

## Vecna BEAR 형 로봇의 견인력 추정을 위한 Lumped 궤도 모델링

김태윤\* · 정사무엘\* · 유완석\*\*

\* 부산대학교 기계공학부

### Lumped Track Modeling for Estimating Traction Force of Vecna BEAR Type Robot

Tae Yun Kim \*, Samuel Jung \* and Wan Suk Yoo \*\*†

\* School of Mechanical Engineering, Busan Nat'l Univ.

(Received October 7, 2014 ; Revised December 23, 2014 ; Accepted January 2, 2015)

**Key Words:** Track Modeling(궤도 모델링), Crawler(크롤러), Traction Force(견인력), Vecna BEAR Type Robot(Vecna BEAR 형 로봇)

**초록:** 최근 전투에서 인명 손실을 최소화하기 위해 사람이 접근하기 어려운 지역에서 부상병을 구조해 내는 로봇(Vecna Bear type robot)이 개발되고 있다. Vecna BEAR 형 로봇은 험한 지형을 주행하게 되므로 큰 진동 및 전복에 의해 부상자에게 충격을 가할 수 있다. 이러한 로봇의 안정성을 보장하기 위해서는 다양한 환경에 대해 주행 한계속도를 실시간으로 추정할 수 있는 알고리즘이 요구된다. 따라서 한계속도 추정 알고리즘을 수행하기 위하여 실시간 해석이 가능한 동역학 모델이 필요하다. Vecna BEAR 형 로봇의 구동부인 궤도는 실제로 많은 요소로 구성되어 있기 때문에 궤도의 다물체 동역학 모델에 의한 실시간 해석은 불가능하다. 그러므로 적은 해석량과 합당한 정확성을 만족하는 lumped 궤도 모델이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 lumped 궤도 모델링을 수행하였고, 다물체 동역학 상용 프로그램인 RecurDyn 을 이용하여 견인력을 검증하였다.

**Abstract:** Recently, Vecna BEAR type robot to save injured individuals from inaccessible areas has been developed to minimize the loss of life. Because this robot is driven on rough terrain, there is a risk of rollover and vibration, which could impact the injured. In order to guarantee its stability, an algorithm is required that can estimate the speed limits for various environments in real time. Therefore, a dynamic model for real-time analysis is needed for this algorithm. Because the tracks used as the driving component of Vecna BEAR type robot consist of many parts, it is impossible to analyze the multibody tracks in real time. Thus, a lumped track model that satisfies the requirements of a short computation time and adequate accuracy is required. This study performed lumped track modeling, and the traction force was verified using RecurDyn, which is a dynamic commercial program.

- 기호설명 -

$b$  : 평판의 작은 폭  
 $w_t, l_t$  : 궤도의 폭, 길이  
 $k_c, k_\phi$  : 토양 변형 계수  
 $n, c$  : 토양의 변형지수, 점착력  
 $\phi$  : 토양의 내부 마찰각  
 $k$  : 전단곡선의 변형상수

$\Delta, \dot{\Delta}$  : 전단 변위, 슬립 속도  
 $v_t$  : 궤도의 이론 속도  
 $v_{x,i}$  : 궤도 요소의 x 방향 속도  
 $v_{y,i}$  : 궤도 요소의 y 방향 속도  
 $C_t$  : 토양의 댐핑 상수

#### 1. 서론

† Corresponding Author, [wsyoo@pusan.ac.kr](mailto:wsyoo@pusan.ac.kr)  
 © 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

Fig. 1 은 미국 Vecna 사에서 개발 중인 BEAR (Battlefield Extraction-Assist Robot)의 모습이다. Vecna

BEAR 형 로봇은 미래전 상황시 사람이 접근하기 힘든 지역으로부터 부상자의 구조를 목적으로, 구조한 부상자를 들고 안전한 지역까지 이동하는 임무를 수행하는 무인 로봇이다. 위험 지역에 투입되는 만큼 Vecna BEAR 형 로봇에 대한 조작은 원격으로 이루어지게 된다. Vecna BEAR 형 로봇의 임무수행 환경은 시가지 또는 야지로서, 예측을 벗어난 상태의 노면을 주행하게 될 때 충격으로 인한 전복의 위험이 있다. 이와 동시에 부상자에게 2 차 충격을 가할 수 있으므로 조작자의 모니터링을 통한 속도 제어만으로는 로봇 및 부상자의 안전성을 보장할 수 없다. 이에 차량형 로봇에 적용된 사례가 있는 한계주행속도 결정 알고리즘<sup>(1,2)</sup>을 적용하여 조작자의 속도제어를 보조하고 Vecna BEAR 형 로봇의 주행 안전성을 보장한다.

