

트랙터의 견인성능 예측 프로그램 개발

박원엽^{1*} · 이상식²¹한경대학교 기계공학과, ²관동대학교 의료공학과

Development of a Tractive Performance Prediction Program of Tractors

Won Yeop Park^{1*}, Sang Sik Lee²¹Dept. of Mechanical Engineering, Hankyong National University, Anseong, Korea,²Dept. of Biomedical Engineering, Kwandong University, Gangneung, KoreaReceived: May 15th, 2012; Revised: June 22th, 2012; Accepted: June 29th, 2012

Abstract

In this study, we developed a simulation program for the prediction of tractive performance of a tractor, by applying a widely used empirical model for tractive performance prediction of single tire, Brixius. The tractive performance prediction program can readily predict and estimate tractive performance according to various soil conditions and different specifications of tractors. The program was developed with the considerations of tractor's specification-related parameters (e.g., weight, tire size, and wheelbase of the tractor), a soil parameter (i.e., cone index which represents the soil strength), and operating conditions of the tractor (e.g., theoretical speed and driving types such as 2WD and 4WD). Also, the program was designed to provide tractive performance prediction results of tractors such as gross traction, motion resistance, net traction, and tractive efficiency, in the form of not only numerical values but also graphical visualization. To evaluate the feasibility of the program, we input three different soil conditions (which have different cone indexes each other) and tractor operating conditions to the program and analyzed the tractive performance from each input condition. From the analysis, it can be concluded that the developed program can be effectively utilized to predict the tractive performance under various soil conditions and driving types of tractors with different specifications.

Keywords: Driving type, Empirical method, Soil conditions, Tractive performance, Tractor

서론

트랙터는 농가에서 가장 많이 이용되고 있는 농업기계 중의 하나로서, 논, 밭 등을 포함한 다양한 토양 조건에서 견인작업과 트랙터의 동력을 이용한 부차작업기의 구동작업에 주로 이용된다(Lee et al., 2009). 따라서 트랙터의 견인성능은 트랙터의 성능 척도의 가장 중요한 인자 중의 하나이다.

그러나 트랙터는 연약지 등을 포함하는 다양한 토양조건에서 운용되고 있기 때문에 동일한 트랙터에 대해서도 트랙터가 운

용되는 토양조건에 따라 견인성능이 다르게 나타난다. 즉 트랙터의 견인성능은 트랙터의 제원뿐만 아니라 트랙터가 운용되고 있는 토양조건에 크게 영향을 받는다. 따라서 트랙터의 설계, 효율적인 선택 및 운용을 위해서는 트랙터의 제원과 트랙터가 운용되는 토양조건에 따른 트랙터의 견인성능을 예측하고 평가할 수 있는 방법의 개발이 매우 필요하다.

트랙터의 견인성능을 예측하기 위한 연구는 지형역학(terramechanics)이라는 학문분야에서 트랙터를 포함하여 다양한 토양조건에서 운용되는 로외차량(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

***Corresponding author:** Won Yeop Park

Tel: +82-31-670-5111; Fax: +82-31-670-5118

E-mail: wypark@hknu.ac.kr

(Wong, 1989; Lee et al., 2009).

두 가지 방법은 각각 트랙터의 견인성능을 예측하는데 있어 상대적인 장·단점을 갖고 있다. 이들 중 경험적 방법은 해석적 방법에 비해 상대적으로 예측의 정확도가 떨어지는 단점은 있으나 원추지수(cone index)라는 하나의 토양변수만을 이용하여 단일 타이어(single tire)의 추진력, 운동저항 등을 간단히 예측할 수 있으며, 또한 원추지수는 휴대가 용이한 간단한 장비에 의해 현장에서 쉽게 측정할 수 있는 장점으로 인해 현재 트랙터를 포함한 로외차량의 견인성능 예측에 널리 이용되고 있다.

트랙터의 견인성능 예측을 위한 경험적 방법은 많은 연구자들에 의해 다양한 경험식이 개발되어 사용되고 있다(Freitag, 1965; Brixius, 1987; Catalan et al., 2008; Dwyer, 1984; Sahu et al., 2008; Wismer et al., 1972). 그러나 트랙터의 견인성능을 예측하기 위해 개발된 다양한 경험식들은 단일 타이어를 대상으로 각각 다른 실험조건하에서 수행된 실험적 결과로부터 유도된 경험식이기 때문에 모델별로 예측 결과가 다르게 나타나고, 또한 이들 모델을 이용하여 트랙터의 견인성능을 예측하기 위해서는 경험식들에 대한 일부 수정 및 보완을 통해 트랙터에 적용함으로써 가능하다.

따라서 본 연구의 목적은 단일 타이어의 견인성능 예측을 위해 개발된 다양한 경험적 모델들 중 트랙터의 견인성능 예측에 가장 적합한 것으로 판단되는 경험식을 이용하여 토양특성과 트랙터의 제원에 따라 트랙터의 견인성능을 쉽게 예측, 평가할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하는데 있다.

견인성능 예측 모델

본 연구의 선행연구(Lee et al., 2009)로서 문헌조사를 통해 토양특성과 트랙터의 제원으로부터 트랙터의 견인성능 예측에 가장 적합한 것으로 판단되는 4개의 경험적 모델을 선정하여 후국 내 토양조건에서 트랙터를 이용하여 수행한 견인력 측정치를 이들 모델들을 이용한 예측치와의 비교를 통해 Brixius(1987) 모델이 트랙터의 견인성능 예측에 가장 적합한 것으로 판단되었다(Lee et al., 2009). 따라서 본 연구에서는 트랙터의 견인성능 예측 프로그램을 개발하는데 있어 Brixius 모델을 이용하였다.

