# 軌道型 車輛의 牽引性能 豫測 컴퓨터 시뮬레이션 모델 開發

# Development of Computer Simulation Model for Tractive Performance Prediction of Tracked Vehicles

박원엽* 이규승*
정회원 정회원
W.Y.Park K.S.Lee

## 1. 서론

현재 국내의 산업용 건설기계나 농업기계분야에서 이용되고 있는 주행장치로는 차륜형과 궤도형이 사용되고 있다. 그러나 차륜형은 도로(on-road)에서 뛰어난 기동성을 갖고 있는 장점에도 불구하고 로외(off-road)에서는 높은 접지압과 침하로 인해 궤도형에 비해 견인성능이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 로외차량(off-road vehicle)의 주행장치로 궤도형을 채택한 궤도형차량(tracked vehicle)의 수요와 생산이 점차 증가하고 있다.

궤도형차량이 운용되고 있는 토양은 점토에서부터 눈, 모래에 이르기까지 매우 다양하기 때문에 궤도형차량의 견인 및 주행성능은 지면의 토양상태에 따라 크게 영향을 받아 지면의 토양조건은 궤도형차량의 성능에 제한적인 요소로 작용하는 경우가 많다. 궤도형차량의 성능은 토양-궤도 접촉면에서의 상호관계에 의해 결정되므로 궤도형차량의 성능을 높이기 위한 설계에 있어서는 주어진 토양조건에서 토양변수와 궤도형차량의 설계변수와의 상호관계를 정확히 예측하는 것이 필요하다. 그러나 국내의 궤도형차량 설계에 필요한 지식과 기술은 아직 초보단계에 머무르고 있어 궤도형차량의 성능을 높이기 위한 연구의 필요성이 크게 요구되고 있다.

본 연구의 목적은 국내의 농업기계, 건설중장비 등의 주행장치로서 점차 그 이용 추세가 늘고 있는 궤도형차량의 성능을 평가하기 위하여 토양특성과 궤도형차량의 주요 설계변수들 간의 역학적 상호작용을 분석하여 궤도형차량의 견인성능을 예측할 수 있는 수학적 모델을 개발하고, 모델로부터 궤도형차량의 성능을 종합적으로 평가할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발하는데 있다.

* 성균관대학교 생명자원과학대학 생물기전공학과

## 2. 견인력 모델

궤도형차량이 연약한 지반위에 놓여 있을 때, 궤도계(track system)를 통해 작용하는 수직하중은 전체 궤도계에 걸쳐 다르게 분포되어 전륜(轉輪) 부분에서 최대 침하가 나타나고, 전륜 사이의 궤도구간(track segment)에서 최소 침하가 발생하게 된다. 전륜 아래 궤도부분의 형상은 전륜의 형태에 의해 영향을 받고, 전륜 사이의 궤도구간의 형상은 토양-궤도 변수의 상호작용, 특히 궤도장력에 크게 영향을 받아 전체 궤도계는 곡선형태를 나타내게 된다. 한편 궤도형차량의 주행에 따른 전륜의 연속적인 통과와 궤도 아래에서 발생하는 추진력과 슬립, 그리고 견인력의 작용점의 위치는 차량 후부(rear part)의 추가적인 침하를 유발하여 차량의 후부가 전부(front part)보다 높아지는 상태가 된다(그림 1). 따라서 궤도계의 해석은 토양변수와 차량의 설계변수, 그리고 운용조건에 따른 상호관계를 정확히 분석할 때 가능하게 된다.

따라서 본 연구에서는 토양변수와 궤도형차량의 주요 설계변수를 해석에 고려하여 궤도를 미소길이를 갖는 유한개의 요소로 구성하여 수치해석적 반복기법(numerical iterative technique)에 의해 궤도계를 해석하였다.

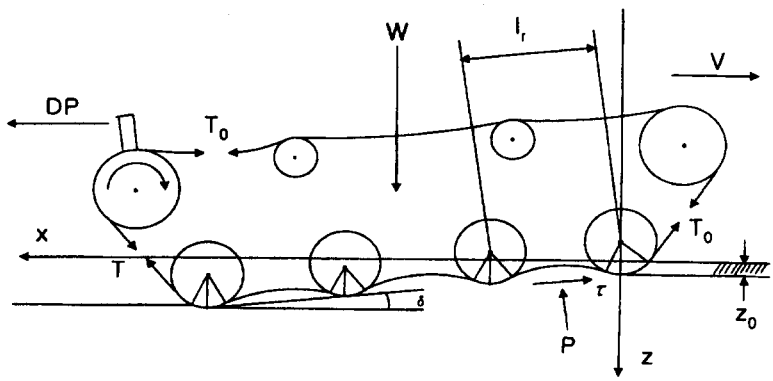


Fig.1 Geometry and forces of a track system in contact with a soft ground.

