

휠형차량의 견인성능 예측 모델

Tractive performance prediction model for wheeled vehicles

안동준* 이규승* 박원엽*

정회원 정회원 정회원

D.J. Ahn K.S. Lee W.Y. Park

1. 서론

다양한 지면상태에서 운용되는 휠형차량의 견인 및 주행성능은 토양-휠의 상호작용에 의해 결정되기 때문에 지면의 토양상태와 지면과 접촉하는 휠의 형태는 차량의 성능에 밀접한 관련이 있다. 그러므로 차량이 운용되는 토양에 대한 역학적 특성과 토양-휠의 역학적 상호작용에 대한 연구는 토양특성과 차량의 설계조건에 따른 성능예측을 가능하게 하여, 로의 차량의 적절한 설계, 투입 및 운용뿐만 아니라 성능향상에도 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 본 연구의 목적은 국내의 농업기계, 건설중장비, 군사용차량 등의 주행장치로서 가장 많이 사용되고 있는 휠형차량의 현장 투입 및 운용뿐만 아니라 설계에 활용하기 위하여 토양과 휠형차량의 주요 설계변수간의 역학적 상호작용을 분석하여 성능을 예측할 수 있는 수학적 모델을 개발하고, 모델로부터 견인성능을 종합적으로 평가할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 개발하는데 있다.

2. 견인성능 예측 모델

휠형차량의 견인성능 예측 모델은 토양변수와 휠형차량의 주요 설계변수를 고려하였으며, 토양변수로는 토양의 압력-침하특성, 전단응력-전단변위특성, 반복하중에 대한 반응특성 및 차량의 슬립에 따른 추가적인 침하를 반영하는 슬립-침하 특성(slip-sinkage effect)등이고, 차량 변수로는 차량무게, 차량의 무게중심 위치, 휠의 직경과 폭, 전·후륜 축거리, 축간거리 등을 고려하였다. 한편, 슬립-침하 특성은 실험을 통해 구한 경험적 관계로부터 수식을 유도하여 견인력 예측 모델에 적용하였다.

가. 휠의 해석

차량의 엔진으로부터 최종구동축에 전달된 토크는 휠을 구동시켜 차량이 주행하는데 필요한 구동력을 제공하며, 이러한 토크의 유·무에 따라 휠을 구동륜과 피구동륜으로 해석한다.

* 성균관대학교 생명자원과학대학 생물기전공학과

구동륜의 경우 연약지 주행시 휠에 전달되는 수직하중에 의해 임의의 침하량이 발생하고, 구동륜의 침하량에 의해 결정되는 휠과 토양의 전 접지면을 따라 수직응력과 전단응력이 발생하게 된다. 피구동륜의 경우는 엔진으로부터 전달되는 토크가 0인 상태에서 외력에 의해 끌려가는(밀리는) 상태로 휠과 토양의 접지면에서 수직응력만이 발생하게 된다. 그림 1과 그림 2는 구동륜과 피구동륜에 작용하는 힘의 구성을 보여준다. 한편, 피구동륜은 수직응력에 의해 운동저항은 발생하지만 전단응력이 존재하지 않기 때문에 추진력이 발생되지 않으며 견인력은 음(-)의 값을 갖게 된다. 식 (1)과 (2)는 휠에 작용하는 힘의 수직·수평방향의 평형방정식을 나타낸 것이며, 피구동륜의 경우 $\tau(\theta)$ 항을 0으로 놓고 해석한다.

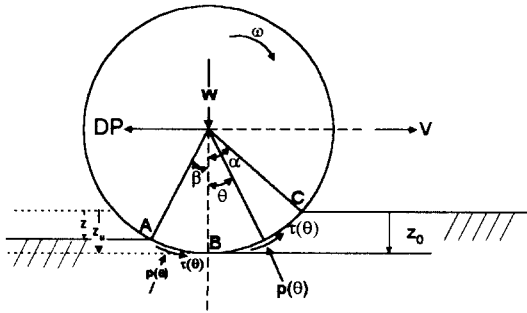


Fig.1 Simplified model for driving wheel-soil interaction.

