한국자동차공학회논문집 제9권 제1호, pp.20~27

가변 형상 무한 궤도 차량의 성능 해석 및 설계

Design and Performance Analysis of a Variable Configuration Tracked Vehicle

김 한 호*, 곽 윤 근**
Han ho Kim, Yoon keun Kwak

ABSTRACT

A variable configuration tracked vehicle(VCTV) is developed to reduce turning energy and improve climbing ability for stairs. This mechanism has four track T-type frames. By changing the driving direction, each track T-type frame rotates to minimize the contact area with ground. It also has better performance than other VCTV in energy consumption of turning. Furthermore this mechanism is more stable than other VCTV on the rough terrain. When climbing stairs, each track T-type frame rotates to obtain a front attack angle and keep stability on steep stairs.

The design parameters of components of track T-type frames are optimized to enhance the performance of climbing stairs. Performance indices include a stable angle, a climbing ability, a height of the vertical obstacle. In case that the overall length of the mechanism is 0.2m, it is required that the radius of the wheels should be 5mm and the length track contacted with the ground should be 0.09m to climb higher and steeper stairs.

주요기술용어 : Tracked vehicle(무한 궤도 차량), Performance analysis(성능 해석), Variable Configuration(가변 형상), Track T-type frame(트랙 T형 프레임)

1. 서 론

적지나 위험 지역의 무인 탐사, 지뢰 탐지, 파손된 건물 조사, 위험물 제거, 방사선이나 생화학 물질로 오염된 지역의 조사, 건물과 공장의 청소, 화재시 구조구난, 행성 탐사 등의 분야에서 자율 주행 로봇의 필요성이 증가하고 있다. 이러한 자율 주행 로봇은 기본적으로 험한 지형을 주행할 수 있어야 하고, 건물 내에서는 계단 등판이 가능하여야 한다.

자율 주행 로봇의 이동 기구로는 크게 바퀴형, 무한 궤도형, 보행형으로 나눌 수 있는데, 험로 주행과 계단 등판이 가능한 자율 주행 로봇의 이동 기구로는 무한 궤도형이 가장 적합하다.[1] 구

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과 대학원
** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

동원이 내연기관인 무한 궤도 탱크나 굴삭기와는 달리, 밧데리를 흔히 사용하는 자율 주행 로봇은 포장도로에서의 평지 주행 및 회전시 바퀴 차량으로 변형시킬 수 있는, 가변 형상 무한 궤도 차량으로 에너지 소모를 줄일 수 있다.

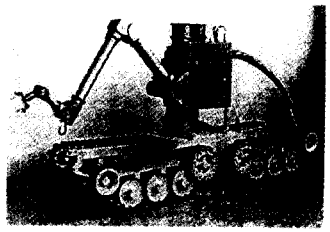


Fig. 1 Mechanism Designed by Kohler etc.

Kohler등[2]은 기존의 무한 궤도 차량의 이동기구로 Fig.1과 같이 4개의 가변 트랙을 사용한 메커니즘을 제안하였다. 원자력 발전소에서 사용하기 적합한 여러 기능을 가지는 자율 주행 로봇은 Devresse[3]에 의해서 개발 되었다. 또한, Fig.2과 같이 4개의 조향 바퀴를 이용하여 바퀴형 주행과 무한 궤도형 주행의 특성을 병합하여 여러 주행 모드로서 움직일 수 있는 다기능 로봇은 Maeda등[4]에 의해서 고안되었다. 최근에는 주행 중 트랙의 형상을 변형하여 계단 등판이 가능하도록 한 메커니즘이 Iwamoto등[1,5]에 의해서 개발되었다. Fig.3에 트랙이 변형하는 형태를 나타내었다. 회전할 때의 에너지 소모를 줄이고 계단 등판시 계단면과의 접촉 면적을 넓히기 위해서 트랙의 재질을 변형시킨 무한 궤도 차량이 Yoneda등[6]에 의해서 개발되었다.

