

연약지반 무한궤도차량의 다물체 동적거동 해석

김형우* · 홍 섭* · 최중수* · 여태경*
*한국해양연구원 해양시스템안전연구소

Multibody Dynamic Analysis of a Tracked Vehicle on Soft Cohesive Soil

HYUNG-WOO KIM*, SUP HONG*, JONG-SU CHOI* AND TAE-KYEONG YEU*
*Maritime and Ocean Engineering Research Institute, KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Multibody dynamic analysis 다물체 동역학 해석, Test miner 시험집광기, Soft cohesive soil 연약지반, Soil mechanics 지반역학, Shear displacement 전단변위, Sinkage 침하

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

1. 서 론

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 시간당 500톤에 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 요소 기술이다. 특히 연약지반 위를 주행하는 무한궤도 차량의 동적거동 해석은 아주 중요하다.

컴퓨터의 발달에 힘입어, 컴퓨터를 이용한 기계시스템에 대한 동적거동 해석이 활발히 이루어지고 있다. Hong et al. (2002)은 연약지반을 주행하는 강체차량에 대한 동적거동 해석

방법을 개발하였다. 연약지반에서 적용할 수 있는 연약지반 모델이 포함되어 있다.

또한, 효율적인 다물체 무한궤도 해석프로그램이 개발되었다 (RecurDyn, 2002). 하지만 상용프로그램에는 일반적인 지반모델만 포함되어 있을 뿐, 연약한 지반에서의 동적거동에 사용되는 연약지반 모델이 포함되어 있지 않다.

본 논문에서는 다물체 해석프로그램에 Hong et al.(2002)에 의해 개발되어진 연약지반 지반역학 모델을 적용하여, 연약지반에 대한 다물체 무한궤도 차량의 동적거동 해석을 할 수 있도록 하였으며, 이를 바탕으로 하여 지반의 형상이 다른 4종류의 연약지반(평탄지반, 경사지반, 장애물 지반, 트렌치 지반)에 대한 무한궤도차량의 주행성능을 관찰하였다. 차량의 동적거동 해석 결과는 향후 심해저 집광차량의 설계에 이용될 예정이다.

2. 무한궤도차량

상용해석 프로그램을 이용한 무한궤도 차량의 수치해석을 수행하기에 앞서 프로그램의 정확성에 대한 검증작업이 선행되어야 한다. 프로그램의 검증작업은 류한식(2004)의 논문으로 대신하였다. 류한식(2004)은 군사용 무한궤도 차량을 이용하여 사용자 정의 서브루틴(User-defined subroutine)을 적용한 상용해석 프로그램(RecurDyn, 2002)에 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. 차량의 사시 중심에서의 가속도를 측정하기 위해 포탑 위에 Strain type 3축 가속도계 센서를 부

착하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 상용 해석 프로그램(RecurDyn, 2002)을 이용한 해석모델과 MBT의 실험치를 비교한 결과이다. Fig. 2는 8인치 범프를 차량 속도 10km/h로 주행할 때 사시의 가속도를 보여주고 있으며, 수치해석 결과와 실험결과가 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 3은 평지를 차량 속도 10km/h로 주행할 때 얻어지는 사시의 가속도 주파수 성분을 나타내며, 약 14Hz 성분이 지배적으로 나타남을 알 수 있다. 여기서 14Hz 성분이 지배적인 이유는 다음과 같다. 차량속도 10km/h는 초속 2.8m 가 되며, 궤도 링크의 길이가 약 0.2m로 로드휠, 아이들러, 스프라켓과 궤도와 접촉, 지면과 궤도와 접촉에 의해 약 14Hz 성분이 지배적으로 나타남을 알 수 있다 (류한식, 2004).

