

## 그라우저에 의해 발생하는 궤도의 측면추진력 예측

# The Prediction of Side Thrust Generated by Grouser Under Track

박 원 엽*	이 규 승*	박 준 걸**
정회원	정회원	정회원
W. Y. Park	K. S. Lee	J. G. Park

### SUMMARY

This study was conducted to develop the mathematical model for predicting the side thrust which is generated by the shearing action on the vertical surfaces of the sides of the track.

Experiments were conducted with the three different shear plates with grouser length of 1, 3 and 5cm for two different soil conditions using soil bin system. The measured side thrust were compared with the values predicted by the new model developed in this study and by Bekker's model respectively. The values of side thrust predicted by the new model were more close to the measured values than those of the side thrust predicted by Bekker's model.

The total thrust measured were also compared with the values predicted by the conventional model which considers only bottom thrust effect and by the new model which contains not only bottom thrust but side thrust effect. The values of the thrust predicted by conventional model were lower than measured values for both of the soil conditions and the three levels of grouser length. The maximum errors of conventional model were increased with the increase of grouser length. But the values of the total thrust predicted by the model developed in this study were well matched to the measured ones for both of the soil conditions and the three levels of grouser lengths.

**주요용어(Key Words):** 그라우저(Grouser), 측면추진력(Side thrust), 저면추진력(Bottom thrust), 주동토압(Active earth pressure), 점착고(Cohesive height)

### 1. 서 론

도로(on-road) 또는 단단한 지면에서 운용되고 있는 차량의 견인력은 일반적으로 차량의 주행장치(running gear)와 지면과의 마찰에 의해 발생된다. 그러나 농업기계, 건설중장비, 군사용차량 등과 같이 주로 연약지에서 운용되는 로외차량(off-road vehicle)의 견인력은 토양-주행장치의 상호작용에 의해 발생되며, 이 경우 주행장치와 토양과

의 접지면에서 발생하는 토양의 침하 및 파괴현상에 의해 주행장치는 토양으로부터 차량의 주행에 필요한 충분한 추진력을 산출할 수 없는 경우가 많다. 이와 같이 로외차량이 운용되고 있는 토양 조건은 차량성능에 제한적인 요소로 작용하기 때문에 연약지에서의 차량성능은 엔진성능 뿐만 아니라 토양으로부터 차량의 주행에 필요한 충분한 토양추진력을 발생시킬 수 있는 주행부의 능력에 의해 결정되는 경우가 많다(박, 1998). 따라서 로

\* 성균관대학교 생명자원과학대학 생물기전공학과  
\*\* 건국대학교 생명자원과학대학 생물산업기계공학과

외에서 운용되고 있는 차량의 주행장치로는 차량의 침하에 따른 운동저항을 줄이면서 토양으로부터의 충분한 추진력을 얻기 위하여 임의 길이의 그라우저를 갖는 케도형주행장치가 많이 사용되고 있다.

그라우저의 역할은 케도형차량이 주행할 때 토양 속으로 파고들어 토양으로부터 차량의 주행에 필요한 충분한 토양추진력을 얻는데 있다. 특히 연약지에서 주행할 경우, 그라우저는 차량의 기동성을 좌우하는 절대적인 역할을 한다(Reece, 1964).

케도형 주행장치가 발휘할 수 있는 최대추진력의 예측방법은 Mohr-Coulomb의 법칙으로부터 유도된 토양의 최대전단응력을 케도의 전 접지면적에 대해 적분해 주는 방법이 가장 널리 사용되고 있다(Wong, 1984, 1989). 그러나 이 방법은 그라우저에 의해 케도의 양 측면에서 추가적으로 발생하는 측면추진력(side thrust)의 효과를 고려하지 않았고, 단지 케도의 저면에서 발생하는 저면추진력(Bottom thrust)만을 대상으로 유도된 방법이기 때문에 그라우저 길이가 길 경우에는 실제 토양추진력보다 낮게 예측되는 단점이 있다. 따라서 케도형 주행장치에 의해 산출되는 추진력을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 그라우저 길이를 고려한 측면추진력이 해석에 포함되어야 한다고 보고되고 있다(Bekker, 1956, 1969).

Bekker(1956)는 그라우저에 의해 케도의 측면에서 발생하는 측면추진력을 예측하기 위하여 그라우저 사이의 토양에 의해 케도측면에 수직으로 작용하는 압력을 반무한 탄성체 위에 작용할 경우 발생하는 측압으로 가정하여 측면추진력을 예측하였다. 그러나 케도형차량이 주행할 경우, 케도아래의 토양은 케도의 수직압력하에서 압축 또는 압축 파괴상태 즉, 소성상태에 놓이게 되므로 토양을 탄성체로 가정하여 접근하는 방법에는 무리가 있다(Reece, 1964).

그라우저에 의해 케도의 양 측면에서 추가적으로 발생하는 측면추진력을 예측하기 위한 연구는 현재까지 계속 수행되고 있으나 이에 대한 해석방법은 아직까지 명확히 구명되어 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 케도형차량의 추진력을 보다 정확히 예측하기 위하여 그라우저에 의해 케도의 양 측면에서 발생하는 측면추진력을 예측할 수 있는 수학적 모델을 개발하는데 있다.