Brixius는 Wismer and Luth(1972)에 의해 제안된 경험식을 수정하여 점착 및 마찰특성을 갖고 있는 토양(cohesive-frictional soils)에서 운용되는 바이어스 타이어의 견인성능을 예측할 수 있는 경험식을 개발하였다. Brixius 모델은 토양변수로서 쉽게 측정이 가능한 원추지수와 단일 타이어 변수를 고려하여 유도된 무차원 기동성수(mobility number)를 토대로 단일차륜의 견인성능 척도인 추진력계수(gross traction coefficient, GT/W), 운동저항계수(motion resistance coefficient, MR/W), 견인력계수(net traction coefficient, NT/W or DP/W)

를 예측할 수 있는 경험적 관계식이다.

여기서 그는 Wismer and Luth의 차륜지수(C_n)에 타이어의 직경에 대한 단면 폭의 비(b/d), 타이어 단면 높이에 대한 처짐의 비(δ/h)를 포함하는 기동성수 B_n 을 다음과 같이 제안하였다.

$$B_n = \frac{CIbd}{W} \left(\frac{1 + 5 \frac{\delta}{h}}{1 + 3 \frac{b}{d}} \right) \quad (1)$$

where, B_n : mobility number, (dimensionless)

b : unloaded tire section width, (m)

d : unloaded overall tire diameter, (m)

h : undeflected tire section height, (m)

δ : tire deflection, (m)

CI : average cone index(0-15cm), (kPa)

식(1)의 기동성수를 기초로 단일타이어에 대한 추진력계수, 운동저항계수 및 견인력계수를 예측할 수 있는 경험적 관계식을 다음과 같이 개발하였다.

$$\frac{GT_a}{W} = 0.88 (1 - e^{-0.1B_n}) (1 - e^{-7.5S}) + 0.04 \quad (2)$$

$$\frac{MR_a}{W} = \frac{1}{B_n} + 0.04 + \frac{0.5s}{\sqrt{B_n}} \quad (3)$$

$$\frac{NT_a}{W} = 0.88 (1 - e^{-0.1B_n}) (1 - e^{-7.5S}) - \frac{1}{B_n} - \frac{0.5s}{\sqrt{B_n}} \quad (4)$$

where, GT_a : gross traction of a tire, (kN)

MR_a : motion resistance of a tire, (kN)

NT_a : net traction of a tire, (kN)

W : static load of a tire, (kN)

S : slip, (decimal, 0-1)

위 식은 대부분의 농용 타이어에 적용할 수 있으며, 위 식의 적용범위는 타이어의 직경에 대한 폭의 비(b/d)가 약 0.1~0.7 범위이고, 타이어의 변형(static deflection)이 타이어 단면 높이의 10~30% 범위, 평균접지압(W/bd)의 범위가 약 15-55 kPa 인 범위로 제한된다. 한편 Brixius의 모델은 다른 모델들과는 달리 차륜의 운동저항계수의 예측식에 차륜의 슬립을 고려하였다.

그러나 전술한 식(2)~(4)는 단일차륜에 작용하는 정하중(static load)하에서의 추진력계수, 운동저항계수 및 견인력계

수를 예측하는 식으로서 식 (2)~(4)로부터는 트랙터의 견인성능을 직접적으로 예측할 수 없다. 트랙터의 전체 하중은 전륜축(front wheel axle)과 후륜축(rear wheel axle)에 모두 분포하고, 트랙터 작업시 발생하는 견인력 또는 경운저항 등에 의해 전륜축 하중이 후륜축으로 이동되는 하중전이(weight transfer) 효과에 의한 동적하중(dynamic load)의 변화가 나타난다. 즉, 트랙터의 견인성능을 예측하기 위해서는 식 (2)~(4)에 나타난 단일차륜에 대한 견인력 예측 모델에 트랙터의 하중전이 효과에 의한 동적하중의 변화를 고려한 트랙터의 견인성능 예측 모델로 수정, 보완되어야 한다.

차륜축에 작용하는 동적하중은 견인력이 있을 경우 트랙터의 하중전이 효과에 의해 변하는 값으로서 트랙터의 견인력이 NT 이고, 견인력이 작용하는 히치점의 높이가 h 일 경우 하중전이를 고려한 트랙터의 앞·뒤 차축의 하중은 각각 식 (5)와 (6)에 의해 결정된다.

$$W_{Pf} = W_f - \left(\frac{NT}{L} h \right) \quad (5)$$

$$W_{Pr} = W_r + \left(\frac{NT}{L} h \right) \quad (6)$$

where, W_{Pf} , W_{Pr} : dynamic load of front and rear tire by weight transfer, (kN)

W_f , W_r : static load of front and rear tire, (kN)

h : the height of drawbar point, (m)

L : wheelbase, (m)

NT : net traction of a tractor, (kN)

따라서 식 (2)~(6)으로부터 하중전이를 고려한 트랙터의 추진력(GT), 운동저항(MR), 견인력(NT)는 다음과 같이 식 (7)~(9)에 의해 결정할 수 있다.

$$GT = GT_f + GT_r \quad (7)$$

$$MR = MR_f + MR_r \quad (8)$$

$$NT = GT - MR \quad (9)$$

where, GT : gross traction of a tractor

MR : motion resistance of a tractor

NT : net traction of a tractor

GT_f , GT_r : gross traction of front and rear tire by weight transfer

$$GT_f = W_{Pf} \left[0.88 (1 - e^{-0.1N_{BPf}}) (1 - e^{-7.5S}) + 0.04 \right]$$

$$GT_r = W_{Pr} \left[0.88 (1 - e^{-0.1N_{BPr}}) (1 - e^{-7.5S}) + 0.04 \right]$$

