

## Article

## 점착성 연약지반 주행차량의 동적거동 연구

김형우\* · 홍 섭 · 최종수

한국해양연구원 해양개발시스템연구본부  
(305-600) 대전광역시 유성우체국 사서함 23호

## A Study on Dynamic Responses of Tracked Vehicle on Extremely Soft Cohesive Soil

Hyung-Woo Kim\*, Sup Hong, and Jong-Su Choi

Ocean Development System Laboratory, KORDI  
Yuseong P.O. Box 23, Daejeon 305-600, Korea

**Abstract :** This paper concerns about a study on dynamic responses of tracked vehicle on soft cohesive soil. For dynamic analyses of tracked vehicle, two different models were adopted, i.e. a single-body model and a multi-body model. The single-body vehicle model was assumed as a rigid body with 6-dof. The multi-body vehicle was modeled by using a commercial software, RecurDyn-LM. For the both models properties of cohesive soft soil were modeled by means of three relationships: pressure to sinkage, shear displacement to shear stress, and shear displacement to dynamic sinkage. Traveling performances of the two tracked vehicle models were compared through dynamic analyses in time domain.

**Key words :** 무한궤도 차량(Tracked vehicle), 3차원 비정상 해석(3D unsteady analysis), 연약지반모델(cohesive soil model), 전단 변위/응력(shear displacement/stress), 다물체(Multi-body), 강체(Single-body)

## 1. 서 론

각종 공학적 설계 및 제작을 위한 컴퓨터 시뮬레이션의 사용이 급격히 증가하고 있다. 컴퓨터 시뮬레이션의 장점은 설계변경에 대한 성능해석의 결과를 손쉽게 확인할 수 있고, 또한 문제해결에 필요한 시간과 경비를 획기적으로 절감할 수 있다는 데에 있다. 연약 지반에 대한 주행차량의 성능해석에도 컴퓨터 시뮬레이션 기법이 많이 사용되고 있다(Hayasi 1975; Kitano and Tyorzaki 1976; Kitano and Kuma 1977; Baladi and Rohani 1978; Bode 1991; Murakami *et al.* 1992; Zhang 1995; Tran *et al.* 2002; Hong *et al.* 2002).

시뮬레이션 기법을 이용한 연약지반 주행차량의 동적거

동 해석은 크게 다물체 모델과 강체 모델로 나눌 수 있다. 다물체 모델은 실제모델과 유사하도록 각각의 구성요소를 모델링하는 반면에 강체 모델은 실제모델을 하나의 강체로 모델링하는 것을 의미한다.

두 모델은 각각 장단점을 가진다. 다물체 모델의 장점은 차량의 각 요소의 세부적인 모델링을 바탕으로 각 요소에 대한 동적 거동 특성의 예측이 가능하다는 점과, 이러한 동적 거동 특성을 통하여 세부설계 제작에 매우 유용하게 사용될 수 있다는 점이다. 하지만 다물체 모델 생성을 위해서는 많은 수의 강체와 구속조건 등을 사용함으로써, 모델의 자유도(Degree of freedom)가 크게 증가하게 된다. 자유도의 증가로 인하여 풀어야 할 방정식의 수가 늘어남으로써 수치해석에 매우 긴 시간이 소요된다. 반면에 강체모델은 실제모델을 하나의 강체로 가정하여 모델링하기 때문에 다물체 차량 해석에서 발생하는 수치해석

\*Corresponding author. E-mail : guddn@kriso.re.kr

시간의 문제를 해결할 수 있다. 하지만 강체 차량 모델은 실제모델을 단일 강체로 모델링함으로써 실제 발생할 수 있는 다물체적 운동에 대한 지나친 단순화에 따른 해석 결과의 적용 제한조건이 크며, 동시에 해석결과의 신뢰를 얻기 위한 충분한 검증작업을 필요로 한다.

본 논문에서는 점착성 연약지반용 주행차량에 대한 다물체 모델과 강체 모델의 동역학 해석결과들을 비교하고자 한다. 이때, 연약지반에 있어서 지면에 대한 차량 트랙의 미끄럼에 의해 발생하는 접지면에서의 전단변위의 공간적 분포는 매우 중요하다. 특히 해저 퇴적지반은 매우 연약하여 지반의 전단저항력이 전단변위에 따라 민감하게 변하는 비선형 특성을 가지고 있기 때문에, 올바른 지반 추진력을 산정하기 위해서는 트랙의 접지면에서 발생하는 전단변위의 분포가 정확하게 계산되어야 한다. 트랙의 구동속도는 일정하지 않는 비정상상태에서 트랙 접지면의 전단변위(분포)를 구하기 위해서는 순환하는 트랙이 지면과 접촉하는 순간부터의 트랙 접지면의 각 점에서의 미끄럼속도에 대한 시간 적분이 수행되어야 한다. 이러한 점을 바탕으로 연약지반에 대한 지반주행역학 모델이 개발되었으며, 이 모델을 강체모델과 다물체 모델에 적용시켰다.

강체모델은 Murakami *et al.*(1992)에 의해 제안된 궤도 차량의 수학적 모델을 사용하였으며, 연약한 지반에 대한 무한궤도 차량의 비정상 해석을 위해 수학적 모델을 확장하여 강체모델을 구성하였다. 지반은 기울기가 없는 평탄 지형으로 가정하였으며, 연약지반 주행현상을 기술하는 비선형 운동방정식은 차량고정 좌표계에 대하여 도출되었다. 수치해석에는 Newton 방법과 Newmark 시적분법을 통합한 미소증분 반복계산 알고리즘이 사용되었다. 비선형 동역학 해석 프로그램은 FORTRAN으로 개발되었으며, 연약지반에 대한 지반주행역학 모델을 포함시켰다.

다물체 모델 해석에 있어서는 최근 다물체 주행차량 해석에 있어서 높은 효율성이 입증됨으로써 국내외에서 사용이 증가하고 있는 상용 해석프로그램인 RecurDyn-LM (2002)을 무한궤도 차량에 대한 동특성 해석에 사용하였다. 하지만 연약지반에서의 주행 특성을 해석하기 위하여 해석 소프트웨어에서 제공하는 사용자 정의 서브루틴을 이용하여 연약지반에 대한 지반주행역학 모델을 포함시켰다.

## 2. 강체차량

### 좌표계(Coordinates System)

강체차량 모델에서는 Fig. 1와 같이 두 개의 직교 좌표계가 사용되었다. 즉, 공간고정 좌표계( $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3$ )와 차량고정 좌표계( $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3$ )이다. 차량고정 좌표계의 원점은 차량의 무게중심에 위치한다. ( $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3$ )와 ( $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3$ )의

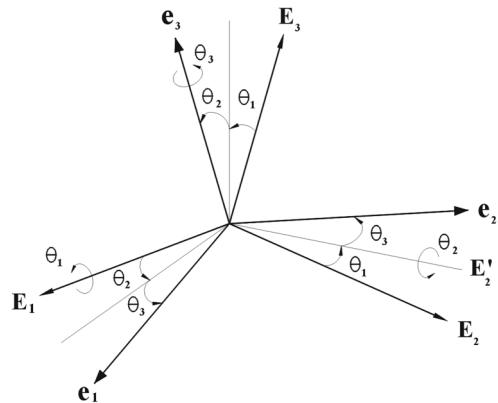


Fig. 1. Sequential rotation of Tait-Bryan angles.