Fig. 4는 무한궤도차량 모델을 나타내고 있다. 무한궤도차량은 주행장치와 채집장치로 구성되어 있다. 주행장치는 1개의



Fig. 1 Field test on profile IV

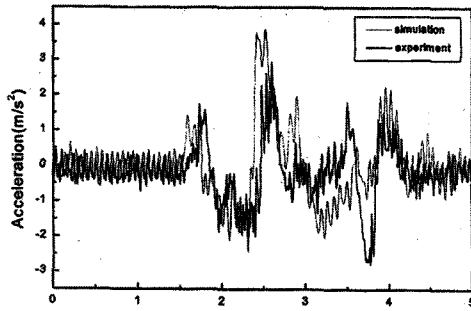


Fig. 2 Vertical acceleration of chassis on 8 inch symmetric bump

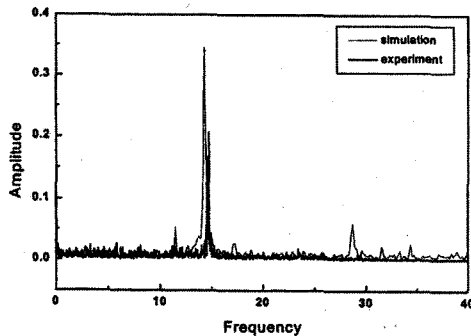


Fig. 3 FFT of the vertical acceleration 10 km/h straight motion

차체(Chassis)와 2개의 스프라켓(Sprocket), 2개의 아이들러(Idle), 20개의 로드휠(Roadwheel), 10개의 지지롤러(Support roller), 112개의 트랙링크로 구성되어 있으며, 차량의 물성치는 Table 1에 나타나 있다.

스프라켓, 로드휠, 아이들러, 지지롤러와 차체(Chassis)의 연결에는 34개의 회전조인트(Revolute joint)가 사용되었다. 트랙링크들 사이의 연결은 부형 요소를 사용하였으며, 스프라켓과 트랙링크, 로드휠과 트랙링크, 아이들러와 트랙링크, 지지롤러와 트랙링크사이에는 접촉요소(Contact element)를 사용하였다.

상용해석프로그램에서 제공하는 사용자 정의 서브루틴(User-defined subroutine)을 사용하여 Hong et al.(2002)에 의해 개발된 연약지반용 지반역학 모델을 적용시켰다.

3. 지반역학

토양의 지반반력은 토양의 수직응력과 전단응력으로 나눌 수 있으며, 토양의 수직응력은 차량의 지면 압력으로 표시되고, 압력-침하간의 관계식에 의해 구할 수 있다. 이에 반해 전단변위에 의해 발생하는 토양의 전단응력은 차량의 견인력과 모멘트를 발생시키며, 전단변위-전단응력간의 관계식에 의해 구해진다.

지면의 압력은 아래와 같이 정적침하의 함수로 나타난다.

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

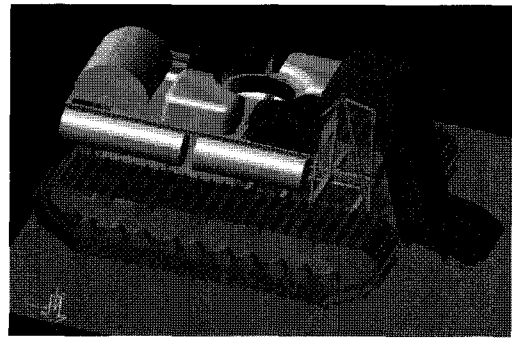


Fig. 4 Test miner model by using commercial software

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
Idle	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

정적침하는 차량의 전체침하에서 차량의 전단변위에 의한 침하를 제외한 침하(Hong et al., 2002)를 의미하며, 압력-침하 간의 특성곡선은 Fig. 5에 나타나 있으며, K_1 과 K_2 는 직선의 기울기를 나타낸다.

연약한 점착성 토양은 Fig. 6과 같이 일정 이상의 전단변위가 발생하면 토양이 급격히 붕괴되는 전형적인 비선형성을 나타낸다(Hong and Choi, 2001).

