

Article

부이 특성에 따른 궤도 차량 동적 거동

김형우¹ · 민천홍¹ · 이창호¹ · 홍섭¹ · 배대성² · 오재원^{1,2*}

¹한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소
(305-343) 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 32
²한양대학교 공과대학 기계공학과
(133-791) 서울특별시 성동구 왕십리로 222

Dynamic Analysis of Tracked Vehicle by Buoy Characteristics

Hyung-Woo Kim¹, Cheon-Hong Min¹, Chang-Ho Lee¹, Sup Hong¹,
Dae-Sung Bae², and Jae-Won Oh^{1,2*}

¹Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KIOST
Daejeon 305-343, Korea

²Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Hanyang University
Seoul 133-791, Korea

Abstract : This paper focuses on the dynamic responses of a tracked vehicle crawling on extremely cohesive soft soil, each side of which is composed of two parallel tracks. The tracked vehicle consisted of 2 bodies. One body is the tracked vehicle body, which is assumed to be a rigid body with 6 DOFs. The other body is the buoy body. The two bodies are connected by a revolute joint. In order to evaluate the travelling performance of a 7 DOFs vehicle, a dynamic analysis program for the tracked vehicle was developed using Newmark's method and the incremental-iterative method. The effects of road wheels on the track and soil are not taken into account. A terra-mechanics model of extremely cohesive soft soil is implemented in form of relationships: normal pressure to sinkage, shear resistance to shear displacement, and dynamic sinkage to shear displacement. Pressure-sinkage relationship and shear displacement-stress relationship should represent the non-linear characteristics of extremely soft soil. Especially, since the shear resistance of soft soil is very sensitive to shear displacement, spatial distribution of shear displacement occurring at the contact area of the tracks should be calculated precisely. The proposed program is developed in FORTRAN.

Key words : tracked vehicle, buoy characteristic, cohesive soft soil, revolute joint, terra-mechanics model

1. 서 론

육상광상에 비해 니켈, 코발트, 구리의 함량이 대단히 높은 심해저 망간단괴는 수심 3000~5000m의 전 세계 심해저에 널리 분포되어 있는 대표적인 심해저 광물자원이다. 특히, 태평양의 클라리온-클립퍼톤 해역(CCFZ)에

부존되어 있으며, 막대한 양의 망간단괴는 세계 선진 각국의 상업적 개발의 목표가 되고 있으며, 1970년대 미국, 유럽 등의 선진국을 중심으로 현재까지 활발히 수행되고 있다(Brink and Chung 1981; Chung 1996, 1998; Hong and Kim 1999; Morgan et al. 1999; Liu and Yang 1999; Handschuh et al. 2001; Glasby 2002; Valsangkar 2003; Deepak et al. 2007; Sharma 2011).

심해저의 퇴적지반은 매우 높은 함수율을 가지는 미세

*Corresponding author. E-mail : herotaker@kriso.re.kr

한 입자들로 구성되어 지반의 지지력이 매우 미약하다는 문제점을 가진다. 이러한 미약한 지반 지지력으로 인해 상업생산에 요구되는 연간 150만~300만톤에 달하는 망간단괴를 집광시스템으로 실어 운반하는 것은 불가능하며, 해상의 채광선까지 양광관을 통하여 연속적으로 채광하는

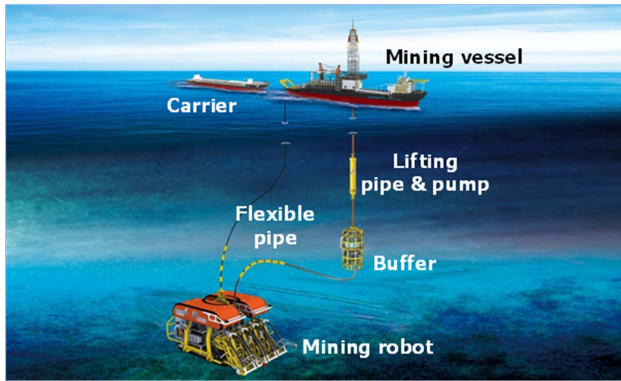


Fig. 1. Conceptual diagram of deep-seabed integrated mining system



Fig. 2. Pilot mining robot (MineRo)

것(Continuous mining, Fig. 1 참조)이 필요하다(Brink and Chung 1981; Hong and Kim 1999). 연속적 채광시스템은 Fig. 1처럼 해상의 채광선, 양광관, 중간버퍼, 유연관, 자항식 집광로봇으로 구성되어 있다.

선박해양플랜트연구소에서는 망간단괴 상용화 기반 구축의 일환으로 파일럿 규모의 자항식 채광로봇(MineRo®, Fig. 2)이 2012년에 개발되었으며, 심해저 연약 지반에서 안정적인고 효율적인 주행을 위해 4열 궤도 차량으로 개발이 되었다(Hong et al. 2001, 2002; Kim et al. 2003; 최 등 2004, 2006; 김 등 2007). 2012년과 2013년 동해에서 파일럿 채광로봇의 실험역 성능시험을 성공적으로 수행하였다. 자항식 집광로봇으로부터 채집된 망간단괴를 저장장소인 버퍼까지 이송하기 위해 자항식 채광로봇과 버퍼 사이에는 유연관으로 연결되어 있다(Fig. 1 참조). 유연관은 채집된 망간단괴를 안정적으로 중간저장장소인 버퍼까지 이송하면서 집광로봇의 주행성능에 영향을 주지 않기 위해 유연관에 다수의 부력재를 장착하여 S 형상을 유지해야 한다. 하지만 이는 해양이라는 특수 환경으로 인해 설계 및 설치의 어려움이 있고, 유연관의 특성상 해류에 의해 큰 거동을 갖게 된다. 이에 따라 채광 로봇의 주행성능에 영향을 미칠 수밖에 없다. 따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 유연관의 거동과 채광 로봇의 거동을 분리시켜야만 한다.

