

해저 연약지반 주행성능 실험기법 연구 (I) : 주행실험토조

최종수* · 홍섭* · 김형우*

*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

Experimental Technique for Trafficability on Soft Benthic Terrain (I) : Soil bin

JONGSU CHOI*, SUP HONG*, HYUNG-WOO KIM*

*Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KORDI
Daejeon, Korea

KEY WORDS: Benthic Terrain 해저지반, Cohesive Soil 점착성 토양, Shear Strength 전단강도, Soil bin 토조, Bentonite 벤토나이트

ABSTRACT:

To study the trafficability on soft and cohesive benthic terrain, a soil bin is designed and constructed. The information of shear strength of pacific seafloor and the results of dimensional analysis of vehicle-train system are used as basic datum for concept design of soil bin. Cohesive benthic terrain is modeled by means of bentonite-water mixture. The shear strength of the mixture is measured by motorized shear meter. Several facilities are constructed for mixing and evening modeled soil, transporting vehicle model. The shear strength in soil bin is investigated for depth, age and velocity. The result of this study is used as basic information to the experimental study for development of crawler on benthic terrain.

1. 서론

해저 주행은 파이프라인 또는 케이블의 해저 설치 및 보수 유지, 해저 자원의 개발, 해양 방위, 과학탐사 연구 등 다양한 임무 수행을 위하여 그 필요성이 제기되었으며, 그에 따른 주행 장치(vehicle)의 형태 또한 다양하게 고안되어왔다.

해저주행은 지형적으로 완만한 지반을 전제로 하며, 지반 토양의 물성에 의해 지배적인 영향을 받는다. 해저의 토양은 구성 성분에 따라 사토(sand), 사질토(sandy loam), 사질이토(sandy mud), 니질사토(muddy sand), 점토(clay) 등으로 세분화되나, 전반적으로 사질토양은 육상에 인접한 해역에 국한되고 그 외에는 점토의 성분이 높은 점착성(cohesive) 토양이 대부분이라 볼 수 있다.

해저 주행장치 개발을 위해서는 해저 토양의 주행성(Trafficability)에 관한 연구가 선행되어야 한다. 이를 위해서는 주행역학(Terramechanics) 관점에서의 실험설비 및 실험기법 요구된다. 이는 지반 시뮬레이션을 위한 설비와 장치 및 일련의 실험계측기법 등의 마련을 의미한다.

일반적으로 건설기계 또는 농기계 개발에 토조(Soil Bin)가 기본 설비로 활용되고 있다. 토조는 조절·관리된 토양지반을 제공하는 기반 시설이다. 이때, 압력-침하 및 전단저항 특성 등

은 토양의 주행성 판단에 결정적인 요인이며, 시험토조 시설은 이러한 토양의 주요 주행역학 특성을 재현하여야 한다.

목적에 따라서 폭 6m 길이 63m 깊이 3.5m의 대형 담수토조(Dörfler 1992)로부터 3.4m×2.9m×0.6m의 소형 토조(Zhang 1995)에 까지 그 크기와 규모가 다양한 주행시험 토조가 활용되고 있다.

광물학적 구성 성분 외에 해저토양에 포함되어있는 유기적 성분은 시간과 주변 환경조건에 따라서 변하며 토양의 기계적 성질을 바꾸기 때문에, 실험 토양을 주행시험 토조에서 장기간 사용하기는 어렵다. 따라서, 인위적으로 원하는 지반 토양물성(기계적)을 재현하고 조절할 수 있는 실험기법은 주행역학 실험 연구에 필수적인 요인이다.

본 연구에서는 실험 토양의 전단강도 특성조사결과와 주행 차량-지반의 동적 상호작용 해석을 위한 차원해석 수행결과를 참고하여 주행성능시험 토조를 설계 제작하였다. 토조내 인공지반은 벤토나이트와 물의 혼합물로 모사되었으며 전단강도계측장치를 통해 강도계측을 수행하면서 함수율을 조정하여 원하는 강도를 얻는다. 모사된 연약지반의 전단강도가 전단강도계측장치의 계측배인의 투입 깊이와 회전속도 그리고 지반의 교란 후 경과 시간에 따라 계측되어 분석되었다. 이러한 연구를 통하여 연약지반의 주행성능연구의 기반이 마련된 것으로 사료된다.

