

◆특집◆ 응용역학 CAE 엔지니어링

심해저 연약지반 시험집광기 동적거동에 미치는 유체력 영향

김형우*, 홍 섭*

Hydrodynamic Effects on Dynamics of Test Miner on Soft Deep Seafloor

Kim Hyung-Woo* and Hong Sup*

Key Words : Multi-body Dynamic Analysis (다물체 동역학 해석), Test Miner (시험집광기), Soft Soil (연약지반), Soil Mechanics (지반역학), Shear Displacement (전단변위), Sinkage (침하)

1. 서론

심해저 다금속 단괴는 수심 5,000m 해저 퇴적 지반의 표층에 산재하여 부존되어 있기 때문에 상업적 개발을 위해서는 해저면을 주행하며 망간단괴를 끌어 담듯 작업하는 자항식 집광시스템이 절대적으로 필요하다.

이와 같은 자항식 집광시스템 개발을 위해서는 해저주행기술을 포함하는 항법기술과 해저면에 산재해 있는 다금속을 채취할 수 있는 단괴채집기술 그리고 주행차량에서 버퍼까지 단괴를 이송하는 송출기술의 개발이 요구된다. 이러한 각 요소기술들은 각각 독립적이지가 않고 상호간 강하게 연성되어 있기 때문에 각 단위공정들을 구성하는 하부시스템들 간의 통합 최적설계 및 집광공정의 통합운용 기술의 개발이 필요하다. 집광시스템을 해상에서 원격으로 운용하기 위해서는 전체 채광시스템의 동적 거동 예측과 제어기술이 요구되기 때문에 시뮬레이션 기반 설계기술이 개발되어야 한다.

연약지반 주행차량의 동적거동 해석에는 주행차량을 하나의 강체로 가정하여 해석하는 방법과 실제모델과 상당히 유사하게 모델링하는 방법으로 구분되어 연구가 진행되어 오고 있다.^{4,9} 또한, 효율적인 다물체 무한계도 상용 해석프로그램¹⁰이 개발되었다. 하지만 상용프로그램에는 일반적인 지반모델만 포함되어 있을 뿐, 연약한 지반에서의 동적거동에 사용되는 연약지반 모델이 포함되어 있지 않다. Kim et al.⁹은 무한계도 상용 해석프로그램¹⁰의 사용자 정의 서브루틴을 이용하여 Hong et al.⁴에 의해 개발되어진 연약지반 지반역학 모델을 적용시켜 다물체 무한계도 차량의 동적거동 해석을 수행하였다.

본 논문은 해저연약지반 시험집광기의 동적거동 해석을 위해 천천히 움직이는 수중물체에 대한 유체동력학²을 적용하였다. 각 부분에 대해서 부력은 상용소프트웨어에서 제공하는 사용자 정의 서브루틴을 이용하여 정의하였으며, 다양한 항력계수에 따른 다물체 무한계도 주행차량의 동적거동을 분석하였다.

다양한 동적거동 해석을 통하여 분석된 결과는 시험집광기의 설계변경 및 실험역 운용 시나리오 작성에 활용될 예정이다.

* 한국해양연구원 해양시스템기술연구본부

Tel. 042-868-7736, Fax. 042-868-7503

Email guddn@moeri.re.kr

국가 프로젝트인 심해저 광물자원 개발 사업중 집광시스템 및 채광운용기술 개발 부분에 참여하여 연구활동을 하고 있다.

