

직교 배열표를 이용한 심해저 채광로봇 미내로의 주행 특성 연구

이창호* · 김형우* · 최종수* · 여태경* · 이민욱* · 오재원* · 홍섭*

*선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업기술센터

Study of Deepsea Mining Robot “MineRo” Using Table of Orthogonal Arrays

Chang-Ho Lee*, Hyung-Woo Kim*, Jong-Su Choi*,

Tae-Kyeong Yeu*, Min-Uk Lee*, Jae-Won Oh* and Sup Hong*

*Technology Center for Offshore Plant Industries, KRISO, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Tracked Vehicle 무한궤도 차량, Pilot Mining Robot 파일럿 채광 로봇, Extremely Cohesive Soft Soil 점착성 연약 지반, Numerical Analysis 수치해석, Table of Orthogonal Arrays 직교 배열표

ABSTRACT: KRISO(Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering) designed and manufactured a pilot mining robot called "MineRo" in 2012. MineRo is composed of four track modules. In general, much time and money are needed for deep-sea tests. Therefore, a numerical analysis to predict the dynamic behaviors has to be performed before a deep-sea test. In the numerical analysis, the information about the mining robot and soil properties are the most important factors to analyze the driving performance and dynamic response of MineRo. A terra-mechanics model of extremely cohesive soft soil is implemented in the form of the relationships between the normal pressure and sinkage, and between the shear stress and shear displacement. It is possible to acquire information about MineRo from the CAD model in the design phase. The Wong model is applied to the terra-mechanics model. This model is necessary to acquire many soil coefficients for a numerical analysis. However, in soil testing, the amount of soil property data obtained is limited. Moreover, it is difficult to analyze all of the cases for the many soil coefficients. In this paper, the dynamic behaviors of MineRo are analyzed according to the driving velocity, steering ratio, and variable extremely cohesive soft soil properties using a table of orthogonal arrays. The dynamic responses of MineRo are the turning radius, sinkage, and slip ratio. The relationships between the dynamic responses and variable soil properties are derived for MineRo.

1. 서 론

심해저 광물자원 개발을 위하여 선박해양플랜트연구소에서는 자항식 시험집광기를 개발하였고 실험역 실험을 성공적으로 수행하였다(Hong et al., 2008; Hong et al., 2009). 또한 2012년도에는 기존의 2열 무한궤도에서 채집의 효율을 증대하기 위하여 Fig. 1과 같이 4열 무한궤도 형태로 이루어진 “미내로(MineRo)”를 설계 개발하였다(Hong et al., 2013).

개발단계에 있어 접지 길이, 궤도 간격 등 다양한 해석 조건을 바탕으로 미내로의 선회 주행 시뮬레이션을 수행하고, 결과를 설계에 반영하였다.(Kim et al., 2013) 또한 4열 무한궤도 차량이 선회 주행할 때 입력 속도, 선회비 등의 속도프로파일에 따라 어떠한 특성을 보이는지도 해석을 통해 확인한 바 있

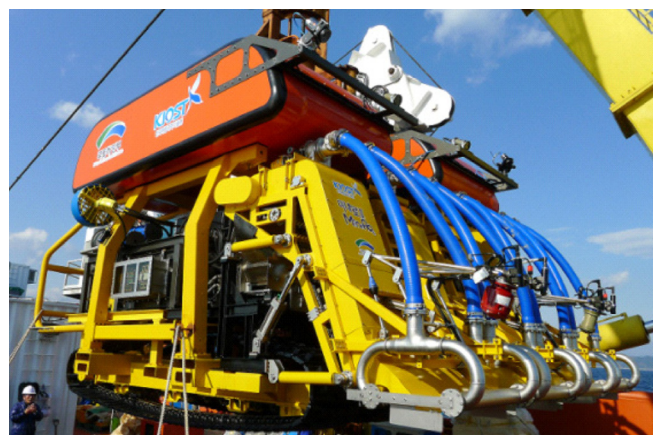


Fig. 1 Pilot mining robot (MineRo)

Received 21 November 2013, revised 18 March 2014, accepted 10 April 2014

Corresponding author Hyung-Woo Kim: +82-42-866-3871, hyungwoo4601@kriso.re.kr

© 2014, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KSOE Fall conference 2013 in Seoul.