제1저자 최종수 연락처: 대전시 유성구 장동 171

042-868-7529 jschoe@kriso.re.kr

2. 개념정립

2.1 해저 연약지반 특성 조사

실해역의 수심 5,000~6,000 m 수심의 퇴적층은 포화된 실트(silt)와 점토(clay)로 구성된 연약한 세립질 퇴적물의 점착성 지반으로서 전단강도 특성은 주행장치의 설계 및 운용의 가장 중요한 기본자료이다. 해저 연약지반의 한 예로서 북태평양의 C-C 구역내의 한국의 심해저 망간단괴 채광구역인 KODOS(Korea Deep Ocean Study)지역에서 채취한 코어시료의 선상 전단강도 시험기의 측정 결과(지상범, 1999) 중 관련된 사항은 같다.

- 수동베인(Shear rate; 약 360 °/min)과 전동베인(Shear rate; 약 30 °/min)의 선상 전단강도 측정 결과 깊이에 따른 변화 양상은 거의 동일하다.
- 선상에서 측정된 전단강도와 3개월 후 실험실에서 측정된 값은 거의 유사하다.
- 측정지점에 따른 전단강도의 변화 폭은 3~10 kPa로 매우 크다.
- 측정지점에 따른 전단강도의 변화 폭은 베인실험의 방법과 채취 후 경과시간에 따른 차이보다 훨씬 크다.
- 대부분의 시료가 깊이 10 cm까지는 낮은 전단강도 값을 가지나 10 cm 이후에는 5 kPa 이상의 최대전단강도를 나타낸다.
- 최대전단강도와 잔류전단강도의 비를 나타내는 민감도는 평균 2.7정도이다.

이러한 실해역 자료를 기반으로 해저 연약지반 주행차량의 성능시험기법을 연구하도록 한다.

2.2 연약지반 주행차량 상사성 연구

실해역에서 운용되는 주행차량에 대한 모델실험을 수행하고 실험결과와 체계적인 분석을 위해 상사성 연구를 수행하였다.

차량이 균질이고 등방성이며 평탄한 연약 지반위를 주행한다고 가정한다면 다음과 같은 토양의 특성치가 차량의 주행성능에 영향을 준다.

- 점착력 (c , cohesion)
- 점성 (η)
- 토양의 비중량 (γ)

주행차량의 독립변수(independant variables)는 다음과 같다.

- 평균접지압 (P)
- 트랙 속도 (V_t)
- 슬립속도 (V_s)
- 트랙 좌우속도비 (S)
- 트랙접촉길이 (L), 트랙폭 (B)
- 그라우저 높이 (h), 바닥폭 (b)
- 그라우저 피치 (G_p)

주행성능을 나타내는 의존변수(dependent variables)는 다음과 같다.

- 견인력 (T)

- 정적 및 동적 침하 (δ)

- 선회반경 (R)

차원해석을 통하여 다음의 무차원 변수를 구하였다.

- 기하학적 상사 : $G_p/h, B/h, b/h, L/G_p$

- 운동학적 상사 : $V_s/V_t, S$

- 동적상사 : $\eta V_s/h/c, gG_p/V_s^2$

- 정적상사 : $\gamma h/c, P/c$

무한케도 차량의 의존변수는 위의 무차원 변수의 함수의 조합을 통해 다음과 같이 표현된다.

$$\left(\frac{T}{c \times 2G_p B}, \frac{\delta}{G_p}, \frac{R}{B} \right) = f \left(\frac{\eta V_s}{ch}, \frac{gG_p}{V_s^2}, \frac{\gamma h}{c}, \frac{P}{c}, \frac{G_p}{h}, \frac{b}{h}, \frac{B}{h}, S \right) \quad (1)$$

여기서, g 는 중력가속도이다.