MR_f , MR_r : motion resistance of front and rear tire by weight transfer

$$MR_f = W_{Pf} \left[\frac{1}{N_{BPf}} + 0.04 + \frac{0.5s}{\sqrt{N_{BPf}}} \right]$$

$$MR_r = W_{Pr} \left[\frac{1}{N_{BPr}} + 0.04 + \frac{0.5s}{\sqrt{N_{BPr}}} \right]$$

N_{BPf} , N_{BPr} : mobility number of front and rear tire by weight transfer

$$N_{BPf} = \frac{CI b_f d_f}{W_{Pf}/2} \left(\frac{1 + 5 \frac{\delta_f}{h_f}}{1 + 3 \frac{b_f}{d_f}} \right),$$

$$N_{BPr} = \frac{CI b_r d_r}{W_{Pr}/2} \left(\frac{1 + 5 \frac{\delta_r}{h_r}}{1 + 3 \frac{b_r}{d_r}} \right)$$

b_f , b_r : width of front and rear tire

d_f , d_r : diameter of front and rear tire

h_f , h_r : width height of front and rear tire

δ_f , δ_r : deflection of front and rear tire

한편, 식 (7)과 (8)에서 W_{Pf} 와 W_{Pr} 은 견인력 NT의 크기를 알고 있는 경우에만 결정할 수 있다. 따라서 식 (9)에서 견인력 NT를 초기에 가정한 후, 가정한 NT를 식 (9)의 우변에 대입하여 계산된 견인력 값이 가정한 NT와 일치할 때까지 반복 계산하여 트랙터의 견인력을 결정하였다. 즉, 식 (9)를 반복법을 이용하여 특정 슬립에 따른 견인력을 결정후 식 (7), (8) 및 (9)에 의해 특정 슬립에서의 트랙터의 추진력, 운동저항, 견인력을 결정하였다.

결과 및 고찰

트랙터의 견인성능 예측 프로그램 개발

Brixius의 견인력 모델을 이용하여 트랙터가 운용되는 토양의 물리적 특성변수인 원추지수와 트랙터의 제원에 따른 트랙터의 견인성능 예측 컴퓨터 프로그램(tractor performance prediction model)을 개발하였다. 트랙터의 견인성능 예측 프로그램은 Visual Basic 6.0을 이용하여 개발하였다.

트랙터의 견인성능 예측 프로그램은 1)트랙터의 제원, 트랙터가 운용되는 토양의 특성 및 운용조건 등 트랙터의 견인성능에

관련되는 변수들을 입력하는 트랙터 성능변수 입력창(Tractor Performance Parameters)(그림 1)과 2) 입력변수들로부터 트랙터의 견인성능 결과를 출력하는 트랙터 견인성능 시뮬레이션 결과 출력창(Tractor Performance Simulation Results)(그림 2)의 2개의 주요 부분으로 구성되었다.

트랙터 성능변수 입력창은 1) Mode Selection, 2) Tractor Parameters, 3) Soil Parameter, 4) Operating Parameters 및 5) Save into a File 등 5개의 주요 메뉴부로 구성되었다(그림 1).

그림 1에서 트랙터 성능 관련 변수들의 입력방법은 먼저 메뉴창의 "Mode Selection"에서 "Existing Tractor"를 선택한 후 "Maker"에서 트랙터의 제조회사, "Model"에서 트랙터의 모델명을 선택하면, 데이터베이스로 저장되어 있는 해당 모델에 대한 트랙터의 제원이 자동적으로 입력되도록 하였다. 또한 해당 모델이 없을 경우에는 메뉴창의 "Add a New Tractor"를 선택한 후 트랙터의 제원을 직접 입력할 수 있도록 하였다.

한편, 토양변수는 "Soil Parameter" 메뉴에서 토양변수인 토양원추치수를 입력하고, "Operating Parameters" 메뉴에서 트랙터의 구동방식(2WD 또는 4WD)과 트랙터의 속도(no load speed)를 입력할 수 있도록 하였다.

그림 2는 그림 1의 입력변수 조건에 대해 프로그램을 실행한 결과를 나타낸 트랙터 견인성능 시뮬레이션 결과(Tractor Per-

formance Simulation Results)의 출력창을 보여주고 있다.

입력값에 대한 견인성능 결과는 일반적으로 트랙터 작업이 수행되는 슬립 20% 이내에서 5% 슬립 단계로 각각의 슬립 조건에 따른 트랙터의 견인성능 출력 결과를 보여주고 있다. 트랙

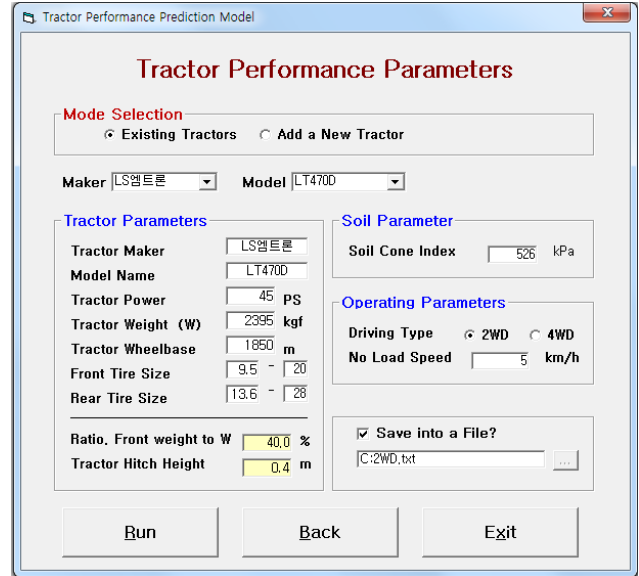


Figure 1. Input parameters screen of simulation program.