이러한 알고리즘을 적용하여 한계속도를 실시간으로 판정하기 위해서는 원격으로 조종되는 Vecna BEAR 형 로봇의 거동을 실시간으로 예측할 수 있어야 한다. 기존의 상용 프로그램은 모델링이 편리한 반면, 해석 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 따라서 Vecna BEAR 형 로봇의 한계 속도추정을 위한 알고리즘에는 기존의 다물체 동역학 상용 프로그램을 사용할 수 없고, 적은 해석량과 합당한 정확성을 가지는 동역학 모델 및 운동방정식 구성이 필요하다.

특히 Vecna BEAR 형 로봇의 구동부인 궤도는 크롤러형 고무 궤도를 사용하며, 궤도는 굽힘에는 매우 유연하고 인장에는 매우 강한 특성 때문에 해석 상 많은 어려움이 있다. 이러한 특성 때문에 보기를은 궤도로부터 접촉에 근거한 구속력을 받으면서 지면으로부터 분포력을 받을 뿐만 아니라 지면의 형상이나 보기의 위치에 따라 궤도의 형태가 매우 불규칙하게 나타나므로 운동학적 해석에도 많은 어려움이 따른다. 또한 Vecna BEAR 형 로봇은 거친 노면을 달리게 되므로, 주행 노면을 평지 노면으로만 가정한 기존의 논문<sup>(3)</sup>은 적용할 수 없다.



Fig. 1 Vecna BEAR

따라서 본 논문에서는 궤도 효과와 지면과의 접촉 영역을 고려한 간략화된 해석 모델을 제시하였다. 이러한 lumped 궤도 모델은 궤도에 의한 접촉력을 직접 구하여 로봇의 운동방정식에 외력으로 넣어 주는 방법을 사용함으로써 실시간해석이 가능하도록 한다. 그리고 제안된 lumped 궤도 모델에 대하여 상용 다물체 동역학 프로그램인 RecurDyn 을 사용하여 견인력 검증을 수행하였다.

## 2. 궤도 모델링

### 2.1 궤도의 요소 분할

기존의 논문<sup>(3)</sup>에서는 궤도가 운용되는 환경을 평지 노면으로만 가정하고 작용하는 압력 분포를 Fig. 2 와 같이 5 가지의 경우로 분류하여 각각의 압력 분포에 따른 견인력 예측 방법을 나타내었다. 또한 궤도 아래 전단 변위가 전체 궤도 길이에 걸쳐 선형적인 증가를 보인다고 생각하였다. 그러나 Vecna BEAR 형 로봇은 장애물이 있거나 노면이 거친 험로를 주행하므로 기존의 논문을 그대로 적용하기는 어렵다. 그리고 멀티바디 모델은 지면의 형상에 따른 궤도힘은 구할 수 있지만 해석량이 많다는 단점이 있다.

따라서 적은 해석량으로 장애물에 따른 실제 압력 분포를 계산하기 위하여 본 논문에서는 궤도를 길이방향으로 N 개의 요소로 분할하여 궤도힘을 계산하는 방법을 제안한다. 궤도를 요소로 분할함으로써 요소마다의 힘 계산을 통하여 주행 노면의 장애물의 위치에 따른 압력 및 힘을 출력할 수 있게 된다.

분할한 요소는 Fig. 3 과 같이 폭  $w_i$ , 길이  $l_i$ 의 크기를 가지며 요소의 면적은  $A_i(=w_i \times l_i)$ 이다. 이