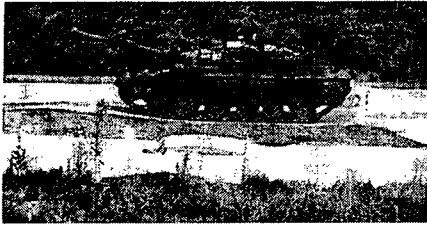


Fig. 1 Field test on profile IV

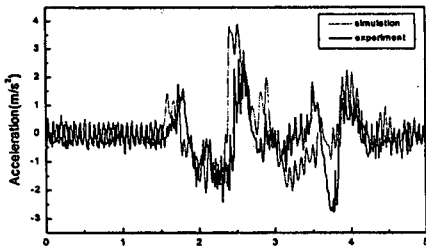


Fig. 2 Vertical acceleration of chassis on 8 inch bump

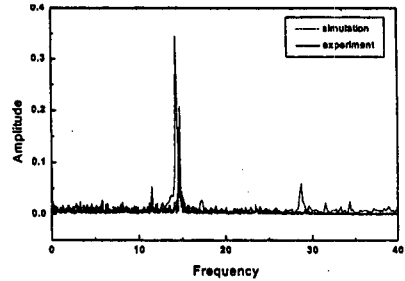


Fig. 3 FFT of the vertical acceleration 10 km/h straight motion

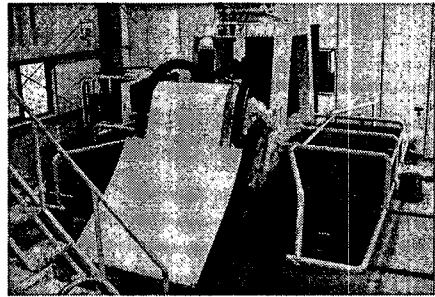


Fig. 4 Mechanical part of the test miner

2. 무한궤도 차량

상용해석 프로그램을 이용한 무한궤도 차량의 수치해석을 수행하기에 앞서 프로그램의 정확성에 대한 검증작업이 선행되어야 한다. 프로그램의 검증작업은 Ryu¹¹의 논문으로 대신하였다. Ryu¹¹는 군수용 무한궤도 차량을 이용하여 사용자 정의 서브루틴(User-defined subroutine)을 적용한 상용해석 프로그램¹⁰에 대한 검증을 하였다. 검증에 사용된 궤도차량 모델은 무게가 약 50톤이며, 60km/h 이상 주행할 수 있는 제 3세대 주 전투탱크(Main battle tank, MBT)이며, Fig. 1에 나타나 있다. Fig. 2와 Fig. 3은 상용 해석 프로그램인 RecurDyn¹⁰을 이용한 해석모델과 MBT의 실험치를 비교한 결과이다.

Fig. 4는 근해역 채광장비 성능실증 시험용 집광기의 기계부를 나타내고 있다. 시험집광기는 프레임(Frame), 전자장비(Electronic equipments), 파쇄기(Crusher), 채집장치(Pick-up device), 주행장치(Track system)로 구성되며, 실 모델(심해용 상용 집광기)의 1/10 규모이다.

현재는 구조부 및 기계부만 제작되어 있는 상황이다. Fig. 5는 시험집광기를 무한궤도 상용 해석

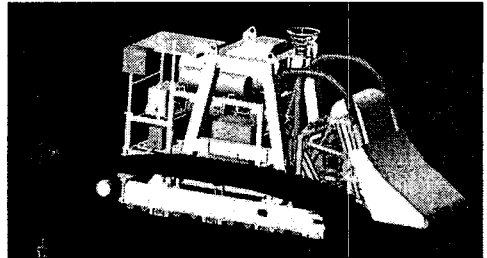


Fig. 5 Test miner model by using commercial software

프로그램으로 모델링한 것을 나타내고 있다. 시험 집광기의 동적거동 해석이 목적인 이유로 망간단괴를 채집하는 부분인 채집장치의 스크래퍼 부분은 하나의 강체로 모델링 하였다. 총 70개의 강체와 120개의 트랙링크, 46개의 회전조인트, 4개의 병진조인트, 25개의 고정조인트가 사용되었다. 주행장치의 트랙링크들 사이의 연결은 부싱 요소를 사용하였으며, 스프라켓과 트랙링크, 로드휠과 트랙링크, 아이들러와 트랙링크, 지지롤러와 트랙링크사이에는 접촉요소(Contact element)가 사용되었다.

Table 1 Mass distribution of vehicle model

Subsystem	Mass(kg)	Center of mass
프레임	1681.0	1530, 828, -2
부력재	546.0	1604, 1231, 0
전자장비	1067.7	1006, 897, -41
파쇄기	293.0	2678, 639, 33
채집장치	854.7	3167, 536, -38
주행장치	2499.2	1607, 4, 0.0
Total	6941.6	1732, 530, -10

Table 2 Cross section area of vehicle model

Body	Cross section area (m ²)
프레임	2.88, 1.95, 4.08
부력재	2.01, 0.57, 1.34
파쇄기	0.55, 0.64, 0.65
채집장치	0.68, 1.71, 1.65
주행장치	1.40, 0.20, 1.21

Table 1은 시험집광기의 각 서브시스템에 대한 중량 및 무게중심을 나타내고 있으며, Table 2에는 시험집광기의 유체저항력을 구하기 위한 단면적이 나타나 있다.

