

## 경험적 방법에 의한 트랙터의 견인력 예측에 관한 연구

이동훈 이규승 박원엽

### A Study on Traction Prediction of Agricultural Tractor by Empirical Method

D. H. Lee K. S. Lee W. Y. Park

#### Abstract

This study was conducted to investigate the adequacy of the representative empirical models which are developed for predicting the tractive performance of the tractor operating in various soil conditions. Four representative empirical models which are widely used in the traction prediction of tractor were selected through literature review. Four models were Wismer-Luth, Brixius, Dwyer and Hernandez model, which were empirical traction models of a single wheel. The efficacy of four models were confirmed via comparison of the tractions of tractor predicted using the four models with those measured from traction tests which were conducted for two different driving type (2WD and 4WD) of the tractor on two different soil conditions. The results showed that tractions predicted by Brixius' model, especially for slip range under 20% which the operating efficiency of a tractor is very high, were well consistent with the ones measured from traction test better than the tractions predicted by models which are proposed by Wismer-Luth, Dwyer and Hernandez.

**Keywords :** Tractor, Soil conditions, Traction prediction, Empirical method, Traction test

#### 1. 서론

트랙터는 농가에서 가장 많이 이용되고 있는 농업기계 중의 하나로서 논 및 밭 토양 등을 포함한 다양한 토양조건에서 주로 구동 및 견인작업에 이용되고 있다. 따라서 보다 큰 견인성능의 확보를 위해 트랙터의 생산 및 공급은 점차 고풍력의 대형 트랙터로 진행되고 있다. 그러나 트랙터는 연약지 등을 포함하는 다양한 토양조건에서 운용되기 때문에 엔진출력이 충분한 경우에도 타이어-토양 접지면에서 발생하는 토양의 침하 및 파괴현상에 의해 견인작업을 위한 충분한 성능을 발휘할 수 없는 경우가 많다. 즉, 트랙터가 운용되고 있는 토양조건은 트랙터의 견인성능에 제한적인 요소로 작용하며, 이것은 주로 타이어-토양 간의 상호작용에 의해 결정된다. 따라서 트랙터가 운용되고 있는 토양의 특성과 트랙터의 주행장치간의 상호작용에 대한 연구는 트랙터의 성능 예측 및 평

가를 위해 필수적이며, 이러한 연구는 트랙터의 적절한 설계뿐만 아니라 트랙터의 효율적인 선택 및 운용방법을 위해 매우 필요하다.

트랙터의 견인성능을 예측하기 위한 연구는 지형역학(terra-mechanics)이라는 학문분야에서 트랙터를 포함하여 다양한 토양조건에서 운용되는 노외차량(off-road vehicles)의 주행 및 견인성능의 예측 및 평가를 위해 수십 년에 걸쳐 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔으며, 크게 해석적 방법(analysis method)과 경험적 방법(empirical method)으로 나뉘어 발전되어왔다(Wong, 1989, 2001).

해석적 방법은 노외차량의 성능은 주행장치와 토양간의 접촉면에서의 수직응력과 전단응력 분포에 직접적인 관계가 있다는 이론에서 유래되었다(Wong, 1989). 이러한 연구는 Bekker (1956, 1969)에 의해 최초로 학문적 토대가 확립된 이후 많은 연구자들에 의해 발전되어왔다(Wong et al., 1984; Park,

This study was conducted by the research fund supported by Rural Development Administration of Korea. The article was submitted for publication on 2009-07-16, reviewed on 2009-08-26, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2009-09-11. The authors are Dong Hoon Lee, Research Associate, Kyou Seung Lee, Professor, KSAM member, Sungkyunkwan University, and Won Yeop Park, KSAM member, Associate Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Hankyong National University. Corresponding author: W. Y. Park, Associate Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Hankyong National University, Ansung, Gyeonggi, 456-749, Korea; Fax: +82-31-672-5110; E-mail: <pwypark@hanmail.net>.

2000). 그러나 해석적 방법은 노외차량의 성능을 매우 정확히 예측할 수 있는 장점이 있으나 토양-주행장치의 해석에 필요한 토양변수를 측정하는데 있어 매우 복잡하고 시간 및 비용이 많이 소요되는 단점이 있어 현장에서 쉽게 노외차량의 성능을 예측하는데 많은 어려움이 있다(Wong, 1989).