본 연구에서는 험로 주행 및 계단 등판에 적합하고 기존의 이동 기구들에 비해 회전시, 포장도로에서 평지 주행시에 에너지 소비를 줄일 수 있는 새로운 형태의 가변 형상 무한 궤도 차량을 개발하고자 한다. 이를 위하여 무한 궤도 차량의 계단 등판 능력과 에너지 효율에 관련된 대한 성능 지수를 조사하여, 설계 변수에 따른 성능 변화를 조사한다. 이로부터 험로주행이 가능하고 우수한 계단 등판 능력을 가지며 기존의 가변 형상 무한 궤도 차량보다 에너지 효율을 높일 수 있고, 특히 회전시에 에너지 소비를 줄일 수 있는 새로운 가변 형상 무한 궤도 차량을 설계, 제작하고자 한다. 그리고 개발된 가변 형상 무한 궤도 차량의 성능을 향상시키기 위해서 최적 설계를 통해 설계 변수를 결정한다.

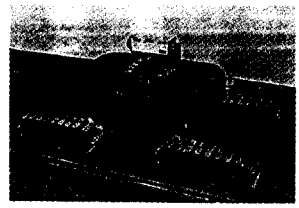


Fig. 2 Mechanism Designed by Maeda etc.

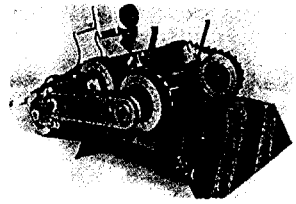


Fig. 3 Mechanism Designed by Iwamoto etc.

2. 성능 지수

2.1 종류와 정의

무한 궤도 차량의 계단 등판 능력과 에너지 효율과 관련된 성능 지수들은 다음과 같은 것이 있다.

1) 안정각(α_{max}) : 차량이 경사면에서 전복하지 않을 경사면의 최대각.

2) 등판능력(α) : 차량 총중량 상태에서 건조된 포장도로의 경사면을 오를 수 있는 최대각.

3) 수직 장애물의 최대 높이(H) : 수직으로 되어 있는 장애물의 통과가능한 최대 높이.

4) 회전 저항 모멘트(M_o) : 차량이 제자리에서 또는 전진하면서 회전을 할 때 소요되는 저항 모

멘트. 무한 궤도 차량의 경우에 에너지 소모가 많다.

5) 구동 모멘트(M) : 직선 도로에서 주행시 저항력으로 작용하는 저항 모멘트. 즉 구동하기 위하여 필요한 최소 구동 모멘트.

위에서 정의된 성능지수들은 다음과 같이 수식으로 표시된다. 식(1)과(2)는 Fig.4에서 차량의 전복이나 미끄러짐이 없을 조건으로부터 구해지고, 식(3)은 Fig.5로부터 구해진다.

$$\alpha_{max} = \tan^{-1}\frac{a}{h} \tag{1}$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{M_{max}}{\sqrt{(1+\mu_R^2)}RW}\right) - \phi \tag{2}$$

$$H = d\sin\phi_0 + h_0\cos\phi_0 + R - \frac{h}{\cos\phi_0} \tag{3}$$

$$M_0 = \frac{\mu_R WL}{4} \tag{4}$$

$$M = \mu_R WR \tag{5}$$

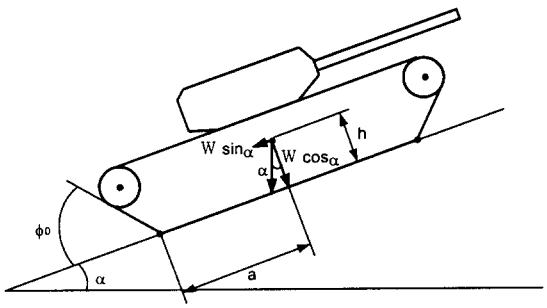


Fig. 4 Vehicle on inclination

여기서 μ_R은 굴림마찰계수($\phi = \tan^{-1}\mu_R$), W는 차량의 무게, R은 구동휠의 반지름, h는 지면으로부터 무게 중심까지의 거리, L은 지면과 트랙사이의 접촉 길이, M_{max}는 차량이 낼 수 있는 최대 모멘트를 나타낸다.