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

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

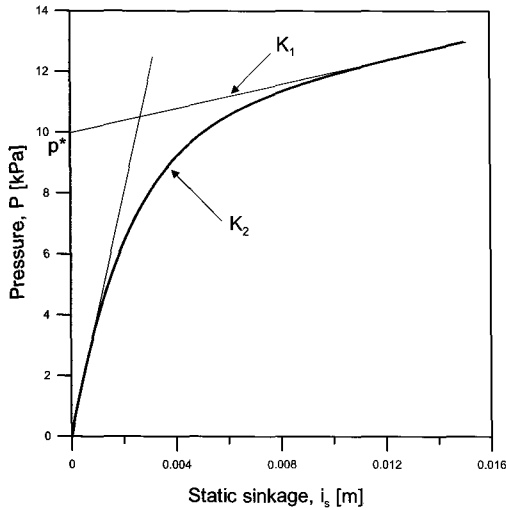


Fig. 5 Pressure-sinkage model

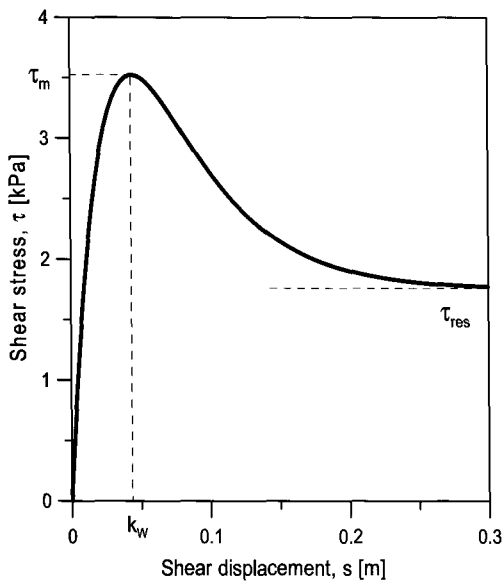


Fig. 6 Shear stress vs. displacement

여기서, τ_m 은 최대 전단응력을 나타내며, E 는 잔류응력에 대한 최대 전단응력의 비이다. k_w 는 최대 전단응력이 발생하는 지점의 전단변위를 나타내며, s 는 전단변위를 의미한다. 함수 특성 곡선은 Fig. 6에 나타나 있다.

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)이며, C_d 와 μ 는 물질상수이며, ϕ 는 내부 마찰각이고, s 는 전단속도이다. 본 논문에서 사용된 점착성 토양 모델의 상수는 Table 2에 나타나 있다.

4. 수치해석

무한궤도차량의 동적거동 해석을 위해서 수치해석을 수행하였다. 수치해석에는 4가지의 지반조건을 사용하였다.

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

무한궤도차량의 스프라켓에 4rad/sec(트랙의 속도(V_0): 1.2m/s)의 각속도를 초기 조건으로 주었다. 4개의 지반에 대해 각각 수치해석을 수행하였으며, Fig. 7은 각 해석결과에 대한 무한궤도차량의 무게중심에 대한 경로를 나타낸다.

Fig. 8과 Fig. 9는 무한궤도차량의 평탄지반에 대한 수치해석 결과를 보여주고 있다. Fig. 10~Fig. 13은 경사각도가 각각 10° 와 30°에 대한 무한궤도차량의 거동 해석 결과를 보여주고 있다. Fig. 14와 Fig. 15는 1.6m의 트렌치를 통과하는 무한궤도차량의 결과를 나타낸다. Fig. 16과 Fig. 17은 무한궤도차량이 0.5m의 장애물을 지나는 결과를 나타내고 있다.