Eq. 1의 모든 무차원 변수는 모형(prototype)과 모델(model) 모두에 대해 동일하다. 즉, 의존 무차원 변수의 경우 모형과 모델에 대해 다음의 관계가 성립한다.

$$\left(\frac{T}{c \times 2G_p B} \right)_p = \left(\frac{T}{c \times 2G_p B} \right)_m$$

$$\left(\frac{\delta}{G_p} \right)_p = \left(\frac{\delta}{G_p} \right)_m, \quad \left(\frac{R}{B} \right)_p = \left(\frac{R}{B} \right)_m$$

3. 실험 기반 구축

3.1 토조와 기타 부속장치 설계/제작

Fig. 1과 같이 연약지반을 모사하기 위한 기본시설인 토조와 기타 부속장치를 자체 설계를 통해 제작하였으며, 그 주요 치수와 기능은 다음과 같다.

- 토조: 3.7m × 6.0m × 0.7m, 모사된 지반을 담고 있음.
- 대차: 3.7m × 1.0m × 1.0m, 전후 좌우의 두 방향으로 지반 교란부와 지반 평탄화부를 이동
- 지반 교란부: 1.0m × 1.0m × 1.8m, 지반의 교란
- 지반 평탄화부: 실험오차를 줄이기 위한 표면 정리작업
- 작업크레인: 주행차량모형의 투입 및 회수



Fig. 1. Soil bin in KRISO

3.2 전단강도계측장치

연약지반을 모사하고 실험시 매번 강도를 측정하기 위해서 전단강도계측장치를 개발하였다. 개발된 전단강도계측장치는 지반을 전단시키는 베인, 베인에 작용되는 토오크를 측정하는 로드셀, 일정한 속도로 베인을 회전시키는 회전모터, 베인을 상하로 이동시키는 상하구동모터, 제어계측 시스템으로 구성된다. Fig. 2는 개발된 전단강도계측장치가 토조내에 설치되어 계측을 준비하는 사진이다.

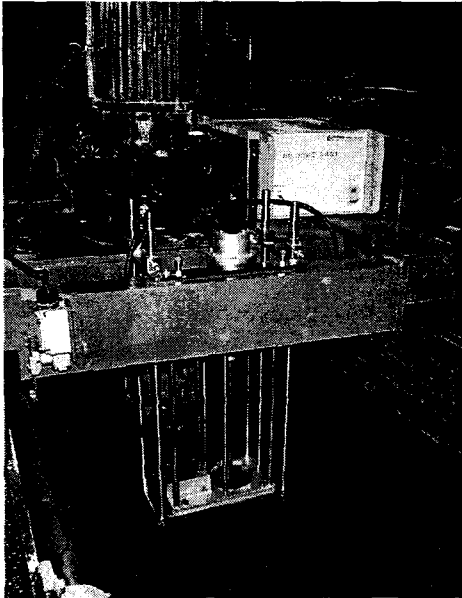


Fig. 2 Motorized Shear Meter

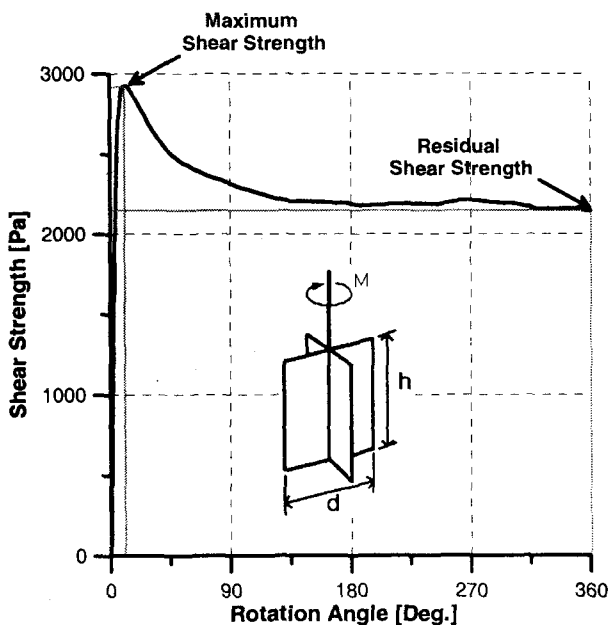


Fig. 3 An example of shear strength measured by motorized shear meter

마찰이 없는 점착성의 토양의 전단강도는 베인에 작용되는 최대 토오크 (M_{max})를 측정하여 다음과 같은 관계(ASTM, 1987)로부터 구한다.