경험적 방법은 주어진 토양 조건에 대해 많은 성능 실험을 수행하여 토양특성과 주행장치간의 경험적 성능 관계를 유도하여 차량의 성능을 예측하는 방법으로서 차량의 주행성(trafficability)과 기동성(mobility)을 평가하기 위한 간단한 방법을 제공하기 위해 개발된 원추관입시험(cone penetrometer technique)에 기초를 둔다. 이 방법은 토양변수로서 원추지수(cone index; CI)를 이용하는 방법으로서 미육군 수로시험소(U.S. Army Waterways Experimental Station; WES)에 의해 개발되었다(Freitag, 1965; Wong, 2001). 경험적 방법은 노외차량의 성능 예측에 있어 해석적인 방법에 비해 예측 정확도가 떨어지는 단점이 있으나 실험적 방법에 사용되는 토양변수인 원추지수를 현장에서 간단히 측정할 수 있을 뿐만 아니라 노외차량의 성능을 원추지수 하나만을 이용하여 간단히 예측할 수 있는 장점을 가지고 있어 현재 노외차량의 성능 예측에 가장 널리 사용되고 있으며, 특히 많은 연구자들에 의해 트랙터의 견인성능 예측을 위한 다양한 경험식이 개발되어 사용되고 있다(Wismer et al., 1974; Dwyer, 1984; Brixius, 1987; Catalan et al., 2008; Sahu et al., 2008; )

그러나 트랙터의 견인성능을 예측하기 위해 개발된 다양한 경험식들은 각각 다른 조건하에서 수행된 실험적 결과로부터 유도된 식으로서 모델별로 트랙터의 견인력 예측 결과가 다르게 나타나기 때문에 이들 경험적 모델들을 국내에서 트랙터의 견인성능을 예측하는데 직접적으로 이용하기 위해서는 다양한 경험적 모델들에 대한 타당성 조사가 필요하다.

본 연구에서는 국내의 토양특성과 트랙터의 제원에 따른 트랙터의 적정 운용방법을 제공하기 위한 기초 연구로서 현재 트랙터의 견인성능 예측에 널리 이용되고 있는 대표적인 경험적 모델들을 조사하고, 실험적 검증을 통해 이들 경험적 모델들에 대한 타당성 분석을 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 견인력 모델

문헌조사를 통해 토양특성과 트랙터의 제원으로부터 트랙터의 견인성능 예측에 가장 적합한 것으로 판단되는 4개의 경험적 모델을 선정하였다.

선정된 모델은 Wismer-Luth(1974), Brixius(1987), Dwyer(1984) 및 Hernandez(1998)가 제안한 4개의 경험적 모델로서 4개의 모델 모두 토양변수로서 측정이 용이한 원추지수 하나만을 이용하며, 원추지수와 단일 타이어(single tire) 변

수를 고려하여 유도된 무차원 차륜지수(wheel numeric)를 토대로 단일차륜의 견인성능 척도인 총견인계수(gross traction coefficient, GT/W), 운동저항계수(motion resistance coefficient, MR/W) 및 순견인계수(net traction coefficient, NT/W or DP/W)를 예측할 수 있는 경험적 관계식이다. 4개의 단일차륜에 대한 경험적 견인력 예측 모델은 표 1과 같다.

표 1에 나타낸 4개의 견인력 예측 모델은 모두 정하중(static load)하에서 단일차륜에 대한 견인성능을 예측하는 모델로서 이들 모델로부터는 트랙터의 견인성능을 직접적으로 예측할 수 없다. 즉, 트랙터의 전체 하중은 전륜축(front wheel axle)과 후륜축(rear wheel axle)에 모두 분포하고, 트랙터 작업 시 발생하는 견인력 또는 경운저항 등에 의해 전륜축 하중이 후륜축으로 이동되는 하중전이(weight transfer) 효과에 의한 동적하중(dynamic load)의 변화가 나타난다. 따라서 트랙터의 견인성능을 예측하기 위해서는 표 1에 나타낸 단일차륜에 대한 견인력 모델에 트랙터의 전륜과 후륜의 4개의 차륜과 하중전이 효과에 의한 동적하중의 변화를 고려한 트랙터의 견인력 예측 모델로 수정, 보완되어야 한다.

전·후륜 차축에 작용하는 하중은 견인력이 있을 경우 트랙터의 하중전이 효과에 의해 변하는 값으로서 트랙터의 견인력이 NT이고, 견인력이 작용하는 히치점의 높이가 h일 경우 하중전이를 고려한 트랙터의 전·후륜 차축의 하중은 식 (1)과 (2)와 같이 나타난다.

$$W_{Pr} = W_f - \left( \frac{NT}{L} \cdot h \right) \quad (1)$$

$$W_{Pr} = W_r + \left( \frac{NT}{L} \cdot h \right) \quad (2)$$

여기서  $W_f$ 와  $W_r$ 은 각각 정적 상태에서 트랙터의 전·후륜축에 작용하는 하중이고,  $W_{Pr}$ 와  $W_{Pr}$ 는 하중전이에 의한 트랙터의 전·후륜축에 작용하는 동하중, h는 견인력 작용점의 높이, L은 앞·뒤 차축간의 거리(wheelbase)를 나타낸다.

