한국정밀공학회지 제 20 권 제 6 호 (2003 년 6 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 20, No. 6, June 2003.

심해저 무한궤도식 채광차량의 동적 해석에 관한 연구

한형석#, 홍섭*

A Study of Dynamic Analysis of a Tracked Vehicle for Mining on Deep-Sea Bed

Hyung Suk Han#, Sup Hong*

ABSTRACT

A study on the dynamic analysis of a tracked vehicle for mining on deep-sea bed with very soft soil is presented. An equation for the interaction between track and soft soil is employed to develop a track/soil interaction module called TVAS. The vehicle is modeled as a multi-body dynamic system using a multi-body dynamic analysis program. The developed module is incorporated into the multi-body dynamic analysis program with a user subroutine. The dynamic behavior and design of the mining vehicle on deep-sea bed is investigated.

Key Words : Tracked Vehicle(무한궤도 차량), Multi-body Dynamics(다물체동역학), Deep-Sea Bed(심해저면), Mining(채광)

기호설명

p : normal pressure, N/m^2
n : exponent of soil deformation
k_w : shear displacement at τ_{max} , m
b : track length, m
k_1 : slope at elastic region, Pa/m
k_2 : slope at yielding region, Pa/m
p_0 : limit pressure, N/m^2
z : sinkage, m
s : shear displacement, m
τ_{res} : residual shear stress, N/m^2
τ_{max} : maximum shear stress, N/m^2
ϕ : internal friction angle, rad
c : cohesion of ground, N/m^2
$\boldsymbol{M}$: system mass
$\boldsymbol{q}$: position
$\dot{\boldsymbol{q}}$: velocity
$\ddot{\boldsymbol{q}}$: acceleration
$\boldsymbol{Q}$: applied force
$\boldsymbol{\Phi}_q$: Jacobian
λ : Lagrange multiplier
γ : right side of acceleration

1. 서론

수심 3000~5000m 의 태평양 심해저 면에는 망간이 구형으로 응고되어 흩어져 있어 세계 여러 나라에서는 이를 채광하기 위한 연구를 수행하고 있다. Yamazaki[1] 와 Amann[2] 에 따르면 심해저면은

접수 2002 년 12 월 6 일 접수
교신저자, 한국기계연구원
Email : hshan@kimm.re.kr, Tel : (042) 868-7814
* 한국해양연구원

여러 면에서 지상에서의 환경과 다르다. 그 중에 하나는 지반이 매우 연약하다는 것이다. 연약 지반에서의 주행성능을 확보하기 위하여 채광용 차량의 주행방식으로 무한궤도식이 적용되고 있다. Choi[3]에 따르면 한국해양연구원에서 Fig. 1 과 같은 심해저 망간 채광 시스템에 무한궤도식 주행장치를 적용하는 연구를 수행하고 있다. 심해저에서의 실제 실험은 어려운 측면이 많기 때문에 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 성능 시뮬레이션이 선 요구된다. 또한 최종 채광장치는 무인운전을 목표로 하기 때문에 시스템의 동적 시뮬레이션에 의한 제어 방안을 모색할 필요가 있다. 무한궤도 차량은 차량의 구조가 다양하고 지반과의 상호작용이 복잡하다. 이미 널리 알려진 무한궤도식 주행장치의 해석 기술이나 관련 해석 프로그램들은 지상 야지, 즉 지반이 견고한 조건을 주로 다루고 있다. 또한 상용 프로그램은 특정한 구조의 차량에 적합하도록 개발되어 있어 심해저면과 같은 연약 지반이나 본 논문에서 소개하는 주행장치를 직접 해석하는데 부가적인 노력이 요구됨을 Rubinstein[4] 문헌에서 알 수 있다. 국내에서는 Shin[5,6] 를 비롯한 몇몇의 연구자들이 주로 일반 야지에서의 무한궤도식 차량에 대한 연구 위주로 수행하였다. 이미 공개된 해석 프로그램을 본 논문에서 소개하는 시스템에 적용하면 두가지 측면에서 어려운 점이 있다. 하나는 차량의 구조가 기존의 해석 프로그램이 대상으로 하는 것과 다르다는 것이다. 다른 하나는 지면의 특성이 일반 야지와 달라 기존의 해석 프로그램을 직접 사용하면 연약지반을 고려하기 힘들다. 그래서 본 논문에서는 심해저 채광장치의 무한궤도식 주행장치를 위한 동적 해석 방법을 소개한다.

본 논문에서는 심해저에서의 채광을 위한 무한궤도식 주행장치 차량의 동적 해석 기법을 소개한다. 기본적으로 다물체 동역학 이론을 이용하며 궤도/지면 상호작용과 궤도/휠의 접촉 모듈은 본 연구의 차량에 적합하도록 개발하였다. 개발된 모듈과 상용 다물체 동역학 해석기와 연성시켜 개발중인 차량의 동적 해석을 수행한다. 그 결과 심해저 채광용 차량에 본 논문에서 제시한 동적 해석 방법을 적용할 수 있음과 설계 변수의 영향도를 분석할 수 있었다.

2. 해석 방법 개발

2.1 다물체 동역학

Fig. 2 는 다물체 동역학 시스템을 보여주고 있다. 만일 이 시스템이 nb 개의 강체로 구성되어 있다면 공간에서 시스템의 운동을 표현하기 위해서 직교 좌표계에서는 $6\times nb$ 개의 좌표가 필요하다.