단위벡터는 각각 ( $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_3$ )과 ( $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ )로 표현하였다.

Tait-Bryan 각(角),  $\theta_i (i=1\sim 3)$ 을 사용하여 차량의 자세를 표현하였다(Fig. 1).

$$\{\underline{\mathbf{e}}\} = [\mathbf{U}][\underline{\mathbf{E}}] \tag{1}$$

여기서  $\{\underline{\mathbf{e}}\} = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3]^T$ ,  $\{\underline{\mathbf{E}}\} = [\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_3]^T$ , 윗첨자 T는 벡터 transpose를 의미하고, Tait-Bryan에 의해 표현되는  $3 \times 3$  행렬은 다음과 같다.

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} c_2c_3 & c_1s_3 + s_1s_2c_3 & s_1s_3 - c_1s_2c_3 \\ -c_2s_3 & c_1c_3 - s_1s_2s_3 & c_1c_3 + c_1s_2s_3 \\ s_2 & -s_1c_2 & c_1c_2 \end{pmatrix} \tag{2}$$

여기서  $c_i = \cos \theta_i, s_i = \sin \theta_i, (i = 1\sim 3)$  이다.

### 기구학적 관계식(Kinematic Relationship)

Fig. 2는 강체 무한궤도차량을 나타낸다. 여기서 L은 궤도의 접지길이이고, D는 궤도의 폭이며, B는 궤도의 간격이며, L<sub>1</sub>은 차량무게중심의 종위치이며, H는 차량무게중심의 높이이며, X<sub>c</sub>는 차량무게중심의 공간좌표를 나타낸다.

강체차량의 임의의 점에 대한 위치벡터  $\mathbf{X}(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}_C + \mathbf{x} \tag{3}$$

여기서  $\mathbf{X}_C$ 는 공간고정 좌표계에 대한 차량고정 좌표계의 원점의 좌표이고,  $\mathbf{x}$ 는 시간과 무관한 차량의 임의의 점의 위치벡터이다.

트랙의 지면에 접촉하는 국부 위치벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{x}^{(j)} = x_1^{(j)} \mathbf{e}_1 + x_2^{(j)} \mathbf{e}_2 - H\mathbf{e}_3 \tag{4}$$

여기서 H는 지면에 대한 차량 무게중심의 높이, j=1은 좌측 트랙을, j=2는 우측 트랙을 나타낸다.

차량의 임의 위치의 속도벡터는 식 (3)을 시간 미분하

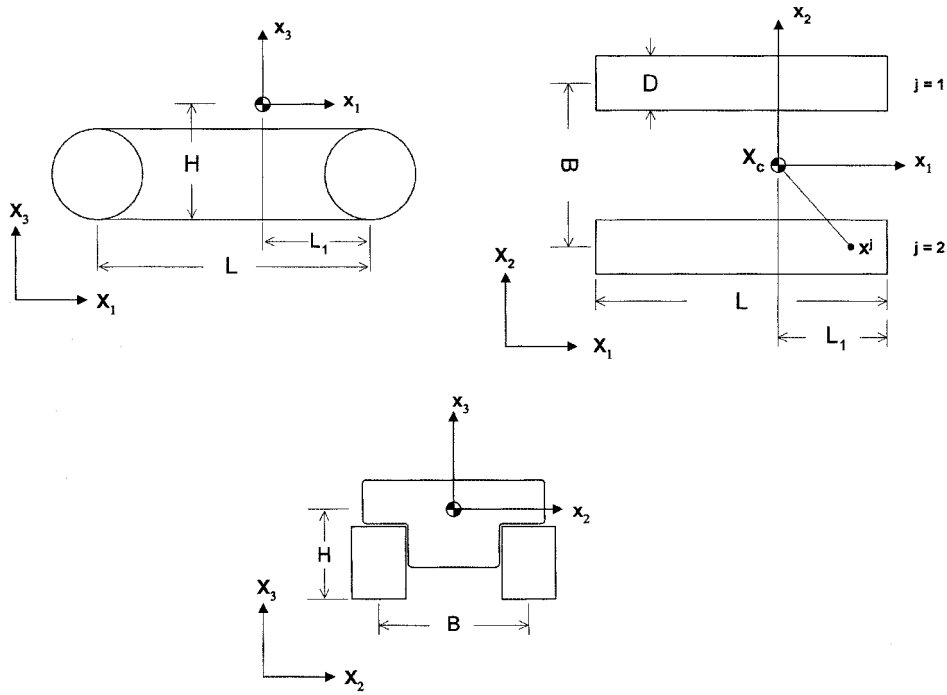


Fig. 2. Rigid-body vehicle model.

여 구한다.

$$\mathbf{V}(t) = \dot{\mathbf{X}}(t) \equiv \mathbf{V}_C(t) + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{x} \quad (5)$$

여기서 차량의 무게중심의 병진속도  $\mathbf{V}_C(t)$ 와 회전 속도  $\boldsymbol{\omega}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{V}_C(t) = \dot{\mathbf{X}}_C(t) \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{T}\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (7)$$

여기서,

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} c_2 c_3 & s_3 & 0 \\ -c_2 s_3 & c_3 & 0 \\ s_2 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

차량의 임의의 점에 대한 가속도와 각가속도는 식 (5)와 (7)을 시간에 대해 미분하면 구할 수 있다.

$$\mathbf{A}(t) = \dot{\mathbf{V}}(t) = \mathbf{A}_C(t) \times \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{x} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{x}) \quad (9)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{T}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{S}\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (10)$$

여기서,

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} -\dot{\theta}_2 s_2 c_3 - \dot{\theta}_3 c_2 s_3 & \dot{\theta}_3 c_3 & 0 \\ \dot{\theta}_2 s_2 s_3 - \dot{\theta}_3 c_2 c_3 & \dot{\theta}_3 s_3 & 0 \\ \dot{\theta}_2 c_2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

차량 무게중심의 가속도 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{A}_C(t) = \dot{\mathbf{V}}_C(t) = \sum_{i=1}^3 \dot{\mathbf{V}}_{C_i} \mathbf{e}_i + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V}_C \quad (12)$$

#### 미끄럼 속도(Slip velocity)

차량에 대한 상대적인 트랙 속도  $V_k^{(j)} \mathbf{e}_1$ 은 트랙의 미끄럼을 발생시킨다. 트랙의  $\mathbf{x}^{(j)}$  지점의 미끄럼 속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_s^{(j)}(\mathbf{x}, t) &= \mathbf{V}(\mathbf{x}, t) - V_k^{(j)} \mathbf{e}_1 \\ &= \mathbf{V}_C(\mathbf{x}, t) + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{x}^{(j)} - V_k^{(j)} \mathbf{e}_1 \\ &\equiv \dot{s}_1^{(j)} \mathbf{e}_1 + \dot{s}_2^{(j)} \mathbf{e}_2 + \dot{s}_3^{(j)} \mathbf{e}_3 \end{aligned} \quad (13)$$