3. 지반역학

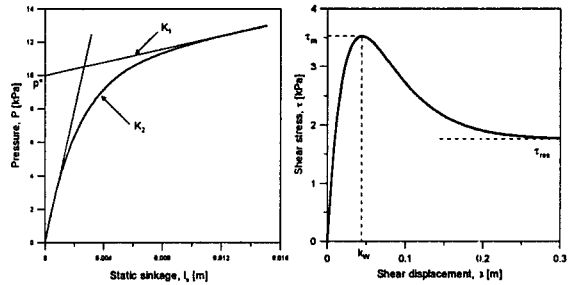
3.1 토양의 지반반력

토양의 지반반력은 토양의 수직응력과 전단응력으로 나눌 수 있다.⁹ 수직응력과 전단응력은 다음과 같이 표현되며, Fig 6은 각각의 특성곡선을 나타내고 있다.

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

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

여기서, K_1 과 K_2 는 각각 직선의 기울기를 나타내며, i_s 는 토양의 정적침하를 나타낸다. τ_m 은 최대 전단응력을 나타내며, E 는 잔류응력에 대한 최대 전단응력의 비이다. k_w 는 최대 전단응력이 발생하는 지점의 전단변위를 나타내며, σ 는 전단변위를 의미한다.



(a) pressure model (b) shear stress model
Fig. 6 Pressure and shear stress model of soft cohesive soil

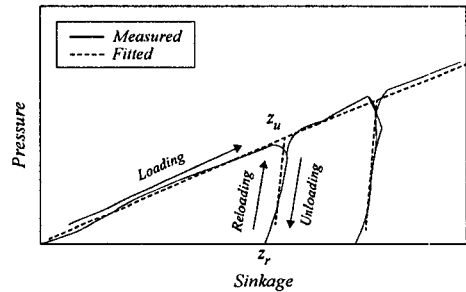


Fig. 7 Pressure-sinkage relationship subjected to repetitive load

점착성 토양의 최대 전단응력은 아래와 같이 표현된다.¹

$$\tau_m = C + C_d(1 - e^{-\mu s}) + p \tan \phi \quad (3)$$

여기서, C 는 점착력(Cohesion)이며, C_d 와 μ 는 물 질상수이며, ϕ 는 내부 마찰각이고, s 는 전단속도이다.

3.2 반복하중

무한궤도 차량같이 토양의 수직방향에 대해 반복하중이 작용할 경우, 침하에 대한 수직압력이 Fig.6의 (a)와 같이 표현되지 않는다. Fig. 7은 반복하중이 작용하는 수직압력-침하 관계를 도식적으로 보여주고 있다. 하중이 작용하는 구간은 식(1)에 의해 침하에 대해 수직압력을 구할 수 있으며, 반복하중이 작용하는 unloading과 reloading 구간에 대한 수직압력-침하곡선은 직선의 형태로 가정하여 다음과 같이 정의할 수 있다.¹²

Table 3 Data of soil model

Pressure-sinkage model	K_1, K_2	2.0, 47.0 [m ⁻¹]
	p^*	10 kPa
	C	4 kPa
	E	2.7
Shear stress model	k_w	0.04 m
	θ	0 deg
	Cd	0.0
Dynamic sinkage model	p_{crit}	6.5 kPa
	C_0, C_1, C_2	0.11, 1.0, 1.0

$$p = p_u - k_u (i_{su} - i_s) \quad (4)$$

여기서 p 는 접지압, i_s 는 침하, p_u 와 i_{su} 는 각각 unloading이 시작되는 지점에서의 접지압과 침하를 나타내며 k_u 는 unloading, reloading구간에서의 기울기를 의미한다.

본 논문에서 사용된 점착성 토양 모델의 상수는 Table 3에 나타나 있다.

4. 유체력

본 논문에서는 무한궤도차량의 유체저항력은 선박에 적용되는 동력학 이론을 기초로 계산되었다.² 해저 연약지반위를 주행하는 무한궤도차량의 성능을 관찰하기위해서, 물속에서 천천히 움직이는 물체에 대한 유체력을 이용하였다.