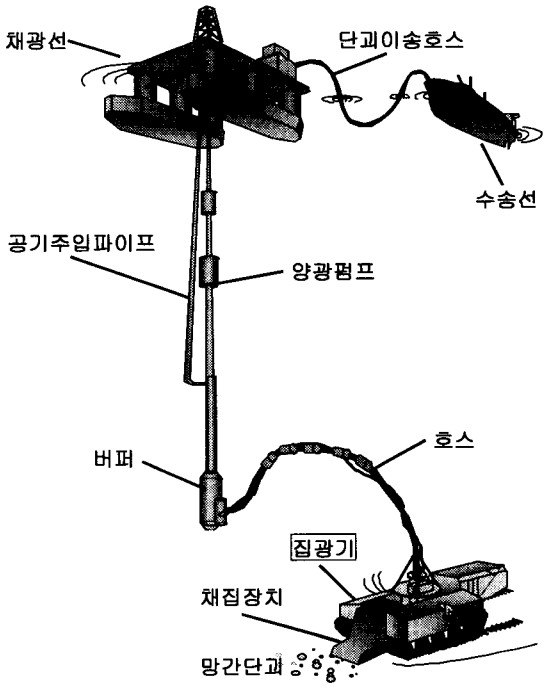

Fig. 1 Conceptual deep sea mining system of KORDI

그러나 이러한 일반좌표는 물체들간의 구속조건 때문에 모두 독립은 아니다. 각 물체들의 운동은 일반 좌표들간의 기구적 구속에 의한 영향을 받는다. 다물체 시스템의 운동을 제어하고 이해하기 위해서는 공간에서의 물체, 조인트, 힘 요소의 정의가 필요하게 된다. nb 개의 강체로 구성된 시스템이 있다면 그 시스템의 일반좌표는 식(1)과 같이 정의된다.

$$\boldsymbol{q} = [q_1, q_2, \cdots\cdots, q_{nb\times 6}]^T \tag{1}$$

만일 시스템에 m 개의 구속조건이 있다면 식(2)와 같이 표시되고 구속된 다물체 시스템의 운동방정식은 식(3)과 같이 정의된다.

$$\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{q},t)=\left[\Phi_1(\boldsymbol{q},t),....,\Phi_m(\boldsymbol{q},t)\right]^T=0 \tag{2}$$

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{\Phi}_{\boldsymbol{q}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{\lambda}=\boldsymbol{Q} \tag{3}$$

식(3)을 유용하게 이용하기 위하여 식(2)의 1,2 차 미분이 필요하며 식(4), 식(5)와 같이 정의된다.

$$\boldsymbol{\Phi}_{\boldsymbol{q}}\dot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{\Phi}_t=0 \tag{4}$$

$$\boldsymbol{\Phi}_{\boldsymbol{q}}\ddot{\boldsymbol{q}}=-(\boldsymbol{\Phi}_{\boldsymbol{q}}\dot{\boldsymbol{q}})_{\boldsymbol{q}}\dot{\boldsymbol{q}}-2\boldsymbol{\Phi}_{\boldsymbol{qt}}\dot{\boldsymbol{q}}-\boldsymbol{\Phi}_{\boldsymbol{tt}}\equiv\boldsymbol{\gamma} \tag{5}$$

식(3), 식(5)를 이용하여 행렬형태의 구속 다물체 시스템 운동방정식을 식(6)과 같이 정의하게 된다.

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{M} & \boldsymbol{\Phi}_{\boldsymbol{q}}^{\boldsymbol{T}}\\ \boldsymbol{\Phi}_{\boldsymbol{q}} & 0\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\ddot{\boldsymbol{q}}\\ \boldsymbol{\lambda}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\boldsymbol{Q}\\ \boldsymbol{\gamma}\end{Bmatrix} \tag{6}$$

다물체 동역학 이론과 그의 해법은 Haug[8] 의 문헌을 참조 바란다. 본 논문에서는 다물체 동역학 모델링 및 시뮬레이션을 위하여 상용 다물체 동역학 해석 소프트웨어 DADS[9] 를 해석기로 이용한다. 다물체 동역학적 접근의 장점은 동적 기계

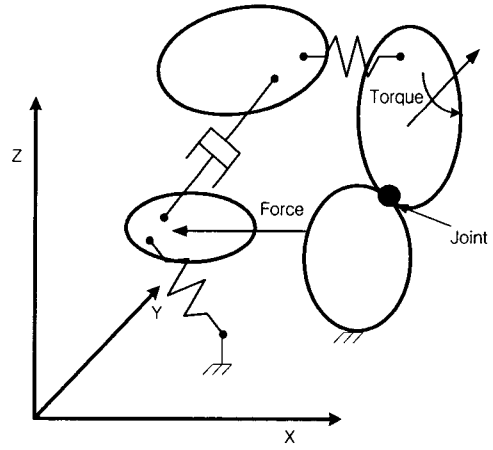

Fig. 2 Multi-body dynamic system

시스템의 전체적인 거동을 예측하기에 적합하다는 것이다.

2.2 야지 주행역학

야지에서의 주행 성능은 궤도와 지반과의 상호작용에 의하여 결정되기 때문에 주행 환경에 가장 적합한 상호작용 관계식을 이용해야 보다 정확한 해석 결과를 얻을 수 있다. 지반에 의해 궤도 밑면에 작용하는 힘은 크게 수직력과 전단력으로 구성된다. 이 두 힘에 대한 관계식 종류는 많으나 본 논문에서 적용하고자 하는 차량은 연약 지반에서의 주행을 목표로 하기 때문에 궤도/지반 상호작용 관계식 중 연약 지반에 적합한 것을 택하였다. Wong [10,11] 은 실험을 통하여 침하량-수직압력 관계를 식(7)과 같이 제안하였으며 이 관계식이 연약지반에 널리 이용되고 있다.

$$p=(p_0+k_2\cdot z)\cdot(1-\exp(-\frac{z\cdot k_1}{p_0})) \tag{7}$$

식(7)에서 이용되는 상수들은 토양에 대한 실험에 의하여 결정된다. Wong 은 전단변형과 전단응력 사이의 관계를 식(8)과 같이 제안하였다.

$$\tau=\tau_{\max}\cdot[\{1+(\frac{E}{1-e^{-1}}-1)\cdot e^{1-s/k_w}\}\times(1-e^{-s/k_w})\cdot\frac{1}{E}] \tag{8}$$

여기서,

$$\tau_{\max}=c+p\cdot\tan\phi$$

식(7)과 식(8)은 본 논문에서 연약 지반의 궤도/지반 상호작용력 계산에 이용된다. 이미 알려진 무한궤도식 주행차량 해석 프로그램들은 식(7), (8)과 같은 연약지반을 위한 관계식을 사용하지 않는다. 그러한 이유로 본 논문에서는 연약지반에 적합한 궤도/지반 모델을 포함한 무한궤도식 주행장치의 동적 해석 방법을 제안하고 있는 것이다.

