

궤도차량과 토양의 상호작용에 대한 연구

박천서*, 이승종**

Study of the Interaction between Tracked Vehicle and Terrain

Cheun-Seo Park *, Seung-Jong Yi **

ABSTRACT

The planar tracked vehicle model used in this investigation consists of two kinematically decoupled subsystems, i.e., the chassis subsystem and the track subsystem. The chassis subsystem includes the chassis frame, sprocket, idler and rollers, while the track subsystem is represented as a closed kinematic chain consisting of rigid links interconnected by revolute joints. In this study, the recursive kinematic and dynamic formulation of the tracked vehicle is used to find the vertical force and the distance of an arbitrary track moved in the driving direction along the track. These distances and vertical forces obtained are used to get the deformation and sinkage of a terrain. The FEM(Finite Element Method) is adopted to analyze the interaction between tracked vehicle and terrain. The terrain is represented by a system of elements with specified constitutive relationships and considered as a piecewise linear elastic, plastic and isotropic material. When the tracked vehicle is moving with different speeds on the terrain, the elastic and plastic deformations and the maximum sinkage for the four different types of isotropic soils are simulated.

Key Words : tracked vehicle(궤도차량), sprocket(스프라켓), idler(아이들러), roller(롤러), elastic and plastic deformation(탄소성 변형), isotropy(동방성), Finite Element Method(유한요소법), deformation(변형), sinkage(침하량)

1. 서론

토양 위를 움직이는 궤도차량에 의한 토양의 변형은 차량의 궤도와 토양사이의 상호작용 때문이다. 이러한 상호관계는 임의의 한 궤도에서 전 단응력과 압력 그리고 여러 다른 현상들로 인하여 나타난다. 이러한 복잡한 현상을 규명하기 위하여 지금까지 궤도차량과 토양의 상호작용 규명은 다음과 같은 3 가지 방법들 중에서 한가지를 사용해 왔다^[1].

첫번째는 해석적인 방법으로서 궤도차량과 토양의 상호작용에 대한 물리적 모델(physical model) 및 실험에 기초한 토양에 대한 수학적/물리적 모델을 이용하였고, 두 번째 방법은 실험적 방법으로서 원추분할(cone index) 등을 사용한 토양의 강도를 측정하거나 실제 경험을 바탕으로 차량원추분할(vehicle cone index)을 위한 차량과 토양의 조건에 대한 수학적 정의를 사용하였다. 세 번째 방법은 유한요소법을 사용하여 궤도차량과 토양의 상호작용에 대한 시뮬레이션을 수행하는 것이며 이

2001년 5월 14일 접수
효성그룹
한양대 기계공학부

때 실험으로부터 구한 기본적인 토양에 대한 데이터를 이용하였다.

이상의 이론적 방법과 실험적 방법은 매우 오랫동안 사용되어 왔으며 나름대로 많은 장점을 가지고 있다. 또한 국부적으로는 매우 정확하고 사실적인 규명을 가능하게 하였다. 하지만 궤도차량과 토양의 상호작용 규명은 실제적으로 매우 복잡하고 해결되지 않은 많은 문제점들을 가지고 있다 [2,3]. 이러한 단점들을 극복할 수 있는 방법중의 하나가 유한요소법이다. 이 방법은 궤도차량과 토양의 상호작용을 규명하는 방법으로는 비교적 최신의 방법이다. 유한요소법은 토양의 변형에 대해서 다양하게 적용할 수 있으며 연구비용도 상당히 줄일 수 있다. 게다가 이 방법은 다양하고 복잡한 토양의 특성을 정확하게 반영시킬 수 있다 [4,5,6].

우선 본 연구에서는 궤도차량의 각각의 훨에 작용하는 수직하중과 주행거리를 알아 내기 위해서 다물체 동역학을 사용하였다 [7]. 여기서 얻어진 데이터는 유한요소법을 이용한 궤도차량과 토양의 상호작용 규명에 사용되었다. 토양은 등방성을 갖는 것으로 가정하였고 선형과 비선형을 모두 고려하였다.

2. 궤도차량 동역학

본 연구에서는 우선 다양한 속도에서 토양의 변형 및 침하량을 계산하기 위해서 궤도차량의 스프라켓, 아이들러, 그리고 훨들에 작용하는 수직하중들을 계산하였다. 이를 위해 54 개의 강체들로 구성된 2 차원 궤도차량을 설정하여 시스템을 구성하였다. 즉 이 궤도차량 모델을 지면(강체 1)을 포함하여 샤시(강체 2), 스프라켓(강체 3), 아이들러(강체 4), 훨리(강체 5 ~ 12) 및 회전이음으로 연결된 궤도링크(강체 13 ~ 54)로 구성하였다.

시스템은 샤시시스템 (Fig. 1)과 트랙시스템 (Fig. 2)으로 구성되며 샤시시스템은 샤시프레임과 스프라켓, 아이들러, 훨리로 구성하였다. 또한 트랙시스템은 회전이음(revolute joint)으로 연결된 링크들로 구성된 폐연쇄(closed kinematic chains)로 나타내었다. 이 2 차원 궤도차량과 관련되는 변수는 각각의 구성요소의 형태(geometry), 위치(각도), 속도(각속도), 가속도(각가속도) 등이 된다.