## 2. 측면 토양추진력 예측 모델

### 가. 케도계의 추진력

케도에 부착되어 있는 그라우저가 수평구동력에 의해 지반을 파괴시킬 때, 토양은 케도아래 그라우저의 끝부분(grouser tips)을 잇는 전단영역을 따라 파괴되고, 파괴면에서는 식 (1)과 같이 Mohr-Coulomb의 파괴규준에 의해 전단응력이 발생한다.

$$\tau = c + p \tan \phi \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $c$  : 토양의 점착력 [kPa]  
 $\phi$  : 토양의 내부마찰각 [deg]  
 $p$  : 케도아래 접지면적 [kPa]

따라서 케도아래에서 나타나는 저면 토양추진력은 식 (1)을 전체 케도면적에 대해 적분해 줌으로써 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$H_b = bl(c + p \tan \phi) \dots\dots\dots (2)$$

여기서,  $H_b$  : 케도 아래에서 발생하는 저면추진력  
 $b, l$  : 케도 폭, 길이 [m]

식 (2)는 케도계의 추진력을 예측하는데 가장 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 임의 길이의 그라우저(특히, 긴 그라우저)를 갖고 있는 케도의 경우, 케도형차량이 주행함에 따라 그라우저 사이의 압축된 토양과 케도측면의 바깥쪽 토양간의 전단에 의해 케도의 양 측면에서 추가적인 추진력 즉, 측면추진력이 발생한다. 따라서 케도계의 전체 추진력(H)은 식 (3)과 같이 케도 아래에서 발생하는 저면추진력( $H_b$ )과 그라우저에 의해 케도의 양 측면에서 발생하는 측면추진력( $H_s$ )의 합으로 결정되어야 한다.

$$H = H_b + H_s \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $H$  : 케도에서 산출되는 전체 토양추진력  
 $H_b$  : 케도아래에서 발생하는 저면 토양추진력  
 $H_s$  : 케도의 양 측면에서 발생하는 측면 토양추진력

### 나. 측면 토양추진력 예측 모델

켈도아래 그라우저 사이에 놓여 있는 토양은 차량의 하중에 의해 켈도아래에서 압축 또는 압축 파괴 상태에 놓이게 되고, 켈도의 전체 길이에 걸쳐 양 측면으로 팽창되어 켈도의 양 측면으로 밀려나는 힘을 받게 된다. 켈도아래 접지압력에 의한 그라우저 사이 토양의 측면 팽창은 켈도의 측면 파괴면에 수직으로 작용하는 축압으로 작용하고, 이 축압은 주동토압(active earth pressure)으로 고려할 수 있다. 따라서 차량하중에 의해 켈도아래 임의의 지점에서 압력  $p$ 가 작용할 경우 그라우저 사이의 토양에 의해 켈도의 양 측면에 작용하는 축압은 Rankine의 토압이론을 이용하여 결정하였다.

그림 1은 점착력(cohesion) 성분을 갖고 있는 점성토에서 켈도아래 임의의 지점에서 압력  $p$ 가 작용할 때의 주동토압( $\sigma_{ha}$ )을 나타내는 Mohr원을 보여 주고 있다.

그림 1의 삼각형  $AO_1T_1$ 로부터  $\sin \phi$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있고,

$$\sin \phi = \frac{\frac{1}{2} (\sigma_v - \sigma_{ha})}{c \cot \phi + \sigma_{ha} + \frac{(\sigma_v - \sigma_{ha})}{2}} \dots\dots (4)$$

식 (4)를 정리하면, 켈도의 측면파괴면에 작용하는 주동토압  $\sigma_{ha}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{ha} + (\gamma z + p) K_A - 2c\sqrt{K_A} \dots\dots\dots (5)$$

- 여기서,  $\sigma_{ha}$  : 주동토압시의 수평응력 [kPa]
- $\gamma$  : 토양의 비중량 [kN/m<sup>3</sup>]
- $K_A$  : 사질토( $c = 0$ )인 경우의 주동토압 계수,  $K_A = \tan^2 (45^\circ - \phi/2)$
- $z$  : 침하깊이 [m]
- $p$  : 켈도아래 접지압력 [kPa]

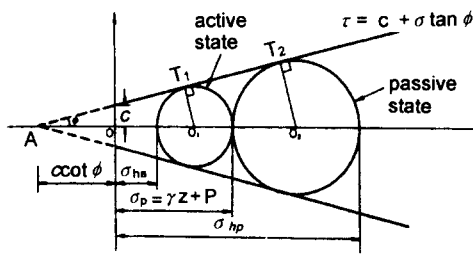


Fig. 1 Mohr circle for Rankine's active and passive earth pressure state.

따라서 식 (5)를 그라우저 높이  $H$ 에 대해 적분함으로써 켈도의 측면에서 그라우저 높이  $H$ 에 대해 단위 켈도 길이당 작용하는 전주동토압( $P_A$ )을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_A = \int_0^H ((\gamma z + p)K_A - 2c\sqrt{K_A}) dz$$

$$= \left( \frac{\gamma H^2}{2} + pH \right) K_A - 2cH\sqrt{K_A} \dots\dots\dots (6)$$

한편, 식 (5)는 토양 자중에 의한 수평응력( $\gamma zK_A$ )과 켈도아래에서의 접지압력( $p$ )에 의한 수평응력( $pK_A$ )의 합에서 깊이에 관계없이 반대방향으로 작용하는 토양의 점착력 성분에 의한 응력  $2c\sqrt{K_A}$ 를 빼주는 형태이다. 이 때 토양자중에 의한 수평응력과 켈도아래 접지압력에 의한 수평응력의 합이 토양 점착력 성분의 항보다 작을 때는 주동토압  $\sigma_{ha}$ 가 음의 값을 갖게 되는데, 이것은 토양 속에 인장균열(tension crack)이 발생하게 된다는 것을 의미한다. 따라서 식 (6)에 언급한 켈도 측면에 작용하는 전주동토압( $P_A$ )은 인장균열이 발생하는 깊이인 점착고(cohesive height,  $z_c$ )를 기준으로 하여 다음의 3가지 경우에 대하여 각각 구하여야 한다(김, 1997).