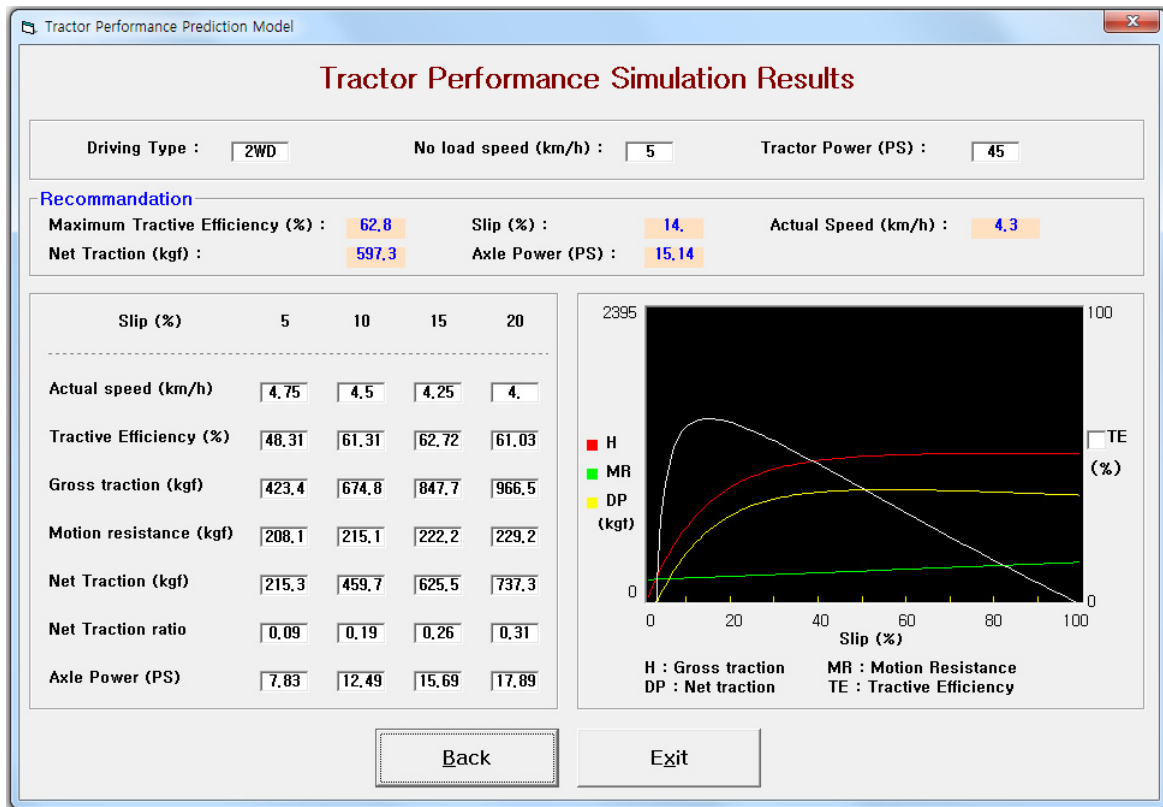


Figure 2. Output screen of traction prediction simulation program.

터의 견인성능 출력변수로는 트랙터의 슬립에 따른 트랙터의 추진력(gross traction), 운동저항(motion resistance), 견인력(net traction), 견인효율(tractive efficiency), 차축소요마력(axle power) 그리고 해당 슬립에서 트랙터의 실제 작업속도 등을 나타낼 수 있도록 하였다. 그림 2에 나타낸 트랙터의 견인성능 출력값으로 나타나는 견인효율과 차축소요마력은 각각 식 (10)과 (11)에 의해 결정하였다.

$$TE = \frac{NT}{GT} (1 - S) \times 100 \quad (\%) \quad (10)$$

$$P_{ax} = (GT \cdot r) \times \left(\frac{V_t}{r} \right) \quad (11)$$

where, TE : tractive efficiency, (%)
 P_{ax} : driving axle power, (PS)
 GT : gross traction of tractor
 V_t : theoretical velocity

한편 사용자에게 추천작업 조건을 제시하기 위해 최대 견인 효율에서 트랙터의 견인력, 슬립, 실제작업속도 및 소요동력 등 트랙터의 성능 결과를 추가로 메뉴 상단에 출력되도록 하였다. 또한 사용자가 트랙터의 전체적인 성능 결과를 쉽게 이해할 수 있도록 슬립에 따른 트랙터의 추진력, 운동저항, 견인력 및 견인 효율을 출력창의 우측에 그래프로 나타내도록 하였다. 한편, 그림 1의 입력창의 "Save into a File" 메뉴에서 출력결과를 저장할 파일명을 입력하면, 입력한 파일명으로 시뮬레이션 결과에 대한 보다 상세한 내용을 그림 3과 같이 데이터 파일로 저장하여 출력할 수 있도록 하였다. 그림 3의 결과를 이용하여 사용자가 트랙터의 전체적인 견인성능을 분석할 수 있도록 하였다.