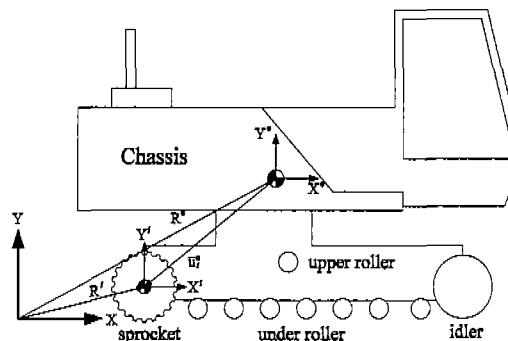


Fig. 1 Chassis subsystem

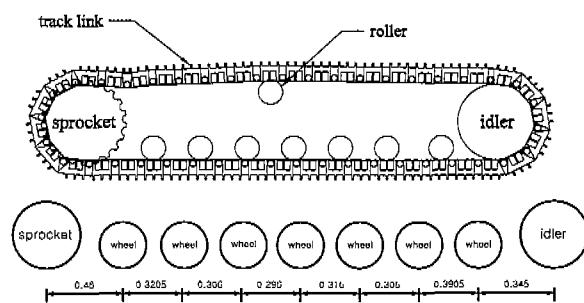


Fig. 2 Track subsystem

2.1 순환기구학방정식

2.1.1 궤도시스템

궤도차량모델의 모든 요소들은 회전이음으로 연결되어 있다. 여기서는 회전이음으로 연결된 강체로 구성된 시스템의 순환기구학방정식을 다물체 궤도차량의 2 차원 모델(Fig. 2)을 이용해서 유도하였다. 만약에 회전이음으로 연결된 강체로 구성된 시스템에서 i 번째 강체가 $i-1$ 번째 강체에 회전이음으로 Fig. 3 과 같이 연결되어 있다면 다음과 같은 기구학적 구속조건들이 생긴다 [7].

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{R}^i + \mathbf{A}^i \bar{\mathbf{u}}_1^i &= \mathbf{R}^{i-1} + \mathbf{A}^{i-1} \bar{\mathbf{u}}_2^{i-1} \\ \theta^i &= \theta^{i-1} + \theta^{i,i-1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{R}^i 와 \mathbf{R}^{i-1} 은 i 번째 및 $i-1$ 번째 강체좌표계 원점의 전역위치벡터(global position vector), \mathbf{A}^i 와 \mathbf{A}^{i-1} 은 각각 i 번째 및 $i-1$ 번째 강체의 회전을 나타내는 2 차원 변환행렬(transformation matrix), $\bar{\mathbf{u}}_1^i$ 와 $\bar{\mathbf{u}}_2^{i-1}$ 은 각각 i 번째 및 $i-1$ 번째 강체의 좌표

계로 표현되는 연결점(joint definition point)의 상태 위치벡터, θ^i 는 i 번째 강체의 전역좌표계에 대한 절대회전각, 그리고 $\theta^{i,i-1}$ 은 $i-1$ 번째 강체에 대한 i 번째 강체의 상대회전각을 나타낸다. 식 (1)을 시간에 대해서 미분하면 속도방정식을 얻을 수 있고, 이를 다시 지역좌표계 원점의 절대위치벡터들과 지역좌표계의 회전각들의 속도방정식으로 나타내면 다음과 같다^[7].

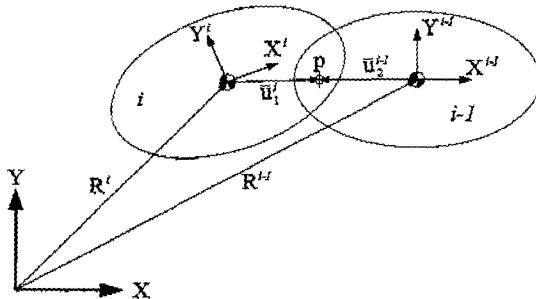


Fig. 3 Revolute joint between adjacent bodies

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{H}\dot{\mathbf{q}}_i \quad (2)$$

여기서

$$\mathbf{q} = [\mathbf{R}^1^T \quad \mathbf{R}^2^T \quad \mathbf{L} \quad \mathbf{R}^n^T \quad \theta^1 \quad \theta^2 \quad \mathbf{L} \quad \theta^n]^T$$

$$\mathbf{q}_i = [\mathbf{R}^1^T \quad \theta^1 \quad \theta^2 \quad \mathbf{L} \quad \theta^n]^T$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{I} & \mathbf{A}_\theta^1 \bar{\mathbf{u}}_2^1 & -\mathbf{A}_\theta^2 \bar{\mathbf{u}}_1^2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{I} & \mathbf{A}_\theta^1 \bar{\mathbf{u}}_2^1 & \mathbf{A}_\theta^2 \mathbf{d}^2 & -\mathbf{A}_\theta^3 \bar{\mathbf{u}}_1^3 & \mathbf{0} & \mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{I} & \mathbf{A}_\theta^1 \bar{\mathbf{u}}_2^1 & \mathbf{A}_\theta^2 \mathbf{d}^2 & \mathbf{A}_\theta^3 \mathbf{d}^3 & -\mathbf{A}_\theta^4 \bar{\mathbf{u}}_1^4 & \mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ \mathbf{I} & \mathbf{A}_\theta^1 \bar{\mathbf{u}}_2^1 & \mathbf{A}_\theta^2 \mathbf{d}^2 & \mathbf{A}_\theta^3 \mathbf{d}^3 & \mathbf{A}_\theta^4 \mathbf{d}^4 & \mathbf{L} & -\mathbf{A}_\theta^n \bar{\mathbf{u}}_1^n \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L} & \mathbf{1} \end{bmatrix}$$

2.1.2 샤시시스템

샤시시스템을 구성하는 요소들 즉, 스프라켓, 아이틀러 및 롤러는 Fig. 1과 같이 모두 샤시프레임에 회전이음으로 연결되어 있고 다음과 같은 기구학적 구속조건이 생긴다^[7].

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{R}^i &= \mathbf{R}^c + \mathbf{A}^i \bar{\mathbf{u}}_i^c \\ \theta^i &= \theta^c + \theta^{i,c} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

여기서 \mathbf{R}^i 는 i 번째 강체좌표계 원점의 전역위치벡터, \mathbf{R}^c 는 샤시프레임좌표계 원점의 전역위치벡터, \mathbf{A}^c 는 샤시프레임의 회전을 나타내는 2 차원변환행렬, $\bar{\mathbf{u}}_i^c$ 는 샤시프레임좌표계로 표현되는 i 번째 강체의 연결점을 나타내는 상대위치벡터, θ^i 는 i 번째 강체의 전역좌표계에 대한 절대회전각, θ^c 는 샤시프레임의 전역좌표계에 대한 절대회전각, 그리고 $\theta^{i,c}$ 는 샤시프레임에 대한 i 번째 강체의 상대회전각을 나타낸다.

