

연약지반 시험집광기의 다물체 동력학 해석

김형우*, 홍 섭*, 최종수*, 여태경*
*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

Multibody Dynamic Analysis of a Test Miner on Soft Cohesive Soil

HYUNG-WOO KIM*, SUP HONG, JONG-SU CHOI AND TAE-KYEONG YEU

*Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KORDI
Daejeon, Korea

KEY WORDS: Multibody Dynamic Analysis 다물체 동력학 해석, Test miner 시험집광기, Soft Cohesive Soil 연약지반, Soil Mechanics 지반역학, Shear Displacement 전단변위, Sinkage 침하

ABSTRACT: This paper concerns about dynamic analysis of an underwater test miner, which operates on cohesive soil. The test miner consists of tracked vehicle and pick-up device. The motion of pick-up device relative to the vehicle chassis is controlled by two pairs of hydraulic cylinders. The test miner is modeled by means of a commercial software. A terramechanics model of cohesive soft soil is implemented to the software and applied to dynamic analysis of the test miner model. The dynamic responses of test miner are studied with respect to of four different types of terrain conditions.

1. 서론

심해저 망간단괴의 상업 생산은 해저 집광시스템의 성능에 의해 지대한 영향을 받는다. 상업생산에 요구되는 시간당 최대 500톤의 망간단괴 집광용량을 만족시키기 위해서는 해저주행 방식의 이동이 불가피하다(Yang *et al.*, 1997).

심해저의 퇴적지반은 매우 높은 함수율을 가진 미세한 입자들로 형성되어 있기 때문에 지반의 지지력(bearing capacity)이 매우 미약하다는 문제점을 가진다. 이러한 미약한 지반 지지력으로 인해 500톤/시에 달하는 망간단괴를 집광시스템으로 실어 운반하는 것은 불가능하며, 해상의 채광선까지 양광관을 통하여 연속적으로 채광하는 것(continuous mining)이 불가피하다. 이러한 연속적 채광시스템은 채광선, 양광관, 중간버퍼, 유연관, 자항식 집광기로 구성된다. 자항식 집광기와 버퍼를 연결하는 유연관의 형상은 자항식 집광기의 성능에 영향을 준다. 또한 유연관에 연결되어 있는 중간버퍼와 자항식 집광기 간의 상대위치도 자항식 집광기의 성능에 영향을 준다. 따라서 채광선-양광관-버퍼-유연관-자항식 집광기로 이어지는 전체 채광시스템의 동적거동 해석은 심해저 채광기술의 중요한 요소기술이다.

컴퓨터의 발달에 힘입어, 컴퓨터를 이용한 기계시스템에 대한 동적거동 해석이 활발히 이루어지고 있다. Hong *et al.*(2002)은 연약지반을 주행하는 강체차량에 대한 동적거동 해석방법을 개발하였다. 또한, 효율적인 다물체 무한궤도 해석프

로그램이 개발되었다(RecurDyn-LM, 2002). 하지만 이 다물체 해석프로그램은 연약한 지반에 대한 지반역학 모델이 빠져 있다.

본 논문에서는 다물체 해석프로그램에 Hong *et al.*(2002)에 의해 개발되어진 연약지반 지반역학 모델을 적용하고자 한다. 아울러 서로 다른 4가지의 연약지반에 대한 시험집광기의 동적거동 해석하고자 한다. 이러한 동적거동 해석을 통하여 시험집광기의 설계에 이용하고자 한다.

2. 시험집광기

Fig. 1은 시험집광기 다물체 모델을 나타내고 있다. 시험집광기 모델은 2개의 스프라켓(sprocket), 2개의 아이들러(idler), 20개의 로드휠(roadwheel), 10개의 지지롤러(support roller), 112개의 트랙링크로 구성되어 있다.