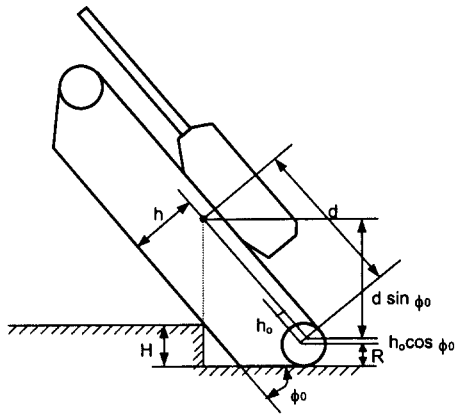


Fig. 5 Vehicle passing step obstacle

2.2 설계 변수에 따른 성능 해석

앞에서 구한 식으로부터 설계 변수에 따른 무한 궤도 차량의 성능 변화를 알아보았다. 안정각 α_{max}는 a/h 비의 함수로, a가 증가할수록 또는 h가 감소할수록 증가한다.

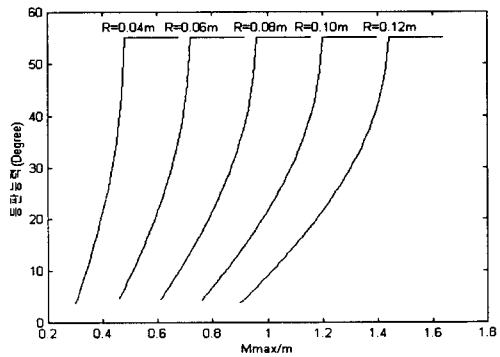


Fig. 6 Change of climbing ability against variation of M/m and R

Fig.6은 최대 모멘트와 질량의 비(M_{max}/m)와 구동휠의 반지름에 따른 등판능력의 성능 변화를 나타낸 것이다. M_{max}/m 비가 일정한 경우 구동휠의 반지름이 작을수록, 구동휠의 반지름이 같을 경우 M_{max}/m가 작을수록 등판능력이 향상된

다. 또한 구동휠의 반지름이 짧을수록 등판능력이 급격히 변한다.

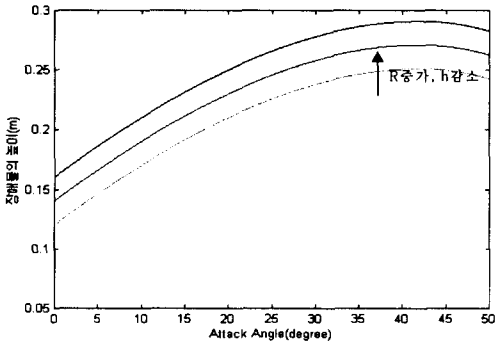


Fig. 7 Change of height of vertical obstacle against variaition of R, h and attack angle

Fig.7은 Attack Angle, 구동휠의 반지름과 무게 중심의 높이 변화에 따른 수직장애물의 최대 높이의 성능 변화를 나타낸 것으로, Attack Angle이 증가하면 통과할 수 있는 수직장애물의 최대높이는 높아진다. 그러나 Attack Angle이 계속 커진다고 통과 장애물의 최대 높이가 커지는 것이 아니다. Fig.7에서 보는 바와 같이 수직장애물의 최대 높이는 Attack Angle이 40-45° 정도일 때가 최대가 된다. 또한 구동휠의 반지름 R이 커질수록, 무게 중심의 위치 h가 낮을수록 높은 장애물을 통과할 수가 있다.

