

궤도시스템의 궤도링크와 연약지반과의 상호 접촉연구

류한식[†], 장정선^{*}, 최진환^{**}, 배대성^{***}

(2004년 5월 20일 접수, 2004년 9월 15일 심사완료)

Track System Interactions Between the Track Link and the Ground

Hansik Ryu, Jungsun Jang, Jinhwan Choi and Daesung Bae

Key Words : Tracked Vehicle(궤도차량), Track System(궤도시스템), Triangular Patch(삼각패치), Bekker's Theory(Bekker 이론), Terramechanics(토양역학)

Abstract

When the tracked vehicle is running on various types of terrain, the physical properties of the interacting ground can be different. In this paper, the interactions between track link and soft soil ground are investigated using static sinkage theory of soil ground. Grouser surfaces of a track link and triangular patches of ground are implemented for contact detection algorithm. Contact force at each segment area of a track link is computed respectively by using virtual work concept. Bekker's static soil sinkage model is applied for pressure-sinkage relationship and shear stress-shear displacement relationship proposed by Janosi and Hanamoto is used for tangential shear forces. The repetitive normal loads of a terrain are considered because a terrain element is subject to the repetitive loading of the roadwheels of a tracked vehicle. The methods how to apply Bekker's soil theory for multibody track system are proposed in this investigation and demonstrated numerically by high mobility tracked vehicle.

1. 서론

궤도차량의 주행시 동특성에 영향을 주는 요소에는 초기장력, 차량속도, 견인력, 노면형상, 스프로킷 토크, 회전운동, 궤도의 접지압 등이 있다. 이 중 접지압은 궤도차량의 침하(sinkage), 슬립, 견인력, 운동저항 등을 결정하므로 궤도차량의 성능을 예측하는데 중요하다. 일반적으로 궤도차량은 차륜형 차량에 비하여 견인력이 우수하고, 지면과의 접촉면적이 커서 낮은 접지압을 받는 장점이 있다. 접지압의 가장 일반적인 모형은 궤도시스템에 작용하는 접지압을 등분포로 가정한 평균 접지압이다. 이 모형은 연약한 토양에 대한 궤도차량의 주행여부를 판단할 수 있지만 차량의 성능은

판단할 수 없다.

Wills⁽¹⁾은 접지압의 분포 형태에 따라서 궤도차량의 견인력이 변화하며, 앞부분에서 접지압이 최대인 직각 삼각형 분포일 때 최대의 견인력을 얻을 수 있음을 증명하였다. Bekker⁽²⁾는 차량무게, 궤도 폭, 전륜 간격, 토양의 접지압-침하 관계를 고려하여 전륜사이 궤도부분을 현수선으로 가정한 접지압 분포 예측 모형을 개발하였다. Rowland⁽³⁾는 연약지면(soft ground)에서 평균 최대 접지압(MMP)의 개념을 도입하여 궤도차량의 주행성능을 평가하였지만 궤도차량의 운동저항이나 추진력, 인장력, 운전 조건하에 따른 견인효율 등의 차량성능 예측은 평가하지 못했다. Garber⁽⁴⁾는 정적상태에서 토양특성, 궤도의 현가장치, 장력장치, 토양변수를 고려한 접지압 분포 모형을 개발하였다. 이 모형은 전륜과 전륜 사이의 궤도 곡선을 현수선으로 가정하여 접지압과의 관계를 모형화 하였지만 하중전이에 의한 차량의 경사는 고려하지 못했다. Wong⁽⁵⁾은 접지압-침하, 전단응력-전단변위, 지형특성 등의 토양변수와 차량무게, 궤도장력, 궤도크기,

[†] 책임저자, 회원, FunctionBay, Inc. R&D Center
E-mail : hsryu@functionbay.co.kr
TEL: (02)583-0155 FAX: (02)583-0157

^{*} Dentium, Inc. R&D Center

^{**} 회원, 경희대학교 기계공학부

^{***} 회원, 한양대학교 기계공학부

전륜의 배열 등의 차량설계변수를 고려하여 접지압 분포 예측 모델을 개발하였다.

본 연구는 케도시스템에서 케도링크와 연약 지면과의 상호작용을 규명하는데 있어서, 기존의 전륜과 전륜사이, 지지롤러와 스프로킷 사이의 케도 거동을 연속적인 곡선으로 단순화시킨 방법에서 벗어나 각각의 케도 링크를 직접 강체로 모델링하고 지면과의 침하여부를 조사하여 연약지면과의 상호작용 이론을 적용하였다. 이를 위하여 Ryu⁽⁸⁾에 의해 케도링크 각각을 강체로 가정한 정교한 모델에 접지압(pressure)-침하(sinkage), 전단응력(shear stress)-전단변위(shear displacement)의 관계를 적용함으로써 노면과 케도링크와의 상호작용을 정확하게 고찰하는데 그 목적이 있다. 케도링크와 노면과의 기구학적 접촉 알고리즘은 노드-삼각패치 이론을 적용하여 노면을 구성한 후 케도링크와 노면과의 침하 여부를 조사하였다. Bekker의 접지압-침하(pressure-sinkage) 이론 및 Janosi-Hanamoto에 의한 전단응력-전단변위(shear stress - shear displacement)이론을 적용하였고, 접촉압은 가상일(virtual work)을 이용한 일반 힘(generalized force)으로 환산하여 케도링크에 적용하였다. 따라서 케도링크와 지면과의 접지압-침하, 전단응력-전단변위의 관계를 정교한 동역학 모델에 적용하여 보다 정확한 케도차량의 주행성능 예측이 가능하다.

