

수직장애물 환경 주행 능력향상을 위한 소형 UGV 플랫폼 설계

Development of a Small UGV for Vertical Obstacle Negotiation

김지철^{1,✉}, 박종원¹, 백주현², 유재관², 김범수², 김수현¹
Ji Chul Kim^{1,✉}, Jong Won Park¹, Joo Hyun Baek², Jae Kwan Ryu², Beom Su Kim² and Soo Hyun Kim¹

¹ KAIST 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, KAIST)

² LIG Nex1(주) 연구개발본부 기계연구센터 (Mechanical Engineering Lab., LIG Nex1)

✉ Corresponding author: sunny277@kaist.ac.kr, Tel: 042-350-3252

Manuscript received: 2010.8.31 / Revised: 2011.4.8 / Accepted: 2011.6.21

There have been many researches about SUGV (Small Unmanned Ground Vehicle) mechanism regarding off-road mobility and obstacle negotiation. This paper introduces an analysis of geometry parameters to enhance the vertical obstacle negotiation ability for the SUGV. Moreover, this paper proposes an anti-shock structure analysis of wheels to protect the main body of the SUGV when it falls off a vertical obstacle. Major system geometry parameters will be determined under certain constraints. The constraints and optimization problem for maximizing the ability of vertical obstacle negotiation will be presented and discussed. Dynamic simulation results and experiments with manufactured platform will also be presented to validate the analysis. Several types of wheel materials and structures will be compared to determine the best anti-shock wheel design through FEM (Finite Element Method) simulations.

Key Words: SUGV (소형 무인주행로봇), Design Parameter (설계 변수), Dynamic Simulation (동역학 모의실험), Vertical Obstacle (수직 장애물), Anti-Shock Wheel (내충격 휠)

기호설명

l = total length of a robot body

d = distance from center to C.G point

r = radius of a wheel

b = length of a flipper

θ = attack angle

m_1 = mass of a battery part

m_2 = mass of a motor part

x_1 = distance from center to m_1

x_2 = distance from center to m_2

1. 서론

최근 전쟁이나 테러, 재난 등 인간의 생명을

위협하는 상황이 빈번함에 따라 로봇을 인간대신 위험 지역에 투입하여 임무를 수행하도록 하는 기술이 관심을 받고 있다. 특히 전쟁이나 재난 지역에 무인 로봇을 보내 원하는 정보를 획득할 수 있다면 유해한 환경으로부터 인간의 생명을 보호할 수 있기 때문에 해당 기술이 가지는 가치는 매우 크다.

이와 같이 인간의 지속적인 개입 없이 로봇이 정보를 획득하거나 특정 작업을 수행하도록 하는 기술을 ‘무인화 기술’이라 한다. 무인화 기술은 자율주행, 자율운항, 자율비행, 자율 매니플레이팅 등의 다방면에 적용되는데 그 중에서 사람의 이동성을 대신하여 지상을 주행하는 무인 로봇을 UGV(Unmanned Ground Vehicle)라고 한다.

실제 미군은 전장에 병사를 대신하여 감시 정

찰 및 폭발물 처리를 수행하는 로봇을 운용하고 있으며,¹ 미 육군은 무인화 체계를 기반으로 하는 미래전투체계 수립을 시도한 바 있다. 또한 지진이나 화재현장에서 인명구조를 담당하는 구조용 로봇도 국내외에서 활발히 개발되어 상용화가 시도되고 있다.²⁻⁵

특히 SUGV(Small Unmanned Ground Vehicle)는 사람이 휴대 가능한 정도의 크기를 가지는 무인 주행 로봇으로 휴대적인 측면에서 운용 이점이 크다. SUGV는 평소에는 사람이 짊어지는 등의 형태로 이동되다가 유사시에 로봇을 운용하는 개념이며, 플랫폼에 장착된 센서를 이용하여 감시정찰, 인명 탐색 등의 작업을 인간 대신 수행한다.

Table 1 Characteristics of mobile mechanisms

	Terrain adaptability	Energy efficiency	Speed	Simplicity	Posture recovery
Leg	O	X	X	X	X
Track	△	△	△	O	O
Wheel	X	O	O	O	O

(O Good △ Average X Poor)

주행 방식의 특징을 비교해 볼 때,⁶ 트랙(Track) 방식의 플랫폼은 휠(Wheel)이나 보행(Leg)방식에 비해 험지 주행성이나 주행 속도 면에서 평균 이상의 성능을 나타낸다. 보행 방식의 UGV는 소형화가 어렵고 주행속도에 한계가 있으며 에너지 효율이 낮아 운용시간이 짧다. 휠 방식의 UGV는 험지 극복에서 타 구조에 비해 부적합한 구조를 지닌 단점이 있다.² 따라서 소형·경량의 단순 구조로 험지를 최대한 극복해야 하는 운용환경을 감안할 때 트랙 방식이 가장 적합할 것으로 예상된다. 특히 트랙의 전면에 부착된 한 쌍의 플리퍼(Flipper)는 장애물을 만났을 때 공격각을 생성하여 장애물을 극복하는데 유리하고 플랫폼이 뒤집혔을 때 원래대로 돌아오는 자세복귀 기능에 유용하게 이용된다.

