

해저연약지반 시험집광기의 동적거동 해석

김형우* · 홍 섭 · 최종수 · 여태경
한국해양연구원 해양시스템연구부

Dynamic Analysis of Underwater Test Collector on Extremely Soft Soil

HYUNG-WOO KIM*, SUP HONG, JONG-SU CHOI, AND TAE-KYEONG YEU
Ocean Engineering Research Department, MOERI/KORDI, Daejeon, Korea

본 논문은 해저 연약지반 위를 주행하는 시험집광기의 동적거동 해석을 다루고 있다. 시험집광기는 단괴채집장치, 무한궤도, 단괴파쇄기, 사시프레임, 전기·전자 시스템으로 구성되어 있다. 시험집광기의 공기 중 무게는 8,600 kg이며, 수중에서의 시험집광기의 평균집압은 6.0 kPa이다. 상용해석 프로그램인 RecurDyn-LM과 Visual Fortran 90을 이용하여 시험집광기의 동적거동 해석 모델 및 유체저항력 모델을 구축하였다. 상용해석 프로그램(RecurDyn-LM)에서 제공되는 사용자 정의 서브루틴을 이용하여 연약지반역학 모델 및 유체저항력 모델을 구축하였으며, 이를 통하여 해저 시험집광기의 동적거동 해석을 수행하였다. 궤도속도, 지반조건, 항력계수 및 추가질량 계수의 변화에 따른 시험집광기의 동적응답을 분석하였다.

We conducted a dynamic analysis of an underwater test collector, which operates on extremely soft soil of deep-seafloor. The underwater test collector consists of nodule pick-up device, vehicle tracks, nodule crusher, loading frame and electric-electronic system. The weight of underwater test collector is about 8600 kg. The average normal pressure, that the underwater test collector supports, is about 6.0 kPa. The dynamic analysis model of underwater test collector is developed using commercial software RecurDyn-LM and Visual Fortran 90. A terramechanics model of extremely soft soil is implemented to the software based on user-written subroutine and applied to the dynamic analysis of the underwater test collector model. The dynamic responses of test collector are studied with respect to track velocities, terrain conditions, and coefficients of added mass and drag.

Keywords: Dynamic Analysis, Underwater Test Collector, Soft Soil, Terramechanics, Hydrodynamic Effect

서 론

우리나라는 1992년부터 북동태평양 클라리온-클리퍼톤 해역(C-C 해역)의 고밀도 망간단괴 분포지역에 대하여 실험 탐사를 수행하고 있으며, 2002년도에 75,000 km²의 광구를 확보하였다. C-C 해역의 심해저 다금속 단괴는 구리, 니켈, 코발트, 망간 등으로 구성되어 있으며, 수심 5,000 m 해저 연약 퇴적지반의 표층에 산재하여 부존되어 있다. 상업적 개발에 필요한 시간당 300톤의 망간단괴를 채집하기 위해서는 해저면을 자유롭게 주행하며 망간단괴를 채집하는 자항식 집광시스템을 이용한 연속적 채광(Continuous mining, Fig. 1)이 필요하다(Brink and Chung, 1981; Hong and Kim, 1999). 연속 채광시스템은 채광선, 수직양광관, 중간버퍼, 유연관, 자항식 집광기로 구성되어 있다. 채광선-수직양광관-버퍼-유연관-자항식 집광기로 이어지는 전체 채광시스템의 동적거동 해석은 심해저 채광기술의 중요한 요소기술이다. 특히 연약지반 위를 주행하는 무한궤도 차량의 동적거동 해석은 아주 중요하다.

컴퓨터의 혁신적인 발달, 다양한 해석 도구의 개발 등으로 각종 공학적인 해석 문제에 컴퓨터 수치 시뮬레이션이 사용되고 있다. 컴퓨터 수치 시뮬레이션의 장점은 모델링 및 해석에 많은 비용 및 시간이 소요되지 않으며, 해석 결과를 손쉽게 쉽게 확인할 수 있다. 또한, 시뮬레이션을 통하여 설계 단계에서부터 제작과 운용을 함께 고려할 수 있는 점은 시뮬레이션을 기반으로 하는 설계기법의 확장의 주요 이유가 된다. 수심 5,000 m 해저 연약지반을 주행하는 무한궤도 차량의 개발에도 모델링 및 시뮬레이션을 활용한 시뮬레이션 기반 설계기술이 활용되고 있다.

연약지반 주행차량의 동적거동 해석에 많은 연구가 진행되어 오고 있다(Hong *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2003; 김 등, 2004; Kim *et al.*, 2005; 김 등, 2006, 2007). 또한, 효율적인 다물체 무한궤도 상용 해석프로그램이 개발되었다(RecurDyn, 2006). 하지만 상용 프로그램에는 일반적인 지반모델만 포함되어 있을 뿐, 연약한 지반에서의 동적거동에 사용되는 연약지반 모델이 포함되어 있지 않다.