### 2-1. 스프로켓과 첫번째 전륜사이 궤도부분의 해석

그림 1과 같은 궤도계를 해석하는데 있어, 초기침하 $Z_o$와 차량경사 $\delta$를 가정함으로서 궤도형차량의 전부(front)에서 첫 번째 전륜(first roadwheel)의 진입각(entry angle) $\alpha_1$을 결정할 수 있다(그림 2, 상태 1). 그러나 침하가 매우 커서 토양표면의 높이가 첫번째 전륜상의 각 $\alpha_0$점의 높이보다 위에 있을 경우, $\alpha_0$의 윗부분에서 토양표면까지 토양과 접하는 궤도부분에 대해서는 토양반력이 작용한다(그림 2, 상태 2). 따라서 $\alpha_0$점의 위에 위치한 궤도부분은 토양반력에 의해 장력이 증가하고, 이러한 장력 증가는 궤도길이의 증가를 초래하여 궤도의

형태는 직선에서 곡선형태로 변형되고 궤도의 형상은 그림 2의 상태 1에서 상태 2와 같이 변형된다. 따라서 스프로켓 부분의 해석에서는 침하가 클 경우, 토양반력에 의한 궤도장력의 변화와 그에 따른 궤도형태의 변화를 해석에 고려하였다.

### 2-2. 첫번째 전륜의 해석

앞의 과정으로부터 첫번째 전륜의 진입각 $\alpha_1$을 결정한 후, 궤도가 첫번째 전륜과 분리되는 점에서 전륜의 원주상의 각도를 $\beta_1$이라 가정하면, 첫번째 전륜에 작용하는 힘들의 구성은 그림 3과 같이 나타난다.

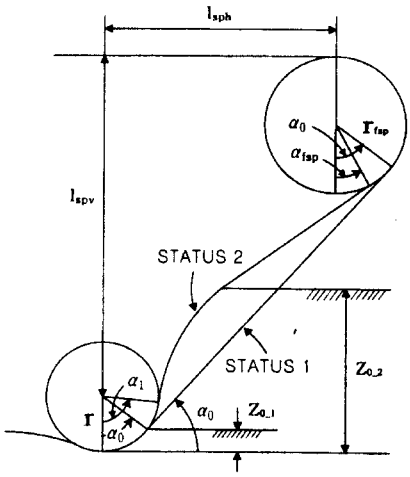


Fig.2 Change of track shape with sinkage.

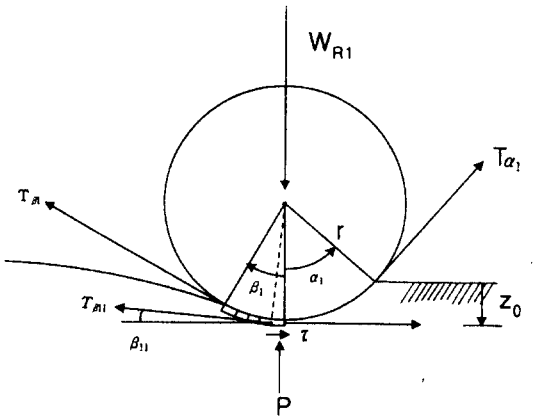


Fig.3 Forces acting on a roadwheel in contact with track

한편, 전륜이 최대 침하점($Z_{1c}$)부터 $\beta_1$까지 접촉하는 구간의 전륜상의 궤도 길이는 $\Delta l$의 미소 길이를 갖는 유한개의 요소(element)의 합으로 나타낼 수 있고, 요소 1 개일 때의 원주상의 각도를 $\Delta\beta$( $\Delta\beta = \Delta l/r$)라 하면, $\beta_1$은 $\Delta\beta$를 i개의 요소까지 더한 $\beta_{1i}$로 나타낼 수 있다. 따라서 첫번째 요소부터 i번째 요소($\beta_{1i}$)까지 전륜의 수평방향 평형을 고려하면 각각의 요소에서의 평형방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고, (1)식을 이용하여 임의의 탈출각에서의 궤도장력을 구할 수 있다.

