

# 직교배열표 실험계획법에 의한 심해저 점착성 연약지반용 무한궤도차량의 선회성능에 대한 실험 연구

최종수\* · 홍 섭\* · 김형우\*

\*한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양시스템기술연구본부

## An Experimental Study on Steering Performance of Tracked Vehicle on Deep-sea Cohesive Soft Soil by DOE using Orthogonal Arrays

JONG-SU CHOI\*, SUP HONG\* AND HYUNG-WOO KIM\*

\*Ocean Engineering Research Department, Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI, Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** Cohesive soil 점착성 지반, Tracked vehicle 무한궤도차량, Steering ratio 조향비, Grouser 그라우저, Turning radius 선회반경, Driving torque 구동토크, Orthogonal arrays 직교배열표

**ABSTRACT:** This paper is concerned with experimental investigation of steering performance of a tracked vehicle on extremely soft soil. A tracked vehicle model with principal dimensions of 0.9 m(L)× 0.75 m(B)×0.4 m(H) and weight of 167 kg was constructed with a pair of driving chain links, driven by two AC-servo motors. The tracks were configured with detachable grousers with variable span. A deep seabed was simulated by means of a bentonite-water mixture in a soil bin of 6.0 m(L)× 3.7 m(B)× 0.7 m(H). The turning radii of vehicle and driving torques of motors were measured with respect to experiment variables: steering ratio, driving speed, grouser chevron angle, grouser span, and grouser height. L8 orthogonal table is adopted for DOE (Design of experiment). The effects of experiment variables on steering performance are evaluated.

### 1. 서 론

심해저에는 망간단괴, 코발트 크러스트, 해저열수광산 등의 광물자원이 존재한다. 심해저 광물자원 중 망간단괴는 망간을 비롯한 철, 니켈, 코발트, 구리 등의 금속을 함유하고 있다. 망간단괴는 19세기 후반에 영국 첼린저호의 대양탐사를 통해 그 존재가 알려졌다. 본격적인 망간단괴 채광시스템개발 연구와 파일럿 실험은 1970년대에 선진국을 중심으로 시작되었다 (호리베 요시오 등, 1987).

우리나라의 경우 1994년에 인도와 중국에 이어 7번째로 선행투자국의 자격을 획득하였으며, 이것을 계기로 국제해저기구로부터 태평양의 CCZ(Clarion-clipperton zone)에 심해저 망간단괴 광구권을 등록하였다. 이와 동시에 심해저 채광시스템 개발 연구도 착수하였다 (홍섭 등, 1997).

Yamazaki와 Park (2005)은 최근 국제 금속가격의 급격한 상승이 중국을 비롯한 아시아 국가의 급격한 소비증가에 기인된 것으로 판단하였다. 현존하는 육상 광산내 금속 부존량과 소비 추세를 비교하였을 때 육상금속자원 중 구리의 부족이 가장 심각하다고 진단하였다. 또한, 심해저 광물자원 개발의 경제성 평가를 통해 2004년 기준 금속가격에 대해서는 심해저 광물자원의 상업적 개발의 경제성이 좋은 편이며, 특히 망간단괴 개발이 가장 경제성이 있다는 것을 확인한 바 있다.

본 연구는 심해저 망간단괴 채광시스템의 주행차량을 개발할 목적으로 수행되었다. 본 채광시스템은 해저면 연약지반위에서 주행하면서 망간단괴를 채집하여 일정한 위치로 전달하는 집광시스템, 집광된 단괴를 수면으로 전달하는 양광시스템, 집광시스템과 거동제어를 수행하면서 양광시스템에서 올려진 단괴를 처리하는 수상선시스템 등으로 구성되어 있다. 집광시스템은 해저면의 연약지반위를 운행하는 주행차량, 해저면의 광물자원을 모으는 채집장치, 채집된 단괴를 이송시키는 송출장치 등으로 세분화된다. 이 중 주행차량은 가장 중요한 개발 항목이며, 우리나라가 심해저 광구권을 등록한 CCZ의 심해저면에 적합한 주행차량의 개발이 요구된다 (홍섭 등, 1999).

망간단괴가 높은 밀도로 분포하고 있는 CCZ의 심해저는 점착성의 연약지반이다. 심해저 점착성 연약지반의 물성중 전단강도는 지질공학적 관점에서 주행차량의 성능에 가장 많은 영향을 주는 물성치이다. 지상범 등(1999)은 CCZ의 전단강도 특성을 조사하였다. 샘플링 위치에 따라 전단강도가 변화하였으며, 해저면 10cm아래에 대한 최대 전단강도는 3.0~10 kPa이고 민감도는 2.7이었다.

