

궤도의 측면 토양추진력 예측을 위한 수학적 모델

Mathematical model for predicting the soil thrust from the sides of track

황철연*	이규승*	박원엽*
정회원	정회원	정회원
C.Y.Hwang	K.S.Lee	W.Y.Park

1. 서론

일반적으로 그라우저의 역할은 궤도차량이 전진할 때 토양 속으로 파고들어 토양으로부터 차량 전진에 필요한 충분한 토양추진력을 얻는데 있다. 특히 연약지에서 주행할 경우 그라우저는 차량의 기동성을 좌우하는 절대적인 역할을 하게된다. 차량의 엔진성능이 아무리 뛰어나다 할지라도 주행부가 차량의 주행에 필요한 충분한 토양추진력을 발생시킬 수 없다면 그 차량은 운용되어질 수 없게 된다. 이와 같이 토양조건은 차량성능에 제한적인 요소로 작용하는 경우가 많으며, 연약지에서의 차량성능은 엔진성능보다는 토양으로부터 차량의 기동에 필요한 토양추진력을 발생시킬 수 있는 주행부(궤도)의 능력에 의해 결정된다. 이와 같은 능력은 그라우저에 의해 크게 영향을 받는다.

일반적으로 차량의 주행에 필요한 추진력은 크게 궤도 밑부분에서 발생하는 추진력과(Bottom thrust)과 궤도의 양 측면에서 발생하는 측면 추진력(Side thrust)으로 대별되는데

이 때 궤도 밑 부분에서의 토양추진력은 일반적으로 Coulomb의 이론으로 해석하고 있으며 궤도 측면부분의 해석은 Bekker⁽²⁾와 Reece⁽³⁾의 이론이 사용되고 있다. 그러나 Bekker⁽²⁾이론의 경우 탄성론을 바탕으로 전개된 이론이며, Reece⁽³⁾의 이론에는 차량이 가해주는 수직압력의 영향이 직접적으로 고려되지 못한 단점이 있다. 따라서 궤도차량이 발휘할 수 있는 견인성능을 보다 정확하게 예측할 수 있는 이론식의 개발이 필요하다.

2. 궤도의 측면 토양추진력 예측모델

그라우저 사이에 놓여 있는 토양은 전륜(roadwheels)에 의해 반복 수직하중의 영향을 받으므로 압축 또는 압축파괴상태에 놓이게 된다. 이 때 토양은 그라우저를 따라 궤도의 측면 밖으로 밀려나게 되며, 이러한 측방향으로의 토양 이동은 궤도측면의 토양에 압력을 가해주게 된다. 이 때 이 압력이 궤도 측면 파괴면에 수직으로 작용하는 측압이 된다.

* 성균관대학교 생명자원과학대학 생물기전공학과

이 측압은 주동토압으로 가정할 수 있으며, 궤도 측면 파괴면에 작용하는 주동토압 σ_{ha} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{ha} = (\gamma z + p)K_A - 2c\sqrt{K_A} \quad (1)$$

여기서, σ_{ha} : 주동토압(kPa), γ : 토양의 비중량(kg_f/m^3), z : 깊이(m)

K_A : 토양이 사질토($c=0$)인 경우의 주동토압 계수, (단, $K_A = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$)

식 (1)은 토양자중에 의한 수평응력($\gamma z K_A$)과 궤도아래 접지 압력(p)에 의한 수평응력($p K_A$)의 합에서, 깊이에 관계없이 반대방향으로 작용하는 토양의 점착력 의한 응력($2c\sqrt{K_A}$)을 빼주는 형태이다. 이 때 토양자중에 의한 수평응력과 접지압력에 의한 수평응력의 합이 토양의 점착력보다 작을 때는 주동토압이 음(-)의 값을 갖게 되는데 이는 토양 속에 인장균열이 발생하게 된다는 것을 의미한다. 따라서 궤도 측면에 작용하는 전주동토압(P_A)을 구하기 위해서는 인장균열 깊이인 점착고(z_c)를 기준으로 하여 다음의 3가지 경우에 대하여 각각 구하여야 한다. 점착고는 식 (1)을 0으로 놓고 구한다.

$$z_c = \frac{2c\sqrt{K_A} - p}{\gamma} \quad (2)$$

I) 점착고가 그라우저 높이 H보다 크거나 같은 경우 ($z_c \geq H$)

