

궤도차량의 야지기동성 평가와 토질특성의 영향

Off-Road Tractive Performance of Tracked Vehicles and the Effects of Soil Parameters

김 진 우*
J. W. Kim

ABSTRACT

The off-road tractive performance of tracked vehicles can be evaluated in terms of soil thrust, motion resistance and drawbar pull. The ability to predict accurately ground pressure distribution under track is of importance since the vehicle sinkage and motion resistance are closely related to it. While the formulation of the method for predicting ground pressure distribution follows closely in spirit the ideas outlined for the terrain with linear pressure-sinkage relation case by Garber and Wong, the analysis of various terrain stiffness is magnified by numerical implementation procedure. The effects of soil parameters on tractive forces can be introduced through the terrain-track interaction such as pressure-sinkage and shearing characteristics. It is illustrated by determining the drawbar pull-slip relation and corresponding ground pressure distribution for the terrains typically chosen and by comparing the results with the conventional ones based on nominal ground pressure. The factorial experiment method is finally adopted for checking the sensitivity of the values of soil parameters on the drawbar pull.

기 호 설 명

C : 토질의 점착력

F : 토질추력

F_d : 순수견인력

K : 수평전단변형계수

k_c : 점착변형계수

k_f : 마찰변형계수

L : 궤도의 접지길이

N : 한쪽 궤도륜의 수

R : 운동저항력

W : 궤도차량의 무게

b : 궤도폭

i : 미끄럼율

$2l$: 인접 궤도륜의 중심간 거리

n : 압력침하지수

r : 궤도륜의 반경

s : 최대 침하 깊이

z_m : 최소 침하 깊이

Π : 궤도 접지길이의 변화량¹⁾

ϕ : 토질의 마찰각

φ : 궤도륜 원주의 각도좌표

* 정회원, 육군사관학교 기계공학과

φ_s : 지면접촉각
 - : 무차원 변수¹⁾

1. 서 론

야지(off-road)에서 궤도차량의 기동성은 도로주행(on-road)의 경우와 달리 지반 및 토질조건이 제한요소로 작용함은 주지의 사실이다. 도로주행에서는 궤도차량의 동력전달장치를 포함하는 각종 기계적 시스템의 운동, 동역학 내지는 주행역학적 관점에서 기동성을 규명, 그 성능을 평가할 수 있는데 반해 야지에서는 기본적으로 흙과 궤도와 의 상호작용에 따른 제반거동을 Terramechanics 적 관점에서 체계적으로 규명하고 정립할 때만이 가능하다. 궤도차량의 Terramechanics 적 기동거동은 흙에 대한 추력과 운동저항력으로 정의할 수 있으며 이 두 힘들의 차이는 순수견인력의 향으로 나타내어 기동성능 평가에 주요 요소로 사용된다. 여기서 토질추력은 흙의 전단강도, 전단변위와 연관된 트랙의 미끄럼을 및 궤도차량의 각종 설계정수들의 함수로서, 주행되는 흙의 점착력과 전단마찰각 등이 포함되는 전단응력-변위특성으로부터 결정되며, 기동에 제한을 주는 주요 운동저항력으로는 compaction 및 bulldozing 저항력이 있고 특히 침하(sinkage)에 따른 compaction 저항력의 평가는 지반의 침하-접지압의 거동규명이 요구된다. 전통적으로 궤도차량의 무게를 접지면적으로 나눈 공칭접지압(Nominal Ground Pressure)이 기동성 평가의 설계인자로 사용되어 왔으나, 고도의 기동성을 위해 짧은 피치의 트랙과 큰 직경의 궤도륜으로 설계된 경우에는 접지압의 분포가 균일하지 않으므로 이로 인한 오차의 발생을 배제할 수 없다. 따라서 궤도차량의 야지기동성 평가에는 차량의 여러 설계상수들과 토질인자들의 영향을 고려한 접지압력의 분포에 대한 연구가 필요하게 된다. Garber와 Wong^{1,2)}은 지반의 압력-침하관계와 차량의 현수장치를 포함한 주요 설계상수들을 고려하는 궤도와 지반의 상호작용에 대한 해석을 통해 정역학적인 압력분포를 예

측할 수 있는 이론적 모델을 확립하였지만 그 실행은 토질의 압력-침하관계가 선형인 경우로 제한되었다.