CCZ의 심해저면과 같은 점착성 연약지반에서의 주행차량은 접지압이 낮으면서 최대한의 견인력을 얻어야 한다. 이러한 상황을 고려할 때 무한궤도형 주행차량이 가장 적합한 것으로 판단된다 (홍섭 등, 1999). 주행차량의 견인성능에 대한 연구는 여러 선행연구자에 의해 수행된 바가 있다 (Dörfler, 1992; 최종수 등, 2004). 본 연구에서는 이러한 무한궤도차량의 견인 주행성능에 대한 연구를 바탕으로 선회 주행성능에 대한 실험적

교신저자 최종수 : 대전광역시 유성구 신성로 104

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

연구를 수행하였다.

무한궤도차량의 선회 주행성능연구가 여러 선행연구자들에 의해 수행되어 왔다. Kitano(1976)는 단단한 지반에 대한 무한궤도차량의 선회주행을 이론적으로 해석하였다. Murakami (1992)는 연약지반에 대한 무한궤도차량의 선회주행에 대한 수학적 모델을 제안하였다. 그는 이러한 수학적모델에 지반과 트랙 간의 상호작용 모델을 포함하였다. Muro 등(1999)은 초연약지반에서의 선회운동에 대한 전산모델을 개발하였으며 실험결과와 비교하여 전산모델의 신뢰성을 확인하였다.

이러한 선행연구를 참고 하여 한국해양연구원 해양시스템안전연구소에서는 심해저 연약지반용 무한궤도차량에 대한 각종 연구를 수행하였다. 무한궤도차량의 트랙슈에 부착된 그라우저는 견인성능에 영향을 주는 중요한 요소이다. 그라우저의 일부만을 모델화하여 침하와 슬립실험을 수행하여 그라우저의 높이와 형상이 주행성능에 주는 효과를 연구하였다 (Hong and Choi, 2001). 실험이 수행될 토조내 벤토나이트 혼합물로 모사된 연약지반에 대한 특성을 사전 조사하였다 (최종수 등, 2002). 본 선회성능실험연구에 앞서 본 연구에 사용된 동일한 토조에서 동일한 무한궤도차량모델의 견인성능 실험연구를 수행하였다 (최종수 등, 2004). 또한 연약지반용 주행차량에 대한 시간영역 전산 해석프로그램인 TRACSIM을 개발하고 이것에 대한 검증연구를 수행하였다 (김형우 등, 2004). 본 연구는 이러한 사전 연구를 바탕으로 수행되었음을 알려둔다.

본 연구는 심해저면 주행차량의 설계에 기초 정보를 주기 위해 수행되었다. 벤토나이트 혼합물로 만들어진 초연약 점착성 지반에서 무한궤도차량의 1/3~1/5정도 축소모델에 대한 선회성능 실험을 수행하였다. 선회성능에 대한 각종 실험변수들의 응답특성을 예측하였다. 이러한 실험결과를 이용하여 초연약지반상의 무한궤도차량의 선회성능을 향상하기 위한 설계방향과 지침들이 제안되었다. 효과적인 실험을 위해 L8 직교배열표를 이용한 실험계획법이 제시되었다. 본 실험결과를 이용한 최적설계점 추정치를 검증하기 위해 추가적인 확인실험도 수행되었다.

## 2. 실험 장치

### 2.1. 연약지반 모사

본 실험은 6.0m(길이)× 3.7m(폭)× 0.7m(높이)의 토조에서 수행되었다 (Fig. 1 참조). 토조내에 벤토나이트 혼합물(이하, 혼합물)을 이용한 연약지반이 형성되어 있다. 혼합물은 전단강도 예측과 함수율의 조절을 통해 원하는 전단강도로 조정되었다. 토조내 혼합물의 전단강도 특성조사결과와 토조 및 그 부속장치에 대한 상세한 설명은 이미 수행된 바 있다 (최종수 등, 2002; 최종수 등, 2004).

본 실험에서 조성된 혼합물의 최대전단강도는 평균 2.778 kPa (표준편차 0.074kPa)이고 잔류전단강도는 평균 2.001kPa (표준편차 0.115kPa)로 예측되었다. 최대전단강도와 잔류전단강도의 비인 민감도는 1.386으로 예측되었다.