이와 같은 경우 σ_{ha} 값은 그라우저 전 길이에 대해 음의 값을 갖게 된다. 음의 토압이란 의미가 없기 때문에, 식 (3)과 같이 주동토압이 작용하지 않는 것으로 간주한다.

$$P_A = 0 \quad (3)$$

II) 점착고가 그라우저 높이 H보다 작은 경우 ($z_c < H$)

이와 같은 경우는, 토양자중에 의한 수평응력과 차량하중에 의한 수평응력의 합이 어느 깊이까지는 토양의 점착력에 의한 응력보다 작은 경우로서, 토양 속에 z_c 깊이까지 인장균열이 발생하므로 $(H - z_c)$ 의 깊이에 작용하는 주동토압만을 고려한다. 따라서 전주동토압은 다음과 같다.

$$P_A = \left(\frac{\gamma H^2}{2} + pH + \frac{p^2}{2\gamma} \right) K_A - \left(2cH + \frac{2cp}{\gamma} \right) \sqrt{K_A} + \frac{2c^2}{\gamma} \quad (4)$$

III) 인장균열이 발생하지 않는 경우 ($z_c = 0$)

토양자중에 의한 수평응력과 접지압력에 의한 수평응력의 합이 지면에서부터 토양의 점착력에 의한 응력보다 큰 경우로서, 토양 속에 인장균열이 발생하지 않으므로 전주동토압을 구할 때 적분구간을 0에서 H까지 그라우저의 전 길이에 걸쳐 적분해준다. 따라서, 전주동토압 P_A 는 식 (5)와 같다.

$$P_A = \left(\frac{\gamma H^2}{2} + pH \right) K_A - 2cH\sqrt{K_A} \quad (5)$$

인장균열은 지면에 가해지는 압력의 증가와 함께 감소되어 결국은 없어지므로 지면에 가해지는 압력(pK_A)이 토양의 점착력($2c\sqrt{K_A}$)을 극복하지 못하는 경우에는 식 (4)로 부터 전주동토압을 구하고, 토양의 점착력을 극복하는 압력 이상부터는 식 (5)로 부터 전주동토압을 구한다. 따라서, 토양의 마찰력 성분에 의해 궤도 측면 파괴면에서 추가되는 토양추진력은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_f = 4IP_A \tan \phi \quad (6)$$

한편 궤도 측면에서 발생하는 최대토양추진력(H_{side})은 궤도 측면에서 토양의 점착력에 의해 발휘되는 H_c 와 마찰력에 의해 발휘되는 H_f 의 합으로 Coulomb의 식을 기본형태로 하여 다음과 같이 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$H_{side} = H_c + H_f \quad (7)$$

따라서 두 궤도의 양 측면에서 발생하는 토양추진력은 식 (8)과 같다.

$$H_{side} = 4[c h l + P_A l \tan \phi] \quad (8)$$

여기서, c : 토양의 점착력 (kPa), h : 그라우저 길이(m)

3. 재료 및 방법

토양가공에 의해 다짐정도가 다른 세 가지 토양상태에서 각각 수직압력의 변화와 그라우저의 길이변화에 따른 전단판 측면에서의 토양전단강도를 측정하여 실험결과와 Bekker⁽²⁾, Reece⁽³⁾이론식에 의한 예측값, 그리고 새 이론 모델에 의한 예측값을 비교 검토하는 검증실험을 실시하였다.

3-1 실험장치

3-1-1 인공토조 시스템

실험의 정확성과 신뢰성 있는 자료수집을 위하여 인공토조 시스템(Soil bin)에서 실험을 수행하였다(그림 1). 인공토조 시스템은 토양조 및 레일시스템, 대차구동 시스템, 측정대차, 토양가공대차 및 자료수집 시스템으로 구성되어 있으며, 토양조의 규격은 1200×100×70cm 이고 수분함량을 조절할 수 있도록 배수시설을 갖추고 있다.

3-1-2 전단판

실험에 사용된 전단판의 크기는 가로×세로가, 20×5cm이고, 그라우저 길이는 각각 1cm, 3cm, 5cm인 세 가지 종류로 제작하였으며, 그림 2는 본 실험에 사용된 전단판의 실제모습을 보여주고 있다.