본 논문에서는 상용S/W(RecurDyn)에서 제공하는 사용자 정의 서브루틴을 이용하여 Hong *et al.*(2002)에 의해 개발되어진 연약지반 지반역학 모델을 적용하여 상용 S/W에서 연약지반 무한궤

*Corresponding author: gudden@moeri.re.kr

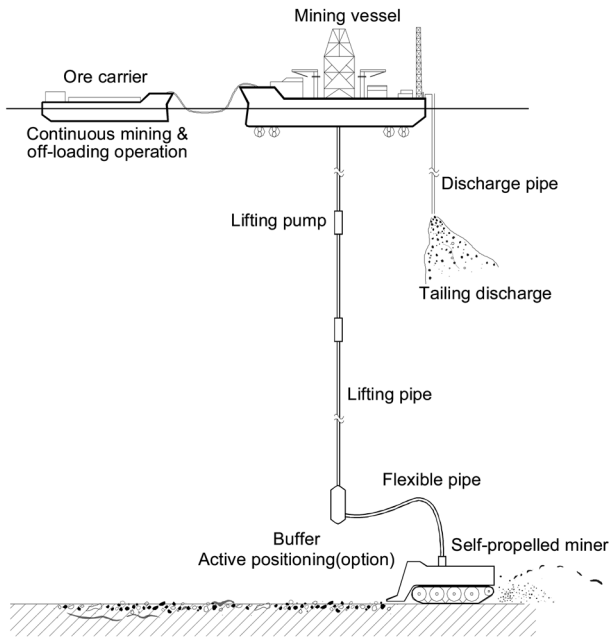


Fig. 1. Concept of commercial deep-seabed mining system.

도 차량의 동적거동 해석이 가능하도록 하였으며, 또한 각 물체에 작용하는 부력과 천천히 움직이는 수중물체에 대한 유체동력학(eq. Faltinsen, 1990)을 적용하여 해저 연약지반에서 무한궤도 차량의 동적거동 해석이 가능하도록 하였다.

개발되어진 해석프로그램을 이용하여 차량의 속도, 항력계수 및 추가질량 계수 변화에 따른 수중 주행차량의 동적거동 해석을 수행하였다. 해석결과는 무한궤도 차량의 성능예측 및 제어프로그램 개발에 활용할 예정이다.

시험집광기

Fig. 2는 근해역 채광장비 성능실증 시험에 사용될 시험집광기를 나타내고 있다. 시험집광기는 크게 기계시스템, 유압시스템, 전기·전자 시스템으로 나눌 수 있다.

기계시스템은 주행장치, 채집장치, 송출장치, 사시 프레임, 부력재 등으로 구성된다. 주행장치는 해저면 집지압을 줄이기 위하여



Fig. 2. The underwater test collector.

무한궤도 방식을 채택하였으며, 한 쪽의 무한궤도 주행장치는 프레임, 상부롤러 3개, 하부롤러 11개, 트랙링크, 스프라켓 및 구동모터, 아이들러 및 장력조절장치, 트랙슈 등으로 구성되어 있다. 또한 수중에서 시험집광기의 중량을 줄이기 위해 합성수지 재질의 트랙슈(폭 130 mm, 길이 1,100 mm, 무게 10 kgf, 비중 1.183) 120개를 사용하여 경량 설계하였다.

유압시스템(Hydraulic system)은 수상선에서 케이블을 통해 공급받은 전기에너지를 파워팩을 통해 유압에너지로 변환하고, 이것을 다시 유압 액츄에이터를 통해 기계에너지로 변환하는 역할을 수행한다. 유압시스템은 파워팩(Powerpack), 제어밸브팩(Valvepack), 레저버(Reservoir), 액츄에이터(Actuator), 릴리프 밸브(Relief valve), 고압필터(High pressure filter), 분기블럭(Divide block), 운동제어 밸브(Motion control valve) 등으로 구성된다. 수중 유압시스템은 육상 유압시스템과 달리 폐회로로 구성되어 있으며, 레저버는 유압보상장치를 통해 외부 압력과 거의 유사하게 유지되고 있으며, 해수와의 직접적인 접촉을 피하기 위해 파워팩의 전기모터, 각종 전자제어밸브 등이 압력보상이 되는 유적식으로 제작되었다.

근해역 시험집광기의 전기 시스템은 해상의 선박으로부터 엄빌리컬 케이블(Umbilical cable)을 통해 공급된 AC 3000V와 AC 440V의 전압이 집광기 내부에 설치된 Power Junction Box를 통해 각각 유압 파워팩과 강압변압기에 분기되어 연결되어 있다. 440V의 전압은 강압 변압기를 거쳐 220V로 강압되어 내압용기(Cannister)로 연결되어 있으며, 이것은 내압용기 내의 SMPS(Switching Mode Power Supply)를 통해 다시 DC 전압(5V, 12V, 24V 등)으로 변환되고 각종 전자장비에 전원을 공급하게 된다.