한편 군사적, 사회안정 등의 목적으로 다방면에서 운용되는 SUGV 플랫폼은 전장이나 재난환경에서 흔히 존재하는 무정형의 장애물 환경에 쉽게 노출된다. 특히 로봇의 높이보다 높은 수직 장애물은 건물의 잔해, 구덩이, 바위 등에 의해 만들어지며 이러한 장애물을 극복하지 못하면 구덩이에 고착되거나 특정지역에 고립되어 운용 불가능한 상황에 빠진다. 그러므로 수직 장애물은 SUGV가

필수적으로 극복해야 할 대상이 된다. 또한 장애물 극복 후 높은 단차에서 낙하할 경우도 대비하여 충격으로 인한 손상을 방지하도록 플랫폼이 설계되어야 한다.

따라서 본 연구는 플리퍼를 장착한 트랙방식의 SUGV가 수직장애물을 최대한 극복할 수 있도록 설계변수를 결정하고, 극복된 수직장애물에서 낙하할 경우를 대비한 충격흡수 구조를 제안하였다.

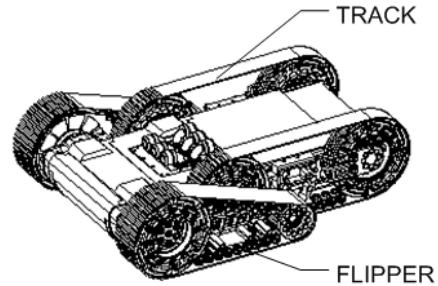


Fig. 1 Track type Small UGV

2. 수직장애물 극복 구조설계

2.1 설계 변수 설정

로봇에 부착된 한 쌍의 플리퍼는 수직 장애물을 극복하는데 이용된다. 장애물 극복은 플리퍼와 트랙의 조작을 통하여 이루어지며 그 과정은 로봇을 장애물에 걸치는 것과 무게 중심을 전방으로 쏠리게 하여 상단으로 올라가는 것으로 구성된다. 모든 과정에서 무게중심의 위치는 매우 중요한 역할을 차지하기 때문에 무게의 상당부분을 차지하는 모터와 배터리의 위치 선정이 장애물 극복의 핵심 고려사항이 된다.

원활한 로봇 운용을 위해 대부분의 배터리는 탈착 교환식으로 설계되는데 그 위치는 설계변수의 최적화에 의해 결정되는 것이 타당하다. 본체의 무게는 균일하다고 가정하면 주로 모터와 배터리 부분의 위치에 의해 전체 무게중심의 위치가 결정된다. 플리퍼 길이 또한 무게중심과 연관되어 로봇을 장애물에 걸치는 과정에 중요한 영향을 미친다. 수직 장애물 극복에 관련된 대표적인 설계 변수를 나타내면 Fig. 2~3과 같이 도식된다.

본체의 무게 구성을 배터리 부분과 모터부로 단순화하여 등가할 수 있다. 실제로 4개의 모터로 구성된 모터 구동부(m_2)와 운용시간을 결정하는 배터리부(m_1)는 플랫폼 무게의 상당부분을 차지

하기 때문에 최종 무게 중심을 나타내도록 모터부와 배터리부의 위치를 선정하도록 한다. 여기서 플리퍼는 무게중심이 축 가까이 있고 본체에 비해 가볍기 때문에 그 영향이 작아 고려하지 않는다. 또한 모터부는 구동 메커니즘상 플리퍼와 트랙의 축이 맞물린 지점에 위치하는 것이 구조적으로 유리하기 때문에 $x_2 = l/2$ 으로 정한다.

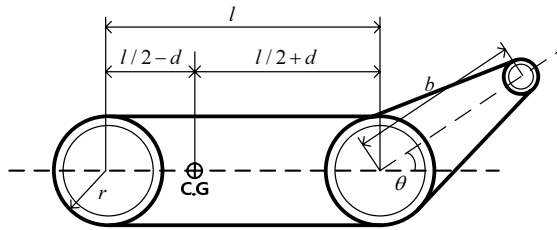


Fig. 2 Design parameters of SUGV (1)

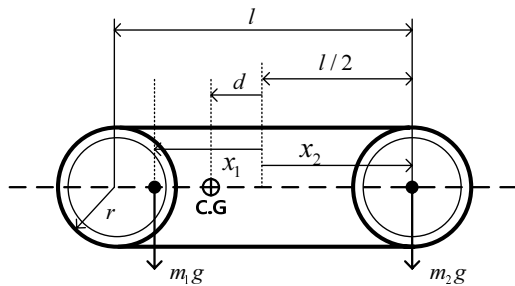


Fig. 3 Design parameters of SUGV (2)

