

# 직교행렬 실험계획법에 의한 해저연약지반 선회성능실험 연구

최종수 · 홍섭 · 김형우  
한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

## An Experimental Study on Steering Performance of Seafloor Tracked Vehicle Based on Design Of Experiment Using Orthogonal Array

JONG-SU CHOI\*, SUP HONG AND HYUNG-WOO KIM  
Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** Benthic Terrain 해저지반, Cohesive Soil 점착성 토양, Tracked vehicle 무한궤도차량, Grouser 그라우저, Steering Performance 선회성능, Steering Ratio 조향비, Turning Radius 선회반경

**ABSTRACT:** This paper concerns about an experimental investigation about steering performance of tracked vehicle on extremely soft soil based on DOE(Design Of Experiment) using L8 orthogonal Array. A tracked vehicle model with principal dimensions of 0.9m × 0.8m × 0.4m and weight of 167kg was constructed with a pair of driving chain links driven by two AC-servo motors. The tracks are configured with detachable grousers, the span of which can be varied. Deep seabed was simulated by means of bentonite-water mixture in a soil bin of 6.0m × 3.7m × 0.7m. Turning radii of vehicle and torques of motors were measured with respect to experimental variables; steering ratio, driving speed, grouser chevron angle, grouser span, grouser height. The effects of experiment variables on steering performance are evaluated.

### 1. 서 론

해저 주행은 파이프라인과 케이블의 해저 설치 및 보수 유지, 해저 자원의 개발, 해양 방위, 과학탐사 연구 등 다양한 임무 수행을 위하여 그 필요성이 제기되었으며, 그에 따른 주행장치(vehicle)의 형태 또한 다양하게 고안되어 왔다

해저 지반의 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.

해저의 토양은 점착성과 부착성(adhesion)이 강하며 전단강도가 극히 낮은 연약지반이므로, 해저 점착성 연약지반(이하, 해저지반)을 주행하는 시스템은 접지면적을 가급적 크게 함으로써 주행시 침하를 가능한 줄이고, 외란의 영향 하에서도 주행 가능한 충분한 견인력을 얻을 수 있도록 설계되어야 한다.

육상 야지(off-road)에 사용되는 건설장비, 농업장비, 군사장비에서 그 예를 찾아볼 수 있는 무한궤도형 차량이 해저지반용 주행장치로 가장 적합한 형태로 알려져 있다(Hong and Choi, 2001).

해저 연약지반용 무한궤도형 차량 설계를 위한 기본 데이터를 제공하기 위한 여러 가지 연구가 국내에서 진행되어 왔다. 본 실험 연구는 한국해양연구원의 실험시설과 그동안 수행되

어온 연구결과들을 바탕으로 수행되었다. 그라우저의 견인 및 슬립특성을 파악한 그라우저 주행성능 실험연구(Hong and Choi 2001), 해저 연약지반 주행성능 실험토조의 설계·제작 및 모사 연약지반의 특성 연구(최종수 외 2002), 주행차량모형을 설계·제작하여 직진주행성능실험(최종수 외 2003, Choi et al. 2003) 등이 수행된 바 있다.

해저지반의 강도는 매우 낮으며 동시에 비선형적이고 비탄성적이다. 따라서, 주행장치 설계를 위하여 다양한 설계변수들을 변화시키는 실험연구에는 큰 어려움이 따른다. 따라서 주행성(Trafficability)의 관점에서 지반과 무한궤도간의 특성을 실험적으로 규명하고 주행장치 수치해석모델을 이용하여 주행성능 해석 및 주행장치 설계를 수행하는 것이 효과적이다(Hong et al. 2001, 2002). 본 연구의 연구결과는 수치해석모델의 매개변수의 교정에 이용될 예정이다.

본 연구는 해저 연약지반용 무한궤도형 차량 설계의 기본 데이터를 제공하기 위해 수행된 일련의 연구의 일부로서 선회성능에 관한 실험결과를 보여준다. 경제적이고 효율적인 실험 연구 수행을 위하여 실험변수간의 직교행렬을 도입하고 그 유효성에 대한 검토를 수행한다.