채광 로봇과 유연관의 거동을 분리하는 방법으로 본 논문에서는 Fig. 3과 같이 부이 구조물을 장착하는 방법을 제안하였다. 유연관은 채광 로봇의 heave와 pitch 움직임에 가장 큰 영향을 준다. 부이 구조물과 채광 로봇을 회전 가능한 조인트 형태로 장착하고 부이에 유연관을 장착하여 채광 로봇의 heave와 pitch 움직임을 독립적으로 할 수 있다. 이 때, 장착될 부이 특성에 영향을 주는 부력크기와 장착위치 등의 설계 인자 결정은 매우 중요하다. 부이의 부력은 채광 로봇의 접지력에 영향을 주어 주행 특성

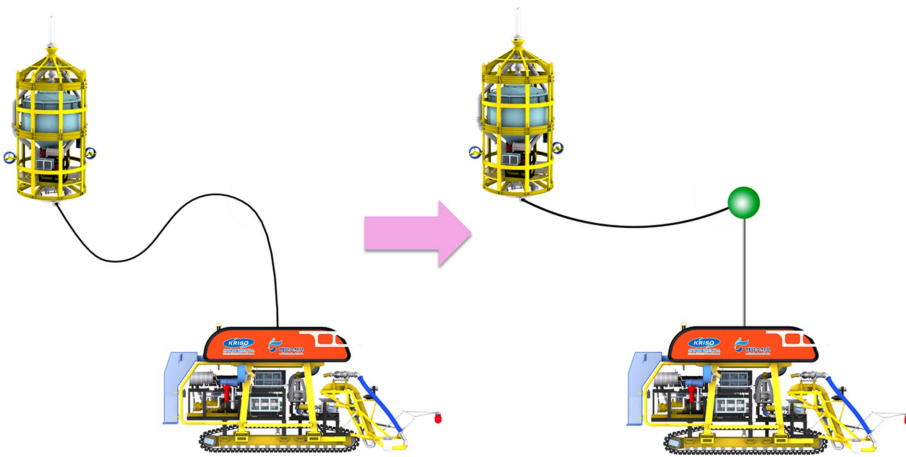


Fig. 3. Conceptual diagram for decoupled motion of MineRo and Buoy

을 변화시킬 수 있고, 부이의 장착 위치에 따라 부이와 채광 로봇을 연결시켜 주는 파이프의 길이가 달라짐으로써 모멘트 변화로 접지력에 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 부이의 부력과 장착위치에 따른 MineRo의 주행 성능에 대해 고찰하였으며, 향후 부이의 설계에 반영하고자 한다.

2. 해석모델

지배방정식

MineRo와 부이 구조물 2개의 강체와 이들을 연결하는 조인트로 구성된 차량의 운동방정식을 유도하기 위해서 2개의 강체에 대한 기구학적 개념도 Fig. 4처럼 정의한다. $X-Y-Z$ 는 절대좌표계, $X'-Y'-Z'$ 은 강체의 좌표계, $X''-Y''-Z''$ 은 조인트 좌표계를 의미한다.

본 연구에서 사용한 수치적 방법은 recursive formulation으로 기준 강체를 제외한 다른 강체들은 조인트 좌표계로 변환되어 표현된다. 따라서 부이의 기구학적 정보는 조인트 좌표계로 변환하여 표현한다. 두 강체 사이의 위치에 대한 기구학적 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$r_1 = r_0 + A_0 s'_0 \quad (1)$$

$$A_1 = A_0 C_{01} A''_{01} \quad (2)$$

$$A''_{01} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, C_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, r_0 은 MineRo의 무게중심까지의 위치벡터, r_1 은 부이 구조물의 조인트 좌표계의 위치벡터이고, A_0 와 A_1 은 두 강체의 자세행렬을 나타낸다. s'_0 은 차량의 무게중심에서 조인트까지의 국부위치벡터를 의미한다. C_{01} 은 채도 차량과 조인트좌표계와의 자세관계를 의미하고 A''_{01} 은 조인트좌표계와 부이 구조물과의 자세관계를 의미한다.

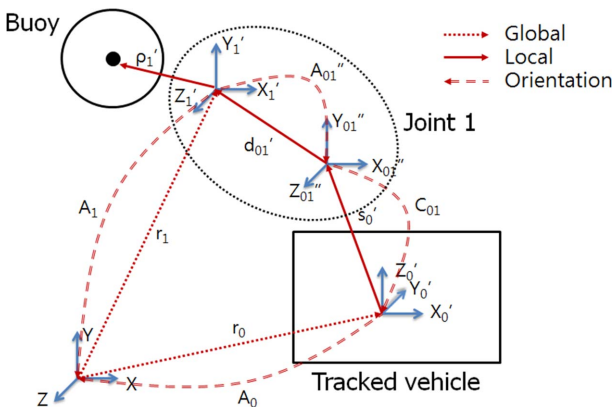


Fig. 4. Free body diagram of 7 DOFs (value of d_{01} is zero)

두 강체 사이의 국부 속도 관계식은 기구학적 관계식의 시간미분을 통해 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{r}'_1 = A_1^T A_0 \dot{r}'_0 - A_1^T A_0 \tilde{s}'_0 \omega'_0 \quad (4)$$

$$\omega'_1 = A_1^T A_0 \omega'_0 + A_1^T A_0 H_{01} \dot{\theta}_1 \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{r}'_1 \\ \omega'_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^T A_0 & -A_1^T A_0 \tilde{s}'_0 \\ 0 & A_1^T A_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r}'_0 \\ \omega'_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ A_1^T A_0 H_{01} \end{bmatrix} \dot{\theta}_1 \quad (6)$$

여기서, \dot{r}'_0 와 \dot{r}'_1 은 MineRo와 부이 구조물의 국부 병진속도벡터, ω'_0 와 ω'_1 은 국부 회전속도벡터, $\dot{\theta}_1$ 은 조인트의 회전속도이고, $H_{01} = A''_{01} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 이다.