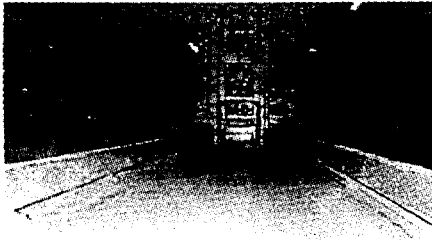


Fig.1 View of soil bin system

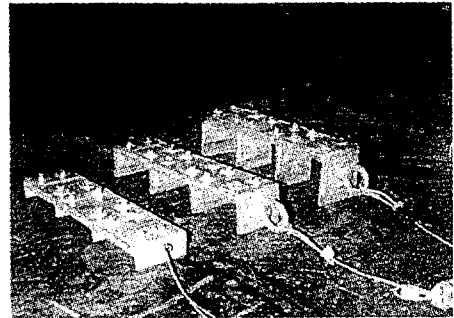


Fig.2 Model shear plate with grousers

3-2 실험방법

3-2-1 총토양추진력(Total soil thrust)의 측정

총토양추진력의 측정은 전단판의 견인시 발생하는 불도징 저항(bulldozing resistance)을 제거해 주기 위해서 그림 3과 같이 전단판 앞부분의 토양을 그라우저 길이 만큼 제거해준 뒤 수행하였다. 이 때 토양의 전단파괴는 전단판의 양 측면부분과 밑부분에서 동시에 발생하게 된다.

3-2-2 전단판 밑부분의 토양추진력(Bottom soil thrust) 측정

전단판 밑부분의 토양추진력은 그림 4와 같이 전단판의 앞부분과 전단판 양 측면의 토양을 제거해 준 뒤 전단판을 끌어 측정하였다. 이 때 토양의 전단파괴는 오직 전단판의 밑부분에서만 발생하게 된다.

3-2-3 전단판 양 측면에서의 토양추진력(Side soil thrust)결정

전단판 양 측면에서의 토양 추진력은 많은 반복실험을 통해 얻은 총토양추진력에서 전단판의 밑부분 토양추진력을 빼준 값으로 결정하였다.