Table 2 Data of soil model

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

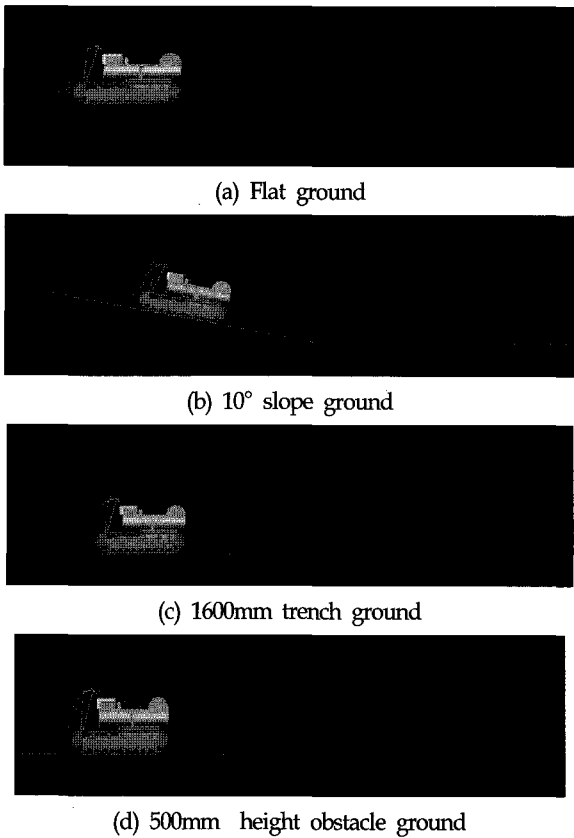


Fig. 7 Trace curves of vehicle's CM on four terrains

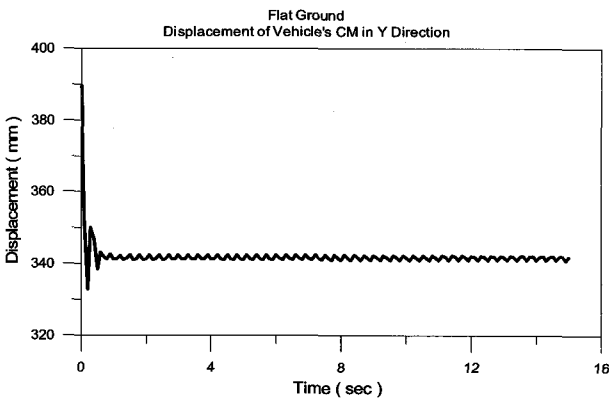


Fig. 8 Displacement of vehicle's CM in Y-direction

5. 수치해석 결과

5.1 평탄한 지반

Fig. 8은 평탄한 지반 위를 주행하는 차량에 대한 차체무게 중심의 수직방향(Y-direction)에 대한 변위를 나타내고 있다. 차량의 수직변위가 진동하고 있는데, 그 크기는 약 0.003m으로 아주 작은 값이며, 매번 새로운 트랙링크가 지면에 접촉하는 현상에 의해 발생하는 결과이다.

Fig. 9는 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%정도 발생하였다.

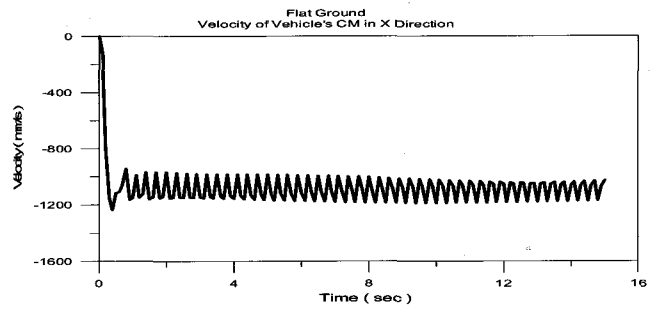


Fig. 9 Velocity of vehicle's CM on flat ground in X-direction

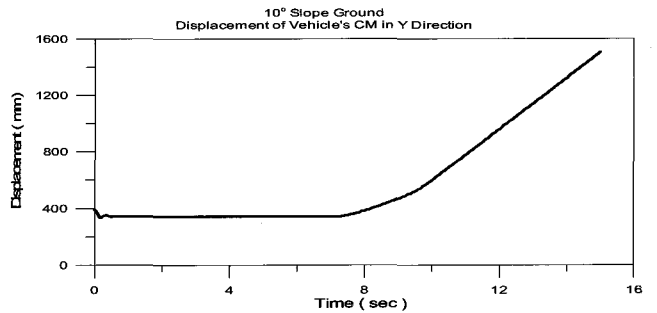


Fig. 10 Displacement of vehicle's CM in Y-direction

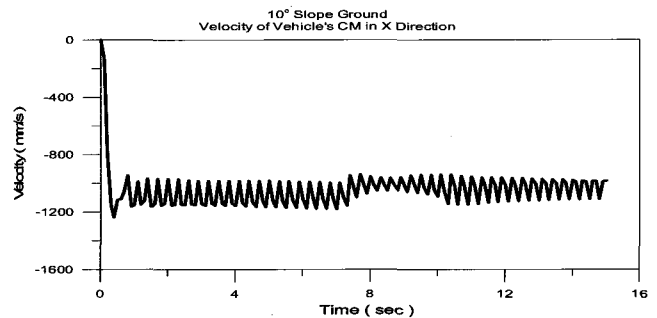


Fig. 11 Velocity of vehicle's CM in X-direction

5.2 10°의 경사지반

Fig. 10과 Fig. 11은 7초 동안은 차량이 평탄한 지반 위를 움직이고, 그 후에 경사가 10°인 지반을 올라가는 조건에 대한 결과이다. Fig. 10의 결과에서 초기의 7초 동안은 경사가 0°이고, 7초에서 10초까지는 경사가 10°보다 작고, 10초에서 15초까지는 경사가 거의 10°를 나타낸다. Fig. 10에서 나타난 것처럼 무한궤도 차량은 경사가 10°인 지반을 주행하는 데 크게 문제점이 발생하지 않았다.

