

북동태평양 심해저 퇴적물의 베인전단강도 측정에 관한 연구

지상범*¹ · 박정기¹ · 손승규¹ · 이경용¹ · 이현복¹

¹한국해양연구원 해저환경자원연구본부 심해저자원연구센터

A Study on Vane Shear Strength Measurement of Deep-sea Sediment in the Northeast Equatorial Pacific

Sang-Bum Chi*¹, Cheong-Kee Park¹, Seung-Kyu Son¹, Kyeong-Yong Lee¹ and Hyun-Bok Lee¹

¹Deep-sea Resources Research Center, Korea Ocean Research & Development Institute, Seoul 425-600, Korea

The shear strength of deep-sea core sediments from the northeast equatorial Pacific was measured in various conditions to ensure precision of results. The comparison items were ① two different measuring systems (hand-held vane and motorized vane), ② in different places of on-board immediately after collecting the core samples and on-land laboratories after storing these samples for three months in a cold room, ③ two different core samples from a multiple corer within a sampling station, and ④ four different measuring points (holes) from a core sample. In this experiment, the values of shear strength in deep-sea sediments show significant change with depth which increase toward the bottom of core. Also, the results of two cores recovered at the same station indicate that vertical variation of shear strength is mainly caused by the change of physical properties. They strongly support the fact that the difference of vane system and/or experimental conditions are not major factor in the variation of geotechnical properties.

Key words : vane shear strength, hand-held vane, motorized vane, deep-sea sediment

북동태평양 심해저퇴적물 전단강도 측정의 정확성을 위하여 측정 방법에 따른 전단강도 측정 결과들을 비교하였다. 비교 항목들은 ① 동일한 시료를 두 종류의 베인 전단강도 측정기(수동 베인, 전동 베인)를 이용하여 측정한 결과, ② 시료채취 후 즉시 선상에서 측정한 결과와 3개월 뒤 육상의 실험실에서 측정한 결과, ③ 동일한 정점에서 채취된 두개 시료를 측정한 결과, 그리고 ④ 동일한 코어 내에서 4회 반복 실험한 결과이다. 측정 결과, 전단강도 값은 퇴적깊이에 따라 뚜렷한 변화 양상을 보였다. 또한, 동일한 정점에서 채취한 두개의 코어 퇴적물에 대한 전단강도를 비교한 결과, 두 시료에서 측정된 변화폭이 장비차이에 따른 변화와 보관 조건에 의한 변화보다 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 퇴적 깊이에 따른 전단강도의 변화가 지질공학적 물성변화에 의해 야기되었음을 지시한다.

주요어 : 베인 전단강도, 수동 베인, 전동 베인, 심해저퇴적물

1. 서 론

해양 퇴적물의 전단강도는 퇴적입자들 사이의 전자 기계적 힘(electromechanical force) 즉, 점착력(cohesive bond)과 함수율, 그리고 입자들 사이의 화학적 응결 결합(precipitate cementation)에 의해 결정되며(Fuller, 1975; Jonson *et al.*, 1977), 퇴적물의 지질공학적 특성을 설명하는 가장 중요한 항목이다(Grupe *et al.*, 2001).

심해저 퇴적물의 전단강도 특성은 해저면 위에서 단괴를 대량으로 채취하게 될 채광장비의 설계 및 운영에 필수 요건으로 고려되어야한다(Hirst and Richard, 1975; Tsurusaki and Hirota, 1977; Richard and Chaney, 1981; Tsurusaki *et al.*, 1994). 해저퇴적물이 연성인 경우, 표층 퇴적물의 특성은 채광기의 크기, 중량, 그리고 마력수를 고려할 때, 안전성과 이동성에 상당한 제약을 주게 된다(Noorany and Fuller, 1982). 따라서

*Corresponding author: sbchi@kordi.re.kr

퇴적물의 전단강도 특성에 관한 자료의 신뢰도는 매우 중요하지만(Hirst and Richards, 1975; Tisort, 1981; Thetis, 1992), 아직도 국제적으로 인정된 표준화된 측정 방법이 없다(Grupe *et al.*, 1994; Oebius, 1998).

심해저 퇴적물과 같이 액성한계보다 높은 함수율을 갖는 연성 세립질 퇴적물의 전단강도 측정은 베인(vane) 측정기를 사용하는 것이 적합하다(Craig, 1979; Dill and Moore, 1965; Johnson *et al.*, 1977; Monney, 1974). 그러나 사용하는 장비는 정량화된 스프링을 이용하는 장비와 전자토크변환기를 이용하는 장비 등 여러가지 장비를 이용하고 있으며, 국제적으로 보고되는 베인의 규격(D×H, cm) 또한 2.5×2.5에서 1.04×1.27까지 약 20가지 종류가 이용되고 있다(과학기술처, 1998).

특히, 베인의 회전속도(vane shear rate)는 전단강도 측정치에 많은 영향을 미침(Lee, 1971; Monney, 1971, 1974; Bennett *et al.*, 1980)에도 불구하고 1°/min.에서 720°/min. 까지 약 20가지 회전속도를 이용하고 있다(과학기술처, 1998). 따라서 지금까지 전단강도 측정은 국제적으로 인정된 표준은 없는 실정이며(Oebius, 1998), 국제적으로 발표되는 논문에는 측정장비, 베인의 규격과 회전속도를 명시하고 있다.

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 측정기의 제작과 한 지점에서 1회의 측정에 소요되는 장시간의 조사선 및 심해잠수정의 사용 등 막대한 비용이 소

모되는 어려운 작업이다(Cochonat *et al.*, 1993). 또한 해저면에서 직접 측정된 전단강도는 교란되지 않은 시료(undisturbed samples)를 실험실에서 측정된 자료와 거의 동일한 것으로 알려져 있다(Keller and Bennett, 1970; Cochonat *et al.*, 1993). 따라서 해저면에서 교란되지 않은 시료를 채취·회수한 후 즉시 선상에서 전단강도를 측정하는 것이 최선책이다(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 시료를 보관하는 동안의 변질 그리고 실험실로 운반하는 도중 발생할 충격 등 또 다른 오차요인을 가지고 있다. 한편, 이러한 전단강도 측정방법에 따른 오차 요인도 있지만, Hargerty(1974)는 동일한 지역의 퇴적물일지라도 측정지점 및 시료채취의 위치에 따라 전단강도 값의 차이가 나타날 수 있다고 제시하였다.