심해저 연약지반은 오랜 기간 고화되어(Consolidate) 민감도

는 2.7로 큰 값을 나타내었다 (지상범, 1999). 하지만, 본 실험에서는 토조내 혼합물의 민감도가 1.386으로 심해저 연약지반의 민감도에 비해 1.95배의 차이가 있다. 이와 같은 차이는 혼합물을 장시간 고화시켜서 심해저 연약지반과 같은 조건을 만들기가 실험실의 토조에서는 현실적으로 어렵기 때문이다. 따라서 혼합물의 최대전단강도와 잔류전단강도 중 잔류전단강도를 심해저 연약지반의 잔류전단강도와 동일하게 맞추어 실험을 수행하였다. 이와 같은 실험조건에서의 실험결과를 이용하여 주행차량을 개발할 경우, 심해저 연약지반 주행에서 더 우수한 성능이 기대된다.

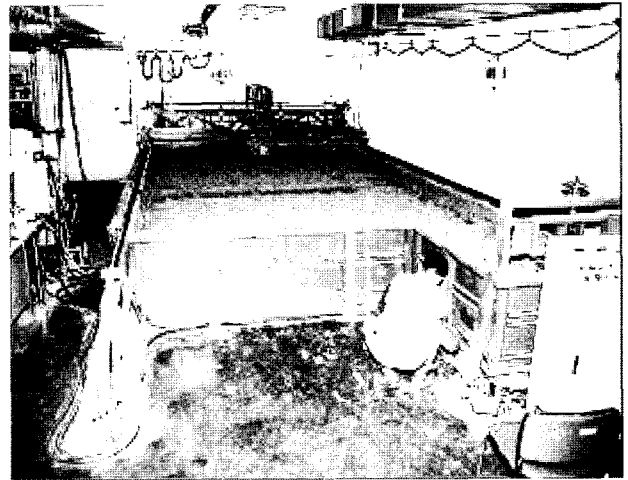


Fig. 1 Soil bin containing cohesive soil of bentonite-water mixture in MOERI/KORDI

### 2.2. 무한궤도차량 모델

본 실험을 위하여 심해저면 주행차량의 약 1/3~1/5규모의 모델이 Fig. 2와 같이 설계·제작되었다. 주요부의 형상 및 치수는 Fig. 3와 Fig. 4 그리고 Table 1에 나타내었다. 본 주행차량 모델의 치수는 0.9m(길이)× 0.75m(폭)× 0.4m(높이)이다.

주행 견인력을 효과적으로 얻기 위해 본 연약지반 주행차량 모델은 좌우 트랙의 바닥면에 그라우저가 체결되어 있다 (Fig. 2 참조). 주행차량 모델의 특성과 사양은 다음과 같다.

- 후륜 구동형 무한궤도 차량 (트랙 폭, 0.2m)
- 체인-스프라켓 구동 (좌우 별도 구동)
- AC-서보 모터 구동 및 PC기반 제어 시스템
- 모터의 공칭 동력과 공칭 토크 : 0.75kW 및 48Nm
- 트랙의 최대속도 : 0.5m/s
- 공칭 무게 : 167kg

그라우저 표면에 지반 부착(Adhesion)은 무한궤도형 차량의 성능을 저하시키기 때문에 부착을 최소화 시킬 필요가 있다. Fukagawa 등(1998)은 테프론 코팅 표면이 심해저와 같은 점착성 지반에서 부착을 감소시키는데 아주 효과적이라는 것을 발표하였고, 본 연구에서는 지반 부착을 최소화하기 위해 그라우저의 표면을 50 $\mu$ m 두께의 테프론으로 코팅하였다.