$$T_{\beta 1,i}\cos\Delta\beta = b\int_{\beta_{1,i-1}}^{\beta_{1,i}}\tau(\theta)\cos(\theta-\beta_{i-1})\,r\,d\theta + b\int_{\beta_{1,i-1}}^{\beta_{1,i}}p(\theta)\sin(\theta-\beta_{i-1})\,r\,d\theta + T_{\beta 1,i-1} \quad \cdots\cdots (1)$$

### 2-3. 첫번째 궤도부분(track segment)의 해석

전륜아래의 궤도형상은 전륜의 크기에 의해 결정되지만, 전륜사이 궤도부분의 형상은 토양-궤도의 상호작용에 의한 장력변화로 임의의 곡선 형태로 나타난다(그림 4). 따라서 궤도부분의 해석은 궤도의 장력변화와 궤도곡선의 변화를 해석에 고려하였다.

궤도해석은 궤도부분을 $\Delta l$의 미소 길이를 갖는 유한개의 요소로 구분한 후 앞에서 가정한 첫번째 전륜의 탈출각 $\beta_1$과 그 점에서의 궤도장력으로부터 궤도부분의 첫번째 요소부터 임의의 요소까지 각 궤도의 접선방향과 수직방향에 대해 평형방정식을 구하면, 첫번째 궤도부분의 임의의 요소(k번째 요소)에 대한 평형방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{s1,k} \cos \Delta\beta_{s1,k} = T_{s1,k-1} + b\,\Delta l\,\tau_{s1,k-1} \quad \cdots\cdots (2)$$

$$T_{s1,k} \sin \Delta\beta_{s1,k} = b\,\Delta l\,p_{s1,k-1} \quad \cdots\cdots (3)$$

여기서, $T_{s1,k}$ : 첫번째 궤도부분의 k 번째 요소의 장력, [ kN ]

$T_{s1,k-1}$ : 첫번째 궤도부분의 k-1 번째 요소의 장력, [ kN ]

( 단, $T_{s1,0} = T_{\beta 1}$ )

$\Delta\beta_{s1,k}$ : 첫번째 k 번째 요소와 k-1 번째 요소의 각도 차, [ rad ]

$\tau_{s1,k-1}$ : 첫번째 k 번째 요소의 전단응력, [ $kN/m^2$ ]

$p_{s1,k-1}$ : 첫번째 k 번째 요소의 수직응력, [ $kN/m^2$ ]

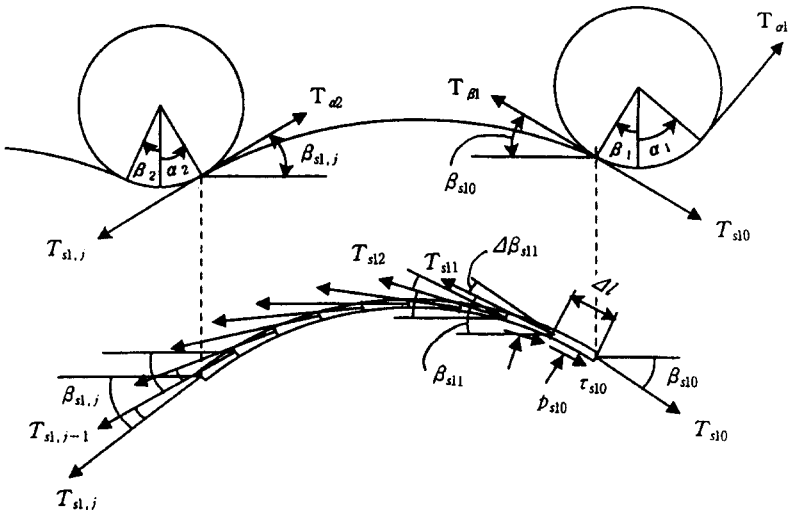


Fig.4 Forces acting on elements of track segment between roadwheels.

식 (2)와 (3)으로 부터 첫 번째 궤도부분의 임의 요소의 장력( $T_{sl.k}$)과 좌표를 구할 수 있고, 위 식을 요소를 증가시켜가며 반복함으로서 임의의 요소의 좌표가 두 번째 전륜의 좌표와 일치하고, 그 위치에서 궤도의 기울기와 전륜의 기울기가 일치할 때 첫 번째 궤도부분의 형상과 첫 번째 전륜의 탈출각(exit angle)과 두 번째 전륜이 진입각을 결정할 수 있다.