지역좌표계 원점의 절대위치벡터들과 지역좌표계의 회전각들의 속도방정식은 식 (3)을 시간에 대해서 미분하여 다음과 같이 나타낼 수 있다^[7].

$$\dot{\mathbf{q}}_c = \mathbf{H}_c (\dot{\mathbf{q}}_i)_c \quad (4)$$

여기서

$$\mathbf{q}_c = [\mathbf{R}^c^T \quad \mathbf{R}^1^T \quad \mathbf{L} \quad \mathbf{R}^n^T \quad \theta^c \quad \theta^1 \quad \mathbf{L} \quad \theta^n]^T$$

$$(\dot{\mathbf{q}}_i)_c = [\mathbf{R}^c^T \quad \theta^c \quad \theta^1 \quad \theta^2 \quad \mathbf{L} \quad \theta^n]^T$$

$$\mathbf{H}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{I} & \mathbf{A}_\theta^c \bar{\mathbf{u}}_1^c & \mathbf{0} & \mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{I} & \mathbf{A}_\theta^c \bar{\mathbf{u}}_2^c & \mathbf{0} & \mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ \mathbf{I} & \mathbf{A}_\theta^c \bar{\mathbf{u}}_n^c & \mathbf{0} & \mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L} & \mathbf{1} \end{bmatrix}$$

여기서 \mathbf{A}_θ^c 는 θ^c 에 대한 \mathbf{A}^c 의 편미분이다.

2.2 운동방정식

절대좌표계에서 궤도차량의 운동방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다[7].

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{Q} + \mathbf{F} \quad (5)$$

혹은

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_R & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_R \\ \ddot{\mathbf{q}}_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_R \\ \mathbf{Q}_\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{F}_R \\ \mathbf{F}_\theta \end{bmatrix}$$

여기서 \mathbf{M} 은 궤도차량의 절대좌표에 대한 질량행렬, \mathbf{Q} 는 외부에서 작용하는 힘과 모멘트 벡터, \mathbf{F} 는 구속력 및 구속모멘트 벡터이고, 아래 첨자 R 및 θ 는 각각 병진운동 및 회전운동 성분을 뜻한다.

식 (5)를 일반좌표 $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{\mathbf{q}}_R \dot{\mathbf{q}}_\theta]^T$ 에 대해서 풀고 양변에 \mathbf{H} 의 전치행렬을 곱해주고 $\mathbf{H}^T \mathbf{F} = \mathbf{0}$ 라는 식을 이용하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다[7].

$$\mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{Q}_i \quad (6)$$

여기서 궤도시스템과 사시시스템에 대한 \mathbf{M}_i 와 \mathbf{Q}_i 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{cases} (\mathbf{M}_i)_{\text{track}} = \mathbf{H}^T \mathbf{M} \mathbf{H} \\ (\mathbf{Q}_i)_{\text{track}} = \mathbf{H}^T (\mathbf{Q} - \mathbf{M} \gamma) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} (\mathbf{M}_i)_{\text{chassis}} = \mathbf{H}_c^T \mathbf{M}_c \mathbf{H}_c \\ (\mathbf{Q}_i)_{\text{track}} = \mathbf{H}_c^T (\mathbf{Q}_c - \mathbf{M}_c \gamma_c) \end{cases}$$

여기서 $\gamma = \dot{\mathbf{H}} \dot{\mathbf{q}}_i$ 이다.

2.3 노면과 궤도링크의 접촉

궤도차량에서 궤도링크는 롤러, 스프라켓, 아이들러 그리고 노면과 접촉을 하며 이들 사이의

접촉력은 주로 궤도링크의 재료, 움직이는 강체의 속도, 마찰 등의 영향을 받기 때문에 이들을 비선형 접촉력모델을 이용하여 모델링 하였다[8]. 궤도링크와 노면과의 접촉 해석에 필요한 접촉력모델은 각 궤도링크가 3 개의 슈풀레이트(shoe plate)를 가졌기 때문에, 각각의 궤도링크들에 대해서 Fig. 4와 같은 3 점 접촉력모델을 사용하였다.

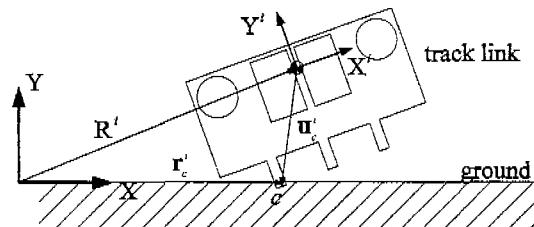


Fig. 4 Interaction between ground and track link

슈(접촉궤도링크) 바닥면에 있는 접촉점의 수직좌표값이 0 보다 작으면 지면과 접촉하는 한 점을 고려하여 접촉점 C에서의 전역위치벡터 \mathbf{r}_c^i 를 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{r}_c^i = \mathbf{R}^i + \mathbf{A}' \bar{\mathbf{u}}_c^i \quad (8)$$

여기서 \mathbf{R}^i 는 i 번째 궤도링크의 전역위치벡터, \mathbf{A}' 는 변환행렬, 그리고 $\bar{\mathbf{u}}_c^i$ 는 궤도링크 지역좌표계에 대한 접촉점 C의 위치벡터이다. 만일 \mathbf{r}_c^i 가 0 보다 작으면 접촉점 C는 노면과 접촉을 해서 접촉력이 발생하게 된다. 식(8)을 시간에 대하여 미분하면 다음과 같이 절대속도벡터를 구할 수 있다

$$\dot{\mathbf{r}}_c^i = \dot{\mathbf{R}}^i + \mathbf{A}' \bar{\mathbf{u}}_c^i \dot{\theta}^i \quad (9)$$

식(8)과 (9)를 이용하면 수직접촉력 F_y 와 수평마찰력 F_x 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} F_y &= k(r_y^i - r_{cy}^i) + c(\dot{r}_y^i - \dot{r}_{cy}^i), \\ F_x &= -\mu F_y \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 r_{cy}^i 와 \dot{r}_{cy}^i 는 각각 노면위에 있는 접촉점의 수직좌표값과 속도, k 는 강성계수, c 는 감쇠계수.

