

Magic Formula를 이용한 아스팔트 노면에서의 농업용 트랙터의 견인력 추정

김경대^{*,**}, 김지태^{*,**}, 안다빈^{*,**}, 박정호^{*}, 조승제^{***,****}, 박영준^{*,**,****,#}

^{*}서울대학교 바이오시스템공학과, ^{**}서울대학교 융합전공 글로벌 스마트팜, ^{***}전북대학교 생물산업기계공학과, ^{****}한국생산기술연구원 지능형농기계연구그룹, ^{*****}서울대학교 농업생명과학연구원

Drawbar Pull Estimation in Agricultural Tractor Tires on Asphalt Road Surface using Magic Formula

Kyeong-Dae Kim^{*,**}, Ji-Tae Kim^{*,**}, Da-Vin Ahn^{*,**}, Jung-Ho Park^{*}, Seung-Je Cho^{***,****},
Young-Jun Park^{*,**,****,#}

^{*}Department of Biosystems Engineering, Seoul National University

^{**}Convergence Major in Global Smart Farm, Seoul National University

^{***}Department of Bioindustrial Machinery Engineering, Jeonbuk National University

^{****}Smart Agricultural Machinery R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology

^{*****}Research Institute of Agricultural and Life Sciences, Seoul National University

(Received 25 August 2021; received in revised form 27 September 2021; accepted 11 October 2021)

ABSTRACT

Agricultural tractors drive and operate both off-road and on-road. Tire-road interaction significantly affects the tractive performance of a tractor, which is difficult to predict numerically. Many empirical models have been developed to predict the tractive performance of tractors using the cone index, which can be measured through simple tests. However, a magic formula model that can determine the tractive performance without a cone index can be used instead of traditional empirical models as the cone index cannot be measured on asphalt roads. The aim of this study was to predict the tractive performance of a tractor using the magic formula tire model. The traction force of the tires on an asphalt road was measured using an agricultural tractor. The dynamic wheel load was calculated to derive the coefficients of the traction-slip curve using the measured static wheel load and drawbar pull of the tractor. Curve fitting was performed to fit the experimental data using the magic formula. The parameters of the magic formula tire model were well identified, and the model successfully determined the coefficient of traction of the tractor.

Keywords : Agricultural Tractor(농업용 트랙터), Magic Formula, Drawbar Pull(견인력), Coefficient of Traction (견인 계수), Curve Fitting(커브 피팅)

1. 서 론

농업용 트랙터는 주로 논이나 밭 등 노외(off-road)에서 작업을 수행하며, 농작업에 필요한 동력을 쟁기, 로터리 등과 같은 농작업기에 제공한다. 노외에서 작업을 수행하기 때문에 엔진의 동력을 온전히 견인력으로 사용할 수 없으며, 작

Corresponding Author : yjpark95@snu.ac.kr

Tel: +82-02-880-4602, Fax: +82-02-873-2049

업의 특성상 보다 큰 견인성능이 필요하다^[1-3]. 따라서, 농업용 트랙터는 트랙터의 견인력을 향상시키기 위하여 타이어에 돌기부인 러그(lug)가 존재한다. 타이어의 러그는 변형이 발생하는 지면에서 주행 시 지면에 관입되며, 지면의 역학적 특성과 러그의 특성을 통해 차량에 추가적인 제공한다. 하지만 변형이 발생하지 않는 포장도로에서 주행 시 타이어의 접지면적이 감소한다는 단점이 있다^[4].

주거 지역이나 대형 차고에 보관되는 농업용 트랙터들은 농경지로 이동하기 위하여 포장도로를 주행해야 하며, 점차 트랙터가 대형화되면서 포장도로를 통해 고하중의 농경 작업에 필요한 재료 및 장비들을 이송 및 견인하는 작업에도 사용된다. 도로를 주행할 때 발생하는 타이어의 슬립(slip)은 타이어와 노면 사이의 상호작용에 의해 발생하는 견인력을 변화시키며^[5], 이는 주행 및 견인 작업에 큰 영향을 미친다. 효율적인 트랙터의 운용을 위해서 포장도로에서의 타이어 슬립에 따른 견인력 변화에 대한 규명이 필요하다.