점착고는 식 (5)를 0으로 놓고 정리하여 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$z_c = \frac{2c - p\sqrt{K_A}}{\gamma \sqrt{K_A}} \dots\dots\dots (7)$$

(1) 점착고가 그라우저 높이  $H$ 보다 작은 경우 ( $z_c < H$ )

그림 2와 같이 토양자중에 의한 수평응력( $\gamma zK_A$ )과 차량하중에 의한 수평응력( $pK_A$ )의 합이 일정 깊이까지 토양 점착력 성분에 의한 응력( $2c\sqrt{K_A}$ )보다 작은 경우로서, 이러한 경우에는 토양속에  $z_c$  깊이까지 인장균열이 발생한다. 따라서  $(H - z_c)$  이상의 깊이에 작용하는 주동토압만을 고려하면, 이 때, 전

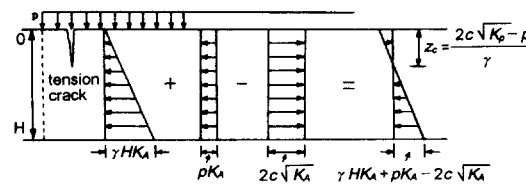


Fig. 2 Distribution of active earth pressure with tension crack for the cohesive soil.

주동토압  $P_A$ 는 식 (8)과 같이 결정된다.

$$P_A = \left( \frac{\gamma H^2}{2} + pH + \frac{p^2}{2\gamma} \right) K_A - \left( 2cH + \frac{2cp}{\gamma} \right) \sqrt{K_A} + \frac{2c^2}{\gamma} \dots\dots (8)$$

(2) 점착고( $z_c$ )가 그라우저 높이  $H$  이상인 경우 ( $z_c \geq H$ )

이러한 경우에는  $\sigma_{ha}$  값이 그라우저의 전체 길이에 대해 음(-)의 값을 갖게 된다. 음의 토압이란 의미가 없기 때문에, 식 (9)와 같이 주동토압이 작용하지 않는 것으로 간주한다.

$$P_A = 0 \dots\dots (9)$$

(3) 인장균열이 발생하지 않는 경우 ( $z_c = 0$ )

그림 3과 같이 토양자중에 의한 수평응력( $\gamma zK_A$ )과 차량하중에 의한 수평응력( $pK_A$ )의 합이 지면에서부터 토양 점착력성분에 의한 응력( $2c\sqrt{K_A}$ )보다 큰 경우로서, 이 경우는 토양속에 인장균열이 발생하지 않으므로 0에서  $H$ 까지 그라우저의 전 길이에 걸쳐 적분함으로써 다음과 같이 전주동토압을 구할 수 있다.

$$P_A = \left( \frac{\gamma H^2}{2} + pH \right) K_A - 2cH\sqrt{K_A} \dots\dots (10)$$

앞에서 서술한 세 가지 경우에 대해 구한 전주동토압  $P_A$ 를 궤도의 측면 파괴면에 작용하는 수직 압력으로 해석할 때, 토양의 마찰력 성분에 의해 궤도의 양 측면 파괴면에서 나타나는 토양추진력  $H_c$ 는 다음과 같이 결정된다.

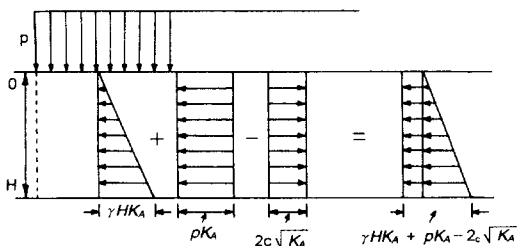


Fig. 3 Distribution of active earth pressure without tension crack for the cohesive soil.

$$H_c = 2IP_A \tan \phi \dots\dots (11)$$

한편, 토양의 점착력 성분에 의한 측면추진력  $H_c$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$H_c = 2IH_c \dots\dots (12)$$

따라서 궤도의 양 측면에서 발생하는 측면토양 추진력은 식 (13)과 같이 궤도 측면에서 토양의 점착력 성분과 마찰력 성분에 의해 나타나는 추진력의 합으로 나타낼 수 있다.

$$H_s = H_c + H_f \dots\dots (13)$$

### 3. 재료 및 방법

#### 가. 실험장치

##### (1) 인공토조시스템

측면토양추진력 예측 모델의 검증실험은 신뢰성 있는 자료의 측정 및 수집을 위하여 인공토조시스템에서 수행하였다. 인공토조시스템은 토양조 및 레일시스템, 대차구동시스템, 작업대차 및 토양가공대차 등으로 구성되어 있다. 토양조는 길이 12 m, 폭 1m, 높이 0.7m로서 필요에 따라 토양의 수분 함량을 조절할 수 있도록 배수시설이 되어 있으며, 토양가공대차는 토양의 물리적상태가 실험 목적에 적합하도록 실험과 실험사이에 토양을 가공하는 대차로서 토양가공에 필요한 로타리틸러, 표면다짐롤러, 균평기 등을 포함하고 있다.