프로그램을 이용한 트랙터의 견인성능 시뮬레이션

본 연구에서 개발한 트랙터의 견인성능 예측 프로그램이 이용하여 트랙터의 제원과 트랙터가 운용되는 토양상태 및 트랙터의 구동방식(2WD, 4WD)에 따른 트랙터의 견인성능을 분석하였다.

시뮬레이션에 사용된 트랙터는 L사의 45마력 트랙터이며 표 1에 트랙터의 주요 제원을 나타내었다.

한편, 시뮬레이션 프로그램에서 토양의 물리적 특성을 나타

내는 입력변수로 사용하기 위해, 국내 주요 지역의 논 토양 14곳을 현장 방문하여 토양의 물리적 특성을 측정 한 후 이들 14개 지역 중 토양의 원추지수가 가장 작은 지역과 큰 지역에서 각각 1곳, 그리고 원추지수가 중간인 지역 1곳 등 원추지수값의 차이가 명확히 나는 지역 3곳을 선정하여 시뮬레이션 프로그램의 토양 입력변수로 사용하였다. 세 지역은 각각 경북 상주시 병성동, 전북 김제시 양전동, 경기 이천시 부발읍의 논 토양으로서 세 지역의 원추지수는 각각 1393.2 kPa, 603.6 kPa, 226.7 kPa 이다 (표 2).

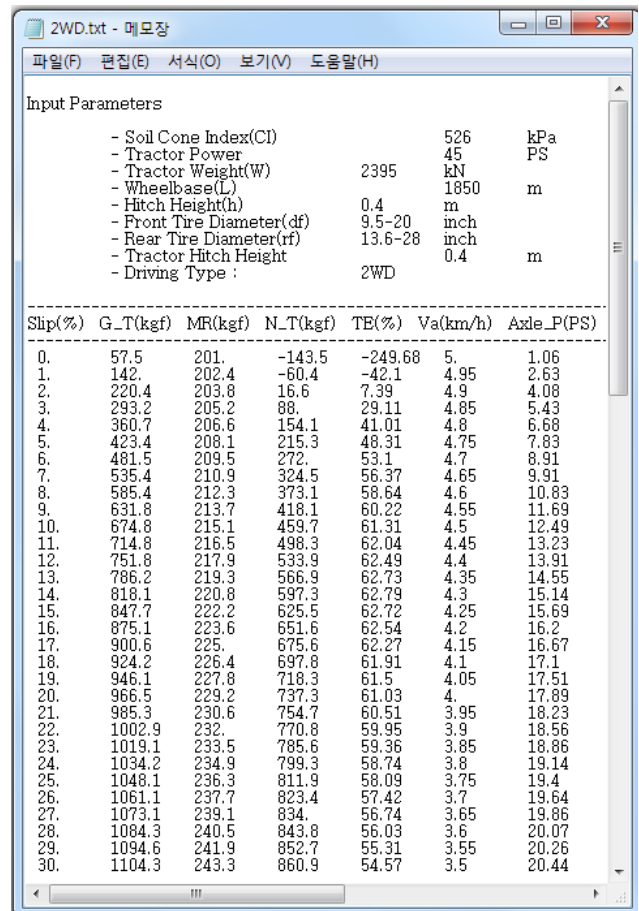


Figure 3. Snapshot of the exported text file of the tractive performance prediction results.

Table 1 Specifications of tractor used for simulation

Model	Power (PS)	Wheelbase (mm)	Vehicle weight (kgf)	Tire size	
LT470D	45	1,850	2,395	Front	9.5-20 4PR
				Rear	13.5-28 6PR

토양상태에 따른 트랙터의 견인성능

그림 4와 그림 5는 각각 2륜구동과 4륜구동 트랙터에 대해 토양의 강도가 다른 병성동, 양전동, 부발읍 세 지역의 토양조건에서 본 연구에서 개발한 트랙터의 견인성능 예측 프로그램을 이용하여 토양조건에 따른 트랙터의 추진력 및 운동저항을 예측한 결과이다.

그림 4와 5에 나타난 바와 같이 토양 특성에 따른 추진력 결과는 세 가지 토양조건에서 2륜구동과 4륜구동 조건에서 모두 슬립이 증가함에 따라 추진력도 지수함수 형태로 증가하는 것으로 나타났고, 토양조건에 따른 추진력의 크기는 두 가지 구동방

식에 대해 모두 병성동, 양전동, 부발읍의 순으로 나타났다. 이러한 결과는 세 지역의 원추지수가 각각 1393.2 kPa, 603.6 kPa, 226.7 kPa로서 토양의 강도가 클수록 트랙터의 추진력이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

토양조건에 따른 운동저항의 크기는 추진력과는 반대로 두 가지 구동조건에 대해 모두 부발읍, 양전동, 병성동의 순으로 토양이 연약할수록 크게 나타났다. 이것은 토양이 연약할수록 타이어의 침하가 크게 발생하고, 침하의 증가는 트랙터의 운동저항을 증가시키기 때문으로 판단된다.

그림 6과 그림 7은 각각 2륜구동과 4륜구동의 트랙터에 대해 토양강도가 다른 병성동, 양전동, 부발읍의 세 토양조건에서 시뮬레이션 프로그램에 의해 예측된 견인력과 견인효율 결과이다.