Fig. 3은 시험집광기를 무한궤도 상용 해석프로그램인 RecurDyn(2006)으로 모델링한 것을 나타내고 있다. 시험집광기의 주행에 대한 동적거동 해석이 목적인 이유로 망간단피를 채집하는 부분인 채집장치의 스크래퍼 부분을 다물체로 모델링 할 경우 해석시간이 많이 소요되는 관계로 하나의 강체로 모델링 하였다. 총 70개의 강체와 120개의 트랙링크, 46개의 회전조인트, 4개의 병진조인트, 25개의 고정조인트가 사용되었다. 주행장치의 트랙링크들 사이의 연결은 상용해석프로그램에서 제공하는 부형 요소(Bushing element)를 사용하였으며, 스프라켓과 트랙링크, 로드휠과 트랙링크, 아이들러와 트랙링크, 지지롤러와 트랙링크사이에는 접촉요소

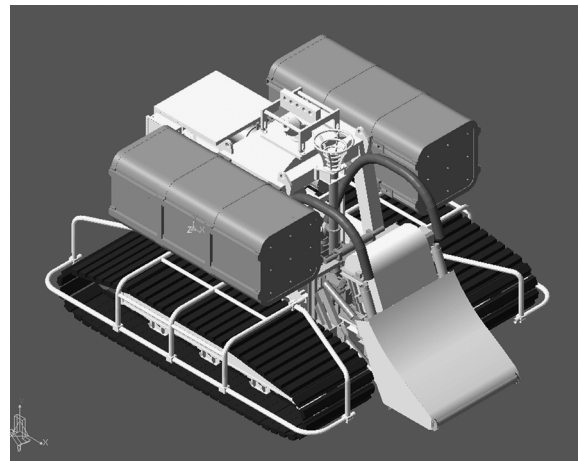


Fig. 3. Test collector model by using commercial software.

Table 1. Mass distribution of multi-body vehicle model

Subsystem	Mass(kg)	Center of mass
Frame	1984.0	1577.0, 1010.0, 2.0
Buoy	1474.0	1618.6, 1617.3, 0.0
Electronic equipments	1299.4	803.4, 870.5, -71.8
Crusher	293.0	2677.8, 638.6, 33.2
Pick-up device	854.7	3167.2, 534.8, -37.6
Track system	2741.2	1608.3, 2.3, 0.0
Total	8646.3	1672.3, 713.5, -12.9

(Contact element)를 사용하였다. Table 1은 시험집광기의 각 서브 시스템에 대한 중량 및 무게중심을 나타내고 있다.

연약지반 모델

토양의 지반반력

토양의 지반반력은 크게 수직응력과 전단응력으로 나눌 수 있다. 수직응력은 차량의 지면 압력으로 나타나고, 수직 침하에 대한 압력-침하간의 관계식에 의해 구할 수 있다. 이에 반해 전단응력은 차량의 지면에 발생하는 전단변위에 의해 발생하게 된다. 전단변위는 차량의 구동에 의해 지면과 접촉하는 부분에서 발생하는 미끄럼 속도를 시간에 따라 적분함으로써 구할 수 있다.

수직응력은 아래와 같이 정적침하(i_s)의 함수로 나타낸다.

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

정적침하는 차량의 전체침하에서 차량의 전단변위에 의한 동적침하(slip sinkage)를 제외한 침하를 의미하며, 압력-침하간의 특성 곡선은 Fig. 4에 나타나 있으며, K_1 과 K_2 는 직선의 기울기를 나타낸다(Hong and Choi, 2001). p^* 는 Fig. 4에서 기울기가 K_1 인 점근선의 y절편을 의미한다.

연약한 점착성 토양은 Fig. 5와 같이 일정 이상의 전단변위가 발생하면 토양이 급격히 붕괴되는 전형적인 비선형성을 나타낸다

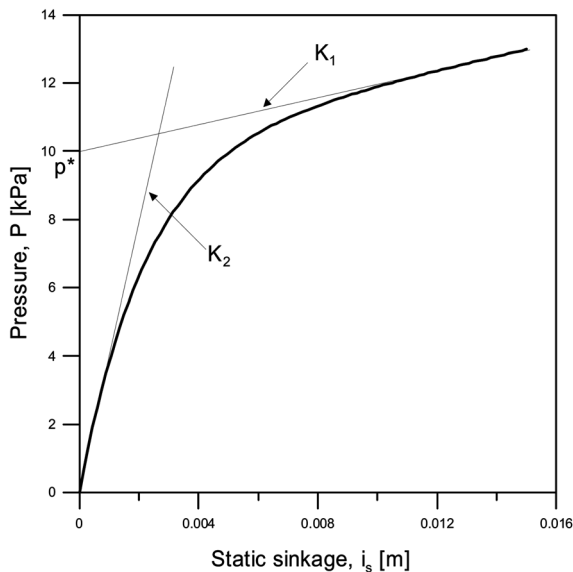


Fig. 4. Pressure-sinkage model.

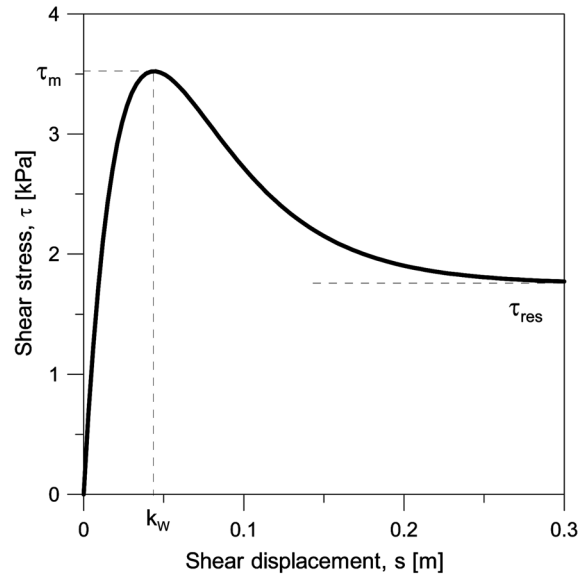


Fig. 5. Shear stress - displacement model.