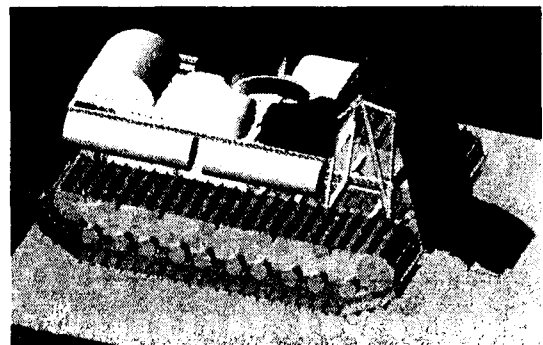


Fig. 1 Test miner model by using Commercial software

스프라켓, 로드휠, 아이들러, 지지롤러는 회전조인트(revolute joint)로 차체(chassis)와 연결되어 있다. 총 44개의 회전조인트가 사용되었다. 트랙링크들은 부싱을 사용하여 연결하였다. 스프라켓과 트랙링크, 아이들러와 트랙링크, 지지롤러와 트랙링크는 접촉요소(contact element)를 사용하였다. 상용프로그램에서 제공하는 사용자 정의 서브루틴(user-defined subroutine)을 사용하여 연약지반용 지반역학 모델을 적용시켰다.

Table 1 Mass distribution of multi-body vehicle model

Body	Mass(kg)	Moment of Inertia (kg · mm ²)
Chassis	3044.87	2.0e10, 4.5e10, 4.5e10
Sprocket	1	1.0e6, 1.0e6, 1.0e6
Idler	1	1.0e6, 1.0e6, 1.0e6
Roadwheel	1	1.0e6, 1.0e6, 1.0e6
Support roller	1	1.0e6, 1.0e6, 1.0e6
Tracklink	20.11	1.7e5, 2.3e5, 9.5e4

3. 지반역학

지반반력으로는 토양의 수직응력과 전단응력으로 나눌 수 있다. 토양의 수직응력은 차량의 지면 압력으로 표시되고, 압력-침하간의 관계식에 의해 얻어진다. 이에 반해 전단변위에 의해 발생하는 토양의 전단응력은 견인력과 모멘트를 발생시킨다. 연약한 점착성 토양은 심한 비선형성을 보여준다(예, Hong and Choi, 2001).

지면의 압력은 아래와 같이 정적침하의 함수로 나타난다.

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

Fig. 2는 압력-침하 특성곡선을 보여준다.

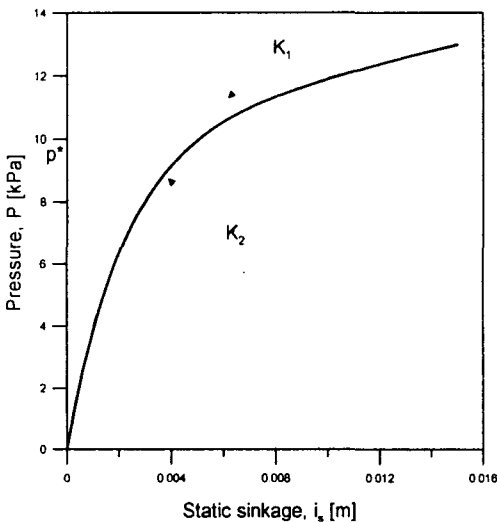


Fig. 2 Pressure-sinkage model

Wong (1993)은 점착성 토양의 전단 응력을 다음의 함수로 제안하였다.

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

여기서, τ_m 은 최대 전단응력이고, E 는 잔류응력에 대한 최대 전단응력의 비이다. k_w 는 최대 전단응력이 발생하는 전단 변위이고, s 는 전단변위이다. 함수특성 곡선은 Fig. 3과 같다.

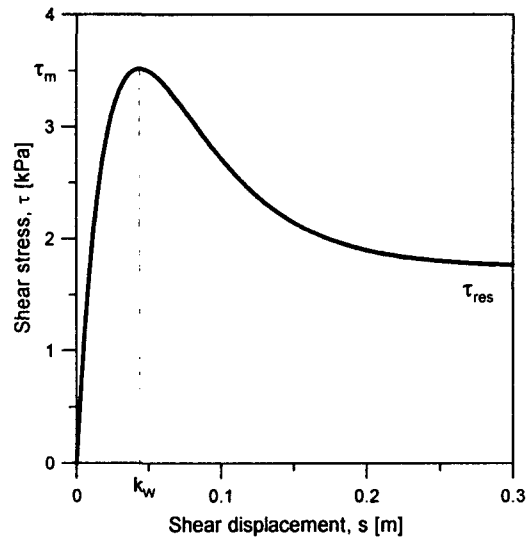


Fig. 3 Shear stress vs. displacement

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 점착력(cohesion)이고, C_d 와 μ 는 물질상수이며, ϕ 는 내부 마찰각이고, s 는 전단속도이다. 본 논문에서 사용된 점착성 토양 모델의 상수는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Data of soil model