두 강체 사이의 국부 가속도에 대한 기구학적 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{r}'_1 = A_1^T A_0 \ddot{r}'_0 - A_1^T A_0 \tilde{s}'_0 \dot{\omega}'_0 - A_1^T A_0 H_{01} \dot{r}'_0 \dot{\theta}_1 - A_1^T A_0 H_{01} \tilde{s}'_0 \omega'_0 \dot{\theta}_1 \quad (7)$$

$$\dot{\omega}'_1 = A_1^T A_0 \dot{\omega}'_0 + A_1^T A_0 H_{01} \omega'_0 \dot{\theta}_1 + A_1^T A_0 H_{01} \ddot{\theta}_1 \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{r}'_1 \\ \dot{\omega}'_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^T A_0 & -A_1^T A_0 \tilde{s}'_0 \\ 0 & A_1^T A_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r}'_0 \\ \dot{\omega}'_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ A_1^T A_0 h_{01} \end{bmatrix} \ddot{\theta}_1 + \begin{bmatrix} -A_1^T A_0 H_{01} & A_1^T A_0 H_{01} \tilde{s}'_0 \\ 0 & -A_1^T A_0 H_{01} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r}'_0 \\ \omega'_0 \end{bmatrix} \dot{\theta}_1 \quad (9)$$

여기서, \ddot{r}'_0 와 \ddot{r}'_1 은 MineRo와 부이 구조물의 국부 병진가속도벡터, $\dot{\omega}'_0$ 와 $\dot{\omega}'_1$ 은 국부 회전가속도벡터, $\ddot{\theta}_1$ 은 조인트의 회전가속도이다.

두 강체 사이에 대한 newton-euler formulation을 이용한 일반적인 운동방정식은 다음과 같다.

$$\delta Z_0^T (M_0 \dot{Y}_0 - Q_0) + Q Z_1^T (M_1 \dot{Y}_1 - Q_1) = 0 \quad (10)$$

여기서, Z_0, Z_1 은 두 강체의 상태변수로 3방향의 병진과 3방향의 회전에 정의된다. \dot{Y}_0, \dot{Y}_1 는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{Y}_0 = \begin{bmatrix} \dot{r}'_0 \\ \dot{\omega}'_0 \end{bmatrix}, \dot{Y}_1 = \begin{bmatrix} \dot{r}'_1 \\ \dot{\omega}'_1 \end{bmatrix}$$

식 (10)의 Newton-euler formulation을 recursive newton-euler formulation으로 변환하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M_0 + B_{11}^T M_1 B_{12} & B_{11}^T M_1 B_{12} \\ B_{12}^T M_1 B_{11} & B_{12}^T M_1 B_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Y}_0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_0 + B_{11}^T Q_1 - B_{11}^T M_1 B_{13} Y_0 \dot{\theta}_1 \\ B_{12}^T Q_1 - B_{12}^T M_1 B_{13} Y_0 \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서, $B_{11} = \begin{bmatrix} A_1^T A_0 & -A_1^T A_0 S_0^T \\ 0 & A_1^T A_0 \end{bmatrix}$, $B_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ A_1^T A_0 H_{01} \end{bmatrix}$, $B_{13} = \begin{bmatrix} -A_1^T A_0 H_{01} & A_1^T A_0 H_{01} S_0^T \\ 0 & -A_1^T A_0 H_{01} \end{bmatrix}$ 이다.

Recursive formulation을 이용하면 상태 변수가 총 12자

유도에서 7자유도로 줄어들어 전체 시스템 행렬의 수가 적어져서 계산량이 줄어들게 된다.

동역학 모델과 해석 조건

동역학 해석을 위해서는 각각의 강체에 대한 물성 정보는 Table 1과 같다. 입력된 두 개의 강체는 Fig. 5(a)와 같

Table 1. Properties of MineRo and Buoy

Parameter		Value
MineRo model	Total mass (in air)	27.336 [ton]
	Total mass (in water)	9.381 [ton]
	Drag coefficient	5.0
Buoy model	Total mass	2.0 [ton]
	Drag coefficient	0.47
	Max. equipment height	50.0 [m]