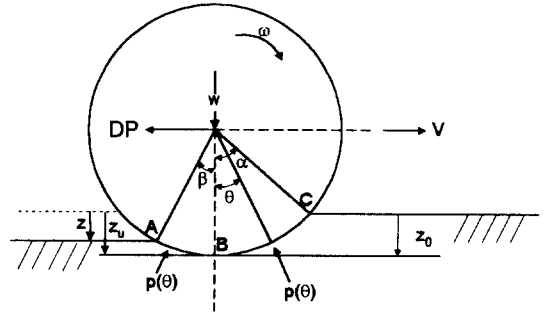


Fig.2 Simplified Model for towed wheel-soil interaction.

$$\begin{aligned}
 W = & b \int_{\frac{\pi}{2}-\alpha}^{\frac{\pi}{2}} p(\theta) \sin \theta \cdot r d\theta + b \int_{\frac{\pi}{2}-\alpha}^{\frac{\pi}{2}} \tau(\theta) \cos \theta \cdot r d\theta \\
 & + b \int_0^{\beta} p(\theta) \cos \theta \cdot r d\theta - b \int_0^{\beta} \tau(\theta) \sin \theta \cdot r d\theta \quad \text{-----} \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서, W : 휠의 축하중, b : 휠의 폭, r : 휠의 반경
 α : 휠의 진입각, β : 휠의 탈출각
 $p(\theta)$: 휠에 작용하는 수직응력, $\tau(\theta)$: 휠에 작용하는 전단응력

$$\begin{aligned}
 DP = & b \int_{\frac{\pi}{2}-\alpha}^{\frac{\pi}{2}} \tau(\theta) \sin \theta \cdot r d\theta - b \int_{\frac{\pi}{2}-\alpha}^{\frac{\pi}{2}} p(\theta) \cos \theta \cdot r d\theta \\
 & + b \int_0^{\beta} \tau(\theta) \cos \theta \cdot r d\theta + b \int_0^{\beta} p(\theta) \sin \theta \cdot r d\theta \quad \text{-----} \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서, DP : 휠에서 발생하는 견인력

나. 횡형차량의 해석

구동륜과 피구동륜의 해석방법을 이용하여 횡형차량의 구동방식에 따른 견인성능을 해석하기 위해 4륜구동(four-wheel-drive,4WD)의 경우는 4개의 휠 모두를 구동륜으로, 2륜구동(two-wheel-drive,2WD)의 경우는 전륜과 후륜을 각각 피구동륜과 구동륜으로 해석하였다. 전체 차량의 해석을 위한 첫번째 단계로서, 전륜의 침하량과 차량의 경사를 임의로 가정한 후 휠-토양 사이에 작용하는 수직응력과 전단응력에 의해 계산된 수직반력과 실제 차량무게에 대한 수직방향평형조건이 만족될 때까지 침하량을 증감시킨다. 수직방향의 평형조건이 만족되었을 때, 두 번째 단계로서 전체 차량에 작용하는 모멘트를 취하여 모멘트의 평형조건이 만족될 때까지 차량의 경사를 증감시켜가며 첫 번째 단계를 반복 수행한다. 따라서 차량의 해석은 위의 두 단계 즉, 수직방향 평형조건과 모멘트 평형조건이 만족될 때 완료되고, 그 때 횡형차량의 운동저항, 추진력, 견인력을 슬립의 함수로서 구할 수 있다.

다. 슬립-침하 효과에 의한 침하량 산정

차량이 연약지를 주행할 경우 차량의 이론속도와 실제속도와의 차이가 생기며 이러한 차이를 슬립이라 한다. 일반적으로 연약지에서는 슬립이 커짐에 따라 차량의 견인력이 증가하지만 주행부의 침하도 함께 증가하여 차량의 운동저항이 증가하는 현상이 나타나게 된다. 이와 같이 슬립의 증가에 따라 추가적으로 발생하는 침하를 슬립-침하라 하며, 이러한 슬립-침하는 차량의 견인성능에 크게 영향을 미치게 된다.