2. 차량모델 및 운동방정식

2.1 Track system model

본 연구에 사용된 케도차량은 Fig. 1 과 같이 지면으로부터의 충격을 흡수할 수 있는 현가장치를 포함한 군수용 고속 케도차량이며 사용된 초기 장력은 5 톤이다. 이 시스템은 현가장치, 파워팩을 장착한 샤프시스템과 2 개의 케도시스템으로 구성된다. 샤프시스템은 샤프와 케도시스템에 구동력을 전달하는 2 개의 스프로킷과 아이들러, 12 개의 로드휠, 로드휠과 샤프를 연결하는 12 개의 로드암, 아이들러와 샤프를 연결하고 케도차량의 장력을 조절할 수 있는 2 개의 아이들러 암, 6 개의 지지롤러를 포함하며 현가장치는 6 개의 HSU (Hydro-pneumatic Suspension Unit)와 6 개의 토션 바(torsion bar)로 구성되어 있다. 또한, 스프로킷, 로드암, 아이들러 암, 지지롤러는 샤프와 핀조인트로 연결되어 있다. 노면과 접촉하는 케도 시스템은 각각 좌측과 우측의 케도 부시스템으로 구성되어 있다. 케도 부시스템은 케도 몸체, 핀, 고무

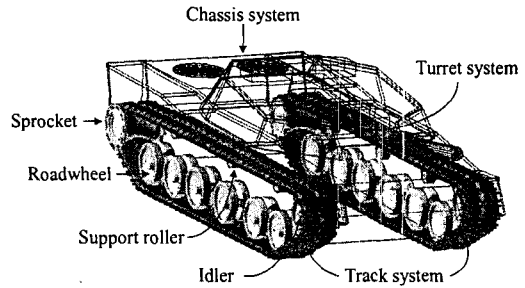


Fig. 1 High mobility tracked vehicle model

부싱, 고무패드로 구성된 케도링크의 결합으로 이루어져 있다. 고무부싱은 케도링크들 사이에 상대각을 줄이고 케도 핀의 진동을 줄여주는 작용을 함으로써 노면과 로드휠, 아이들러, 스프로킷 이(teeth)와의 상호 접촉력을 완하시킨다. 이 케도차량은 191 개의 강체(샤프 시스템에 39 개의 강체, 케도 부시스템에 각각 76 개의 강체)와 1 개의 자유도를 갖는 38 개의 revolute joint, 304 개의 부싱(bushing) 힘 요소들을 지니며 956 개의 자유도를 갖는다. 케도링크는 로드휠, 톨러, 스프로킷, 노면과 상호 접촉이 일어날 수 있으며 각각의 접촉 알고리즘을 통하여 접촉조건을 만족하면 접촉량으로부터 접촉력을 발생시킨다. 보다 자세한 내용은 Ryu⁽⁸⁾의 논문에서 제시되고 있다.

2.2 운동방정식

본 연구에서 사용된 상대좌표는 운동방정식의 크기를 줄이고 미분 대수방정식의 해를 구하는 과정과 관련하여 어려움을 피하는데 유용하다. 케도 시스템은 접촉력을 통하여 상호 작용하고 인접한 케도 링크들은 컴플라이언트(compliant) 힘 요소들에 의해 연결되어 있으므로 케도 시스템의 각 케도들은 3 개의 병진 좌표와 3 개의 오일러 각에 의해 표현되어질 수 있다. 속도 변환법을 이용한 샤프의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{B}^T \mathbf{M} \mathbf{B} \dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{B}^T (\mathbf{Q} - \mathbf{M} \mathbf{B} \dot{\mathbf{q}}_i) \quad (1)$$

여기서 \mathbf{q}_i 는 상대 독립좌표, \mathbf{B} 는 속도변환 행렬, \mathbf{M} 은 샤프 시스템의 질량 행렬, \mathbf{Q} 는 샤프 시스템의 일반 힘 벡터이다. 샤프시스템과 케도 부시스템은 서로 기구학적 연관성이 없으므로 케도 부시스템에 대한 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{M}' \dot{\mathbf{q}}' = \mathbf{Q}' \quad (2)$$

여기서 \mathbf{M}' , \mathbf{q}' , \mathbf{Q}' 는 각각 케도 부시스템의 질량 행렬, 일반 좌표, 힘 벡터를 나타낸다. 따라서 샤프 시스템과 각 케도 링크의 가속도는 수식 (1)와 (2)에 의해 각각 얻어진다.