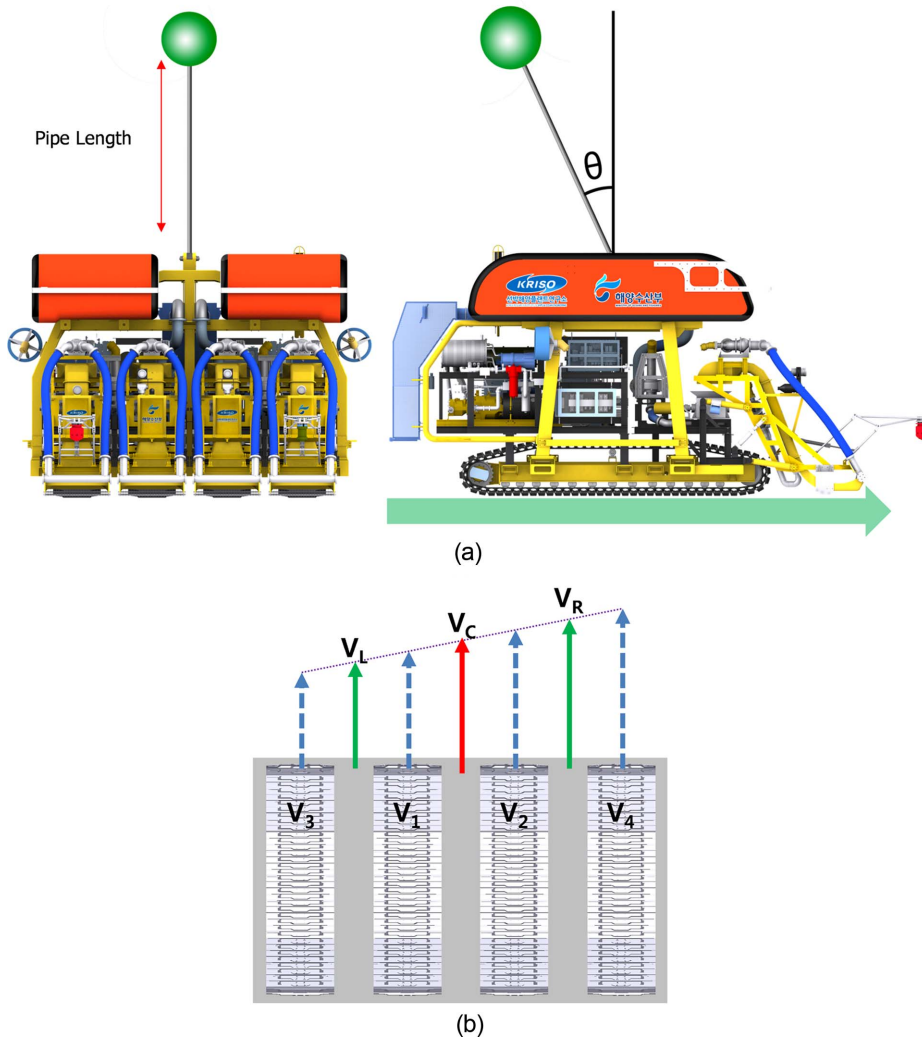


Fig. 5. Dimensional schematic for dynamic analysis: (a) is dynamic model of the MineRo and Buoy, (b) is velocity profile and definition for driving of MineRo

이 배치된다. 이 때 MineRo는 6 자유도 거동이 가능하지만 부이는 회전 방향에 대해서만 거동이 가능하다. 또한 MineRo는 직진 주행과 Fig. 5(b)와 같은 속도 프로파일에 의해 선회 주행을 한다. 선회 주행을 위해서는 여러 종류의 속도 프로파일이 존재하지만 본 연구에서는 선회 성능이 가장 좋은 속도 프로파일을 사용하였다(Kim et al. 2013). 각각의 궤도 속도를 정의하기 위해서 V_R 을 기준 속도로 정의하고 나머지 속도 변수들 간의 관계는 다음과 같이 정의하였다.

$$V_L = \frac{V_3 + V_1}{2}, V_R = \frac{V_2 + V_4}{2} \quad (12)$$

Table 2. Design variables and condition for simulation

Description	Design variables				
Pipe length [m]	P1 10	P2 20	P3 30	P4 40	P5 50
Buoyancy [ton]	B1 2.25	B2 2.5	B3 2.75	B4 3.0	
Input velocity [m/s]	V1 0.3	V2 0.4	V3 0.5		
Steering ratio	S1 1.2	S2 1.4	S3 1.6	S4 1.8	S5 2.0

$$SR = \frac{V_R}{V_L} \quad (13)$$

여기서, SR 은 선회비를 의미한다.

연약 지반 특성은 Kim et al. (2013)의 연구에서 검증된 값을 이용하여 오직 부이의 특성에 관련된 변수만을 설계 변수로 정의하였다. 설계 변수는 부이와 MineRo를 연결하는 관의 높이, 부이의 부력 크기, 궤도의 주행 속도, 궤도의 선회비이다. 각각의 변수에 대한 수치들은 Table 2에서 보여준다.

3. 결 과

결과는 직진 주행과 선회 주행으로 분류하고 직진 주행에서 차량의 동적 거동에 대한 부이의 영향력을 분석하고 선회 주행에서 주행 특성에 영향을 미치는지 확인하고자 한다.

직진 주행

MineRo의 직진 주행 시 알 수 있는 특성은 Fig. 6에서 나타내는 차량의 침하량, Fig. 7에서 보여주는 차량의 회전각, Fig. 8과 같은 부이의 거동 특성이다. Fig. 6에서 (a)는 고정된 파이프 길이와 동일한 주행 속도에서 부이의 부력 크기에 따른 차량 침하를 보여준다. 부력의 크기가