(Hong and Choi, 2001).

Wong (1993)은 이러한 점착성 토양의 전단응력을 다음과 같은 함수로 제안하였다.

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

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. 5와 같다. 또한 점착성 토양의 최대 전단응력은 아래와 같이 표현된다(Baladi and Rohani, 1978).

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

여기서, C 는 토양의 점착력(Cohesion)을 의미하며, C_d 와 μ 는 토양의 물질상수를 나타내며, ϕ 는 토양의 내부 마찰각이고, s 은 전단 속도이다.

토양의 전단변위는 부가적인 동적침하(Slip sinkage)를 발생시키는데, 그 표현은 다음과 같다.

$$i_d = -c_0 \left(\frac{p}{p_{crit}} \right)^{c_1} \cdot s^{c_2} \quad (4)$$

여기서, p 는 수직응력, s 는 전단변위를 가리키며, p_{crit} (kPa)과 상수 c_0 과 지수 c_1 과 c_2 는 실험에서 구해진 값들이다.

차량의 총침하(i_{tot})는 정적침하(i_s)와 동적침하(i_d)로 구성된다.

$$i_{tot} = i_s + i_d \quad (5)$$

본 논문에서 사용된 해저연약 지반 모델의 상수는 해양연구원



Fig. 6. Soil Bin in MOERI/KORDI.

Table 2. Data of soil model

Pressure-sinkage model	K_1, K_2	2.0 [m ⁻¹], 47.0 [m ⁻¹]
	p^*	
Shear stress model	C	4 kPa
	E	2.7
	k_w	0.04 m
	ϕ	0 deg
Dynamic sinkage model	C_d	0.0
	p_{crit}	6.5 kPa
	c_0, c_1, c_2	0.11, 1.0, 1.0

의 실험시설(3차원 토조)을 이용하여 계측하였다. 해저 연약지반은 벤토나이트-물의 혼합물(이하 혼합물)로 3차원 토조 내에 모사되었다. 토조의 주요 치수는 3.7 m(B)×6.0 m(L)×0.7 m(D)이며, Fig. 6은 토조를 나타내고 있다(최 등, 2002).

혼합물의 함수비를 조정하여 잔류전단강도(τ_{res})가 일정한 값으로 유지되게 하였으며, 혼합물의 강도는 실험역 연약지반의 잔류전단강도를 목표로 모사되었다. 이러한 실험 장비를 통하여 지반 모델의 물성치를 계측하였고, Table 2에 나타나 있다.

반복하중

무한궤도 차량같이 토양의 수직방향에 대해 반복하중이 작용할 경우, 침하에 대한 수직압력이 Fig. 4와 같이 표현되지 않는다. Fig. 7은 반복하중이 작용하는 수직압력-총침하 관계를 도식적으로 보여주고 있다. 하중이 작용하는 구간은 식 (1)에 의해 침하에 대해 수직압력을 구할 수 있으며, 반복하중이 작용하는 unloading과 reloading 구간에 대한 수직압력-침하 곡선은 직선의 형태로 가정하여 다음과 같이 정의할 수 있다(Wong, 1989).

$$p = p_u - k_u(i_{su} - i_s) \quad (6)$$

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

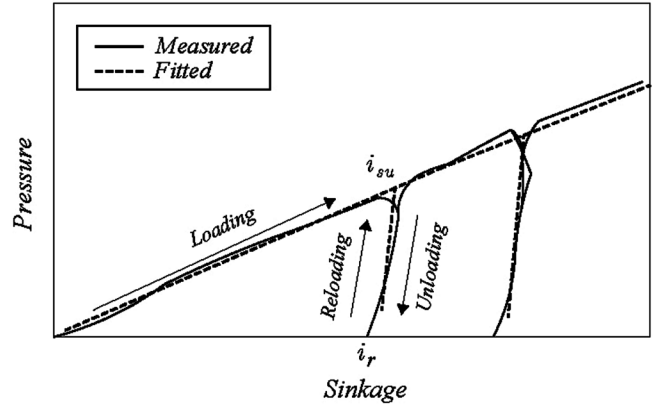


Fig. 7. Pressure-sinkage relationship subjected to repetitive load.

유체저항력 및 부력

본 논문에서는 무한궤도차량의 유체저항력을 선박에 적용되는 동역학 이론을 기초로 계산하였다(Faltinsen, 1990). 해저 연약지반 위를 주행하는 무한궤도차량의 성능을 관찰하기위해서, 물속에서 천천히 움직이는 물체에 대한 유체력을 이용하였다.