3. 궤도링크와 노면과의 접촉이론

3.1 삼각패치를 이용한 궤도 시스템의 노면 모델링

궤도차량이 주행하는 지면은 강성지면(hard ground)과 연약지면(soft ground)으로 구분된다. 강성지면은 궤도차량의 주행시 지반이 변형되지 않는 지면으로 차륜과 지면 사이의 마찰계수에 의하여 견인력이 발생된다. 연약지면은 궤도차량이 주행할 때 지반이 파괴되어 변형되는 지면으로 견인력 작용시 슬립이 발생된다. 따라서 지면과의 상호작용을 규명하기 어렵기 때문에 삼각패치 이론을 적용하여 노면을 구성하였다. 삼각패치 요소에는 3 개의 노드와 하나의 수직단위벡터가 있다. Fig. 2 는 삼각패치로 이루어진 노면을 보여주고 있으며 삼각패치에 대한 평면의 방정식은 다음과 같다.

$$z = ax + by + c \quad (3)$$

3 개의 노드점 좌표를 수식 (3)에 대입하면 수식 (4)와 같이 쓸 수 있으며 수식 (5)을 이용하여 평면의 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} z_1 &= ax_1 + by_1 + c \\ z_2 &= ax_2 + by_2 + c \\ z_3 &= ax_3 + by_3 + c \end{aligned} \quad (4)$$

$$a = \begin{vmatrix} 1 & z_1 & y_1 \\ 1 & z_2 & y_2 \\ 1 & z_3 & y_3 \end{vmatrix}, b = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \end{vmatrix}, c = \begin{vmatrix} z_1 & x_1 & y_1 \\ z_2 & x_2 & y_2 \\ z_3 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \quad (5)$$

또한, 삼각패치의 수직 단위벡터 \hat{n}_k 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{n}_k = \pm \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \begin{Bmatrix} a \\ b \\ -1 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

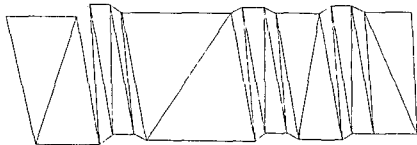


Fig. 2 Terrain Representation

3.2 궤도링크와 삼각패치의 접촉 알고리즘

궤도링크와 지면과의 상호작용은 매우 복잡하다. 접촉되는 면이 일정하지 않기 때문에 궤도링크는 지면과 불규칙적인 접촉형상을 가진다. 궤도시스템을 구성하는 궤도링크의 수가 많으므로 지면과 궤도링크와의 접촉은 면과 면의 유한 접촉이론이 흔히 사용된다. Choi⁽⁷⁾는 유한개의 접촉노드가 궤도링크의 접촉면에 분포하고, 각각의 요소마다 강성(stiffness)과 감쇠(damping) 값을 가진다고 가정하였다. 유한 접촉 노드로 구성된 요소의 사용은 궤도시스템의 동적 해석에 효율적이다. Fig. 3 은 삼각패치와 상호작용이 일어나는 궤도링크 위의 접촉점들을 도식적으로 보여주고 있다.

궤도링크 i 상의 접촉노드 j 와 삼각패치 k 와의 수직 거리 d_k^{ij} 는 다음과 같다.

$$d_k^{ij} = \mathbf{r}^{jp} \cdot \hat{\mathbf{n}}_k \quad (7)$$

여기서 \mathbf{r}^{jp} 는 삼각패치를 이루는 한 점에서 궤도링크의 접촉 노드점까지의 위치벡터이다.

궤도링크와 노면과의 접촉(contact)이 일어날 가능성이 있는 필요조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d_k^{ij} \leq 0 \quad (8)$$

즉, 수식 (8)로부터 삼각패치 평면과 접촉노드가 접촉이 일어나는지의 여부를 파악할 수 있다.

j 노드를 삼각패치 k 상의 평면에 투영한 접촉점 B 의 위치벡터 \mathbf{r}_B^{jk} 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