연약지반 무한궤도 차량에 대한 유체저항력과 모멘트는 다음과 같이 표현된다.³

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_H \\ \mathbf{N}_H \end{bmatrix} = -\mathbf{M}_A \dot{\boldsymbol{\nu}} - \mathbf{C}_A(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} - \mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} \quad (5)$$

여기서 $\boldsymbol{\nu} = [u, v, w, p, q, r]^T$ 는 각 바디의 무게중심에서의 병진속도와 회전속도를 나타내며, \mathbf{M}_A 는 6×6 행렬로 추가질량 행렬을 의미하며, \mathbf{C}_A 는 유체동력학의 코리올리 행렬이며, \mathbf{D} 는 유체동

력학의 감쇠(damping)행렬이다.

일반적으로 추가 질량 행렬은 6×6 전체행렬이다. 각각의 계수는 실험을 통하여 찾아야하는 어려움이 있으며, 심해저 궤도차량과 같이 해저면을 아주 느린 속도로 진행하는 주행차량의 경우에는 어떤 행렬성분은 크게 영향을 미치지 않는다. 본 연구에서는 추가질량 행렬을 다음과 같이 가정하였다.

$$\mathbf{M}_A = \text{diag}\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} \quad (6)$$

추가질량에 의한 유체저항력은 유체의 운동에너지로부터 구할 수 있다.³

$$\mathbf{F}_A = -\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T_A}{\partial \mathbf{v}}\right)^T - \tilde{\omega}\left(\frac{\partial T_A}{\partial \mathbf{v}}\right)^T \quad (7.a)$$

$$\mathbf{N}_A = -\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T_A}{\partial \boldsymbol{\omega}}\right)^T - \tilde{\mathbf{v}}\left(\frac{\partial T_A}{\partial \boldsymbol{\omega}}\right)^T - \tilde{\omega}\left(\frac{\partial T_A}{\partial \boldsymbol{\omega}}\right)^T \quad (7.b)$$

여기서 $T_A (= 1/2\boldsymbol{\nu}^T \mathbf{M}_A \boldsymbol{\nu})$ 는 유체운동에너지이며, $\mathbf{v} = [u, v, w,]^T$ 와 $\boldsymbol{\omega} = [p, q, r]^T$ 는 각각 물체의 병진과 회전 속도를 나타낸다.

식(5)의 감쇠항은 일반적으로 선형감쇠와 비선형감쇠로 구성되어 있다.

$$\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu}) = \mathbf{D}_1(\boldsymbol{\nu}) + \mathbf{D}_n(\boldsymbol{\nu}) \quad (8)$$

여기서 $\mathbf{D}_n(\boldsymbol{\nu})$ 는 유체점성에 의한 2차 감쇠벡터이다. 속도가 느린 주행차량의 경우에, $\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{D}(\boldsymbol{\nu}) = & -\text{diag}\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} \\ & -\text{diag}\{X_{|u|u}, Y_{|v|v}, Z_{|w|w}, K_{|p|p}, M_{|q|q}, N_{|r|r}\} \end{aligned} \quad (9)$$

감쇠항에 대한 계수는 Fig. 4와 Table 1, 2에 나타나 있는 차량의 기본적인 데이터와 항력계수(C_D)를 이용하여 추정하였다. 본 논문에서 1, 2, 5등 3가지의 항력계수를 사용하였으며, 추가질량에 의한 유체력을 계산하기 위해 추가질량계수(C_M)을 사용

하여 식(6)의 M_A 벡터를 계산하였다. 본 논문에서 0.1, 0.2 등 2가지의 추가질량계수를 사용하였다.

5. 수치해석

유체저항력에 따른 차량의 성능을 분석하기 위하여 다음과 같은 조건하에서의 수치해석을 수행하였다.

- Simulation time : 150 sec
- 항력계수(C_D) : 0.0, 1.0, 2.0, 5.0
- 추가질량계수(C_M) : 0.0, 0.1, 0.2
- 스프라켓의 속도 : 1, 2, 4 rad/sec
- 지반 : 평탄한 지반

주행차량에 대한 수치해석 결과가 Fig. 8 ~ Fig. 15에 나타나 있다. 주행차량의 진행방향 및 수직방향의 변위, 진행방향의 속도, 평균슬립 등을 통하여 무한궤도 주행차량에 대한 유체력의 영향을 분석하였다. 슬립에 대한 정의는 다음과 같다.

$$\text{Slip}(\lambda) = 1 - V_C / V^k \quad (10)$$

여기서, V_C 는 주행차량의 무게중심에서의 속도이고, V^k 는 주행차량의 궤도링크의 속도이다.