### 2. 실험 장치

#### 2.1 토조

해저 연약지반은 벤토나이트-물의 혼합물(이하 혼합물)로 토조 내에서 모사되었다. 토조의 주요치수는 3.7m(B)×6.0m(L)×0.7m(D)이며 Fig. 1은 그 사진이다(최종수 외 2002). 본 토조의

제1저자 최종수 연락처: 대전광역시 유성구 장동 171  
042-868-7529 jschoe@kriso.re.kr

부속장치로는 X-Y 대차, 믹서장치, 표면정리장치, 전단강도계측장치, 크레인 등이 있다.

혼합물 내에 함수비를 조정하여 토조내 혼합물의 잔류전단강도가 일정값으로 유지되게 하였다. 본 실험에서 측정된 혼합물의 최대전단강도는 평균 2.778kPa, 표준편차 0.074kPa, 잔류전단강도는 평균 2.001kPa, 표준편차 0.115kPa로서, 최대전단강도와 잔류전단강도의 비를 나타내는 민감도의 평균값은 1.386이다.

벤토나이트-물 혼합물의 강도는 실험역 연약지반의 잔류전단강도를 목표로 모사되었다. 실험역 지반의 민감한 전단강도 특성을 모사하기 위해서는 벤토나이트-물 혼합물의 오랜 고화과정(consolidation)을 필요하기 때문에, 보다 보수적인(conservative) 연약지반 주행성능 예측을 위하여 실험역 지반 보다는 덜 민감하지만 잔류전단강도를 일치시키는 모사 방법을 채택하였다. 실험역의 경우 민감도가 2.7로서 본 연구에서 사용된 토양의 민감도 1.386과는 2배 정도의 차이를 보인다(지상범 외 1999).

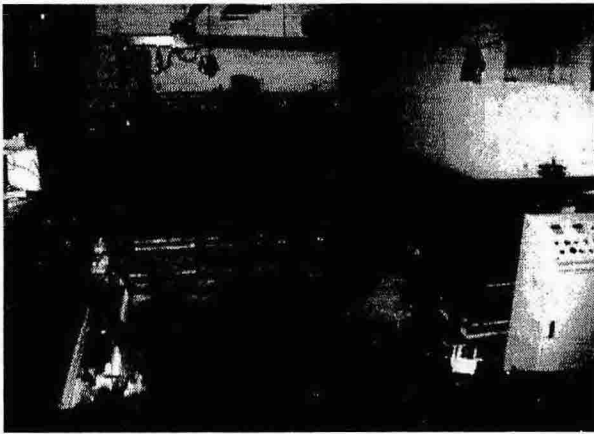


Fig. 1 Soil bin in KRISO/KORDI

### 2.2 주행차량 모형

본 실험을 위하여 설계·제작된 무한궤도형 주행장치 모형은 Fig. 2와 같다.

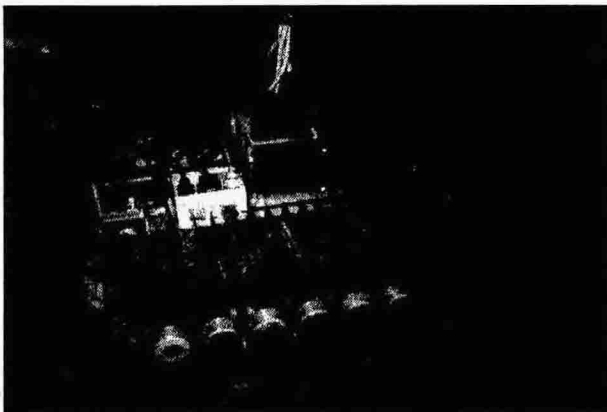


Fig. 2 Tracked vehicle model

이때, 대략적인 외형치수는 0.9m×0.75m×0.4m(L×B×H)이며, 트랙 폭은 0.2m이다.

본 모델의 특징은 체인-스프라켓 구동, 2개의 AC-서보모터 구동, 그라우저 착탈 등이며, 트랙에 지반이 부착되는 것(adhesion)을 줄이기 위해 테프론 코팅을 하였다(최종수 외 2003). 주요 사양은 다음과 같다.

- 각 모터의 공칭 출력 및 토크 : 0.75kW, 48Nm
- 최대 트랙회전 속도 : 0.5m/s
- 기본 무게 : 167kg

## 3. 실험 계획

### 3.1 실험변수와 성능치 선정

본 연구의 실험변수는 차량의 조향비(steering ratio), 차량 속도, 그라우저 꺾임각, 그라우저 간격, 그라우저 높이의 총 5개로 선정하였다. 차량의 선회 성능치는 차량의 선회반경(turning radius) 및 각 트랙의 구동토크의 2개로 선정하였다.