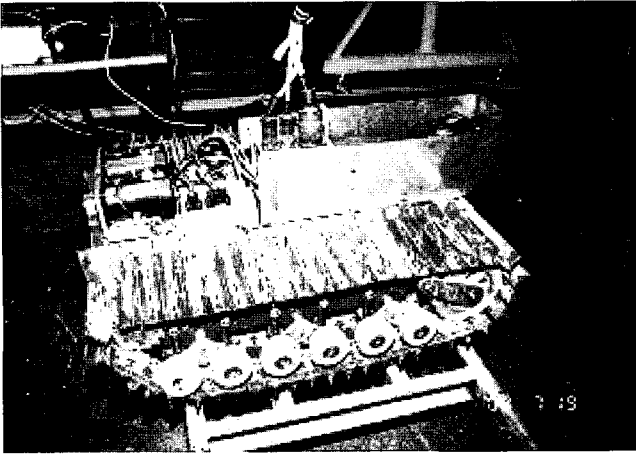


Fig. 2 Tracked vehicle model

Table 1 Specifications of tracked vehicle model

	Symbol	Value	Unit
Width of track	$D$	200	mm
Reference contact length	$L$	670	mm
Static average contact pressure	$P$	5.27	kPa
Distance of tracks	$B$	550	mm
Longitudinal center of gravity*	$Lcg$	330	mm
Vertical center of gravity*	$Hcg$	-22.3	mm
Diameter of idler wheel	$\phi r$	147	mm
Diameter of sprocket	$\phi S$	100	mm
Number of road wheel	$Nrd$	24	ea.
Grouser height	$Hg$	19, 38.1	mm
Grouser span	$Gp$	76.2, 114.3	mm
Grouser chevron angle	$\theta g$	-15, 15	°

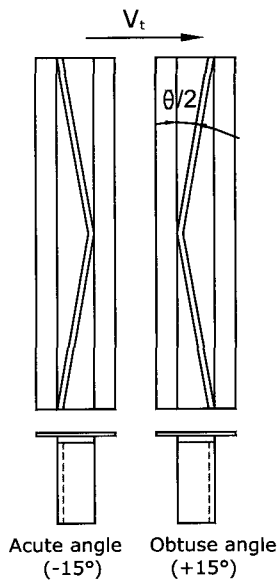


Fig. 3 Grouser chevron angle

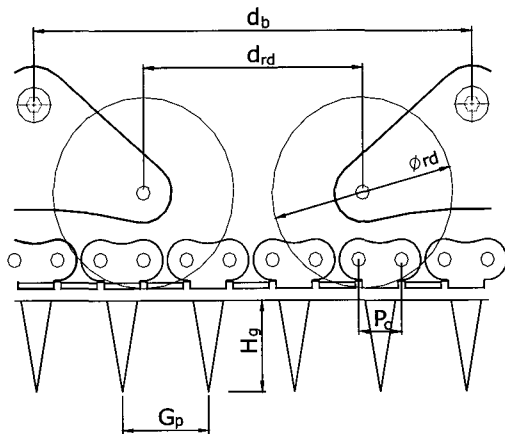


Fig. 4 Grouser height and span

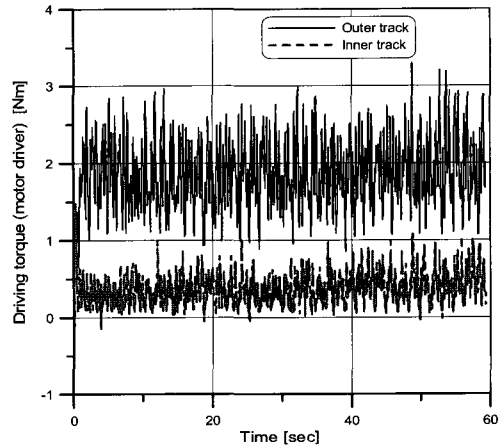


Fig. 5 Driving torque of motors at a test condition

### 3. 선회성능실험 실험계획

#### 3.1. 실험변수와 성능치

구동조건 2가지와 설계조건 3가지 등 모두 5가지의 실험변수가 선정되었다. 양쪽 무한궤도의 속도비( $i$ ; Steering ratio)와 안쪽 트랙 구동속도( $V_i$ ; Driving speed of inner track)의 구동조건이 실험변수로 선정되었다. 조향비  $i$ 는 식 (1)과 같이 안쪽 트랙 속도에 대한 바깥쪽 트랙 속도의 비로 정의된다.

$$i = \frac{V_o}{V_i} \tag{1}$$

Fig. 3과 Fig. 4에서 소개된 그라우저 각임각(Grouser chevron angle), 그라우저 간격(Grouser span), 그라우저 높이(Grouser height) 등의 설계조건이 실험변수로 선정되었다.

선회반경과 구동토크가 성능치로 선택되었다. 선회반경은 주행차량 모델에 부착된 막대기가 선회운동중에 만들어 낸 궤적으로부터 계산되었다. 구동토크는 Fig. 5와 같이 구동 모터 드라이버에 인입되는 전류로부터 모니터링 되었다.