또한 트랙터의 구동방식(2륜구동, 4륜구동)은 견인성능에 크게 영향을 미치기 때문에 트랙터의 견인성능 예측 모델은 2가지 구동방식을 고려하여 개발되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 선정된 4개의 단일차륜에 대한 견인력 예측 모델을 트랙터의 하중전이 효과와 구동방식을 고려하여 식 (3)과 같이 4개의 트랙터 견인성능 예측 모델로 수정, 개발하였으며, 개발된 4개의 트랙터 견인력 예측 모델은 표 2와 같다.

$$NT = GT_{Pr} + GT_{Pr} - MR_f - MR_r \quad (3)$$

여기서 NT는 하중전이를 고려한 트랙터의 견인력(net traction),  $GT_{Pr}$ 와  $GT_{Pr}$ 는 하중전이를 고려한 트랙터의 전륜과 후륜의 총견인력,  $MR_{Pr}$ 과  $MR_{Pr}$ 은 각각 하중전이를 고

**Table 1** Traction prediction models for single wheel

Model	Traction Equations for single wheel	Parameters
Wismer-Luth	$\frac{GT}{W} = 0.75 (1 - e^{-0.3 C_n S})$ $\frac{MR}{W} = \frac{1.2}{C_n} + 0.04$ $\frac{NT}{W} = 0.75 (1 - e^{-0.3 \cdot C_n \cdot S}) - \left( \frac{1.2}{C_n} + 0.04 \right)$	GT : gross traction MR : motion resistance NT : net traction $\frac{GT}{W}$ : gross traction coefficient $\frac{MR}{W}$ : motion resistance coefficient $\frac{NT}{W}$ : net traction coefficient
Brixius	$\frac{GT}{W} = 0.88 (1 - e^{-0.1 B_n}) (1 - e^{-7.5 S}) + 0.04$ $\frac{MR}{W} = \frac{1}{B_n} + 0.04 + \frac{0.5 s}{\sqrt{B_n}}$ $\frac{NT}{W} = 0.88 (1 - e^{-0.1 B_n}) (1 - e^{-7.5 S}) - \frac{1}{B_n} - \frac{0.5 s}{\sqrt{B_n}}$	W : tire axle load S : slip (0-1) b : tire section width d : overall tire diameter h : tire section height $\delta$ : tire deflection CI : cone index
Dwyer	$\frac{GT}{W} = \left( 0.796 - \frac{0.92}{N_{CI}} \right) (1 - e^{-(4.838 + 0.061 N_{CI}) S})$ $\frac{MR}{W} = 0.049 + \frac{0.287}{N_{CI}}$ $\frac{NT}{W} = \left( 0.796 - \frac{0.92}{N_{CI}} \right) (1 - e^{-(4.838 + 0.061 N_{CI}) S}) - 0.049 + \frac{0.287}{N_{CI}}$	$C_n, N_{CI}$ : wheel numeric $C_n = \frac{CI \cdot bd}{W}$ $N_{CI} = \frac{CI \cdot bd}{W} \sqrt{\frac{\delta}{h}} \frac{1}{1 + \frac{b}{2d}}$
Hernandez	$\frac{GT}{W} = 0.75 (1 - e^{-A_1 C_n S})$ $\frac{MR}{W} = W \frac{1.2}{C_n} + 0.04$ $\frac{NT}{W} = 0.75 (1 - e^{-A_1 C_n S}) - \left( \frac{1.2}{C_n} + 0.04 \right)$	$B_n$ : mobility number $B_n = \frac{CI \cdot bd}{W} \left( \frac{1 + 5 \frac{\delta}{h}}{1 + 3 \frac{b}{d}} \right)$ $A_1$ : slip-dependant parameter $A_1 = \frac{182}{CI^{1.0231}}$

려한 트랙터의 전륜과 후륜의 운동저항을 나타낸다. 식 (3)에서 후륜구동(2WD)인 경우에는  $GT_{Pf} = 0$  이다.

한편, 식 (3)에서 우변의 운동저항 및 총견인력 항에는 하중전이를 고려한 전·후륜의 축하중  $W_{Pf}$  와  $W_{Pr}$  를 포함하고 있으며, 이 들 축하중 값들은 견인력 NT의 함수이다. 따라서 식 (3)의 좌변과 우변에는 모두 견인력 NT의 항을 포함하고 있기 때문에 견인력 NT는 반복법을 이용하여 계산하였다. 즉, 먼저 견인력 NT의 초기값을 가정한 후, 가정한 NT를 식 (3)의 우변에 대입하여 계산한 견인력 NT가 가정한 NT와 일치할 때까지 반복 계산하여 트랙터의 견인력을 결정하였다.

#### 나. 견인력 실험

##### 1) 실험 토양

견인력 실험을 수행한 실험토양은 경기도 안성시 환경대학교 교내에 위치한 길이 50 m, 폭 20 m의 토양이며 실험 목적을 위해 강도가 다른 2가지 토양으로 구성하였다.