차량 내의 한 점의 궤적 분석을 통하여 선회반경을 비교하였으며, 모터구동 드라이버에서 출력되는 구동모터의 토크 값을 이용하여 성능의 우열을 분석하였다.

각 실험변수의 수준은 기본적으로 2수준으로 하였다. 조향비가 선회반경에 대하여 미치는 영향력의 비선형성을 확인하기 위해 조향비는 4수준으로 선정하였다.

차량의 조향비( $i$ )는 Fig. 3과 같이 회전 시 안쪽트랙 속도( $V_i$ )에 대한 바깥트랙 속도( $V_o$ )의 비로서 식(1)로 표현된다.

$$i = \frac{V_o}{V_i} \quad (1)$$

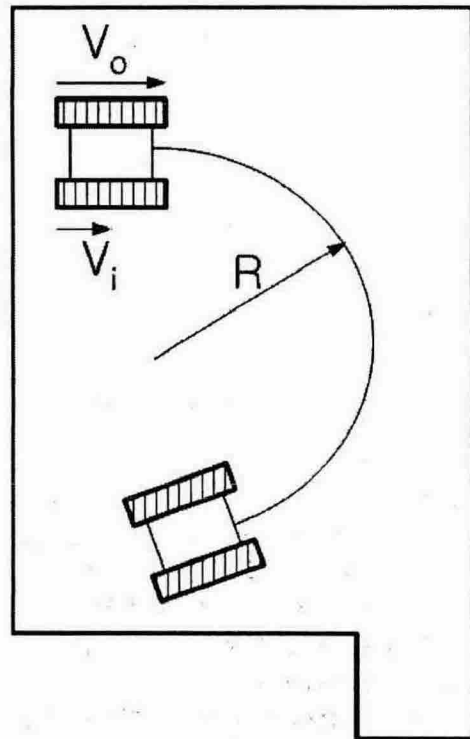


Fig. 3 Track speeds and turning radius, R

본 연구에서는 조향비의 실험 수준은 1.1, 1.2, 1.3, 1.4로 하였으며, 차량 속도의 경우 안쪽트랙의 속도를 기준속도로 하여 0.075m/s와 0.15m/s의 2가지 조건으로 실험을 수행하였다.

그라우저 꺾임각(Chevron angle)은 Fig. 4, 그라우저 간격과 그라우저 높이는 Fig. 5과 같이 정의되었다. 꺾임각( $\theta$ )의 경우 15도와 -15도, 그라우저 간격( $G_p$ )은 76.2mm와 114.3mm, 그라우저 높이( $H_g$ )의 경우 19mm와 38.1mm를 각 실험변수의 수준값으로 선정하였다.

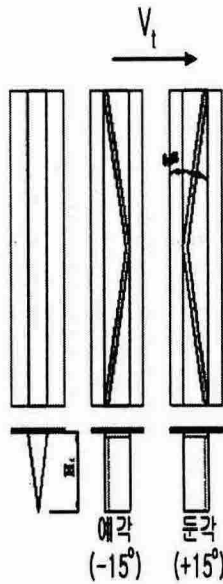


Fig. 4 Chevron angle of grouser

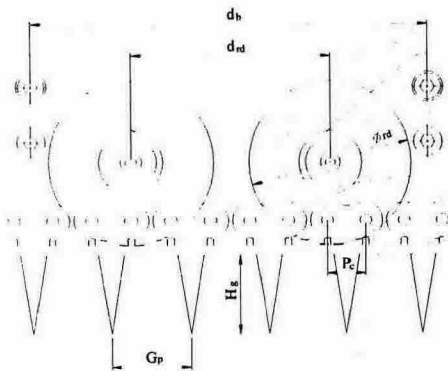


Fig. 5 Height and span of grouser

### 3.2 직교행렬

본 실험과 같이 연약지반을 모사해야하는 경우 1회 실험에 소요되는 시간이 매우 길다. 그 주된 이유는 차량 모형에 의해 한 번 파괴된 토양은 그 강도가 저하됨으로 모사지반의 이용 가능면적이 크게 제한되고, 실험 후 트랙에 부착된 토양 제거에 시간이 많이 소요되는데 있다.