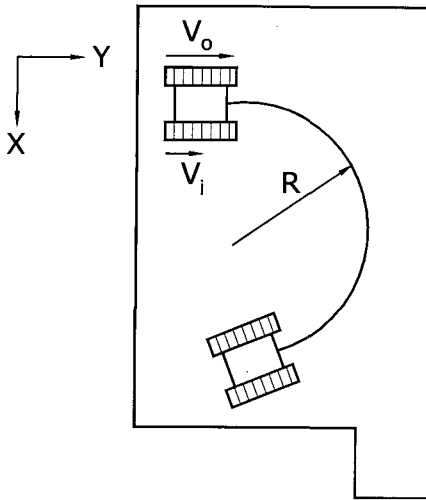


Fig. 6 Track speeds and turning radius, R

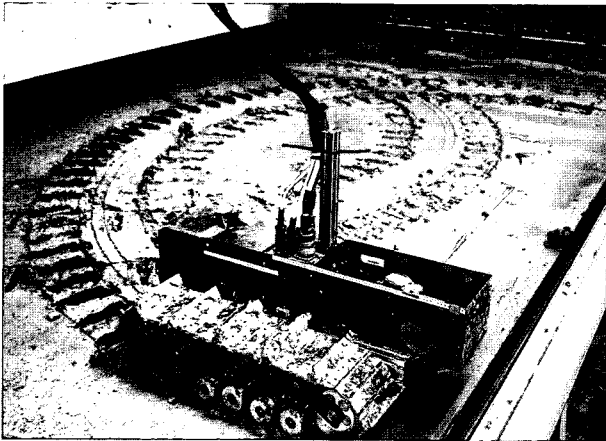


Fig. 7 Tracked vehicle model and the tracks traces on bentonite-water mixture

주행차량 모델의 선회주행실험은 Fig. 6의 모식도와 같이 수행되었다. Fig. 7은 실험이 종료된 시점에서 주행차량 모델과 혼합물 표면에 나타난 트랙 선회운동 자국의 사진이다.

성능치에 대해 선회비의 영향을 심도 있게 분석하기 위해 선회비의 수준은 4수준으로 두었다. 나머지 실험변수는 2수준으로 정하였다.

### 3.2. 직교배열표를 사용한 실험계획법

연약지반을 모사한 혼합물을 통한 주행차량 모델의 성능실험의 경우 주행차량 모델의 청소와 지반 교반 및 정리 등의 실험준비에 많은 시간과 노력이 필요하다. 따라서 제한된 인력과 경비로 최대한 효과적인 실험을 위해 과학적인 실험계획법이 요구된다.

직교배열표는 동일한 실험횟수에 대해 최대한의 효과를 나타내는 실험계획법으로 알려져 있다(박경진과 강병수, 2003). 본 연구에서는 L8 직교배열표를 적용하여 실험을 계획하였다.

주어진 실험변수와 그 수준에 대해 전조합법(Full factorial

Table 2 DOE and results of the experiment

Test No.	Experiment variables					Performance values	
	Steering ratio (A)	Track speed (B)	Chevron angle (C)	Grouser span (D)	Grouser height (E)	Turning radius	Torque
Unit	-	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
Ver. Test	1.4	0.075	-15	114.3	19.1	2100.4 (2030)*	1.802 (1.844)**

\* Expectation value which is calculated from additive model by pooling the effects of track speed, chevron angle and grouser span on performance values to errors since the effect amount are relatively small.

\*\* Expectation value which is calculated from additive model directly.

combination)으로 실험을 수행할 경우 모두 64(=4×2×2×2×2)회의 실험이 수행되어야 한다. 동일한 실험변수와 그 수준에 대해 L8 직교배열표가 적용 가능하며, 모두 8회의 부분조합(Fractional factorial combination)실험으로 64회의 전조합실험과 유사한 결과를 얻도록 하였다. Table 2에는 L8 직교배열표에 의한 각 실험조건이 제시되어 있다. 8회 부분조합법에 추가적으로 한 번의 확인실험이 수행되어 결과의 유용성을 검증하였다.