2.3 해석 모델 개발

일반적으로 무한궤도 차량은 무한궤도, 로드암, 로드휠, 아이들러, 스프라켓, 장력조절장치, 현가장

치 등으로 구성된다. 이러한 구성 요소들을 다음과 같이 다물체 동역학적으로 모델한다.

2.3.1 무한궤도

무한궤도는 일반적으로 유연한 연속체이거나 금속을 핀으로 연결한 구조를 가진다. 본 논문에서는 무한궤도를 모델하기 위하여 Fig. 3 과 같이 무한궤도를 다수의 강체(rigid body)로 변환하고 강체들은 회전조인트를 이용하여 연결하는 방법을 이용한다. 즉 다중링크(multi-link) 개념을 이용한다. 이러한 모델의 장점은 궤도를 실물과 유사하게 모델하는 장점이 있다. 그러나 그에 따라 궤도를 고려하는 물체(body)의 증가에 따라 자유도와 구속조건이 증가하게 되어 계산시간의 증가가 야기된다. Fig. 3 과 같은 방법으로 폐루프인 무한궤도를 모델하면 잉여구속(redundant constraints)이 또한 발생한다. 잉여구속을 제거하기 위하여 구속조건을 증가시키지 않는 힘 요소로 회전조인트 1 개를 부시(bush)로 대치하였다. 이 부시는 회전조인트와 같은 효과를 얻기 위하여 축방향 회전 강성은 0 이 되도록 한다.

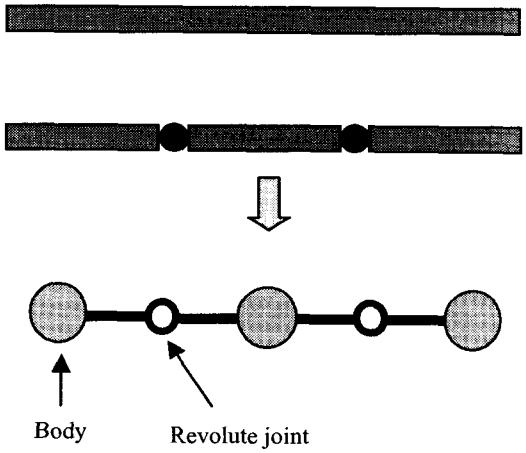

Fig. 3 Model of track

2.3.2 궤도/휠 상호작용

무한궤도와 휠(로드휠, 아이들러) 사이의 상호작용은 접촉을 이용한다. 즉 Fig. 4 에서와 같이 휠은 원으로, 궤도는 선으로 가정하고 원-선 접촉을 이용하여 상호작용을 모델한다. 여기서 계산시간의 문제가 야기된다. 원-선 접촉은 2 단계의 과정을 거치게 되는데 하나는 접촉 여부의 판별이고 다른 하나는 접촉력의 계산이다. 이 과정에서 접촉여부의 판별에 계산 시간을 줄이기 위한 알고리즘이 추가된다. 모든 휠과 궤도를 구성하는 물체 사이의 접촉판별은 모든 조합을 고려하지 않고 구동 스프라켓의 회전각에 따른 접촉 예상 조합을 미리 정의하여 사용하는 알고리즘을 이용하여 접촉 판결에 소요되는 시간을 감소시킨다.

궤도/휠 상호작용과 궤도/지면 상호작용을 위하여 본 논문에서는 TVAS 라는 모듈을 개발하였다. TVAS 는 2.4 절에서와 같이 DADS 와 연성시키게 된다.

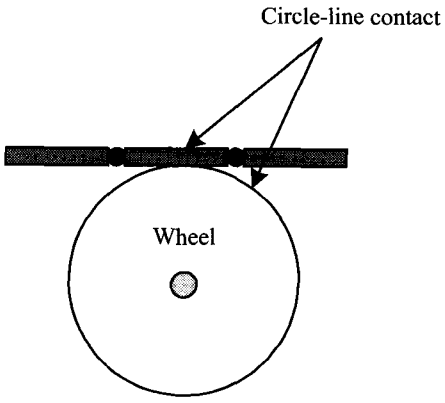

Fig. 4 Model of wheel/track interaction

2.3.3 궤도/지반 상호작용

궤도와 지반사이에서의 상호작용력을 구현하기 위한 관계식은 (7), (8)를 적용한다. 식(7), (8)을 적용하기 위해서는 궤도를 구성하는 각 물체의 위치, 방위, 속도를 감지하여야 한다. 감지된 위치를 이용하여 Fig. 5 에서와 같이 침하량과 전단 변형량을 계산한다. 침하량과 전단변형이 결정되면 식 (7), (8)에 대입하여 수직력과 전단력을 계산한 후 해당하는 물체에 두 힘을 부과하게 된다. 이러한 과정은 TVAS 모듈에서 수행하게 되며 2.4 절에서와 같은 방법으로 DADS 와 연결된다. 임의의 물체의 위치, 속도, 가속도는 DADS 의 GETPVA 함수가 이용된다.