Pressure-sinkage model	K_1, K_2	2.0 [m ⁻¹], 47.0 [m ⁻¹]
	p^*	10 kPa
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

4. 수치해석

시험집광기 모델의 동적거동 해석을 위해서 수치해석을 수행하였다. 수치해석에는 다음과 같은 4가지의 지반조건을 사용하였다.

- 평탄한 지반 (Flat ground)
- 경사 지반 (Slope ground : 10°, 20°, 30°)
- 트렌치 지반(Trench ground : 750 mm, 1000 mm, 1600 mm)
- 장애물 지반(Obstacle ground : 250 mm, 375 mm, 500 mm, 750 mm)

시험집광기는 초기에는 멈추어 있고, 스프라켓에 4rad/sec (트랙의 속도(V_0) : 1.2m/s)의 각속도를 초기 조건으로 주었다. 4가지의 지반에 대한 수치해석을 수행하였다. Fig. 4는 시험집광기 모델의 무게중심에 대한 경로를 나타낸다.

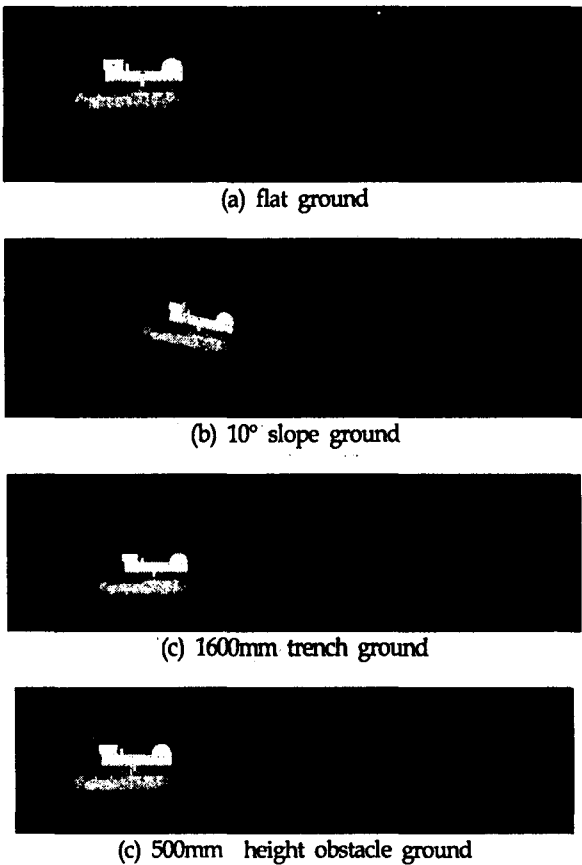


Fig 4. Trace curves of vehicle's CM on four terrains

Fig. 8 과 Fig. 9는 평탄지반에 대한 수치해석 결과를 보여주고 있다. Figs. 10 ~ 13은 경사각도 10° 와 30°에 대한 결과를 각각 보여주고 있다. Fig. 14와 Fig. 15는 1.6m의 트렌치를 지나가는 결과를 나타낸다. Fig. 16과 Fig. 17은 500mm의 장애물을 지나가는 결과를 나타내고 있다.

5. 수치해석 결과

5.1 평탄한 지반

Fig. 5는 평탄한 지반 위를 주행하는 차량에 대한 차체무게 중심의 수직방향(Y-direction)에 대한 변위를 나타내고 있다. 차량의 수직변위가 진동하고 있는데, 그 크기는 약 3mm이며, 이 값은 아주 작은 값이다.

Fig. 6은 차량의 진행방향(X-direction)에 대한 속도를 나타내고 있다. 0.4초에서 최대속도가 -1.2m/s이며, 이후 -1.1m/s를 중심으로 진동하고 있으며, 이때의 차량의 슬립은 약 8.3%이다.