$$c = \frac{M_{max}}{\pi(hd^2/2 + d^3/6)} \quad (2)$$

여기서 d 와 h 는 Fig. 3에 정의된 것과 같이 각각 베인의 직경과 높이에 해당한다. Fig. 3은 전단강도계측장치를 이용하여 토조내의 전단강도를 계측한 예를 보여주고 최대전단강도(Maximum shear strength)와 잔류전단강도(Residual shear strength)가 정의되어 있다.

3.3 해저 연약지반 모사

벤토나이트와 물의 혼합물이 지반모사에 사용되었다. 벤토나이트-물 혼합토양은 마찰이 없는 것으로 가정된다. 벤토나이트-물 혼합토양은 함수율에 의해 그 전단강도가 결정된다. 함수율 W 의 정의는 다음과 같다.

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100 (\%) \quad (3)$$

여기서, W_w 와 W_s 은 각각 물과 벤토나이트의 무게이다.

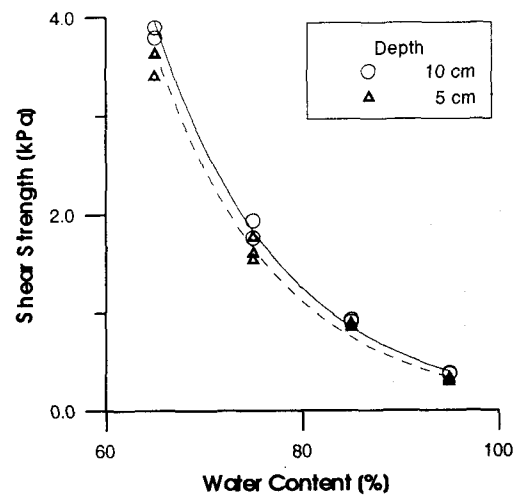


Fig. 4 Correlation of shear strength and water content of bentonite-water mixture

함수율에 대한 전단강도의 상관관계는 Fig. 4와 같이 별도의 실험을 통하여 구하였다. 벤토나이트 혼합물의 최대전단강도는 함수율에 대해 지수함수의 형태로 변화한다. 한편, Fig. 4의 함수율은 사용된 벤토나이트가 공기중의 습기에 노출되어 있어 정확한 값은 아니나, 특성을 파악하는데는 무난하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 4의 상관관계를 통해 Fig. 5과 같이 해저연약지반을 벤토나이트와 물을 단계적으로 미서용 베인으로 교반시켜 모사하였다. 현재 최대전단강도 3.0kPa 정도로 모사되었으며, 최대 전단강도와 잔류전단강도의 비를 나타내는 민감도의 경우 실험역의 값이 2.7인 것에 비해 작은 1.6(표준편차 0.3)을 나타내었다.