견인력실험을 수행하기 전에 토양의 원추지수, 걸보기밀도, 수분함수율 등 실험토양의 물리적 특성을 측정하였다. 걸보기밀도는 실험토양 내의 임의의 4곳에서 100 cc 용량의 토양채취관(EVERWELL 332, Daiki, Japan)을 사용하여 토양 샘플을 채취하여 구하였고, 토양의 수분함수율은 토양채취관에 의해 수집된 토양샘플을 오븐 건조법에 의해 구하였다. 또한, 실험 토양의 원추지수는 SR-2 모델의 원추관입시험기(DIK-5521, Daiki, Japan)를 이용하여 실험토양내의 임의의 5곳에서 관입 깊이별 원추 관입저항을 측정한 후 0~15 cm 깊이까지의 평균 원추지수를 구하였다. 한편 이외에 SR-2 모델의 토양전단장치를 이용하여 실험토양의 점착력(cohesion), 내부마찰각(internal friction angle), 부착력(adhesion), 외부마찰각(soil-metal adhesion) 등을 측정하였다. 표 3에 실험토양의 토양의 물리적 특성을 나타내었다.

##### 2) 견인력 실험 장치

견인력 실험장치는 시험트랙터(test tractor)와 시험트랙터

**Table 2** Traction equations for tractive performance prediction of tractor

Model	Traction equations for tractor	Parameters
Wismer-Luth	$GT_{Pf} = W_{Pf} \left[ 0.75 (1 - e^{-0.3 C_{ipf} S}) \right]$ $GT_{Pr} = W_{Pr} \left[ 0.75 (1 - e^{-0.3 C_{ipr} S}) \right]$ $MR_{Pf} = W_{Pf} \left( \frac{1.2}{C_{nPf}} + 0.04 \right)$ $MR_{Pr} = W_{Pr} \left( \frac{1.2}{C_{nPr}} + 0.04 \right)$ $C_{nPf} = \frac{CI \cdot b_f \cdot d_f}{W_{Pf}/2}, \quad C_{nPr} = \frac{CI \cdot b_r \cdot d_r}{W_{Pr}/2}$	NT : net traction of tractor $NT = GT_{Pf} + GT_{Pr} - MR_f - MR_r$ $GT_{Pf}, GT_{Pr}$ : gross traction of front and rear wheel $GT_{Pf} = 0$ for 2WD $MR_{Pf}, MR_{Pr}$ : motion resistance of front and rear wheel S : slip (0-1)
Brixius	$GT_{Pf} = W_{Pf} \left[ 0.88 (1 - e^{-0.1 N_{Bpf}}) (1 - e^{-7.5 S}) + 0.04 \right]$ $GT_{Pr} = W_{Pr} \left[ 0.88 (1 - e^{-0.1 N_{Bpr}}) (1 - e^{-7.5 S}) + 0.04 \right]$ $MR_{Pf} = W_{Pf} \left[ \frac{1}{B_{nPf}} + 0.04 + \frac{0.5 S}{\sqrt{B_{nPf}}} \right]$ $MR_{Pr} = W_{Pr} \left[ \frac{1}{B_{nPr}} + 0.04 + \frac{0.5 S}{\sqrt{B_{nPr}}} \right]$ $B_{nPf} = \frac{CI b_f d_f}{W_{Pf}/2} \left( \frac{1 + 5 \frac{\delta_f}{h_f}}{1 + 3 \frac{b_f}{d_f}} \right), \quad B_{nPr} = \frac{CI b_r d_r}{W_{Pr}/2} \left( \frac{1 + 5 \frac{\delta_r}{h_r}}{1 + 3 \frac{b_r}{d_r}} \right)$	$W_{Pf}, W_{Pr}$ : dynamic load acting on front and rear wheel of tractor by weight transfer $W_{Pf} = W_f - \left( \frac{NT}{L} \right) \cdot h$ $W_{Pr} = W_r + \left( \frac{NT}{L} \right) \cdot h$ $W_f, W_r$ : static loads acting on front and rear wheel of tractor h : height of hitch point L : wheelbase
Dwyer	$GT_{Pf} = W_{Pf} \left[ \left( 0.796 - \frac{0.92}{N_{CIPf}} \right) (1 - e^{-(4.838 + 0.061 N_{CIPf}) S}) \right]$ $GT_{Pr} = W_{Pr} \left[ \left( 0.796 - \frac{0.92}{N_{CIPr}} \right) (1 - e^{-(4.838 + 0.061 N_{CIPr}) S}) \right]$ $MR_{Pf} = W_{Pf} \left( 0.049 + \frac{0.287}{N_{CIPf}} \right)$ $MR_{Pr} = W_{Pr} \left( 0.049 + \frac{0.287}{N_{CIPr}} \right)$ $N_{CIPf} = \frac{CI b_f d_f}{W_{Pf}/2} \sqrt{\frac{\delta_f}{h_f}} \frac{1}{1 + \frac{b_f}{2d_f}}, \quad N_{CIPr} = \frac{CI b_r d_r}{W_{Pr}/2} \sqrt{\frac{\delta_r}{h_r}} \frac{1}{1 + \frac{b_r}{2d_r}}$	$C_{nPf}, C_{nPr}$ : wheel numeric of front and rear wheel by dynamic load $N_{CIPf}, N_{CIPr}$ : wheel numeric of front and rear wheel by dynamic load $B_{nPf}, B_{nPr}$ : mobility number of front and rear wheel by dynamic load $b_f, b_r$ : tire section width $d_f, d_r$ : overall tire diameter $h_f, h_r$ : tire section height $\delta_f, \delta_r$ : tire deflection CI : cone index $A_1$ : slip-dependant parameter $A_1 = \frac{182}{CI^{1.0231}}$
Hernandez	$GT_{Pf} = W_{Pf} \left[ 0.75 (1 - e^{-A_1 C_{ipf} S}) \right]$ $GT_{Pr} = W_{Pr} \left[ 0.75 (1 - e^{-A_1 C_{ipr} S}) \right]$ $MR_{Pf} = W_{Pf} \left( \frac{1.2}{C_{nPf}} + 0.04 \right)$ $MR_{Pr} = W_{Pr} \left( \frac{1.2}{C_{nPr}} + 0.04 \right)$ $A_1 = \frac{182}{CI^{1.0231}}$	NT : net traction of tractor $NT = GT_{Pf} + GT_{Pr} - MR_f - MR_r$ $GT_{Pf}, GT_{Pr}$ : gross traction of front and rear wheel $GT_{Pf} = 0$ for 2WD $MR_{Pf}, MR_{Pr}$ : motion resistance of front and rear wheel S : slip (0-1)