한편, 선정된 실험변수를 이용하여 전조합 실험을 수행하면 모두 64회(4×2×2×2)의 실험이 필요하나, 직교행렬에 의하여

실험을 수행하면 가장 적은 횟수로 전조합 실험에 준하는 결과를 산출할 수 있다(이종원 1989). 사용된 직교행렬은 L8 직교행렬로서 Table 1과 같다.

Table 1 Design Of Experiment and results of the experiment

Test No.	실험변수					성능치	
	속도비	속도	꺾임각	간격	높이	선회반경	토크
단위	-	m/s	°	mm	mm	mm	Nm
1	1.1	0.075	-15	76.2	19.1	7273.9	1.414
2	1.1	0.150	+15	114.3	38.1	8221.7	2.053
3	1.2	0.075	-15	114.3	38.1	4018.5	1.860
4	1.2	0.150	+15	76.2	19.1	3903.4	1.725
5	1.3	0.075	+15	76.2	38.1	2810.8	2.229
6	1.3	0.150	-15	114.3	19.1	2591.3	1.683
7	1.4	0.075	+15	114.3	19.1	2098.2	1.847
8	1.4	0.150	-15	76.2	38.1	2190.1	2.439
확인 실험	1.4	0.075	-15	114.3	19.1	2100.4 *(2030)	1.802 *(1.844)

\* 예측치

### 4. 실험 결과

위의 Table 1은 본 실험의 결과를 포함하고 있다. 실험의 결과는 다음의 식과 같이 정의된 S/N으로 나타내어, 각 실험변수의 각 수준의 기여도로 변환하여 성능치에 대한 영향력을 판별하는데 사용된다(염봉진 2000).

$$S/N = -10 \log(y^2) \quad (2)$$

여기서,  $y$ 는 성능치에 해당되며 분석된 결과 중 선회반경에 대한 것은 Fig. 6, 차량의 구동토크에 대한 것은 Fig. 7에 도식되어 있다. 식(2)의 성능치는 Fig. 6과 Fig. 7에서 종축의 평균값 보다 위에 놓일수록 우수한 결과를 나타낸다. 즉, Fig. 6의 경우는 작은 선회반경을, Fig. 7의 경우는 낮은 토크를 가리킨다.

선회반경의 경우, 높은 조향비와 낮은 그라우저 높이의 경우 작은 선회반경을 보임으로 성능이 우수하다고 할 수 있다. 차량의 속도, 그라우저 꺾임각, 그라우저 간격 등의 영향은 상대적으로 적어서 우열을 뚜렷하게 구별하기 어려웠다.

구동토크의 경우, 낮은 조향비 및 차량 속도에서, 꺾임각이 예각(-15°)에서, 그라우저 간격이 넓을수록, 그라우저 높이가 낮을수록 구동토크가 적게 작용되어 성능이 우수하다고 할 수 있다. 그 중에서 조향비와 그라우저 높이가 선회반경과 마찬가지로 전체 성능을 결정하는 가장 중요한 실험변수이다.

직교행렬을 이용한 실험결과를 분석하여 임의의 실험변수조합에 대한 성능치를 예측하였다. Table 1의 마지막 행의 확인실험은 임의로 선택된 실험변수조합에 대한 예측치와 실험을 통한 실측치를 비교한 것이다. 선회반경의 경우 실측치가 예측치에 비해 3.5%높게 나타났으며, 구동토크의 경우 2.3% 낮게 나타났다. 지반의 불균일과 비등방성, 계측오차 등의 각종 실험오차

를 고려할 때 5%이내의 오차를 보이므로 본 직교행렬을 이용한 실험결과는 높은 재현성과 신뢰성을 보인다고 사료된다.

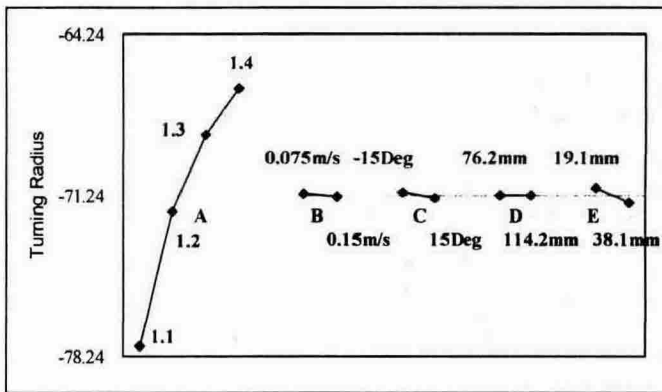


Fig. 6 Response of turning radius with respect to experiment variables: A, B, C, D, E, which denote steering ratio, vehicle speed, grouser angle, grouser span, grouser height, respectively