##### (2) 토양추진력 측정장치

실제 궤도형차량의 궤도가 산출할 수 있는 추진력상태를 재현하기 위하여 직사각형 형태의 전단판을 사용하였다. 실험에 사용된 전단판은 길이 20cm, 폭 5cm의 직사각형 형태이고, 전단판 아래에는 길이가 각각 1cm, 3cm, 5cm인 돌기부(그라우저)가 부착된 세 가지 종류로 제작하였다. 그림 4에 그라우저 길이가 다른 세 가지 종류의 전단판의 실제 모습을 나타내었다.

전단판의 추진력은 전단판의 전면부와 인공토조시스템의 작업대차의 견인부에 하중변환기가 부착된 강선을 연결한 후, 작업대차가 전단판을 견인할 때 하중변환기에 나타나는 수평인장력으로부터 측정하였다. 전단판에 가해주는 하중은 원형봉이

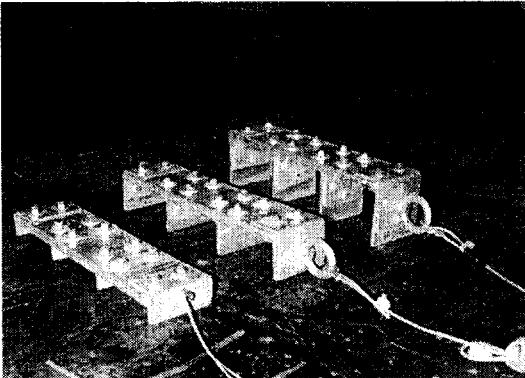


Fig. 4 Shear plates used in test.

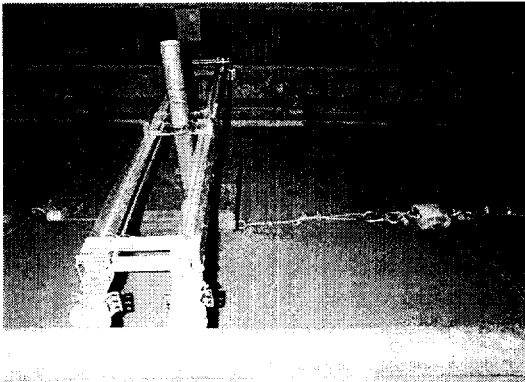


Fig. 5 Overall view of experimental devices.

부착된 4.1kgf의 무게를 갖는 사각판을 전단판 위에 고정한 후, 전단판위의 사각판에 10kgf의 무게추를 이용하여 단계적으로 증감시켰다. 한편, 전단판의 견인시 무게추를 실은 사각판의 흔들림을 방지하기 위하여 인공토조시스템의 레일상을 자유롭게 이동하면서 사각판 위의 원형봉을 잡아주도록 구성된 수평지지대를 부착하였다(그림 5). 그림 5에 토양추진력을 측정하기 위한 장치의 실제 모습을 나타내었다.

나. 실험방법

본 실험에서는 토양상태와 그라우저 길이에 따른 토양추진력간의 관계를 조사하기 위하여 인공토조내의 사양토(sandy loam)에서 인공토조시스템의 토양가공대차를 이용하여 토양가공방법에 따라 다짐정도가 다른 두 가지 토양상태(토양 I, 토양 II)에서 그라우저 길이가 각각 1cm, 3cm, 5cm인

Table 1 Soil properties of experimental soil

Soil conditions	Bulk density (kN/m <sup>3</sup> )	Cone Index (kPa)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (degree)
I	14.841	380.9	8.510	31.383
II	15.438	579.3	8.282	37.776

세 가지의 다른 전단판을 이용하여 토양상태와 그라우저 길이에 따른 전단판의 토양추진력을 측정하였다.

(1) 토양가공

토양가공은 인공토조시스템의 토양가공대차를 이용하여 실험토양을 다짐정도가 다른 두 종류의 토양상태(토양I, 토양II)로 가공하였다.

토양 I은 2회의 로타리(rotary)작업으로 토양을 완전히 파쇄하고 균평기(grader)로 균평작업 작업을 한 후 토양다짐롤러(surface roller) 작업을 2회 실시하였고, 토양 II는 로타리작업과 균평작업은 토양 I과 동일하게 수행한 후, 표면다짐롤러 작업을 4회 실시하여 토양 I에 비해 상대적으로 토양의 강도를 높도록 가공하였다.

(2) 토양물리성 측정

토양의 물리성은 토양가공이 끝나고 토양추진력 측정실험이 시작되기 직전에 토양의 겉보기밀도, 함수율, 원추지수, 점착력 및 내부마찰각을 측정하였다.

겉보기밀도는 100cc 용량의 토양채취관을 사용하여 토조내의 임의의 세 곳을 선정하여 구하였고, 토양의 점착력, 내부마찰각 및 원추지수는 SR-2 모델의 토양전단 측정장치를 이용하여 토조내에서 임의의 다섯 곳을 선정하여 측정하였다. 한편, 원추지수는 5cm 깊이 간격으로 측정하여 0~15cm 사이의 평균값을 이용하였다. 표 1에 토양가공상태가 다른 두 가지 토양상태에서 측정한 토양의 물리성을 나타내었다.

(3) 검증실험

측면추진력의 측정은 먼저 전단판의 밑부분과 양측면부분 모두에서 나타나는 전체추진력과 전단판의 밑부분에서만 나타나는 저면추진력을 측정 후, 두 값의 차로써 결정하였다.

총 토양추진력의 측정은 전단판의 이동시 전단

판 앞부분에 쌓이는 토양에 의해 나타나는 볼도징 효과(bulldozing effect)를 없애기 위해 전단판 앞부분의 토양을 제거한 후 측정대차가 전단판을 견인할 때 하중변환기에 의해 나타나는 인장력에 의해 측정하였다. 이 때 토양의 전단파괴는 전단판의 양 측면부분과 밑부분에서 동시에 발생하게 된다.