주행차량의 진행방향은 X축이고, 중력방향은 Y축이다.

Fig. 8 ~ Fig. 11은 추가질량계수(C_M)가 0.2, 주행차량 스프라켓의 속도가 2.0 rad/sec, 인 경우, 항력계수(C_D)의 변화에 대한 차량의 진행방향의 변위와 속도, 수직방향의 침하, 피치 각(pitch angle)을 각각 나타내고 있다. Fig. 8에서 보는바와 같이 진행방향에 대한 위치 변화의 차이는 거의 없다. 하지만 항력계수가 0인 것에 비해 수직침하는 더 작아졌다(Fig. 10). 이러한 이유는 항력계수에 의해 발생하는 유체저항력에 의해 추가적인 모멘트가 발생하게 되어 차량의 피치각이 증가하기 때문이다(Fig. 11). Fig. 9는 주행차량의 진행방향에 대한 속도의 변화를 나타내고 있다. 차량의 평균슬립은 식 (10)을 이용하여 구할 수 있으며, Table 4에 나타나 있다. 주행차량의 평균슬립의 변화가 크지 않은 이유는 주행차량의 속도가 크지 않은 관계로 속도변화에 대해 유체저항력이 크지 않기 때문이다.

Table 4 Average slip with respect to Drag coefficients

항력계수(C_D)	0	1	2	5
평균속도(mm/s)	457.78	457.06	456.27	451.21
평균슬립(%)	4.63	4.78	4.95	6.00

Fig. 12 ~ Fig. 14는 항력계수(C_D)가 5.0, 주행차량 스프라켓의 속도가 1.0 rad/sec인 경우, 추가질량계수(C_M)의 변화에 대한 차량의 진행방향의 속도, 수직방향의 침하, 피치 각(pitch angle)을 각각 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 추가질량계수의 변화에 대해 진행방향의 속도, 수직침하, 피치각의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 이는 추가질량계수의 변화가 주행차량의 성능에 아무런 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 이러한 이유는 주행차량의 속도가 아주 느린 관계로 추가질량계수에 의한 저항력이 크지 않다는 것을 의미한다. 일반적으로 차량이 아주 느린 속도로 움직일 경우 추가질량 계수는 질량의 20%에 해당되지만 속도가 빨라지면 추가질량계수는 증가하게 된다. 이러한 영향을 관찰하기 위하여 해석 모델의 추가-질량 계수를 크게 변경하였는데, 해석이 더 이상 수행되지 않았다. 추가질량 계수의 변화에 대한 저항력은 식 (5)처럼 물체의 무게와 가속도의 성분으로 표시된다. 이는 추가질량 계수에 의한 저항력이 물체의 질량을 증가시키는데 영향을 미치지만 다물체 해석 프로그램인 RecurDyn에는 질량이 항상 상수로 고정되어 있기 때문에 이러한 영향을 제대로 표현할 수가 없었다. Fig. 15는 항력계수(C_D)가 10.0, 주행차량 스프라켓의 속도가 1.0 rad/sec, 추가질량계수(C_M)인 0.2일 때, 주행차량의 수직침하와 피치각을 나타내고 있다. 항력계수가 10인 경우, 주행차량은 유체저항력으로 인한 모멘트가 크게 발생하게 되어 차량의 피치각이 급격하게 증가되어 더 이상 주행을 할 수가 없었다. 해석상에서는 피치각이 증가하면서 바닥면에 접촉하는 면적이 줄어들고, 미끄럼 침하의 증가로 인하여 차량이 점점 땅속으로 가라앉는 결과를 보였다. 차량이 땅속으로 많이 가라앉을 경우 차량이 더 이상 주행을 할 수가 없으나 현재 차량모델에는 이러한 영향을 나타낼 수 있는 모델링이 생략된 관계로 차량이 땅속으로 계속 가라앉고 있는 결과를 나타내고 있다.