본 연구에서는 심해저퇴적물 전단강도 측정의 정확성을 위하여 측정시기, 측정장비의 종류, 동일 정점 시료에 대한 반복실험 결과를 비교 분석하였다. 즉, 두 종류의 전단강도 측정기(수동베인 및 전동베인)를 이용, 시료채취 후 즉시 선상의 실험실에서 그리고 3개월 뒤 육상의 실험실에서, 또한 동일한 정점의 두 시료와 동일한 코어 내에서 4회 반복 실험한 결과에 대해 고찰하고자 한다.

2. 지역개관

연구지역은 북동태평양 클라리온-클리퍼톤 균열대 내에 위치한 132-131°W, 10-11°N 지역이다(Fig. 1). C-C지

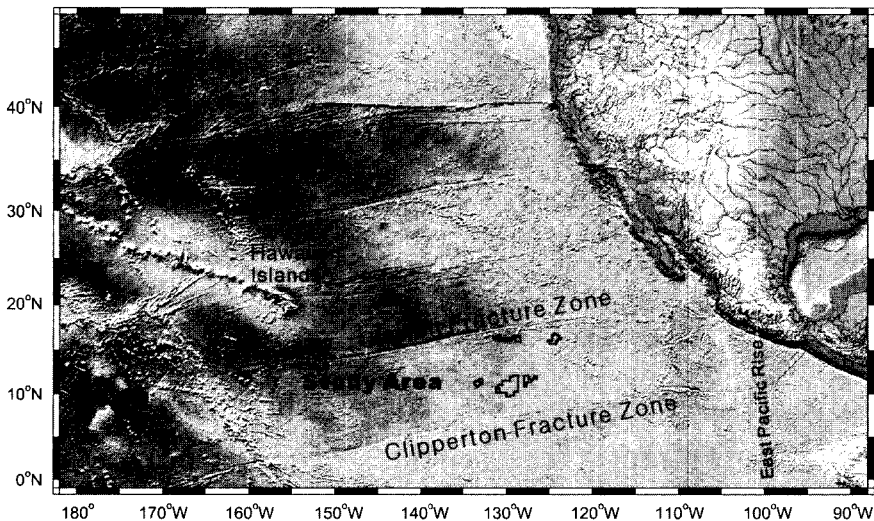


Fig. 1. Locations of studied area in the Clarion-Clipperton fracture zone of the northeast equatorial Pacific.

역에는 전체적으로 북북서-남남동 방향의 해저구릉이 약 7-10 km의 간격으로 반복적으로 나타나며, 폭은 약 500 m 정도이고, 약 150-300 m 정도의 높이를 보이는 것으로 알려져 있다(van Andel *et al.*, 1975; Craig, 1979). 한편 C-C지역의 퇴적율은 0.1 mm/kyr에서 수 mm/kyr로 다양하다(Piper and Williamson 1977; Muller and Mangini, 1980; 지 등, 2000). 지역적으로 다양한 퇴적율의 변화는 남극저층수(Antarctic Bottom Water)의 흐름에 따른 재퇴적에 의한 차이 때문이다(Johnson and Johnson, 1970; Piper and Blueford, 1982; Skornjakova and Murdmaa, 1992). 클라리온-클리퍼톤 지역에 유입되는 저층해류는 남극저층수(Antarctica Bottom Water)에서 기원된 것으로, 남극저층수가 북상하여 Samoan Passage를 통과한 후, 중앙태평양에서 동쪽으로 이동하여 Line Island Ridge를 이루는 해저산 골들을 따라 가속되어 유입되는 것으로 보고 되어있다(Edmond *et al.*, 1971; Mantyla, 1975; Volet *et al.*, 1980). 이 남극저층수는 C-C지역 심해저 퇴적물의 재이동, 침식, 재퇴적의 원인이 되는 것으로 알려져 있다(Johnson, 1972).

C-C지역 퇴적물의 상부는 간헐적인 강한 해류와 생교란작용에 의해 재퇴적된 것으로 알려져 있다(Jeong *et al.*, 1996; Jung and Lee, 1999). 특히 마이오세-플라이토세 시기에는 저층해류의 영향으로 퇴적물의 혼합과 퇴적층의 침식이 수반되어 다양한 형태의 해저면 및 퇴적결층을 형성하였다(Hayes *et al.*, 1969; Johnson, 1972). 따라서 이러한 불규칙한 특징들은 저층 해류와 지형경사도에 의해 조절되는 퇴적물 침식과 지역적인 이동의 결과로 알려져 있다(van Andel *et al.*, 1975; Piper *et al.*, 1977).

클라리온-클리퍼톤 규원대 중앙부에 위치한 연구지역 표층 퇴적물의 대부분은 매우 높은 함수율, 낮은 투수율, 높은 전단응력을 갖는 소성이 높은 생물기원의 무기질 실트로 구성된 규질 원양성 점토(siliceous pelagic clay)로 분류되며(Richards and Chnaey, 1981), 생물(biogenic), 자생(authigenic) 그리고 육성(terrigenous)기원 퇴적물이 혼재되어 있다(지 등, 2000). 퇴적물 입도조성은 실트와 점토가 우세하고(70-90%) 모래와 실트크기의 입자는 대부분 방산층이나 규조류 잔해 및 자생광물로 이루어져 있다(지 등, 2000; Jung *et al.*, 2001).