본 연구는 Garber와 Wong의 압력분포이론을 기본으로 비선형 압력-침하관계를 포함하여 다양한 토질의 경우에 적용할 수 있는 압력분포 예측의 수치모델을 확립하고, 대응되는 기동력을 공칭접지압의 경우와 비교 검토하였다. 또한 기동력 산정을 위한 각종 토질인자들의 측정 평균값이나 인자들의 상관 관계를 통한 추정치의 신뢰성 검토를 위해 일정구간 다변량 회귀해석법(factorial experiment method)³⁾을 사용하였다. 끝으로 지반강도를 달리하는 4종류의 토질에 대해 압력분포 및 기동력을 계산하였다.

2. 견인력 평가

순수견인력 F_d 는 토질추력 F 와 운동저항력 R 의 차로 나타낸다. 이때 토질추력은 전단응력 분포를 궤도 접지면에 대해 적분하여 구하고, 침하에 따른 compaction 운동저항력은 접지압력분포를 최대 침하까지의 적분에 의해서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_d = F - R \tag{1}$$

$$F = 2b \int_0^L \tau(x) dx \tag{2}$$

$$R = 2b \int_0^p p(z) dz \tag{3}$$

여기서 토질의 전단변형거동에 대한 전단응력-변위의 관계와, Bekker의 제안식에 따른 압력-침하의 관계⁴⁾는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau(x) = [C + p(x) \tan \phi] \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-ix}{K}\right) \right\} \tag{4}$$

$$p(z) = k \cdot z^n, \quad k = \left(\frac{k_c}{b} + k_f \right) \tag{5}$$

따라서 토질추력의 계산을 위해 지반에 대한 궤도의 접지압력분포, $p(x)$ 에 대한 해석이

필요하게 된다.

Garber 와 Wong의 모델에서 궤도차량의 정역학적인 압력분포는 궤도와 지반의 상호작용에 대한 관계식들로 해석되며, 궤도는 Fig. 1과 같이 궤도륜과 지면을 동시에 접촉하는 부분과 지면만을 접촉하는 부분으로 구분된다.

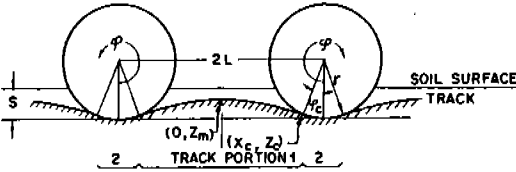


Fig.1 Shape of the deflected track between two road wheels

이때 동시에 접촉하는 경우에 대한 궤도의 형상은 아래와 같이 궤도륜의 곡선형태로 나타낸다.

$$z_1(\varphi) = r(\cos \varphi - 1) + s \quad (6)$$

또한 지면만을 접촉하는 부분에 대한 비선형 함수식은 궤도 장력에 대한 수평(H) 방향 성분의 미분식과 지반의 압력-침하의 관계식(5)으로부터 다음과 같이 나타낸다.

$$z_2(z) = x_m \pm \frac{\sqrt{r^{n+1}}}{\nu} \int_{z_m}^z \frac{1}{\sqrt{z^{n+1} - z_m^{n+1}}} dz \quad (7)$$

$$\nu = \sqrt{\frac{2kr^{n+1}}{(n+1)H}}$$

위의 궤도 형상에 대한 식(6, 7)들을 이용하여 궤도와 궤도륜의 접촉 조건과 차량하중에 대한 평형조건 그리고 궤도륜과 지지륜의 현수스프링에 대한 추가압축과 변형 및 전체 궤도길이의 일정 조건을 만족하는 관계식들을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{z_m}^{\bar{z}_c} F(\bar{z}, \bar{z}_m) dz - \nu(\bar{l} - \sin \varphi_c) = 0 \quad (8)$$

$$(N-1) \left[2 \tan \varphi_c + \int_0^{\varphi_c} \bar{f}(\varphi, \nu, \bar{s}) d\varphi \right] + \int_0^{\varphi_c} \bar{f}(\varphi, \nu, \bar{s}) d\varphi - \bar{W} = 0 \quad (9)$$

$$2(N-1) \left[\frac{1}{\nu} \int_{z_m}^{\bar{z}_c} \sqrt{\nu^2 + F^2(\bar{z}, \bar{z}_m)} d\bar{z} + \varphi_c - \bar{l} \right] + \bar{W} = 0 \quad (10)$$