연약지반 무한궤도 차량에 대한 유체저항력과 모멘트는 다음과 같이 표현된다(Fossen, 2002).

$$\begin{bmatrix} F_H \\ N_H \end{bmatrix} = -M_A \dot{v} - C_A(v)v - D_A(v)v \quad (7)$$

여기서 $v = [u, v, w, p, q, r]^T$ 을 나타내며, $[u, v, w]^T$ 는 바디의 무게중심에서의 각 방향(x-y-z)의 병진속도를 나타내고, $[p, q, r]^T$ 는 회전속도를 의미한다. M_A 는 6×6 행렬로 추가질량 행렬을 의미하며, C_A 는 유체동역학의 코리올리 행렬이며, D_A 는 유체동역학의 감쇠(damping)행렬이다.

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

$$M_A = \text{diag}\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} \quad (8)$$

여기서 X, Y, Z 는 차량의 무게중심의 각각의 좌표 방향을 의미하며, K, M, N 은 좌표축의 회전방향을 의미한다.

질량 행렬 M_A 는 간단한 형상(구, 육면체 등)인 경우에는 추가질량 행렬의 병진성분(X_u, Y_v, Z_w)은 질량에 추가질량계수(C_M)를 곱하여 구할 수 있고, 회전성분(K_p, M_q, N_r)은 관성모멘트에 추가질량계수(C_M)를 곱하여 구할 수 있으나, 본 논문의 모델처럼 형상이 복잡한 경우에는 실험을 통해 구해야만 한다. 하지만 본 연구에서는 아직 추가질량 행렬을 구하기위한 실험을 수행하지 못한 관계로 모델을 육면체와 같이 간단한 형상으로 가정하여 추가질량 행렬을 구하였다.

식 (7)의 감쇠항은 일반적으로 선형감쇠와 비선형 감쇠로 구성

되어 있다.

$$D(v) = D_r(v) + D_n(v) \tag{9}$$

여기서 $D_n(v)$ 는 유체점성에 의한 2차 감쇠행렬이다. 속도가 느린 주행차량의 경우에, $D(v)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$D(v) = -diag\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} - diag\{X_{|u|}, Y_{|v|}, Z_{|w|}, K_{|p|}, M_{|q|}, N_{|r|}\} \tag{10}$$

감쇠항에 대한 계수는 Fig. 3과 Table 1에 나타나 있는 차량의 기본적인 데이터와 항력계수(C_D)를 이용하여 유체점성에 의한 2차 감쇠행렬인 $D_n(v)$ 는 다음과 같은 방법을 이용하여 계산하였다.

$$X_{|u|} = \frac{1}{2} \rho C_D A_x |u| u \tag{11}$$

여기서, ρ 는 물의 밀도를 의미하며, A_x 는 차량모델의 x방향의 단면적을 나타낸다.

본 논문에서 1, 5, 10의 3가지 항력계수(C_D)를 사용하였으며, 0.0, 0.2, 0.5, 1.0의 4가지의 추가질량계수(C_M)를 사용하였다.

시험집광기의 허용집압(6 kPa)을 만족시키기 위해 Fig. 1과 같이 부력재를 사용하였으며, 부력재 한 개의 기중에서의 무게(770 kgf)와 수중무게(-545 kgf)를 계측하였으며, 계측된 데이터를 이용하여 부력재의 순부력을 계산하였다. 이와같은 방법으로 시험집광기의 모든 장비에 대한 순부력을 계산하였다. 계산되어진 순부력을 해석 모델에 적용하기 위해 상용 해석프로그램(RecurDyn, 2006)에서 제공되는 사용자 정의서브루틴을 이용하여 부력을 적용시켰다. 시험집광기 데이터의 보안을 위해 수중무게 및 순부력은 공개하지 않기로 한다.

수치해석

개발된 해저 연약지반역학 모델이 포함된 시험집광기의 동적거동 분석을 위해 아래의 조건하에서 수치해석을 수행하였다.

- Simulation time: 200 sec
- 항력계수(C_D): 1.0, 5.0, 10.0
- 추가질량계수(C_M): 0.0, 0.2, 0.5, 1.0
- 스프라켓의 속도: 1, 2.3, 4.0 rad/sec

해석결과는 Fig. 8~Fig. 15에 나타나 있다.

Fig. 8~10은 주행차량 스프라켓의 각속도가 1.0 rad/sec, 추가질량계수(C_M)가 0.2인 경우, 항력계수(C_D)의 변화에 대한 차량의 피치각(pitch angle), 수직방향의 변위, 진행방향의 속도의 그래프를 나타내고 있다. Fig. 8처럼 항력계수가 증가함에 따라 피치각이 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 항력계수에 의해 발생하는 유체 저항력에 의해 추가적인 모멘트가 발생하게 되어 차량의 피치각이 증가하게 된다. Fig. 9는 차량의 무게중심에서의 수직변위를 나타내고 있으며, 항력계수가 증가함에 따라 수직침하가 더 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 항력계수가 증가함에 따라 차량에 유체

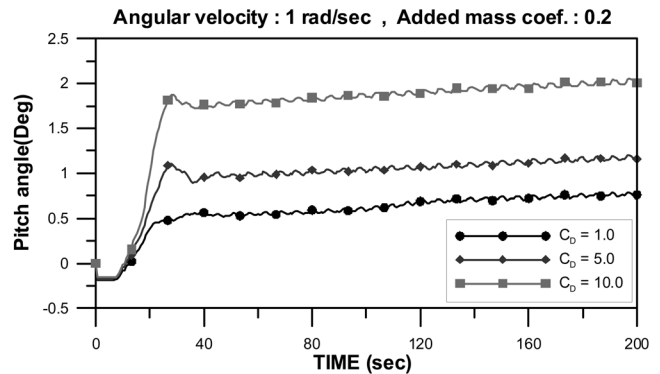


Fig. 8. Pitch angle of vehicle with respect to drag coefficient.