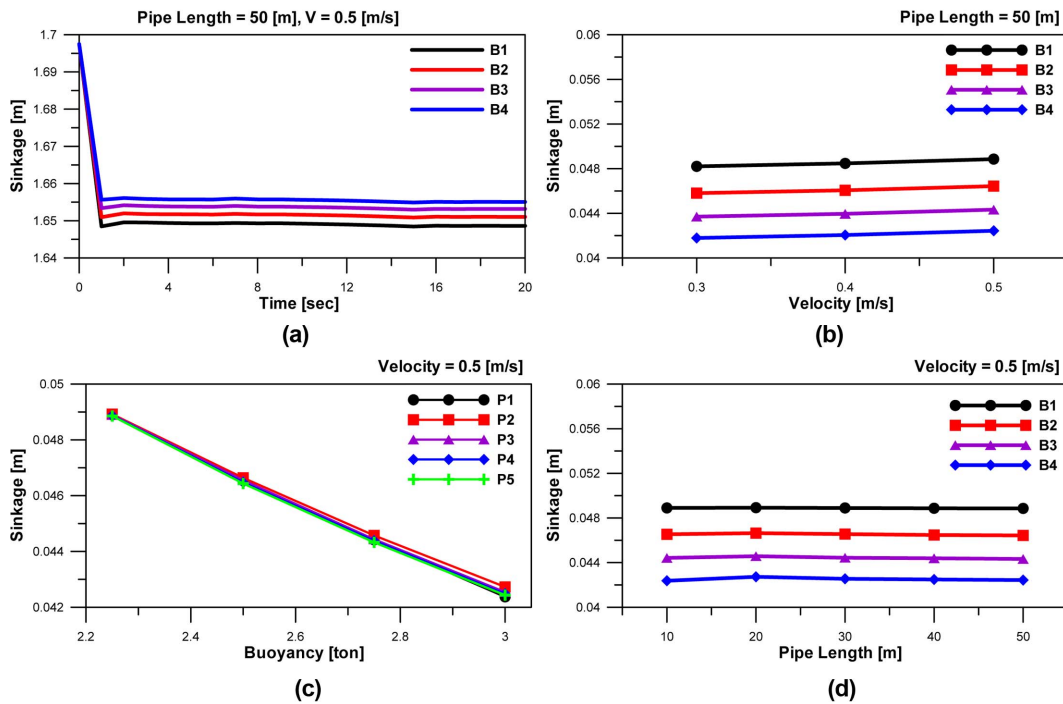


Fig. 6. Straight drive simulation results of vehicle's sinkage: (a) is time domain results by buoyancy variables, (b) is results by velocity and buoyancy variables, (c) is results by buoyancy and pipe length variables, (d) is results by pipe length and buoyancy variables

커질수록 차량의 중량이 상대적으로 감소하기 때문에 침하가 덜 발생함을 확인할 수 있다. (b), (c), (d)는 주행 속도, 파이프 길이, 부이의 부력 크기에 따른 침하량의 민감도를 나타낸다. (b)에서는 주행 속도가 증가 시 침하량이 더 발생하고 부력 크기의 증가 시 차량의 침하량이 덜 발

생함을 확인할 수 있다. 이 때, 주행 속도보다는 부력의 크기가 침하량의 크기에 더 크게 기여함을 알 수 있다. (c)에서는 동일한 주행 속도에서 부력의 크기와 파이프의 길이에 따른 침하량의 관계를 확인할 수 있다. 동일한 주행 속도 시, 부력의 크기가 커질수록 침하량이 감소하며 파이프

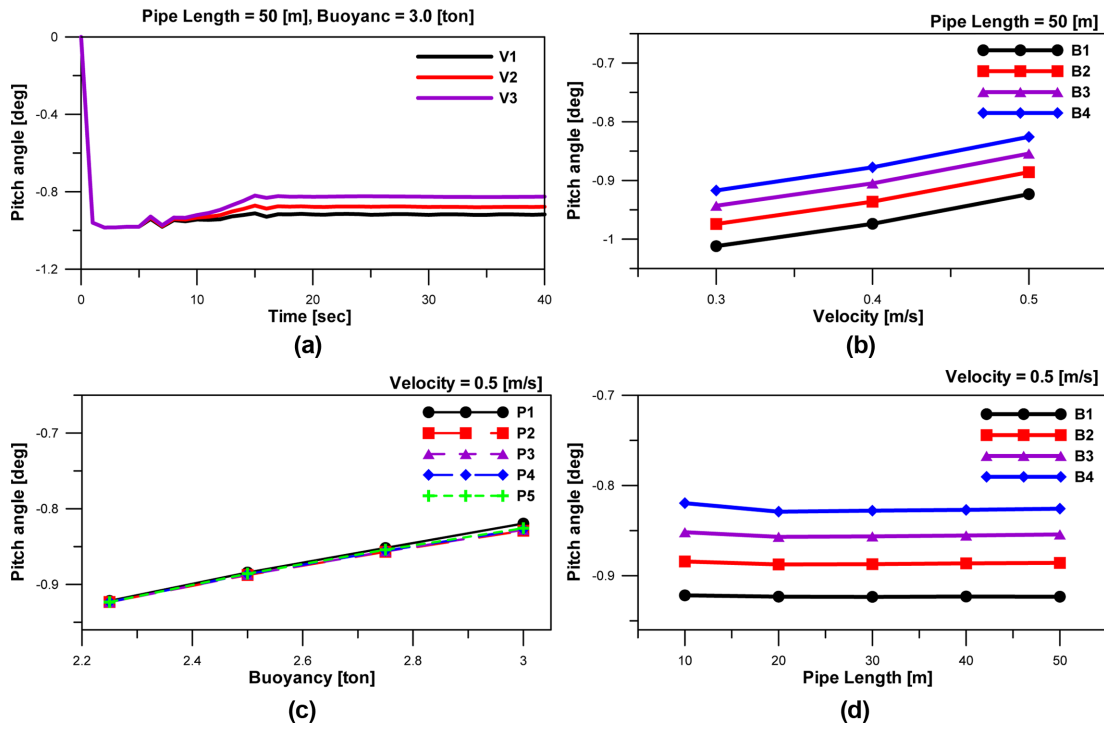


Fig. 7. Straight drive simulation results of vehicle’s pitch angle: (a) is time domain results by velocity variables, (b) is results by velocity and buoyancy variables, (c) is results by buoyancy and pipe length variables, (d) is results by pipe length and buoyancy variables