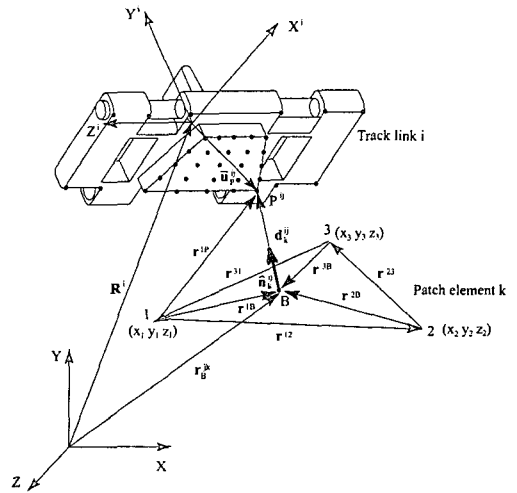


Fig. 3 Interaction between track shoe body and triangular patch element

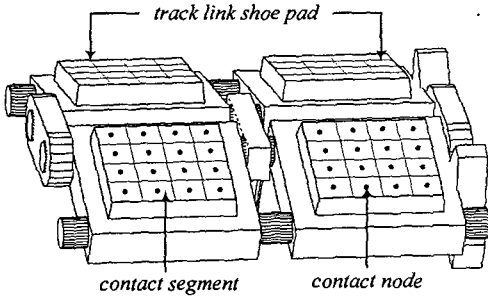


Fig. 4 Contact segment of track link shoe pad

$$\mathbf{r}_B^{jk} = \mathbf{R}^i + \mathbf{A}^i \bar{\mathbf{u}}_p^j - d_k^j \hat{\mathbf{n}}_k \quad (9)$$

여기서, \mathbf{R}^i 는 관성좌표계에 대한 궤도링크 i 의 위치벡터이며 \mathbf{A}^i 는 관성좌표계에 대한 지역좌표계의 회전 변형행렬, $\bar{\mathbf{u}}_p^j$ 는 지역좌표계에서 바라본 노드 j 의 위치벡터를 나타낸다. 다음으로는 삼각패치 평면 k 상의 투영된 접촉점 B 가 삼각패치 내에 존재하는지의 여부를 파악하기 위한 수식은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \mathbf{r}^{12} \times \mathbf{r}^{1B} \cdot \hat{\mathbf{n}}_k \geq 0 \\ \mathbf{r}^{23} \times \mathbf{r}^{2B} \cdot \hat{\mathbf{n}}_k \geq 0 \\ \mathbf{r}^{31} \times \mathbf{r}^{3B} \cdot \hat{\mathbf{n}}_k \geq 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \mathbf{r}^{12} \times \mathbf{r}^{1B} \cdot \hat{\mathbf{n}}_k \leq 0 \\ \mathbf{r}^{23} \times \mathbf{r}^{2B} \cdot \hat{\mathbf{n}}_k \leq 0 \\ \mathbf{r}^{31} \times \mathbf{r}^{3B} \cdot \hat{\mathbf{n}}_k \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

따라서 수식 (10)의 조건이 만족되면 j 노드는 삼각패치 k 와 접촉이 일어난다고 판단할 수 있으며 접촉량은 d_k^j 가 된다.

4. 노면과 궤도와의 Soil 접촉 모델링

4.1 다물체 궤도차량을 위한 Bekker's soil model

지면과 궤도링크와의 접촉은 Fig. 4와 같이 궤도링크의 슈 패드부분에서 이루어지며 이 접촉면을 유한한 수의 접촉분절들(contact segments)로 구성하였다.

궤도링크와 노면과의 상호작용은 접지압-침하와 전단응력-전단변위 관계로 구성된다. Bekker는 토양(soil)의 특성을 파악하기 위하여 베바메타 기법(bevameter technique)을 개발하였다. 그는 평판 침하시험(plate penetration test)을 통하여 접지압-침하에 대한 토양의 특성을 파악하였으며 전단시험(shear test)에 의하여 토양의 전단강도와 전단응력-전단변위 관계를 측정하였다.

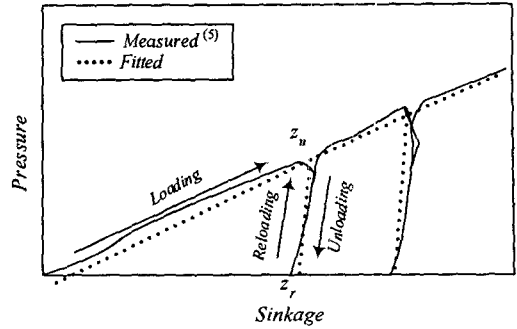


Fig. 5 Pressure-sinkage relationship with repetitive load

Fig. 5는 반복하중이 작용하는 접지압-침하 관계를 도식적으로 보여주고 있다. Bekker는 loading 구간에 대한 접지압-침하 관계식을 다음과 같이 제안하였다.

$$p(z) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \cdot z^n \quad (11)$$

여기서 p 는 접지압, b 는 사각 접촉면적의 폭, z 는 침하량, k_c 와 k_ϕ 는 각각 토양에 대한 특성 계수를 나타내며 n 은 토양의 변형지수를 의미한다. 반복하중이 작용하는 unloading과 reloading 구간에 대한 접지압-침하 곡선은 직선의 형태로 가정하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$p(z) = p_u - k_u(z_u - z) \quad (12)$$

여기서 p 는 접지압, z 는 침하, p_u 와 z_u 는 각각 unloading이 시작되는 지점에서의 접지압과 침하를 나타내며 k_u 는 unloading, reloading 구간에서의 기울기를 의미한다.