전단판 밑부분에서 발생하는 저면 토양추진력은 전단판의 양 측면에서 나타나는 측면추진력 효과를 없애기 위해 전단판의 앞부분 뿐만아니라 전단판 양 측면의 토양도 제거해 준 후 전단판을 끌어 하중변환기에 의해 측정되는 인장력에 의해 측정하였다.

전단판에 가해주는 수직하중은 전단판위에 4.1 kg의 무게를 갖는 사각판을 고정한 후, 사각판 위에 10.5kg의 무게추를 이용하여 14.6kg(14.31 kPa), 25.1kg(24.60kPa), 35.6kg(34.89kPa), 46.1kg(45.18 kPa), 56.6kg(55.47kPa)의 5단계로 증감하였고, 모든 실험은 3반복으로 수행되었다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 가. 측면 토양추진력 예측 모델의 검증

본 연구에서 개발한 측면 토양추진력 예측 모델의 유효성을 검증하기 위하여 인공토조시스템에서 수행한 측정 결과를 본 연구에서 개발한 모델(식 (13))에 의해 예측된 결과 및 식 (14)와 같이 문헌에 보고된 Bekker의 모델에 의해 예측된 결과와 비교하였다.

$$H_s = 2chl + 2l \frac{p}{\pi} \left[ h \cot^{-1} \left( \frac{h}{b} \right) \right] \tan \phi \quad (14)$$

그림 6과 7은 각각 두 가지 다른 토양조건(토양 I, 토양 II)에서 그라우저 길이가 각각 1cm, 3cm, 5cm인 전단판을 이용하여 측정된 측면추진력값과 두 모델에 의해 예측된 측면추진력 값들을 비교한 결과이다. 그림 7과 8에서 실선은 측정치로부터 유도된 회귀방정식에 의해 구한 결과로서 두 모델에 의해 예측된 결과는 측정치의 회귀방정식으로부터 구한 결과와 비교하였다.

그림에서 볼 수 있듯이, 그라우저 길이가 다른 세 가지 전단판을 이용하여 측정된 측면추진력값

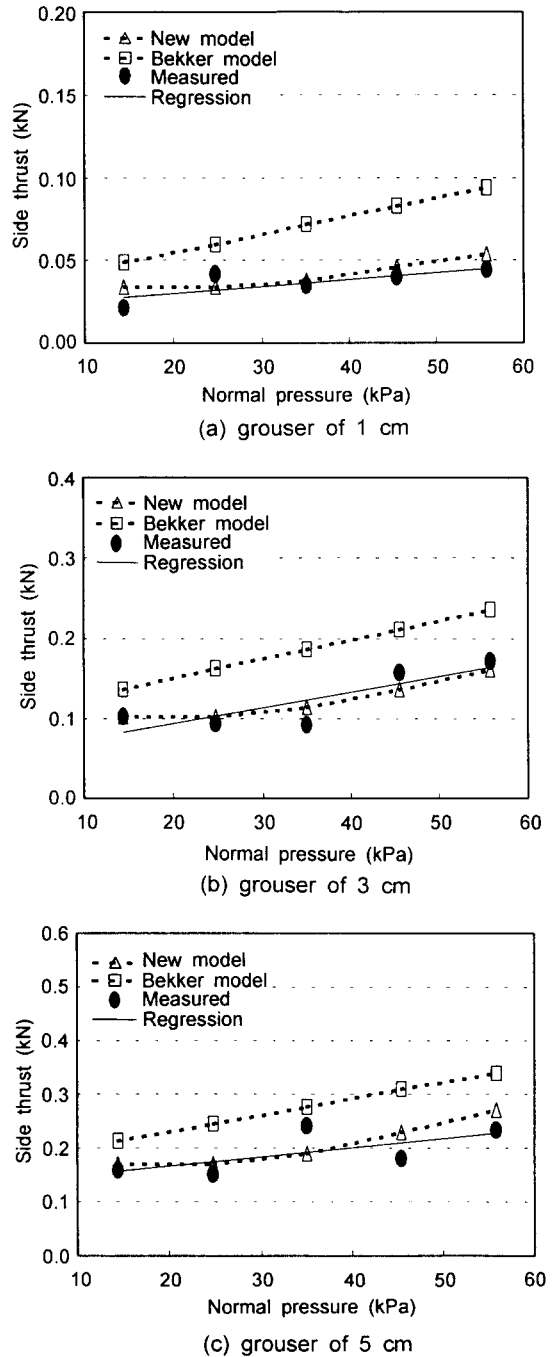
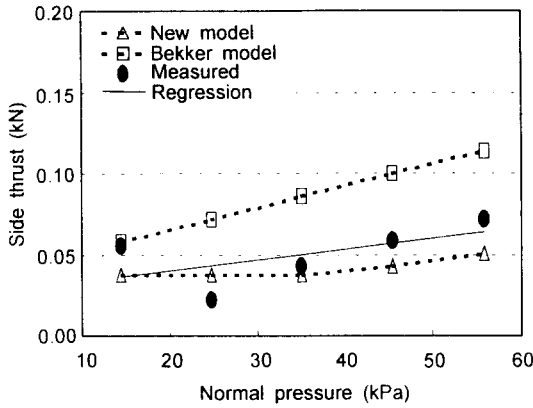
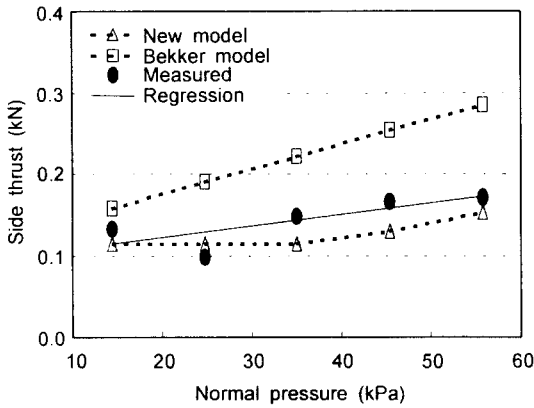


