

# 무한궤도 로봇의 주행 해석에 관한 연구

이상호<sup>†</sup> · 고진석\* · 정연하\* · 신현수\*\* · 김창준\*\* · 이승열\*\* · 한창수\*\*\*

## A Study on the Driving Analysis of Tracked Robot

Sang-ho Lee, Jin-suk Ko, Yeon-ha Jung, Hyun-Soo Shin  
Chang-Joon Kim, Seung-yeol Lee, Chang-soo Han

**Key Words :** Analysis(해석), Ansys(앤시스), RecurDyn (리커다인), Tracked Vehicle(무한궤도 차량)

### Abstract

A tracked robot has an excellent mobility on the rough terrain. Especially, a tracked robot for driving has to get structural function in the every field. In this paper, we propose a tracked robot of a small rear wheel typed. Also compared and estimated a driving analysis about the tracked robot in considered the general environment. Compared 2 models are different in size of rear wheels but front wheels are same size each other. From comparing model, the radius of front wheels is 100mm and the radius of rear wheels is 100mm. The radius of front wheels is 100mm and the radius of rear wheels is 70mm from proposed tracked robot. Depend on these radiuses of values we are known driving torque values of an actuating wheel using Recurdyn. And estimated stress of rotated track by an actuating wheel using Ansys. finally, the designed robot has size of 600mm x 330mm x 150mm, weight is 27kg and the tracked robot is actuated by 2 geared DC motors.

#### 기호설명

- $\theta$  : 차륜의 회전 각도(degree)  
 $\theta_1$  : 무한궤도의 기울기(degree)  
 $F$  : 궤도 로봇의 추진력(N)  
 $F'$  : 궤도 로봇의 마찰력(N)  
 $H$  : 장애물의 높이(m)  
 $J$  : 구동 모멘트(N · m)  
 $J'$  : 차륜의 관성 모멘트(N · m)  
 $l$  : 전륜 중심과 후륜 중심 사이의 거리(m)  
 $P$  : 구동륜과 장애물의 모서리와 접촉 점  
 $r$  : 차륜의 반지름(m)  
 $S, S_1$  : 무한궤도 로봇의 이동거리(m)

### 1. 서론

최근 적지에서 정찰 수색을 위한 군용 로봇, 화재 및 지진 등의 재난 현장에서의 인명 탐색 로봇, 건물과 공장의 청소 로봇, 오염지역 조사 로봇, 위험물 취급 로봇 등 로봇에 대한 관심이 고조되면서 높은 주행 성능을 가질 수 있는 이동 로봇들이 계속 개발되고 있다.<sup>1)</sup>

현재 개발된 로봇의 이동형태는 여러 가지 형태의 구동장치가 있다. 평지를 빠른 속도로 주행으로 하는 바퀴형, 야지와 같은 산악지형을 주행하는 궤도형, 불규칙한 지면을 주행하기 위한 보행형 이렇게 세가지로 분류되는데 비포장 도로 및 험지 주행 측면에서 바퀴형은 주행이 불가능할 경우가 많고, 보행형은 구조 및 제어가 복잡하고 속도가 느린 단점이 있다. 따라서 무한궤도형 이동형태가 로봇의 구동부로서 가장 적합하다고 할 수 있다.<sup>2)</sup> 따라서, 궤도 로봇의 성능은 궤도와 토양 사이에서 발생하는 접지압의 분포와 운동저항, 견인 효율과 견인력을 슬립(sleep)의 함수로써 정의한다. 접지압의 분포는 궤도의 초기 장력과 궤도의 유연성, 차륜의 반경, 궤도에 대한 차륜의 간격, 토양의 조건 등에 의하여 영향을 받는데, 적당한 접지압의 분포는 운동 저항을 줄이고 토양 추진력

<sup>†</sup> 한양대학교 대학원 메카트로닉스공학과, 인펠스(주)  
E-mail : empas@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-4062 FAX : (031)406-6398

\* 한양대학교 기계공학과 기계경영공학부

\*\* 한양대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 회원, 한양대학교 기계공학과

을 증가 시킨다.