4.2 궤도링크와 노면에서의 전단응력 이론

Fig. 6은 접지압이 일정할 때 전단변위에 대한 전단응력을 보여주고 있다. Janosi-Hanamoto에 의해 제안된 전단응력-전단변위 관계식은 다음과 같다.

$$\tau(j, z) = (c + p \tan \phi)(1 - e^{-j/K}) \quad (13)$$

여기서 τ 는 전단응력, p 는 접지압, j 는 전단변위, c 는 토양의 점성(cohesion), ϕ 는 토양의 내부 마찰각, K 는 토양의 전단변형계수를 의미한다.

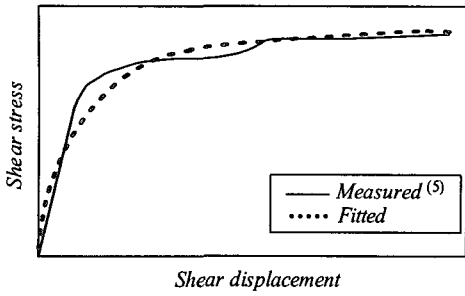


Fig. 6 Shear stress - shear displacement relationship

4.3 케도링크에 작용하는 일반화된 힘

반복하중이 작용하는 토양과 케도와의 상호 작용은 loading 구간, unloading/reloading 구간, reloading 후의 loading 구간으로 나눌 수 있으며 각각의 구간별로 작용하는 접지압과 전단응력은 다음과 같이 구분할 수 있다.

Case1 : loading 구간 ($z > z_p$)

$$p(z) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi\right) \cdot z^n \quad (11)$$

$$\tau(j, z) = (c + p \tan \phi)(1 - e^{-j/K}) \quad (13)$$

여기서 z 는 현재 time step에서의 침하이고 z_p 는 이전 time step에서의 침하이이다.

Case2 : unloading, reloading 구간 ($z_r < z < z_u$)

$$p(z) = p_u - k_u(z_u - z) \quad (12)$$

$$\tau(j, z) = (c + p \tan \phi)(1 - e^{-j/K}) \quad (13)$$

여기서 z_r 은 reloading 이 시작되는 침하를 나타내며 z 가 z_r 보다 작을때에는 접지압과 전단응력은 0이 된다.

Case 3 : reloading 후의 loading 구간 ($z > z_u$)

$$p(z) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi\right) \cdot z^n \quad (11)$$

$$\tau(j, z) = (c + p \tan \phi)(1 - e^{-j/K}) \quad (13)$$

위에서 얻어진 접지압과 전단응력으로부터 케도링크 i 의 접촉노드 j 와 삼각패치로 구성된 지면과의 접촉력은 다음과 같다.

Table 1 Characteristics of soil

Material Properties	Clayey soil	LETE sand
$k_c [N/m^{n+1}]$	13189.86	6940.01
$k_\phi [N/m^{n+2}]$	692159.33	505793.63
n	0.5	0.71
$c [N/m^2]$	4140	1150
$\phi [degree]$	13.0	31.5
$K[m]$	0.025	0.025

$$F_p^{ij} = p^{ij} \times area, \quad F_s^{ij} = \tau^{ij} \times area \quad (14)$$

$$\mathbb{F}^{ij} = F_p^{ij} \hat{n}_k + F_s^{ij} \hat{t}_k \quad (15)$$

여기서 F_p^{ij} 는 접지압에 의한 접촉력, F_s^{ij} 는 전단응력에 의한 접촉력, area는 접촉분절의 면적, \hat{n}_k 는 수직단위벡터, \hat{t}_k 는 접선벡터를 나타낸다. 케도 링크 i 에 작용하는 힘은 케도링크 i 의 접촉 노드들 j 에 대한 힘의 합으로 표현할 수 있으며 가상일(virtual work)을 이용한 일반화 된 힘 (generalized force)으로 표현할 수 있다. 케도링크 i 에 작용하는 가상일은 다음과 같다.

$$\delta W^i = \sum_{j=1}^n \delta W^{ij} = \sum_{j=1}^n \delta \mathbf{r}^{ijT} \mathbb{F}^{ij} \quad (16)$$

여기서, \mathbf{r}^{ij} 는 케도링크 i 의 좌표계에서 바라본 j 노드의 위치벡터를 나타낸다.

5. 수치예제 및 결과

본 모델에 사용된 노면은 Table 1과 같은 토양 속성을 적용하였다.⁽⁵⁾ 여기서 k_c 는 점성에 의한 토양 변형계수이고, k_ϕ 는 마찰에 의한 토양 변형 계수, n 은 토양 변형지수, c 는 토양의 점성, ϕ 는 토양의 내부 마찰각, K 는 토양의 전단 변형계수이다. Fig. 7은 LETE sand에 대하여 고기동 케도차량이 정지상태에서 10초동안 사시속도 10 km/h로 가속하였다가 다음 10초동안 사시속도 10 km/h로 등속 주행하는 시뮬레이션에 대한 수치적 결과를 보여주고 있으며 특정 케도링크 하나에 작용하는 접지압-침하에 대한 그래프이다. 케도링크와 지면의 접지압-침하 곡선은 지면과의 침하가 증가할수록 접지압도 증가하고 있으며 반복하중에 의한 결과가 실험적 결과⁽⁵⁾와의 경향과 잘 일치함을 알 수 있다.