3. 시료 및 시험방법

3.1. 시료의 채취

일반적으로 해저 퇴적물을 채취할 때 채취기가 퇴적

물 내로 삽입될 때 발생하는 기계적 눌림(compaction) 작용은 퇴적물의 지질공학적 특성을 변화시키므로(Baltzer *et al.*, 1994) 기계적인 교란(mechanical disturbance)을 받지 않은 시료의 채취는 해양 퇴적물의 지질공학적 특성 연구를 위하여 가장 중요한 작업 중 하나이다(Hargerty, 1974; Lee, 1985). 본 연구에서는 8개의 원주상시료(직경 10cm, 길이 60cm)를 동시에 채취하는 다중 주상시료 채취기(multiple corer)를 이용하였다. 이 장비의 채취관 뚜껑은 퇴적물이 채취된 후 밀봉되어 퇴적물-해수간 접촉면이 교란되지 않고 안전하게 유지될 수 있도록 하므로 시료가 선상으로 회수될 때까지 퇴적물 시료는 교란되지 않고 회수된다(Barnett *et al.*, 1984). 또한 동시에 8개 시료가 채취되므로 동일한 지점과 깊이에서 반복실험이 가능한 장점이 있으므로 연성 표층시료는 퇴적물의 지질공학적 특성 연구에 적합한 채취기이다(Barnett *et al.*, 1984). 시료의 채취는 1997년과 1998년에 한국해양연구원에서 수행한 심해저광물자원 개발사업의 일환으로 조사선 온누리호를 이용하여 이루어졌다. 북동태평양 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 지점에서 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.

3.2. 측정기기 및 방법

베인 전단 시험 기기(vane shear test device)는 스웨덴의 Cadling과 Odenstad가 1950년에 고안하여 발표하였으며(Monney, 1974), 이 측정법은 1960년대 초부터 일반적으로 사용되고 있다(Moore, 1962). 베인 시험기기는 심해저 퇴적물과 같이 연약한 세립질 퇴적물에 대한 전단강도를 측정하기 위하여 이용된다. 교란되지 않은 연성 퇴적물을 채취하더라도 그 시료를 삼축 압축실험이나 일축압축 실험 때문에 공시체로 형성하는 작업이 불가능할 정도로 연약한 시료의 경우에 이용된다. 특히 심해저 퇴적물은 실트와 점토로 구성되어 투수율이 극히 낮기 때문에, 베인을 이용한 측정값은 삼축압축 실험기로 측정된 값과 근사한 것으로

보고되고 있다(Tsurusaki and Hirota, 1977).

세립질 해저퇴적물의 전단강도 측정에 사용되는 베인 측정기는 토크 감지기(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 수동베인 전단강도 측정기는 베인이 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^2 이며, 원 장비의 베인 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.

전동베인은 독일 Haake 사에서 제작된 기본 장치 RV 30, 측정기 M5로서 베인의 규격은 직경 1.0cm, 높이 0.88cm로 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 측정한계는 25.71 kPa, 최소 측정 한계는 0.01 kPa이다. 본 시험에서는 30%/min (0.0167 rad/sec)의 회전속도로 측정하였으며, 측정 깊이는 표층에서 내려가면서 1-2cm 간격으로 측정하였다. 각 측정 지점별 측정 시간은 12분으로 하였다. 1회 측정시간 동안 얻어지는 토크의 값은 720개로, 초당 1개의 자료가 획득되었다(Fig. 2). 베인의 회전이 측정시간(12분) 동안 균일한 속도로 회전하며, 회전과 동시에 측정 자료를 변환기가 감지·기록하기 시작하므로 30%/min의 느린 회전 속도로 측정

하더라도 모두 60초 이내에 최대 전단강도(maximum shear strength)가 측정된다(Fig. 2).

일반적으로 전단시험은 최대 전단강도를 구하는 것을 목적으로 한다. 전단 시험에서 전단저항이 최대값을 넘어서 점차 낮아져 궁극적인 정상전단(steady shear) 상태에 도달할 때의 값을 잔류 전단강도(residual shear strength) 또는 잔류강도라 한다. 본 연구에서도 일정 시간이 경과한 후 나타나는 그래프 상에서 최대 토크를 교란되지 않은 최대 전단강도로 하고, 조적이 파괴된 후 토크 값의 변화가 없이 거의 일정한 11-12분 사이의 평균값을 잔류 전단강도로 판단·측정하였다(Fig. 2). 측정에 이용되는 베인의 크기에 따라 전단강도가 계산되므로 10여 가지의 규격이 이용되고 있으며, 측정기의 토크 용량에 따라서 단단한 시료의 경우 더 작은 크기의 베인을 사용하고 있다. 베인 회전속도는 많이 연구·토의되었지만 지금까지도 규정된 회전속도는 없다. 보고된 회전속도는 1%/min에서 720%/min 까지 매우 광범위하다(과학기술처, 1998). 본 연구에서는 전동베인의 회전속도를 문헌 조사에 의존하여 많은 학자들이 가장 선호하는 6%/min과 60-90%/min의 중간 값인 30%/min으로 측정하였으며, 또한 수동베인의 경우는 일반적 측정 속도인 60-90%/min으로 베인을 회전시키기가 현실적으로 어렵기 때문에 주로 약 360%/min 속도로 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 측정장비에 따른 차이

채취한 원주상시료들을 선상에서 수동 및 전동베인을 이용하여 전단강도를 측정할 결과, 퇴적물 깊이에 따른 전단강도의 전반적 변화 양상은 모든 시료에서 유사하다(Fig. 3). 그러나 대부분 정점에서 10 cm 이하의 깊이에서는 측정시간의 차이가 상부보다 크게 나타난다. 이는 대부분의 시료가 10 cm 까지는 매우 높은 함수율을 가진 균질한 층(homogeneous layer)으로서 낮은 전단강도 값을 가지며, 10 cm 하부는 균질하지 않고 고화된 층으로 높은 전단강도 값을 보이는 것과 일치한다.