각 성분들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{s}_1^{(j)}(\mathbf{x}, t) &= V_{C_1} - V_k^{(j)} - \omega_2 H - \omega_3 x_2^{(j)} \\ \dot{s}_2^{(j)}(\mathbf{x}, t) &= V_{C_2} - \omega_3 x_1^{(j)} - \omega_1 H \\ \dot{s}_3^{(j)}(\mathbf{x}, t) &= V_{C_3} - \omega_2 x_1^{(j)} - \omega_1 x_2^{(j)} \end{aligned} \quad (14)$$

#### 운동방정식(Equation of Motion)

차량고정좌표계에 대한 뉴턴 제 2법칙으로 유도한 차량의 운동방정식과 운동량 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{m} \mathbf{A}_C(t) = \sum_{j=1}^2 \mathbf{F}_s^{(j)}(t) - W \cdot \mathbf{E}_3 + \mathbf{F}_w \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}(t)) = \sum_{j=1}^2 \mathbf{M}_s^{(j)} + \mathbf{M}_w \quad (16)$$

여기서,

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{I} = \begin{pmatrix} I_{11} & 0 & 0 \\ 0 & I_{22} & 0 \\ 0 & 0 & I_{33} \end{pmatrix} \quad (17)$$

식 (15)와 식 (16)의 우변의  $\mathbf{F}$ 와  $\mathbf{M}$ 은 차량에 대한 외력과 모멘트이다.  $\mathbf{W}$ 는 차량의 자중이며, 아래첨자  $s$ 는 지반 저항을 표시하며, 아래첨자  $w$ 는 유체저항을 나타낸다.

### 수치해석방법(Numerical Analysis Method)

식 (15)와 (16)의 운동방정식은 비선형 방정식으로 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{g}(\mathbf{z}, \dot{\mathbf{z}}, \ddot{\mathbf{z}}) = \mathbf{0} \quad (18)$$

여기서  $\mathbf{z}$ 는 강체차량의 무게중심과 무게중심에 대한 Tait-Bryan 각(角)으로 구성된다.

$$\mathbf{z} = [X_{C_1}, X_{C_2}, X_{C_3}, \theta_1, \theta_2, \theta_3]^T \quad (19)$$

식 (18)의 수치 해를 구하기 위해서 미소증분-반복방법을 적용하였다. 이 때 전 단계의 수치 해는 알고 있는 것으로 가정하였다.  $t = t + \Delta t$ 에서의 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{g}(t + \Delta t) \equiv \mathbf{g}_i(t + \Delta t) + \mathbf{g}_e(t + \Delta t) = \mathbf{0} \quad (20)$$

여기서,  $\mathbf{g}_i$ 는 강체차량의 무게를 포함하는 관성력 부분이고,  $\mathbf{g}_e$ 는 관성력을 제외한 외력 항들이다.

식 (20)에 Newton 방법을 적용한 미소증분 형태는 다음과 같다.

$$\Delta \mathbf{g} + \mathbf{g}_i(t) + \mathbf{g}_e(t + \Delta t) = \mathbf{0} \quad (21a)$$

$$\Delta \mathbf{g}_i = \frac{\partial \mathbf{g}_i}{\partial \mathbf{z}} \cdot \Delta \mathbf{z} + \frac{\partial \mathbf{g}_i}{\partial \dot{\mathbf{z}}} \cdot \Delta \dot{\mathbf{z}} + \frac{\partial \mathbf{g}_i}{\partial \ddot{\mathbf{z}}} \cdot \Delta \ddot{\mathbf{z}} \quad (21b)$$

식 (21)의 미소증분해의  $i$ 번째 교정은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta \mathbf{g}_i^{(i)} + \mathbf{g}_i^{(i-1)}(t + \Delta t) + \mathbf{g}_e^{(i)}(t + \Delta t) = \mathbf{0} \quad (22a)$$

$$\mathbf{g}_i^{(i)}(t + \Delta t) = \mathbf{g}_i^{(i-1)}(t + \Delta t) + \Delta \mathbf{g}_i^{(i)} \quad (22b)$$

이러한 교정을  $\mathbf{g}(t + \Delta t)$ 가 아래의 식을 만족할 때 까지 반복해야 한다.

$$|\mathbf{g}(t + \Delta t)| \leq e_\epsilon \quad (23)$$

식 (21b)의  $\Delta \dot{\mathbf{z}}$ 와  $\Delta \ddot{\mathbf{z}}$ 에 Newmark 적분식을 적용하면 다

음과 같이 표현된다.

$$\Delta \ddot{\mathbf{z}} = a_1 \Delta \mathbf{z} + a_2 \dot{\mathbf{z}}(t) + a_3 \ddot{\mathbf{z}}(t) \quad (24a)$$

$$\Delta \dot{\mathbf{z}} = b_1 \Delta \mathbf{z} + b_2 \dot{\mathbf{z}}(t) + b_3 \ddot{\mathbf{z}}(t) \quad (24b)$$

여기서,

$$a_1 = \frac{1}{\beta \Delta t^2}, \quad a_2 = -\frac{1}{\beta \Delta t}, \quad a_3 = -\frac{1}{2\beta} \quad (25a)$$

$$b_1 = \frac{\gamma}{\beta \Delta t}, \quad b_2 = -\frac{\gamma}{\beta}, \quad b_3 = \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \Delta t \quad (25b)$$

### 강체차량 모델(Rigid-body Model)

강체차량(Fig. 2)의 무게중심의 높이는 지면에서 1.5 m 지점에 위치하고 있다. 차량의 총 길이는 3 m이다. 각 차량의 물성치는 Table 1에 나타나 있다.

다물체 주행차량에서는 차량의 구동속도에 의해 궤도링 크가 움직이면서 접지면에서 전단변위 분포를 형성한다. 그러나 강체 주행차량은 한 개의 강체로 구성되어 있기 때문에, 전단변위 분포곡선을 표현할 수 없다. 전단변위 분포를 계산하기 위해서 트랙과 지면의 접촉면을 Fig. 3과

Table 1. Data of tracked vehicle model.

Mass	m	5 Ton
Longitudinal position of mass center	L1	1.5 m from mid-point
Width of track belt	D	1 m
Contact length of track belt	L	3 m
Centerline distance of tracks	B	2 m
Height of mass center	H	1.5 m

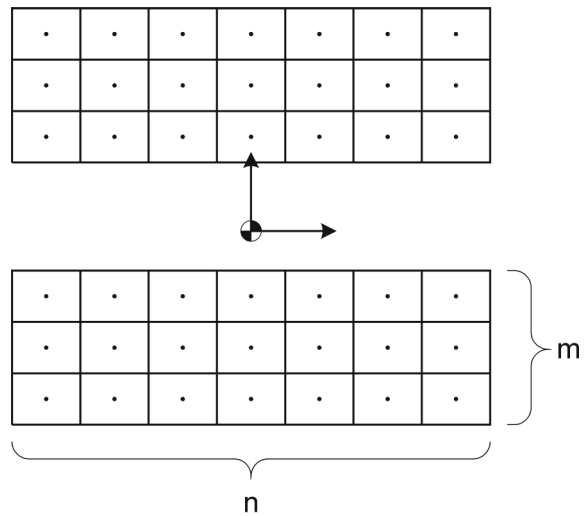


Fig. 3. Track mesh for estimation of shear displacements and soil reactions.