그림 3은 일정하중 상태에서의 전단응력-전단변위 관계와 전단변위의 증가에 따른 침하량의 변화관계를 도식적으로 나타낸 것으로서, 침하량은 전단변위의 증가에 따라 임의의 기울기(α)로 증가하고 있다. 한편, 최대전단응력이 나타날 때의 전단변위를 슬립 100%로 가정하면 그림 3의 전단응력-침하관계는 그림 4의 슬립-침하관계로 변환될 수 있다. 한편, 그림 4에 나타난 바와 같이 다양한 수직압력에서의 슬립에 따른 침하관계는 수직압력이 클수록 슬립의 증가에 대한 침하량의 증가폭(기울기)이 커지는 것으로 나타났다. 따라서 슬립-침하 효과를 수직하중의 함수로 표현하기 위해, 그림 5에 나타난 수직압력과 슬립-침하량의 변화(기울기) 관계로부터 수직압력에 따른 슬립-침하관계식을 다음과 같이 경험적으로 유도하였다.

$$\alpha = K_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{p}{k_s}} \right) \quad \text{-----} \quad (3)$$

여기서, K_{\max} , k_s : 슬립-침하 실험으로부터 유도된 변수 [m], [kPa]

p : 토양에 작용하는 수직하중 [kPa]

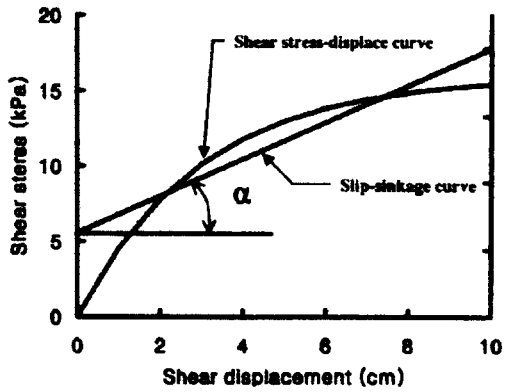


Fig.3 Shear stress-shear displacement and sinkage-shear displacement curve.

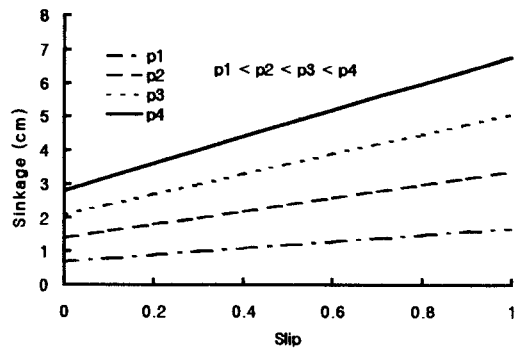


Fig.4 Variations of the sinkage with slip for various pressure.

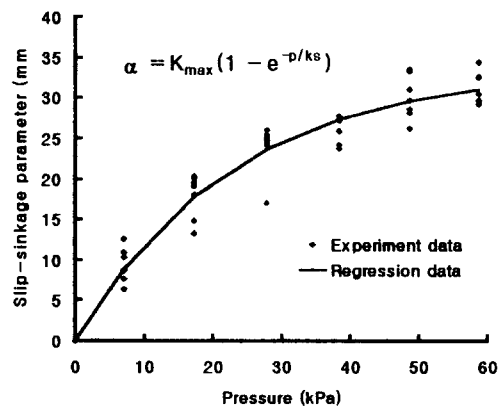


Fig.5 Variations of slip-sinkage parameter with various pressure.