수동베인과 전동베인을 이용한 전단강도 측정치를 비교한 결과, 대부분 정점에서 퇴적깊이에 따른 전단강도 측정값은 전동베인으로 측정된 값이 수동베인 보다 민감하게 나타나 변화 폭이 크다. 2개 정점(MC98-N06, N05)에서는 수동베인의 측정치가 약간 높게 측정된 반면, 8개 정점(MC98-N12, 11, 10, 09, 08,

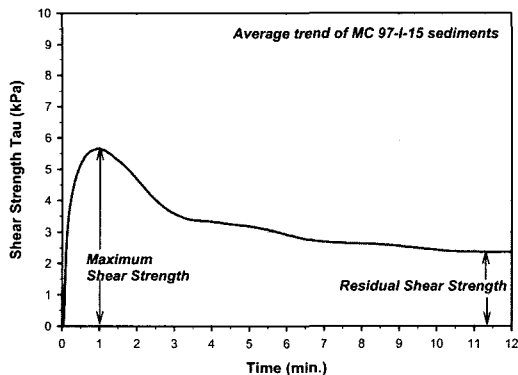


Fig. 2. Plot of shear strength against time measured by motorized vane. Note maximum and residual shear strengths marked in the figure.

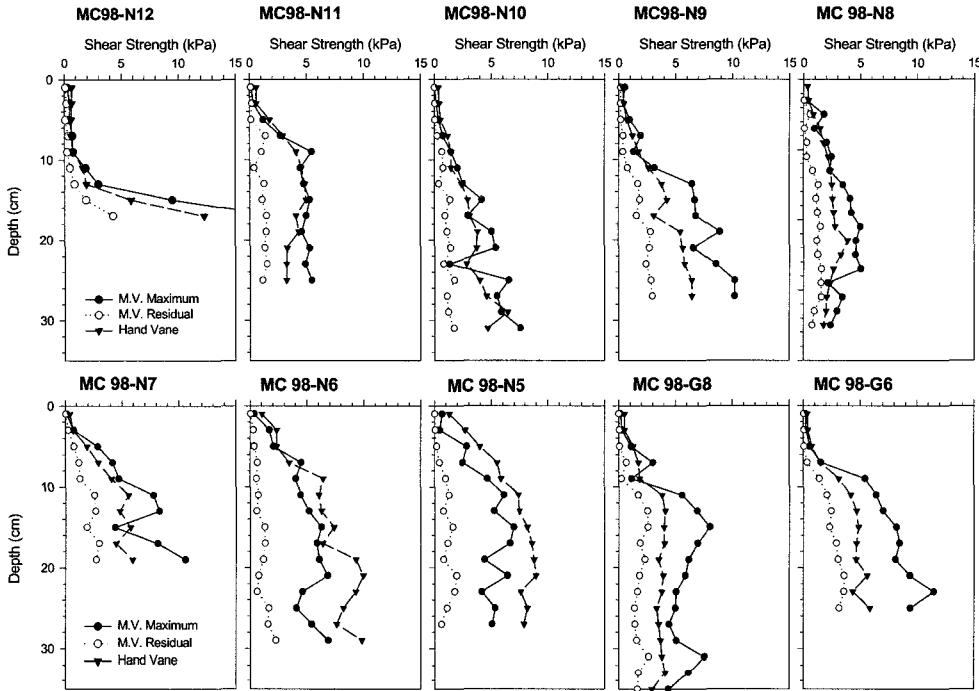


Fig. 3. Depth variations of shear strength of sediments measured on board by hand-held vane and motorized vane. MV: motorized vane.

07, G08, G06)에서는 전동베인의 측정치가 높게 관찰되었다(Fig. 3, Table 1). 수동베인과 전동베인으로 동일 깊이에서 140회 측정된 전체 전단강도 자료의 비율은 평균 1.28:1이다. 결과적으로 전자토크셀(electronic torque cell)이 장착된 전동베인으로 측정된 값은 정량화된 스프링 장치(calibrated soft torsional spring)가 장착된 수동베인으로 측정된 값에 비하여 평균 28% 높은 값을 보인다.

해양퇴적물의 전단강도 측정시 가장 간편하게 사용하는 정량화된 스프링을 이용하는 수동 베인은 정확하고 일정한 회전속도에서의 측정이 어려우며, 측정기를 일정한 속도로 회전하더라도 내장된 스프링 장치가 베인을 회전시키므로 실제로 퇴적물 내에서 강도를 측정하는 배인 회전속도는 일정치 않게 된다. 즉 전자토크 변환기를 이용하는 전동베인 측정기는 배인이 일정한 속도로 회전함에 따라 퇴적물의 전단저항은 점차 증가하여 최대저항에 이르러서는 최대 전단강도 값을 나타내며, 이후에 퇴적물 조직은 파괴된다. 조직이 파괴된 이후에도 배인은 궁극적인 정상전단(steady shear) 상태에 도달할 때까지 일정한 속도를 유지하게 된다.

반면에 스프링을 이용하는 배인 측정기는 최대전단저항에 다다르기 이전에는 퇴적물 내의 배인은 회전하

Table 1. Average shear strength of core samples measured on board by hand-held vane and motorized vane.

Station Number	MV shear strength(kPa)	HV shear strength(kPa)	MV/HV ratio
MC98-N12	3.97	2.77	1.43
MC98-N11	3.81	3.27	1.16
MC98-N10	3.22	2.74	1.18
MC98-N09	5.19	3.43	1.51
MC98-N08	3.06	2.11	1.45
MC98-N07	5.18	3.65	1.42
MC98-N06	4.54	5.79	0.78
MC98-N05	4.36	6.60	0.66
MC98-G08	4.60	3.03	1.52
MC98-G06	5.88	3.46	1.70
average	4.38	3.69	1.28

Comments, MV: motorized vane, HV: hand-held vane

지 않고 정지 상태에 있다가 최대 전단강도에 이르러서는 빠른 속도로 퇴적물 조직을 파괴하게 되므로 퇴적물의 최대전단저항 값을 표시하기 이전에 퇴적물이 파괴되는 것으로 판단되며, 측정자료는 전동베인 측정 자료에 비하여 신뢰성이 낮은 것으로 사료된다. 따라서 전자토크셀이 장착된 전동베인과 정량화된 스프링 장치가 장착된 수동베인에 측정된 전단 강도 값의 차

이(28%)는 스프링식 측정기의 기계적인 문제점에 기인하는 것으로 판단된다.