여기서 F 와 f 는 다음과 같이 정의된다.

$$F(\bar{z}, \bar{z}_m) = \frac{1}{\sqrt{\bar{z}^{n+1} - \bar{z}_m^{n+1}}} \quad (11)$$

$$\bar{f}(\varphi, \nu, \bar{s}) = (n+1) \nu^2 (\cos \varphi - 1 + \bar{s})^n \cos \varphi$$

식(8~10)의 해로서 최대 침하의 깊이, s 와 최소 침하의 깊이, z_m 및 두 궤도형상의 연결점 깊이, z_c 가 구해지며, 궤도와 궤도륜의 접촉 조건으로부터 연결점의 수평위치, x_c 와 전후방 궤도륜의 지면접촉각, φ_s 그리고 무차원변수값 ν 가 계산된다.

본 연구에서는 Gaussian Quadrature의 수치적분법과 Quasi-Newton비선형 방정식 해법을 사용하였으며 해의 수렴을 위한 초기치는 $n=1$ 인 경우 즉, 지반의 압력-침하 관계가 선형인 경우의 해로부터 선정하여 사용하였다. 궤도차량의 순수견인력 F_d 의 평가에서 토질추력은 위치변위 x 에 대한 전단응력 분포의 궤도 접지면에 대한 적분으로 나타나고, 운동저항력은 접지압력 분포를 최대 침하량까지 적분하여 구하므로 견인력을 계산하기 위해서는 지반에 대한 접지압력 분포의 해를 구하여 위치변위 x 에 대한 함수로 나타내야 한다. 따라서 식(5)를 이용하여 궤도상의 위치좌표, x 에 따른 압력을 구하기 위해 궤도륜과 지면을 동시에 접촉하는 부분의 궤도 형상에 대한 침하, z 와 위치좌표 x 의 관계식은 식(6)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_1(x) = \sqrt{r^2 - (l-x)^2} - r + s \quad (12)$$

같은 방법으로 전, 후방 궤도륜의 축 중심선 바깥쪽의 관계는 축의 중심을 x 좌표의 원점으로 할때 아래와 같이 구할 수 있다.

$$z_3(x) = \sqrt{r^2 - x^2} - r + s \quad (13)$$

궤도륜과 궤도륜 사이의 관계식은 식(7)로부터 $n=1$ 인 경우 침하 z 를 x 에 대한 함수식

으로 나타낼 수 있으나, $n \neq 1$ 인 경우에는 수치적분값을 구해야 하므로, 본 연구에서는 짐하 z 에 대한 x 의 해를 구해 조합을 구성하여 Polynomial Curve Fitting을 하였으며 사용된 식은 다음과 같다.

$$z_2(x) = z_m \cos h\left(\frac{\nu}{r} \cdot x\right) \quad n=1 \text{인 경우}$$

$$z_2(x) = c_1 \cos h(\sigma \cdot x) + \sum_{j=2}^{15} c_j \cdot x^j \quad n \neq 1 \text{인 경우} \quad (14)$$

$$\sigma = \frac{1}{x_c} \cos h^{-1}\left(\frac{z_c}{z_m}\right)$$

위의 식(12~14)를 이용하면 궤도상의 구간별 압력분포를 위치변위, x 에 대하여 구할 수 있으므로 토질추력, F 와 운동저항력, R 의 계산을 위한 적분은 식(2)와 식(3)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = 4b \left\{ (N-1) \left[\int_0^{x_c} \tau_1(x) dx + \int_{x_c}^l \tau_2(x) dx \right] + \int_0^{r \sin \theta_c} \tau_3(x) dx \right\} \quad (15)$$

$$R = \frac{2bk}{n+1} s^{n+1} \quad (16)$$

여기서 τ_1, τ_2, τ_3 는 궤도접지면의 전단응력 분포로 식(12~14)와 식(5)를 이용하여 식(4)로 나타낸 것이다. 따라서 토질추력 F 는 궤도차량의 설계상수와 함께 토질의 강도정수 c, ϕ, K 와 토질정수 k_c, k_f, n 의 함수이며, 운동저항력 R 은 설계상수와 토질정수의 함수임을 알 수 있다.