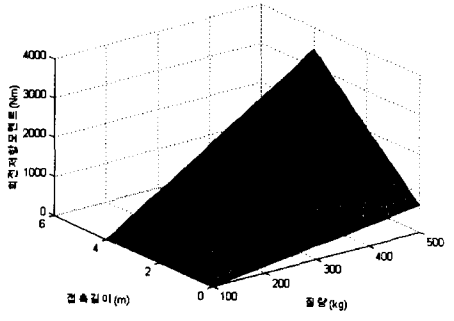


Fig. 8 Change of turning resistance moment against variation of mass and ground contact length

Fig.8은 지면과의 접촉길이와 질량의 변화에 따른 회전저항모멘트의 성능 변화를 나타낸 것이다. 질량과 지면과의 접촉길이가 증가함에 따라 회전 저항 모멘트가 선형적으로 증가한다. 따라서 회전시 지면과의 접촉 길이를 줄이는 방법으로 회전 저항 모멘트를 감소시켜, 가변 형상 무한궤도 차량이 밧데리를 사용하는 자율 주행 로봇의 이동기구로 적합함을 알 수 있다.

마찬가지로 구동모멘트는 구동휠의 반지름과 질량의 함수로, 구동 모멘트를 줄이기 위해서는 구동휠의 반지름을 줄이거나 질량을 줄이면 된다.

3. 새로운 메커니즘

3.1 설계시 고려사항

험로주행, 계단 등판능력이 우수하고, 회전저항모멘트가 작은 가변 형상 무한궤도 차량의 설계시 성능 해석 결과 이외에 고려해야 할 사항은 아래와 같다.

첫째, 계단 등판시, 트랙이 계단의 모서리 부분과 최소한 두 곳 이상의 접촉점을 가지고 있어야 한다.

둘째, 효율적인 계단 등판을 위해서는 계단의 모서리와 처음으로 접촉할 부분의 높이가 계단의 높이보다 높아야 한다.

3.2 개발된 메커니즘

3.2.1 기본구조

2.2절의 성능 해석과 3.1절의 설계시 고려사항을 바탕으로 개발된 메커니즘의 기본 형태는 Fig.9에 나타난 바와 같이 기본적으로 4개의 트랙 T형 프레임으로 구성되어 있으며 전,후방 양쪽으로 Attack Angle을 가진 구조로 되어 있다. 또한 각 트랙 T형 프레임은 세 개의 바퀴가 트랙으로 감겨있고, 트랙 T형 프레임의 회전에 의해 접촉 길이 변형이 가능하게 설계하였다. 트랙의 구동에 사용되는 4개의 모터와 트랙 T형 프레임의 회전에 사용되는 2개의 모터, 총 6개의 모터를 사용하였다.

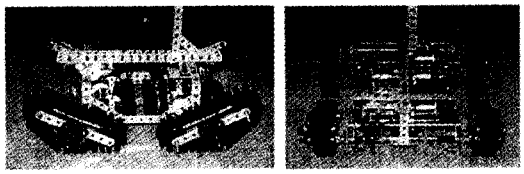


Fig. 9 Developed mechanism

3.2.2 주행시의 메커니즘 형태

메커니즘이 장애물이 없는 평지를 주행할 때는 Fig.9에서처럼 트랙이 지면과 접촉하여서 주행을 한다. 또한 습지 같은 험로에서는 프레임 회전용 모터로 트랙 T형 프레임을 회전시켜, Fig.9의 프레임의 윗면이 지면과 접촉한 상태에서 주행을 하게 된다. 험로에서는 지면과의 접촉면적이 넓어야 단위트랙이 받는 힘이 적어서 가라앉음이 적어지고 주행이 용이하기 때문이다.