따라서, 슬립-침하효과를 고려한 전체 침하량은 식 (4)와 같이 슬립이 없을 때의 침하 (no-slip)와 슬립에 의한 추가적인 침하(slip sinkage)의 합으로 나타낼 수 있다.

$$z_{total} = z_{no-slip} + z_{slip} = \left(\frac{p}{\frac{k_c}{b} + k_\phi} \right)^{\frac{1}{n}} + K_{max} \cdot (1 - e^{-\frac{p}{k_s}}) \cdot i \quad (4)$$

라. 견인성능 예측 프로그램

견인성능 예측 모델을 이용하여 베바미터에 의해 측정된 토양변수들과 휠형차량의 설계변수를 입력변수로 하여 휠형차량의 성능을 예측할 수 있는 시뮬레이션 프로그램(Tractive Performance Prediction Model for Wheeled Vehicles : TPPMWV-99)를 개발하였다. 프로그램은 C-언어로 작성하였으며 운영방식은 사용자가 편리하도록 자료를 입력한 후 계산 결과를 그래픽 형태로 출력한 후 저장할 수 있도록 되어 있으며 입력부(File), 계산부(Compute), 및 차량형태부(veiw)로 이루어졌다.

3. 견인력 실험

수학적 모델로부터 개발된 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램의 유효성을 검증하기 위하여 수분 함량이 15.59%인 양토(loam)에서 토양의 물리적 특성을 측정후 견인력 실험을 수행하였다.

토양의 물리적 특성은 성균관대학교 생물기전공학과에서 제작한 베바미터(Bevameter)⁽⁶⁾를 이용하여 토양의 압력-침하, 전단응력-전단변위, 반복하중에 대한 반응특성 및 슬립-침하 특성을 측정하였다. 표 1에 베바미터를 이용하여 측정된 값으로부터 유도된 토양변수를 나타내었다.

Table 1 Characteristics of soil used in traction test.

Parameter derived from plate sinkage test, k_c	78.31	[kN/m ⁿ⁺]
Parameter derived from plate sinkage tests, k_ϕ	2355.08	[kN/m ⁿ⁺]
Plate sinkage exponent, n	1.26	
Unloading-reloading parameter, k_0	36130	[kN/m ³]
Unloading-reloading parameter, A_u	-165519	[kN/m ⁴]
Soil cohesion, c	3.69	[kN/m ²]
Soil internal friction angle, ϕ	36.78	[degree]
Soil shear deformation modulus, K	0.01	[m]
Slip-sinkage parameter, K_{max}	0.033	[m]
Slip-sinkage parameter, k_s	22.98	[kN/m ²]

견인력 측정은 시험차량의 후미 견인고리와 하중차량의 전면 견인고리에 각각 강선을 연결하고 그 사이에 하중변환기를 부착한 후, 시험차량을 구동하여 하중변환기에 나타나는 인장력을 측정하여 구하였다. 한편, 슬립과 견인력 관계를 구하기 위해 시험차량의 전륜과 후륜에 부착된 로타리엔코더로부터 측정된 이론주행거리와 시험차량의 후부에 장착된 오륜(fifth wheel)으로부터 측정된 실제주행거리로부터 슬립을 측정하였다. 그림 6과 그림 7은 각각 견인력 실험에 사용된 시험차량과 하중차량을 나타내고 있다.

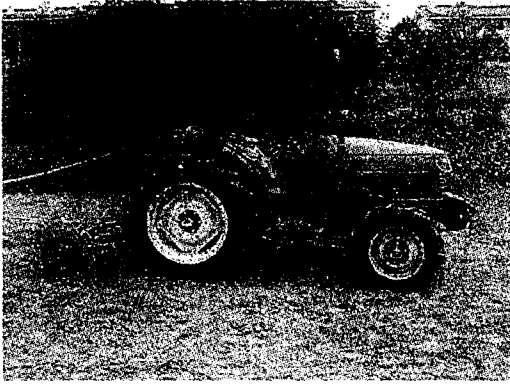


Fig.6 View of test vehicle.



Fig.7 View of load vehicle.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서 개발한 견인력 예측 모델의 유효성을 검증하기 위해 시뮬레이션 프로그램에 의해 예측된 견인력을 실험에 의해 측정된 견인력과 비교하였다. 비교결과 구동방식에 따른 측정치와 예측치간에는 일정한 경향을 나타내었으나, 이들을 직접 비교하여 그 차이를 구명하기에는 어려움이 많았다. 따라서 비교의 편의를 위하여 측정 결과를 Janosi and Hanamoto⁽¹⁾식에 적용하여 슬립의 함수로서 견인력에 대한 실험식을 유도하였다. 그림 8과 그림 9는 각각 4륜구동과 2륜구동 상태에서의 측정치와 예측치를 나타낸 것으로서 측정치와 예측치는 각각 점과 실선으로 나타내었고, 측정치로부터 유도된 실험식은 점선으로 나타냈었다.