그리고 μ 는 마찰계수이다.

2.4 시뮬레이션

본 연구에서 개발된 TVS(Tracked Vehicle Simulation) 프로그램은 주행속도(0 km/h, 3 km/h, 10 km/h)에 따라 7 개의 휠과 스프라켓, 그리고 아이들러에 작용하는 수직하중을 계산한다. 이들 수직하중 값들은 데이터 파일로 만들어져서, 토양의 변형 및 침하량을 구하기 위한 유한요소 프로그램의 입력 데이터로 쓰인다. 또한 트랙의 임의의 한 링크를 관찰하여 주행방향으로의 주행거리를 계산한다. 주행속도가 0km/h 일 경우의 정적상태(static state)와 차량이 이동하고 있는 경우의 동적상태(dynamic state)에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

2.4.1 정적상태(static state)

Fig. 5 는 정적상태에서 각각의 휠에 작용하는 수직하중을 보여주고 있다. 여기서 나타난 총 수직하중은 약 12,400kg 인데 이것은 궤도차량의 실제 무게인 12,434.68kg에 근접하는 것이다. 또한 최대수직하중이 궤도의 중심에 위치하지 않는 데 이것은 실제로 차량의 무게중심이 정가운데 있지 않기 때문이다.

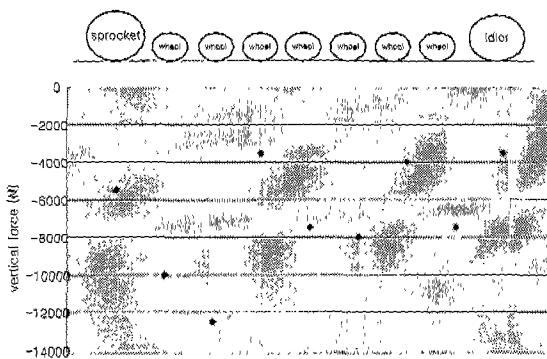


Fig. 5 The vertical force underneath each wheel in the static state

2.4.2 동적상태(dynamic state)

Fig. 4 의 C 점과 같이 트랙의 링크 중에서 임의의 한 점을 정한 후, 차량이 주행하는 동안 이 한 점을 관찰한다. 이 점은 차량이 주행함에 따라 각각의 휠 아래를 지나가게 된다. 속도에 따라 이러한 결과를 보여주는 것이 Fig. 6 과 Fig. 7 이다.

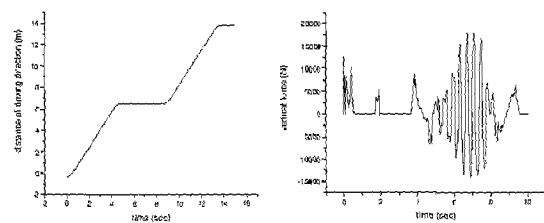


Fig. 6 Distance and load of a track link point under the moving speed of 3km/h

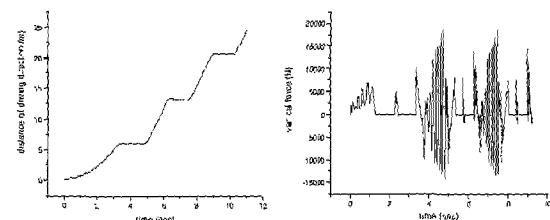


Fig. 7 Distance and load of a track link point under the moving speed of 10km/h

Fig. 6 은 주행속도가 3 km/h 일 때 각각의 휠에 작용하는 수직하중과 주행거리를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 수직하중의 분포가 상하 대칭으로 나타나는데 이것은 지면과 궤도링크 사이의 접촉모델을, 궤도가 주행에 필요한 추진력을 제공하는 동시에 주행 중 지면으로부터의 충격을 1 차적으로 흡수 완화시키는 기능을 하기 때문에, 스프링-댐퍼(spring-damper) 시스템으로 모델링 하였기 때문이다^[9].

Fig. 7 은 주행속도가 10 km/h 일 때 스프라켓과 아이들러 그리고 휠들 아래에 작용하는 수직하중과 주행거리를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 속도가 빨라질수록 임의의 링크가 더욱더 빨리 높기 때문에 시간에 따른 수직하중의 폭도 더욱 더 작아짐을 볼 수 있다. 이를 결과는 다양한 토양의 변형 및 침하량을 구하기 위한 유한요소 프로그램에서 데이터로 사용되었다.

3. 토양의 대변형 운동학

기준 이상의 변형률(strains)이 토양에 작용할 때 이것에 의한 기하학적 형상의 변형은 더 이상 소홀이 될 수 없다. 변형이 큰 변형률 계산은 해

당되는 수학적 관계와 몇 가지의 기본적 물리량 즉 변위와 변형을 정의함으로써 계산된다^[10].

토양에 작용하는 수직하중은 토양의 위치를 다른 위치로 이동시킨다. 이런 움직임은 Fig. 8 에서처럼 변형전의 위치와 변형후의 위치로 표현될 수 있다. 여기서 $\mathbf{P}(0)$ 는 변형의 초기위치를 나타내고, $\mathbf{P}(n)$ 은 현재 스텝 n 에서의 위치, 그리고 $\mathbf{P}(n+1)$ 은 스텝 $(n+1)$ 에서의 위치를 나타낸다. 스텝 $(n+1)$ 에서의 위치벡터 $\mathbf{r}^{(n+1)}$ 은 초기위치벡터 $\mathbf{r}^{(0)}$, 스텝 n 에서의 위치벡터 $\mathbf{r}^{(n)}$ 및 변위벡터 $\Delta\mathbf{u}$ 와 다음과 같은 관계가 있다.