2.3.4 구동

스프라켓에 의한 궤도의 구동은 Fig. 6 과 같이

접촉을 이용한다. 일반적으로 스프라켓에는 기어이가 있고 궤도에는 홈이 있어 스프라켓을 구동함으로써 차량이 진행하게 된다. 이를 모델하기 위하여 원-호 접촉을 이용한다. 스프라켓의 기어이는 접촉의 원, 무한궤도의 홈은 접촉의 호로 모델한다. 스프라켓의 구동은 시간의 함수, 또는 임의로 정의할 수 있다.

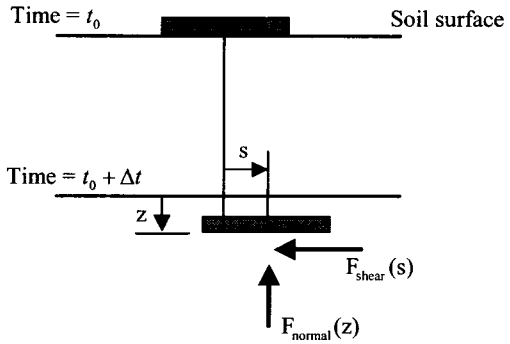

Fig. 5 Force calculation of a track segment

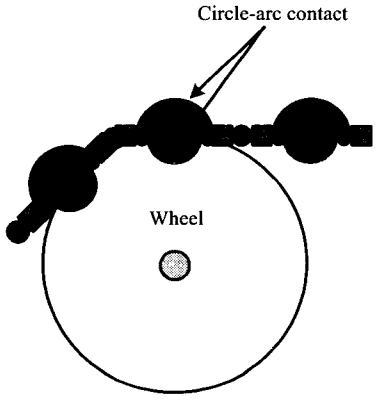

Fig. 6 Sprocket driving model

2.4 DADS 와의 연결

전 절에서 설명한 궤도/지반 상호작용, 궤도/휠 접촉, 궤도/스프라켓 구동을 모델하기 위하여 전용 모듈(TVAS)을 개발하였다. 그 이외의 무한궤도 차량 모델링은 다물체 동역학 해석 프로그램 DADS를 이용한다. 차량을 구성하는 강체, 조인트, 힘요소 등은 DADS 요소 BODY, REVOLUTE JOINT, TSDA, DRIVER 등으로 모델한다. 그런 후 본 논문에서 개발한 모듈 TVAS 와 DADS 를 연성시켜 전체 차량의 동적 해석을 수행하게 된다. 본 논문에서 개발한 모듈과 DADS 와의 연성은 식(9)와 같은 방식으로 이루어진다.

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M} & \boldsymbol{\Phi}_q^T \\ \boldsymbol{\Phi}_q & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\boldsymbol{q}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{Q} \\ \boldsymbol{\gamma} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \boldsymbol{Q}^{TVAS} \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{9}$$

식(9)에서와 같이 DADS 가 자동으로 구성한 시스템 운동방정식의 우변항, 즉 외력 부분에 본 논문에서 개발한 TVAS 에서 계산한 힘을 DADS 사용자 정의 서브루틴 FRCUDF 를 통하여 더하게 된다. 그러면 기본적인 동적 모델링은 DADS 를 이용하고 궤도/지면, 궤도/휠 상호 작용은 본 논문에서 개발한 모듈을 이용하게 되는 것이다. 그 결과 범용 DADS 의 모든 기능을 이용할 수 있을 뿐만이 아니라 차량의 구조가 바뀌더라도 쉽게 해석 모델을 변경할 수 있어 응용성이 넓고 새로운 공식화가 필요 없다는 장점을 가진다. 또한 현가 장치나 차량의 세부적인 보조 장치들도 동역학 해석을 위한 모델 구성이 가능하게 된다. Fig. 7 은 TVAS 의 흐름도를 보여주고 있다.