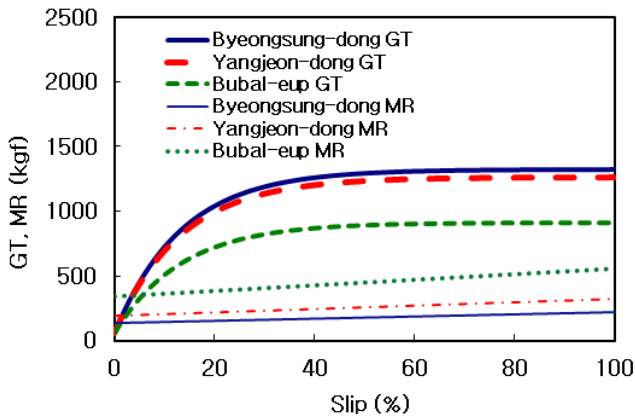


Figure 4. Gross traction (GT) and motion resistance (MR) predicted by simulation program at three soil conditions for tractor of 2WD.

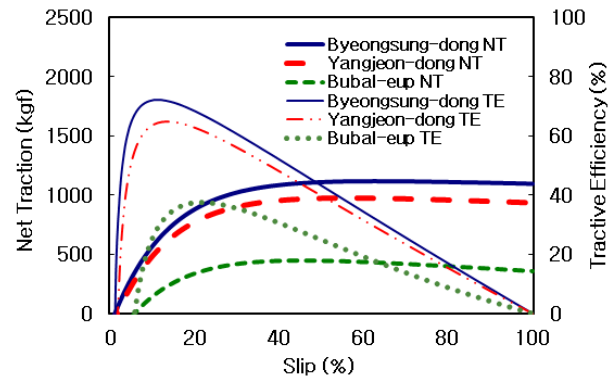


Figure 6. Net traction (NT) and Tractive efficiency (TE) predicted by simulation program at three soil conditions for tractor of 2WD.

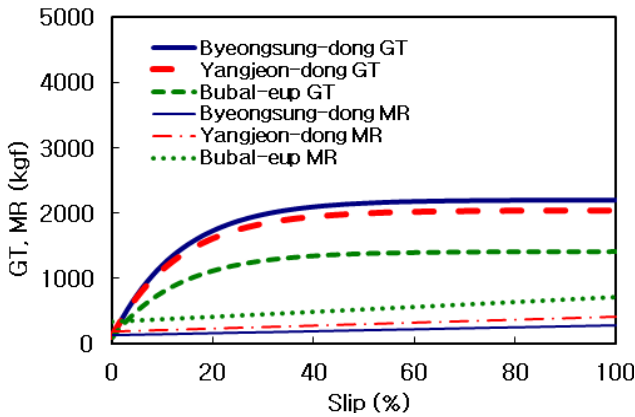


Figure 5. Gross traction (GT) and motion resistance (MR) predicted by simulation program at three soil conditions for tractor of 4WD.

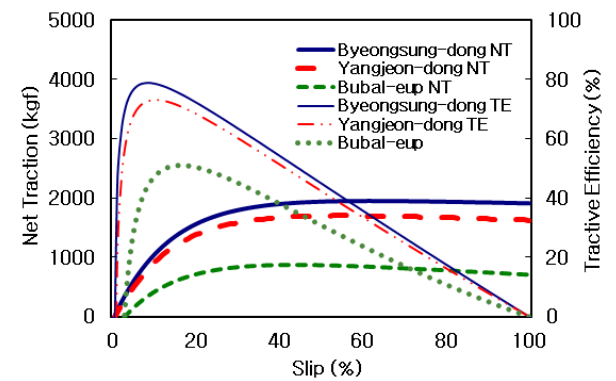


Figure 7. Net traction (NT) and Tractive efficiency (TE) predicted by simulation program at three soil conditions for tractor of 4WD.

Table 2 Soil properties of paddy field used by simulation program

Region	Moisture Content (d. b.) (%)	Unit weight (kg/m ³)	Average Cone Index (kPa)
			0-15cm
Bubal-eup	55.23	1554	226.7
Yangjeon-dong	35.07	1811	603.6
Byeongsung-dong	18.84	1748	1393.2

그림 6과 7에서 볼 수 있듯이 세 가지 토양상태에서의 견인력은 두 가지 구동방식에 대해 모두 전체 슬립구간에서 토양이 단단할수록 크게 나타났다. 또한 세 가지 토양조건에서 예측된 견인력간의 차이는 두 가지 구동방식에 대해 모두 그림 4와 5의 결과에 나타난 세 토양조건에서의 추진력간의 차이보다 크게 나타났다. 이러한 결과는 전술한 그림 4와 5에 나타난 바와 같이 토양이 단단할수록 추진력은 크고, 운동저항은 작게 나타나기 때문에 추진력과 운동저항의 차로써 나타나는 견인력은 토양이 단단할수록 증가한 것으로 판단된다.

한편, 세 토양조건에서의 견인효율은 견인력 결과와 마찬가지로 두 가지 구동방식에 대해 모두 토양이 단단할수록 전체 슬립구간에서 견인효율이 높게 나타났다. 병성동, 양성동 및 부발읍의 세 토양조건에서의 최대 견인효율은 2륜구동의 경우 각각 72.17%(슬립 11%), 64.89%(슬립 13%), 37.47%(슬립 22%)이고, 4륜구동의 경우에는 각각 78.97%(슬립 8%), 73.13%(슬립 10%), 50.967%(슬립 15%)로서 2륜구동 및 4륜구동 모두 토양이 단단할수록 최대 견인효율이 높게 나타났으며, 최대 견인효율에서의 슬립도 낮게 나타났다.