### 2-4. 전체 궤도계의 평형

n 개의 전륜으로 구성된 궤도시스템은 앞의 과정을 연속되는 마지막 전륜과 궤도부분까지 반복 수행함으로서 해석할 수 있다. 해석이 완료되면 차량의 자세로부터 차량의 무게를 계산할 수 있고, 침하를 변화시켜 가며 해석을 반복하여 계산된 차량의 무게가 실제 차량의 무게와 같을 때, 차량의 견인력(Drawbar pull:DP)을 구할 수 있다.

한편, 궤도형차량의 주행은 연속되는 전륜에 의한 반복하중과 슬립에 따른 추가적인 침하를 발생시키고, 견인력의 작용점 위치와 크기는 차량의 무게 중심을 후부로 이동시키게 된다. 따라서 이러한 무게중심의 변화에 의해 차량은 하중전이가 발생하여 차량의 전부가 높아지고 후부가 낮아져 임의의 각 $\delta$로 아래쪽으로 경사지는 상태가 되어 전체궤도계의 평형상태는 이루어지지 않는다. 따라서 앞에서 구한 견인력과 차량에 작용하는 힘들에 대한 모멘트가 평형상태를 이룰 때까지 차량의 경사 $\delta$를 수정해 가며 앞의 해석을 반복한다.

전체 궤도계는 차량의 수직, 수평, 모멘트가 균형을 이룰 때 완전히 해석되고, 그 때 궤도형차량의 견인력(Drawbar pull:DP)을 아래 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$DP = DP_W + DP_S + DP_{fsp} + DP_{fs} \quad \text{----------} \quad (4)$$

여기서, $DP_W$ : 전륜부분에서 산출되는 견인력

$DP_S$ : 궤도부분에서 산출되는 견인력

$DP_{fsp}$ : 스프로켓부분에서 산출되는 견인력

$DP_{fs}$ : 스프로켓과 첫 번째 전륜사이의 궤도부분에서 산출되는 견인력

## 3. 컴퓨터 시뮬레이션

개발한 견인력 예측 모델을 이용하여 토양변수와 궤도형차량의 제원을 입력변수로 하여 궤도형차량의 견인성능을 예측할 수 있는 시뮬레이션 프로그램(TPPMTV98)을 개발하였다.

수학적 모델의 유효성을 검정하기 위해 Wong[8,9,10]의 문헌에 보고된 결과를 TPPMTV98을 이용한 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

TPPMTV98과 Wong의 모델에 의한 접지압분포의 비교는 전륜아래 평균최대압력(MMP)을 이용하였다. 그림 5는 차량무게에 따른 MMP값을 나타낸 그림으로 TPPMTV98에 의한 MMP값은 Wong의 결과와 유사한 경향을 나타내고 있으나 상대적으로 낮게 예측되고 있다.

이와 같은 경향은 본 모델은 Wong의 모델에 비해 전단응력이 상대적으로 크게 나타나 전단응력에 의한 궤도의 장력증가량이 커서 전륜사이의 궤도부분에서 지지하는 하중이 크기 때문으로 판단된다. 한편 그림 6은 TPPMTV98를 이용한 궤도 아래의 접지압분포를 보여주고 있다.

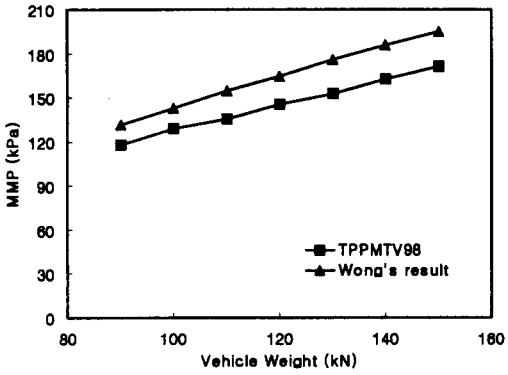


Fig.5 Variations of MMP with vehicle weight at 20% slip.

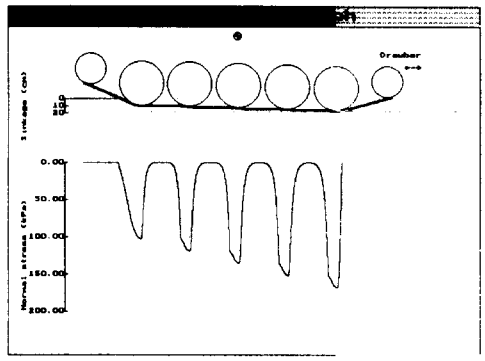

Fig.6 Normal pressure distribution under track at 20% slip.