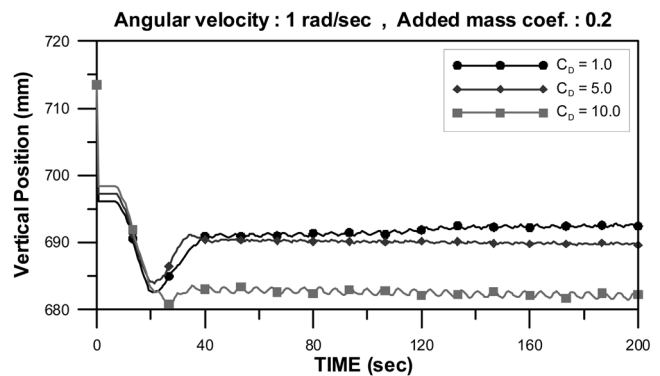


Fig. 9. Vertical position of vehicle with respect to drag coefficient.

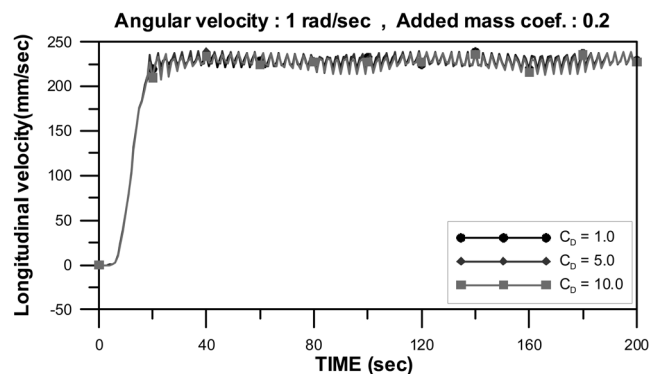


Fig. 10. Longitudinal vehicle velocity with respect to drag coefficient.

저항력이 증가하게 되고, 유체저항력의 증가는 차량의 지면에서 발생하는 추진력을 증가시키는 원인이 되고, 추진력은 차량의 전단변위를 증가시키게 된다. 차량의 전단변위가 증가하게 되면, 식 (4)에 의해 동적침하가 증가하여 부가적인 침하가 차량에 발생하기 때문이다. Fig. 10은 차량의 진행방향에 대한 속도를 나타내고 있다. 항력계수가 증가에 따라 유체저항력이 증가함에도 불구하고 차량의 속도가 거의 유지되고 있다. 이는 차량에 작용하는 유체저항력을 극복할 수 있는 추진력이 발생하기 때문이다. 하지만 전단변위가 최대 전단응력이 발생하는 전단변위(k_w)보다 커지게 되면 전단변위의 증가에도 불구하고 차량의 추진력은 감소하게 된다 (Fig. 5참조).

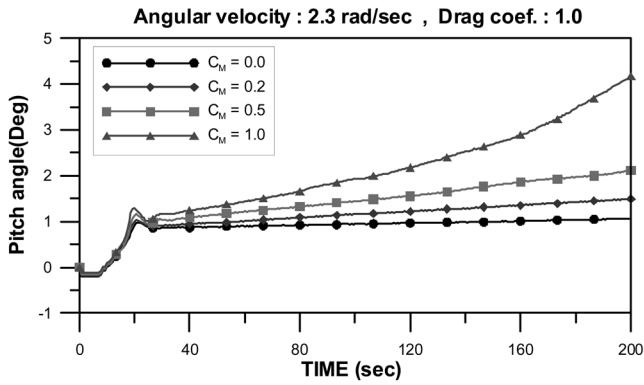


Fig. 11. Pitch angle of vehicle with respect to added mass coefficient.

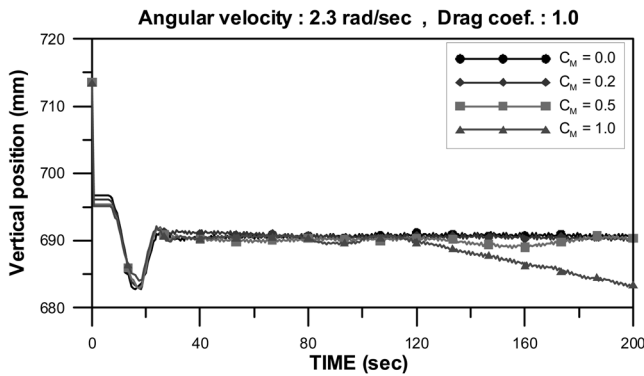


Fig. 12. Vertical position of vehicle with respect to added mass coefficient.