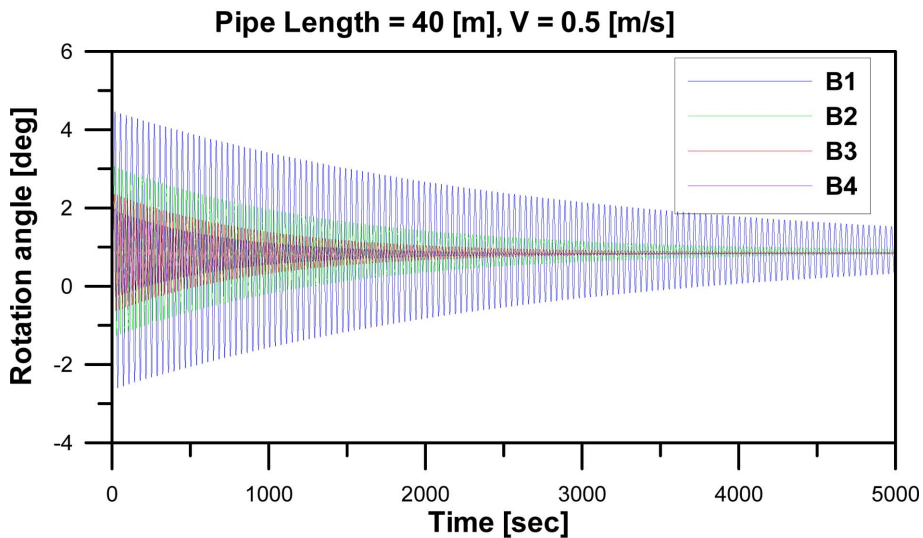


Fig. 8. Straight drive simulation result of buoy’s pitch angle by buoyancy variables

길이가 길어질수록 침하량이 감소함을 확인할 수 있다. 하지만 파이프의 길이에 따른 침하량의 변화가 너무 적기 때문에 기여도가 거의 없다고 할 수 있다. (d)에서는 동일한 주행 속도에서 부력의 크기와 파이프 길이에 따른 침하량 변화를 보여주고 있다. 여기서 확실히 알 수 있는 사실은 파이프의 길이가 침하량의 변화에 거의 기여하지 않음을 확인할 수 있고, (b), (c), (d)를 종합해서 분석하면 부력의 크기가 침하량에 가장 큰 기여를 하며, 파이프 길이는 거의 기여하지 않는다.

Fig. 7에서 (a)는 고정된 파이프 길이와 부력의 크기에서 주행 시 발생하는 차량의 회전각을 보여준다. 속도가 증가할수록 회전각의 변화가 큼을 확인할 수 있다. 차량의 초기 회전각은 차량의 무게 중심의 불균형으로 인해 -1.0 deg가 된다. (b), (c), (d)는 주행 속도, 파이프 길이, 부이의 부력 크기에 따른 차량 회전각의 민감도를 나타낸다. (b)에서는 주행 속도와 부력 크기의 증가 시 회전각이 더 작아짐을 확인할 수 있다. (c)에서는 동일한 주행 속도에서 부력의 크기와 파이프의 길이에 따른 회전각의 변화를 확인할 수 있다. 동일한 주행 속도 시, 부력의 크기가 커질수록 회전각이 감소하지만 파이프 길이에 따라서는 거의 변화하지 않는다. (d)에서는 동일한 주행 속도에서 부력의 크기와 파이프 길이에 따른 회전각의 변화를 보여주고 있다. 여기서 확실히 알 수 있는 사실은 파이프의 길이가 회전각의 변화에 거의 기여하지 않음을 확인할 수 있고, (b), (c), (d)를 종합해서 분석하면 부력의 크기와 주행 속도가 차량의 회전각에 가장 큰 기여를 하며, 파이프 길이는 거의 기여하지 않는다.

Fig. 8은 차량 주행 시 부이의 회전각에 대한 동적 거동을 보여준다. 부이는 차량과 하나의 회전 자유도를 갖기 때문에 회전각에 대한 결과만을 고찰한다. 파이프의 길이가 40 m, 주행 속도가 0.5 m/s일 때 부이의 회전각은 부력의 크기에 따라 큰 차이가 발생한다. 부이의 회전각의 변화는 차량이 주행함에 따라 진동 특성이 발생하는데 이러한 진동은 부력의 크기가 클수록 소멸된다. 그러나 부이의 크기가 B1, B2일 경우 진동 크기는 줄어들지만 진동 자체

가 소멸하지는 않았다. 이는 파이프의 길이와 부력 크기 간의 관계에 따라 차량과 상관없이 부이의 진동에 지배적인 영향을 미치게 되고 이는 조인트의 내구성에 영향을 주기 때문에 중요한 설계 인자가 된다. Table 3은 파이프 길이와 부력의 크기의 관계에 따른 부이의 진동 특성을 보여준다. 파이프의 길이가 짧을수록 진동은 발생하지 않고 파이프의 길이가 길어질수록 진동이 발생한다. 또한 부력의 크기가 커질수록 진동이 발생하지 않고 작을수록 진동이 잘 발생한다. 따라서 부이의 동적 거동 특성에 지배적인 인자는 부력과 파이프 길이가 되고 속도는 영향력이 거의 없는 것을 알 수 있었다.