아스팔트 노면과 타이어 사이의 상호작용에 대한 기존 연구는 주로 일반 승용 차량을 대상으로 진행되었다. 일반 승용 차량에 대한 기존 연구는 수학적 모델로서 Bakker와 Pacejka가 제시한 magic formula를 주로 사용하였으며, 타이어의 특성과 노면의 조건에 따라 변화하는 모델 내의 파라미터를 규명함으로써 주행 조건마다 타이어 슬립률(slip ratio)에 따른 견인력을 예측하는 모델을 개발하였다^[6-10]. 그러나 일반 승용 차량의 경우, 농업용 트랙터의 타이어와는 다르게 러그가 존재하지 않아 타이어의 특성이 매우 다르기 때문에 기존 연구의 결과는 러그가 있는 타이어에 대한 견인력을 예측하는데 사용하기 부적절하다.

러그가 있는 타이어와 노면간의 상호작용을 규명하기 위한 연구는 수십년에 걸쳐 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔다. 연구는 주로 해석적 방법(analysis method)과 경험적 방법(empirical method)으로 나뉘어 발전되어왔다^[11]. 해석적 방법은 주행장치와 토양간의 수직응력과 전단응력 분포에 대한 직접적인 관계를 이용하여 노외차량의 성능을 매우 정확하게 예측할 수 있는 방법이지만 해석에

필요한 토양 변수를 측정하기 위한 시간과 비용이 많이 소요된다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 사용되는 경험적 방법은 토양과 주행장치간의 상관관계를 많은 시험의 결과를 통하여 경험적으로 유도하여 노외차량의 성능을 예측하는 방법이다.

경험적 방법은 원추관입시험(cone penetrometer technique)을 통해 얻을 수 있는 원추지수(cone index; CI)만을 통해 노외차량의 성능을 예측할 수 있기 때문에 정확도가 다소 떨어지더라도 예측에 필요한 토양변수를 간단한 방법으로 구할 수 있다는 장점이 있어 가장 많이 사용되고 있으며 다양한 경험식이 개발되어 있다^[12-16]. 그러나 개발된 다양한 경험식들은 모두 토양변수인 원추지수가 필요하기 때문에 기존 토양과는 다르게 원추관입 시험이 불가능한 아스팔트 노면에 대해서는 경험식을 사용할 수 없다.

본 논문에서는 아스팔트 노면을 주행하는 농업용 트랙터에 대하여 러그가 있는 타이어와 아스팔트 노면 사이의 상호작용을 예측하는 모델을 개발하기 위하여 원추지수가 필요없는 magic formula를 이용하였다. 아스팔트에서 트랙터 견인시험을 수행하여 트랙터의 견인력과 차축 토크를 측정하여 견인계수를 계산하였으며, 타이어 슬립과 상관관계를 magic formula 예측식을 이용하여 분석하였다. 이를 통해 magic formula의 파라미터를 도출하여 슬립률에 따른 견인력을 예측하는 모델을 개발하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 Magic formula

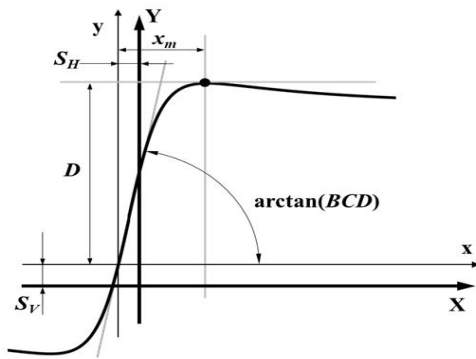
본 논문에서 사용된 magic Formula 타이어 모델은 Pacejka와 Bakker(2012)가 제안한 모델로서, 순수 코너링(pure cornering) 또는 순수 제동(pure braking)과 같은 정상상태(steady-state)에서 타이어에 작용하는 횡력(side force), 제동력(brake force) 그리고 복원모멘트(self aligning moment)를 계산할 수 있는 예측식이며, 관련 식은 (1), (2), (3)에 나타내었다.