**Table 3** Physical properties of experimental soil

Soil Type	Cohesion (kPa)	Internal frictional angle (deg.)	Soil-metal frictional angle (deg.)	Soil-metal adhesion (kPa)	Average Cone Index (kPa)	Moisture content (d. b.) (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )
					0-15cm		
Soil I	8.2188	37.005	16.757	3.2522	670	17.49	1754
Soil II	11.49	29.687	19.157	6.7838	528	17.29	1748

에 견인부하를 가해주기 위한 부하트랙터(load tractor)로 구성하였다. 시험트랙터는 본 연구의 실험 목적에 적합하도록 슬립과 견인력을 측정할 수 있는 장치를 구성하였고, 부하트랙터에는 견인력 실험시 시험트랙터에 부착된 각종 센서들로

부터 측정된 신호를 수집하기 위한 데이터 수집장치를 구성하였다.

견인력 실험을 위해 사용된 시험트랙터와 부하트랙터는 각각 45마력 트랙터(LT470D, LS Mtron, Korea)와 52마력 트

랙터(TA5240, Tong Yang, Korea)를 이용하였다. 그림 1과 그림 2는 각각 실험에 사용된 시험트랙터와 부하트랙터를 보여주고 있고, 표 4에 시험트랙터 및 부하트랙터의 제원을 나타내었다.



Fig. 1 Test tractor.



Fig. 2 Load tractor.

Table 4 Specifications of test tractor and load tractor

Item	Specifications	
	LT470D	TA5240
Model	LT470D	TA5240
Vehicle Length (mm)	3655	3670
Vehicle Width (mm)	1644	1670
Vehicle Height (mm)	2410	2400
Wheel base (mm)	1850	2040
Front Tire Size (mm)	9.5-20-6PR	8.3-20-6PR
Rear Tire size (mm)	13.6-28-6PR	14.9-28-8PR
Max. Engine Power (PS/rpm)	45/2600	52/2500
Vehicle Weight (kN)	23.64	22.75
Static Front Weight (kN)	10.17	-
Static Rear Weight (kN)	13.47	-
Height of Drawbar point (mm)	400	-

견인력 측정장치는 시험트랙터의 후부(rear part)와 부하트랙터 전부(front part)에 강선(wire rope)을 연결한 후 그 사이에 (주)봉신의 2 ton 용량의 하중변환기(loadcell)를 부착하여 하중변환기에 나타나는 인장력을 측정할 수 있도록 구성하였다.

견인력 실험시 시험트랙터의 슬립을 측정하기 위하여 시험트랙터의 이론주행거리와 실제 주행거리를 측정할 수 있는 장치를 구성하였다. 이론 주행거리 측정 장치는 시험트랙터의 구동축에 로타리엔코더를 설치하여 트랙터의 구동시 차륜의 실제 회전수를 측정한다. 로타리엔코더는 구동축과 로타리엔코더와의 회전편심에 의한 손상을 방지하기 위해 구동축을 가공한 후 연성커플링(flexible coupling)을 통해 연결하였다. 한편, 시험트랙터의 실제 주행거리 측정 장치는 시험차량의 후부에 5륜(5th wheel)을 장착하여 5륜의 주행거리를 측정할 수 있도록 하였다. 5륜은 이론주행거리 측정장치와 같은 방법으로 5륜의 축에 로타리엔코더를 부착하였다. 시험트랙터의 구동축 및 5륜에 사용된 로타리엔코더는 구동축이 1회전할 때마다 1024개의 펄스를 출력하는 일본 Nemicon사의 OEW-1024-2M을 사용하였다. 그림 3과 4는 트랙터의 이론 및 실제 주행거리 측정을 위해 제작한 측정 장치의 모습을 보여주고 있다.



Fig. 3 Device for measuring the theoretical travel distance.



Fig. 4 5th wheel for measuring the real travel distance.