선회 주행

Fig. 9는 MineRo의 선회 주행 시 속도, 파이프 길이, 부력의 크기, 선회비에 따른 선회 반경 특성 및 민감도를 나타내고 있다. MineRo는 선회비에 따라 선회 반경이 다른 주행을 하게 되고 이는 Fig. 9(a)를 통해 확인할 수 있다. 선회비가 커질수록 좌측과 우측 궤도의 속도 차가 크게 발생하기 때문에 선회 반경은 작아진다. 하지만 부이를 연결할 경우 선회 반경이 영향을 받을 수도 있고, 이 때 선회 반경의 특성이 어떻게 변화하는지에 대해 분석하여야 할 필요성이 있다. 부이의 거동이 MineRo의 거동에 영향을 주지 않는 것이 좋으며, 따라서 선회 반경에 거의 영향을 주지 않아야 한다. (b), (c), (d)는 부이와 MineRo의 연결 시 선회 반경 특성을 보여준다. (b)에서는 동일한 파이프 길이와 선회 반경 시, 주행 속도와 부력의 크기에 따른 선회 반경의 민감도를 보여준다. 여기서 부이의 부력 크기와 주행 속도는 선회 반경에 미치는 영향은 거의 없으며, 다만 부력의 크기가 커질수록 속도에 따른 선회 반경의 변화가 거의 없고, 속도가 커질수록 부력의 크기에 따른 선회 반경의 변화가 거의 없었음을 확인할 수 있었다. 이는 속도와 부력의 크기가 상호간에 관여하고 있음을 보여준다. (c)에서는 동일한 속도와 부력 크기일 때, 파이프의 길이와 선회비의 변화에 따른 선회 반경의 크기를 보여준다. 여기서, 파이프의 길이의 변화에 따라서는 선회 반경의 변화가 거의 없었고 선회비는 명확하게 기여하고 있음을 확인할 수 있다. (d)에서는 동일한 주행 속도와 선회 비에서, 파이프 길이와 부력의 크기 변화에 따른 선회 반경의 크기를 보여준다. 파이프의 길이가 커질수록 선회 반경이 커지고 부력의 크기가 커질수록 선회반경이 작아짐을 확인할 수 있었다. (b), (c), (d)를 종합해서 분석하면 선회 반경의 변화에 지배적인 영향을 미치는 인자는 궤도의 선회비이고 파이프의 길이와 부력의 크기, 주행 속도는 기여도가 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 부이를 장착하더라도 MineRo의 선회 주행 특성에는 큰 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3. Vibration occurrence of buoy by combinations of pipe length and buoyancy variables

		Buoyancy [ton]			
		B1	B2	B3	B4
Pipe length [m]		2.25	2.5	2.75	3.0
	P1	10	X	X	X
P2	20	O	X	X	X
P3	30	O	O	X	X
P4	40	O	O	X	X
P5	50	O	O	O	X

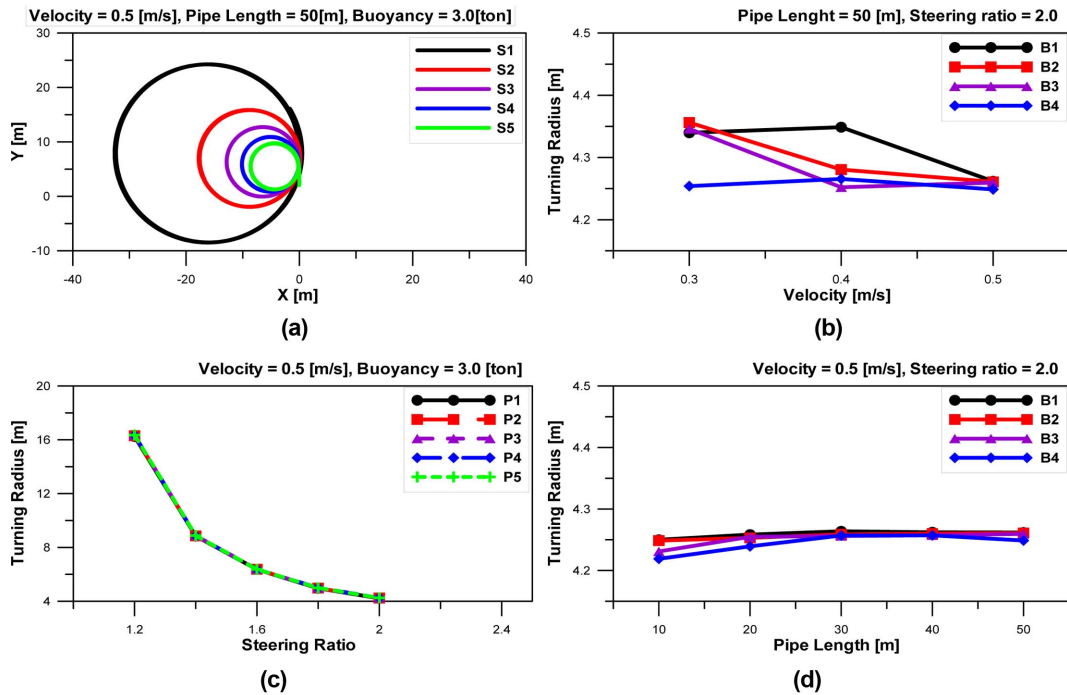


Fig. 9. Turning drive simulation results of vehicle's turning radius: (a) is time domain results by steering ratio variables, (b) is results by velocity and buoyancy variables, (c) is results by steering ratio and pipe length variables, (d) is results by pipe length and buoyancy variables

4. 요약 및 결론

심해저 광물 채광 로봇 MineRo의 주행 성능을 향상시키기 위해서 기존의 유연관과 직접적인 체결 방식을 변경하여 유연관의 거동이 MineRo의 거동에 영향을 주지 않도록 거동을 분리하는 방안을 본 연구에서 제시하였다. 제안된 방안의 효율성을 검증하기 위해 수치해석 시뮬레이션을 수행하였다. 직진 주행에서는 부이로 인해 차량의 침하 정도와 회전, 부이의 거동 특성을 확인하였고 선회 주행에서는 차량의 선회 반경 영향력에 대해 검토하였다. 수치해석 설계변수로는 부이의 부력 크기, 부이의 장착 위치, MineRo의 주행 속도와 선회비를 사용하였다. MineRo의 거동에 영향을 주는 인자로는 부력의 크기와 주행 속도, 선회비이며 파이프의 길이는 차량의 거동에는 영향력이 없었다. 하지만 파이프의 길이는 부이의 거동에 진동 발생 등의 큰 영향을 주었다. 파이프의 길이와 부력의 관계에 따라 진동의 발생 여부를 확인하였고 차후 설계 시 이를 반영할 예정이다. MineRo는 광물 채광 시 직진 주행 뿐만 아니라 선회 주행도 한다. 부이 장착 시 선회 주행 특성에는 영향력이 거의 없었기 때문에 본 연구에서 제안된 유연관과 MineRo의 거동 분리 방법으로 부이 구조물을 장착하는 방법이 타당하다고 판단된다. 또한 부이 장착 시 효과는 유연관과 MineRo 거동의 분리뿐만 아니라 유

연관의 형상이 S 형태가 아닌 catenary 형태이므로 관용 부력재의 추가 구비 및 설치가 필요 없으며 부이 구조물에 펌프 등과 같은 기계 장치를 부수적으로 구축할 수 있다는 공간 확보의 장점이 존재한다. 차후에는 부이 구조물의 실제 설계에 대해 연구를 수행할 예정이다.

