane shear strength measurements on Leg 27 sediment. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, **27**: 425–432.
- Simpson, F., C.S. Wallin, H.M. Crawford and P.C. Springer, 1977. Geotechnical properties of NE Pacific sediments from DOMES Sites A, B, and C, In: Deep Ocean Environmental Study: Geology and Geochemistry of DOMES Sites A, B, and C, Equatorial North Pacific, edited by Piper, D.Z., USGS Open-file Rept. 77–788, pp. 351–492.
- Tsurusaki K. and T. Hirota, 1977. Some physical properties of the bottom sediments. In : Deep Sea Mineral Resources Investigation in the Central-Eastern Part of Central Pacific Basin, edited by Mizuno A. and T. Moritani, Geological Survey of Japan Cruise Report No. 8, 125–130 pp.
- Tsurusaki K., Yamazaki, T. and K. Handa, 1994. Geotechnical properties of deep-sea sediments and manganese nodules in the Penrhyn Basin, South Pacific. In : Marine Geology, Geophysics and Manganese Nodule Deposits in the Penrhyn Basin, South Pacific. edited by Usui A., Geological Survey of Japan Cruise Report No. 23, pp. 225–240.

1999년 3월 8일 원고 접수

1999년 8월 16일 수정본 채택