$$y(x) = D \sin [C \arctan \{ Bx - E(Bx - \arctan Bx) \}] \quad (1)$$

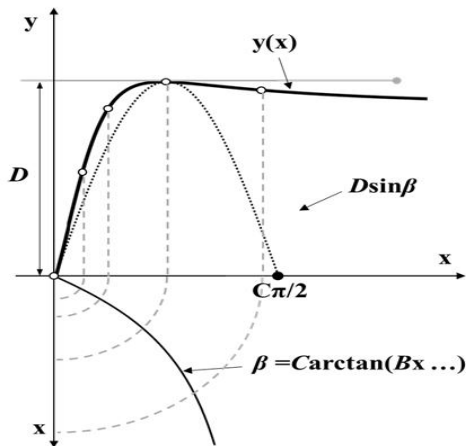
$$Y(x) = y(x) + S_V \quad (2)$$

$$x = X + S_H \quad (3)$$

여기서, $Y(x)$ 는 타이어에 작용하는 축방향 견인력 F_x , 횡방향 견인력 F_y , 타이어 복원 모멘트 M_z , 축방향 견인력 계수 μ_x , 또는 횡방향 견인력 계수 μ_y 이다. X 는 슬립각 α , 또는 슬립률 S_x 이다. B, C, D, E 는 magic formula의 파라미터로 각각 예측식 곡선의 stiffness, shape, peak, curvature factor를 의미한다. S_H 와 S_V 는 각각 예측식의 수평 및 수직 평행이동을 의미한다. 각 파라미터의 의미는 Fig. 1에 나타내었다.



(a) Typical form of magic formula



(b) Force as a function of slip

Fig. 1 The curve produced by the magic formula

2.2 트랙터 견인력 측정 시험

트랙터 견인력 측정 시험(drawbar pull test)은 KS B ISO 7464:1984를 기반으로 수행되었다. 해당 표준은 1983년 제 1판으로 발행된 ISO 7464^[17]를 기초로 작성된 한국산업표준으로 굴삭기를 제외한 자주식 토공기계를 대상으로 견인력 성능을 측정하는 시험방법을 규정한다. 본 논문에서는 견인력 성능을 측정할 대상인 시험 장비(견인 트랙터)와 시험 장비에 일련의 하중을 가하는 장비(하중 트랙터)로 모두 트랙터를 사용하였다.

시험 방법은 다음과 같다. 견인 트랙터가 특정 기어단수와 엔진 출력 조건에서 주행속도를 유지할 때, 하중 트랙터에서 견인 트랙터로 브레이크를 통해 견인 부하(drawbar pull)를 가하며 동시에 견인력(traction force), 견인 트랙터의 실제 주행속도, 견인 트랙터의 구동 차축 회전속도를 측정한다. 이 때 하중 트랙터에서 전달하는 견인력은 탑승자가 최대한 일정하게 브레이크를 밟아 전달되는 부하의 크기가 유지되도록 한다. 시험 진행 동안 견인력은 육분력계(six-component load cell), 견인 트랙터의 실제 주행속도는 GPS, 견인 트랙터의 차축 회전속도는 타코미터(tachometer)를 이용하여 측정한다. 차축 회전속도는 식 (4)를 이용하여 트랙터의 이론 주행속도로 계산될 수 있다.

$$v_{ideal} = 2\pi R_{wheel} N \times \frac{60}{1000} \quad (4)$$

여기서, v_{ideal} 은 이론 주행속도(km/h), R_{wheel} 은 차륜 반경(m), N 은 차축 회전속도(rpm)를 의미한다.