그림 6과 그림 7의 결과로부터 토양의 강도특성을 나타내는 원추지수에 따른 트랙터의 견인성능은 원추지수의 크기에 따라 명확한 차이가 있는 것으로 나타났으며, 본 프로그램은 토양강도에 따른 트랙터의 견인성능을 효과적으로 예측, 평가할 수 있는 것으로 판단되었다.

트랙터의 구동방식에 따른 견인성능

그림 8의 (a), (b), (c)는 각각 토양강도가 다른 병성동, 양성동, 부발읍의 세 토양조건에서 2륜구동과 4륜구동인 두 가지 트랙터의 구동방식에 따른 트랙터의 추진력과 운동저항의 예측 결과이다.

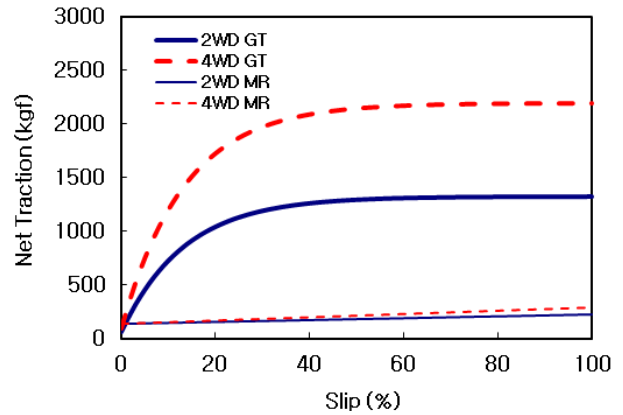
그림 8에 나타난 바와 같이 세 토양조건에서 2륜구동과 4륜구동인 두 가지 구동방식에 따른 트랙터의 추진력은 세 토양조건에서 모두 4륜구동의 경우가 2륜구동의 경우에 비해 매우 크게 나타났다. 한편 구동방식에 따른 운동저항은 세 토양조건에서 모두 4륜구동의 경우가 2륜구동에 비해 전체 슬립 구간에서 약간 크게 나타났다. 이러한 결과는 4륜구동의 경우에는 전륜(front wheel)의 추진력에 의한 슬립의 발생, 즉 슬립-침하 효과(slip-sinkage effect)에 의한 침하 증가로 운동저항이 증가하였기 때문이다.

그림 9의 (a), (b), (c)는 각각 세 가지 토양조건에서 두 가지 구동방식에 따른 견인력과 견인효율을 나타낸 결과이다.

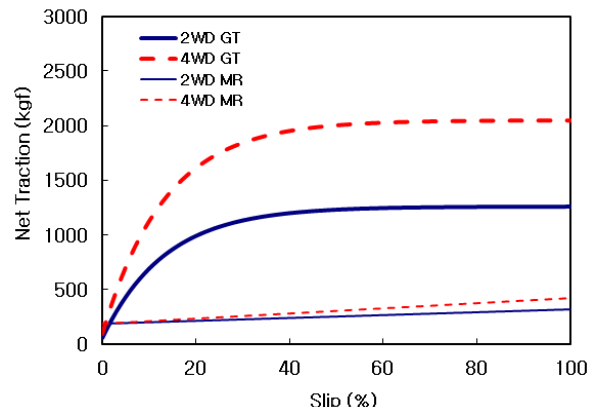
그림의 결과에서 볼 수 있듯이 세 가지 토양상태에서 예측된 트랙터의 구동방식에 따른 견인력은 세 토양에서 모두 4륜구동의 경우가 2륜구동에 비해 견인력이 높게 나타났다. 이러한 경향은 전술한 바와 같이 구동방식별 운동저항의 크기는 큰 차이

가 없었으나 추진력의 경우는 4륜구동의 경우가 2륜구동의 경우에 비해 매우 크기 때문에 추진력에서 운동저항의 차로 나타나는 견인력은 4륜구동의 경우가 2륜구동에 비해 크게 나타나게 된다.

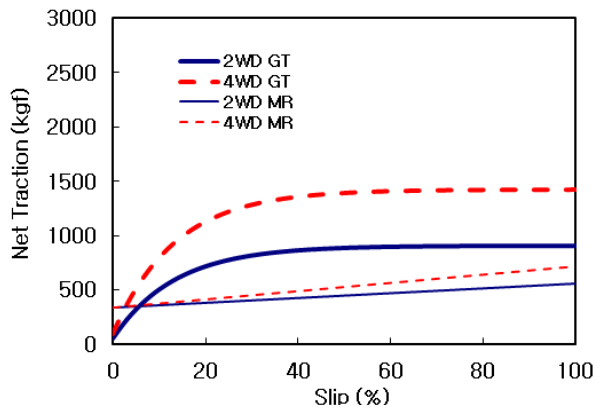
한편, 구동방식에 따른 견인효율은 견인력 결과와 마찬가지로 4륜구동의 경우가 2륜구동에 비해 세 토양조건에서 모두 전



(a) Byeongsung-dong (CI = 1393.2 kPa)

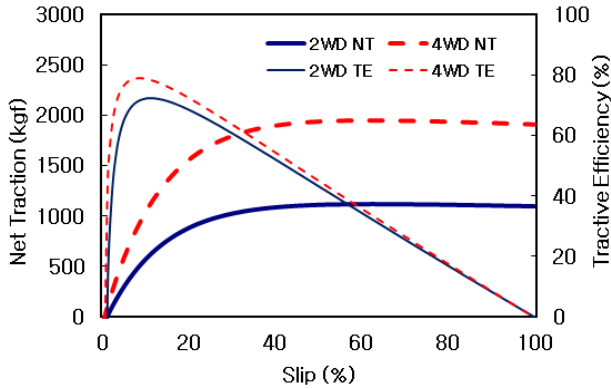


(b) Yangjeon-dong (CI = 603.6 kPa)