다.(Lee et al., 2009) 심해저 채광 로봇의 주행 해석에 있어서 가장 중요한 요소는 궤도와 지반과의 상호작용관계이다. 선박해양플랜트연구소에서는 심해저 지반의 모사지형을 만들고 수치해석을 위한 토양모델에 필요한 토양의 전단강도 및 기타 계수를 측정하기 위한 노력을 수행하여왔다(Hong and Choi, 2001). 이러한 실험은 장비가 크기 때문에 필요한 토양 샘플의 양이 많이 필요하다. 하지만, 실제 실험지역의 토양 샘플을 원하는 양만큼 얻기가 쉽지 않고, 또한 작은 양의 샘플을 이용하여 측정할 수 있는 토양모델 계수의 수가 한정되어 있기 때문에 실험을 수행하여 정확한 토양모델 계수를 얻기란 쉽지 않은 일이다. 그렇기에 실제 실험환경에서의 결과를 예측하는데 어려움이 있다.

본 논문에서는 기 설계된 미내로의 입력 속도 및 선회비를 입력하고, 다양한 토양모델 계수에 따른 주행성능을 분석하고자 한다. 이때 고려해야 할 변수의 개수가 많고, 또한 변수의 값의 구간이 많을 경우 해석해야 하는 경우의 수가 많아져 많은 시간이 소요된다. 그렇기 때문에 본 논문에서는 적은 해석을 통해 전체의 경향을 분석할 수 있는 직교 배열표를 활용하고자 한다. 이를 토대로 실제 실험지역에서의 토양모델 계수 값을 예측하고, 실험역에서 미내로의 주행특성을 예측하고자 한다.

2. 수치해석 모델

2.1 수치해석을 위한 미내로 제원

수치해석을 위한 미내로의 제원은 Table 1에 나타나 있다. 이러한 값은 Fig. 2에서와 같이 3차원 CAD(Computer aided design) 모델에서부터 측정을 하였으며, 실제 무게측정을 통하여 확인을 하였다.

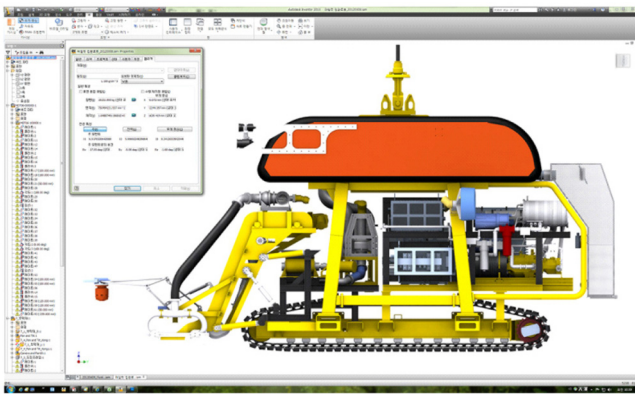


Fig. 2 3D CAD model of MineRo

Table 1 Specifications of MineRo model

MineRo model	
Total mass(in air) [ton]	27.336
Total mass(in water) [ton]	9.381
Contact length of track [m]	4.049
Contact width of track [m]	0.7
Contact area [m ²]	11.336
Contact pressure [kPa]	8.115

2.2 수치해석을 위한 토양모델의 계수 측정

궤도와 지반과의 상호작용에 의한 힘을 나타내는 토양모델은 크게 수직응력과 전단응력으로 나눌 수 있다. 수직응력은 식 (1)과 같이 압력-침하간의 관계식으로 표현된다.

$$p = p_0(1 - K_1 \cdot i_s)(1 - e^{-K_2 \cdot i_s}) \quad (1)$$

여기서 K_1 과 K_2 는 Fig. 3에서 보듯이 직선의 기울기를 나타낸다. p^* 는 Fig. 3에서 기울기가 K_1 인 점근선의 y 절편을 의미한다. 전단응력은 식 (2)와 같이 전단변위-전단응력의 관계식으로 표현된다(Wong, 1993).

$$\tau = \frac{\tau_m}{E} \left[1 + \left(\frac{E}{1 - e^{-1}} - 1 \right) e^{1 - \frac{s}{k_w}} \right] \left(1 - e^{-\frac{s}{k_w}} \right) \quad (2)$$

여기서, τ_m 은 최대 전단응력을 나타내고 E 는 민감도로서 잔류응력(τ_{res})에 대한 최대 전단응력의 비를 나타내며, k_w 는 최대 전단응력이 발생하는 부분의 전단변위를 나타내며, s 는 전단변위를 의미한다. 함수특성 곡선은 Fig. 4와 같다.