3.2.3. 회전시의 메커니즘 형태

회전시에 에너지 소모를 줄이기 위해 지면과의 접촉 면적을 최소로 할 수 있도록 Fig.10에서와 같이 트랙 T형 프레임의 아래 꼭지점이 지면과 접촉하도록 한다. 따라서 기존의 가변 형상 무한궤도 차량[1,5,6]처럼 가운데를 지지하고 회전하는 것보다 지면의 굴곡에 덜 민감하므로 험로에서도 회전이 용이하다. 또한 회전시 구조의 변형이 다른 가변 형상 무한 궤도 차량에 비해서 적다.

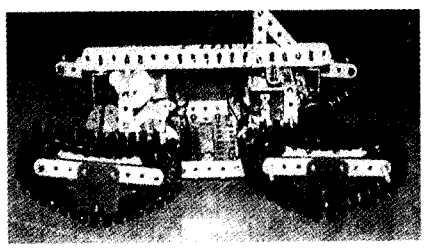
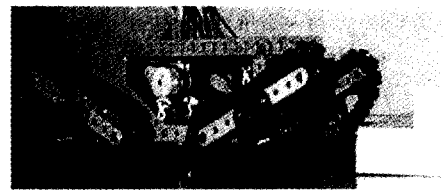


Fig. 10 Turning of developed mechanism

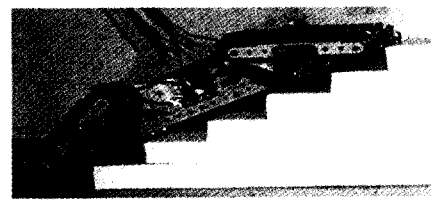
3.2.4 계단 등판시의 메커니즘 형태

계단 등판시에는 먼저 Fig11(a)에서처럼 충분한 Attack Angle로 접근한다. 계단 등판 시작점에서는 계단면과의 접촉 면적을 늘여 충분한 접지력을 얻기 위해서, 프레임 회전 모터로 전방 트랙 T형 프레임을 회전시켜 Fig.11(b)와 같이 변형한다. 계단 등판 중에는 계단 모서리와의 접촉부분을 늘이고 무게 중심에서 전복축까지의 거리를 늘여 안정각이 크게 되도록 Fig.11(c)에서처럼 후방 트랙 T형 프레임을 회전시킨다. 전방 트랙 T형 프레임은 마지막 계단을 지나면 Fig.11(d)처럼 회전하여 계단 윗면과의 접촉면적을 증가시킨다. 마지막으로 Fig.11(e)의 과정을 거쳐 계단 등판을 완료하게 된다.



(a)

(b)



(c)

(d)

Fig. 11 Climbing stairs of developed mechanism

(e)

Fig. 11 Climbing stairs of developed mechanism

3.3 기존의 VCTV와의 비교

개발된 가변 형상 무한 궤도 차량은 기존의 VCTV에 비해 트랙 T형 프레임의 작은 회전 변형으로도 접촉면적을 상당히 줄일 수 있어 회전 시에 소모되는 에너지를 감소시킬 수 있다. 그리고 지지점이 기존의 가변 형상 무한 궤도 차량[1,5,6]과는 달리 차체의 네 군데에 트랙 T형 프레임의 아래 꼭지점에 있기 때문에 지면의 굴곡에 대해서 민감도가 적어진다.

계단 등판시에도 개발된 가변 형상 무한 궤도 차량이 기존의 VCTV보다 트랙 T형 프레임의 변형이 작다. 또한 무게 중심으로부터 차체의 전복축까지의 거리가 길어서 경사가 급한 계단에 대해서도 등판이 가능하고 Attack Angle과 Departure Angle을 조절할 수 있어 여러 모양의 계단을 등판할 수 있는 장점이 있다.

습지와 같은 험로에 대해서는 트랙에 분포되는 하중이 골고루 분포되어야 하므로, 트랙이 넓게 지면과 접촉되어야 한다. 그런 경우에는 트랙 T형 프레임의 윗부분을 이용한다. 이때 지면에서 차체 밑부분까지의 거리(Ground Clearance)가 커지는 이점도 있다.