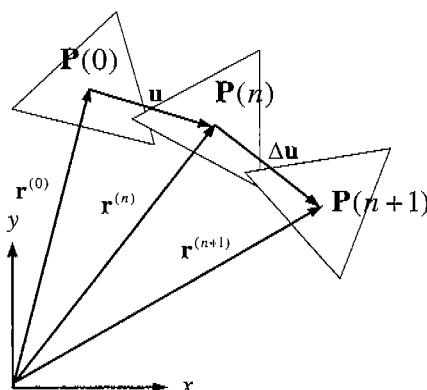


Fig. 8 Position vectors and displacements of a deforming body

$$\mathbf{r}^{(n+1)} = \mathbf{r}^{(0)} + \mathbf{u} + \Delta\mathbf{u} = \mathbf{r}^{(n)} + \Delta\mathbf{u} \quad (11)$$

토양이 스텝 n 에서 스텝 $n+1$ 로 변형될 때 변형구배텐서(deformation gradient tensor) \mathbf{F} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{r}^{(n+1)}}{d\mathbf{r}^{(n)}} \quad (12)$$

Green 변형텐서 \mathbf{C} 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{C} = \mathbf{F}^T \mathbf{F} \quad (13)$$

변형률증분텐서(incremental strain tensor) $\Delta\boldsymbol{\epsilon}$ 은 Green 변형텐서 \mathbf{C} 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta\boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \Delta\epsilon_{11} & \phi \\ \phi & \Delta\epsilon_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서 $\Delta\epsilon_{11} = \ln \lambda_1$, $\Delta\epsilon_{22} = \ln \lambda_2$ 이며 λ_i ($i=1,2$)는 스트레치비(stretch ratio)로서 \mathbf{C} 의 주값(principal value)이다.

응력증분텐서(incremental stress tensor)는 변형률증분텐서와 아래와 같은 관계가 있다.

$$\Delta\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\Delta\boldsymbol{\epsilon} \quad (15)$$

여기서 \mathbf{D} 는 응력과 변형률을 관련시켜주는 행렬이다. 7 개의 휠파 스프라켓 그리고 아이들러에 작용하는 수직하중에 의한 외력증분벡터 $\Delta\mathbf{F}$ 와 토양의 변위증분 $\Delta\mathbf{u}$ 는 가상일(virtual work)의 원리를 이용하여 아래와 같이 Newton-Raphson 방정식으로 표현할 수 있다^[11,12].

$$\mathbf{K}\Delta\mathbf{u} = \Delta\mathbf{F} \quad (16)$$

여기서 \mathbf{K} 는 강성행렬(stiffness matrix)이다.

4. 토양의 변형 및 침하량

궤도차량은 엔진에서 발생한 동력을 스프라켓을 통하여 궤도에 전달하여 궤도와 토양과의 마찰과 점착에 의해서 주행을 한다. 궤도차량은 그 특성상 일반차량과는 달리 여러 종류의 토양 위를 주행하거나 혹은 토양 위에서 작업을 한다. 이를 토양들은 서로 다른 물성치를 가지고 있기 때문에 궤도차량의 견인력은 토양의 변형 및 침하량 등을 구하여 간접적으로 파악할 수 있다.

본 연구에서는 궤도차량의 주행속도(0 Km/h, 3 Km/h, 10 Km/h)에 따른 서로 다른 성질을 가진 4 가지 종류의 토양(콘크리트, 자갈, 모래, 점토)에 대한 변형 및 침하량을 구하기 위해서 유한요소법을 사용하였다. 또한 궤도차량이 다양한 종류의 토양을 주행하거나 작업을 하기 때문에, 서로 다른 성질을 가진 4 종류의 토양에 대해서 서로 다른 토양역학을 적용하여야 하지만 여기서는 단지 그 경향을 파악하기 위해서 이를 토양들을 동방성(isotropic)을 가지고 있는 탄성체 및 소성체로 간주하였다.

4.1 선형성을 갖는 토양

토양을 매우 작게 나누고 이렇게 잘려진 각각의 요소들은 서로 연속적인 관계를 갖는 것으로 간주하였다. 또한 궤도차량의 수직하중에 의해서 토양에 작용하는 응력은 토양의 변형률과 선형적인 관계를 갖는다고 가정하였다.

유한요소해석 프로그램은 요소를 Fig. 9에서 보듯이 여러 요소들 중에서 삼각형요소를 사용하였다. 토양의 맨 윗부분은 해의 정확도를 위해 보다 세밀하게 분할하였다.

궤도차량과 토양의 상호작용을 규명하기 위해서, 주행속도가 0 km/h, 3 km/h, 10 km/h 일 때 4 가지 서로 다른 토양들(콘크리트, 자갈, 모래, 점토)에 대해서 유한요소법을 이용해서 시뮬레이션을 수행하였다. 각각의 토양에 대한 물성치가 Table 1에 나와 있다.

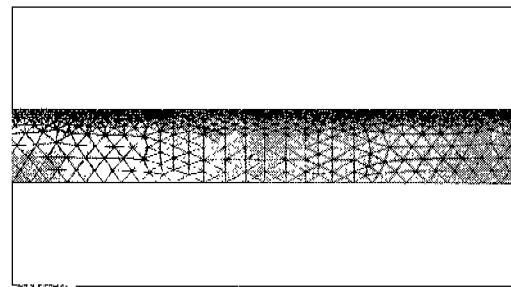
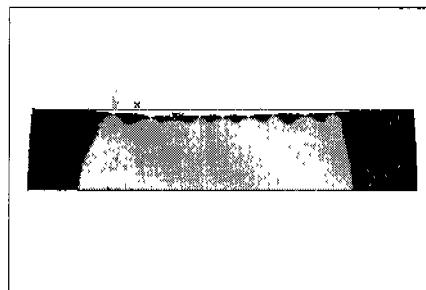


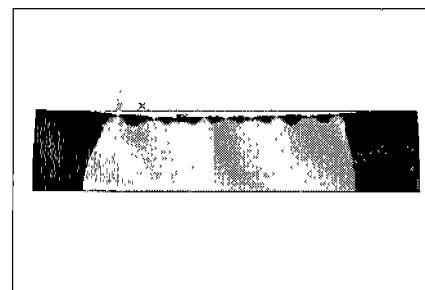
Fig. 9 Mesh of triangular elements for the analysis of interaction between track and soil