Fig. 11은 진행방향(X-direction)에 차량의 무게중심의 속도를 나타내며, 경사지반을 오를 때의 차량의 평균속도는 약 -1.05m/s이다. 차량의 지면에 대한 진행방향 속도(V_g)는 차량의 속도(V_0)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_g = V_0 / \cos 10^\circ \tag{4}$$

식 (4)를 이용하여 계산된 차량의 평균슬립은 약 10%이다.

이는 평탄한 지반의 평균슬립(8.3%)보다 크게 발생한다. 이런 현상이 발생하는 이유는 차량이 경사면을 올라 갈 경우 차량의 자중에 의한 차량의 진행방향에 대한 저항력이 발생하기 때문이다. 지반에 접촉하는 차량의 최대전단변위는 차량의 끝부분에서 발생하며, 그 크기는 약 0.3m 이다.

5.3 30°의 경사지반

Fig. 12와 Fig. 13은 경사가 30°인 지반에 대한 결과를 나타내고 있다. Fig. 12와 Fig. 13을 보면 차량이 경사지반을 올라가지 못하고 있다. 차량의 끝부분이 경사면에 접촉하였을 때 차량은 미끄러지기 시작하였다. 경사가 30°인 경우의 경사저항은 $W\sin30 = W/2$ 인 약 18kN이다. 그러므로 차량이 경사면을 오르기 위해서는 18kN보다 큰 구동력이 필요로 한다. 18kN에 대한 토양의 최대 전단변위를 Fig. 6에서 구하면 약 0.075m 정도이다. 경사도가 10°인 경우에 차량의 최대 전단변위가 약 0.3m정도 발생하였으므로, 경사도가 30°일 경우에는 최대전단변위가 0.3m 이상 발생하게 될 것이며, 이 경우에 차량의 구동력은 약 8.8kN이며, 경사면을 올라가기 위한 구동력(18kN)에 비해 작은 값이다. 그러므로 차량은 더 이상 경사면을 오르지 못하게 된다.

5.4 1600mm 트렌치지반

Fig. 14와 Fig. 15는 주행차량이 1.6m 트렌치 지반을 지나갈 때의 결과이다. Fig. 14는 차량의 수직방향 변위에 대한 결과이

다. 주행차량은 6.45초에서 트렌치를 지나기 시작해서, 10.85초에 완전히 트렌치를 벗어나게 된다. 트렌치를 지나는 동안 차량의 무게중심이 약 0.065m 정도 침하하며, 트렌치를 완전히 지나면 무게중심이 원래 위치로 복귀한다.

Fig. 15는 차량의 진행방향에 대한 속도를 나타내고 있다. 차량이 트렌치를 지나갈 때, 갑자기 속도가 -0.85m/s로 감소했다가, 차량이 트렌치를 완전히 벗어나면, 평탄지반과 마찬가지로 약 -1.1m/s의 속도를 보인다.

5.5 500mm 장애물지반

Fig. 16과 Fig. 17은 주행차량이 0.5m의 장애물을 지나갈 때의 수치해석결과를 나타내고 있다. Fig. 16은 시간의 변화에 대한 차량의 무게중심의 수직방향 변위 그래프이다. 차량은 6.5초에 장애물을 올라가기 시작해서, 10.7초에 장애물을 완전히 벗어나게 된다. 또한 9.3초에 차량은 장애물의 정점에 도달하며, 이때의 차량의 무게중심의 수직변위가 약 0.77m이다. 한편 차량이 평탄한 지반을 지나갈 때 무게중심의 수직변위가 약 0.34m이다. 즉, 차량이 0.5m의 장애물을 지나갈 때 차량 무게중심의 수직방향 변위의 변화는 약 0.43m(=0.77m-0.34m)이다. 그러므로 차량이 장애물의 정점을 지나갈 때 차량의 무게중심에서 발생하는 침하는 약 0.07m(=0.5m-0.43m)정도 된다.