본 연구는 험지 주행의 능력이 우수하며 특히, 어느 분야에서든지 주행 로봇이 사용되기 위해서는 공통적으로 이동할 수 있는 구조적인 기능을 기본적으로 갖추어야 하며, 여러 목적에 사용하기 위해 각각의 목적에 맞는 모듈(module)을 장착할 수 있고, 장착된 모듈과 함께 야지를 쉽게 이동하고 그 일을 수행할 수 있는 후륜이 작은 형태의 무한궤도 로봇을 제안하고 RecurDyn을 이용하여 해석 모델(model)을 비교 검증하는 내용을 다루고 있다.<sup>3)</sup>

RecurDyn은 기계시스템의 모델링과 시뮬레이션을 하는 3 차원 해석이 가능한 역학분야의 시뮬레이션 프로그램으로서 3 차원의 기계적인 형상을 설계하고 물성을 입력하면 부하 토크(torque), 등가 관성계수, 마찰계수를 출력할 수 있어 기계시스템 모델의 파라미터(parameter)를 쉽게 구할 수 있다.<sup>4)</sup>

또한, Ansys최적화 프로그램으로 궤도의 회전하는 형상을 나타내는 설계변수, 만족시키고자 하는 성능을 제한하는 제한조건, 최소화하고자 하는 목적함수를 지정하고 반복계산의 실행을 통하여 구동륜에 장착되는 궤도에 대한 유한요소해석 결과를 도출하고 이를 비교·검토하였다.<sup>5)</sup>

## 2. 궤도 로봇의 주행 능력 해석

Fig.1 은 제안한 로봇의 간단하게 형상을 나타내고 있으며 지게차의 차륜 형태와 같이 후륜이 작은 무한궤도 로봇이다.

제원은 전륜의 반지름은 100mm 이고, 후륜의 반지름은 70mm, 로봇의 가로는 330mm 이고, 세로는 600mm, 모듈을 제외한 총 무게는 27Kg 이다.

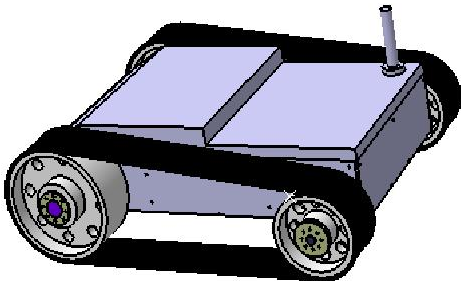


Fig. 1 Schematic view of the tracked robot

### 2.1 무한궤도 로봇의 장애물 등반

바퀴형 이동 로봇과 같이 무한궤도를 가진 주행 로봇이 장애물을 넘을 수 있는 턱의 높이는 전륜 바퀴의 반지름보다 낮아야 한다. Fig.2 와 같이 전

륜과 후륜이 동일한 반경  $r$  을 가지며 2 개의 전륜에 의해 구동되는 가장 일반적인 형태의 무한궤도 로봇을 예를 선정하여 장애물 등반에 대하여 설명한다.

이 무한궤도 로봇이 어떠한 속도를 가지고 높이  $H$  의 장애물을 등반하기 위해 궤도와 장애물의 모서리가 접촉하는 점  $P$  에서 미끄러짐이 없다고 가정한다. 또한, 전륜 중심점과 후륜 중심점의 길이  $\ell$  은 일정하다.

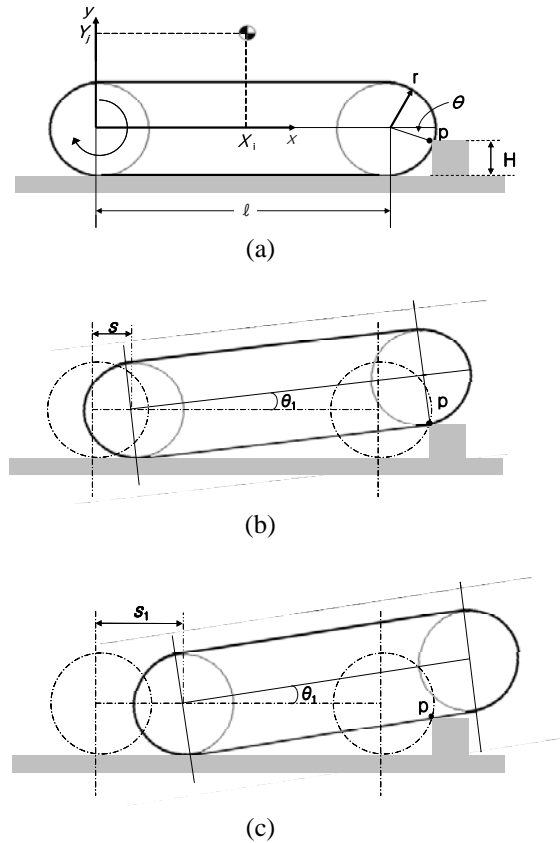


Fig. 2 Process of tracked robot goes over obstacle

Fig.2(a)와 같은 초기 접촉 상태에서 전륜의 구동축을 기준으로 한 접촉 점과의 각도  $\theta$  는 다음과 같이 표현된다.