2.3 견인력 측정 시스템 구성

견인력 측정 시험을 위한 견인 트랙터로는 대동의 PX1000모델을 사용하였으며, 하중 트랙터로는 동양물산의 TX1500모델을 사용하였다. 두 트랙터의 형상과 제원은 각각 Fig. 2와 Table 1에 나타내었다. 견인력을 측정하기 위해 견인 트랙터의 3점 히치에 육분력계를 설치하였으며, 장력바를 이용하여 육분력계와 하중 트랙터를 연결하였다. 육분력계에 사용된 3개의 로드셀은 CAS사의 SBA-2T 모델이다. 견인 트랙터의 실제 속도를 측정하기 위해 트랙터 캐빈에 RTK-GPS를 설치하였으며, Swift navigation사의 Duro모델을 이용하였다. 견인

트랙터의 이론 속도를 측정하기 위해 구동 차축인 후륜 차축에 100개의 기어이를 갖는 스프로킷과 타코미터로 hall effect gear tooth 센서를 설치하였고, 센서 모델명은 CYGTS211B이다. 견인 트랙터의 캐빈 내부에는 데이터 측정 시스템(data acquisition system)을 설치하여 실시간 데이터를 측정하고 저장하였다. 시험장은 콘크리트 평면의 타원형 주행로이며, 시험은 주행로의 직진 경로에서만 수행되었다. Fig. 3는 시험장 주행로를 나타낸 것이며, Fig. 4는 트랙터의 견인력 측정을 위한 시스템의 모습이다.

2.4 트랙터 축 하중 측정

트랙터 견인력은 구동 타이어에 가해지는 수직 하중(normal load)과 견인 계수에 비례하므로 식 (5)를 통해 견인 계수를 구할 수 있다. 본 연구에서는 견인 트랙터를 후륜 구동 모드에서 시험하였기 때문에 후륜에 가해지는 정적 축하중을 측정하였다.



(a) PX1000, Daedong



(b) TX1500, TYM

Fig. 2 Tractors used in drawbar pull test

트랙터 정적 축하중은 CAS의 wheel weighing scale RW-P와 indicator RW-2601P를 사용하여 측정되었다. 견인력 시험과 동일한 조건에서 측정하기 위해 로더를 최고 높이에 위치시키고 시험자가 탑승한 채로 측정하였다. Fig. 5(a)는 indicator 장비 사진이며, Fig. 5(b)는 정적 축하중을 측정하는 모습이다.

Table 1 Specification of tractors

Specification	PX1000	TX1500
Power, kW	76.8	108.1
Rated RPM, rpm	2200	2200
Weight, kg	4020	5656
Dimensions (L×W×H), m	4.91×2.32×2.87	4.91×2.32×2.87
Front tire	13.6-24	420/70R28
Rear tire	18.4-34	520/70R38



Fig. 3 Tractor test road

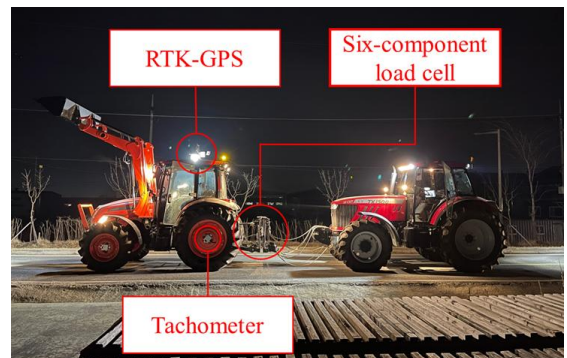


Fig. 4 Traction measurement system



(a) RW-2601P indicator



(b) Tractor on wheel weighing scale RW-P

Fig. 5 Tractor axial load measurement test

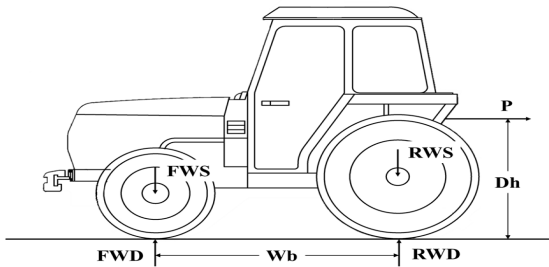


Fig. 6 Tractor weight transfer

또한 하중 트랙터에 의해 견인 트랙터에 가해진 부하는 하중 전이(weight transfer)를 발생시키고 주행 중 후륜에 가해지는 동적 축하중은 식 (6)을 통해 계산해야 한다. Fig. 6은 식 (6)의 설명을 위한 그림이다.