4.2. 측정시기에 따른 변화

동일 시료에 대하여 시료를 채취한 즉시 선상에서 전동베인으로 측정한 전단강도와 냉장고에 3개월 보관 후 육상 실험실에서 측정한 전단강도 결과를 비교하였다(Fig. 4).

시료채취 3개월 후 실험실에서 2 cm 깊이별로 측정된 전단강도의 평균값은 5.07 kPa(MC98-N06), 6.23 kPa(MC98-G06)로 시료채취 후 선상에서 깊이별로 측정된 전단강도의 평균값 4.29 kPa(MC98-N06), 5.88 kPa(MC98-G06)에 비하여 각각 18%와 6% 높게 측정되었다. 결과적으로 측정시기를 달리 측정된 결과, 실험실 측정치는 선상측정치에 비하여 전체적으로 11% 높게 측정되었다(Table 2).

반면에 동일 시료에서 측정지점을 달리하여 2지점(hole 1, hole 2)에서 측정된 결과, hole 2에서의 깊이별 전단강도의 평균값은 5.43 kPa(MC98-N06), 7.63 kPa(MC98-G06)로 hole 1의 평균값 4.70 kPa(MC98-

N06), 5.84 kPa(MC98-G06)에 비하여 각각 15%와 30% 높게 측정되었다. 결과적으로 hole 2 측정치는 hole 1 측정치에 비하여 전체적으로 23% 높게 나타났다(Table 2).

일반적으로 퇴적물 구성입자 내 공극수의 압력 감소에 따라 퇴적물 입자들이 분리되어 한정된 공간 내에서 입자간의 응력이 증가하면 퇴적물 전단강도는 증가되며, 반대로 공극수의 압력이 증가한다면 분리된 입자들이 서로 결합하게 되므로 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 시험에서는 선상 측정치나 3개월 후 실험실 측정치가 큰 차이를 보이지 않았다. 즉 측정시기를 달리한 전단강도 차이(11%)는 실험실에서 측정된 동일 코어 내에서 두 측정 지점(hole 1, hole 2)에서 나타난 차이(23%)에 비하여 적은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 보관상태가 양호한 경우 약 7개월 후에 측정된 자료도 선상에서 측정된 자료와 유사한 측정값을 나타낸다고 보고한 Hagerty(1974)의 연구결과와 유사하다. 따라서, 전단강도의 차이는 측정시기를 달리한 것으로부터 기인하는 것 보다, 측정시 인위적 요인 또는 다른 요인에 의해 전단강도 차이가 조절되는 것으로 판단된다.

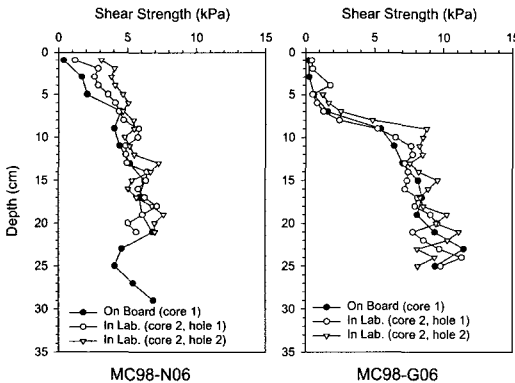


Fig. 4. Depth profiles of shear strengths measured on board and in laboratory using motorized vane in cores. Shear strengths measured in different places do not show any consistent variation.

Table 2. Average shear strength of sediments measured both on board and in laboratory (hole 1 and hole 2) using motorized vane in cores.

Core number	MC98-N06	MC98-G06	Average
on board (kPa)	4.29	5.88	5.15
in lab. hole 1 (kPa)	4.70	5.84	5.32
in lab. hole 2 (kPa)	5.43	7.63	6.53
in lab. average (kPa)	5.07	6.23	5.70
on board/in lab. ratio	1.18	1.06	1.11
hole 2/hole 1 ratio	1.15	1.30	1.23

4.3. 동일 코어에서의 반복실험

동일한 코어 내에서 측정지점에 따라 나타나는 전단강도 값의 차이와 범위를 파악하기 위하여 전동베인을 이용하여 한 개의 원주상시료에서 동일한 깊이의 4지점에서 반복하여 전단강도를 측정하였다(Fig. 5). 측정 결과, 깊이에 따른 변화양상은 유사하였지만(Fig. 6) 동일 깊이에서 약 ±3 kPa의 차이를 보인다. 특히 MC97-I-05의 11 cm 깊이에서는 이러한 변화의 폭이 최대 12 kPa로 다른 정점에 비해 크게 나타난다(Fig. 6). 이러한 차이는 하나의 코어시료에서도 부위마다 다른 물성의 차이 때문으로 각 퇴적층간의 경사진 경계면, 국부적인 생물교란, 즉, 반점(mottle)과 구멍(burrow), 국부적으로 고화된 물질(consolidated material)과 탄산질

퇴적물의 존재 등 깊이별 코어시료의 육안 특성차이가 이러한 가능성을 뒷받침한다.

3개 코어의 4지점(hole1-4)에서 측정된 지점별 전단강도의 평균값 차이를 비교해 본 결과, 각 코어에서 최대값을 보이는 지점과 최소값을 보이는 지점의 차이는 평균 12%(5-22%)로 측정되었다(Table 3). 따라서 앞에서 기술한 측정장비에 따른 차이(28%), 측정시기에 의한 차이(11%)와 비교할 때 동일한 코어의 4지점에서 측정된 값의 차이는 크지 않음을 알 수 있다.

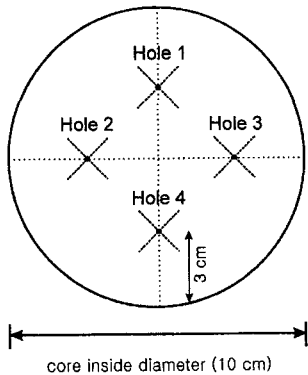


Fig. 5. Positions of vane shear testing holes in a core section.