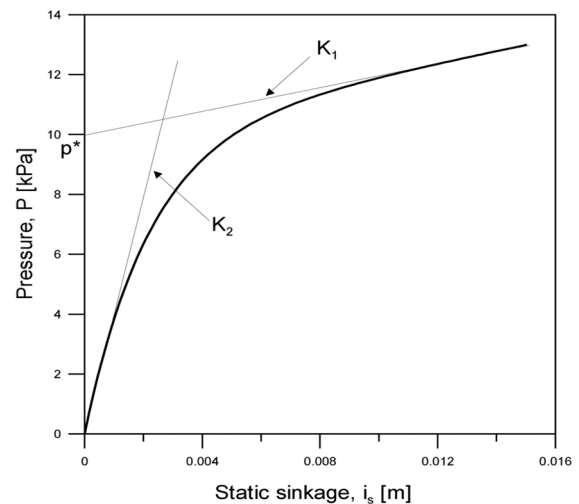


Fig. 3 Pressure-sinkage model

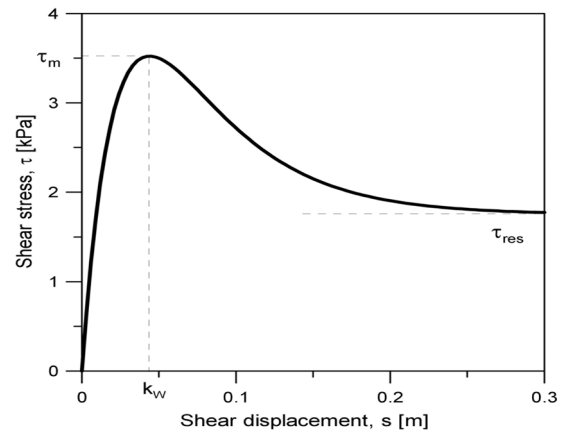


Fig. 4 Shear stress-displacement model

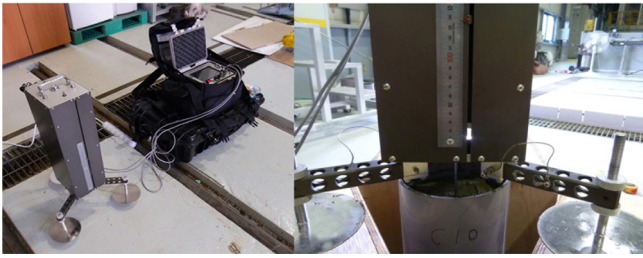


Fig. 5 Shear stress measurement equipment

Table 2 Shear stress of inshore test site

Sample No.	Maximum shear stress (τ_m) [kPa]	Residual shear stress (τ_{res}) [kPa]	Sensitivity ($E = \frac{\tau_m}{\tau_{res}}$)
ST02.DEPT H060	4.08	1.52	2.69
ST04.DEPT H060	3.76	1.61	2.33
ST05.DEPT H060	4.04	1.42	2.85
ST08.DEPT H060	3.23	1.26	2.56
Average	3.78	1.45	2.60

식 (2)의 토양모델의 최대 전단강도 및 민감도를 구하기 위하여 다음의 Fig. 5에서와 같이 전단강도 계측장치를 이용하여 전단응력을 측정하였다. 실험에 사용된 토양은 실패역 실험 지역에서 중력코어를 통해 획득하였다. Fig. 5와 같이 토양샘플 표면으로부터 6 cm 깊이에서 전단강도를 측정 하였으며, 그 결과는 Table 2에 나타내었다.

이와 같은 실험을 통하여 토양의 최대 전단응력 및 민감도를 측정할 수 있었다. 하지만 이러한 정보는 토양모델의 일부 값에 지나지 않기 때문에 토양의 수직 응력 및 기울기 등 나머지 변수 값을 변화시켜가면서, 변수에 따른 미내로의 주행성능을 분석하여야 한다.

3. 선회 주행을 위한 수치 해석

3.1 수치해석 조건

미내로의 선회 주행을 위하여 다음과 같은 변수 및 값을 선정하였다.

- 선회 기준 속도(V_{Ref}) [m/s] : 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6
- 선회비 : 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9
- 최대전단응력(τ_m) [kPa] : 3, 3.5, 4, 4.5, 5
- 민감도(E) : 2, 2.25, 2.5, 2.75, 3
- 최대전단응력 시 전단변위(k_w) [m] : 0.04, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6
- 토양의 수직 응력(p_0) [kPa] : 11, 13, 15, 17, 19
- 토양모델 계수(K_1) : 10, 15, 20, 25, 30
- 토양모델 계수(K_2) : 370, 420, 470, 520, 570