$$\mu_x = \frac{F_x}{W} \quad (5)$$

$$RWD = RWS + \frac{P \times Dh}{Wb} \quad (6)$$

여기서 식 (5)의 μ_x 는 견인 계수, F_x 는 견인력 (kN), W 는 트랙터 하중(kN)이며 식 (6)의 RWD 는 후륜 동적 축하중(kN), RWS 는 후륜 정적 축하중(kN), P 는 견인 하중(kN), Dh 는 견인 하중 작용점 높이 (m), Wb 는 축간거리(m)이다.

3. 결과 및 토의

3.1 트랙터 견인력 측정

견인력 측정 시험은 견인 트랙터의 변속 단수는 L1, 엔진의 회전속도는 2,000 rpm인 조건에서 수행되었다. 하중 트랙터에서 가하는 부하의 크기는 트랙터 브레이크 시스템의 복잡도와 시험자의 숙련도에 따라 일정한 크기를 유지하는 것이 매우 어렵기 때문에 0~5 kN, 5~10 kN, 10~20 kN, 20~30 kN으로 총 4가지 조건으로 선정하였다.

측정된 실제 주행속도와 이론 주행속도는 식 (7)을 이용하여 슬립률(slip ratio)로 계산하였다. 동 시간대 발생한 슬립률과 견인력을 대응시켜 슬립률에 따른 견인력 선도를 얻었다. Fig. #는 20~30 kN의 부하 조건에서 측정된 견인력, 실제 주행속도, 이론 주행속도이며, 수직선으로 구분된 구간은 측정 시험 중 견인력과 주행속도의 표준편차가 평균값의 5% 미만으로 데이터가 다소 일정하게 유지되었다고 판단된 구간이다. 해당 구간에서의 슬립률의 평균과 견인력의 평균을 계산하여 하나의 슬립률-견인력 데이터로 사용하였다. Fig. 7의 구간에서 계산된 평균 슬립률은 16.7%이며, 이 때 평균 견인력은 25.89 kN이 나오는 것을 확인하였다. 시험 결과마다 구간이 겹치지 않도록 데이터가 일정하게 유지되는 구간을 다수 찾았으며, 같은 계산방식으로 슬립률-견인력 데이터를 확보하였다.

$$slip\ ratio = \left(1 - \frac{real\ velocity}{ideal\ velocity} \right) \times 100 \quad (7)$$

Fig. 8는 위에서 확보한 데이터를 이용하여 도출한 슬립률에 따른 견인력의 선도를 나타낸 것이다. 슬립률이 대략 25% 이하인 경우에는 견인력은 슬립률에 비례하여 증가하는 경향을 보였으나 슬립률이 25% 이상인 경우에는 견인력이 더 이상

증가하지 않고 수렴하는 경향을 보였다. 또한 슬립률이 40%~100% 구간에서는 차륜이 빠르게 공회전 상태(100% slip condition)로 변화하기 때문에 신뢰할 수 없는 데이터가 측정된 것으로 판단되어 결과에 반영하지 않았다.

트랙터의 정적 축하중 측정 결과는 Table 2에 나타내었다. 측정 결과, 후륜 정적 축하중은 24.13 kN으로 나타났다. 측정된 견인력의 최대값이 대략 29.46 kN이므로 견인 하중에 의한 하중 전이로 인하여 후륜 동적 축하중이 후륜 정적 축하중보다 커지게 된 것으로 판단된다.