4.4. 동일 지점의 두개 코어의 비교실험

동일한 정점에서 동시에 채취된 여러 코어들의 전단강도 값의 차이와 범위를 파악하기 위하여 다중주상시료 채취기로 채취된 8개의 코어시료 중 2개의 코어를 선택하여 전동베인과 수동베인을 이용하여 깊이별로 측정된 값을 비교하였다. Fig. 7은 다중주상시료 채취기로 채취된 8개의 코어시료 중 2개를 취하여 측정된 값을 도시한 것으로 퇴적 깊이에 따라 증가되는 전단강도의 변화양상은 유사하지만 시료 간 측정값이 현저하게 나타났다.

즉, 서로 다른 두개의 코어에서 2 cm 깊이별로 측정된 전단강도의 평균값은 MC98-N10의 경우, 2.98 kPa(core 1)과 4.44 kPa(core 2)로 core 1의 측정치에 비하여 core 2는 49% 높게 측정되었다. 또한 MC98-I-25의 경우, 두 코어의 전단강도 평균값은 4.06 kPa(core 1)과 2.62 kPa(core 2)로 core2의 측정치에 비하여 core 1은 55% 높은 값을 보였다(Table 4). 반면에 동일 시료에서 측정지점을 달리하여 2지점(hole 1, hole 2)에서 측정된 결과, MC98-N10의 경우, hole 1과 2의 깊이별로 측정된 전단강도의 평균값은 18% 차이를 보였으며, MC98-I-25의 경우, hole 1과 2의 깊이별로 측정된 전단강도의 평균값은 각각 4.07 kPa

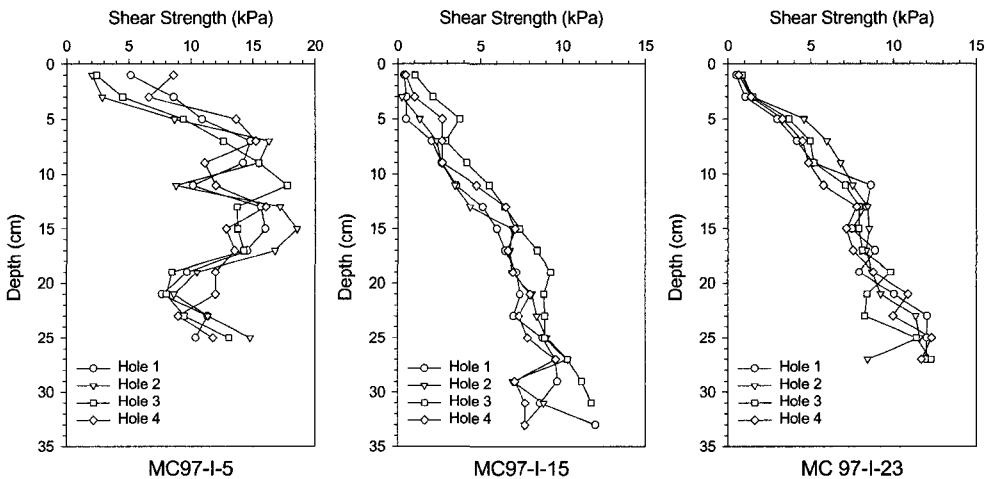


Fig. 6. Depth profiles of shear strengths measured at four different holes from a core using motorized vane in laboratory. Note the gap between the profiles from different holes in a core.

Table 3. Average shear strength values measured at four different holes from a core using motorized vane in laboratory.

Core number	Hole 1(kPa)	Hole 2(kPa)	Hole 3(kPa)	Hole 4(kPa)	Max./min. ratio
MC97-I-05	11.47	11.69	11.00	11.88	1.08
MC97-I-15	5.74	5.90	6.94	5.70	1.22
MC97-I-23	7.23	7.27	6.96	6.90	1.05

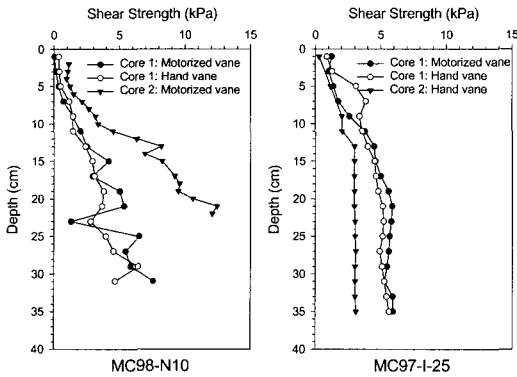


Fig. 7. Comparison of depth profiles of shear strength measured in two different core sample tubes in a station. Note the large difference between the values from different tubes.

Table 4. Average shear strength values measured at two different cores and two different holes.

Station Number	MC98-N10	MC98-I-25
Core 1-hole 1(kPa)	3.22	4.07
Core 1-hole 2(kPa)	2.74	4.05
Core 1 average(kPa)	2.98	4.06
Core 2(kPa)	4.44	2.62
Hole 1/Hole 2 ratio	1.18	1.00
Core 1/Core 2 ratio	0.67	1.55
(Core 2/Core 1 ratio)	(1.49)	(0.65)

와 4.05 kPa로 거의 동일한 측정값을 보였다. 따라서 동일한 정점에서도 서로 다른 두개의 코어는 뚜렷이 다른 전단강도 차이를 나타냄을 알 수 있다.

5. 결 론

수동베인과 전동베인을 이용하여 선상에서 전단강도를 측정된 결과, 코어 시료의 깊이에 따른 전단강도 증가 경향은 유사하나, 전동베인으로 측정된 값은 수동베인으로 측정된 값에 비하여 28% 높은 값을 나타낸다. 이러한 차이의 원인은 스프링이 장착되어있는 수동베인의 기계적인 문제점으로 판단된다.