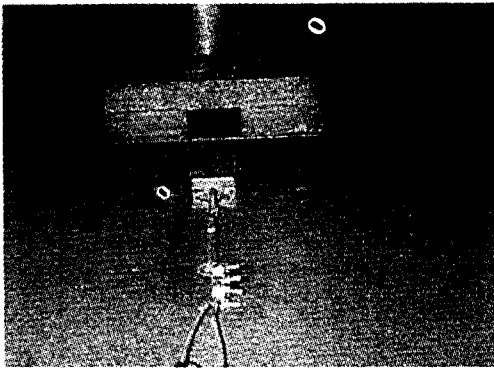


Fig.3 View of the removed soil in front of the shear apparatus

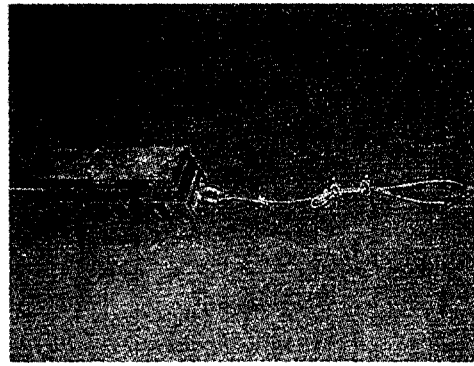


Fig.4 View of the removed soil in front & sides of the shear apparatus

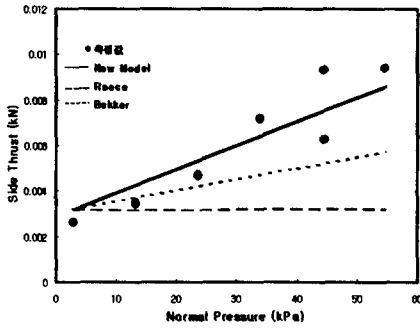
4. 결과 및 고찰

그림 5~7은 그라우저 길이가 각각 1cm, 3cm, 5cm일 때, 원추지수가 135.6kPa, 421.8kPa, 663.2kPa인 세 가지 토양다짐상태에서 측정값과 세 가지 모델에 의해 예측된 값들을 비교한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 그라우저 길이가 다른 세가지 전단판에 대한 측정값은 세 가지 토양상태에서 모두 수직압력의 증가에 따라 선형으로 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 Reece의 모델에 의한 결과는 수직압력의 증가에 관계없이 거의 일정한 예측값을 나타내어 측정값과는 상당한 오차를 나타냈으며, Bekker의 모델에 의한 결과는 수직압력의 증가에 따라 예측값도 증가하는 경향을 나타냈으나 그 증가량은 측정값의 증가량보다 적어서 수직압력이 증가할수록 오차가 현저히 커지는 경향을 나타냈다. 그러나 본 연구에서 개발한 새 모델에 의한 예측값은 실험구간 내에서 측정값과 거의 유사한 기울기로 선형 증가하는 경향을 나타냈다.

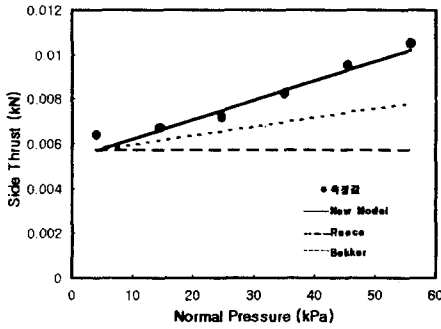
표 1은 측정값과 새 모델에 의한 예측값간의 상관관계를 나타낸 결과로서, 결정계수는 0.9021이상으로 나타났으며, 회귀계수의 범위는 0.7616~1.1416으로 나타나 새 모델에 의한 예측값은 측정값과 잘 일치하는 것으로 판단된다.

Table 1. The values of R^2 and Regression coefficient between predicted side thrust and measured ones

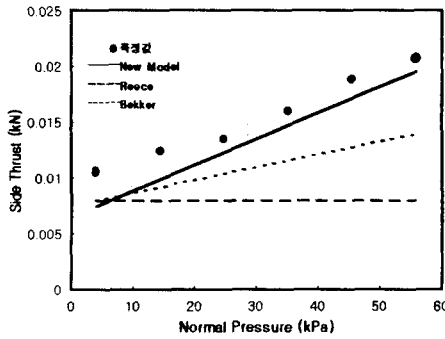
Grouser length CI	1cm			3cm			5cm		
	135.6kPa	421.8kPa	663.2kPa	135.6kPa	421.8kPa	663.2kPa	135.6kPa	421.8kPa	663.2kPa
R^2	0.9021	0.958	0.9825	0.9786	0.9357	0.9940	0.9587	0.9791	0.9776
Regression coefficient	0.7616	1.0029	1.1416	1.0814	0.8037	0.8758	0.7782	0.9398	0.8963



(a)

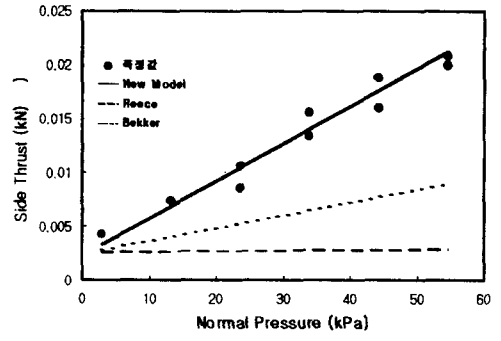


(b)

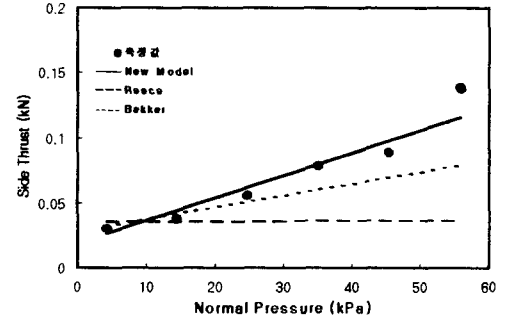


(c)