그림 7은 두 모델을 이용하여 슬립에 따른 견인력계수를 나타낸 그림으로 TPPMTV98의 결과는 Wong의 결과에 비해 전체적으로 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 MMP의 비교에서와 같이 본 모델이 Wong의 모델에 비해 전단응력이 커서 추진력이 크게 예측되어 견인력계수도 높게 나타난 것으로 판단된다.

한편 슬립에 따른 견인효율은 아래 그림 8과 같이 TPPMTV98과 Wong의 결과가 거의 일치하고 유사한 경향을 나타내었다.

위의 결과를 종합해 볼 때, 본 모델의 결과는 Wong의 모델에 비해 견인력을 높게 예측하나 그 차이가 크지 않고 전반적으로 유사한 경향을 보이고 있다.

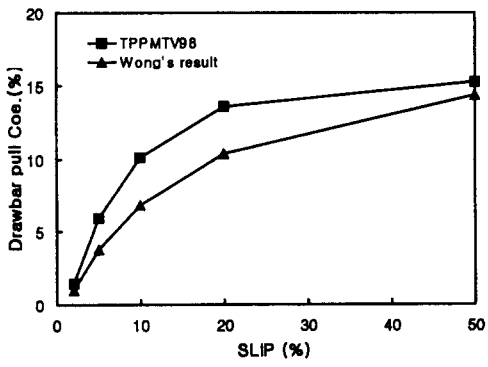


Fig.7 Variations of the drawbar pull coefficient with slip.

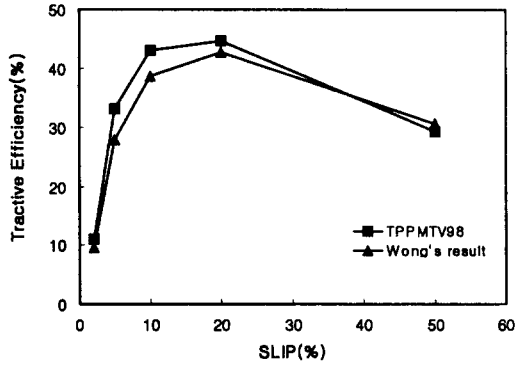


Fig.8 Variations of the tractive efficiency with slip.

## 4. 요약 및 결론

로외에서 운용되는 궤도형차량의 견인성능을 예측할 수 있는 수학적 모델을 개발하고, 모델로부터 궤도형차량의 성능을 평가할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 모델(TPPMTV98)을 개발하였다. TPPMTV98은 주어진 토양조건과 궤도형차량의 설계변수로부터 궤도형차량의 침하량과 궤도형상, 접지압분포, 전단응력, 추진력, 운동저항, 견인력 등을 종합적으로 예측할 수 있다. TPPMTV98의 검정은 유효성이 입증된 Wong의 결과와 비교하는 방법으로 검정였으며, 시뮬레이션 결과는 유효성을 인정할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 시뮬레이션 프로그램 TPPMTV98은 궤도형차량의 투입 및 운용 뿐만아니라 궤도형차량의 설계과정에서 설계인자에 따른 상대적인 성능비교를 가능하게 하므로 궤도형차량의 성능을 향상시키는데 활용될 수 있을 것이다.

## 5. 참고문헌


1. 김경욱. 1994. "궤도형 로외차량의 주행 및 견인 성능 예측 모형 개발" 한국과학재단 연구보고서
2. 室 達朗, 1993. "テラメカニックス-走行力學-", 技報堂
3. Bekker, M. G., 1956. "Theory of land locomotion." University of Michigan Press.
4. 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, Edizioni Minerva Tecnica, Torono, Italy.
5. Kogure, K. and Y. Ohira, H. Yamaguchi., 1982. "A simplified method for the estimation of soil thrust exerted by a tracked vehicle." Journal of Terramechanics, Vol. 19, No. 3, pp. 165-181.
6. Muro, T., 1989. "Tactive performance of a bulldozer running on weak ground." Jounal of Terramechanics, Vol. 26, No. 3/4, pp. 249-273.
7. Okello, J. A., 1994. "Prediction and experimental validation of the feild tractive performance of a rubber track unit." Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 59, No. 2, pp. 163-171.
8. Wong, J. Y., 1989. "Terramechanics and off-road vehicles." Elsevier Publishers.
9. Wong, J. Y., 1993. "Theory of ground vehicle." John Wiley & Sons Newyork.
10. Wong, J. Y., 1994. "On the role of Mean Maximum Pressure as An Indicator of Cross-country Mobility for Tracked Vehicles." Journal of Terramechanics, Vol. 31, No.3, pp. 197-213.