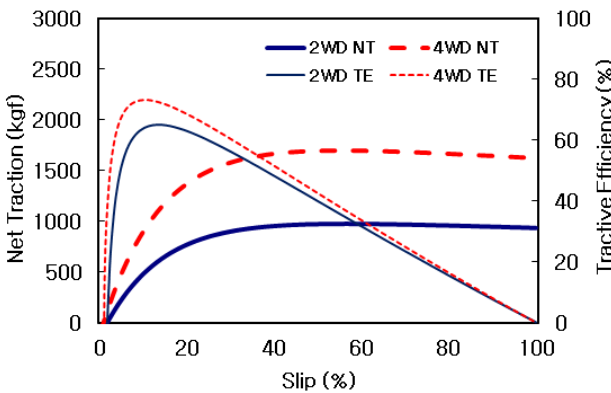


(c) Bubal-eup (CI = 226.7 kPa)

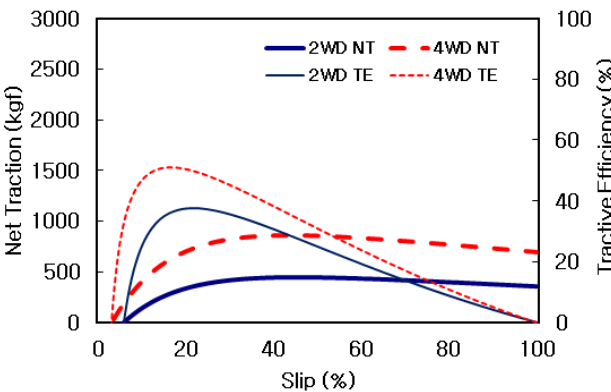
Figure 8. Gross traction and motion resistance predicted by simulation program for tractor of two different driving conditions (2WD and 4WD).



(a) Byeongsung-dong (CI=1393.2 kPa)



(b) Yangjeon-dong (CI=603.6 kPa)



(c) Bubal-eup (CI=226.7 kPa)

Figure 9. Net traction and Tractive efficiency predicted by simulation program for tractor of two different driving conditions (2WD and 4WD)

체 슬립구간에서 높게 나타났다. 또한 구동방식에 따른 최대 견인효율은 병성동 토양의 경우 2륜구동 및 4륜구동에 대해 각각 72.17%(슬립 11%), 78.97%(슬립 8%)이고, 양성동 토양의 경우에는 각각 64.89%(슬립 13%), 73.13%(슬립 10%), 그리고 부발을 토양의 경우에는 각각 37.47%(슬립 22%), 50.967%(슬립 15%)로서 세 토양조건에서 모두 4륜구동의

경우가 2륜구동에 비해 최대 견인효율이 높게 나타났고, 최대 견인효율에서의 슬립도 낮게 나타났다.

이러한 결과로부터 트랙터의 구동방식은 트랙터의 견인성능에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

요약 및 결론

본 연구에서는 단일 타이어의 견인성능 예측을 위해 개발된 대표적인 경험적 모델인 Brixius 모델을 이용하여 토양특성과 트랙터의 제원에 따른 트랙터의 견인성능을 쉽게 예측, 평가할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 견인성능 예측 프로그램은 트랙터의 무게, 타이어 치수 등 트랙터의 제원과 관련된 트랙터변수들과 토양의 강도특성을 나타내는 원추지수, 그리고 트랙터의 구동방식(2WD, 4WD)과 속도 등과 같은 트랙터의 운용조건을 해석에 고려하였다.
- (2) 개발된 프로그램은 입력된 트랙터제원과 원추지수 및 운용조건에 대해 슬립에 따른 트랙터의 추진력, 운동저항, 견인력, 견인효율 등을 수치와 그래픽으로 제공하여 사용자가 트랙터의 견인성능을 쉽게 예측, 평가할 수 있도록 구성하였다.
- (3) 견인성능 예측 프로그램의 적용 가능성을 평가하기 위해 개발된 프로그램을 이용하여 원추지수값이 다른 세 수준의 토양조건과 트랙터의 구동방식에 따른 트랙터의 견인성능을 분석하였다.
- (4) 분석 결과 본 연구에서 개발된 트랙터의 견인성능 예측 프로그램은 트랙터가 운용되는 토양조건, 트랙터의 제원 및 구동방식에 따른 트랙터의 견인성능의 예측 및 평가에 효율적으로 활용할 수 있는 것으로 판단되었다.

References

Brixius, W. W. 1987. Traction prediction equations for bias ply tires. ASAE paper no. 87-1622.
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.
Dwyer, M. J. 1984. The tractive performance of wheeled vehicles. Journal of Terramechanics 21(1):19-34.
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.

- Lee, D. H., W. Y. Park and K. S. Lee. 2009. A Study on Traction Prediction of Agricultural Tractor by Experimental Method. *Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery* 34(5):297-304 (In Korean).
- Sahu, R. K. and H. Raheman. 2008. A decision support system on matching and field performance prediction of tractor-implement system. *Computer and Electronics in Agriculture* 60:76-86.
- Wismer, R. D. and H. J. Luth. 1972. Off-Road Traction Prediction for Wheeled Vehicles. *Transaction of ASAE*: 8-14.
- Wong, J. Y. 1989. *Terramechanics and Off-Road Vehicles*. Amsterdam, Netherlands; Elsevier Science.