4륜구동 상태에서 측정치와 예측치를 비교한 결과, 예측치는 전체 슬립구간에서 측정치와 유사한 경향이 나타났고, 측정치로부터 유도된 실험식과 예측치간의 최대오차는 슬립 62.33%에서 0.21kN(2.46%)으로서 측정치와 프로그램에 의한 예측치는 잘 일치하는 것으로 나타났다. 2륜구동 상태에서 전체 슬립구간에 따른 예측치와 측정치간의 비교결과는 4륜구동의 경우에 비해 상대적으로 덜 일치하는 경향을 나타냈으나, 최대오차는 슬립 64.66%에서 0.62kN(12.06%)로 매우 작게 나타나 예측치와 측정치는 잘 일치하는 것으로 판단되었다.

한편, 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 횡형차량의 구동방식에 따른 견인성능을 비교하였다. 그림 10은 구동방식에 따라 프로그램에 의해 예측된 견인계수(견인력/차량무게)의 결과를 보여주고 있다. 그림 10의 결과는 2륜구동과 4륜구동 모두 슬립이 증가함에 따라 견인계수가 증가하는 것으로 나타났고, 전체적으로 4륜구동의 경우가 2륜구동에 비해 높게 나타났다. 한편, 2가지 구동방식에 대해 슬립에 따라 예측된 견인효율은 견인계수의 결과와 마찬가지로 4륜구동의 경우가 전체 슬립구간에 걸쳐 2륜구동에 비해 크게 나타났다(그림 11). 또한 최대견인효율은 4륜구동의 경우에는 슬립 15%에서 57.85%, 2륜구동의 경우에는 슬립 30%에서 38.27%으로 나타나 4륜구동의 경우가 2륜구동에 비해 약 19.58% 크게 나타났다.

위의 결과를 종합해 볼때, 4륜구동의 경우가 2륜구동에 비해 높은 견인성능을 나타내는 것으로 판단된다.

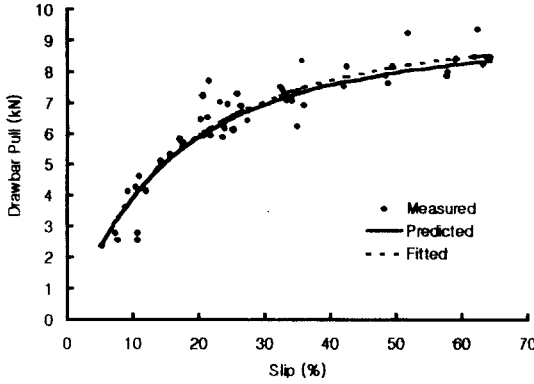


Fig.8 Comparison between the measured drawbar pulls and the predicted ones for four wheel drive tractor on the loam soil.

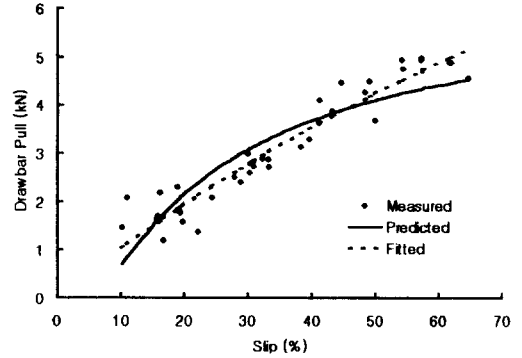


Fig.9 Comparison between the measured drawbar pulls and the predicted ones for two wheel drive tractor on the loam soil.