Fig. 17은 차량의 진행방향에 대한 속도결과를 나타내고 있다. 장애물을 지나는 동안 속도는 감소하였다가, 차량이 장애물의 정점을 지나면 속도가 약 -2.0m/s까지 증가했다가, -1.1m/s로 안정화 되었다.

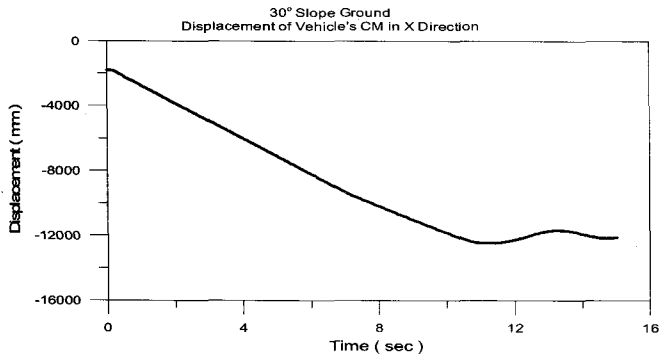


Fig. 12 Displacement of vehicle's CM in Y-direction

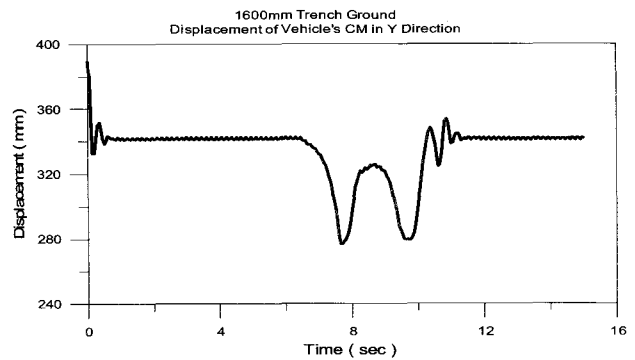


Fig. 14 Displacement of vehicle's CM in Y-direction

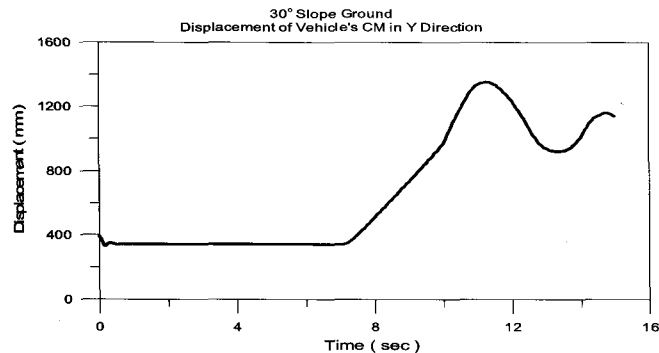


Fig. 13 Displacement of vehicle's CM on slope 30° ground in X-direction

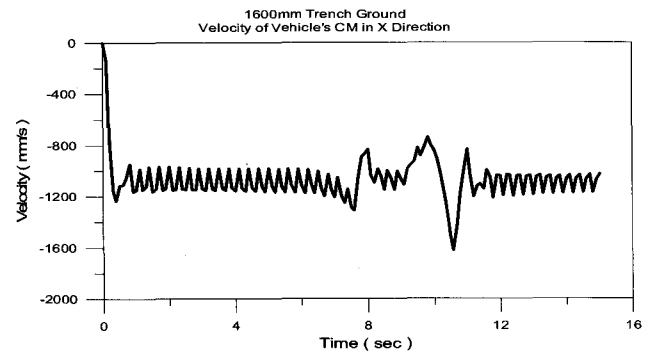


Fig. 15 Velocity of vehicle's CM in X-direction

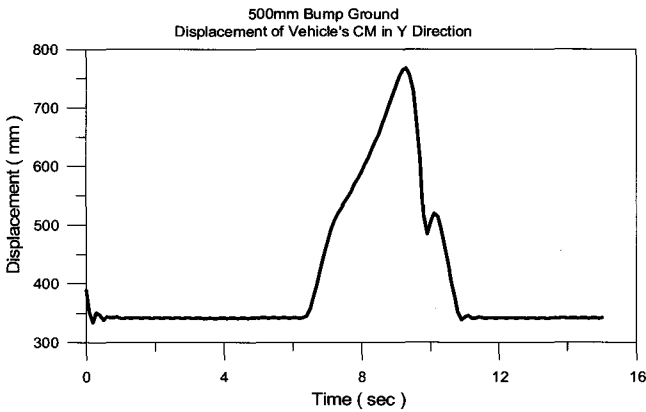


Fig. 16 Displacement of vehicle's CM on 500mm obstacle in Y-direction

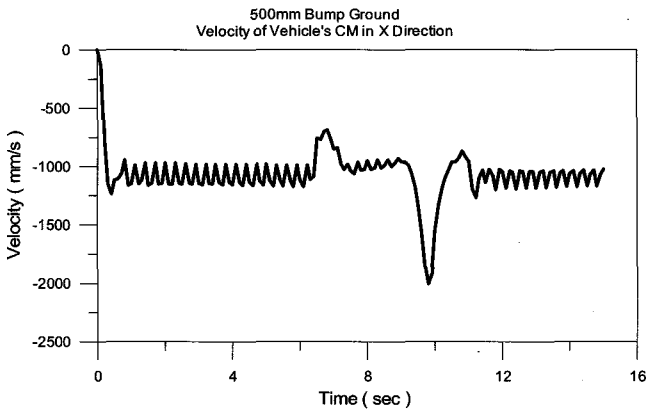


Fig. 17 Velocity of vehicle's CM on 500mm obstacle in X-direction

6. 결 론

본 연구에서는 연약지반용 지반역학모델을 다물체 해석프로그램에 적용하였으며, 그 결과 연약지반에 대한 다물체 무한궤도 주행차량의 동적거동 해석이 가능하게 되었다.

4가지의 다른 지반(평탄지반, 경사지반, 트렌치지반, 장애물지반)에 대해서 무한궤도차량 모델의 동적거동 해석을 수행하였으며, 수치해석 결과를 통하여 시험집광기 가상모델이 연약지반위에서 잘 주행함을 알 수 있었으며, 10°의 경사면에 대한 주행이 가능하였으며, 1.6m의 트렌치 구간에 대한 주행도 가능하였다.

향후 이 차량모델은 시험집광기의 프로토타입 설계의 기준이 될 것이며, 많은 수치해석을 통하여 시험집광기의 설계 및 제작에 직접 이용될 것이다.

후 기

본 논문은 해양수산특정 연구과제인 "심해저 집광시스템 및 채광운용기술 개발"과제 및 "친환경 갯벌차량 기술개발"과제의 일부분으로 수행되었다.