$$\sin \theta = \frac{r-H}{r} \quad (1)$$

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{r^2 - (r-H)^2}}{r} = \frac{\sqrt{2rH + H^2}}{r} \quad (2)$$

무한궤도가 이동함에 따라 무한궤도와 턱 모서리  $P$  와 의 접촉점은 Fig.2(a)와 같이 반경  $r$  의 구동륜 원호를 따라 이동하지만 Fig.2(b)이후 부터는

궤도의 직선부분을 따라 움직이며 무한궤도의 기울기  $\theta_1$  은 증가하게 된다.

Fig.2(b)와 같은 경우, 무한궤도의 이동거리  $S$  와 기울기  $\theta_1$  는 다음과 같은 기하학적 조건을 만족 시킨다.

$$r + l \sin \theta_1 = H + r \cos \theta_1 \quad (3)$$

$$S + l \cos \theta_1 + r \sin \theta_1 = l + r \cos \theta \quad (4)$$

식(3)은 다음과 같이  $\varphi$  에 의해 표현된다.

$$\frac{r-H}{\sqrt{r^2-l^2}} = \cos(\theta_1 + \varphi) \quad (5)$$

이때,  $\cos \varphi \equiv \frac{r}{r^2+l^2}, \sin \varphi \equiv \frac{l}{r^2+l^2}$  이다.

식(4)로부터 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\sin(\theta_1 + \varphi) = -\frac{S-l-r \cos \theta}{\sqrt{r^2+l^2}} \quad (6)$$

식(5)와 (6)으로부터  $S$  는 다음 식을 만족함을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} & \sin^2(\theta_1 + \varphi) + \cos^2(\theta_1 + \varphi) \\ &= \frac{(r-H)^2}{r^2+l^2} + \frac{(S-l-r \cos \theta)^2}{r^2+l^2} \\ &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

따라서,  $S$  는 다음과 같이 구해진다.

$$S = l + r \cos \alpha - \sqrt{r^2 - l^2 - (r-H)^2} \quad (8)$$

식, (5)와 (6)으로부터 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\begin{aligned} \tan(\theta_1 + \varphi) &= \frac{\tan \theta_1 + \tan \varphi}{1 - \tan \theta_1 \tan \varphi} \\ &= \frac{\theta_1 - l - r \cos \theta}{r-H} \end{aligned} \quad (9)$$

따라서,  $\theta_1$  은 다음 식으로부터 구해진다.

$$\tan \theta_1 = -\frac{r(\sqrt{r^2+l^2-(r-H)^2} + l(r-H))}{r(r-H) - l\sqrt{r^2+l^2-(r-H)^2}} \quad (10)$$

무한궤도의 이동거리  $S \geq S$  인 Fig.2(c)의 경우에 무한궤도의 기울기  $\theta_1$  은 다음 식으로부터 구해될 수 있다.

$$r = \sin \theta_1 (l - r \cos \theta - S_1) + \cos \theta_1 (r - H) \quad (11)$$

구해진  $\theta_1$  으로 부터 무한궤도의 무게 중심의 위치를 구할 수 있으며 무게 중심의 위치로부터 Fig.3 과 같이 전 후방 안정 여유  $S_F, S_B$  를 구할 수 있다.

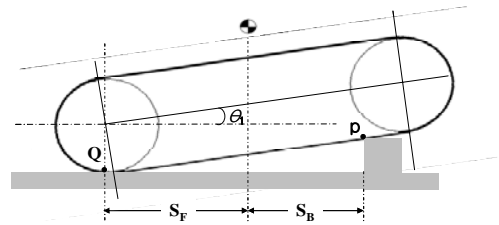


Fig. 3 Stability margin of tracked robot

$$S_F + S_B = r \sin \theta_1 + \frac{r \cos \theta_1 - (r-H)}{\sin \theta_1} \cos \theta_1 \quad (12)$$

$$S_B = X_i \cos \theta_1 - Y_j \sin \theta_1 \quad (13)$$

전방 안정 여유  $S_F$  가 0 보다 작을 경우 무한궤도는 장애물 위로 올라 갈 수 있으며 무한궤도의 궤도 치와 장애물 모서리가 맞물림으로써 충분한 마찰력을 가지고 장애물을 등반 할 수 있다. 후방 안정 여유  $S_B$  가 0 보다 작을 경우 무한궤도는 후방으로 전복 되게 된다.