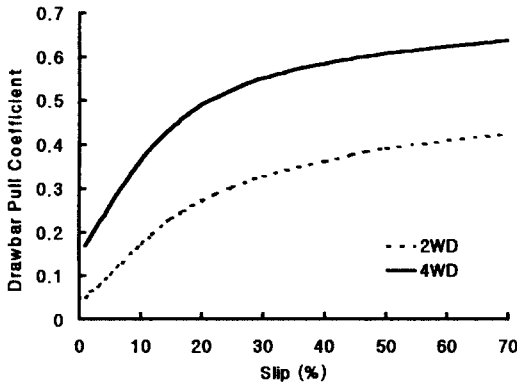


Fig.10 Variations of the drawbar pull coefficient of two wheel drive and four wheel drive tractor with slip.

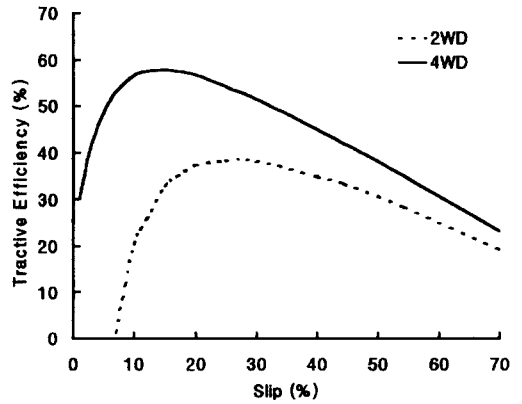


Fig.11 Variations of the drawbar pull coefficient of two wheel drive and four wheel drive tractor with slip.

5. 요약 및 결론

본 논문은 다양한 토양 상태에서 운용되고 있는 휠형 차량의 견인성능을 예측할 수 있는 수학적 모델을 개발하고, 모델로부터 휠형 차량의 견인성능을 종합적으로 평가할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램(TPPMWV99; Tractive Performance Prediction Model for Wheeled Vehicle)을 개발하기 위해 수행하였으며, 본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 슬립-침하 효과가 휠형 차량의 견인성능에 미치는 영향을 구명하기 위하여 토양 물리성 측정장치의 전단시험장치를 이용하여 토양의 슬립-침하 관계를 측정하여 슬립-침하 특성을 경험적으로 유도하였다.
2. 모델의 유효성을 검증하기 위하여 휠형 차량의 구동방식(2륜구동, 4륜구동)의 변화에 따라 실제 포장에서 견인력 실험을 수행하였으며 슬립의 변화에 따른 견인력 예측치의 결과는 두 경우 모두 측정치와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 개발된 모델은 휠형차량의 견인력을 잘 예측할 수 있는 것으로 판단된다.
3. 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 구동방식에 따른 견인성능을 비교한 결과 4륜구동이 2륜구동에 비해 전체 슬립구간에 걸쳐 견인계수가 크게 나타났으며 4륜구동과 2륜구동의 최대견인효율은 각각 57.85%, 38.27%로서 4륜구동의 경우가 2륜구동에 비해 약 19.58% 크게 나타나 4륜구동의 경우가 2륜구동에 비해 높은 견인성능이 나타났다.

6. 참고문헌

1. Janosi, Z. and Hanamoto, B., 1961. "The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soils." , Proc. of the 1st International Conference on the Mechanics of Soil Vehicle Systems, Toronto, Italy.
2. Okello, J. A. , 1994. "Prediction and Experimental Validation of the Field Tractive Performance of a Rubber Track Unit" , Journal of agricultural Engineering Research. Vol. 59 , No. 2. pp 163-171
3. Wong, J. Y. , 1984. "On the Study of Wheel-Soil Interaction", Journal of Terramechanics , Vol. 21 , No. 2 pp.117-131
4. Wong, J. Y. , 1984. "Terramechanics and Off-road Vehicles" Elsevier Publishers.
5. Wong, J. Y. , 1993. "Theory of Ground Vehicles" , John Wiley & Sons
6. 박원엽, 1997. "케도형 차량의 견인성능 예측 모델 개발", 성균관대학교 대학원 박사학위 논문