같이 길이방향(n), 폭방향(m)으로 등분할하였다. 이러한 메쉬를 이용하여 트랙의 구동속도에 대한 전단변위 분포 곡선을 형성하였다. 그리고 각 요소의 중심점에서의 전단 변위를 해당요소의 전구간에 적용하였다. 본 논문에서는 n을 96으로, m을 1로 주었다.

### 3. 지반역학 모델

#### 전단변위와 침하

트랙에 대한 토양의 전단변위는 식 (14)의 미끄럼 속도의 시간에 대한 적분을 통하여 구할 수 있다.

$$s_1^{(j)}(\mathbf{x}, t) = \int_0^t \dot{s}_1^{(j)} dt$$

$$s_2^{(j)}(\mathbf{x}, t) = \int_0^t \dot{s}_2^{(j)} dt \quad (26)$$

Fig. 4와 Fig. 5는 트랙에 대한 진행방향과 측면방향의 전단변위 분포를 도식적으로 보여준다.

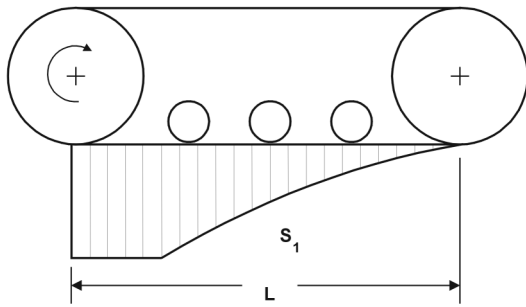


Fig. 4. A schematic view of longitudinal shear displacements in the initial transient phase.

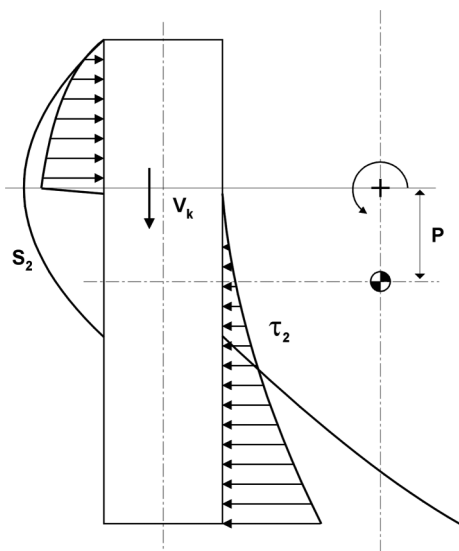


Fig. 5. Lateral shear and shear stress.

토양의 전단변위는 부가적인 동적침하를 발생시키는데, 그 표현은 다음과 같다.

$$i_d = -c_0 \left( \frac{p}{p_{crit}} \right)^{c_1} \cdot s^{c_2} \quad (27)$$

여기서, p는 접지압, s는 전단변위를 가리키며, 상수 c0와 지수 c1과 c2는 실험에서 구해진 값들이다.

차량의 총침하는 정적침하(is)와 동적침하(id)로 구성된다.

$$i_{tot} = i_s + i_d \quad (28)$$

만약, XB3가 지면의 높이를 나타내면 총침하는 다음과 같이 표현된다.

$$i_{tot} = X_{C3} + x_1^{(j)} U_{13} + x_2^{(j)} U_{23} - H U_{33} - X_{B3} \quad (29)$$

여기서, U13, U23, U33는 Fig. 2의 행렬의 성분이다.

#### 수직응력과 전단응력

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 비선형을 보여준다(예, Hong and Choi 2001).

지면의 압력은 아래와 같이 정적침하의 함수로 나타난다.

$$p = p^* (1 - K_1 \cdot i_s) (1 - e^{-K_2 \cdot i_s}) \quad (30)$$

Fig. 6은 압력-침하 특성곡선을 보여준다.

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

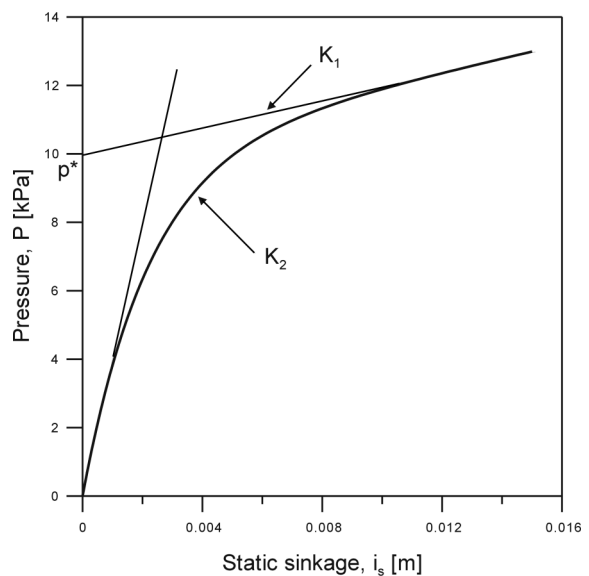


Fig. 6. Pressure-sinkage model.

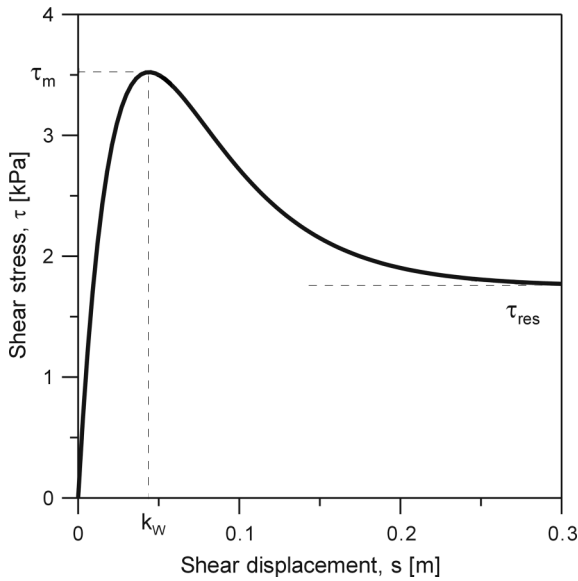


Fig. 7. Shear stress vs. displacement.

$$\tau = \frac{\tau_m}{E} \left[ 1 + \left( \frac{E}{1 - e^{-1}} - 1 \right) e^{\frac{1-s}{k_w}} \right] \left( 1 - e^{-\frac{s}{k_w}} \right) \quad (31)$$

여기서,  $\tau_m$ 은 최대 전단응력이고,  $E$ 는 잔류응력에 대한 최대 전단응력의 비이다.  $k_w$ 는 최대 전단응력이 발생하는 전단변위이고,  $s$ 는 전단변위이다. 함수특성 곡선은 Fig. 7과 같다.