전동베인으로 선상에서 측정된 값과 3개월 후 실험실에서 측정된 값을 비교한 결과, 실험실 측정치가 선상 측정치에 비해 11% 높은 값을 보였지만 이는 측정 지점을 달리한 실험실 2회 반복시험 결과 차이(23%)에 비하여 적은 값이다.

한편, 한 코어시료에서 전동베인으로 4회 반복 측정된 결과, 깊이에 따른 전반적인 변화 양상은 유사하지만, 동일 깊이에서 측정 지점(hole) 별로 전단강도 값

의 차이(3-10 kPa)가 나타났으며, 최대값을 보이는 지점과 최소값을 보이는 지점의 차이는 평균 12%(5-22%)로 측정되었다.

또한 한 정점에서 채취된 8개의 코어시료 중 2개를 선정하여 깊이에 따른 전단강도 변화를 측정된 결과, 두 정점에서 그 값의 차이는 49%(MC98-N10)와 55%(MC98-I-25)로 큰 차이를 보였다.

이러한 결과로 판단할 때, 태평양 C-C 지역 한 정점의 연성 심해저 퇴적물에서 깊이에 따른 전단강도 변화 양상은 상당한 변화의 폭을 지니고 있으며, 또한 한 정점의 두 코어시료에서 나타난 전단강도 차이의 폭이 측정 장비의 차이 또는 선상과 실험실에서 실시된 채취된 후 수개월간의 보관에 따른 시험시기의 차이 등에 의한 영향보다는 훨씬 큼을 알 수 있다. 이러한 차이의 원인은 심해저면의 퇴적작용이 일정치 않았으며, 생물교란 작용에 따라 국부적 퇴적상 및 퇴적물 물성이 변화했기 때문으로 사료된다.

사 사

연구에 도움을 주신 한국해양연구원 심해저자원연구센터 연구원 여러분과 온누리호 승무원 여러분께 감사드립니다. 또한 세밀한 심사와 교정에 시간을 내주신 두 분의 심사위원께 진심으로 감사드립니다. 이 연구는 1997년부터, 2003년까지 수행된 심해저광물자원 개발사업(해양수산부)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

과학기술처 (1998) 심해저 광물자원 개발기술 및 환경보전 연구 (1). 과학기술처 보고서 BSPN 96331-00-1025-7, 335p.

지상범, 김기현, 문재운, 이경용, 손승규, 오재경 (2000) 북동태평양 KODOS 지역 심해저 퇴적물의 지질공학적 특성. 한국해양학회지, 5권, p. 320-334.

Almagor, G. (1982) Marine geotechnical studies at continental margins (a review-Part I). Applied Ocean Res., v. 4, p. 92-98.

Baltzer, A., Cochonat, P. and Piper, D.J.W. (1994) In situ geotechnical characterization of sediments on the Nova Scotian Slope, eastern Canadian continental margin. Mar. Geol., v. 120, p. 291-308.

Barnett, P.R.O., Watson, J. and Connelly, D. (1984) A multiple corer for taking virtually undisturbed samples from shelf, bathyal and abyssal sediments. Oceanologica Acta, v. 7, p. 399-408.

Bennett, R.H., Freeland, G.L., Lambert, D.N., Sawyer, W.B. and Keller, G.H. (1980) Geotechnical properties of surficial sediments in a mega-corridor: U.S. Atlantic continental slope, rise, and deep-sea basin. Mar.