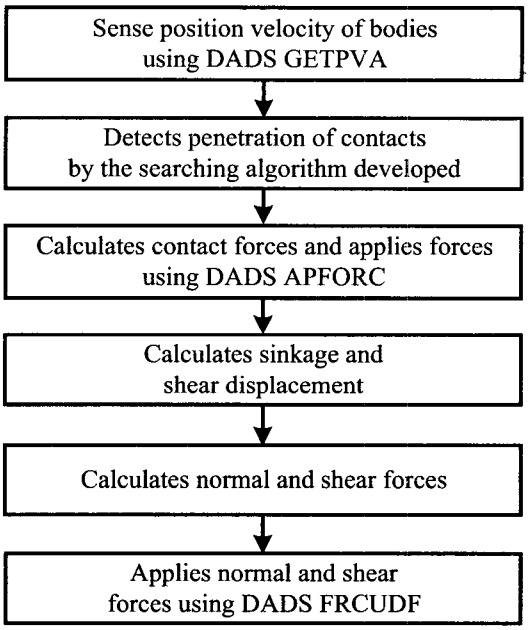

Fig. 7 Flow of the TVAS for tracked vehicle dynamic simulations

2.5 해석 방법 비교

본 논문에서 개발한 기법의 신뢰성을 검증하기 위하여 이미 상용화된 DADS 의 무한궤도차량 전용 모듈인 DADS Track super-element 를 이용한 해석 결과와 비교하였다. DADS Track super-element 는 고기동성의 군용차량에 적합한 프로그램이다. 본 논문에서 소개하는 해석 방법의 비교평가를 위하여 궤도/지반 상호작용 관계식을 DADS Track super-element 와 동일한 것을 적용하였다. 비록 연약 지반에서의 비교는 아니지만 전체적인 동적 모델 기법의 타당성을 평가하기 위함이다. Fig. 8 과 같은 BV206 차량에 적용하였으며 차량 제원은 Jonsson[12,13] 에 의하여 공개된 자료를 이용하였다. 여기서 2 차량이 1 편성이나 비교를 위하여 전방 1 차량에 대하여만 적용하였다. 이 차량에 대하여 1m/s 로 Fig. 9 와 같은 형상을 가진 노면을 통과했을 때 두 프로그램으로 해석한 결과 중 차체의 수직방향 위치를 Fig. 10 에서 보여주고 있다. 해석 결과의 경향과 상대적 차이가 작은 것을 볼 수 있다. Fig. 11 은 차체의 피치각을 보여주고 있다. 피치각도 경향과 상대적인 차이가 작은 것을 볼 수 있다. 그러나 여기서 본 논문에서 소개하는 방법의 결과에 있어서 오실레이션이 상대적으로 많이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이것은 연속체인 궤도의 동적 모델의 차이에서 기인한다고 판단된다. DADS Track super-element 는 궤도를 연속체로 모델하고 궤도를 구성하는 각 물체는 상세하게 다루지 않는다. 결과적으로 완만한 거동을 보이고 있다. 반면에 본 논문에서 소개하는 TVAS 는 모든 궤도를 다수의 질량을 갖는 물체로 구성하였기 때문에 궤도와 휠의 접촉이 부드럽지 않고 Fig. 10, Fig. 11 과 같은 오실레이션이 많이 발생한다고 할 수 있다. 두 방법에서의 차이가 상대적으로 작기 때문에 본 논문에서 소개하는 해석법의 타당성을 간접적으로 유용성을 확인할 수 있다.

3. 응용

2 장에서 제시한 동적 해석방법을 이용하여 현재 한국해양연구원에서 심해저 망간단괴 채광차량으로 개발 중인 무한 궤도식 주행차량에 대해 동역학 해석을 수행하였다. 현재 적용하는 주행장치는 개발단계에 있기 때문에 해석에 사용된 특성치는 일부 추정된 값이며 결과도 정성적 경향에 초

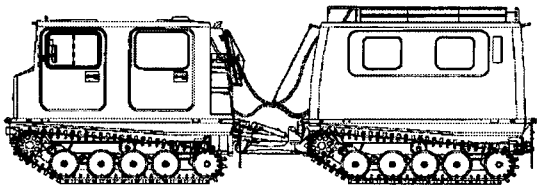

Fig. 8 Tracked vehicle for high mobility

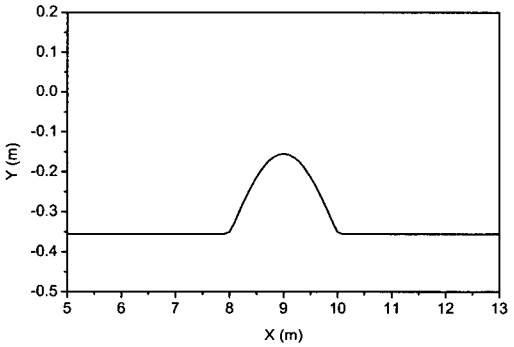

Fig. 9 Road profile

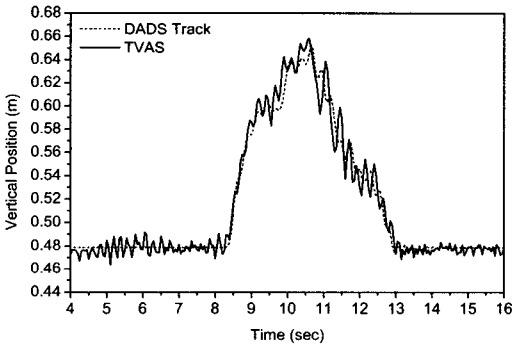

Fig. 10 Vertical displacement of chassis

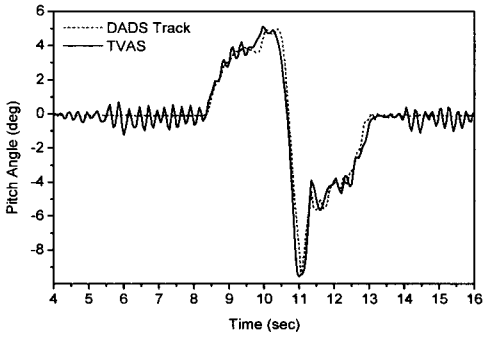

Fig. 11 Pitch angle of chassis

점을 둔다. 수중에서의 유동 저항을 포함한 심해의 모든 환경을 고려한 동역학 해석은 매우 복잡해지기 때문에 본 논문에서는 차량에 작용하는 부력과 심해의 연약한 지반 조건만을 고려하고 저항은 단지 속도에 대한 저항으로 모델한다.

3.1 구조 및 모델링

Fig. 12 는 개발 중인 채광장치로 무한궤도, 차체, 로드휠, 스프라켓, 아이들러, 로드암 등으로 구성된다. 지반 특성은 Fig. 13 과 같은 장치와 연약지반 모사에 의하여 얻어진 Table 1 과 같은 값을 이용한다. Fig. 14, Fig. 15 는 연약지반 모사에 의하여 얻어진 연약지반의 수직과 전단 변형에 대한 압력 특성을 보여주고 있다. 무한궤도는 이산화하여 회전조인트로 연결하였으며, 로드암은 차체와 회전조인트로, 로드휠은 로드암과 회전 조인트, 스프라켓과 아이들러는 차체와 회전조인트, 무한궤도와 휠의 상호작용, 구동 및 지반-궤도 상호작용은 전장에서 언급한 방법으로 모델한다.

3.2 정적 해석

정적 해석을 통하여 침하량을 해석한 결과를 Fig. 16 에서 보여주고 있다. 최대 침하량은 채광장치 쪽에서 약 3cm 이고 그때의 압력은 7.9kPa 이었다. 실제적으로는 주행장치에 광물을 수면위로 올리기 위한 장치가 추가될 것이기 때문에 침하량은 증가할 것으로 예상된다.