점착성 토양의 최대 전단응력은 아래와 같이 표현된다 (Baladi and Rohani 1978).

$$\tau_m = C + C_d(1 - e^{-\mu \dot{s}}) + p \tan \phi \quad (32)$$

여기서,  $C$ 는 점착력(cohesion)이고,  $C_d$ 와  $\mu$ 는 물질상수이며,  $\phi$ 는 내부 마찰각이고,  $\dot{s}$ 은 전단속도이다.

#### 토양 저항력과 모멘트

차량에 작용하는 토양 저항력과 모멘트는 트랙의 접촉 부위의 수직응력과 전단응력의 적분으로 구해진다.

$$F_{s_1}^{(j)} = \iint_A \tau_1^{(j)} dA$$

$$F_{s_2}^{(j)} = \iint_A \tau_2^{(j)} dA \quad (33)$$

$$F_{s_3}^{(j)} = \iint_A p^{(j)} dA$$

$$M_{s_1}^{(j)} = \iint_A x_2^{(j)} p^{(j)} dA + H \cdot F_{q_2}^{(j)}$$

$$M_{s_2}^{(j)} = \iint_A x_1^{(j)} \tau_1^{(j)} dA - H \cdot F_{q_3}^{(j)} \quad (34)$$

$$M_{s_3}^{(j)} = \iint_A (x_1^{(j)} \tau_2^{(j)} - x_2^{(j)} \tau_1^{(j)}) dA$$

토양의 다짐저항(compaction resistance)은 지면을 압축시키는 일을 차량의 길이로 나눔으로써 구해진다.

$$R_C = \frac{1}{L} \int_A \int_0^s p(\mathbf{x}, t) dx_3 dA \quad (35)$$

#### 4. 다물체차량

##### 무한계도

무한계도는 일반적으로 유연한 연속체이거나 금속을 핀으로 연결한 구조를 가진다. 무한계도 모델링에 일반적으로 사용되는 방법은 무한계도를 다수의 강체(rigid body)로 변환하고, 강체들은 회전조인트(revolute joint)나 부싱(bushing)을 이용하여 연결하는 방법을 이용한다(Fig. 8). 즉 다중링크(multi-link)개념을 이용한다. 이러한 모델의 장점은 계도를 실물과 유사하게 표현할 수 있다는 것이다. Fig. 8와 같은 방법으로 페루프인 무한계도를 모델링하면 잉여구속(redundant constraints)이 발생한다. 잉여구

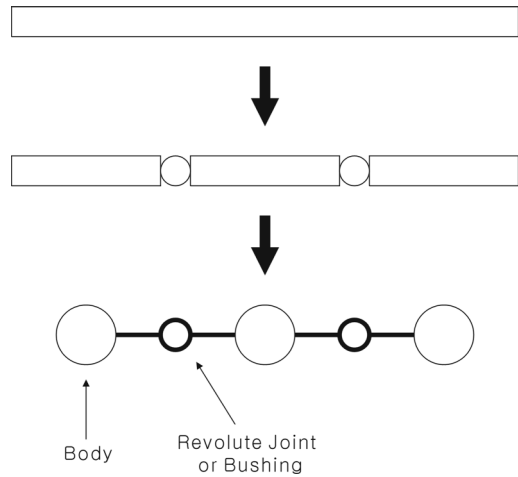


Fig. 8. Model of track.

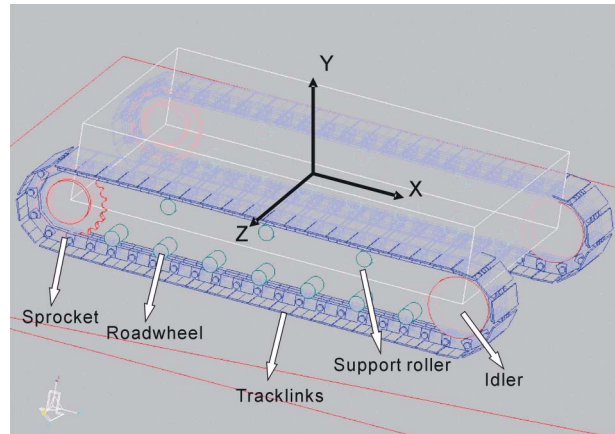


Fig. 9. Multi-body vehicle model by using RecurDyn-LM.

속을 제거하기 위하여 구속조건을 증가시키지 않는 힘 요소인 부싱으로 모델링하였다. 부싱의 축방향 회전강성을 0으로 하여 회전조인트와 같은 효과를 얻도록 하였다.

### 다물체 차량 모델

일반적으로 무한궤도식 차량의 구조는 Fig. 9와 같이 트랙링크(Tracklink)로 이루어진 무한궤도, 스프라켓(Sprocket), 로드휠(Road wheel), 아이들러(Idler), 지지롤러(Support roller) 그리고 아이들러에 연결된 장력 조절장치, 로드휠에 연결된 스프링-댐퍼 등으로 구성된다. 그러나 사용환경과 목적에 따라 다양한 구조가 이용된다. 무한궤도는 지면과 접촉하여 차량의 지지 및 견인력을 발생하는 역할을 한다. 스프라켓은 무한궤도식 차량이 일반적으로 진행방향의 후방에 위치하는 것이 효율적인 것으로 알려져 있으나 환경과 목적에 따라 전방에 설치하기도 한다. 본 논문에서는 스프라켓이 후방에 위치하고 있다. 아이들러에는 구동력이 없으며 단지 무한궤도의 경로를 만들어주는 기능을 가진다. 로드휠은 무한궤도를 지지할 뿐만 아니라 때때로 헨가요소(스프링-댐퍼)와 연결되어 헨가 기능을 가진다. 일반적인 육상트랙의 무한궤도 차량과 달리 해저면 연약지반을 주행하는 무한궤도 차량의 경우에는 구동 속도가 아주 느리다(트랙의 최대 구동속도 : 0.5 m/s). 트랙의 구동속도가 아주 느리고 본 논문에서는 진행방향에 대한 차량의 주행성능이 중요한 관심대상이기 때문에 차량의 헨가시스템(스프링-댐퍼)에 대한 모델링은 생략하였다. 향후 다물체 차량 모델에 차량의 헨가시스템에 대한 모델링을 포함시킬 예정이다.

본 논문에서 사용된 다물체 차량 모델은 차체와 2개의 스프라켓, 2개의 아이들러, 14개의 로드휠, 6개의 지지롤러로 구성되며, 각각의 요소는 강체인 것으로 가정한다. 스프라켓, 로드휠, 아이들러, 지지롤러는 차체와 회전조인트로 연결되어 있다. 다물체 주행차량에서는 24개의 회전조인트가 사용되었다. 주행차량을 구동시키기 위해서 2개의 드라이버를 각 스프라켓의 회전조인트에 장착하였다. 무한궤도의 최대 구동속도는 약 0.5 m/s이다. 궤도링크는 총 96개이며, 인접한 궤도링크들은 부싱으로 연결되어 있다. 다물체 주행차량의 자유도의 크기는 604이다.