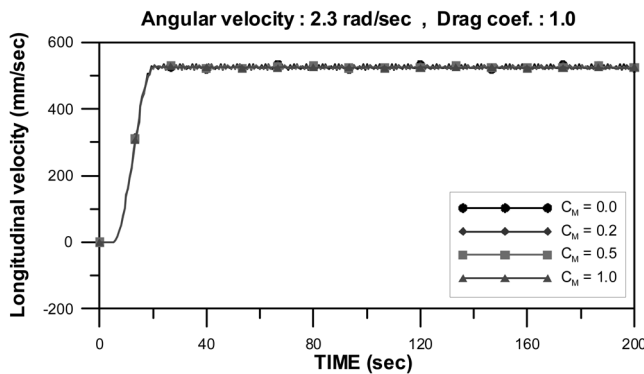


Fig. 13. Longitudinal vehicle velocity with respect to added mass coefficient.

Fig. 11~13은 주행차량의 스프라켓의 각속도가 2.3 rad/sec, 항력계수(C_D)가 1.0인 경우, 추가질량계수(C_M)의 변화에 대한 차량의 피치각(pitch angle), 수직방향의 변위, 진행방향의 속도의 그래프를 나타내고 있다. 추가질량계수가 증가함에 따라 피치각이 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 추가질량 계수에 의해 유체저항력이 증가하게 되고, 유체저항의 증가에 의해 차량의 모멘트가 증가하게 되어 피치각이 증가하게 된다. 그리고 저항력의 의해 추진력이 증가하고 추진력에 의해 전단변위가 많이 발생하게 된다. 전단변위는 차량의 앞부분 보다는 뒷부분으로 갈수록 많이 발생하게 되므로, 전단변위에 의해 발생하는 부가적인 침하 앞부분 보다 뒷부분에서 더 많이 발생하게 되어 차량의 피치각이 증가하

게 된다.

피치각이 증가하면 차량의 주행이나 채집시 좋지 않은 영향을 미친다. 이런 현상을 방지하기 위해서는 차량의 무게중심을 앞으로 이동시켜 차량의 기울기를 최소화해야 할 것이다.

Fig. 12는 추가질량계수(C_M)의 변화에 대한 차량의 무게중심의 수직변위를 나타내고 있다. 추가질량계수(C_M)가 1.0인 경우, 시간이 증가함에 따라 차량의 침하가 점점 증가하고 있다. 이는 차량의 피치각이 증가함에 따라 지면의 접촉 면적이 줄어 차량이 침하하게 되기 때문이다.

Fig. 13은 차량의 진행방향의 속도를 나타내고 있다. 추가질량계수의 증가에도 차량의 속도에는 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이는 차량의 추진력이 유체력을 충분히 극복하고 있다는 것을 나타내고 있다.

Fig. 14~15는 주행차량 스프라켓의 각속도가 4.0 rad/sec, 추가질량계수(C_M)가 0.2인 경우, 항력계수(C_D)의 변화에 대한 차량의 진행방향의 속도, 수직방향의 변위의 그래프를 나타내고 있다. Fig. 14처럼 항력계수가 1인 경우 주행차량의 속도가 약 0.9 m/s 정도 발생하지만, 항력계수가 5 혹은 10인 경우, 주행차량의 속도는 그보다 작게 발생하고 있다. 이는 항력계수의 증가에 의해 유체저항력이 증가하게 되고, 유체저항력으로 인하여 차량의 지면에서는 미끄러움이 많이 발생하게 되고, 이는 차량의 전단변위를 증가시키게 된다. Fig. 5처럼 전단변위가 최대전단응력이 발생하는 전단변위보다 크게 발생하게 되면 전단변위의 증가에도 불구하고, 전단응력은 증가하지 않게 된다. 이런 이유로 차량에 작용하는 추진력

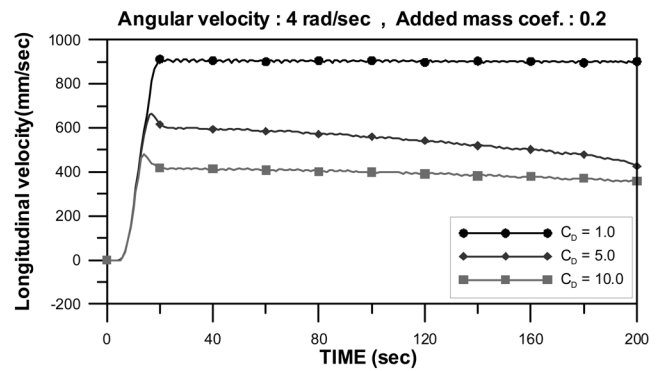


Fig. 14. Longitudinal vehicle velocity with respect to drag coefficient.