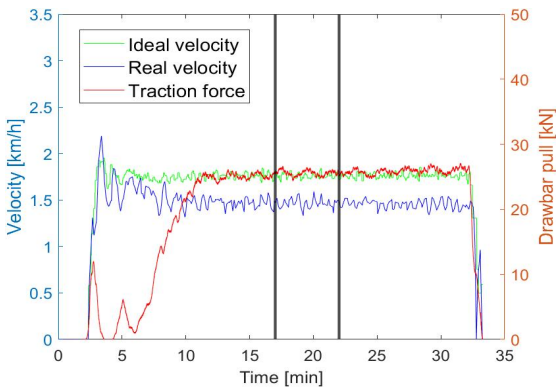


Fig. 7 Drawbar pull test result

Table 2 Tractor static axial load measurement results

Axial load [kN]	Left	Right
Front	11.81	11.90
Rear	12.26	11.87

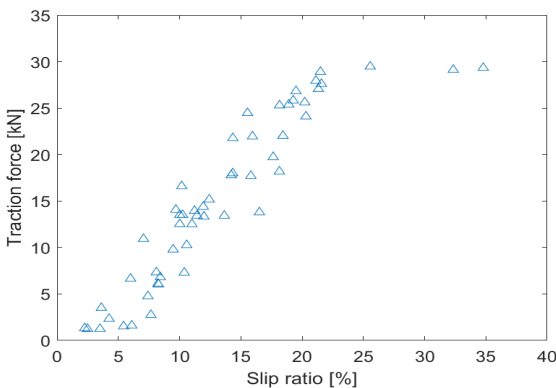


Fig. 8 Traction force - Slip ratio curve

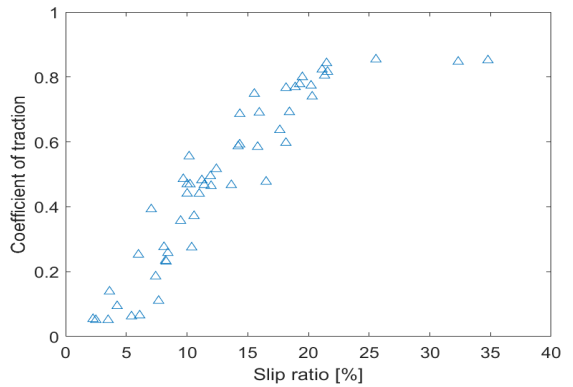


Fig. 9 Traction coefficient - Slip ratio curve

견인력 시험을 통해 측정된 견인력이 시간에 따라 변하기 때문에 견인력을 통해 계산되는 후륜 동적 축하중(*RWD*)도 시간에 따라 변한다. 슬립률-견인력 데이터를 계산한 동일 시간 구간 내에서 견인력과 계산된 동적 축하중을 나누어 시간에 따라 변하는 견인 계수를 계산하였다. Fig. 9은 슬립률에 따른 견인 계수 선도를 나타낸 것이다.

러그가 있는 타이어와 노면 간의 견인 계수에 대한 기존 연구 결과(Fig. 10)를 보면, 콘크리트 (concrete) 노면에서 견인 계수가 최대 0.8 ~ 0.9로 나타났으며, 연약지(firmed, tilled, soft or sandy soil) 노면에서는 0.3 ~ 0.65로 나타났다^[18]. 본 연구의 시험에서 아스팔트 노면의 경우, 견인 계수가 최대 0.85로 나타났다. 이는 기존 연구 결과와 비교하여 콘크리트 노면에서 발생하는 최대 견인 계수와 유사하며, 연약지 노면에서 나타나는 최대 견인 계수보다 크다. 연약지 노면과는 상이하게 침하 및 파괴 현상이 발생하지 않는 아스팔트 노면에서 상대적으로 더 많은 엔진 동력을 차량의 견인력으로 사용할 수 있기 때문에 아스팔트 노면에서의 견인 계수가 연약지 노면에서의 견인 계수보다 크게 나타났으며, 콘크리트 노면의 견인 계수와 유사한 결과가 나타난 것으로 판단된다.