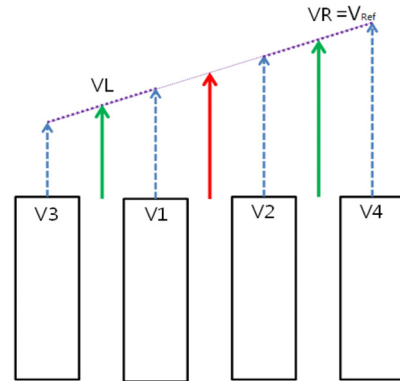


Fig. 6 Definition of reference velocity and steering ratio

여기서, 최대전단응력 및 민감도는 실패역 실험을 통해 측정된 값을 포함하는 범위로 입력 값을 선정하였다. 선회 기준 속도는 선회 시 바깥쪽 궤도의 평균 속도를 나타내며, 선회비는 좌측 궤도와 우측 궤도의 속도 평균의 비를 나타낸다.

$$V_L = \frac{V_1 + V_3}{2}, V_R = \frac{V_2 + V_4}{2} \tag{4}$$

$$SR = \frac{V_R}{V_L} \tag{5}$$

1,000초의 주행 시뮬레이션을 적분간격 10ms로 수행하였을 경우 한 번의 수치해석에 소요되는 시간은 대략 4분 30초이다. 이는 Intel i7 3.5GHz의 성능을 갖는 CPU를 사용하였을 경우의 해석 소요시간이다. 위와 같이 8변수 5수준의 해석을 수행하기 위해서는 총 390,625개의 해석을 수행하여야 한다. 이는 동일 CPU 12개로 나누어 해석을 하여도 대략 100일의 시간이 걸리는 양이다. 그렇기 때문에 본 논문에서는 최적설계기법의 민감도 분석에서 사용되는 직교배열표(Park and Kang, 2007)를 이용하여 총 1840가지의 해석 경우의 수가 도출되었으며, 이를 통해 미내로의 선회 특성을 파악할 수 있도록 하였다.

3.2 수치해석 결과 분석

미내로의 선회 주행 특성을 분석하기 위하여, 응답특성으로 선회반경, 침하량, 궤도의 슬립율을 선정하였다. 궤도의 슬립율은 Fig. 7에서와 같이 각 궤도 중심에서의 속도와 각 궤도의 입력속도를 이용하여 다음의 식 (6)에서와 같이 계산하였다.

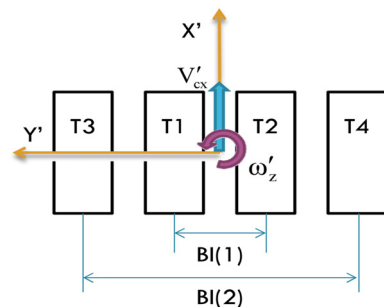


Fig. 7 Input variables and output variables of track

$$SlipRatio_{Ti} [\%] = \frac{V_{In} - (V_{cr}' \pm \omega_z' \frac{BI_i}{2})}{V_{In}} \quad (i=1 \sim 4) \quad (6)$$

여기서 V_{In} 는 각 궤도의 입력속도를 나타내며, V_{cr}' 는 차량 중심에서의 진행방향에 대한 속도, ω_z' 는 차량 중심에서 z축에 대한 회전 각속도를 나타낸다. 이때 BI는 각 궤도에 따라 적용한다. 즉 안쪽 궤도는 BI(1)을 바깥쪽 궤도는 BI(2)를 이용하여 계산한다.

Table 4는 각 요소에 따른 선회반경의 영향도를 분석한 표이다. 이 표에서 보듯이 F ratio가 가장 큰 선회비가 선회반경에 가장 큰 영향을 보임을 확인할 수 있다. 보다 효과적인 분석을 위하여 Fig. 8에 각 요소에 따른 선회반경의 분포도를 나타내었다. 굵은선으로 표시된 선회비 그래프에서 보듯이 선회비가 선회반경에 가장 큰 영향을 보임을 확인할 수 있으며, 선회비가 증가할수록 선회반경이 작아지는 경향을 확인할 수 있다.

이와 같이 선회반경에는 선회비가 가장 중요함을 확인하였다. 선회비는 사용자가 설정 가능한 변수이며, 사용자가 설정할 수

Table 4 Analysis of effect for turning radius of MineRo with respect to input variables

Variables	Sum of squares	F Ratio	Prob > F
Input Velocity	0.773	0.198	0.6564
Steering ratio	26166.772	6706.080	0.0000
Cohesion	4.639	1.189	0.2757
Sensitivity	24.104	6.177	0.0130
k_w	65.342	16.746	<.0001
p_0	3.954	1.013	0.3142
K_1	0.016	0.004	0.9486
K_2	0.184	0.047	0.8281