참 고 문 헌

류한식 (2004). 3차원 군수용 궤도차량의 동적 궤도·장력 및 거동 특성에 대한 연구, 박사학위논문, 한양대학교 대학원

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.

Hong, S. and Choi J.S. (2001). "Experimental Study on Grouser Shape Effects on Traffability of Extremely Soft Seabed", Proceedings of the 4th Ocean Mining Symposium, Szczecin, Poland, pp 115-121.

Hong, S., Kim, H.W. and Choi, J.S. (2002). "A Method for 3-D Dynamic Analysis of Tracked Vehicles on Soft Terrain of Seafloor", Fall KCORE Conference, pp 149-154.

RecurDyn-LM (2002). User's Manual, Ver 5.2, FunctionBay.

Wong, J.Y. (1993). Theory of Ground Vehicles, John Wiley & Sons, New York.

Yang, S.I., Hong, S., Hong, S.W., Choi, H.S., Lim, Y.K., Hong, S.Y., Lee, P.M., Hong, K.Y., Lee, J.M., Kim, H.J., Cho, I.H., Kim, J.H., Kim, H.J., Choi, J.S., Jeon, B.H. and Kang, J.S. (1997). A Study on the Technological Development for the Deep Seabed Mining and the Protection of the Deepsea Environment - Volume 2 Development of Mining Technology for Deep-Seabed Manganese Nodules, The report of Korea Institute of Machinery & Materials, UCN376-2068.D.

2006년 8월 3일 원고 접수

2007년 1월 23일 최종 수정본 채택