각 강체 및 궤도링크의 물성치는 Table 2에 나타나 있다.

Table 2. Material properties.

Body	Mass (kg)	Moment of inertia (kg mm <sup>2</sup> )
Chassis	3044.87	2.0e10, 4.5e10, 4.5e10
Sprocket	1	1.0e6, 1.0e6, 1.0e6
Road wheel	1	1.0e6, 1.0e6, 1.0e6
Idler	1	1.0e6, 1.0e6, 1.0e6
Tracklink	20.11	1.7e5, 2.3e5, 9.2e4

## 5. 수치해석

### 차량 모델링

다물체 주행차량과 강체 주행차량을 비교하기 위해서 각각의 모델에 대한 수치해석을 행하였다. 다물체 주행차량의 적분기는 Track G-alpha를 사용하였다. Track G-alpha는 Newmark 적분기를 변형한 것이다. 강체 주행차량의 적분기는 Newmark 적분기를 사용하였다.

다물체 주행차량과 강체 주행차량의 동특성을 비교하기 위하여 같은 조건에서 비교하여야 한다. 그러나 두 모델은 아래와 같이 다른 조건을 가지고 있다.

첫째, 강체 차량모델은 지면에 접촉하는 부분이 항상 직선을 이루고 있으나, 다물체 차량모델은 각각의 궤도링크들은 회전이 가능한 부싱으로 연결되었기 때문에 지면에 접촉하는 궤도링크들은 직선의 형상을 유지하지 못한다. 이러한 접지궤도의 변형의 문제를 해결하기 위해서 다물체 주행차량 모델의 궤도링크에 보다 많은 로드휠들을 장착하고, 궤도링크에 작용하는 인장력을 보다 크게 주어서 궤도링크의 접지형상을 직선에 가깝게 유지시켰다.

둘째, 강체차량에는 궤도링크가 없기 때문에 질량과 관성모멘트가 차체에만 집중되어 있지만, 다물체 차량모델에서는 차체, 스프라켓, 로드휠, 아이들러, 궤도링크에 질량과 관성모멘트가 분포되어 있다.

궤도링크의 질량을 변화시키면서 다양한 해석을 수행하였다. 궤도링크의 속도가 아주 느려서 궤도링크의 질량의 변화에 대한 차량의 동적거동이 크게 변화하지는 않았다. 하지만 궤도링크의 질량이 상대적으로 작은 경우에는 해석시간이 많이 소요되는 관계로 전체차량에 비해 궤도링크의 질량이 조금 과도하지만 보다 나은 수치해석을 위해, 본 논문에서는 다물체 차량모델의 궤도링크 총 질량을 차량의 전체 질량의 38.6%로 선정하였다. 그리고 차량의 주행성능에 미치는 영향인자가 낮은 스프라켓, 아이들러, 로드휠의 경우에는 각 질량을 1 kg으로 정하였다.

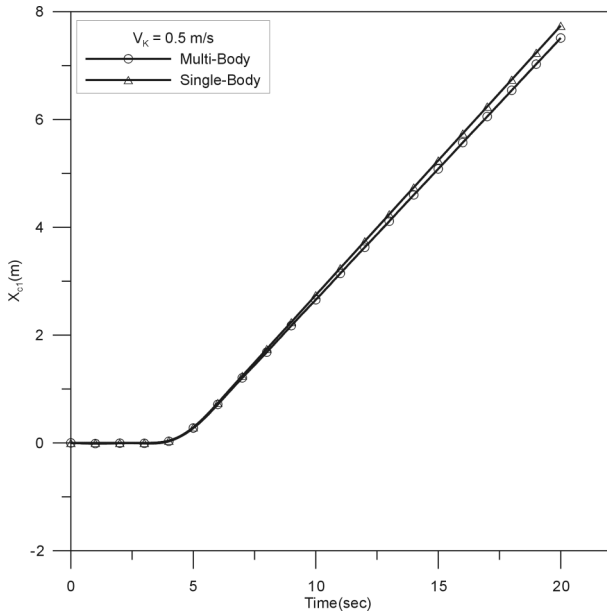
### 수치 해석 결과

수치해석은 궤도링크의 속도가 0.5 m/s와 1.0 m/s인 두 가지의 직진 주행의 경우에 대해서 해석을 행하였다. 수치해석 시뮬레이션은 20초 동안 수행하였다. 적분시간 간격은 강체 차량의 경우에는 초로 일정하지만, 다물체 차량은 다중 적분시간 간격을 사용하고 있다. 다물체 차량의 평균 적분시간 간격은 약 0.0002초이었다.

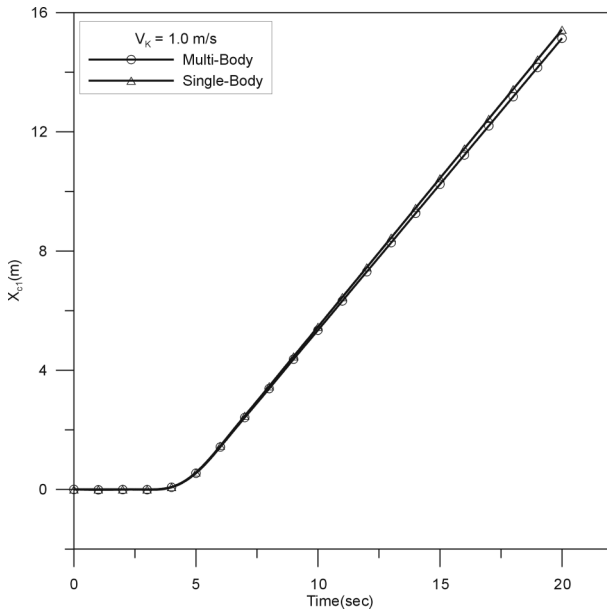
Table 3은 두 시뮬레이션의 계산시간을 나타내고 있다. 강체차량 모델의 경우에는 두 가지의 적분시간 간격을 사용하였다. 강체차량 해석의 경우에는 실시간 해석이 가능하였다.