## 2.2 무한궤도 로봇의 경사 주행

평탄한 경사지형에서 궤도와 지면과의 마찰계수를  $\mu$ , 수직항력을  $N$  이라 할 때, 무한궤도가 올라갈 수 있는 경사지형의 경사는 다음과 같다.

$$\tan \theta_2 \leq \mu \quad (14)$$

여기에서, 마찰력  $F' = \mu N$  이다.

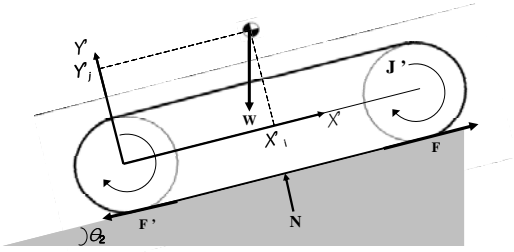


Fig. 4 Climbing of tracked robot on the slope

### 2.3 무한궤도 로봇의 구동 모멘트

Fig.4 에서  $F$  는 추진력,  $J$  는 구동 모멘트 (moment),  $M$  은 전체 무한궤도 로봇의 질량,  $J'$  는 구동륜의 관성 모멘트,  $m$  은 구동륜의 질량이다.

Fig.2(a)에서 설계한 무한궤도 로봇에 대해 구동 모멘트의 크기를 구해보면 무한궤도 로봇이 경사에서 미끄러지지 않고 진행할 수 있는 조건으로부터 구해진다.  $J$  는 식(15)와 같은 궤도로봇의 진행 방향에 대한 힘의 평형과 구동륜에 대한 평형에 식(16)의 구름 조건을 대입해 구한다.

$$M\ddot{x} - 2F = 0 \quad (15)$$

$$J'\ddot{\theta} + F\alpha = 2J$$

$$X = \alpha\theta \quad (16)$$

구동륜을 실린더(cylinder)라 가정하고 구해진 관성 모멘트를 식 (15)에 대입하면, 추진력  $F$  가 구해진다. 궤도 로봇이 미끄러짐 없이 구동하기 위해서는 추진력이 지면과의 마찰력보다 작아야 한다. 이러한 조건으로부터 식 (17)과 같은 구동 모멘트 조건이 구해진다.

$$J \leq \frac{\mu r M g}{4} \left(1 + \frac{m}{M}\right) \quad (17)$$

## 3. 궤도 로봇의 주행 능력 시뮬레이션

### 3.1 궤도로봇의 RecurDyn 시뮬레이션

Fig.5 는 제안한 무한 궤도 로봇을 RecurDyn 프로그램으로 구동 상황을 나타내었다.

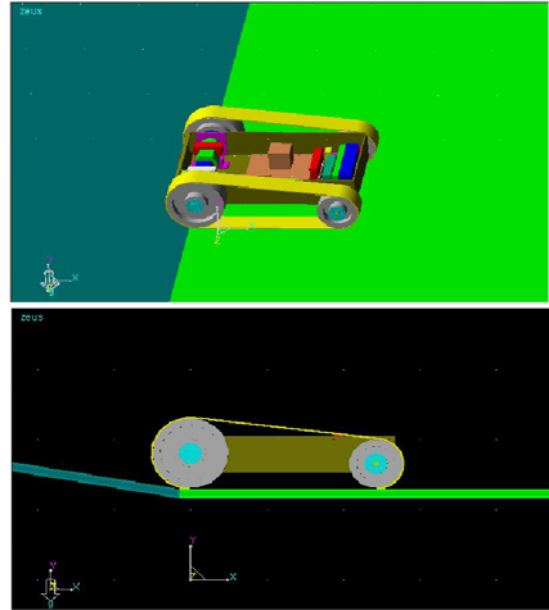


Fig. 5 Tracked robot model by using RecurDyn

무한궤도 로봇의 속도는 11.3Km/h, 경사각 30도 일 때 차륜의 크기가 모두 같은 모델과 제안한 로봇에 대하여 해석을 하였다. 선정된 모델의 무게는 31Kg 이고, 제안한 로봇의 무게는 27kg 여기서 두 모델의 후륜 크기가 다르기 때문에 로봇의 무게 차이가 있다.