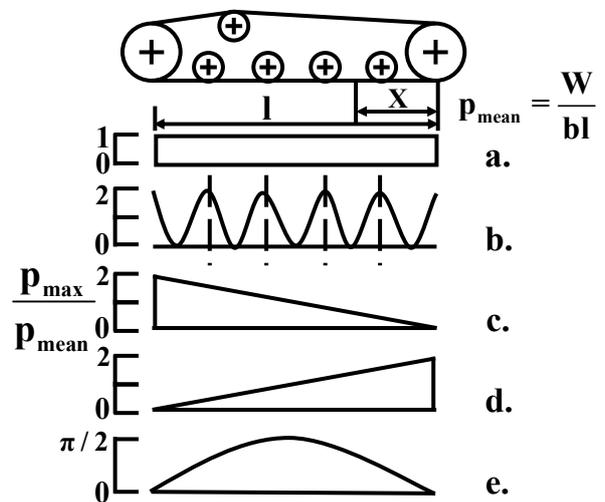


Fig. 2 Various idealized normal pressure

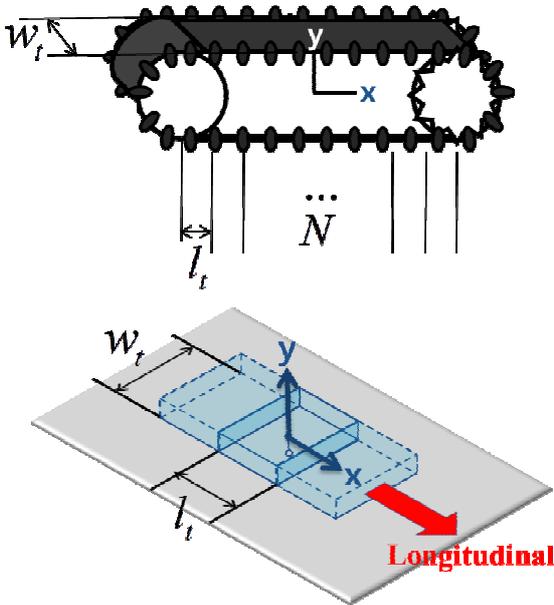


Fig. 3 Distribution of track

때 각 요소에 작용하는 궤도힘은 요소의 면적에 일정하게 분포하여 작용한다고 가정한다.

2.2 궤도힘 계산

2.2.1 토양의 압력-침하 특성

Bernstein<sup>(4)</sup>은 토양이 적당한 깊이까지 균일한 성분으로 구성되어 있다고 가정하여 평판의 압력-침하 관계를 정의하였다. 그러나 Bernstein 은 평판의 형태를 고려하지 못했고, Bekker<sup>(5)</sup>는 이를 고려하여 평판의 압력-침하 관계를 다음과 같이 나타내었다.

$$p = \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n \quad (1)$$

$$b = w_t$$

여기서  $b$ 는 평판의 작은 폭,  $w_t$ 는 Fig. 3에서 볼 수 있는 궤도 요소의 폭,  $z$ 는 침하량이다. 이때, Bekker<sup>(5)</sup>의 식 (1)을 궤도힘 계산에 적용하기 위하여 평판의 작은 폭  $b$  대신 궤도 폭  $w_t$ 을 대입하였다.  $k_c$ ,  $k_\phi$ 은 순수한 토양만의 성질을 나타내는 토양 변형계수로서 Fig. 4와 같이 토양의 변형지수  $n$ 에 따라 차원이 변한다. 차원 변화에 따른 물리적 해석은 어려운 단점이 있지만 현재 토양의 압력-침하 관계를 나타내는데 가장 광범위하게 사용되고 있다.<sup>(7)</sup> 이러한 토양 변수는 베바메타(bevameter)를 사용하여 측정한다.

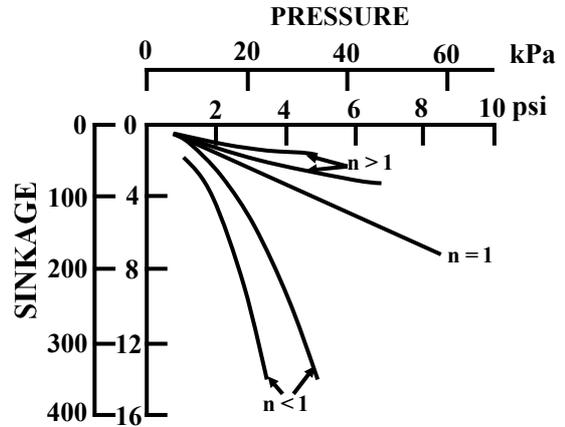


Fig. 4 Pressure-sinkage curves of various homogeneous soil (Bekker,<sup>(6)</sup> 1969)