## 4. 실험 결과와 토의

평균분석법(ANOM; Analysis of means)을 이용하여 본 실험결과가 분석되었다 (박경진과 강병수, 2003). 직교배열표의 특성으로부터, 성능치에 대한 실험변수 각 수준의 효과는 실험변수의 수준이 포함된 성능치들의 평균을 취함으로써 얻어진다. 예를 들어, 선회반경에 대한 그라우저 높이(E)의 첫 번째 수준인 19.1mm와 두 번째 수준인 38.1mm의 효과는 각각  $m_{E1}$ 와  $m_{E2}$ 로 표현되며 다음과 같이 정의된다.

$$m_{E1} = \frac{1}{4}(\eta_1 + \eta_4 + \eta_6 + \eta_7) = 3967\text{mm} \quad (2)$$

$$m_{E2} = \frac{1}{4}(\eta_2 + \eta_3 + \eta_5 + \eta_8) = 4310\text{mm} \quad (3)$$

여기서,  $\eta_i$ 는  $i$ 번째 실험의 선회반경을 나타낸다.

각 성능치에 대한 각 실험변수의 효과가 식 (2)와 식 (3)과 유사한 방법으로 계산되어 Fig. 8과 Fig. 9에 계산되었다. 성능

치인 선회반경과 구동토크는 그 값이 최소화 될수록 더 나은 성능을 나타낸다.

높은 조향비와 낮은 그라우저 높이에서 선회반경 성능치가 우수했다. 한편, 트랙속도, 꺾임각, 그라우저 간격 등의 실험변수는 조향비와 그라우저 높이에 비해 상대적으로 무시할 만큼 선회반경에 대한 영향력이 적었다.

낮은 조향비반경과 낮은 트랙속도, 예리한 꺾임각, 높은 간격, 낮은 그라우저 높이 등의 조건에서 구동 토크 성능치가 우수했다. 여기서 조향비와 그라우저 높이가 구동토크에 가장 많은 영향력을 주는 변수임을 알 수 있었다.

Fig. 8과 Fig. 9의 분석 결과를 이용하면 임의의 실험조합에 대한 성능값의 예측이 가능하다. 가법성(Additive property)을 만족하는 가법모형(Additive model)이 성립한다는 가정하에 원하는 실험조합에 대한 성능값이 계산된다.

Table 2의 확인실험(Verification test)행에 성능 예측값과 추가적인 확인실험을 통한 계측값이 비교되어 있다. 선회반경의 경우 계측값이 예측값보다 6.1%정도 크게 구해졌고, 구동토크의 경우 3.9% 적게 계측되었다. 따라서 공학적인 견지에서

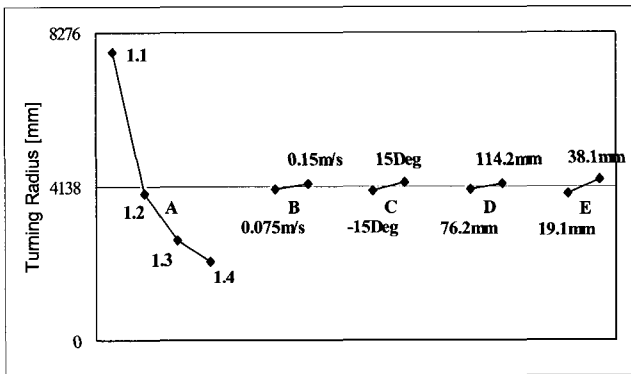


Fig. 8 Effect of experiment variables to turning radius: A, B, C, D, E denote steering ratio, speed, chevron angle, grouser span, grouser height, respectively

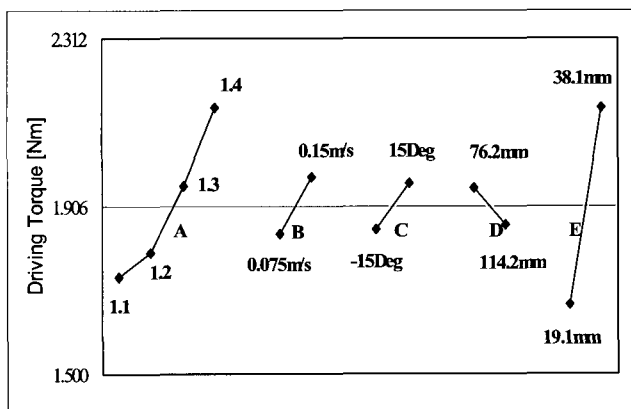


Fig. 9 Effect of experiment variables to driving torque: A, B, C, D, E denote steering ratio, speed, chevron angle, grouser span, grouser height, respectively

L8 직교배열표를 이용한 8회의 실험결과를 이용하여 임의의 실험조합에 대한 예측이 큰 무리가 없는 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

심해저 점착성 연약지반위를 운행하는 무한궤도차량의 선회 성능에 대한 실험 연구가 L8 직교배열표를 사용한 실험계획법에 기초를 두고 토조에서 수행되었다. 추가적인 확인실험을 통해 직교배열표를 이용한 무한궤도차량의 성능 예측의 신뢰성을 검증하였다.