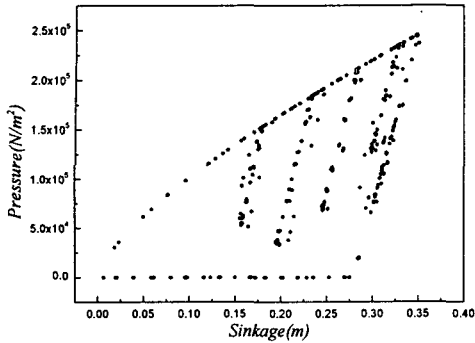


Fig. 7 Pressure-sinkage at chassis velocity 10 km/h

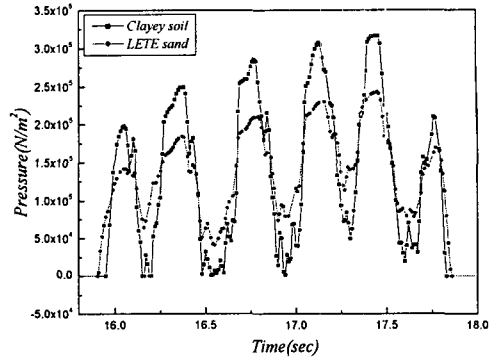


Fig. 10 Pressure distribution on Clayey soil and LETE sand

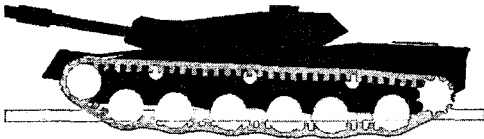


Fig. 8 Tracked vehicle animation on soft soil

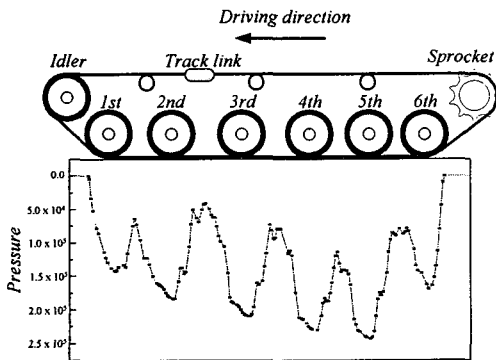


Fig. 9 Pressure distribution around road wheels

Fig. 9 는 LETE sand 에서 차속 10 km/h 로 등속주행하는 시나리오에 대한 접지압 분포를 보여주고 있으며 Fig. 8 은 주행할 때의 고기동 궤도 차량의 그림을 보여주고 있다. Fig. 9 로부터 차량의 접지압은 차시 pitching 운동에 의해 스프로킷에 가까워지는 로드휠 아래에서의 접지압이 상대적으로 커진다는 것을 알 수 있다. 6 번째 로드휠 아래에서는 스프로킷 구동으로 6 번째 로드휠과 스프로킷 사이의 궤도장력이 증가하며 이로 인하여 상대적으로 작은 접지압을 나타낸다.

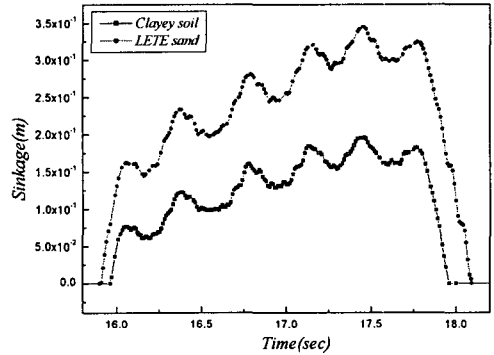


Fig. 11 Sinkage distribution on Clayey soil and LETE sand

Fig. 10 와 11 은 차량속도가 10 km/h 로 등속 주행하고 Clayey soil 과 LETE sand 노면에서의 특정 궤도링크에 작용하는 시간에 따른 접지압, 침하 분포를 보여주고 있으며 시간에 따른 6 개의 봉우리는 1 번부터 6 번 로드휠이 특정 궤도 링크를 지나감을 보여주고 있다. Fig. 10 을 통하여 주행방향에 대하여 궤도링크가 지면과 접촉을 하지 않을 경우에 접지압이 0 이 되며 접촉을 할 경우에 로드휠 아래에서는 접지압이 증가하고 로드휠과 로드휠 사이의 구간에 위치할 때 접지압은 감소함을 알 수 있다. LETE sand 에서의 접지압은 Clayey soil 과 비교하여 로드휠 아래에서의 접지압은 낮지만 로드휠과 로드휠 사이에서의 접지압은 상대적으로 높다는 것을 알 수 있다. 또한, 각각의 토양에 대하여 접지압에 궤도 링크의 면적을 곱하면 차량의 자중을 지탱하는 힘이 되므로 접지압의 시간에 대한 적분 값은 토양의 종류에 관계없이 일정함을 알 수 있다. Fig. 11 은 10 km/h 로 등속 주행시 특정