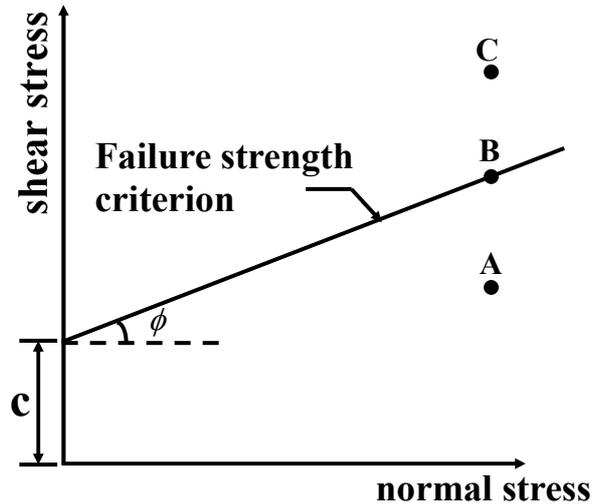


Fig. 5 Mohr-Coulomb's failure criterion

$$\tau_{max} = c + p \tan \phi \quad (2)$$

여기서  $p$ 는 압력,  $c$ 는 토양의 점착력,  $\phi$ 는 토양의 내부 마찰각으로써 베바메타를 통해 측정 가능하다. 일반적으로 점토성분이 많이 포함된 토양일수록 점착력  $c$ 의 상대적 비중이 커지고, 모래 성분이 많이 포함된 토양일수록 내부 마찰각  $\phi$ 가 커진다.

Fig. 5에서 점 A와 같이 수직응력과 전단응력이 작용하고 있다면 전단 파괴는 일어나지 않는다. 점 B와 같이 수직응력과 전단응력이 파괴선에 위치한 경우에 전단파괴가 일어난다. 점 C는 이미 전단파괴가 일어난 이후로써 실제로는 존재하지 않는다.

Mohr-Coulomb의 파괴법칙은 전통적인 토질역학에서 유래된 식이지만 수직응력과 전단응력의 점

이 파괴선에 접할 때 전단파괴가 일어난다는 이론에 근거하여, 궤도 아래 토양에서 발생하는 최대 토양응력을 산출하는데 사용하고 있다.<sup>(7)</sup>

### 2.2.2.2 토양의 전단변위-전단응력 특성

궤도힘은 다음과 같은 순서를 가지고 계산된다. 궤도와 지면에서 발생하는 슬립 속도에 따른 전단 변위로부터 전단응력을 구하고, 이러한 전단응력으로부터 견인력을 계산한다. 따라서 전단변위와 전단응력의 관계에 관한 이해는 매우 중요하다. Janosi-Hanamoto<sup>(8)</sup>는 소성 토양(plastic soil)에 대해 하나의 상수 만을 포함하는 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\tau = \tau_{\max} \left( 1 - \exp\left(\frac{-\Delta}{k}\right) \right) \quad (3)$$

여기서  $k$ 는 전단변형지수로서 전단응력-전단변위 관계를 측정하여 구할 수 있다. 그리고  $\Delta$ 는 전단 변위로서 다음 절에서 정의되며, 전단변위  $\Delta$ 가 결정되면 식 (3)으로부터 궤도 아래 전단응력 분포를 구할 수 있다.

### 2.2.2.3 전단변위

장애물에 따른 실제 압력 분포를 계산하기 위해 현재 고려하고 있는 궤도의 요소별 전단 변위를 구하기 위하여, McCullough<sup>(9)</sup>가 제시한 전단 변위의 정의를 적용한다.

궤도 아래의 전단 변위는 궤도의 longitudinal 슬립 속도  $\dot{\Delta}_{\text{long}}$ 와 전단 하중이 가해지는 시간  $t_c$ 를 곱하여 전단 변위를 구한다.

먼저 궤도의 longitudinal 슬립 속도  $\dot{\Delta}_{\text{long}}$ 는 다음과 같다.

$$\dot{\Delta}_{\text{long},i} = v_t - v_{x,i} \quad (4)$$

본 논문에서는 궤도의 요소별로 전단 응력을 구하고 있으므로 슬립 속도 역시 각 요소에 따라 계산해야 한다.

그리고 전단 변위를 구하기 위한 전단 하중이 가해지는 시간은 요소의 주행 방향 속도  $v_{x,i}$ 와 궤도의 길이  $l_i$ 로부터 계산할 수 있다.

$$t_{c,i} = \frac{l_i}{|v_{x,i}|} \quad (5)$$

따라서 요소별 전단 변위는 다음과 같다.

$$\Delta_i = \left| \dot{\Delta}_{\text{long},i} \right| \times t_{c,i} \quad (6)$$

### 2.2.3 궤도힘

식 (3)과 식 (6)을 이용하면 궤도 요소별 전단 응력을 구할 수 있다. 전단 응력에 접촉면적을 곱함으로써 전체 전단력의 크기를 계산할 수 있고, 이는 곧 궤도의 견인력이 된다. 그리고 압력과 접촉면적의 곱으로써 수직력을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{x,i} &= \tau_i A_t = \tau_i w_i l_i \\ T_{y,i} &= p_i A_t = p_i w_i l_i \end{aligned} \quad (7)$$

그리고 McCullough<sup>(9)</sup>는 토양의 댐핑 상수  $C_t$ 와 요소의 수직 방향 속도  $v_{y,i}$ 를 이용하여 soil damping 효과를 나타내었다.