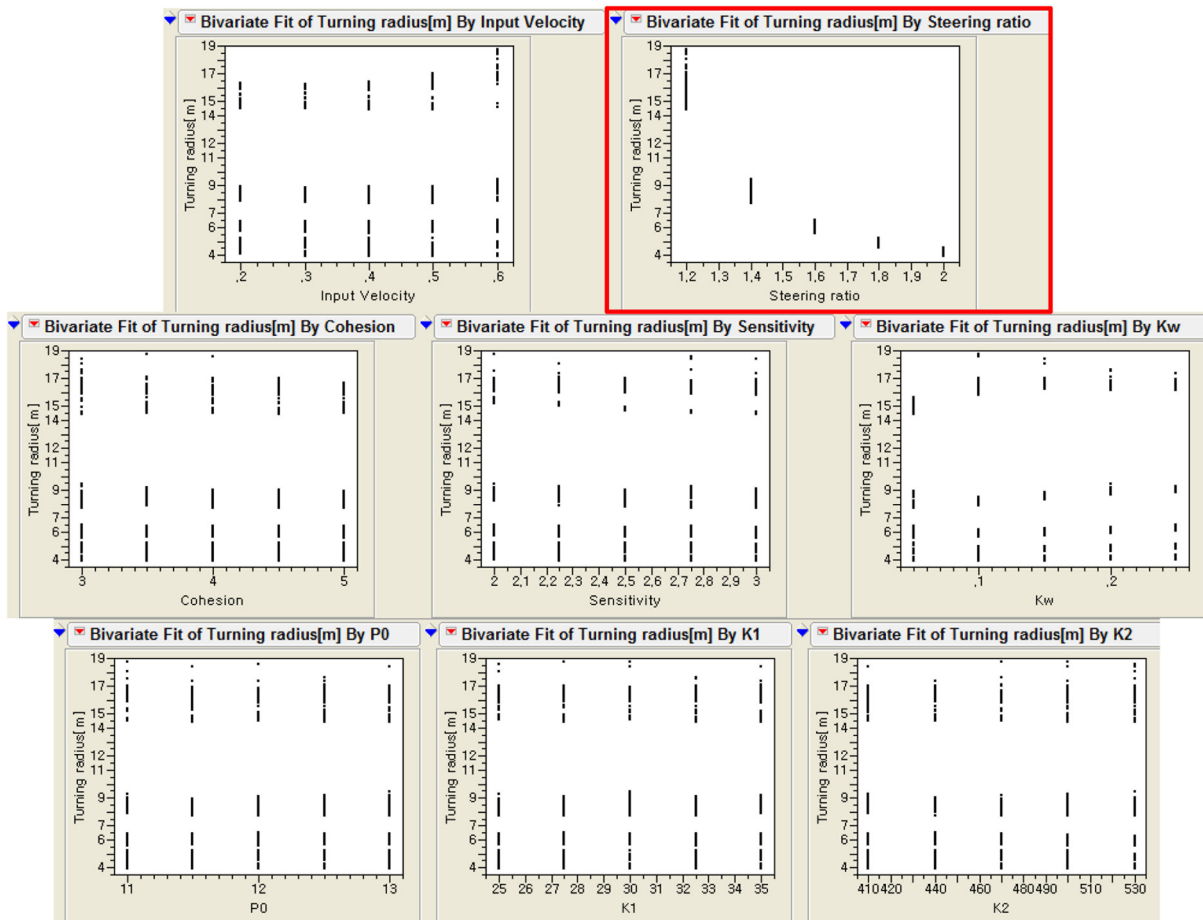


Fig. 8 Bivariate fit of turning radius by input variables

Table 5 Analysis of effect for turning radius of MineRo with respect to input variables (Steering ratio = 1.4)

Variables	Sum of Squares	F Ratio	Prob >F
Input Velocity	0.040	0.905	0.3421
Cohesion	0.177	3.986	0.0467
Sensitivity	5.388	121.474	<.0001
k_w	17.448	393.402	<.0001
p_0	0.144	3.238	0.0728
K_1	0.001	0.023	0.8804
K_2	0.061	1.378	0.2414