Table 1 Young's moduli of the 4 different types of terrains^[13]

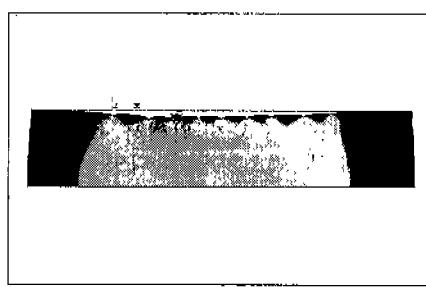
Species of the terrain	E (N/m ²)
Clay	60e5
Sand	150e5
Gravel	1000e5
Concrete	6895e6



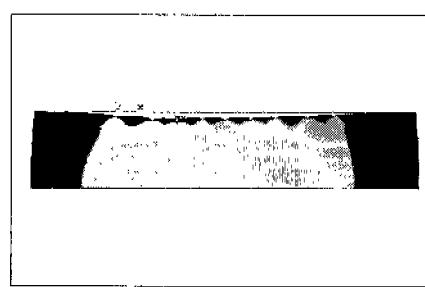
(a) concrete



(b) gravel



(c) sand



(d) clay

Fig. 10 Deformations for the 4 different types of soil at static state (0 km/h)

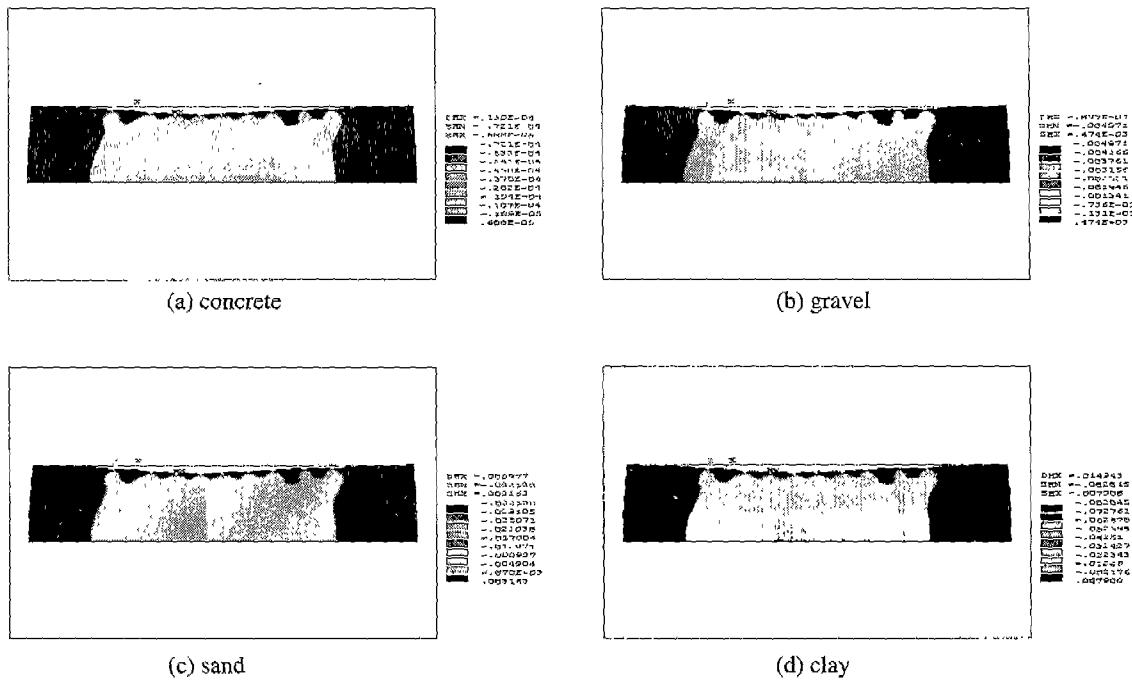


Fig. 11 Deformations for the 4 different types of soil at a dynamic state (3 km/h)

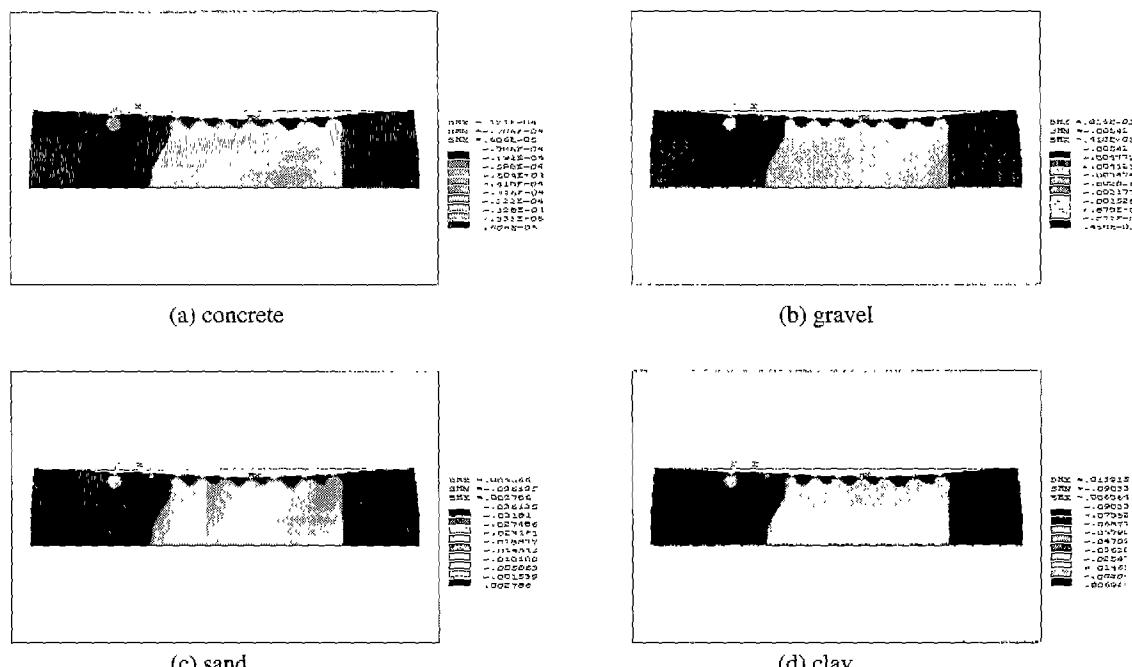


Fig. 12 Deformations for the 4 different types of soil at a dynamic state (10 km/h)