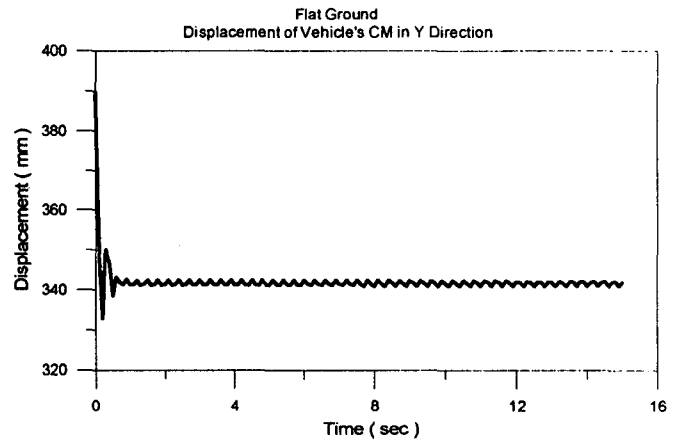


Fig. 5. Displacement of Vehicle's CM on flat ground in Y-direction

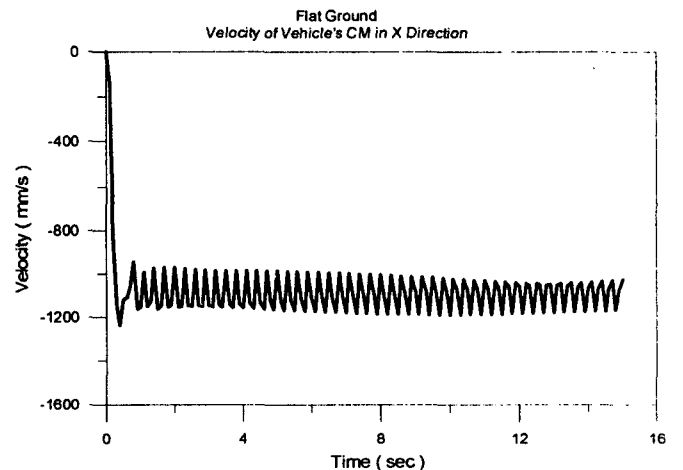


Fig 6 Velocity of Vehicle's CM on flat ground in X-direction

5.2 10°의 경사지반

Fig. 7과 Fig. 8은 7초 동안은 차량이 평탄한 지반 위를 움직이고, 그 후에 경사가 10°인 지반을 올라가는 차량에 대한

결과이다. Fig. 7의 결과를 보면, 초기의 7초 동안은 경사가 0°이고, 7초에서 10초까지는 경사가 10°보다 작고, 10초에서 15초까지는 경사가 거의 10°를 나타낸다.

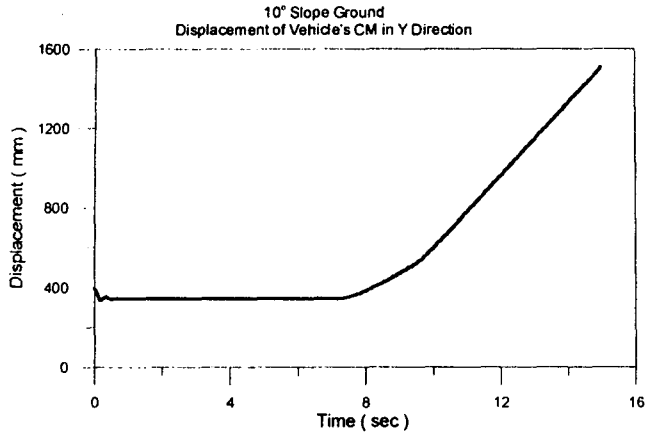


Figure 7. Displacement of vehicle's CM on slope 10° ground in Y-direction

Fig. 8은 진행방향(X-direction)에 차량의 무게중심의 속도를 보여주고 있다. 경사지반을 오를 때의 차량의 평균속도는 약 -1.05m/s이며, 조금 진동을 하고 있다.