궤도 링크에서 작용하는 침하로 LETE sand 의 침하가 Clayey soil 에서의 침하보다 많이 일어남을 보여주고 있다. Fig. 10 과 Fig. 11 의 시뮬레이션 결과로부터 접지압은 Clayey soil 에서 크게 나타났지만 침하는 LETE sand 에서 크게 나타남을 알 수 있다. 즉, LETE sand 에서의 침하가 Clayey soil 에서의 침하보다 컸지만 Bekker 가 제안한 수식 (11)에서 Clayey soil 에 대한 k_c , k_ϕ 값이 LETE sand 보다 크기 때문에 접지압은 LETE sand 보다 Clayey soil 에서 크게 나타났다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12 는 고기동 궤도차량이 사시속도 10 km/h 로 등속 주행하는 시뮬레이션에서 특정 궤도 링크에 작용하는 침하에 대한 접지압 관계를 보여주고 있다. 같은 침하에 대하여 접지압은 Clayey soil 에서 크게 나타나고, 같은 접지압에 대하여 침하는 LETE sand 노면에서 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 13 과 Fig. 14 는 Janosi-Hanamoto 의 전단응력-전단변위 이론을 이용하여 사시속도 10km/h 로 등속 주행시 토양의 유형에 따라 특정 궤도링크 하나에 대하여 작용하는 전단응력-전단변위 그래프이다. 접지압은 LETE sand 보다 Clayey soil 에서 크게 나타났지만 전단응력은 전단응력-전단변위의 수식(13)에서 c , ϕ 와 j 의 영향으로 Fig. 10 의 접지압 경향과는 달리 LETE sand 에서 Clayey soil 보다 전단응력이 크게 나타났다. LETE sand 에서 등속 주행하는 궤도차량의 주행방향에 대한 전단응력과 전단변위를 살펴보면 Fig. 14 과 같고 접지압이 일정한 상태에서의 전단변위와 전단응력의 관계를 보여주는 Fig. 6 과는 다른 경향을 나타내고 있는데 이는 전단응력이 접지압과 전단변위의 함수가 되기 때문이다.

Fig. 15 는 초기장력(pre-tension) 3 톤과 8 톤에 대하여 궤도차량이 10 초동안 사시속도 50 km/h 로

등속 주행하는 상태에서의 궤도 링크의 접지압을 각각 보여주고 있으며 이 때 초기 장력은 아이들러 암(idler arm)의 길이로부터 장력을 조절하였다. 궤도차량의 초기장력이 높을수록 로드휠 아래에서의 접지압은 상대적으로 낮아지고 로드휠과 로드휠 사이에서의 접지압은 상대적으로 커짐을 확인할 수 있다.