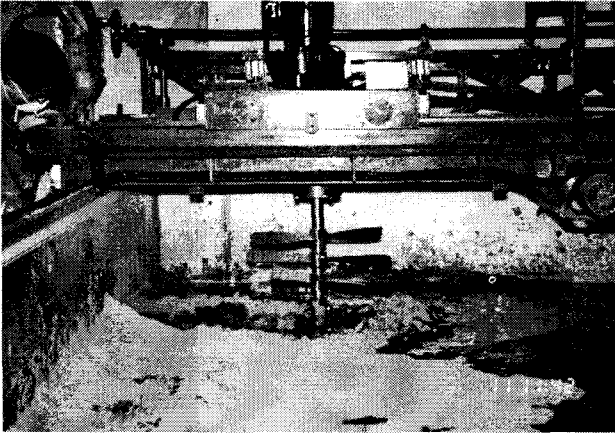


Fig. 5 Mixing Process of bentonite-water mixtures

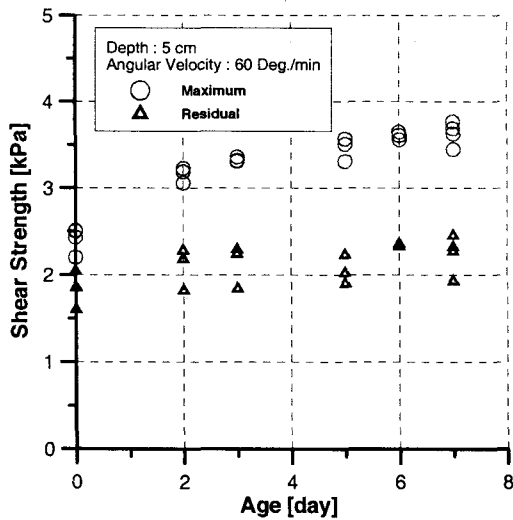


Fig. 6 The effect of age to shear strength in which depth is 5cm, and angular velocity of vane is 60 ° /min.

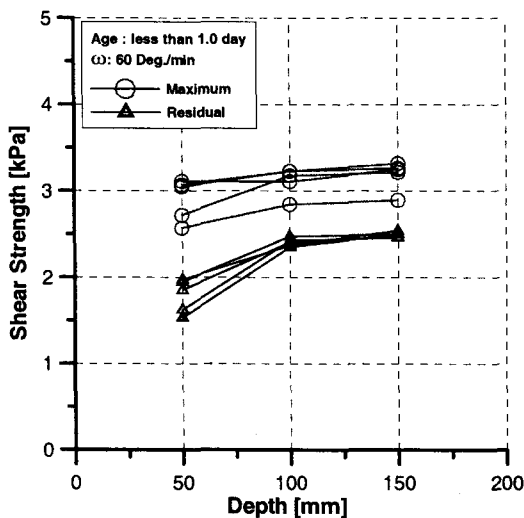


Fig. 7 The effect of measuring depth to shear strength in which age is less than 1.0 day, and angular velocity of vane is 60 ° /min.

4. 모사지반 특성

점착성 해저연약지반을 모사한 토조의 깊이별, 회전속도별, 믹서후 경과 시간별 전단강도 특성을 조사하였다. 사용된 베인은 직경 5cm, 높이 5cm의 크기이다.

4.1 교란후 경과 시간에 따른 특성

Fig. 6은 믹서 바로 직후부터 7일간의 시간에 따른 최대 및 잔류 전단강도의 변화를 나타낸 것이다. 이 때 측정 깊이는 베인의 상부기준으로 깊이 5 cm, 회전속도는 60 °/min이다.

계측된 시간에 따라 최대전단강도가 높아지는 것이 뚜렷하게 관찰되었으며, 잔류전단강도의 경우에는 큰 변화가 없어, 최대전단강도와 잔류전단강도의 비를 나타내는 민감도는 증가하는 경향을 보인다. 한편, 토조내의 위치별로 특별한 경향성은 보이지 않는다.

4.2 측정 깊이에 따른 특성

Fig. 7은 깊이에 따른 전단강도 특성을 나타낸다. 깊이에 따라 전단강도의 증가가 적은 양이지만 뚜렷이 보인다. 이러한 원인은 깊이에 따라 자체 중량에 의한 압력에 의한 마찰저항인 것으로 사료된다. 따라서 마찰저항이 없는 점착성 지반으로 가정 한 것에 대해 어느 정도의 추가적인 마찰저항의 존재를 염두해 두어야 한다.

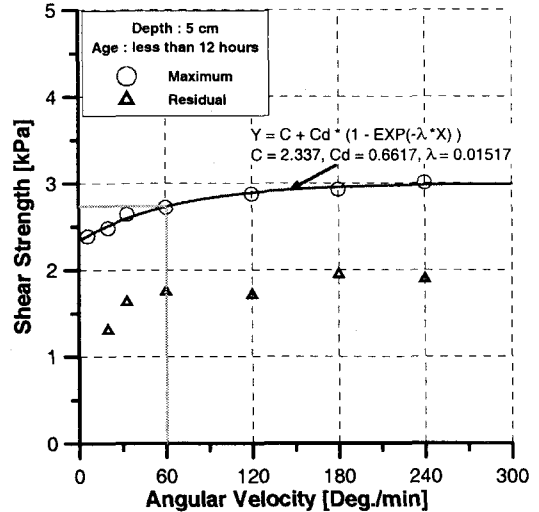


Fig. 8 The effect of measuring depth to shear strength in which age is less than 12 hour, and angular velocity of vane is 60 ° /min.