3.2 Magic formula의 파라미터 도출

슬립률에 따른 견인 계수의 선도를 magic formula 형태로 커브피팅(curve-fitting)을 수행하였고, 상관계수(R^2)가 0.9 이상으로 도출된 회귀곡선의 파라미터를 Table 3에 나타내었다. 이 때, 슬립

률이 25% 이상부터 수렴하는 경향을 보였으며, 40% 이상의 시험 데이터는 신뢰할 수 없는 데이터로 판단하였기 때문에 견인 계수가 슬립률이 커짐에 따라 수렴하는 경향을 갖도록 shape factor(C)는 1로 가정하였다. 식 (8)은 커브 피팅을 이용하여 유도한 회귀식 결과이며, Fig. 11는 시험을 통해 측정된 견인력 결과와 회귀식으로부터 유도된 견인력 결과를 한 그래프에 나타낸 모습이다.

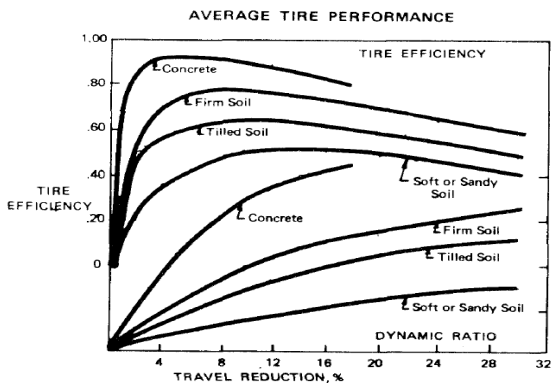


Fig. 10 Tire performance of four soil conditions (Zoz, 1972)^[18]

Table 3 Magic formula parameter values

Parameter	B	C	D	E
value	0.029	1	0.844	-29.2

$$y(x) = 0.844 \sin [\arctan(0.029x + 29.2(0.029x - \arctan 0.029x))] \quad (8)$$

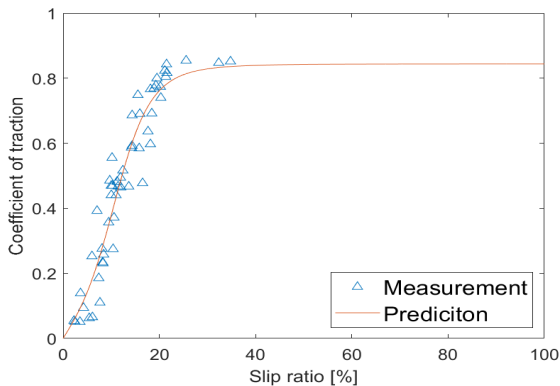


Fig. 11 Curve fitted magic formula results

4. 결론

본 연구에서는 아스팔트 도로에서 러그가 있는 트랙터 타이어의 견인력을 측정하고 슬립률에 따른 견인 계수 선도를 도출하였다. 도출된 선도에 magic formula 형태의 커브 피팅을 수행하여 파라미터를 도출하였다. 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 러그가 있는 타이어와 아스팔트 노면 사이의 견인 계수는 슬립률 0%부터 선형적으로 변화하다가 슬립률 25.5%에서 최대 0.85가 되었으며, 이후 수렴하는 경향이 나타났다.
2. 측정된 트랙터 정적 축하중과 견인력을 토대로 동적 축하중을 도출하였으며, 이를 통해 견인 계수를 도출하였다.
3. 도출된 아스팔트 노면에서 발생하는 최대 견인 계수는 콘크리트 노면의 최대 견인 계수와 유사하였으며, 연약지 노면의 견인 계수보다는 크게 나타났다.
4. Magic formula를 이용하여 트랙터 타이어와 지반 사이의 견인력을 예측할 수 있음을 확인하였다.