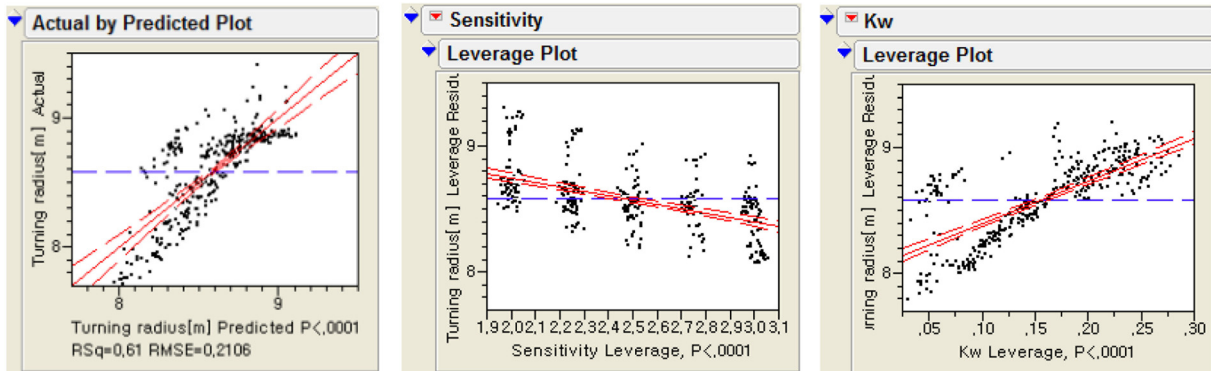


Fig. 9 Actual by predicted plot and bivariate fit of turning radius by sensitivity and k_w of soil

없는 토양계수의 영향도를 자세히 분석하기 위하여 선회비를 고정하였을 경우에 대한 민감도 분석이 필요하다. 그래서 선회비를 1.4로 고정하였을 경우의 결과만을 추출하여 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과 Table 5와 Fig. 9에서와 같이 토양의 민감도와 최대전단강도에서의 전단변위인 k_w 가 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 이는 전단응력-전단변위의 특성에 해당하는 토양의 입력값에 영향을 받는 결과임을 확인할 수 있다. 또한 이러한 결과는 Table 4에서의 결과와 유사하며, 결과는 Fig. 9에서 RSq(R-Square(R제곱값) : 전체 분산 중에서 이 모델이 설명해 주는 비율)가 0.61로 전체 특성의 60 %를 대변하는 결과로 어느 정도 타당성이 있다고 판단된다.

다음의 Table 6과 Fig. 10은 각 요소에 따른 침하량의 영향도

및 그래프를 나타낸 것이다. Fig. 10에서 굵은선 박스는 가장 영향이 큰 것을 표시한 것이며, 점선 박스는 주요한 영향을 미치는 인자에 대한 그래프를 나타낸 것이다. 이 결과에서 보듯이 침하량 역시 선회반경의 영향을 가장 크게 받는 것을 확인할 수 있으며, 선회비가 증가할수록 침하량도 증가하는 경향을 보인다. 또한 침하량의 경우 모든 입력변수의 영향을 받지만 특히 압력-침하에 대한 토양의 입력 값에 영향을 받음을 확인할 수 있다. Fig. 10에서와 같이 p_0 및 K_2 의 값이 증가할수록 침하량은 감소하는 경향을 보인다.

마지막으로 Table 7~10은 각 요소에 따른 슬립율의 영향도를 나타낸 결과이다. 이 결과에서 보듯이 슬립율에 영향을 가장 많이 주는 값은 선회비와 기준 속도임을 알 수 있다. 이때 각 계

Table 6 Analysis of effect for sinkage of MineRo with respect to input variables

Variables	Sum of Squares	F Ratio	Prob >F
Input Velocity	1.10014	47.8515	<.0001
Steering ratio	624.6704	27170.57	0.0000
Cohesion	0.62871	27.3461	<.0001
Sensitivity	0.99078	43.0950	<.0001
k_w	35.63251	1549.866	<.0001
p_0	145.61522	6333.657	0.0000
K_1	23.39429	1017.554	<.0001
K_2	158.99612	6915.671	0.0000