3) 실험 방법

가) 실험인자

견인력 실험은 강도가 다른 2가지 토양조건(토양 1, 토양 2)에서 트랙터의 2가지 구동방식(2WD, 4WD)에 대해 트랙터의 견인력 실험을 수행하였다. 견인력실험으로부터 측정된 변수는 시험트랙터의 견인력과 슬립 등이며, 측정된 변수들로부터 2가지 토양조건과 2가지 구동방식에 대하여 트랙터의 슬립-견인력 관계를 측정하였다.

견인력 측정은 시험트랙터의 후미 견인고리와 부하트랙터의 전면 견인고리에 각각 강선을 연결하고 그 사이에 인장력을 측정할 수 있도록 하중변환기를 부착한 후, 시험차량을 구동하여 하중변환기에 나타나는 인장력을 측정함으로써 구하였다. 견인력과 슬립의 관계를 구하기 위하여 견인력 측정은 먼저 부하트랙터를 중립에 놓은 상태에서 시험트랙터의 구동력에 의해 하중변환기에 나타난 견인력을 측정하였고, 이후 부하트랙터의 제동력을 단계적으로 변화시켜 가며 나타나는 시험트랙터의 슬립과 견인력을 측정하여 슬립에 따른 견인력을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

4개의 단일차륜에 대한 경험적인 견인력 예측 모델로부터 수정된 4개의 트랙터의 견인성능 예측 모델들에 대한 타당성 분석을 수행하였다. 타당성 분석을 위해 전술한 2가지 토양 조건과 트랙터의 2가지 구동방식에 대해 측정된 슬립-견인력 결과를 전술한 표 2에 나타난 4개의 트랙터 견인력 예측 모델에 의해 예측된 결과와 비교하였다.

2가지 토양조건과 2가지 구동방식에 대해 측정된 트랙터의 슬립-견인력 관계는 모든 실험 조건에 대해 지수함수적인 일정한 경향을 나타내었으나 견인력 실험시 토양조건에 불균일, 트랙터의 진동 및 기타 실험적 요인 등에 의해 일정 슬립에 대해서도 견인력 측정치가 넓게 분포하여 측정치와 4개의 모델에 의한 예측치를 직접적으로 비교하여 차이를 구명하기에는 어려움이 많았다. 따라서 측정치와 예측치의 비교의 편의를 위해 견인력 측정치는 일반적으로 연약지에서의 슬립-견인력 관계를 나타내는 데 많이 이용되고 있는 Janosi와 Hanamo(1961) 식을 변형한 식 (4)를 이용하여 측정치를 curve fitting한 회귀곡선을 이용하였다.

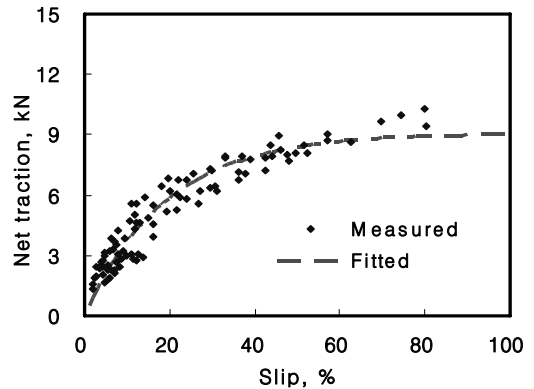
$$NT = A (1 - e^{-BS}) \tag{4}$$

where, NT : Net traction, kN

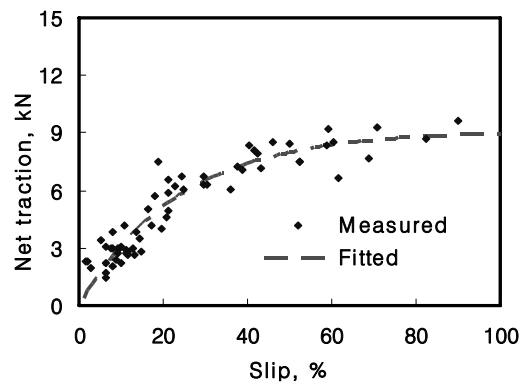
S : Slip, decimal

A, B : Constant

그림 5의 (a)는 토양 1에서 2륜구동에서의 트랙터의 슬립에 따른 견인력 관계로서 점(point)은 측정치를 나타내고, 점선은 식 (5)를 이용하여 측정치를 fitting한 회귀식으로부터 유도된 결과를 보여주고 있다. 또한 그림 5의 (b)와 (c)는 각각 토양 2에서 2륜구동과 4륜구동 상태에서 측정된 측정치와 측정치로부터 유도된 회귀곡선을 나타내고 있다. 그림 5의 (a)~(c)의 결과는 식 (5)의 회귀식으로부터 유도된 회귀곡선이 전체 슬립 구간에서 견인력 측정치를 매우 잘 나타내는 것으로 보여지고 있다. 한편 그림 5의 (a)~(c)에 대한 회귀식에 대한 상수값과 표준오차(standard error) 및 상관계수(correlation coefficient)는 표 5에 나타내었다.