본 연구의 방법을 활용하여 타이어 조건, 지반 조건, 차량 축하중 조건 등에 따른 파라미터를 도출할 수 있으며, 이를 통해 트랙터 견인 성능에 대한 데이터베이스(data base)를 구축할 수 있을 것으로 판단된다.

후기

“본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농식품기술융합창의인재양성사업의 지원을 받아 연구되었음(과제번호: 320001-4).”

REFERENCES

1. Jang, S. G., Woo, D. G. and Kim, T. H., “Development of Motor-Driven Convenience Equipment for Harvesting Chili Peppers on Bare

- Ground,” *Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 45, Issue. 1, pp. 33-42, 2020.
2. Shin, S. Y., Kim, D. C., Kang, Y. S. and Cho, Y., “Factorial experiment for air blower of the pepper harvester,” *Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 45, Iss. 4, pp. 239-248, 2020.
 3. Kang, S., Kim, J., Kim, Y. and Woo, S., “Simulation Study of Dynamic Characteristics of Hot Pepper Harvester,” *Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 45, Iss. 4, pp. 333-340, 2020.
 4. Li, H. and Schindler, C., “Investigation of tire-soil interaction with analytical and finite element method#,” *Mechanics based design of structures and machines*, Vol. 41, Iss. 3, pp. 293-315, 2013.
 5. Ali, O. S. and McKyes, E., “Traction characteristics of lugs for tires,” *Transactions of the ASAE*, Vol. 21, Iss. 2, pp. 239-248, 1978.
 6. Bakker, E., Nyborg, L. and Pacejka, H. B., “Tyre modeling for use in vehicle dynamics studies,” *SAE Transactions*, Vol. 96, Section 2, pp. 190-204, 1987. <https://doi.org/10.4271/870421>.
 7. Pacejka, H. B. and Bakker, E., “The magic formula tyre model,” *Vehicle system dynamics*, Vol. 21, Sup. 1, pp. 1-18, 1992.
 8. Pacejka, H. B. and Besselink, I. J. M., “Magic formula tyre model with transient properties,” *Vehicle system dynamics*, Vol. 27, Sup. 1 pp. 234-249, 1997.
 9. Pacejka, H. B., *Tire and vehicle dynamics 3th edition*, Butterworth-Heinemann, 2012.
 10. Ružinskas, A. and Sivilevičius, H., “Magic formula tyre model application for a tyre-ice interaction,” *Procedia Engineering*, Vol. 187, pp. 335-341, 2017.
 11. Lee, D. H., Lee, K. S. and Park, W. Y., “A study on traction prediction of agricultural tractor by empirical method,” *Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 34 No. 5, pp. 297-304, 2009.
 12. Wismer, R. D. and Luth, H. J., “Off-road traction prediction for wheeled vehicles,” *Transactions of the ASAE*, Vol. 17, No. 1, pp. 8-14, 1974.
 13. Dwyer, M. J., “The tractive performance of wheeled vehicles,” *Journal of Terramechanics*, Vol. 21, No. 1, pp. 19-34, 1984.
 14. Brixius, W. W., *Traction prediction equations for bias ply tires*, American Society of Agricultural Engineers, 1987.
 15. Catalán, H., Linares, P. and Méndez, V., “Tractor_PT : A traction prediction software for agricultural tractors,” *Computers and electronics in agriculture*, Vol. 60, Issue. 2, pp. 289-295, 2008.
 16. Sahu, R. K. and Raheman, H., “A decision support system on matching and field performance prediction of tractor-implement system,” *Computers and electronics in agriculture*, Vol 60, Iss. 1, pp. 76-86, 2008.
 17. International Organization for Standardization (ISO), “Earth-moving machinery – Method of test for the measurement of drawbar pull,” ISO 7464, 1983.
 18. Zoz, F. M., “Predicting tractor field performance,” *Transactions of the ASAE*, Vol. 15, No. 2, pp. 249-255, 1972.