따라서 요소별 견인력 및 수직력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{x,i} &= T_{x,i} \\ F_{y,i} &= T_{y,i} - C_t v_{y,i} \end{aligned} \quad (8)$$

결국 차체에 가해지는 최종 궤도힘은 각 요소힘의  $N$ 개 합으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_x &= \sum_{i=1}^N F_{x,i} \\ F_y &= \sum_{i=1}^N F_{y,i} \end{aligned} \quad (9)$$

## 3. 검증 모델

### 3.1 Two track vehicle model

제안된 궤도힘 모델은 다물체 동역학 모델에 비하여 다소 간략하게 궤도힘을 구한다. 따라서 이러한 궤도힘 모델의 신뢰성을 확보하기 위해서 다물체 동역학 모델에 대한 검증이 필요하다. 검증은 다물체 동역학 상용 프로그램인 RecurDyn을 사용하여 모델링한 다물체 동역학 모델과 궤도힘 모델을 적용한 lumped 궤도 모델을 비교하여 검증한다. 다물체 동역학 모델과 lumped 궤도 모델에 대한 검증은 Vecna BEAR 형 로봇 전체 시스템에 대해서가 아닌 Fig. 6과 같이 단일 바디를 가지는 two track vehicle model에 대하여 수행한다. 그 이유로 현재의 검증 목적은 로봇의 다른 파트들의 상호 작용에 의한 응답을 보는 것이 아니라 궤도 자체의 검증이 목적이기 때문이다.



Fig. 6 Typical two track vehicle

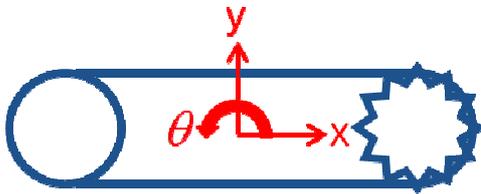


Fig. 7 Coordinates of lumped track model

### 3.1.1 Lumped 궤도 모델

Lumped 궤도 모델의 견인력을 보기 위한 모델은 Fig. 7 과 같이 longitudinal  $x$ , vertical  $y$ , pitch  $\theta$ 의 3 자유도를 가지는 2 차원으로 모델링한다.

Lumped 궤도 모델은 차체만 질량과 관성모멘트를 가지며 궤도 부분은 궤도의 힘을 계산하여 차체에 입력이 된다. 즉, 궤도는 질량과 관성모멘트가 없으며 Fig. 7 과 같은 형상으로 가정함으로써 형상 아래 지면이 닿는 부분에서 힘 계산이 이루어지게 된다. 형상 아래의 요소별 위치는 차체의 center of mass 에 대한 local 정보로써 정의되어 있고, 요소별 위치 아래에 있는 지면의 위치 정보를 보간하여 얻음으로써 침하량을 계산하게 된다.

Lumped 궤도 모델의 운동방정식은 식(10)과 같다. 차체의 질량  $m$  과 관성모멘트  $I$  로 이루어진 mass 행렬과 궤도의 침하량에 따른 견인력과 수직력, 모멘트가 발생되어 외력으로 삽입 되는 force 행렬로 구성된다. 운동방정식은 시간에 따른 적분을 통하여 동역학 해석이 이루어진다.

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M \end{bmatrix} \quad (10)$$

그리고 lumped 궤도 모델에서 궤도의 요소 개수를 선정하는 것이 필요하다. 궤도를 요소별로 나

Table 1 Design variable of lumped model

Design Variable	Value
DV_track_height $h_t$	0.980 m
DV_track_length $l_{total}$	2.925 m
DV_track_width $w_t$	0.23 m
DV_chassis_height $h_c$	0.25 m
DV_chassis_length $l_c$	1.8 m
DV_chassis_mass $m$	2242 kg
DV_chassis_I $I$	1607 kg·m <sup>2</sup>