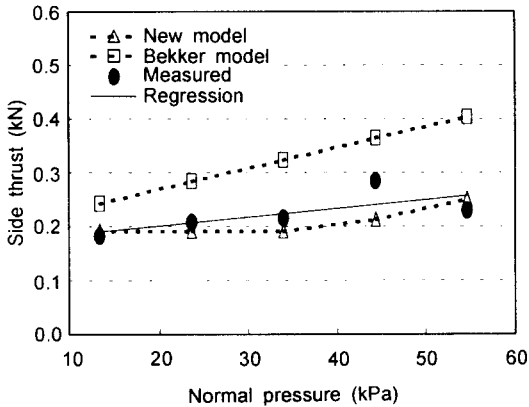
Fig. 6 Comparisons between the measured side thrusts and predicted ones by Bekker's and New model for three different shear plates for the soil condition I.



(a) grouser of 1 cm



(b) grouser of 3 cm



(c) grouser of 5 cm

Fig. 7 Comparisons between the measured side thrusts and predicted ones by Bekker's and New model for three different shear plates for the soil condition II.

은 두 가지 토양상태에서 모두 수직압력의 증가함에 따라 증가하였으며, 또한 그라우저 길이가 길수록 크게 나타났다.

한편, Bekker 모델에 의해 예측된 결과는 측정치와 마찬가지로 두 가지 토양상태에서 모두 수직압력에 따라 증가하고, 그라우저 길이가 길수록 크게 나타나는 경향을 보여주고는 있으나 그 값이 측정치에 비해 현저히 크게 나타났다. 또한 수직압력의 증가에 따른 예측값의 증가율이 측정치에 비해 상대적으로 크게 나타나 수직압력이 증가함에 따라 측정치에 대한 오차도 함께 증가하였다. 그러나 본 연구에서 개발한 모델에 의한 예측값은 실험구간내에서 측정치와 거의 유사한 경향을 나타내었고, 실험이 수행된 수직압력 범위(14.31kPa~55.47kPa)내에서 1cm, 3cm, 5cm의 그라우저 길이를 갖는 세 가지 전단판에 대한 측정치와 예측치간의 최대오차는 토양 I에서 각각 24.25%, 22.30%, 18.88%이고, 토양 II에 대해서는 각각 24.57%, 19.88%, 13.99%로서 최대 25%의 범위내에 있는 것으로 나타나 본 연구에서 개발한 측면추진력 예측모델은 실험이 수행된 두 가지 토양상태에 대해 그라우저 길이에 따른 측면추진력의 예측이 가능한 것으로 판단된다.

#### 나. 측면 토양추진력 효과를 고려한 추진력 예측 모델의 검증

그림 8과 9는 같은 실험조건에서 측정한 전체추진력과 두 가지 모델에 의한 예측값, 그리고 식 (2)에서 언급한 측면추진력 효과를 포함하지 않고 저면추진력만을 고려한 전통적인 모델에 의한 예측값을 비교한 결과이다.

그림 8과 9에서 볼 수 있듯이, 저면추진력만을 해석에 포함한 전통적인 방법에 의해 예측된 결과는 1cm, 3cm, 5cm의 그라우저 길이를 갖는 세 가지 전단판에 대해, 두 토양상태에서 모두 측정치에 비해 낮게 예측되어 각각의 전단판에 대한 측정치와의 최대오차는 토양 I에서 21.53, 34.15, 50.34%, 토양 II에 대해서는 17.31, 35.22, 51.06%로 나타나 측정치와 큰 차이를 나타내었고, 그라우저 길이가 길수록 측정치와의 오차가 증가하였다. 이와 같은 결과는 전통적인 모델은 레도의 측면에서 산출되는 측면추진력 효과가 고려되지 않았기 때문에 레도의 측면에서 추가적으로 발생하는 측면추진력 값만큼 측정치보다 낮게 예측되고, 또한 앞의 그림 6, 7에 나타난 바와 같이 그라우