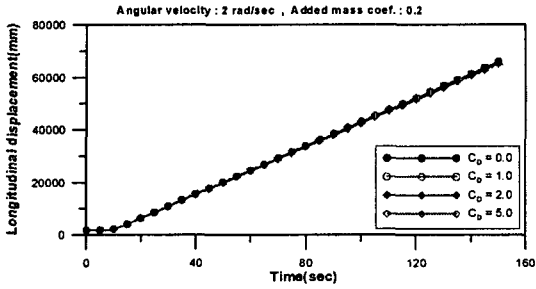


Fig. 8 Displacement of vehicle's CM in X-direction

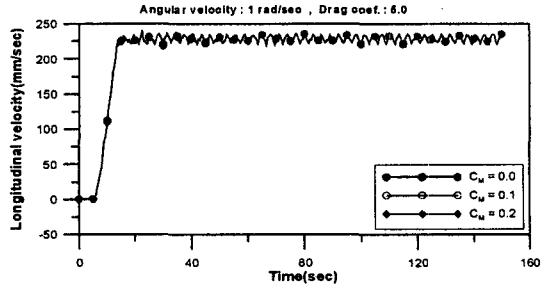


Fig. 12 Velocity of vehicle's CM in X-direction

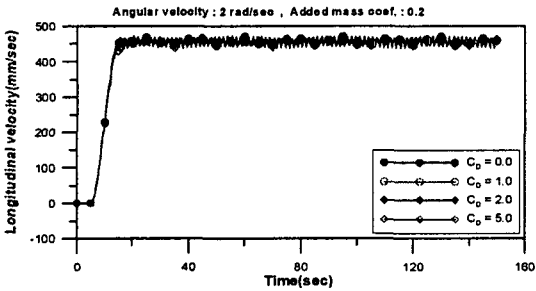


Fig. 9 Velocity of vehicle's CM in X-direction

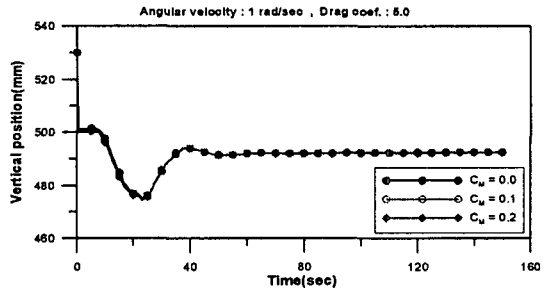


Fig. 13 Vertical position of vehicle's CM

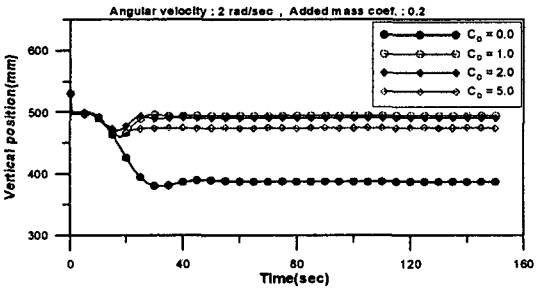


Fig. 10 Vertical position of vehicle's CM

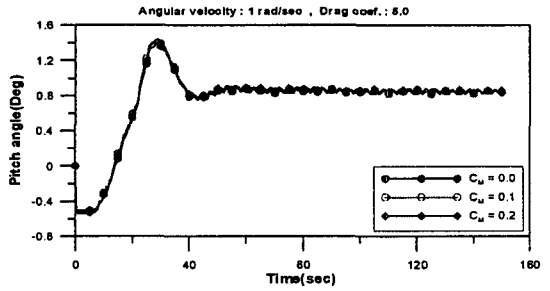


Fig. 14 Pitch angle of vehicle's CM

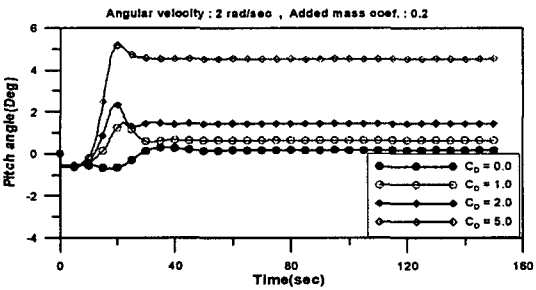


Fig. 11 Pitch angle of vehicle's CM

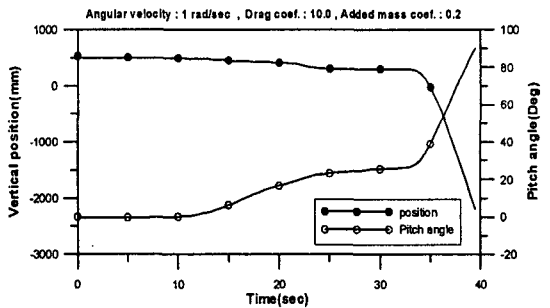


Fig. 15 Vertical position and pitch angle

6. 결론

본 연구에서는 연약지반역학모델이 적용된 다물체 해석프로그램을 이용하여 근해역 채광장비 성능실증시험용 집광기에 대한 수치해석을 수행하였다. 다물체 해석프로그램에 유체저항력을 포함시킴으로써 해저연약지반 시험집광 차량에 대한 해석이 가능하게 되었다. 항력계수, 추가질량계수와 그리고 차량의 속도변화에 대해 수치 해석을 수행하였으며, 항력계수, 추가질량계수, 차량속도 변화에 따른 시험집광기의 성능을 분석하였다. 정확한 항력계수를 산정하지 않았기 때문에 해석결과에 대한 정량적인 데이터를 뽑을 수 없었지만 항력계수와 속도변화에 대한 정성적인 결과는 알 수 있었다.

향후 실험을 통하여 시험집광기 모델에 대한 항력계수 및 추가질량계수를 구하여 시험집광기 성능 분석을 수행할 예정이며, 이러한 동적거동 해석을 통하여 분석된 결과는 시험집광기의 설계변경 및 실험 운영 시나리오 작성에 활용될 예정이다.

후기

본 논문은 해양수산특정 연구과제인 “심해저 집광시스템 및 채광운용기술 개발”과제로 수행되었으며, 아울러 “친환경 갯벌차량 기술개발”과제의 일부분으로 수행되었다.

참고문헌

- Baladi, G.Y. and Rohani, B., “A Mathematical Model of Terrain Vehicle Interaction for Predicting the Steering Performance of Track-laying Vehicles,” The 6th ISTVS Conference, pp. 285-332, 1978.
- Faltinsen, O. M., “Sea Loads on ship and Offshore Structures,” Cambridge University Press, pp.150-178, 1990.
- Fossen, T. I., “Marine Control Systems, 2nd edition - Chapter 3 Dynamics of Marine Vessels,” Marine Cybernetics, pp. 49-53, 2002.