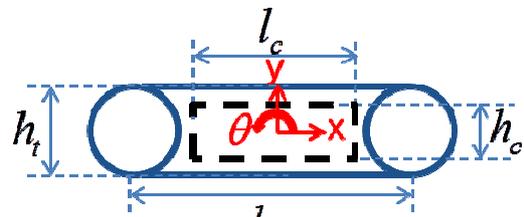


Fig. 8 Schematic of lumped track model

눌 때, 개수에 따라 각 요소의 길이가 달라지고 그에 따라 출력할 수 있는 전단응력 크기가 달라진다. 만약 요소의 개수가 많아 전단 변위가 요소의 길이보다 클 경우 그 이상의 전단응력은 출력할 수 없다. 게다가 각 요소의 전단변위는 선형합이 이루어지지 않는 점도 전단응력 크기에 영향을 미친다. 따라서 궤도의 주행 중 발생하는 전단 변위를 수용할 수 있는 요소의 길이와 개수를 구하기 위하여 반복 시뮬레이션 수행하였다. 이로부터 검증을 위한 요소 개수는 15 개로 선정하였다.

Fig. 8 은 lumped 궤도 모델의 개략도로써 점선은 차체를 나타내고 실선은 궤도를 나타낸다. 이에 따른 design variable 은 Table 1 과 같다.

### 3.1.2 다물체 동역학 모델

다물체 동역학 모델은 RecurDyn 을 이용하여 모델링하였다. RecurDyn 을 이용한 궤도 모델은 Fig. 9 와 같다. 단위 슈(shoe)로부터 궤도가 생성되며, Vecna BEAR 형 로봇의 궤도는 고무 궤도임을 고려하여 러그(lug) 형상을 편평하게 하였다. 그리고 sprocket, idler, road wheel, center(carrier), tensioner, track frame 으로부터 궤도 모델이 구성된다. 각 바디는 revolute joint, fixed joint, translational joint 로 연결된다. Sprocket 의 motion 을 통하여 궤도는 구동되며 tensioner 의 스프링 값을 통하여 궤도 장력을

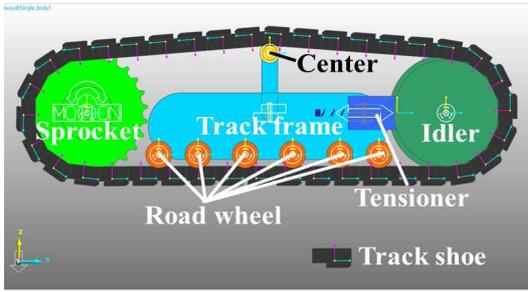


Fig. 9 Track designed by RecurDyn



Fig. 11 Traction trailer (Auto Journal<sup>(10)</sup>)

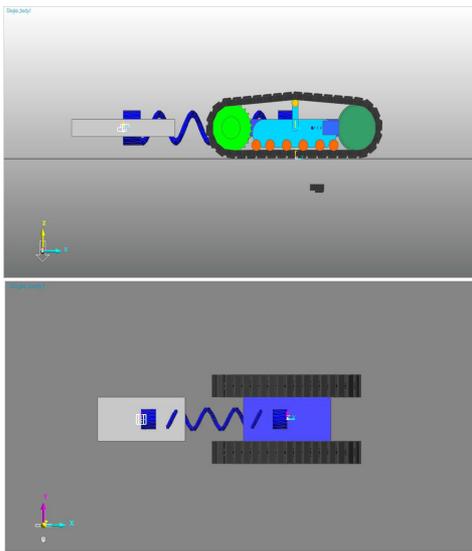


Fig. 10 Simulation about traction force

조절한다. 이러한 궤도 모델 두 개를 사용하여 two track vehicle model 을 모델링하였다.

#### 4. 시뮬레이션

##### 4.1 시뮬레이션 환경 및 조건

기존의 동역학 상용 프로그램인 RecurDyn 은 실험과의 검증이 되어있으므로, 상용 프로그램의 결과를 정해로 가정하고 시뮬레이션을 통하여 검증을 수행한다.