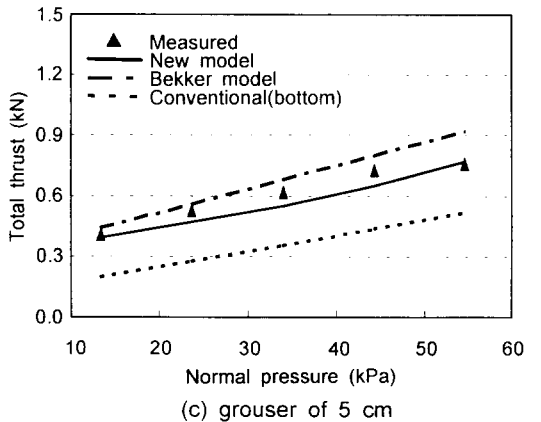
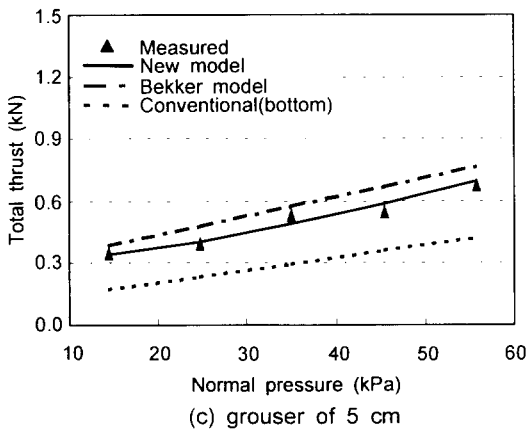
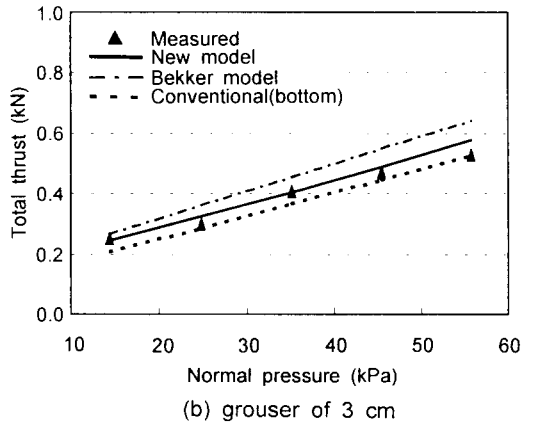
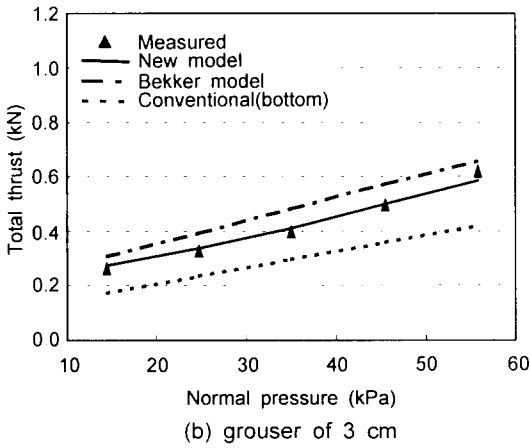
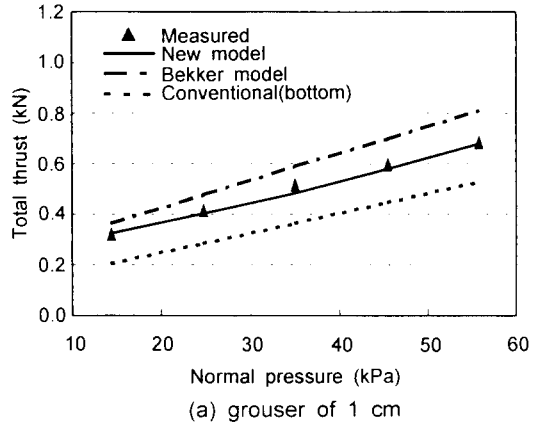
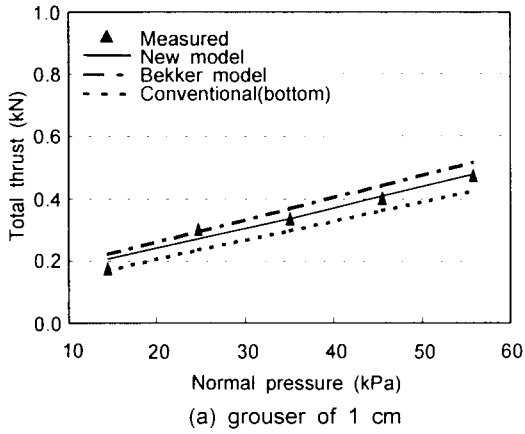


Fig. 8 Comparisons between the measured thrusts and predicted ones by New, Bekker's and Conventional model for shear plates with three different grouser height for soil condition I.

Fig. 9 Comparisons between the measured thrusts and predicted ones by New, Bekker's and Conventional model for shear plates with three different grouser height for soil condition II.



저 길이가 길수록 측면추진력이 증가하여 그라우저 길이가 길어질수록 측정치와의 오차가 증가한 것으로 판단된다.

한편, 추진력 예측에 있어, 저면추진력 뿐만 아니라 측면추진력 효과를 모두 고려한 두 가지 모델에 의해 예측된 결과는 전통적인 방법에 의해 예측된 결과에 비해 측정치와 훨씬 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 Bekker 모델에 의해 예측된 결과는 전통적인 방법에 의해 예측된 결과에 비해서는 상대적으로 측정치와 유사한 경향을 나타내었지만 두 가지 토양상태와 세 가지 전단판에 대해 모두 측정치보다는 높게 나타났다. 즉, 세 가지 전단판에 대한 측정치와 예측치간의 최대오차는 토양 I에서 각각 27.66%, 21.19%, 22.34%, 토양 II에 대해서는 각각 21.47%, 19.08%, 21.26%로서 측정치와 매우 큰 차이를 나타내었다. 이와 같이 Bekker 모델에 의해 예측된 결과가 측정치에 비해 높게 예측되고 오차가 크게 나타난 이유는 앞의 그림 6과 7의 결과에 나타난 바와 같이 Bekker 모델에 의해 예측된 측면추진력값이 측정된 측면추진력값에 비해 높게 예측되어, 결과적으로 측정된 측면추진력과 예측된 측면추진력간의 차이만큼 전체추진력이 높게 나타난 것으로 판단된다.