3.3 평탄 지반 주행해석

주행장치의 구동력 평가를 위하여 평탄 지면 주행특성을 해석하였다. 구동 조건은 차량이 정지상태에서 속도가 약 1m/s 가 되도록 스프라켓을 구동하였다. 주행장치의 설계 개선 방향을 제시하기 위하여 초기 구조와 Table 2 와 같은 네 경우의 다른 설계에 대하여 해석을 수행하였다.

차량의 기초 설계 해석에 대한 주행속도를 Fig. 17 에서 보여주고 있다. 속도가 정지상태에서 증가하여 1m/sec 를 유지하는 것을 볼 수 있는데 여기서 속도는 미소하게 변동을 일으키는 것을 볼 수 있는데 이러한 현상의 원인은 무한궤도를 인산화하였기 때문이다. 각각의 설계 변경에 따른 해석결과 통계치는 Table 3 에 주어져 있다. 슬립의 경우 초기 설계에 대해 휠의 반경이 커질수록 상대적으로 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 실제 심해저에 적용시 슬립은 해석 결과와 다를 것으로 예상되는데 현재 해석에서는 해수의 저항을 정확히 알 수 없어 추정하였기 때문이다. Design 4 에서 다른 경우보다 피치각의 변화가 커진 것은 장력조절장치에 의해 아이들러가 전방으로 움직여 궤도의 유연성이 감소했고 또한 차량 전체의 무게중심이 앞으로 이동했기 때문으로 사료된다. 차후 좀 더 정확한 지반 특성값 및 주행환경을 고려한다면 보다 유용한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 전술한 바와 같이 소개하는 주행장치가 개발단계에 있기 때문에 정성적 경향에 의미를 두고 있다.

3.4 장애물 통과 해석

주행장치의 장애물 통과시 안정성을 분석하기 위하여 Fig. 9 와 같은 지면 형상에 대하여 주행해석을 수행하였다. 초기 설계에 대한 각 설계 변경이 차체 피치각에 미치는 영향을 Fig. 18-20 에서 세 경우에 대한 결과를 보여주고 있다. Design 1 에서는 피치각이 초기 설계에 비하여 증가하는 것을 볼 수 있고 Design 3, Design 4 는 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 주행장치의 안정성 향상을 위해서는 Design 3, 4 방향으로 설계에 중점을 두는 것이 필요하다는 것을 알 수 있다. Fig. 21-22 는 해석 결과에 대한 그래픽 애니메이션을 보여주고 있다.

이상에서 각 설계변경이 차체의 피치각 변화에 미치는 영향을 볼 수 있다. Design 1 은 피치각이 증가하고 Design 4 는 작게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그러나 비교적 모든 설계가 피치각에는 영향이 작은 것을 볼 수 있다.

3.5 홈 통과능력 해석

심해저면에는 다수의 홈(trench)이 존재한다. 그러므로 홈의 직경에 따른 주행장치의 통과 성능을 보기 위하여 지면의 형상이 Fig. 23 과 같은 경우에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 24-25 는 이에 대한 해석 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 1.5m 까지의 폭은 잘 통과하나 2m 의 폭은 통과하지 못하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 본 주행장치는 1.5m 이상의 홈은 통과할 수 없으므로 홈 발견시 우회하는 전략이 필요하다.