4.3 베인의 회전속도에 따른 특성

회전속도에 의한 영향력을 고려한 전단강도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tau = c + c_d(1 - e^{-\lambda v}) \quad (4)$$

여기서 c 는 점착력을, c_d 와 λ 는 전단속도에 영향을 받는 상

수를, v 는 전단속도를 나타낸다.

식 (4)의 관계를 교란을 마친지 12시간이 되지 않은 모사 지반의 깊이 5cm에서 속도에 따른 전단강도 특성그래프를 나타내는 Fig. 8에 적용하면 각 파라미터의 값은 다음과 같다.

- c : 2.337 kPa
- c_d : 0.6617 kPa
- λ : 0.3034 (배인 원주방향속도에 대해)
- c' (60 °/min) : 2.725 kPa

따라서, 점착력을 얻기 위해서는 배인을 최대한 저속으로 회전시키면서 여러 번 반복하여 보간하는 방법을 사용하여야 한다. 하지만 시간적, 경제적 여건상 제약받기 때문에 대개 60 °/min 속도의 값(ASTM, 1987)을 이용하는 경우가 일반적이다.

본 연구결과에서는 60 °/min 속도로 전단을 시켜 얻은 결과 (c')가 곡선회귀에 의한 결과 (c)에 비해 17%정도 큰 값을 가진다.

5. 결론

한국해양연구원 해양시스템안전연구소에서는 해저 연약지반용 주행차량의 실험연구를 위한 토조와 부대시설을 설계 제작하였다. 본 토조내의 모사된 해저연약지반의 전단강도 특성을 파악하여 다음과 같은 결론을 내린다.

- 벤토나이트-물의 혼합물의 조성비의 조절을 통하여 해저 점착성 연약지반 모사기법이 정립되었다.
- 설계·제작된 주행시험 토조는 전단강도의 공간 분포의 표준편차가 3.9%정도인 균일한 인공지반 모사가 가능하다.
- 교반 후 경과시간에 따라 최대 전단강도가 증가하므로 교란 후 실험시간 선정에 있어서 주의를 요한다.
- 내부마찰저항의 영향으로 계측깊이가 깊어질수록 전단강도가 조금씩 증가하며, 이 영향은 차량의 주행성능 예측에 고려되는 것이 바람직하다.
- 배인의 회전속도가 증가함에 따라 전단강도 계측값이 지수함수적으로 증가하였다. 전단강도 계측시 60 °/min로 계측한 값은 회귀분석에 의한 정적상태의 전단강도인 점착력과 비교하였을 때 약 17% 컸다. 따라서, 전단속도의 영향력을 고려한 실험수행이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

이상의 토조 모사지반에 대한 연구자료는 추후 수행될 주행성능실험에 유용한 기본자료로 사용될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 국가연구개발사업 "심해저 광물자원 집광 및 채광운용기술 실용화 연구"의 일환으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Dörfler, G. (1992): Drawbar Pull of a Tracked Vehicle on Deep Sea Soil, ISTVS, Proceedings 4th Regional North American Meeting, Sacramento, CA, March 25-27, pp.102-110.
- Zhang, Y. (1995): Pruefstands- und Rechnersimulation der Kurvenfahrt von Raupenfahrwerken auf extrem weichen Böden, doctoral dissertation, University of Hanover.
- 지상범, 정희수, 김현섭, 문재운 (1999): 북동태평양 KODOS지역 심해 퇴적물의 배인 전단강도 측정 방법에 따른 결과 비교, 한국해양연구소 심해저 자원연구센터, 「The Sea」 Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 4, No. 4, pp. 390-399.
- The American Society for Testing and Materials (1987): Standard Test Method for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine-Grained Clayey Soil, Designation: D 4643-87.