정지 마찰 계수와 운동 마찰계수는 일반적으로 적용하는 0.9, 0.7 로 각각 선정하였다. 무한궤도 로봇의 구동시간 8 초 동안에 600 번 결과를 추출하도록 하였다. Fig .6 은 평지에서 2.4 초~ 4.1 초 사이에 주행하는 두 모델의 드라이빙 토크(driving torque) 결과를 나타내는 그래프이다.

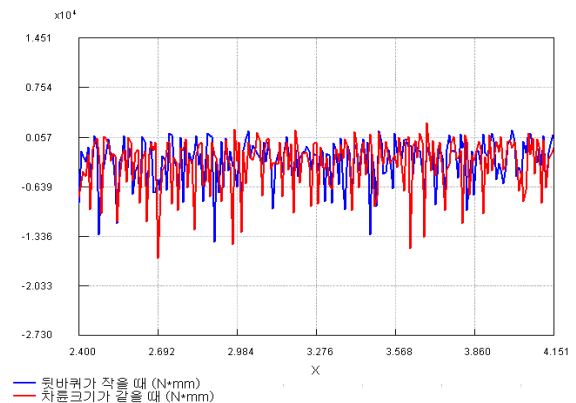
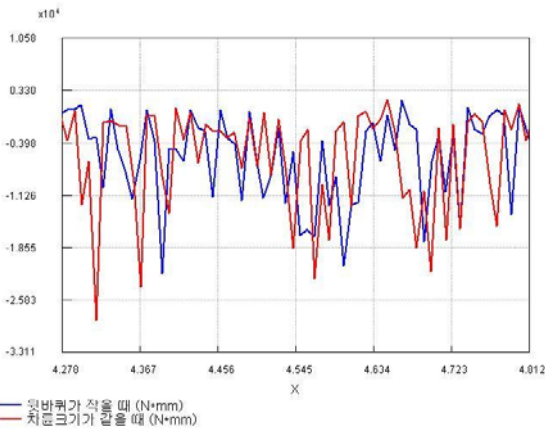


Fig. 6 Driving Torque of 2 models by using RecurDyn

Fig. 7 은 경사에서 주행하는 두 모델의 드라이빙 토크 결과를 자세히 보기 위해 4.2 초~4.8 초 사이를 확대하여 나타내는 그래프이다.



**Fig. 7** Climbing Driving Torque of 2 models by using RecurDyn

Fig.6 과 Fig.7 은 속도에 대한 무한 궤도 로봇에서 발생하는 토크를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 두 모델의 발생 토크가 유사하지만 경사가 없이 주행을 나타내는 그래프와 경사를 주행을 나타내는 그래프에서 피크(peak)점의 값이 차원이 모두 같은 모델이 훨씬 크게 발생함을 알 수 있다. 무한 궤도 로봇 또는 차량의 경우 토크 값이 잡음과 비슷하게 진동을 하고 있는데, 그 이유는 RecurDyn 에서 지면에 대한 전단 변위 분포를 제대로 계산하지 못해서 발생하는 것으로 추측된다.

3.2 궤도로봇의 궤도에 대한 Ansys 시뮬레이션  
무한궤도 로봇의 구동륜의 회전 사이클(cycle) 중 가장 가혹한 경계조건이 작용하는 부분에 대하여 해석을 수행함으로써 궤도의 스트레스(stress)를 추정할 수 있다. 또한, 차량의 전륜과 후륜을 같은 형태를 설정하여 이를 기준 모델과 비교함으로써 궤도의 요소 변화에 따른 스트레스를 해석 하였다.

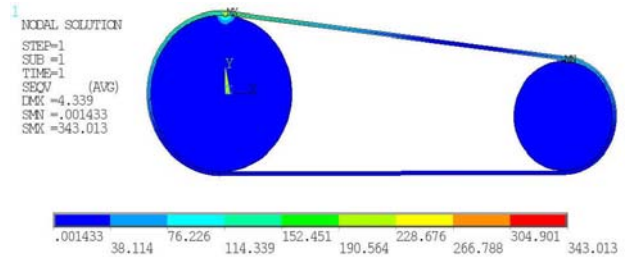
Ansys 를 이용하여 궤도 회전에 따른 유한 요소 해석을 수행하였고 해석에 사용된 전륜과 궤도의 재질은 Table 1 과 같으며, 구동륜의 토크는 0.06 Nm 으로 설정 하였다.