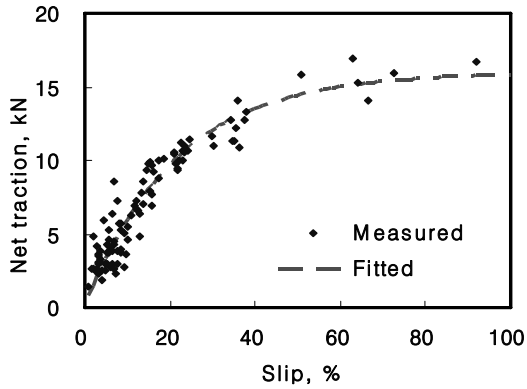
(a) soil 1 and 2WD conditions



(b) soil 2 and 2WD conditions

Table 5 Curve fitting coefficient

Experimental conditions		Regression coefficient		Standard error (S)	Correlation coefficient (R)
		A	B		
Soil 1	2WD	9.0823167	0.051581667	0.75830193	0.95130870
	4WD	9.1256648	0.041794609		
Soil 2	2WD	15.993174	0.046469467	1.26237429	0.94823579
	4WD				



(c) soil 2 and 4WD conditions

**Fig. 5** Measured and fitted net tractions with slip for 4WD tractor at soil 2.

그림 6은 토양 1에서 2륜구동 상태에 대한 트랙터의 견인력 측정치와 4개의 모델에 의한 예측치를 나타낸 결과이다.

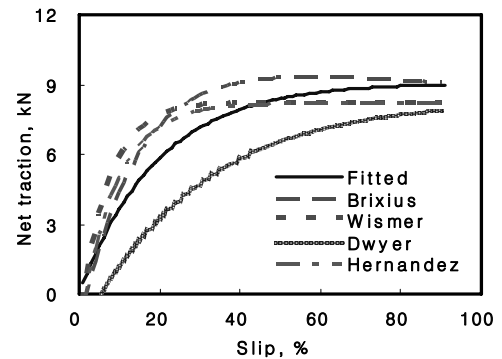
그림 6의 결과는 Dwyer의 모델에 의한 견인력 예측치는 전체 슬립구간에서 측정치에 비해 상대적으로 낮게 예측되는 경향을 나타내었고, Brixius, Wismer & Luth 및 Hernandez의 모델은 Dwyer의 모델에 비해 상대적으로 전체 슬립구간에서 측정치와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 한편, Dwyer의 모델 이외의 세 개의 모델을 비교해보면 Brixius 모델은 Wismer & Luth 및 Hernandez의 모델에 비해 슬립 60% 이상의 고슬립과 슬립 20% 이내의 저슬립 구간에서 두 모델에 비해 상대적으로 측정치와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Brixius 모델이 다른 모델에 비해 최대 견인력을 잘 예측할 수 있으며, 또한 일반적으로 트랙터의 효율이 가장 높은 슬립 10~20% 범위와 트랙터 작업이 가장 많이 이루어지는 슬립 20% 이내의 저슬립에서 측정치와 가장 잘 일치하는 Brixius 모델이 다른 3개의 모델에 비해 측정치와 가장 잘 일치하는 것으로 판단된다.

그림 7은 토양 2에서 2륜구동 상태에 대한 트랙터의 견인력 측정치와 4개의 모델에 의한 예측치를 나타낸 결과로서 그림 6의 결과와 유사하게 Brixius 모델이 전체 슬립구간에서 다른 세 개 모델에 비해 상대적으로 측정치와 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 특히 슬립 20% 이내의 저슬립 구간에서 측정치와의 일치도가 상대적으로 높게 나타났다.

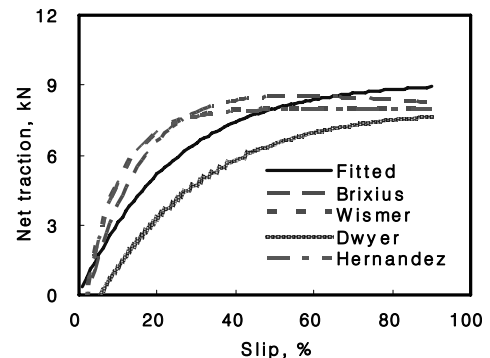
그림 8은 토양 2에서 4륜구동 상태에서 트랙터의 견인력 측정치와 4개의 모델에 의한 예측치를 나타낸 결과로서, 이것은 그림 6 및 7의 결과와는 달리 Dwyer의 모델이 다른 세 모델에 비해 전체 슬립 구간에서 측정치와 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. 한편 Brixius 모델은 Wismer-Luth 및 Hernandez 모델에 비해서는 상대적으로 측정치와 잘 일치하고, Dwyer의 모델에 비해서는 측정치와의 일치도가 상대적으로 떨어지나 슬립 20% 이내의 저슬립 구간에서는 Dwyer

의 모델에 비해 측정치와의 일치도가 크게 떨어지지 않는 것으로 나타났다.