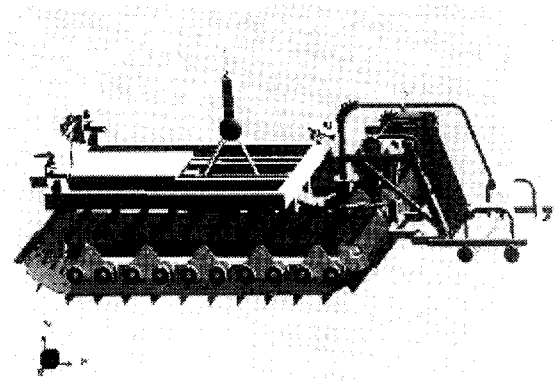

Fig. 12 Mining Vehicle on the deep-sea bed

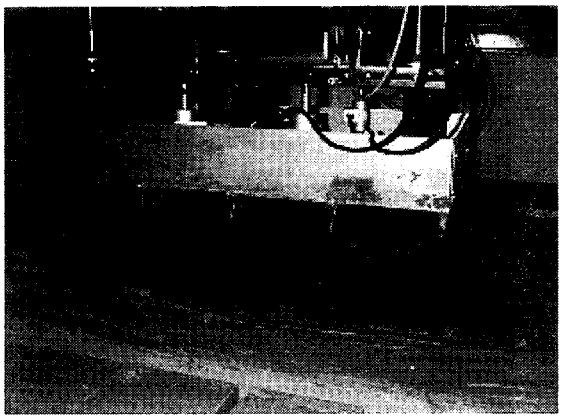

Fig. 13 Photograph of soil property measurement device

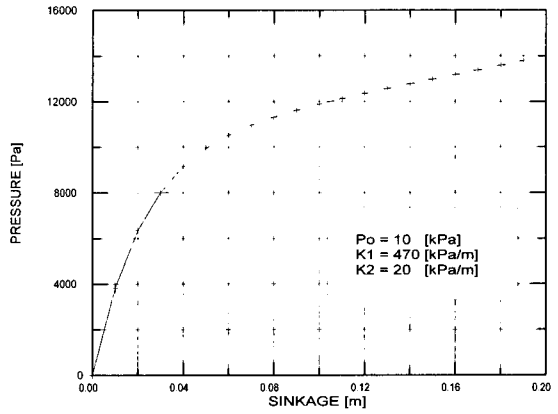

Fig. 14 Sinkage-normal pressure characteristic

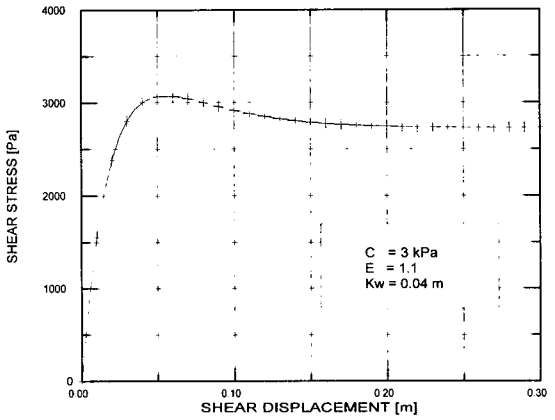

Fig. 15 Shear displacement-shear stress characteristic

Table 1 Soil properties

p_0	10,000
k_1	470,000
k_2	20,000
k_w	0.04
c	3,000
ϕ	0.0
E	1.1

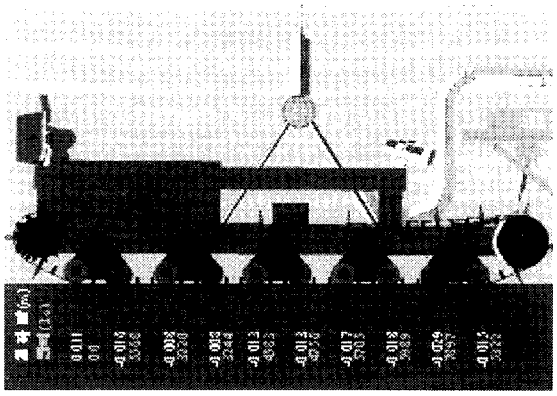

Fig. 16 Static sinkage and pressure

Table 2 Design cases

설계방법	설 계 내 용
Design 0	초기 설계
Design 1	로드휠의 반경을 1.5 배로 증가
Design 2	로드휠의 반경을 2.0 배로 증가
Design 3	로드암과 차체의 회전 조인트에 회전스프링 설치 (K= 100 Nm/deg)
Design 4	초기 장력 작용(7500 N)

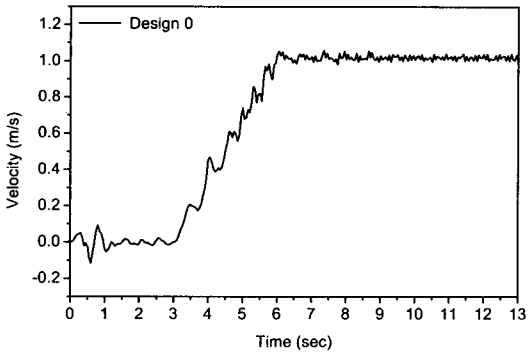

Fig. 17 Horizontal Velocity of Chassis

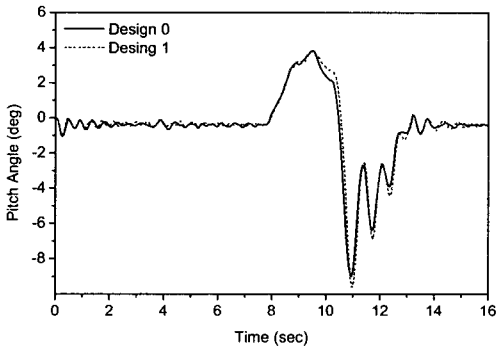

Fig. 18 Pitch angle of design 1

Table 3 Results of driving on a flat bed

설 계 / 결 과	Slip (%)	속도 표준편차	구동 토크	피치각 (degree)
Design 0	1.1	0.014	-47	-0.39
Design 1	1.02	0.019	-64	-0.38
Design 2	0.89	0.010	-37	-0.38
Design 3	0.97	0.013	-78	-0.33
Design 4	0.94	0.017	-48	-0.43

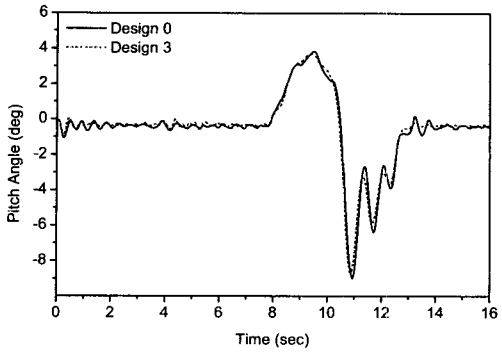

Fig. 19 Pitch angle of design 3

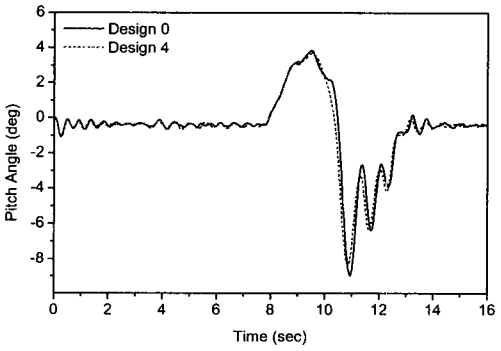

Fig. 20 Pitch angle of design 4

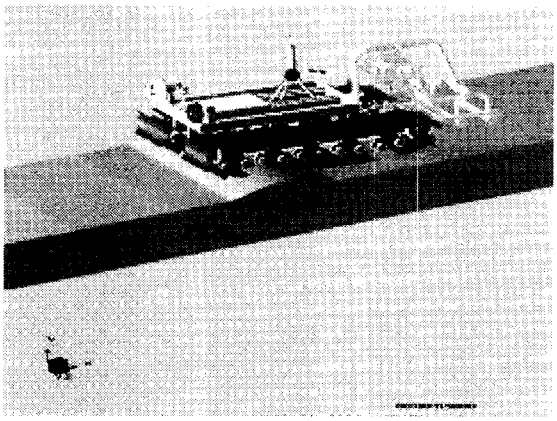

Fig. 21 Obstacle simulation (Time=11.5 sec)