시뮬레이션은 two track vehicle model 이 등속 주행시의 견인력 검증을 목표로 하며 검증의 방법은 다음과 같다. Fig. 10 과 같이  $k(=100\text{kN/m})$ ,  $c(=5\text{kNs/m})$  값을 가지는 스프링을 차체의 질량 중심점과 고정 물체에 구속하여 스프링에 걸리는 힘을 견인력으로 간주하여 두 모델 간에 비교함으로써 검증한다. Fig. 11 은 제동이 가능한 trailer 를 통하여 차량의 견인력 측정 실험을 나타내고 있다. 이와 같이 실제 시험에서의 견인력 측정 또한 시험 차량의 후미 견인고리와 하중차량의 전면 견인고리에 각각 강선을 연결하고 그 사이에 인장력을

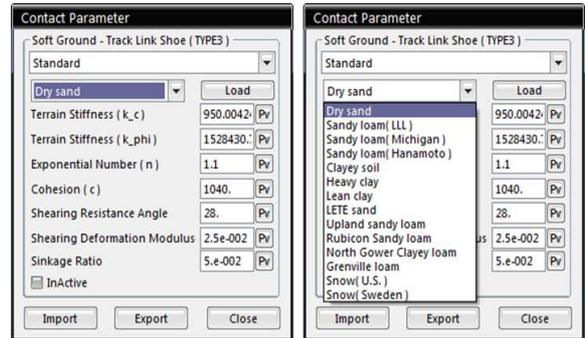


Fig. 12 Soil parameter of RecurDyn

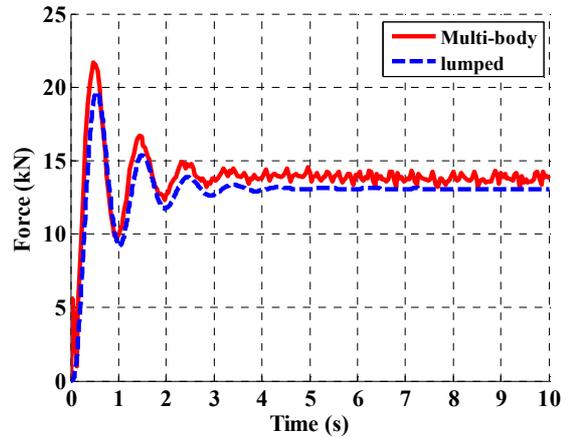


Fig. 13 Traction force

측정할 수 있도록 하중변환기를 부착한 후 시험차량을 구동하여 하중변환기에 나타나는 인장력을 측정한다.<sup>(7)</sup>

RecurDyn 에서는 Fig. 12 와 같이 Bekker<sup>(5)</sup>의 이론을 따르는 궤도와 토양의 contact parameter 를 제공한다. 시뮬레이션 토양 재질은 dry sand 로 선택하여 멀티바디 모델과 lumped 궤도 모델에 입력하였다.

##### 4.2 시뮬레이션 결과

###### 4.2.1 견인력

멀티바디 모델과 Lumped 궤도 모델의 스프링에 측정되는 힘의 비교 그래프를 Fig. 13 에 나타내었다. Fig. 13 으로부터, 초반 가속에 의해 큰 힘이 발

Table 2 Comparison with results of simulation

	Multi-body	Lumped	Error
RMS value	13.85 kN	13.09 kN	5.8 %

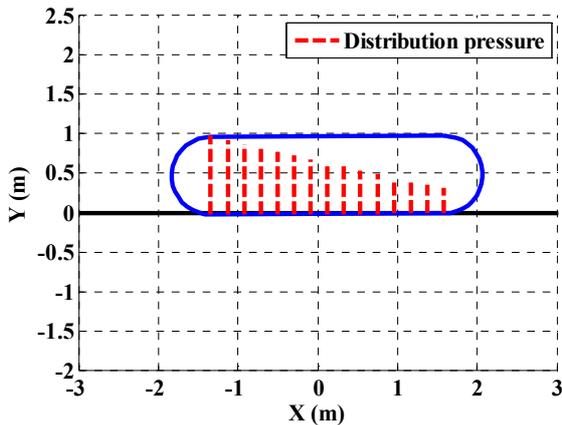


Fig. 14 Simulation of lumped track model

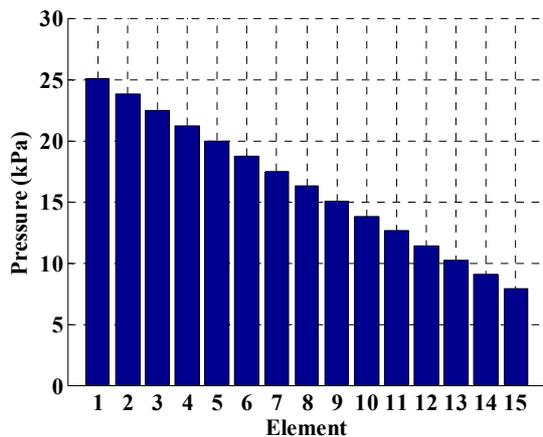


Fig. 15 Distribution pressure

생하여 peak 를 나타내고 스프링 구속에 의해 정상상태를 찾아가는 모습에서 위상이 거의 같음을 확인할 수 있다.