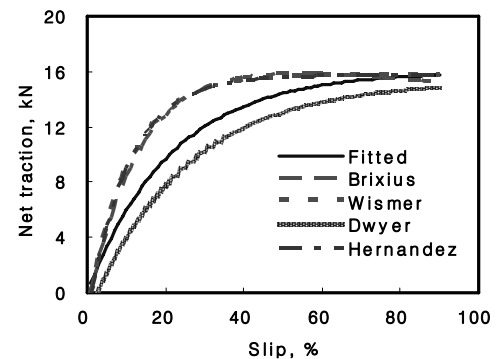
이상의 결과로부터 본 실험이 수행된 조건하에서 4가지 견인력 모델에 의한 트랙터의 견인력 예측 정도는 전체적으로 Brixius 모델이 가장 높은 것으로 나타났으며, 특히 실제 트랙터 작업이 수행되는 슬립 20% 이내의 구간에서는 다른 모델에 비해 더욱 정확도가 높은 것으로 나타났다. 따라서 4개의 모델 중 Brixius 모델이 본 연구가 수행된 실험조건하에서 트랙터의 견인성능 예측 모델로서 가장 적절한 것으로 판단되었다.



**Fig. 6** A Comparison between the measured and predicted net tractions for 2WD tractor at soil 1.



**Fig. 7** A Comparison between the measured and predicted net tractions for 2WD tractor at soil 2.



**Fig. 8** A Comparison between the measured and predicted net tractions for 4WD tractor at soil 2.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 국내의 토양특성과 트랙터의 체원에 따른 트랙터의 적정 운용방법을 제공하기 위한 기초 연구로서 현재 트랙터의 견인성능 예측에 널리 이용되고 있는 대표적인 경험적 모델들을 조사하였고, 실험적 검증을 통해 이들 경험적 모델들에 대한 타당성 분석을 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 문헌연구를 통해 트랙터의 견인성능 예측에 가장 적합한 경험적 모델로서 판단되는 4개의 단일차륜에 대한 견인성능을 예측 모델을 선정하였으며, 선정된 모델은 Wismer-Luth, Brixius, Dwyer 및 Hernandez의 모델이다.
- (2) 4개의 단일차륜에 대한 견인력 예측 모델은 트랙터의 하중전이 효과와 구동방식을 고려하여 4개의 트랙터 견인성능 예측 모델로 수정, 개발하였다.
- (3) 개발된 4개의 트랙터 견인성능 예측 모델은 2가지 토양조건과 2가지 구동방식에 따른 트랙터의 견인력 실험 결과와의 비교를 통해 모델의 타당성을 조사하였다.
- (4) 견인력 실험에 의해 측정된 견인력과 4개의 모델에 의해 예측된 견인력을 비교한 결과, Brixius 모델이 다른 세 모델에 비해 트랙터의 견인력을 가장 잘 예측하는 것으로 나타났으며, 특히 실제 트랙터 작업이 수행되는 슬립 20% 이내의 구간에서는 다른 모델에 비해 더욱 정확도가 높은 것으로 나타났다.
- (5) 이상의 결과로부터 Brixius 모델이 본 연구가 수행된 실험조건하에서 트랙터의 견인성능 예측 모델로서 가장 적절한 것으로 판단되었다.

#### 참고 문헌

1. Bekker, M. G. 1956. Theory of Land Locomotion. University of Michigan Press, Ann Arbor.
2. Bekker, M. G. 1969. Introduction to Terrain-Vehicle Systems. University of Michigan Press, Ann Arbor.
3. Brixius, W. W. 1987. Traction prediction equations for bias ply tires. ASAE Paper No. 87-1622.
4. Catalan, H., P. Linares and V. Mendez. 2008. Tractor\_PT: A traction prediction software for agricultural tractors. Computer and Electronics in Agriculture 60:289-295.
5. Dwyer, M. J. 1984. The Tractive performance of wheeled vehicles. Journal of Terramechanics 21(1):19-34.
6. Freitag, D. R. 1965. A dimensional analysis of the performance of pneumatic tires on soft soils. Technical Report No. 3-688, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, MS.
7. Janosi, Z. and B. Hanamoto. 1961. The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soils. Proceeding of the 1st International Conference on the Mechanics of Soil-Vehicle Systems. Edizioni Minerva Tecnica, Torono, Italy.
8. Park, W. Y. and K. S. Lee. 2000. Prediction of tractive performance of wheeled vehicles on soft terrains. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery 25(5):359-368. (In Korean)
9. Sahu, R. K. and H. Raheman. 2008. A decision support system on matchung and field performance prediction of tractor-implement system. Computer and Electronics in Agriculture 60:76-86.
10. Wismer, R. D., H. J. Luth. 1974. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. Transactions of the ASAE 17(1):8-14.
11. Wong, J. Y. 1989. Terramechanics and Off-Road Vehicles. Elsevier.
12. Wong, J. Y. 2001. Theory of Ground Vehicles. John Wiley & Sons.