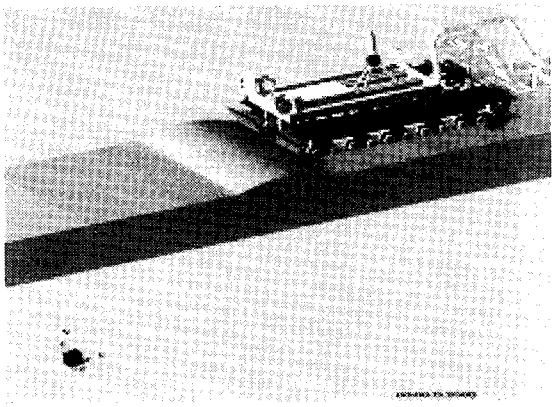

Fig. 22 Obstacle simulation (Time=13.2 sec)

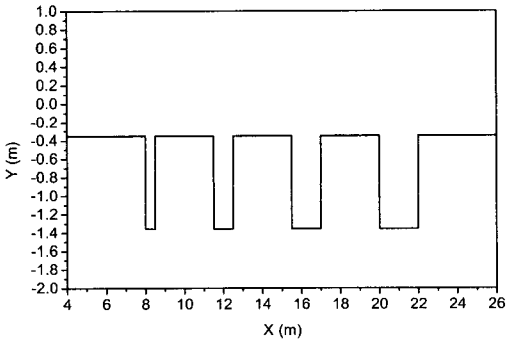

Fig. 23 Profile of deep-sea bed with trenches

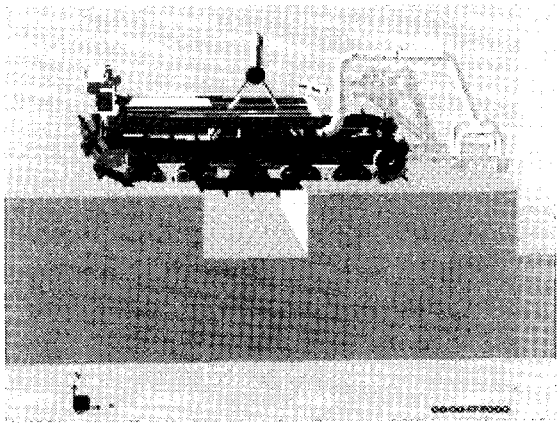

Fig. 24 Passing over a trench (1.5m)

Fig. 25 Passing over a trench (2.0m)

4. 결론

본 논문에서는 연약 지반인 심해저의 망간단괴 채광용 주행장치의 동역학 해석 기법을 제안하였다. 심해저면을 고려한 궤도/지면 상호작용, 궤도/휠 상호작용을 모델하고 힘 계산을 위한 모듈을 개발하여 범용 해석 프로그램과 연계시켰다. 제안된 모델링 기법과 모듈을 이용하여 현재 한국해양연구원에서 개발 중인 심해저 망간단괴 채광용 무한궤도 주행차량에 대한 동역학 해석을 수행하고 차량의 설계 변경에 대한 영향을 검토하였다 설계변경 영향도 분석 결과 로드휠의 반경이 커지면 구동 토크는 감소하였다. 로드암에 회전 스프링을 설치하면 구동 토크는 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 초기 장력이 작용하면 피치각 변화는 상대적으로 작은 것을 알 수 있었다.

본 논문에서 제안한 해석 방법은 다물체 동역학과 범용 프로그램에 기초를 두기 때문에 연약지반과 다양한 구조의 무한궤도식 주행장치에 적용 가능하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 연구비 지원으로 수행중인 국책사업(심해저 망간단괴 및 채광시스템 개발)지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Yamazaki, T., Tsurusaki, K. and Inagaki, T., "Effect of Collector Touchdown Speed on Dynamic Response of Simulated Deep-sea Sediments," Proceedings of the Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference, Montreal, Canada, May 25-29, 1998.
2. Amann, H., Oebius, H. U., Gehbauer, F., Schwarz, W. and Weber, R., Soft Ocean Mining, OTC, 1991.
3. Choi, J. S., Lee, T. H., Hong, S. and Shim, J. Y., " Design Evaluation of Pickup Device Collecting Deep-Sea-Manganese Nodules," Journal of the KSPE, Vol. 15, No. 3, pp. 68-74, 1998.
4. Rubinstein, D. and Galili, N., "REKEM-A Design Oriented Simulation Program for Off-road Track Vehicle," Journal of Terramechanics, Vol. 31, No. 5, pp. 329-352, 1994.
5. Shin, J. H., Choi, J. W. and Lee, S. J., " Dynamic Analysis of Multibody Tracked Vehicles (I) : Development of the Recursive Formulation Module," Journal of KSAE, Vol. 6, No. 3, pp. 11-17, 1998.
6. Shin, J. H., Choi, J. W. and Lee, S. J., " Dynamic Analysis of Multibody Tracked Vehicles(II): Development of the Nonlinear Contact Force Module," Journal of KSAE, Vol. 6, No. 4, pp 24-31, 1998.
7. Park, W. E. and Lee, K. S., "Theoretical Prediction and Experimental Substantiation of Tractive Performance of Off-Road Tracked Vehicles," Journal of KSAE, Vol. 7, No. 6, pp. 248-257, 1999.
8. Haug, E. J., The Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Allyn and Bacon, Boston, 1989.
9. http://www.lmsintl.com
10. Wong, J. Y., "Optimization of Design Parameters of Rigid-link Track Systems Using an Advanced Computer Aided Method," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D : Journal of Automobile Engineering, Vol. 212, No. 3, pp. 153-160, 1998.
11. Wong, Y. J., Theory of Ground Vehicle, John Willey & Sons, New York, 1993.
12. Jonsson, J., A Track Vehicle Simulation Using DADS, Chalmers University of Technology Report 89:5, 1989.
13. http://www.haggve.se/Brochure