- Geol., v. 38, p. 123-140.
- Coconat, P., Bourillet, J.F., Savoye, B. and Dodd, L. (1993) Geotechnical characteristics and instability of submarine slope sediments, the Nice Slope(N-W Mediterranean Sea). *Mar. Geol. and Geotech.*, v. 11, p. 131-151.
- Craig, J.D. (1979) Geological investigation of the equatorial north Pacific seafloor : a discussion of sediment redistribution. In: Bischoff, J.L. and Piper, D.Z. (ed) *Marine geology and oceanography of the Pacific manganese nodule province*. Plenum Press, New York, p. 529-557.
- Dill, R.E. and Moore, D.G. (1965) A Diver held vane-shear apparatus. *Mar. Geol.*, v. 3, p. 323-327.
- Edmond, J.M., Chung, Y.C. and Sclater, J.G. (1971) Pacific bottom water: penetration east around Hawaii. *J. Geophys. Res.*, v. 76, p. 8089-8097.
- Fuller, J.T. (1975) Behavior of Mechanical Elements in submerged clays of lower shear strength, *Off. Tech. Conf.*, No. OTC 2242, Dallas.
- Grupe, B., Halbach, P., Gronenberg, M. and Oebius, H.U. (1994) *Bodenmechanische Eigenschaften von Tiefseesedimenten in Maganknollen-Feldern als Funktion des sedimentpetrographischen Aufbaus*. Technische Universität Berlin, VWS, Eigenverlag, Germany.
- Grupe, B., Becker, H.J. and Oebius, H.U. (2001) Geotechnical and sedimentological investigations of deep-sea sediments from a manganese nodule field of the Peru Basin, *Deep-sea Research II*, v. 48, p. 3593-3608.
- Hagerty, R. (1974) Usefulness of spade cores for geotechnical studies and some results from the northeast Pacific. In Inderbitzen, A.L.(ed) *Deep-Sea sediments: physical and mechanical properties*. Plenum Press, New York, p. 169-186.
- Hayes, J.D., Saito, T., Opydyke, N.D. and Bruckle, L.H. (1969) Pliocene-Pleistocene sediments of the equatorial Pacific: their paleomagnetic, biostratigraphic, and climatic record. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 80, p. 1481-1514.
- Hirst, T.J. and Richard, A.F. (1975) Analysis of deep-sea nodule mining - seafloor interaction, *Off. Tech. Conf.*, No. OTC 2241, Dallas
- Jeong, K.S., Kang, J.K., Lee, K.Y., Jung, H.S., Chi, S.B. and Ahn, S.J. (1996) Formation and distribution of Manganese nodule deposit in the northwestern margin of Clarion-Clipperton fracture zones, northeast equatorial Pacific. *Geo-Marine Letters*, v. 16, p. 123-131.
- Johnson, D.A. (1972) Ocean-floor erosion in the equatorial Pacific. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 83, p. 3121-3144.
- Johson, D.A. and Johnson, T.C. (1970) Sediment redistribution by bottom currents in the central Pacific. *Deep-sea Research*, v. 17, p. 157-169.
- Johnson, T.C., Hamilton, E.L. and Berger, W.H. (1977) Physical properties of calcareous ooze: control by dissolution at depth. *Mar. Geol.*, v. 24, p. 259-277.
- Jung, H.S. and Lee, C.B. (1999) Growth of diagenetic ferromanganese nodules in an oxic deep sea sedimentary environment, NE equatorial Pacific. *Mar Geol.*, v. 157, p. 127-144.
- Jung, H.S., Jung, K.S., Chu, Y.S., Park, S.H. and Kim, K.H. (2001) Role of siliceous fossil dissolution in downcore variations of grain size and water content: western margin of Clarion-Clipperton fracture zone, NE equatorial Pacific. *Mar. Geores. Geotech.*, v. 19, p. 181-195.
- Keller, G.H. and Bennett, R.H. (1970) Variation in the mass physical properties of selected submarine sediments. *Mar. Geol.*, v. 9, p. 215-223.
- Lee, H.J. (1971) Measurements and estimates of engineering and other physical properties, In *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, v. 19, p. 701-719.
- Lee, H.J. (1974) The roll of laboratory testing in the determination of deep-sea sediment engineering properties. In Inderbitzen, A.L.(ed), *Deep-Sea sediments: physical and mechanical properties*. Plenum Press, New York, p. 111-127.
- Lee, H.J. (1980) Offshore soil sampling and geotechnical parameter determination. *J. Petrol. Technol.*, p. 891-898.
- Lee, H.J. (1985) State of the art. In Chaney, R.C. and Demars, K.R.(ed), *Laboratory Determination of the Strength of marine soils, Strength testing of marine sediments and In-situ measurements*, ASTM STP 883, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p. 181-250.
- Mantyla, A.W. (1975) On the potential temperature in the abyssal Pacific Ocean. *J. Mar. Res.*, v. 33, p. 341-354.
- Monney, N.T. (1971) The Engineering Properties of Marine Sediments. *Mar. Technol. Soc.*, v. 5, p. 21-30.
- Monney, N.T. (1974) An analysis of the vane shear test at varying rates of shear. In: Inderbitzen, A.L.(ed), *Deep-Sea sediments: physical and mechanical properties*, Plenum Press, New York, p. 151-167.
- 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.*, v. 73, p. 1163-1166.
- Muller, P.J. and Mangani, A. (1980) Organic carbon decomposition rates in sediments of the Pacific manganese nodule belt dated by Th-230 and Pa-231. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 51, p. 94-114.
- Noorany, I. and Fuller, T. (1982) Soil-machine interaction studies for manganese nodule mining. In: *OTC 4261, Offshore Technology Conference Proceedings*, p. 445-456.
- Oebius, H.U. (1998) Deep-sea mining and its environmental consequences. *Technische Universität Berlin, VWS, Eigenverlag, Germany*. 136p.
- Piper, D.Z., Cannon, W. and Leong, K. (1977) Composition and abundance of ferromanganese nodules at DOMES Sites A, B, and C: relationship with bathymetry and stratigraphy, In Piper, D.Z.(ed), *Deep Ocean Environmental Study: Geology and Geochemistry of DOMES A, B, and C, Equatorial Pacific*, USGS Open-File Report. 77-778, Menlo Park, 217p.
- Piper, D.Z. and Williamson, M.E. (1977) Composition of Pacific ocean ferromanganese nodules. *Mar Geol.*, v. 23, p. 285-303.
- Piper, D.Z. and Blueford, J.R. (1982) Distribution, mineralogy, and texture of manganese nodules and their relation to sedimentation at DOMES Site A in the equatorial north Pacific. *Deep-sea Research*, v. 29, p.

- 927-952.
- Richards, A.F. and Chaney, R.C. (1981) Present and future geotechnical research needs in deep ocean mining. *Mar. Mining*, v 2, p. 315-337.
- Skornyakova, N.S. and Murdmaa, I.O. (1992) Local variations in distribution and composition of ferromanganese nodules in the Clarion-Clipperton nodule province. *Mar. Geol.*, v. 103, p. 381-405.
- Thetis. (1992) The environmental impact of deep sea mining, section I. Nodules and environment. ed. by Amann, H., 283p.
- 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. OTC 4132, Offshore Technology Conference Proceedings, p. 139-146.
- Tsurusaki, K. and Hirota, T. (1977) Some physical properties of the bottom sediments. In Mizuno A. and Moritani, T.(ed), *Deep Sea Mineral Resources Investigation in the Central-Eastern Part of Central Pacific Basin*, Geological Survey of Japan Cruise Report No. 8, p. 125-130.
- Tsurusaki, K., Yamazaki, T. and Handa, K. (1994) Geotechnical properties of deep-sea sediments and manganese nodules in the Penrhyn Basin, South Pacific. In Usui A.(ed), *Marine Geology, Geophysics and Manganese Nodule Deposits in the Penrhyn Basin, South Pacific*. Geological Survey of Japan Cruise Report No. 23, p. 225-240.
- van Andel, Tj.H., Heath, G.R. and Moore Jr., T.C. (1975) Cenozoic History and Paleooceanography of the Central Equatorial Pacific Ocean, *Geol. Soc. Am. Mem.*, v. 143, p. 1-134.
- Volet, J., Pastouret, L. and Vergnaud-Granzzini, C. (1980) Dissolution and carbonate fluctuations in Pleistocene deep-sea cores: A review. *Mar. Geol.*, v. 34, p. 1-28.

2003년 12월 23일 원고접수, 2004년 2월 19일 게재승인.