한편, 본 연구에서 개발한 모델에 의해 예측된 결과는 두 가지 토양조건에서 세 가지 전단판에 대해 모두 측정치와 거의 유사한 경향을 나타내었다. 측정치와의 최대오차는 토양 I에서 세 가지 그라우저에 대해 각각 19.03%, 5.30%, 7.96%이고, 토양 II에 대해서는 각각 9.55%, 6.35%, 11.12%로서 전통적인 모델 및 Bekker 모델에 의해 예측된 결과에 비해 매우 작은 오차를 나타내어 측정치와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 개발한 모델을 궤도형 주행 시의 추진력 예측에 적용할 경우보다 정확한 예측이 가능한 것으로 판단되고, 궤도형 주행부의 성능 평가 및 설계에 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 그라우저에 의해 궤도의 양 측면에서 발생하는 측면토양추진력을 예측할 수 있는 수학적 모델을 개발하였고, 개발된 모델은 인공토 조내의 사양토에서 토양의 다짐정도가 다른 두 가지 토양상태에서 길이와 폭이 각각 20cm, 5cm이고, 그라우저 길이가 각각 1cm, 3cm, 5cm인 세 가지 전단판을 이용하여 14.31kPa에서 55.47kPa의 수

직압력 범위에서 실험적으로 검증하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 두 가지 다른 토양상태와 그라우저 길이가 다른 세 가지 전단판을 이용하여 측정된 측면추진력은 두 토양상태에서 모두 수직압력이 증가함에 따라 선형적으로 증가하였고, 또한 그라우저 길이가 길수록 크게 나타났다.

2) 본 연구에서 개발된 모델 및 Bekker 모델에 의해 예측된 측면추진력값을 측정값과 비교한 결과, 본 연구에서 개발한 모델에 의해 예측된 값은 실험구간내에서 측정치와 거의 유사한 경향을 나타내어 측정값과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 Bekker 모델에 의해 예측된 결과는 측정치에 비해 현저히 크게 나타났고, 또한 수직압력에 따른 예측값의 증가율이 측정치에 비해 상대적으로 크게 나타나 수직압력이 증가함에 따라 측정치에 대한 오차도 함께 증가하였다.

3) 전체추진력을 예측하는데 있어, 측면추진력 효과를 고려하지 않은 전통적인 모델(저면추진력)에 의해 예측된 결과는 두 토양상태에서 세 가지 그라우저 길이에 대해 모두 측정치에 비해 낮게 예측되었고, 그라우저 길이가 다른 세 가지 전단판에 대한 측정치와의 최대오차는 토양 I에서 21.53%, 34.15%, 50.34%이고, 토양 II에 대해서는 17.31%, 35.22%, 51.06%로 나타나 측정치와 큰 차이를 나타내었으며 그라우저 길이가 길수록 측정치와의 오차가 증가하였다. 그러나 본 연구에서 개발한 모델에 의해 예측된 결과는 모든 실험조건에서 측정치와 거의 유사한 경향을 나타내었고, 세 가지 전단판에 대한 측정치와의 최대오차는 토양 I에서 19.03%, 5.30%, 7.96%이고, 토양 II에 대해서는 9.55%, 6.35%, 11.12%로서 전통적인 모델에 의해 예측된 결과에 비해 매우 작은 오차를 나타내었고, 측정치와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

4) 이상의 결과로부터, 궤도형 주행장치의 추진력을 보다 정확히 예측하기 위해서는 궤도의 저면에서 산출되는 저면추진력 뿐만 아니라 궤도의 양 측면에서 산출되는 측면추진력을 해석에 포함시켜야 하는 것으로 나타났고, 본 연구에서 개발한 측면추진력 예측 모델은 본 연구에서 수행한 실험조건에 대해서 토양상태와 그라우저 길이에 따라 궤도의 양측면에서 산출되는 측면추진력을 매우 정확히 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 개발한 모델은 궤도형 주행장치의 성능 평가와 설계개선에 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발한 측면추진력 예측모델은 인공토조내의 사양토에서 모형 전단판을 사용하여 특정 실험조건에 대해서 그 유효성을 검증하였다. 따라서 본 예측 모델을 다양한 토양조건에서 운용되는 궤도형 차량에 대한 확대 적용 가능성을 평가하기 위해서는 실제 토양조건에서 운용되는 궤도형 차량에 대한 추가적인 검증이 필요할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. 김팔규 외. 1997. 최신토질역학상론, 학연사.
2. 김상규. 1997. 토질역학, 청문각.
3. 박원엽. 1998. 연성 궤도형차량의 견인성능 예측 모델 개발. 성균관대학교대학원 박사학위논문.
4. Bekker, M. G. 1956. Theory of land locomotion. University of Michigan Press.
5. Bekker, M. G. 1969. Introduction to terrain vehicle system. University of Michigan Press.
6. Park, W. Y. and Lee, K. S. 1998. Prediction of Tractive Performane of Tracked Vehicles using a Computer Simulation Model. Proceedings of the 5th Asia-Pacific Regional Conference of ISTVS. pp. 401-409.
7. Reece, A. R. 1964. The effect of grousers on off-the-road vehicle performance. Journal of Agricultural Engineering Research 9(4):360-371.
8. Wong, J. Y., M. Garber and J. Preston-Thomas. 1984. Theoretical prediction and experimental substantiation of the ground pressure distribution and tractive performance of tracked vehicles. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 198D(15):265-285.
9. Wong, J. Y. 1989. Terramechanics and off-road vehicles. Elsevier Publishers.