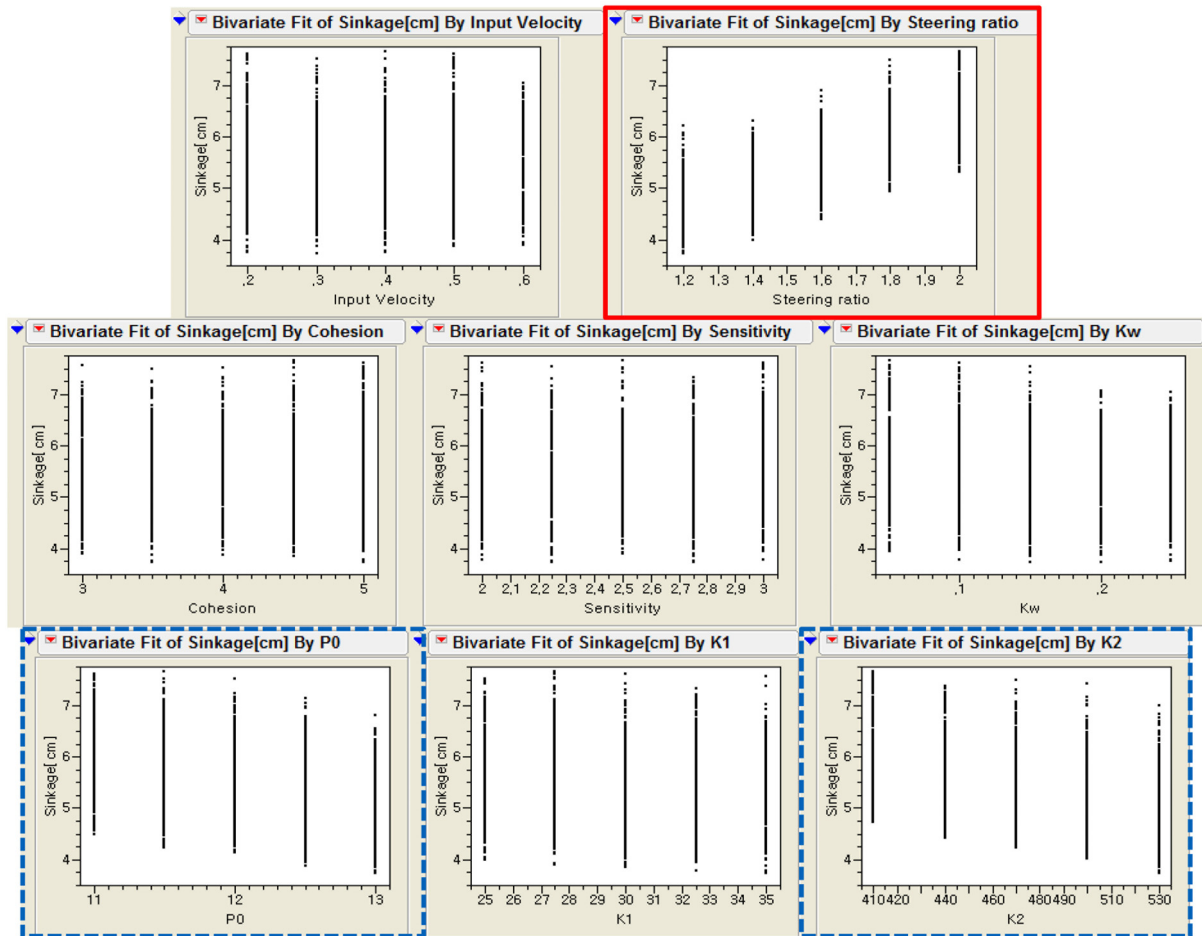


Fig. 10 Bivariate fit of sinkage by input vairables

Table 7 Analysis of effect for slip ratio of track 3 with respect to input variables

Variables	Sum of squares	F Ratio	Prob >F
Input Velocity	3669.214	1093.737	<.0001
Steering ratio	33824.932	10082.700	0.0000
Cohesion	37.929	11.306	0.0008
Sensitivity	735.982	219.385	<.0001
k_w	269.982	80.478	<.0001
p_0	72.683	21.666	<.0001
K_1	56.462	16.831	<.0001
K_2	218.051	64.998	<.0001

Table 8 Analysis of effect for slip ratio of track 1 with respect to input variables

Variables	Sum of squares	F Ratio	Prob >F
Input Velocity	826.310	4320.560	0.0000
Steering ratio	330.984	1730.629	<.0001
Cohesion	58.359	305.143	<.0001
Sensitivity	17.205	89.963	<.0001
k_w	104.961	548.813	<.0001
p_0	0.056	0.295	0.5869
K_1	0.061	0.318	0.5728
K_2	0.344	1.801	0.1798

Table 9 Analysis of effect for slip ratio of track 2 with respect to input variables

Variables	Sum of squares	F Ratio	Prob >F
Input Velocity	1507.178	4910.34	0.0000
Steering ratio	966.334	3148.286	0.0000
Cohesion	43.580	141.982	<.0001
Sensitivity	39.153	127.559	<.0001
k_w	0.080	0.260	0.6104
p_0	11.299	36.811	<.0001
K_1	5.677	18.495	<.0001
K_2	22.702	73.962	<.0001

Table 10 Analysis of effect for slip ratio of track 4 with respect to input variables

Variables	Sum of squares	F Ratio	Prob >F
Input Velocity	526.213	821.862	<.0001
Steering ratio	1274.988	1991.332	<.0001
Cohesion	72.185	112.741	<.0001
Sensitivity	113.897	177.889	<.0001
k_w	293.502	458.405	<.0001
p_0	2.978	4.650	0.0312
K_1	3.305	5.163	0.0232
K_2	15.663	24.462	<.0001