- Hong, S., Kim, H.W. and Choi, J.S., “Transient Dynamic Analysis Tracked Vehicles on Extremely Soft Cohesive Soil,” Proceedings of the 5th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, pp. 100-107, 2002.
- Kim, H.W., Hong, S. and Choi, J.S., “Comparative Study on Tracked Vehicle Dynamics on Soft Soil : Single-Body Dynamics vs. Multi-Body Dynamics,” Proceedings of The Fifth ISOPE Ocean Mining Symposium, pp. 132-138, 2003.
- Kim, H.W., Hong, S. and Choi, J.S., “A Study on Dynamic Responses of Tracked Vehicle on Extremely Soft Cohesive Soil,” Ocean and Polar Research, Vol. 26, No. 2, pp. 323-332, 2004.
- Kim, H.W., Hong, S., Choi, J. S. and Yeu, T. K., “Dynamic Analysis of Underwater Tracked Vehicle on Extremely Soft Soil,” Proceedings of The Sixth ISOPE Ocean Mining Symposium, pp. 141-148, 2005.
- Kim, H.W., Hong, S., Choi, J.S. and Yeu, T.K., “Dynamic Analysis of Underwater Tracked Vehicle on Extremely Soft Soil by Using Euler Parameters,” Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 20, No. 6, pp. 93-100, 2006.
- Kim, H.W., Hong, S., Choi, J.S. and Yeu, T.K., “Multibody Dynamic Analysis of a Tracked Vehicle on Soft Cohesive Soil,” Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 21, Nc. 1, pp. 69-74, 2007.
- “RecurDyn-LM User's Manual,” Ver.5.2, Function Bay, 2002.
- Ryu, H.S., “Investigation of the Dynamic Tension and Behavior for Three Dimensional High Mobility Tracked Vehicles,” doctoral thesis, University of HanYang, 2004.
- Wong, J. Y., “Theory of Fround Vehicles, 3rd edition- Chapter 2 Mechanics of Vehicle-Terrain Interaction,” John Wiely & Sons Inc., pp. 130-153, 1989.