3. 토질인자의 영향 분석

각 토질인자값들은 측정치의 분포 범위에서 그 중심값과 변화폭을 이용하여 -1 과 $+1$ 사이의 값을 갖는 변수인자로 나타낼 수 있다.

즉,

$$X_{(\text{factor})} = \frac{\text{토질인자값} - \text{중심값}}{0.5 \times \text{변화폭}} \quad (17)$$

변수인자의 단위크기가 결과에 미치는 효과는 서로 독립적이라는 가정하에 변수인자들의 조합을 구성하여 각각의 경우에 대한 결과를 구하고 Multiple Linear Regression Analysis를 통해 결과에 대한 인자들의 새로운 함수관계를 나타냄으로써 알아볼 수 있다. 조합형의 구성은 예를 들어 독립변수가 3개이며 각 변수의 최대값과 최소값을 이용할 경우 Table 1과 같이 2^3 개로 이루어진다.

Table 1 Three-factor, 2^3 , factorial design

Run No.	Level of factor		
	X_1	X_2	X_3
Y_1	-1	-1	-1
Y_2	+1	-1	-1
Y_3	-1	+1	-1
Y_4	+1	+1	-1
Y_5	-1	-1	+1
Y_6	+1	-1	+1
Y_7	-1	+1	+1
Y_8	+1	+1	+1

따라서 각 토질인자값들은 측정치 분포범위에서 최대값과 최소값을 택하여 2^6 개의 조합형을 구성하여 견인력에 대한 계산결과를 구한 다음, 견인력을 토질 변수인자 분포범위에서의 새로운 선형함수관계로 나타낼 수 있으며 그 모델은 다음과 같다.

$$F_d = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_5 + a_6 X_6 \quad (18)$$

윗식에서 X 는 견인력 F_d 의 변수인자로 토질인자의 최대값은 $+1$, 최소값은 -1 로 표시되며, 각 토질인자에 대한 parameter, a 를 구하기 위한 normal equations의 matrix 형태를 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} m & \Sigma X_1 & \dots & \Sigma X_6 \\ \Sigma X_1 & \Sigma X_1^2 & \dots & \Sigma X_1 X_6 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \Sigma X_6 & \Sigma X_1 X_6 & \dots & \Sigma X_6^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ a_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Sigma Y \\ \Sigma X_1 Y \\ \cdot \\ \cdot \\ \Sigma X_6 Y \end{pmatrix} \quad (19)$$

여기서 다루어지는 변수인자들은 -1과 +1의 값을 갖게 되므로 견인력에 대한 변수인자들의 조합형으로 구성된 factorial running을 좌측의 matrix는 오직 대각선항만이 존재하게 되고 다음과 같이 간단하게 parameter들을 구하게 된다.

$$a_{(factor)} = \frac{\sum X \cdot Y}{\sum X^2} \quad (20)$$

따라서 식(18)에서 parameter값의 크기를 비교함으로써 측정치의 분포범위에서 각 토질의 변수인자에 따른 견인력의 변화를 예측할 수 있고, 또한 주요 토질인자의 결정과 그 영향을 분석할 수 있다.

4. 결 과

본 연구에서는 지반강도의 측면에서 비교적 마찰각이 큰 토질과 마찰각이 작은 토질을 각각 2개소씩 선정하여 궤도차량의 기동성을 평가하였으며 각 지역의 토질인자들은 Table 2와 같다. 토질인자의 추정분포는 공히 대표값으로부터 ±10%의 범위에 대하여 평가하였으며 계산에 사용된 궤도차량의 설계상수는 Table 3과 같다.

1) 접지압력 분포

압력분포는 한 궤도륜을 기준으로 궤도와 궤도륜이 동시에 지면과 접촉된 부분과 궤도부분만 지면과 접촉된 두 부분으로 구분하여 궤도륜의 축 중심선에서 대칭되게 계산되었다.