**Table 3. Comparison of computation times.**

Velocity	Single Body model	Multi-body model
0.5 m/s	5.2 sec(h=0.01 sec)	1305 sec
	149 sec(h=0.0002 sec)	(h=0.0002 sec)
1.0 m/s	5.3 sec(h=0.01 sec)	1812sec
	151 sec(h=0.0002 sec)	(h=0.0002 sec)

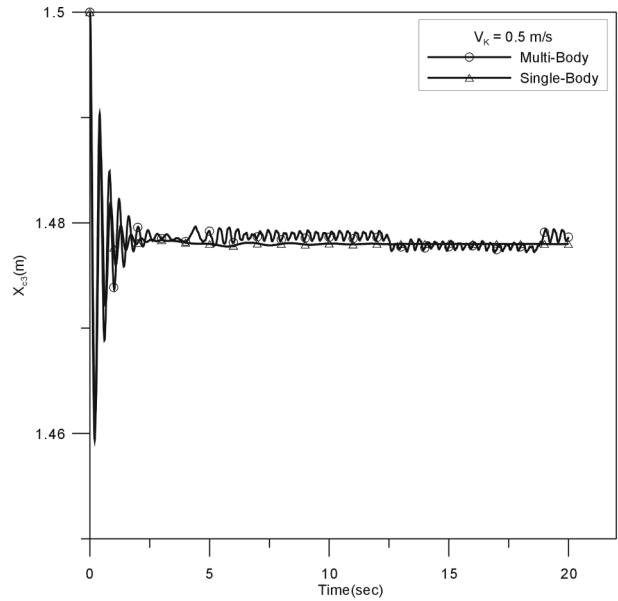


**Fig. 10. Surge responses of vehicles at  $V_k = 0.5$  m/s.**



**Fig. 11. Surge responses of vehicles at  $V_k = 1.0$  m/s.**

두 가지 조건에 대한 시뮬레이션 결과는 Figs. 10-16에 나타나 있다.



**Fig. 12. Heave responses of vehicles at  $V_k = 0.5$  m/s.**

Fig. 10과 11은 속도에 대한 주행차량의 직진운동을 나타낸다. 다물체 차량 모델의 결과가 강체차량의 결과에 비해 조금 느린 것을 알 수 있다. 다물체 차량의 경우, 순환하는 트랙링크가 차량 전면의 아이들러 주위를 따라 회전하면서 지면과 접촉할 때 트랙링크와 지면간의 접촉각도에 따라서 지반의 반력이 차량의 진행 반대방향으로 작용하기 때문에 다물체 차량의 속도가 감소하여 나타난다.

Fig. 12는 속도에 대한 주행차량의 수직운동을 나타낸다. 강체차량이 초기의 비정상 운동 이후에 정상상태의 주행상황을 보여주는데 반하여, 다물체 차량모델은 주기적 진동을 계속하고 있는 것을 볼 수 있다. 이 진동의 주기는 차량의 앞부분의 궤도링크가 지면에 접촉하는 주기와 일치한다. 아이들러 주위를 따라 궤도링크가 회전하면서 지면과 처음 접촉할 때, 지면과 상대 각도를 가지고 접촉하게 된다. 이런 경우 지면에서 발생하는 힘은 차량의 진행 방향 뿐만 아니라 수직방향의 힘도 작용하게 된다. 이러한 힘으로 인하여 다물체 차량의 운동에 진동이 발생하게 된다. 그리고 차량의 수직침하와 지반반력간의 관계를 식 (30)의 모델을 사용함으로써 차량모델은 궤도가 구동되지 않은 약 3초간의 초기 구간에서 정적 평형상태에 도달하기까지 수직 진동을 나타낸다.

Fig. 13과 14는 각각 궤도구동속도가 0.5 m/s와 1.0 m/s에 대한 차량의 직진속도 응답을 나타낸다. Fig. 12에서 확인하였듯이 두 모델의 속도에는 약간의 차이가 있는 것을 알 수 있다. 다물체 차량모델의 직진속도는 정상구동 구간에서도 Fig. 12의 수직운동의 진동 주기와 같은 주기로 진동하는 것이 보인다.



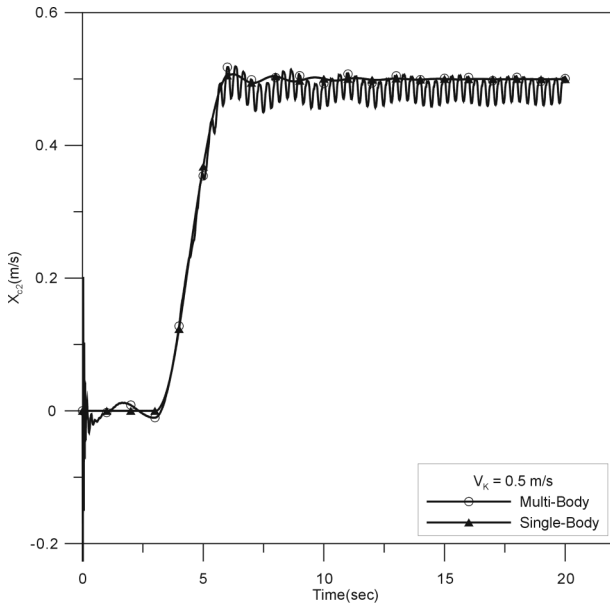


Fig. 13. Longitudinal velocities of vehicles at  $V_k = 0.5$  m/s.

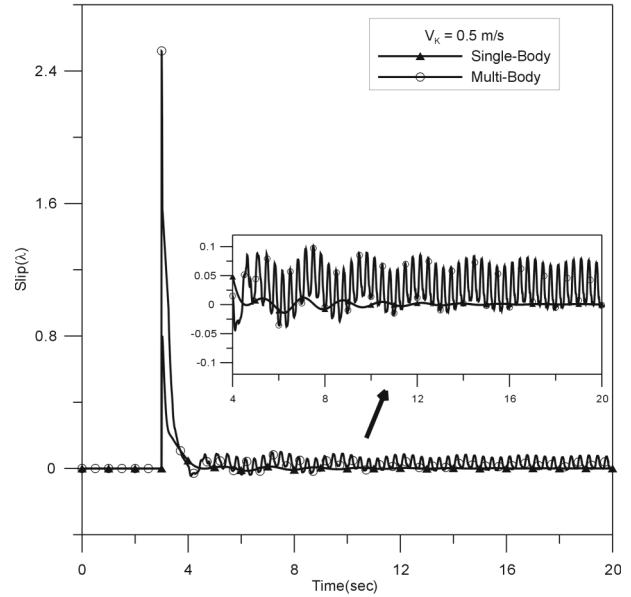


Fig. 15. Slips of track at  $V_k = 0.5$  m/s.

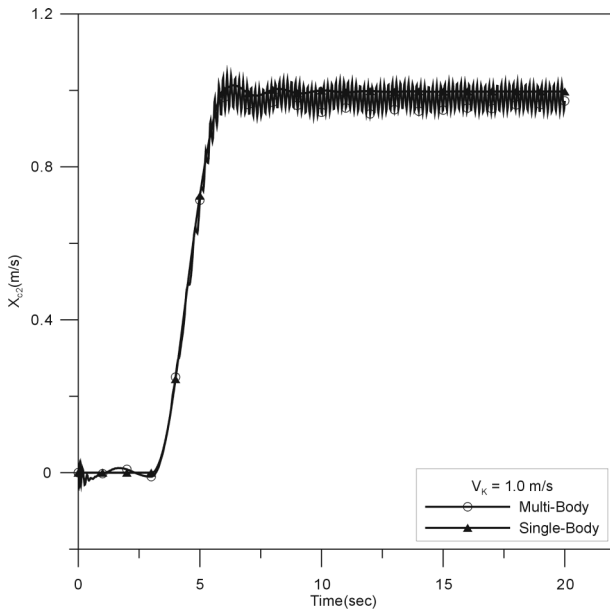


Fig. 14. Longitudinal velocities of vehicles at  $V_k = 1.0$  m/s.