Figs. 10 과 11 그리고 12 는 각각의 다른 주행속도에서의 4 가지 토양에 대한 토양의 변형을 보여 준다. 차량의 경우 속도가 증가함에 따라서 가속도 역시 증가하여 차의 앞부분이 들리는 스팽트(squat) 현상이 발생하게 된다. 궤도차량 역시 이 스팽트 현상 때문에, 속도가 증가함에 따라서 스팽트부터 시작하여 차량 전반부에 있는 롤리부터 차례로 들려서 토양과 비접촉됨으로써 차량의 앞부분부터 토양에 전달되는 수직하중이 감소하게 된다. 이에 따라서 비접촉된 훨은 토양에 수직하중을 전달할 수 없기 때문에 훨과 비접촉된 부분의 토양은 거의 변형을 하지 않게 된다. 만일 훨과 비접촉된 토양에 변형이 생긴다면 그것은 접촉이 되는 다음 훨에 의한 변형이며 변형의 정도는 접촉에 의해서 생기는 변형보다 훨씬 작아진다.

Fig. 10 은 정적상태 하에서의 토양의 변형을 나타낸다. 스팽트, 7 개의 롤리, 및 아이들러 밑의 토양은 차량이 움직이지 않기 때문에 스팽트 현상이 발생되지 않고 따라서 수직하중이 토양에 영향을 미쳐서 결과적으로 토양이 변형되었음을 알 수 있다. 변형의 정도는 콘크리트, 자갈, 모래, 및 점토 순으로 토양의 강성이 약해지기 때문에 역으로 토양의 변형이 커졌음을 알 수 있다.

Fig. 11 및 12 에서 보는 바와 같이 궤도차량의 속도가 증가함에 따라서 스팽트 및 첫번째 롤리 밑의 토양은 스팽트 현상에 의해서 거의 변형을 하지 않음으로써 전체적으로 토양의 변형되는 폭이 점점 좁아짐을 알 수 있다. 또한 정적상태 하에서와 같이 콘크리트, 자갈, 모래, 및 점토 순으로 토양의 강성이 약해짐에 따라서 역으로 토양의 변형이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 13 은 궤도차량의 속도가 증가함에 따라서 4 가지 서로 다른 토양에서의 최대침하량을 구한 것이다. 토양의 강성이 약해짐에 따라서 즉 콘크리트, 자갈, 모래, 점토 순으로 최대침하량의 크기가 커짐을 알 수 있다. 또한 어느 속도(5km/h) 이상에서는 토양의 다짐효과 때문에 최대침하량의 변화는 거의 없어지게 된다. 토양의 최대침하량은 토양의 강성에 따라 다르게 나타나지만, 그 경향은 거의 비슷함을 알 수 있다.

Fig. 14 는 정적상태와 동적상태에서 토양의 특성에 따라 최대침하량이 다르게 나타남을 보여주고 있다. 즉 토양의 경화성이 떨어짐에 따라 최대침하량 정도의 기울기가 더욱더 커짐을 알 수 있다. 또한 정적상태에서보다 동적상태에서 최대 침하량이 더욱 더 커짐을 알 수 있다.

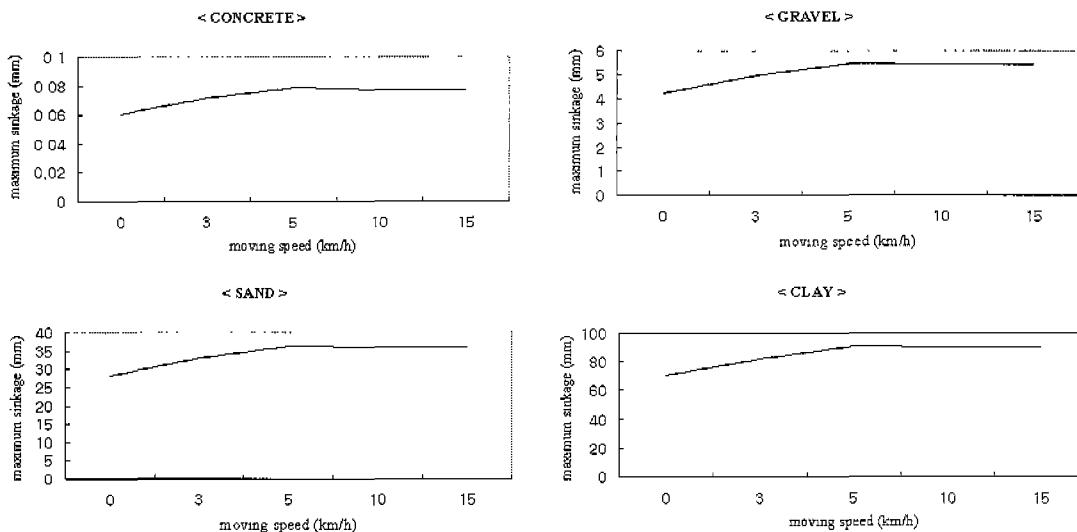


Fig. 13 The maximum sinkage with different soil property and driving speed

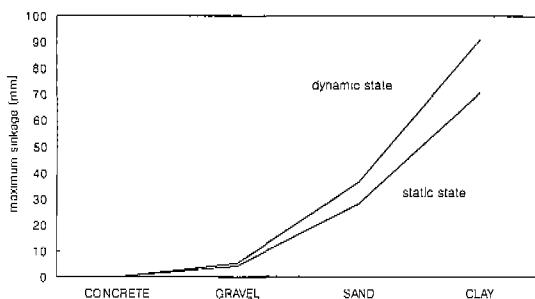


Fig. 14 The maximum sinkage for the 4 different types of soil under the static and dynamic state

4.2 비선형성을 갖는 토양

실제적으로 토양은 비선형성을 가지고 있어서 토양에 힘이 작용하면 토양은 비선형적으로 변형하게 된다. 즉 궤도차량이 지나갈 때 토양은 변형(압축)을 일으킨다. 그 변형은 토양에 따라서 다르지만 완전히 비탄성체가 아니라고는 할 수 없다. 왜냐하면 궤도차량이 지나간 후에는 변형된 상태로 있지 않고 원래 상태로 돌아오려고 하기 때문이다. 그러나 약간 복원은 되지만 완전히 원래 형태로 돌아오지는 않는다.