Table 2 Terrain values⁵⁾

Terrain	함수비 (%)	n	k_c kN/m ⁿ⁺¹	k_f kN/m ⁿ⁺²	c kN/m ²	ϕ deg.	K cm
Dry Sand	0	1.1	1.0	1,528.43	1.04	28	2.0
Sand Loam(Silt)	15	0.7	5.27	1,515.04	1.72	29	1.5
Clayey soil(Cohesive soil)	55	0.7	16.03	1,262.53	2.07	10	1.0
Lean Clay	32	0.15	1.52	119.61	13.79	11	0.8

Table 3 Design parameters of the track system

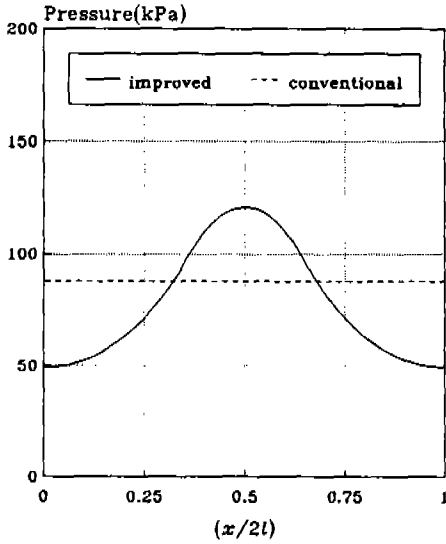
Weight of the vehicle	514 kN
Width of the track	0.65 m
Distance between the centers of the front and rear road wheels	4.50 m
Radius of the road wheel	0.35 m
Number of the road wheels	7
Angle of approach of the track	45°
Angle of departure of the track	35°
Vertical distance between the centers of the tensioning and road wheels	0.525 m
Radius of the sprocket	0.28 m
Radius of the tensioning wheel	0.30 m
Combined stiffness of the suspension springs of the one track	1,500 kN/m
Stiffness of the track tensioning device spring	1,000 kN/m
Weight of the track per unit track length	1.2 kN/m
Number of supporting rollers	4
Initial track tension per unit width of the track	44 kN/m

Fig.2는 선정된 4개소의 압력분포를 공칭접지압과 비교하여 각각 도시하였고, Fig.3은 침하의 크기를 도시하였다. 궤도차량의 접지압력분포와 침하에 영향을 주는 주요 토질인자는 마찰변형계수, k_f 와 침하지수 n 으로 일정한 n 의 값에서는 k_f 가 클수록, 반면 일정한 k_f 의 값에서는 n 이 작을수록 최대와 최소

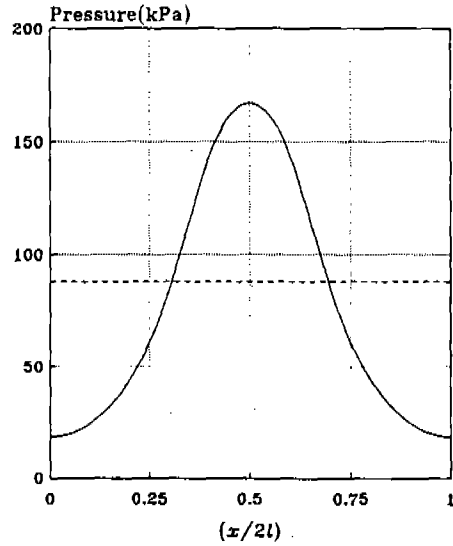
의 압력차가 커짐을 알 수 있다. 최대 접지압력은 공히 궤도륜의 축 중심선에서 발생하나 Lean Clay의 경우 공칭접지압 87.86 kPa 보다 작은 값을 가짐을 알 수 있다.

2) 순수견인력

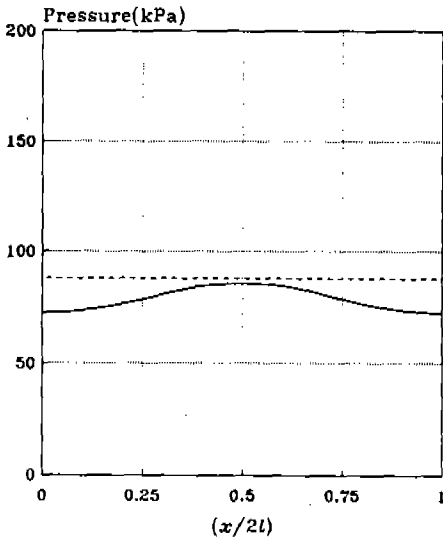
Fig.4는 계산된 순수 견인력을 미끄럼율의 함수로 도시하였고 이때 공칭접지압에 의한 순