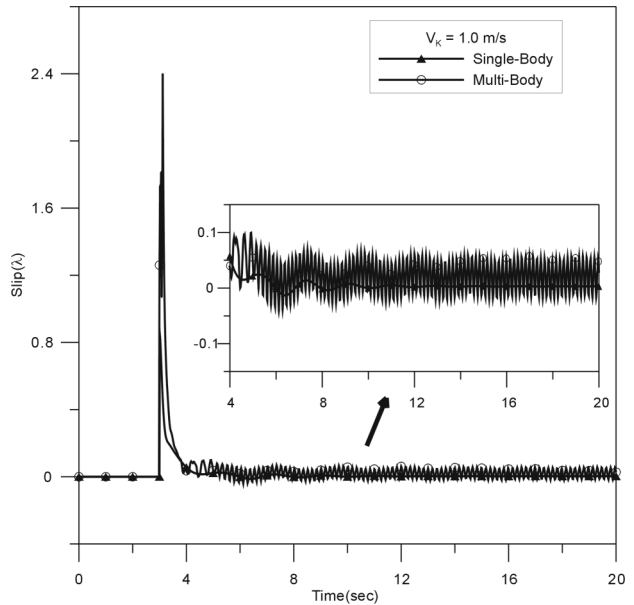


Fig. 16. Slips of track at  $V_k = 1.0$  m/s.

Fig. 15와 Fig. 16은 트랙의 슬립(slip)을 보여준다. 슬립의 정의는 다음과 같다.

$$\lambda^{(j)} = 1 - V_{C_1} / V_K^{(j)} \quad (36)$$

Fig. 15와 Fig. 16에서 보는 바와 같이 강체차량 모델의 경우에는 다물체 차량모델에 비하여 슬립이 매우 작게 발생하는 것을 볼 수 있다. 특히, 궤도의 구동속도가 0.5 m/s의 경우에는 슬립이 거의 발생하지 않았는데 이는 해석

조건에서 외부저항 요인을 고려하지 않은 결과이다. 반면에 다물체 차량모델의 경우에는 Fig. 13과 Fig. 14에서 차량속도가 낮게 해석된 결과와 연관되어 트랙의 슬립이 강체차량 모델에 비하여 크게 발생하는 것이 확인되었다. 이는 앞서와 마찬가지로 차량 전면부에서 새로 지면과 접촉하는 트랙링크에 작용하는 지반의 저항반력에 기인한다. 이를 미루어 볼 때, 보다 큰 외부저항 요인들이 고려된다면 강체차량 모델의 경우에서도 슬립이 현저하게 증가되어 발생할 것을 쉽게 예상할 수 있다.

## 6. 결 론

점착성 연약지반을 주행하는 무한궤도 주행차량의 운동 해석을 위하여 강체차량 주행해석 전산프로그램이 개발되었다. 아울러 다물체 차량 주행해석을 위하여 강체차량 해석모델을 위한 연약지반 주행역학 모델을 상용소프트웨어에서 제공하는 사용자 정의 서브루틴을 이용하여 다물체 차량 해석모델에 추가하였다. 수치해석 결과에 나타난 것처럼, 해석 시간에 대해서는 강체 주행차량 모델이 다물체 주행차량 모델에 비해 월등히 좋은 결과를 주었다. 다물체 주행차량 모델에서 발생하는 진동이 강체 주행차량 모델에서는 발생하지 않았다. 실제 모델에서도 발생하는 진동이 강체 주행차량 모델에서 발생하지 않은 이유는 강체차량 모델에는 궤도링크에 대한 모델이 포함되어 있지 않기 때문이다. 또한 이런 이유로 차량의 속도 면에 있어서도 강체차량 모델이 조금 더 빠른 경향을 보이고 있다.

강체차량 해석모델과 다물체 차량 해석모델의 비선형 동적 거동 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 점착성 연약지반에 대한 강체 차량 및 다물체 차량의 동적거동 해석이 가능하게 되었다.
- 강체차량 모델의 경우에는 실시간 해석이 가능하였으며, 이러한 실시간 시뮬레이션은 연약지반 주행차량의 제어 알고리즘 개발에 적용할 수 있다.
- 연약지반에 대한 다물체 모델에 대한 해석은 연약지반 주행차량의 상세설계 결정에 효과적으로 사용될 수 있다.

향후 다물체 차량모델의 선회주행 해석 연구, 궤도링크의 그라우저 효과에 관한 실험적 연구 및 차량 모형시험을 통한 두 해석모델 간의 장단점 비교 연구 등이 필요하다.

## 사 사

본 논문은 해양수산특정 연구과제인 '심해저 집광시스템 및 채광운용기술 개발' 과제와 기본연구 과제인 '해양개발 설계엔지니어링 기술 고도화'의 일부분으로 수행되었다.

## 참고문헌

- Baladi, G.Y. and B. Rohani. 1978. A mathematical model of terrain vehicle interaction for predicting the steering performance of track-laying vehicles. p. 285-332. In: *Proc. 6th ISTVS Conference*.
- Bode, O. 1991. Simulation der Fahrt von Raupenfahrwerken auf Tiefseeböden. Ph.D. Thesis. Univ. of Hanover. (in German)
- Hayasi, I. 1975. Practical analysis of tracked vehicle steering depending on longitudinal track slippage. *Proc. ISTVS Conf.*, Vol. 2.
- Hong, S. and J.-S. Choi. 2001. Experimental study on grouser shape effects on trafficability of extremely soft seabed. p. 115-121. In: *Proc. 4th Ocean Mining Symposium*. Szczecin, Poland.
- Hong, S., H.-W. Kim, and J.-S. Choi. 2002. A method for 3-D dynamic analysis of tracked vehicles on soft terrain of seafloor. p. 149-154. In: *Proc. Fall KCORE Conference*.
- Kitano, M. and M. Kuma. 1977. An analysis of horizontal plane motion of tracked vehicles. *J. Terramechanics*, 14, 211-225.
- Kitano, M. and H. Tyorzaki. 1976. A theoretical analysis of steerability of tracked vehicle. *J. Terramechanics*, 13(4), 241-258.
- Murakami, H., K. Watanabe, and M. Kitano. 1992. A mathematical model for spatial motion of tracked vehicles on soft ground. *J. Terramechanics*, 29, 71-81.
- RecurDyn-LM. 2002. *User's Manual ver 4.3*. FunctionBay.
- Tran, D.T., J. O'Brien, and T. Muro. 2002. An optimal method for the design of a robotic tracked vehicle to operate over fresh concrete under steering motion. *J. Terramechanics*, 39(1), 1-22.
- Wong, J.Y. 1993. *Theory of Ground Vehicles*. John Wiley & Sons, New York.
- Zhang, Yilin. 1995. Prüfstands und Rechnersimulation der Kurvenfahrt von Raupenfahrwerken auf extrem weichen Böden. Ph.D. Thesis, Univ. of Hanover. (in German)

Received Apr. 16, 2004

Accepted Jun. 8, 2004