차량의 지면에 대한 진행방향 속도(V_R)는 $V_R = V_0 / \cos 10^\circ$ 를 이용하여 구할 수 있다. 이때 차량의 평균슬립은 약 10%이며, 지면에 접촉하는 차량의 최대전단변위는 차량의 끝부분에서 약 30cm정도 발생한다.

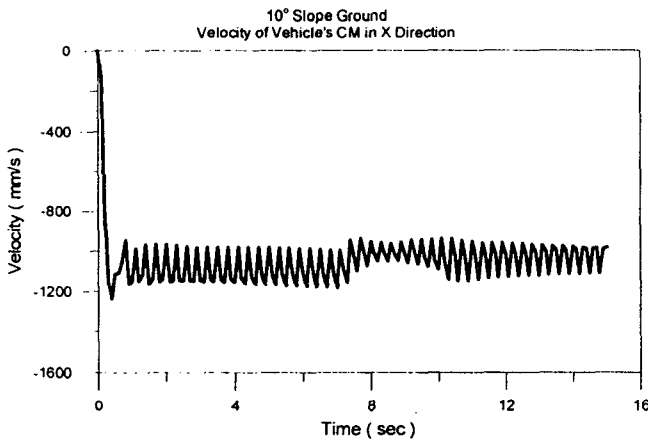


Figure 8. Velocity of vehicle's CM on slope 10° ground in X-direction

5.3 30°의 경사지반

Fig. 9와 Fig. 10은 경사가 30°인 지반에 대한 결과를 나타내고 있다. Fig. 9와 Fig. 10을 보면 차량이 경사지반을 올라가지 못하고 있다. 차량의 끝부분이 경사면에 접촉하였을 때 차량은 미끄러지기 시작하였다. 경사가 30°인 경우의 경사저항은 $W \sin 30 = W/2$ 인 약 18kN이다. Fig. 3을 이용하여 차량의 전단변위

를 구할 수 있다. 18kN에 대한 토양의 최대 전단변위는 약 7.5cm 정도이다. 그런데 10°의 경사도에서 차량의 최대 전단변위가 약 30cm정도 발생하였다. 그러므로 경사도가 30°일 경우는 최대 전단변위가 더 발생하게 되며, 아울러 차량의 견인력은 18kN 이하가 되어서 차량이 경사면을 오르지 못하게 된다.