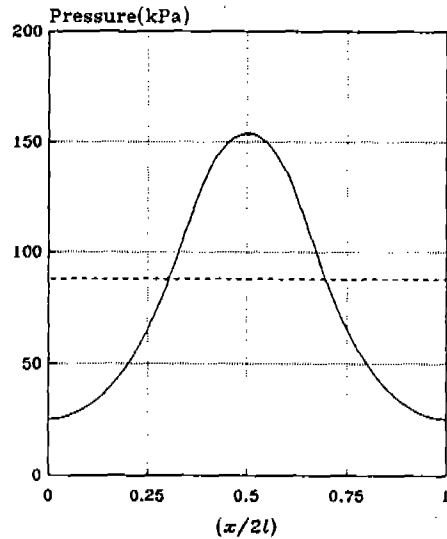
Dry Sand



Sand Loam (Silt)



Lean Clay



Clayey soil (Cohesive soil)

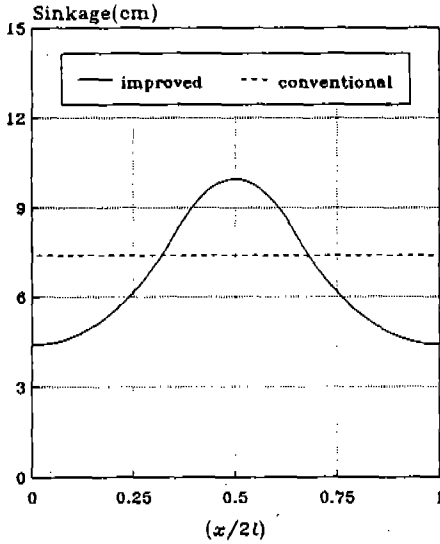
Fig.2 Predicted normal pressure under the track

수견인력 값도 계산하여 비교하였다. 공칭접지압에 의한 순수견인력값이 압력분포에 의한 값을 초과함을 알 수 있으나, Lean Clay의 경우에는 공칭접지압에 의한 침하가 압력분포에 의한 침하보다 크기 때문에 compaction 저항력의 영향이 크게 작용하여 압력분포에 의한 값보다 작게 나타남을 알 수 있다. 공칭접지압의 경우 미끄럼을 20% 미만에서 점근적(asymptotic) 견인력 값을 가지나 압력분포

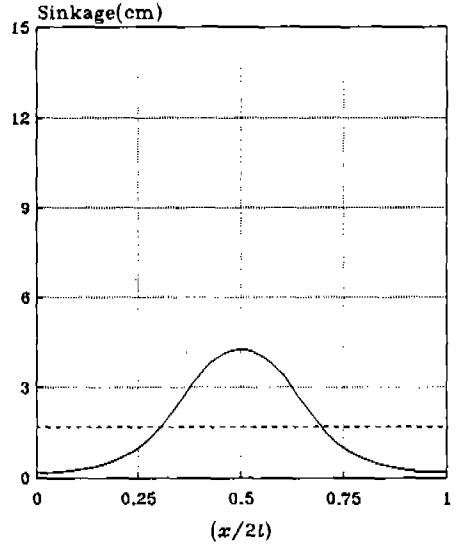
를 이용한 경우 이보다 큰 미끄럼을 30~40%에서 점근적임을 볼 수 있다.

3) 토질인자의 영향

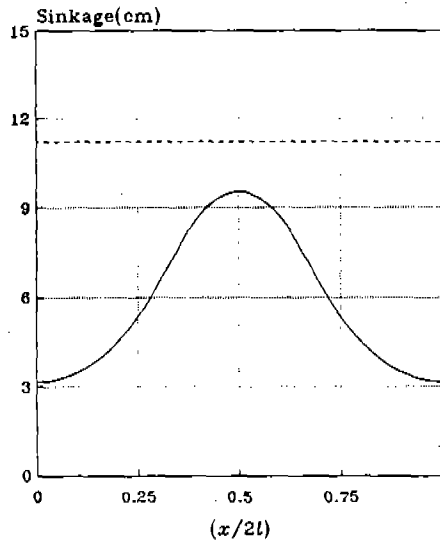
선정된 야지에 대한 궤도차량의 견인력을 토질인자의 $\pm 10\%$ 분포 범위에서 새로운 선형 함수관계로 나타낼 경우 각각의 토질인자에 대한 parameter 값은 20%의 미끄럼율에서 Table 4와 같이 계산되었다. 여기서 parameter 값의 크기는 변수인자의 단위크기, 즉 토질인자 분