**Table 1** Material Properties

	Material	Young's Modulus E	Poisson's Ratio
Wheel	Aluminum	72 GPa	0.33
Belt Pulley	Urethane	4.413 MPa	0.49

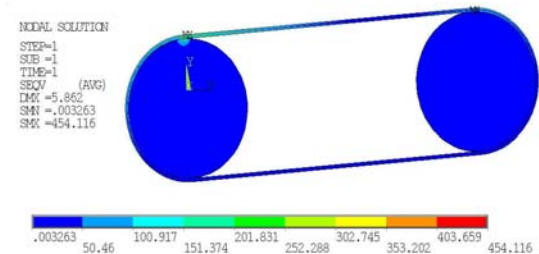
좌측의 구동륜이 시계 반대방향으로 회전할 경우 Fig.8 의 해석 결과로부터 구동륜 수직방향의

궤도와 닿는 부분의 궤도에서 가장 큰 스트레스가 일어남을 알 수 있다. 이는 구동륜이 회전할 때 구동륜 중심에서 수직의 치수 부분이 궤도를 회전시키기 위한 회전력이 가장 크게 발생하는 부분으로 판단된다.



**Fig. 8** Analytic result of rear wheel(70mm)

Fig.9 에서는 전륜의 반지름 100mm 와 후륜의 반지름 100mm 를 선정하여 해석한 궤도 스트레스 결과를 나타내었다.



**Fig. 9** Analytic result of rear wheel(100mm)

위와 같은 두 모델을 선정하여 궤도의 스트레스 해석 결과를 Table 2 에 나타내었다. 결과를 보면 후륜이 클 때 구동륜의 치수에 닿는 궤도 스트레스는 111.103Mps 만큼 증가 됨을 알 수 있다.

**Table 2 Results of Ansys**

Front Wheel (mm)	Rear Wheel (mm)	Max Stress (Mpa)
100	100	454.116
100	70	343.013

#### 4. 결 론

본 연구에서는 험지 주행을 위한 후륜이 작은 무한궤도 로봇을 제안하였다. 일반적인 형태의 무한궤도 로봇에 대해 수직 턱 장애물과 경사 지형의 등반 능력을 비교·분석하고 Recurdyn 프로그램으로 해석하여 복잡한 모델링 및 계산 과정이 없이 쉽게 구동 모터의 드라이빙 토크에 대해 결과값을 알 수 있었다. 또한, Ansys 프로그램을 이용하여 구동륜에 의해 회전 되어지는 궤도의 스트레스를 예측 할 수 있었다.

전륜의 크기에 비해 후륜의 크기만을 작게 하여 무게를 줄임으로써 로봇의 소비 에너지를 줄이고 구동륜 즉, 전륜의 궤도 스트레스를 감소 시킬 수 있다. 이와 같은 결과는 무한 궤도 로봇의 설계와 제작 시에 적용하여 발생하는 기계적인 오차 및 에러를 감소시켜 보다 안정된 성능을 제시할 수 있다.

향후 로봇을 제작하고 실험을 통하여 장애물 및 경사지형 등반 등 각각의 실험을 통한 분석과 시뮬레이션의 검증이 요구된다.

이렇게, 동역학 해석 프로그램과 유한요소 해석 프로그램을 활용할 경우 다양한 조건에서의 시뮬레이션에 대한 데이터를 제공을 함으로써 설계자에게 보다 다양한 정보 제공이 가능하여 시뮬레이션 기반의 설계시스템의 수준을 향상 시키는 역할을 할 수 있다.

#### 참고문헌

(1) Chung, K. M., Shin, H. C., Jeong, S. H. and Kim, S. H., 2007, " A study on the Crossing-over Capability of Mobile Mechanisms with passive Joints", *Seminar of Ground Weapon system*, Vol.13, pp.1

(2) Iwamoto, T., Yamamoto, H., 1990, "Mechanical Design of Variable Configuration Tracked Vehicle." *J. of Mechanical Design*, Vol.112, pp.289~294

(3) Kim, U. C., Kim, J. C., Shin, B. S., 1993, "Effects of Initial Track Tension on the ground Pressure Distribution of Tracked Vehicles.", *Conf. of the KSAE*, No. 933923, pp. 342~348

(4) 2005, "RecurDyn v6.21 Basic Training Guide" *Functionbay*

(5) Tae Sung S&E Inc., 2002, "*Selected Problem for Ansys Users.*", Kyerim,