이러한 연구결과를 바탕으로 심해저 초연약지반에서의 선회 운동성능을 향상시키기 위한 무한궤도차량의 설계지침을 다음과 같이 제안한다.

- (1) 무한궤도차량의 선회반경에 대한 제어응답을 민감하게 하기 위해서 가급적 그라우저 높이가 낮도록 설계하는 것이 추천된다. 한편, 그라우저의 꺾임각이나 간격은 선회반경에 영향을 주는 인자가 아닌 것으로 판단된다.
- (2) 선회반경에 대한 가장 주된 인자는 선회비이며 비선형적인 특성을 나타낸다. 차량의 속도는 낮은 속도범위에서는 선회반경에 거의 영향을 주지 않는다.
- (3) 동일한 선회성능에서 구동토크를 최소화하기 위해, 예각의 꺾임각을 가진 폭이 넓고 높이가 낮은 그라우저가 유리하다.
- (4) 구동동력소비량 예측시에는 1.2보다 큰 선회비에 대해서는 선회비에 비례하여 구동동력이 증가하는 경향을 보인다라는 점을 주목해야 한다.

### 후 기

본 논문은 해양수산부에서 발주한 국가연구개발사업인 “심해저 광물자원 집광시스템 및 채광운송기술 개발”과제의 연구 결과 중 일부분입니다. 이에 관계자분들께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

박경진, 강병수 (2003). “기계 설계론”, pp 198-200.  
 지상범, 정희수, 김현섭, 문재운 (1999). 북동태평양 KODOS지역 심해 퇴적물의 베인 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 (2004). “직교배열표를 실험계획법에 의한 심해 연약지반용 무한궤도차량의 견인성능에 대한 실험적 연구”, Ocean and Polar Research, 26권 2호, pp 231-243.  
 호리베 요시오, 오마찌 호꾸이찌로, 간노 마사요시 (1987). “해

- 양광물자원”, 겸지사, pp 28-56.
- 홍섭 등 (1997). “심해저 광물자원 개발기술 및 환경보존 연구 - 심해저 망간단괴 집광 및 채광운용시스템 개발연구”, 과학기술부, pp 24-26.
- 홍섭 등 (1999). “심해저 광물자원 개발기술 및 환경보존 연구 : 심해저 망간단괴 집광 및 채광운용시스템 개발연구”, 과학기술부, pp 7-33.
- Dörfler, G. (1992). “Drawbar Pull of a Tracked Vehicle on Deep Sea Soil”, Proc. of 4th Regional North American Meeting Sacramento, USA, March 25-27, ISTVS, pp 102-110.
- Fukagawa, R., Tamai, T., Kobayashi, T. and Matsuno, S. (1998). “Basic Experiments on Adhesion between Clay and Solid Surfaces”, Proc. of 5th Asia- Pacific Regional Conference, ISTVS, Seoul, Oct 20-22, pp 73-82.
- Kitano, M. and Jyozki, H. (1976). “A Theoretical Analysis of Steerability of Tracked Vehicles”, J. of Terramechanics, Vol 13, No 4, Pergamon Press, pp 241-258.
- Murakami, H., Watanabe, K. and Kitano, M. (1992). “A Mathematical Model for Spatial Motion of Tracked Vehicles on Soft Ground”, J. of Terramechanics, Vol 29, No 1, pp 71-81.
- Muro, T., Tai, T.D. and Kawahara, S. (1999). “Influence of Shape Ratio of Track to turning Characteristics of a Tracked Vehicles”, Proc. of 13th Int. Conference of the ISTVS, Munich, Germany, September 4-17, pp 209-216.
- Yamazaki, T. and Park, S.H. (2005). “Economic Validation Analyses of Japan’s Nodule, Crust, and Kuroko-type SMS Mining in 2004”, Proc. of ISOPE OMS-2005, Changsha, Hunan, China, October 9-13, pp 65-70.

---

2006년 4월 21일 원고 접수

2006년 7월 5일 최종 수정본 채택