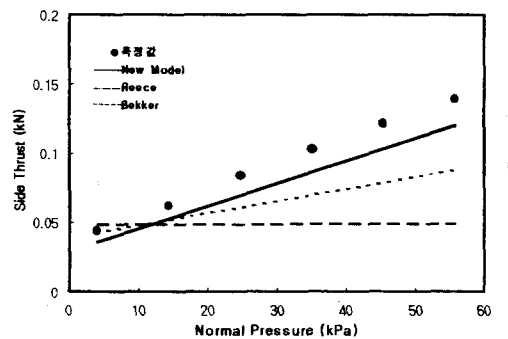
Fig.5 Comparisons between the measured side thrust and predicted ones for three different types of model of shear apparatus with grouser length of 1cm. (a) CI=135.6kPa, (b) CI=421.8kPa, (c) CI=135.6kPa



(a)

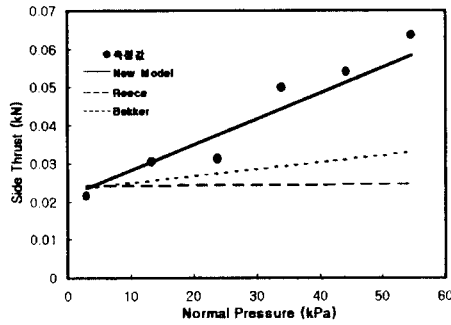


(b)

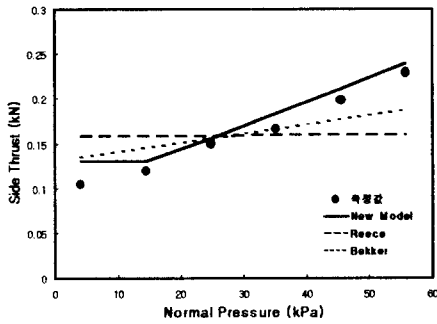


(c)

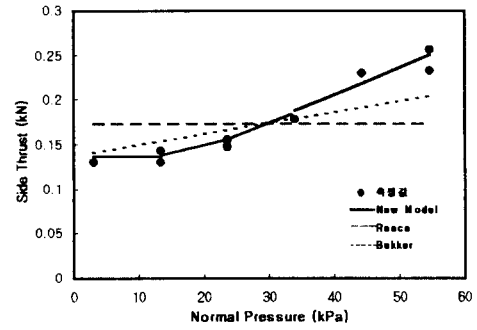
Fig.6 Comparisons between the measured side thrust and predicted ones for three different types of model of shear apparatus with grouser length of 3cm. (a) CI=135.6kPa, (b) CI=421.8kPa, (c) CI=135.6kPa



(a)



(b)



(c)

Fig.6 Comparisons between the measured side thrust and predicted ones for three different types of model of shear apparatus with grouser length of 3cm (a) CI=135.6kPa, (b) CI=421.8kPa, (c) CI=135.6kPa

5. 요약 및 결론

본 연구는 궤도의 측면에서 발생하는 토양추진력을 예측할 수 있는 수학적 모델을 개발하기 위하여 수행되었다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 모델에서는 궤도의 측면에 수직으로 작용하는 측압을 주동토압으로 가정하였으며, 궤도 위에 작용하는 수직압력을 측면 추진력 계산에 고려하였다.
- (2) 모델의 검증은 위하여 그라우저 길이를 1cm, 3cm, 5cm인 세 수준으로 변화시키고 또한 토양 다짐상태를 각각 원추지수가 135.6kPa, 421.8kPa, 663.2kPa인 세 가지 상태로 변화시켜 그라우저 길이와 토양상태의 변화에 대한 검증실험을 실시하였다. 검증실험결과 본 연구에서 개발한 측면추진력 예측모델은 Bekker⁽⁶⁾와 Reece⁽⁷⁾모델에 의한 예측값보다 측정값에 가깝게 접근하는 것으로 나타났으며, 본 모델의 예측값과 측정값간에는 높은 결정계수와 회귀계수를 나타내어 측정값과 잘 일치하는 것으로 판단되었다.

6. 참고문헌

1. 김팔규 외, 1997, "최신토질역학상론", 학연사.
2. Bekker, M. G., 1962, "Theory of land locomotion", Univ. Mich. Press.
3. Reece, A. R., 1964b, "The effect of grousers on off-the-road vehicle performance", J. Agri. Engng Res., 9(4), pp 360-371.
4. Yong, R. N., 1984, "Track-soil interaction", J. Terramechanics, Vol. 21, No. 2, pp 133-152.
5. Biris P. Volfson, 1984, "Determination of Some Soil Properties for Vehicle Ride simulation", Trans. of ASAE, pp 341-347.