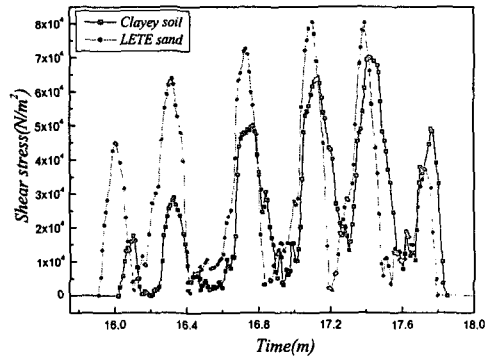


Fig. 13 Shear stress on Clayey soil and LETE sand

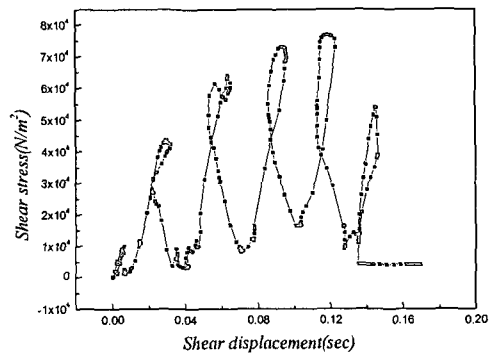


Fig. 14 Shear stress-shear displacement on LETE sand

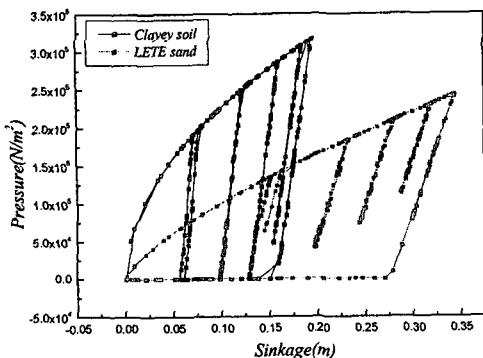


Fig. 12 Pressure-sinkage on Clayey soil and LETE sand

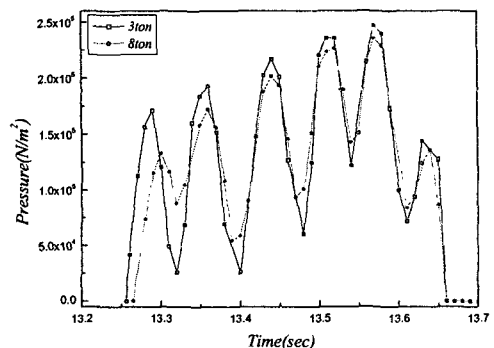


Fig. 15 Pressure distribution with respect to track tension

6. 결론

각각의 궤도링크를 부싱힘 요소들로 연결된 강체로 모델링하고 노면과 접촉이 일어나는 궤도 슈패드를 사각패치로 분할(mesh)하여 대규모 고기동 궤도차량 모델에 Bekker 의 정적 침하 토양이론 (static sinkage soil theory)을 적용시켜 보았다.

주행상태에서의 접지압-침하, 전단응력-전단 변위, 노면과 궤도에 작용하는 접지압 분포의 경향이 잘 일치함을 알 수 있었으며 그 유용성을 확인하였다. Bekker 의 접지압-침하의 이론을 적용하여 각각 궤도링크와 지면과의 상호작용을 현수선이 아닌 궤도링크 관점에서 처음으로 규명하였고, 접지압과 침하의 관계를 산출한 후 일반화된 힘으로 환산함으로써 연약지반에서의 궤도차량의 주행성능 예측이 가능해졌다.

본 연구에서는 정적 침하 토양 이론을 적용하고 있으나 향후 토양의 동적 침하 특성까지 고려한 연구가 수행되어져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 국방과학프로젝트 ‘적정 궤도장력결정 및 성능평가’로 이루어졌으며 국방과학연구소 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Wills, B. M. D., 1963, "The Measurement of Soil Strength and Deformation Moduli and a Comparison of the Actual and Theoretical Performance of a Family of Rigid Tracks," *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 8, No. 2, pp. 115~131.
- (2) Bekker, M. B., 1969, "Introduction to Terrain-Vehicle Systems," University of Michigan Press.
- (3) Rowland, D., 1972, "Tracked Vehicle Ground Pressure and Its Effect on Soft Ground Performance"

- in Proc. 4th Int. Conf. of the International Society for Terrain-Vehicle systems*, Vol. I, Stockholm, Sweden.
- (4) Garber, M. and Wong, J. Y., 1981, "Prediction of Ground Pressure Distribution Under Tracked Vehicles-I. An Analytical Method for Predicting Ground Pressure Distribution", *Journal of Terramechanics*, Vol. 18, No. 1, pp. 1~23.
 - (5) Wong, J. Y., 2001, "Theory of Ground Vehicles," 3rd Ed. John Wiley&sons.
 - (6) Park, W. Y. and Lee, K. S., 1998, "Development of Tractive Performance Prediction Model for Flexible Tracked Vehicles," Ph.D. SungKyunKwan University.
 - (7) Choi, J. H., 1996, "Use of Recursive and Approximation Methods in The Dynamic Analysis of Spatial Tracked Vehicle," Ph.D. Thesis, The University of Illinois at Chicago.
 - (8) Ryu, H. S., Bae, D. S., Choi, J. H. and A. Shabana, 2000, "A Compliant Track Model For High Speed, High Mobility Tracked Vehicle," *International Journal For Numerical Methods in Engineering*, Vol. 48, pp. 1481~1502.
 - (9) Ryu, H. S., 2004, "Investigation of the Dynamic Tension and Behavior for Three Dimensional High Mobility Tracked Vehicles," Ph.D. Thesis, Hanyang University.
 - (10) Ryu, H. S., Huh, K. S., Choi, J. H. and Bae, D. S., 2003, "Development of A Multibody Dynamics Simulation Tool for Tracked Vehicles, Part I : Efficient Contact and Nonlinear Dynamic Modeling," *JSME International Journal*, Series C, Vol. 46, No. 2, pp. 540~549.
 - (11) Choi, J. H., Ryu, H. S. and Bae, D. S., 1999, "A Compliant Double Pin Track Link Model For Multibody Tracked Vehicles," *Proceedings of DETC'99, 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences, September 12-16, Las Vegas, Nevada, USA, DETC99/VIB-8199*.
 - (12) Choi, J. H., Park, D. C., Ryu, H. S., Bae, D. S. and Huh, G. S., 2001, "Dynamic Track Tension of High Mobility Tracked Vehicles," *Proceedings of DETC'01, ASME 2001 Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference, September 9-12, Pittsburgh, PA, USA, DETC2001/VIB-21309*.