도에 따라 영향도가 다르게 나타남을 확인 할 수 있는데, 가장 바깥쪽 두 궤도(Fig. 6에서 T3, T4 궤도)에서는 선회비가 가장 큰 영향을 주며, 안쪽 두 궤도(Fig. 6에서 T1, T2 궤도)의 슬립율에는 입력 속도가 가장 큰 영향을 미침을 확인 할 수 있다. 또한 각 궤도에 따라 영향을 주는 인자가 다름을 확인할 수 있다. 하지만 주로 전단응력-전단변위 관계식의 입력 계수가 압력-침하 관계식의 입력 계수보다 더 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 파일럿 채광로봇 미내로에 대한 선회 주행 특성을 분석하기 위하여 측정 및 CAD모델을 통하여 실제 모델과 유사한 차량 입력데이터를 얻고, 실제 실험을 통하여 측정하기 어려운 토양모델 계수를 변화시키면서, 다양한 해석 조건에 따른 선회 특성을 분석하였다. 또한 많은 해석조건에 따른 해석 시간을 줄이고자 직교배열표를 사용하였다. 그 결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 선회 반경의 경우 선회비의 영향을 가장 많이 받으며, 또한 이밖에도 주로 전단응력-전단변위에 해당하는 변수의 영향을 받는다.

- 선회비가 증가할수록 선회반경은 작아진다.
- 민감도가 증가할수록 선회반경은 작아진다.
- 최대전단강도에서의 전단변위인 k_w 가 증가할수록 선회반경도 증가한다.

(2) 침하량의 경우도 역시 선회비의 영향을 가장 많이 받으며,

또한 선회반경과는 달리 주로 압력-침하에 해당하는 변수의 영향을 받는다.

- 선회비가 증가할수록 침하량은 작아진다.
- 압력 p_0 가 증가할수록 침하량은 작아진다.
- 기울기 K_2 가 증가할수록 침하량은 작아진다.

(3) 슬립율의 경우 주로 선회 기준 속도 및 선회비의 영향을 크게 받으며, 이밖에 각 궤도의 위치에 따라 결과에 영향을 미치는 인자는 다르다.

향후에는 실험실 실험에서 얻어진 선회주행 결과와의 비교를 통하여 실험실에서의 토양 데이터를 예측하고, 본 논문에서 고려하지 않은 해류 및 경사면 등 다양한 환경조건에 대한 미내로의 주행특성을 분석할 예정이다.

후 기

본 연구는 해양수산부 연구과제인 “심해저 광물자원 통합체 광시스템 개발연구” 과제의 연구결과 중 일부임을 밝힙니다.

References

- Hong, S., Choi J.S., 2001. Experimental Study on Grouser Shape Effects on Trafficability of Extremely Soft Seabed. Proceedings of the 4th Ocean Mining Symposium, Szczecin, Poland, 115-121.
- Hong, S., Kim, H.W., Choi, J.S., Yeu, T.K., Park, S.J., 2008. Development of a Test Miner System for Deep-seabed

- Manganese Nodule, KSOE Spring Conference, 179-184.
- Hong, S., Kim, H.W., Choi, J.S., Yeu, T.K., Park, S.J., Yoon, S.M., Lee, C.H., Lee, D.K., Lee, K.M., 2009. A Test Miner for Deep-seabed Manganese Nodules and Inshore Performance Tests. KSOE Fall Conference, 293-296.
- Hong, S., Kim, H.W., Yeu, T.K., Choi, J.S., Min, C.H., Yoon, S.M., Kim, J.H., Lee, M.U., Sung, K.Y., Lee, C.H., Oh, J.W., Kim, S.S., 2013. The Development of Pilot Mining Robot, MineRo, and Sea Performance Tests. KSOE Fall Conference, 60-63.
- Kim, H.W., Lee, C.H., Hong, S., Choi, J.S., Yeu, T.K., Min, C.H., 2013. Study on Steering Ratio of Four-Row Rigid Tracked Vehicle on Extremely Cohesive Soft Soil Using Numerical Simulation. Journal of Ocean Engineering and Technology, 27(6), 81-89.
- Lee, C.H., Kim, H.W., Choi, J.S., Hong, S., 2009. A Study on the Steering Performance of Four-Row Tracked Vehicle on Extremely Cohesive Soft Soil. KSOE Fall Conference, 310-315.
- Park, G.J., Kang, B.S., 2007. Analytic Methods for Design Practice, Dong Myeong Publishers.
- Wong, J.Y., 1993. Theory of Ground Vehicles, John Wiley & Sons. NewYork.