사 사

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 “심해저 광물 자원 통합채광시스템 개발 연구(PMS2870)” 과제의 연구 결과 중 일부임을 밝힙니다.

참고문헌

- 김형우, 홍섭, 최종수, 여태경 (2007) 연약지반 무한궤도차량의 다물체 동적거동 해석. 한국해양공학회지 **21**(1):69-74
- 최종수, 홍섭, 김형우, 이태희 (2004) 직교배열표를 실험계획법에 의한 심해 연약지반용 무한궤도차량의 견인성능에 대한 실험적 연구. Ocean and Polar Res **26**(2):231-243
- 최종수, 홍섭, 김형우 (2006) 직교배열표 실험계획법에 의한 심해저 점착성 연약지반용 무한궤도차량의 선회성능에 대한 실험 연구. 한국해양공학회지 **20**(4):37-42
- Brink AW, Chung JS (1981) Automatic position control of a 300,000-ton ship ocean mining system. In: Offshore

- Technology Conference, Houston, 1 December 1981
- Chung JS (1996) Deep-ocean Mining: technologies for manganese nodules and crusts. *Int J Offshore Polar Eng* **6**(4):244-254
- Chung JS (1998) An articulated pipe-miner system with thrust control for deep-ocean crust mining. *Mar Georesour Geotech* **16**:253-271
- Deepak CR, Ramji S, Ramesh NR, Babu SM, Raju A, Shajahan MA, Atmanand MA (2007) Development and tests of underwater mining systems for long term operations using flexible riser concept. In: 7th ISOPE ocean mining symposium, Lisbon, Portugal, 1-6 July 2007
- Glasby GP (2002) Deep seabed mining: past failures and future prospects. *Mar Georesour Geotech* **20**:161-176
- Handsuh R, Grebe H, Panthel J, Schulte E, Wenzlawski B, Schwarz W, Atmanand MA, Jeyamani R, Shajahan M, Deepak C, Ravindran M (2001) Innovative deep ocean mining concept based on flexible riser and self-propelled mining machines. In: 4th ISOPE ocean mining symposium, Szczecin, Poland, 23-27 September 2001
- Hong S, Kim HW, Choi JS (2002) Transient dynamic analysis of tracked vehicles on extremely soft cohesive soil. In: The 5th ISOPE Pacific/Asia offshore mechanics symposium, Daejeon, Korea, 17-20 November 2002
- Hong S, Choi JS (2001) Experimental study on grouser shape effects on trafficability of extremely soft seabed. In: Proceedings of the 4th Ocean mining symposium, Szczecin, Poland, 23-27 September 2001
- Hong S, Kim K (1999) Proposed technologies for mining deep-seabed polymetallic nodules – Chap 12 research and development of deep seabed mining technologies for polymetallic nodules in Korea. In: International seabed authority's workshop, Kingston, Jamaica, 3-6 August 1999
- Kim HW, Hong S, Choi JS (2003) Comparative study on tracked vehicle dynamics on soft soil : single-body dynamics vs. multi-body dynamics. In: ISOPE, OMS-2003, Tsukuba, Japan, 15-19 September 2003
- Kim HW, Lee CH, Hong S, Yeu TK, Choi JS (2013) A study on steering characteristics of pilot mining robot (MineRoll) on extremely cohesive soft soil. In: 42nd Underwater mining institute, Rio, Brazil, 21-29 October 2013
- Liu F, Yang N (1999) Proposed technologies for mining deep-seabed polymetallic nodules – Chap 9 environmentally friendly deep seabed mining system. In: International seabed authority's workshop, Kingston, Jamaica, 3-6 August 1999
- Morgan CL, Odunton NA, Jones AT (1999) Synthesis of environmental impacts of deep seabed mining. *Mar Georesour Geotech* **17**:307-356
- Sharma R (2011) Deep-sea mining: economic, technical, technological, and environmental considerations for sustainable development. *Mar Technol Soc J* **45**:28-41
- Valsangkar AB (2003) Deep-sea polymetallic nodule mining: challenges ahead for technologists and environmentalists. *Mar Georesour Geotech* **21**:81-91

국문 참고자료의 영어 표기

English translation / Romanization of references originally written in Korean

- Kim HW, Hong S, Choi JS, Yeu TK (2007) Multibody dynamic analysis of a tracked vehicle on soft cohesive. *J Ocean Eng Technol* **21**(1):69-74 (in Korean)
- Choi JS, Hong S, Kim HW, Lee TH (2004) An experimental study about tractive performance of tracked vehicle on deep-sea soft sediment based on design of experiment using orthogonal array. *Ocean and Polar Res* **26**(2):231-243 (in Korean)
- Choi JS, Hong S, Kim HW (2006) An experimental study on steering performance of tracked vehicle on deep-sea cohesive soft soil by DOE using orthogonal arrays. *J Ocean Eng Technol* **20**(4):37-42 (in Korean)

Received Oct. 21, 2014

Revised Nov. 16, 2014

Accepted Nov. 29, 2014