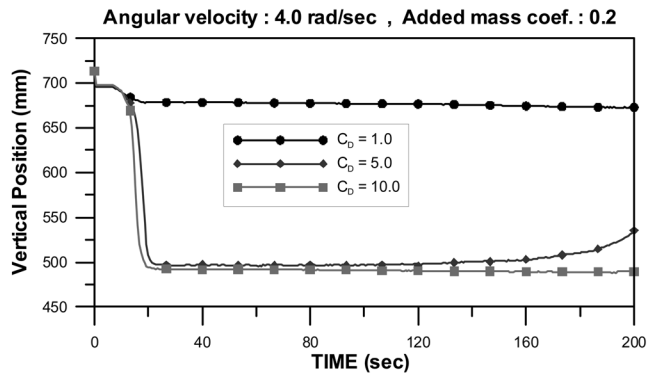


Fig. 15. Vertical position of vehicle with respect to drag coefficient.

이 줄어들게 되어 차량의 속도가 감소하는 현상이 발생하게 된다. 또한 전단변위의 증가에 의해 식 (4)에 의해 동적침하가 발생하게 되어 차량의 수직침하가 더 크게 발생하게 된다(Fig. 15).

결 론

본 연구에서는 연약지반역학모델이 적용된 다물체 해석프로그램을 이용하여 근해역 채광장비 성능실증시험용 집광기에 대한 수치해석을 수행하였다. 다물체 해석프로그램에 유체저항력을 포함 시킴으로 해저연약지반 시험 집광 차량에 대한 해석이 가능하게 되었다. 항력계수, 추가질량계수와 그리고 차량의 속도변화에 대한 시험집광기 모델에 대한 해석을 수행하였으며, 항력계수, 추가질량계수, 차량속도 변화에 따른 시험집광기의 성능을 분석하였다. 정확한 항력계수와 추가질량 계수를 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 성능분석을 수행할 예정이며, 이러한 동적거동 해석을 통하여 분석된 결과는 시험집광기의 설계변경 및 실험역 운용 시나리오 작성에 활용될 예정이다.

후 기

본 논문은 국토해양부 특정연구과제인 “심해저 집광시스템 및 채광운용기술 개발(2-2)” 과제 및 “친환경 갯벌차량 기술개발(주행장치)” 과제로 수행되었으며, 아울러 기본연구 과제인 “해양구조물의 극한응답 해석기술 개발”의 일부분으로 수행되었다.

참고문헌

- 김형우, 홍 섭, 최종수, 2004. 점착성 연약지반 주행차량의 동적 거동 연구, *Ocean and Polar Research*, 26(2): 323-332.
- 김형우, 홍 섭, 최종수, 여태경, 2006. 오일러 매개변수를 이용한 해저연약지반 무한궤도 차량의 동적거동 해석, *한국해양공학회지*, 20(6): 93-100.
- 김형우, 홍 섭, 최종수, 여태경, 2007. 연약지반 무한궤도차량의 다물체 동적거동 해석, *한국해양공학회지*, 21(1): 69-74.
- 최종수, 홍 섭, 김형우, 2002. 해저 연약지반 주행성능 실험기법

- 연구(I): 주행실험토조, *한국해양공학회 추계학술대회논문집*, pp. 224-228.
- Baladi, G.Y. and Rohani, B., 1978. A mathematical model of terrain vehicle interaction for predicting the steering performance of track-laying vehicles, the 6th ISTVS conference, pp. 285-332.
- Brink, A.W. and Chung, J.S., 1981. Automatic Position Control of a 300,000-Ton Ship Ocean Mining System, *Proc Offshore Tech Conf, Houston, Paper 4091*.
- Faltinsen, O.M., 1990. *Sea Loads on ship and Offshore Structures*. Cambridge University Press.
- Fossen, T.I., 2002. *Marine Control Systems*, 2nd edition - Chapter 3 Dynamics of Marine Vessels, pp. 49-53.
- Hong, S. and Choi J.S., 2001. Experimental Study on Grouser Shape Effects on Trafficability of Extremely Soft Seabed, *Proc of the 4th Ocean Mining Symposium, Szczecin, Poland*, pp. 115-121.
- Hong, S. and 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, *Proc International Seabed Authority's Workshop, Kingston, Jamaica*, pp. 261-283.
- Hong, S., Kim, H.W. and Choi, J.S., 2002. Transient Dynamic Analysis Tracked Vehicles on Extremely Soft Cohesive Soil, *Proc of the 5th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*, pp. 100-107.
- Kim, H.W., Hong, S. and Choi, J.S., 2003. Comparative Study on Tracked Vehicle Dynamics on Soft Soil : Single-Body Dynamics vs. Multi -Body Dynamics, *Proc of The Fifth ISOPE Ocean Mining Symposium*, pp. 132-138.
- Kim, H.W., Hong, S., Choi, J.S. and Yeu, T.K., 2005. Dynamic Analysis of Underwater Tracked Vehicle on Extremely Soft Soil, *Proc of The Sixth ISOPE Ocean Mining Symposium*, pp. 141-148.
- RecurDyn-LM, 2006. *User's Manual, Ver 6.3, FunctionBay*.
- Wong, J.Y., 1989. *Terramechanics and Off-Road Vehicles*, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V.
- Wong, J.Y., 1993. *Theory of Ground Vehicles*, John Wiley & Sons, New York.

2008년 4월 2일 원고접수

2008년 7월 7일 수정본 채택

담당편집위원: 홍 섭