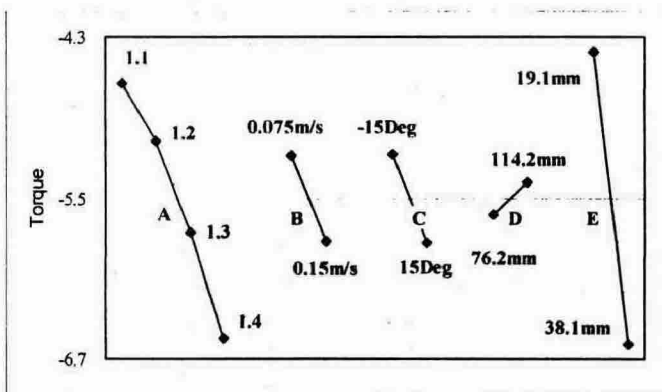


Fig. 7 Response of torque with respect to experiment variables: A, B, C, D, E, which denote steering ratio, vehicle speed, grouser angle, grouser span, grouser height, respectively

## 5. 결 론

한국해양연구원내에 제작·설치된 토조를 사용하여 직교행렬 실험계획법에 의한 주행차량모형의 선회성능실험을 수행한 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 해저 연약지반을 주행하는 무한계도형 차량의 선회반경을 줄일 수 있는 가장 손쉬운 방법으로는 본 실험의 설계변수 중 그라우저 높이를 낮추는 방안인 것으로 확인되었다.
- (2) 구동토크를 줄이기 위한 그라우저 설계 방안으로서 예각의 꺾임각, 보다 넓은 간격, 낮은 높이가 효과적이다. 그 중에서 가장 큰 영향을 미치는 변수는 그라우저 높이이다.

- (3) 조향비가 선회반경과 구동토크에 미치는 영향의 비선형성이 실험적으로 확인되었다. 차량의 선회반경은 조향비에 의해 가장 크게 영향을 받으며, 큰 조향비에 의한 급격한 차량의 선회는 구동토크 증가를 유발함이 확인되었다.
- (4) 확인실험에 대한 예측치와 실측치 간의 상대오차의 비교 결과, 선회주행성능에 관한 직교행렬 실험계획법의 효율성이 확인되었다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부의 국가연구개발사업 “심해저 광물자원 집광시스템 및 채광운용기술 개발” 사업의 일환으로 이루어졌음을 밝혀둡니다.

## 참 고 문 헌

- Jong-su Choi, Sup Hong, Hyung-Woo Kim (2003): An Experimental Study on Tractive Performance of Tracked Vehicle, ISOPE, OMS-2003, Tsukuba, Japan, September 15-19, pp.139~143.
- Sup Hong, Jongsu Choi (2001): Experimental Study on Grouser Shape Effects on Trafficability of Extremely Soft Seabed, ISOPE, OMS-2001, Szczecin, Poland, September 23-27, pp.115~121.
- Sup Hong, Hyong Woo Kim, Jong-su Choi (2002): Transient Dynamic Analysis of Tracked Vehicles on Extremely Soft Cohesive Soil, ISOPE, PACOMS-2002, Daejeon, Korea, November 17-20, pp.100~107.
- 염봉진의 3인 (2000): 실험계획 및 분석 : 다구치 방법과 직교표의 활용, 한국과학기술원 산학협동 공개강좌.
- 이종원 (1989): Taguchi방법에 의한 실험 계획, 자동차공학회지, Vol.11, No.6, pp.3~16.
- 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.
- 최중수, 홍섭, 김형우 (2002): 해저 연약지반 주행성능 실험기법 연구(I) : 주행실험토조, 한국해양공학회 2002년도 추계학술대회 논문집, pp.224~228.
- 최중수, 홍섭, 김형우, 이태희 (2003): 해저 연약지반 주행성능 실험기법 연구(II) : 직진주행성능시험, 한국해양공학회 2003년도 추계학술대회 논문집, pp.116~120.
- 홍섭, 김형우, 최중수 (2002): 해저 연약 지반 주행차량의 3차원 동역학 해석 기법, 한국해양공학회 2002년도 추계학술대회 논문집, pp.149~154.