4. 최적 설계

4.1 제한조건과 목적함수

2.1절에서 성능 지수에 대해서 유도한 식들 중에 식(1),(3)을 개발한 가변 형상 무한 궤도 차량에 적용하여 다시 유도하면 식(6),(7)과 같다. 최대 수직 장애물의 높이는 Fig.12로부터 구해진다.

$$\alpha_{max} = \tan^{-1}\frac{l-2R+2c}{2h}\frac{180}{\pi} \tag{6}$$

$$H = c+R \tag{7}$$

여기에서 c는 주행트랙길이로써, 주행시 트랙 T형 프레임이 지면과 접촉하는 길이를 말한다.

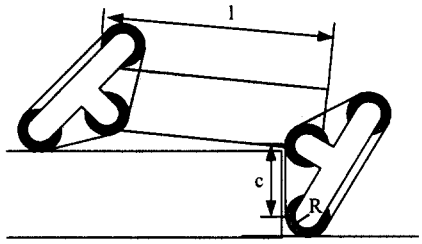


Fig. 12 Highest vertical obstacle of new mechanism

차체 길이 l=0.2m인 개발된 가변 형상 무한 궤도 차량의 성능 향상을 위한 최적설계의 설계 변수는 구동휠의 반지름 R과 주행 트랙길이 c로 한다. 차체 길이, 구동휠의 반지름 및 주행 트랙 길이의 기구학적 제한 조건은 식(8),(9)와 같다. 또한 식(10)은 경사각이 45° 인 계단의 등판능력에 대한 제한 조건이다. 수직 장애물의 높이를 0.032m로 하였을 때의 제한조건은 식(11)과 같다.

$$g(1) = 2c+2R-l<0 \tag{8}$$

$$g(2) = 2R-c<0 \tag{9}$$

$$g(3) = 45-\left(\sin^{-1}\frac{M_{max}}{\sqrt{1+\mu_R{}^2RW}}-\phi\right)\frac{180}{\pi}<0 \tag{10}$$

$$g(4) = 0.032-c-R<0 \tag{11}$$

식(8),(9)으로부터 주행 트랙 길이 c와 구동휠의 반지름 R 에 대한 범위는 식 (12),(13)과 같다.

$$0.04<c<0.10(m) \tag{12}$$

$$5<R<20(mm) \tag{13}$$

2.1절의 식(2),(5)와 4.1절의 식(6),(7)로부터 성능 지수식들의 최대, 최소값을 구하고 무차원화하면 식(14)-(17)이 나온다.

$$f_n(1)=\frac{\alpha_{max}-74.7}{78.5-74.7} \tag{14}$$

$$f_n(2)=\frac{\alpha-40.6}{90-40.6} \tag{15}$$

$$f_n(3)=\frac{0.588-M}{0.588-0.147} \tag{16}$$

$$f_n(4)=\frac{H-0.045}{0.12-0.045} \tag{17}$$

식 (14)-(17)의 식을 이용하여 하나의 목적하수를 만들면 식(18)을 얻을 수 있다.

$$f_{obj}=-(w_1 f_n(1)^2+w_2 f_n(2)^2+w_3 f_n(3)^2+w_4 f_n(4)^2) \tag{18}$$

여기에서 w_1, w_2, w_3, w_4는 각각 안정각, 등판능력, 구동모멘트, 수직 장애물의 최대높이에 대한 가중치를 나타낸다.

또한 개발된 가변 형상 무한 궤도 차량의 질량 m은 6kg, 메커니즘이 낼 수 있는 최대 모터 구동력 M_{max}는 구동에 사용되는 모터 4개의 동력을 합한 0.81Nm/s를, 또한 무게 중심의 높이(h)는 0.03m를 사용하고, 마찰 계수(μ_R)는 0.05로 가정하였다.