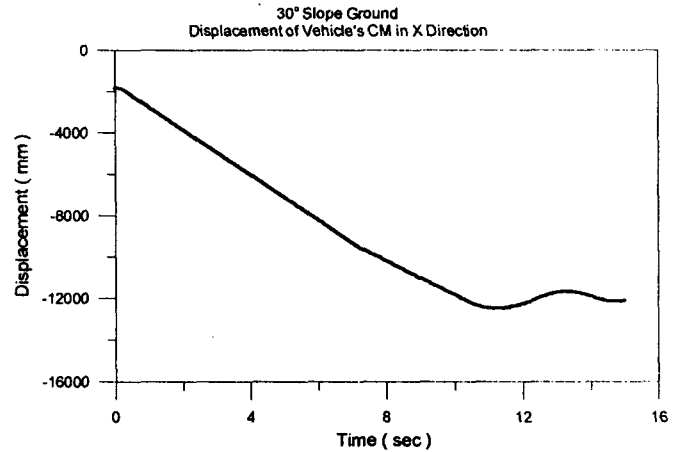


Figure 9. Displacement of vehicle's CM on slope 30° ground in Y-direction

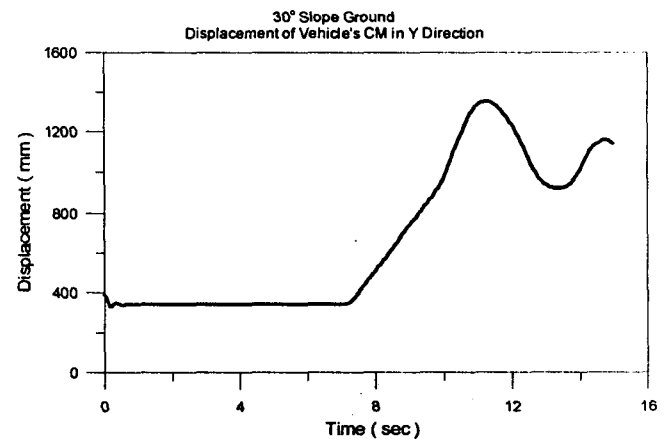


Figure 10. Displacement of vehicle's CM on slope 30° ground in X-direction

4.4 1600mm 트렌치지반

Fig. 11과 Fig. 12는 주행차량이 1600mm 트렌치지반을 지나갈 때의 결과이다. Fig. 11은 차량의 수직방향 변위에 대한 결과이다. 주행차량은 6.45초에서 트렌치를 지나기 시작해서, 10.85초에 완전히 트렌치를 벗어나게 된다. 트렌치를 지나는 동안 차량의 무게중심이 약 6.5cm가 가라앉았다가 트렌치를 완전히 지나면 다시 원래 위치로 복귀한다.

Fig. 12는 차량의 진행방향에 대한 속도를 나타내고 있다. 차량이 트렌치를 지나갈 때, 갑자기 속도가 -0.85m/s로 감소했다가, 차량이 트렌치를 완전히 벗어나면, 평탄지반과 마찬가지로

로 약 -1.1m/s의 속도를 보인다.

-1.1m/s로 안정화 된다.