Table 2 는 정상 상태에서의 RMS(Root Mean Square)값을 비교한 표이다. RMS 값의 오차는 5.8%로써 이는 lumped 궤도 모델의 견인력이 타당한 결과를 나타낸다고 볼 수 있다.

Fig. 14 는 lumped 궤도 모델의 시뮬레이션 모습을 나타낸다. 점선은 궤도 요소 아래의 압력을 나타내며, 정상 상태에서의 요소별 분포압은 Fig. 15 와 같다. Fig. 15 에서 첫 번째 요소가 lumped 궤도 모델의 뒷 부분 분포압을 나타내며 15 번째 요소가 앞 부분의 분포압을 나타낸다.

지면과 닿은 지점의 궤도 요소별 주행방향 견인

력과 차체 center of mass 에 받는 스프링 힘에 의해 모멘트가 발생한다. 두 힘에 의한 모멘트는  $\theta$  의 양의 방향으로 발생하므로 모델은 그에 따라 기울어지게 된다. 따라서 뒤쪽 요소의 분포압이 앞쪽 요소의 분포압보다 상대적으로 커지게 되는 이러한 현상은 합당하다.

## 5. 결론

본 연구에서는 실시간 해석을 필요로 하는 Vecna BEAR 형 로봇의 구동부인 궤도를 간략화하여 모델링하였고, 이를 상용 소프트웨어의 다물체 동역학 모델과 비교하여 견인력 검증을 수행하였다. 시뮬레이션으로부터 lumped 궤도 모델의 견인력은 타당한 결과를 나타냄을 확인하였다.

현재 구현한 lumped 궤도 모델은 2 차원 모델로써 종방향만 고려되었다. 따라서 기존의 모델에 횡방향 힘이 추가적으로 고려되어야 하고, 이는 3 차원 모델로 모델링 되어야 한다. 그리고 실제 모델이 제작된 이후에 실험과의 검증을 통하여 본 연구에 대한 신뢰성을 높일 것이다.

## 후 기

본 연구는 부산대학교 자유 과제 학술 연구비(2년)의 지원에 의하여 연구되었으므로, 지원 기관에 감사드립니다.

## 참고문헌 (References)

- (1) Yi, K. C., 2009, "Driving Velocity Decision of a 6x6 Autonomous Vehicle Using Dynamic Analysis," M. S. Thesis, Busan National University, Busan, Korea.
- (2) Jung, Y. S., 2011, "Development of Velocity Decision Algorithm for Autonomous Driving of Unmanned Ground Vehicle in Roughness Terrain," M. S. Thesis, Busan National University, Busan, Korea.
- (3) Wills, B. M. D., 1963, "The Measurement of Soil Shear Strength and Deformation Moduli and Comparison of the Actual and Theoretical Performance of a Family of Rigid Tracks," *J. of Agricultural Engineering Research*, Vol. 8, No. 2, pp. 115~131.
- (4) Bernstein, R., 1913, "Probleme zur Experimentellen Motopflug Mechanik," *Der Motorwagen*, 9, pp. 199~206.
- (5) Bekker, M. G., 1956, "Theory of Land Locomotion," University of Michigan Press, Michigan, USA.
- (6) Bekker, M. G., 1969, "Introduction to Terrain Vehicle System," University of Michigan Press, Michigan,

- USA.
- (7) Park, W. Y., 1998, "Development of Tractive Performance Prediction Model for Flexible Tracked Vehicle," Ph. D. Dissertation, Sungkyunkwan university, Seoul, Korea.
- (8) 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 1<sup>st</sup> International Conference on the Mechanics of Soil Vehicle Systems*, Edizioni Minerva Tecnica, Torino, Italy.
- (9) McCullough, M. K., Haug, E. J., 1985, "Terra-Dynamics of High Mobility Track Vehicles," *Technical Report*, University of Iowa, Iowa, USA.
- (10) AUTO JOURNAL, Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 31, No. 3, p. 25.
- (11) Function Bay, "RecurDyn, Low-Mobility Tracked Vehicle Tutorial (Track\_LM)."
- (12) MSC Software, "ADAMS, Manual of Soft Soil Tire Model."