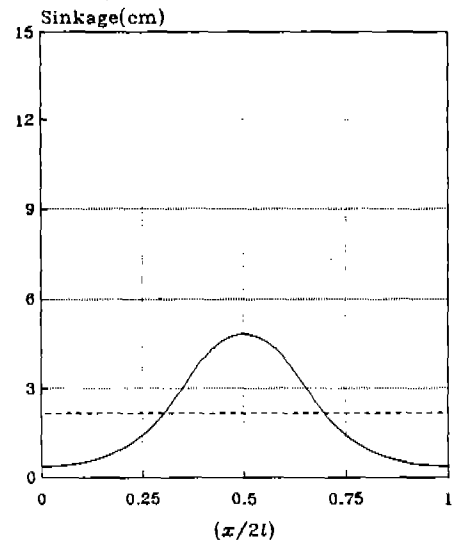
Dry Sand



Sand Loam(Silt)



Lean Clay



Clayey soil(Cohesive soil)

Fig.3 Predicted sinkage under the track

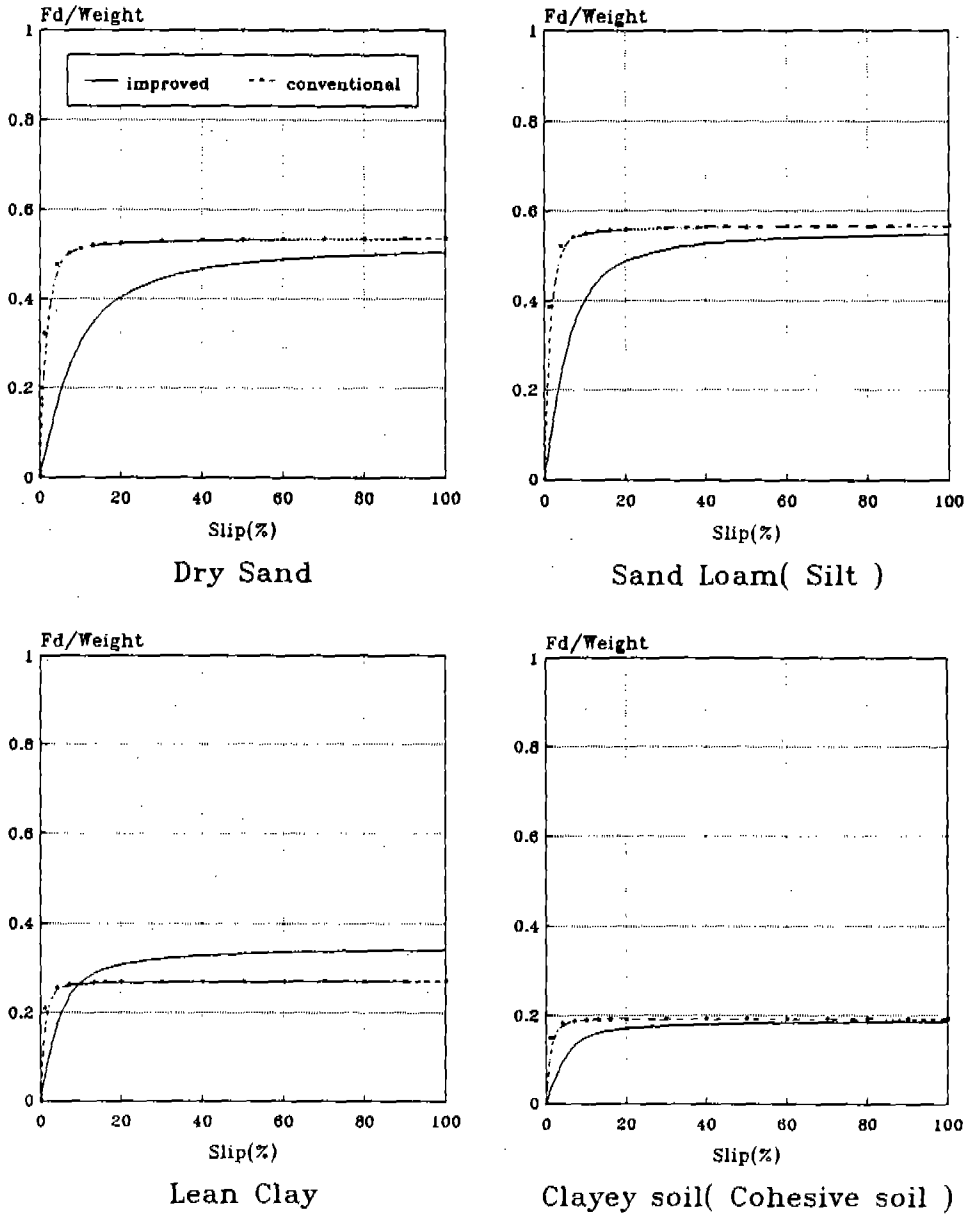


Fig.4 Predicted drawbar performance of the track system

Table 4 Results of factorial running

Terrain	a_0 (kN)	a_1 (ϕ)	a_2 (c)	a_3 (K)	a_4 (n)	a_5 (k_r)	a_6 (k_f)
Dry Sand	210	+25.0	+0.5	-6.2	-2.4	0	+1.2
Sand Loam(Silt)	250	+29.5	+0.9	-4.1	-0.8	0	+0.2
Clayey soil(Cohesive soil)	88	+ 8.4	+1.1	-1.0	-0.6	0	+0.2
Lean Clay	158	+ 9.1	+8.0	-2.1	-0.7	0	+1.8

포의 중심값에서 최대값 혹은 최소값으로의 변화에 따른 견인력의 변화량을 의미하며, 토질 인자의 값이 증가함에 따라 +부호는 견인력이 증가함을 나타내고 -부호는 감소를 나타낸다. 계산결과로부터 각 토질인자의 $\pm 10\%$ 분포범위에서 견인력은 토질에 따라 약 $\pm 12\% \sim \pm 17\%$ 의 변화폭을 나타낼 수 있으며, 견인력에 영향을 주는 주요 토질인자는 마찰각과 접착력임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 야지에서 궤도차량의 기동성을 토질추력과 운동저항력으로 정의하고 지반의 전단응력-변위 및 압력-침하 관계식에서 토질 특성 상수가 도입되었다. 기동성 평가를 위해 제시된 궤도의 압력분포 모델은 기존의 공칭 접지압 대신 지반의 강도에 따른 압력-침하의 특성은 물론 궤도의 다양한 설계상수, 궤도장력, 궤도륜의 배열 및 현수장치의 특성이 고려된 짧은 피치, 큰 직경의 고속 궤도차량에 적합되도록 구성되었다. 지반강도를 달리 하는 4종류의 토질에 대한 압력분포 및 대응되는 기동력이 계산되고 공칭접지압의 경우와 비교되었다. 토질인자의 추정치에 대하여 일정구간 다변량 회귀해석법으로 민감도를 해석하여 기동력 산정의 신뢰성을 검토하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원과 제(D890002ED)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. M. Garber and J.Y. Wong, "Prediction of ground pressure distribution under tracked vehicles, Part I. An analytical method for predicting ground pressure distribution", *Journal of Terramechanics*, Vol. 18, No. 1, 1981.
2. M. Garber and J.Y. Wong, "Prediction of ground pressure distribution under tracked vehicles, Part II. Effects of design parameters of the track-suspension system on ground pressure distribution", *Journal of Terramechanics*, Vol. 18, No. 1, 1981.
3. G.E. Dieter, "Engineering Design, A Material & Processing Approach", McGraw-Hill, New York, NY, 1983.
4. M.G. Bekker, "Introduction to Terrain-Vehicle System", University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1969.
5. J.Y. Wong, "Theory of Ground Vehicles", John Wiley & Sons, New York, NY, 1978.