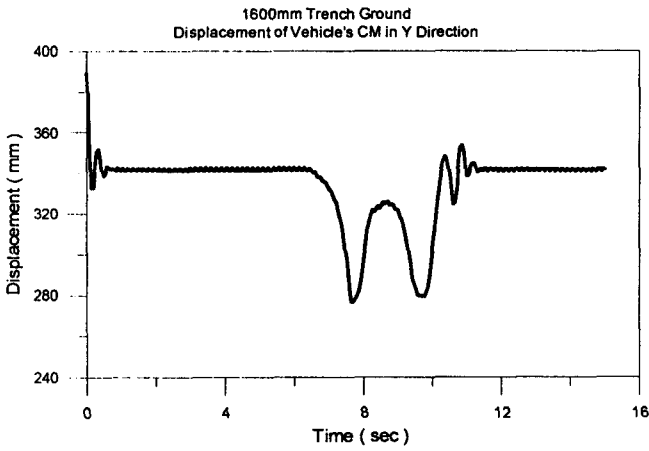


Fig 11. Displacement of vehicle's CM on 1600mm trench ground in Y-direction

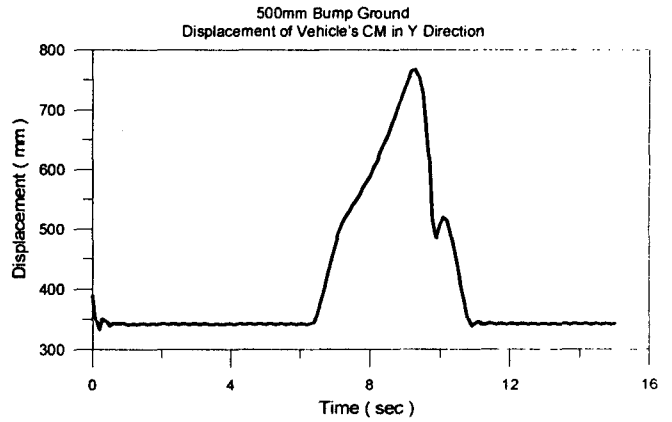


Fig 13. Displacement of vehicle's CM on 500mm obstacle in Y-direction

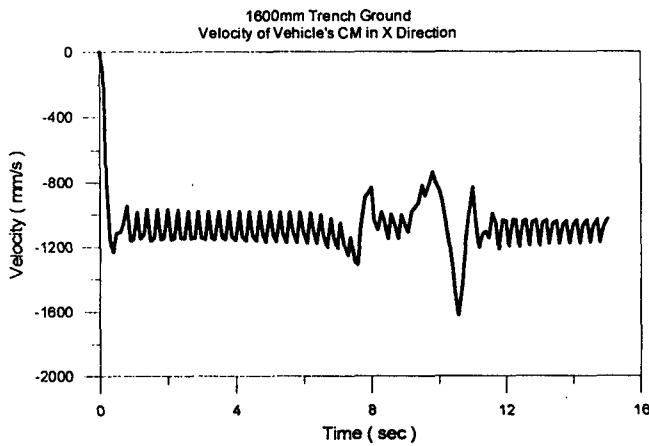


Fig 12. Velocity of vehicle's CM on 1600mm trench ground in X-direction

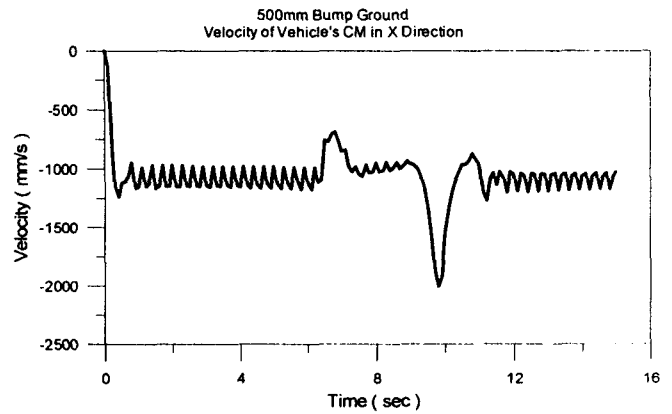


Fig 14. Velocity of vehicle's CM on 500mm obstacle in X-direction

5.5 500mm 장애물지반

Fig. 13과 Fig. 14는 주행차량이 500mm의 장애물을 지나갈 때의 수치해석결과를 나타낸다. Fig. 13은 차량의 수직방향에 대한 변위에 대한 그래프이다. 차량은 6.5초에 장애물을 올라가기 시작해서, 10.7초에 장애물을 완전히 벗어나게 된다. 또한 9.3초에 차량은 장애물의 정점에 도달하며, 이때의 수직변위가 약 770mm이다. 차량이 평탄한 지반을 지나갈 때의 수직변위가 약 340mm이다. 즉, 차량이 500mm의 장애물을 지나갈 때 차량의 수직방향의 변위의 변화는 약 430mm이다. 그러므로 차량이 장애물을 지나갈 때 발생하는 침하는 약 70mm정도 된다.

Fig. 14는 차량의 진행방향에 대한 속도결과를 나타내고 있다. 장애물을 지나가는 동안 속도는 감소하였다가, 차량이 장애물의 정점을 지나면 속도가 약 -2.0m/s까지 증가했다가,

6. CONCLUSIONS

연약지반용 지반역학모델을 다물체 해석프로그램에 적용하였으며, 이것은 연약지반에 대한 다물체 주행차량에 대한 동적 거동 해석을 가능하게 하였다. 4가지의 다른 지반(평탄지반, 경사지반, 트렌치지반, 장애물지반)에 대해서 시험집광기 모델의 동적거동 해석을 수행하였다. 수치해석 결과를 통하여 시험집광기 가상모델이 연약지반위에서 잘 주행함을 알 수 있었다. 향후 이 차량모델은 시험집광기의 프로토타입(prototype) 설계의 기준이 될 것이다.

후기

본 논문은 해양수산특정 연구과제인 "심해저 집광시스템 및 채광운용기술 개발"과제로 수행되었으며, 아울러 기본연구 과

제인 “해양개발 설계엔지니어링 기술 고도화”의 일부분으로
수행되었다.

참고문헌

- Yang, S. I. et al., A Study on the Development of Mining Technology for Deep-Seabed Manganese Nodules, The report of Korea Institute of Machinery & Materials, UCN376-2068.D, 1997.
- Hong, Sup, Kim, HW and Choi, JS, A Method for 3-D Dynamic Analysis of Tracked Vehicles on Soft Terrain of Seafloor, Fall KCORE Conference, pp. 149-154, 2002.
- RecurDyn-LM User's Manual, Ver 5.2, FunctionBay, 2004.
- Hong, Sup and Choi JS, Experimental Study on Grouser Shape Effects on Trafficability of Extremely Soft Seabed, Proceedings of the 4th Ocean Mining Symposium, Szczecin, Poland, pp. 115-121, 2001
- Wong, JY, Theory of Ground Vehicles, John Wiley & Sons, New York, 1993
- Baladi, GY 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