본 연구에서는 이와 같은 실제적 토양에 근사하게 토양의 변형을 조사하기 위하여 4 가지 서로 다른 토양 중에서 강성이 가장 작은 점토를 선택하여 유한요소법을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 시 토양이 일정부분까지는 균일하다고 가정하였고, 점토의 비선형성을 나타내기 위해서 Bekker 가 제안한 다음과 같은 압력분포식을 사용하였다^[14].

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n$$

여기서

- p : pressure
- b : width of a rectangular contact area or radius of a circular contact area
- z : sinkage
- n , k_c , k_ϕ : pressure-sinkage parameter

그리고 점토에 대한 물성치는 대국에서 측정된 아래와 같은 실험 데이터를 이용하였다^[13].

Table 2 Terrain values

Terrain	Moisture content (%)	k_c (kN/m^{n+1})	k_ϕ (kN/m^{n+2})	b (mm)	n
Clay	38	13.19	692.15	51	0.5

위의 식과 데이터를 이용하여 정적상태에서 점토에 관해 시뮬레이션 한 결과는 Fig. 15 와 같으며, 점토의 비선형적 성질을 잘 반영하고 있다.

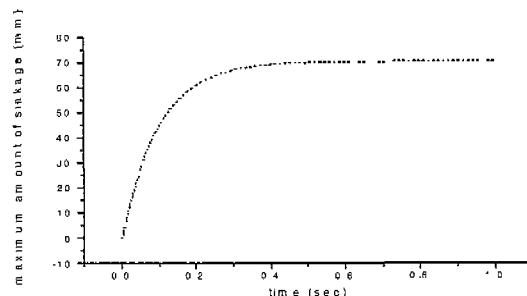


Fig. 15 The maximum sinkage at a static state

5. 결론

본 연구에서는 궤도차량이 여러 종류의 토양을 지날 때에 생기는 토양의 변형 및 침하량을 예측하기 위해서 시뮬레이션을 수행하였다.

이를 위해서 우선 궤도차량의 7 개의 훨과 스프라켓 그리고 아이들러에 작용하는 수직하중들을 다물체동역학을 이용하여 개발한 TVS 프로그램을 사용하여 구하였다. 이를 수직하중들을 데이터 파일로 만들어서 유한요소법을 사용하여 개발한 프로그램의 입력 데이터로 사용하여서 각각의 다른 토양 및 주행속도에 따른 토양의 변형 및 침하량을 구하였다. 여기서 토양은 등방성이며 선형 혹은 비선형성을 갖는 것으로 가정하였다.

이들 주행속도에 따른 서로 다른 토양에 대한 변형 및 침하량은 궤도차량의 기동성에 대한 하나의 척도가 될 수 있는 궤도와 토양간의 견인성을 나타내며 더불어 궤도차량의 궤도를 설계하기 위한 기본적인 자료로 사용될 수 있다.

또한 궤도차량 제작 시 본 연구에서 개발한 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 궤도차량 및 궤도의 성능을 미리 예측함으로써 원형(prototype)의 제작 수를 줄여서 예산과 시간을 절약할 수 있고, 또한 궤도의 파손도 역시 미리 예측할 수 있다.

참고문헌

Wiley & Sons. Inc., second edition, 1993.

1. Schmid, I.C., "Interaction of vehicle and terrain results from 10 years research of IKK," Journal of Terramechanics, Vol. 32, No. 1, pp. 3~26, 1995.
2. Garber, M. and Wong, J-Y., "Prediction of ground pressure distribution under tracked vehicles-1. An analytical method for predicting ground pressure distribution," Journal of Terramechanics, Vol. 18, No. 1, pp. 1~23, 1981.
3. Garber, M. and Wong, J-Y., "Prediction of ground pressure distribution under tracked vehicles-2. Effects of design parameters of the track-suspension system on ground pressure distribution," Journal of Terramechanics, Vol. 18, No. 2, pp. 71~79, 1981.
4. Hiroma, T., Wanjin, s., Kataoka, T. and Ota, Y., "Stress analysis using FEM on stress distribution under a wheel considering friction with adhesion between an wheel and soil," Journal of Terramechanics, Vol. 34, No. 4, pp. 225~233, 1997.
5. Molin, J-P., Leviticus, L-I., "Performance and use of tracks in agriculture - a review," Society of Automotive Engineers, 952131.
6. van Wyk, D. J. van, Spoelstra, J. and de Klerk, J. H. de, "Mathematical modeling of the interaction between a tracked vehicle and the terrain," Appl. Math. Modeling, Vol. 20, November, pp. 838~846, 1996.
7. Shabana, A. A., "Computational Dynamics," John Wiley & Sons, Inc., 1994.
8. Shin, J-H, "Dynamic analysis of multibody tracked vehicles," Master Thesis, Hanyang University, 1998.
9. KIMM, "Mechanical Characteristics Test on the Track," Report #BSI107-205, 1995.
10. Washizu, K., "Variational Methods in Elasticity & Plasticity," Pergamon Press, 1993.
11. Hinton, E. and Owen, D.R.J., "Finite Element Programming," Academic Press, 1977.
12. Owen, D.R.J., and Hinton, E., "Finite Elements in Plasticity : Theory and Practice," Pineridge Press Limited, 1980.
13. 우기형, "퍼스컴에 의한 토질-기초의 계산 예 해설," 기술경영사, 1992.
14. Wong, J.Y., "Theory of Ground Vehicles," John