4.2 최적화 결과

식(18)의 목적함수에 대해서 최적화한 결과를 Table 1에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 안정각 또는 구동모멘트만의 성능을 최적화 하기 위해서는 구동휠의 반지름을 최소화하여야 하고, 수직 장애물의 최대높이만의 성능을 최대화하기 위해서는 구동휠의 반지름과 주행트랙길이가 커져야 한다. 또한 4개의 성능 지수의 가중치가 동일한 경우에는 주행트랙길이는 설계 상한치에 도달하고, 구동휠의 반지름은 설계 하한치에 도달한다.

Table 1 Optimal design result

Weighting factor	w_1	1	0	0	0	1
	w_2	0	1	0	0	1
	w_3	0	0	1	0	1
	w_4	0	0	0	1	1
설계변수	R(mm)	5	12.5	5	10	**5**
	c(m)	0.095	0.04	0.085	0.09	**0.095**

5. 결 론

본 연구에서는 험로 주행이 용이하고, 계단 등판 능력이 우수하며, 회전 또는 포장된 평지 주행시 에너지 소모가 적은 새로운 가변 형상 무한 궤도 차량을 개발하였다. 이를 위해 무한 궤도 차량의 계단 등판능력과 에너지효율에 관련된 성능지수를 선택하고, 설계변수에 따른 성능지수 변화를 조사한 결과, 차량의 질량이 증가할수록 등판능력, 회전 저항 모멘트 및 구동 모멘트가 증가하였고, 지면과의 트랙 접촉 길이가 짧을수록 회전 저항 모멘트가 감소하였다. 또한 구동휠의 반지름이 커지면 수직 장애물의 통과 가능 높이는 커지나 구동 모멘트와 등판능력이 감소하였다.

이를 바탕으로 건물내 표준 계단의 1/5의 계단 등판에 적합한 새로운 가변 형상 무한 궤도 차량을 설계하고 제작하였다. 개발된 가변 형상 무한 궤도 차량은 4개의 트랙 T형 프레임으로 구성되어 전,후방 Attack Angle을 갖는 구조로 되어 있다. 기존의 가변 형상 무한 궤도 차량과 기구학적으로 비교한 결과, 회전시 및 트랙 변형시 에너지 소모가 적고 지면의 적응력이 향상될 뿐 아니라 계단 등판 능력이 증가한다. 또한 습지와 같은 험로에서 트랙 접촉길이를 크게 할 수 있어 차량의 침하를 감소시킬 수 있다.

개발된 가변 형상 무한 궤도 차량을 안정각, 등판능력, 구동모멘트, 수직 장애물의 최대 높이에 동일한 가중치로 합한 목적 함수에 대해 최적설계한 결과 차량의 길이가 0.2m인 경우 구동휠

의 반지름이 5mm이고, 주행 트랙 길이가 0.095m이었다.

참 고 문 헌

1) T. Iwamoto, H. Yamamoto, "Mechanical Design of Variable Configuration Tracked Vehicle," J. of Mechanical Design, Vol.112, 289-294, 1990.

2) G. W. Kohler, M. Selig, M. Salaske, "Manipulator Vehicle of the Nuclear Emergency Brigade in the Federal Republic of Germany," Proc. of 24th conf. on Remote Systems Technology, 196-218, 1976.

3) M. Devresse, "General Concept of a Remote Multipurpose Vehicle for Nuclear Applications," ICAR, 591-595, 1985.

4) Y. Maeda, S. Tsutani, S. Hagihara, "Prototype of Multifunctional Robot Vehicle," ICAR, 421-428, 1985.

5) T. Iwamoto, H. Yamamoto, "Stairway Travel of a Mobile Robot with Terrain-Adaptable Crawler Mechanism," J.of Robotic Systems, 2(1), 125-134, 1985.

6) K. Yoneda, Y. Ota, S. Hirose, "Development of Hi-Grip Crawler using a Deformation of Powder," JRSJ Vol.15 No.8, 1188-1193, 1997.