2.2 설계 변수 결정

Fig. 4~5 에서 보는 것과 같이 플리퍼가 로봇을 들어 수직장애물을 극복하면 몇 가지 이로운 점을 얻을 수 있다. 먼저 로봇을 장애물에 걸치는 높이가 플리퍼를 들어 걸치는 것에 비해 높다. 또한 플리퍼를 이용하여 높은 단차를 극복하기 위해서는 무게중심이 플리퍼 쪽으로 위치해야 하는데 이것은 배터리와 구동 모터의 무게가 한쪽으로 집중되는 형상이기 때문에 구조적으로 안정적이지 않다. 하지만 Fig. 5 의 경우는 무게중심이 플리퍼 반대쪽으로의 이동이 허락되어 배터리와 모터의 무게 분산이 가능하다. 마지막으로 로봇이 뒤집혔을 때 원상태로 되돌아오는 자세복귀 메커니즘과 로봇을 장애물에 걸치는 메커니즘이 동일하기 때문에 수직 장애물 극복과 자세복귀가 동시에 적용 가능하다. 따라서 후방향으로 수직장애물을 극복하는데 필요한 설계변수의 관계를 살펴보고 최대

높이의 장애물 극복이 가능한 플리퍼 길이(b)와 배터리의 위치(x_1)를 결정하였다.

휴대성을 위해 플랫폼의 크기는 병사가 짊어지고 다닐 수 있는 야전배낭의 크기를 참고할 수 있다. 국방물자시스템의 야전 배낭의 크기(가로 510mm, 세로 600mm, 두께 약 200mm)를 고려하여 이에 준하는 크기인, 휠반지름($r=90mm$)과 본체길이($l=500mm$)를 결정하였다. 플리퍼의 길이는 플리퍼 구동축에서 플랫폼까지의 길이($l+r$) 절반보다 클 수 없는 구속조건을 설정하면 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 장애물을 극복하기 위해서는 Fig. 4 에서 보는 것과 같이 플리퍼를 바닥에 지지하고 로봇을 들어올리는 과정이 필요한데, 이를 위해서는 식(2)에서 나타내는 것과 같이 무게중심의 위치가 플리퍼 안쪽에 위치해야하는 구속조건을 추가로 필요하게 된다. 최종적으로 로봇이 수직 장애물을 넘으려면 장애물 끝 단에서 중력에

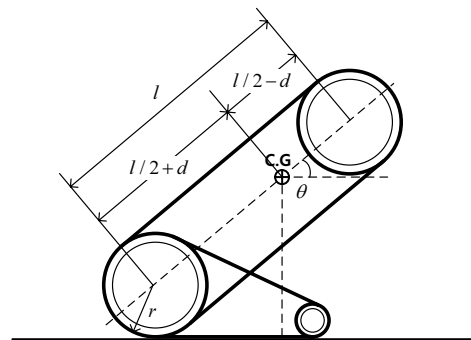


Fig. 4 Position to lift the body

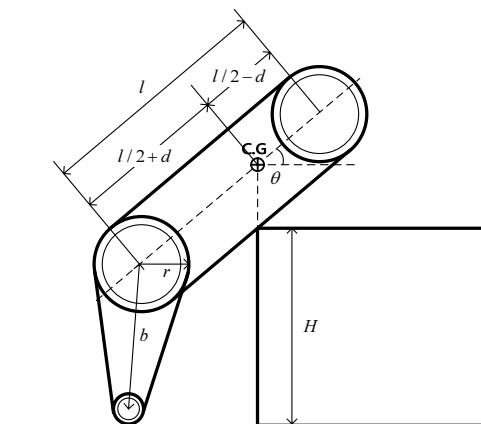


Fig. 5 Climbing vertical obstacle

$$b < (l+r)/2 \tag{1}$$

$$l/2 - d < b \tag{2}$$

$$H = b + (l/2 + d)\sin\theta - r/\cos\theta \tag{3}$$

의한 모멘트가 발생해야 한다. 이것은 장애물 수직면 오른쪽에 로봇의 무게중심이 위치해야 하는 것과 등가이다.

로봇이 수직장애물에 걸친 다음 상단으로 넘어 갈 수 있는 높이는 식(3)에 의해 결정된다.⁷ 구속 조건을 고려하여 극복가능 높이를 그래프로 도식 하면 Fig. 6 과 같다.

무게중심의 위치는 로봇본체를 들어올리는 범위 내에서 가장 큰 값인 40mm 이 되고 지면과 플랫폼이 이루는 각이 약 50° 일 때 최대 극복높이가 약 38cm 가 된다. 공격각은 지면의 상태에 따른 마찰과 구동 모터의 토크와 관련되어 추후의 모터 성능과 마찰의 상태를 결정짓는 요소가 된다.

결정된 무게중심의 위치($d=40\text{mm}$)를 설계하기 위해 Fig. 3 에서의 배터리의 위치(x_1)와 구동부의 위치(x_2)는 식(4) 에 의해 결정된다.

$$x_1 = \frac{m_2}{m_1} x_2 + \frac{(m_1 + m_2)}{m_1} d \tag{4}$$

구동에 필요한 모터부(2.4kg)와 배터리부(4.4kg)의 질량을 고려하여 최종적으로 도출된 설계변수는 Table 2 와 같다.

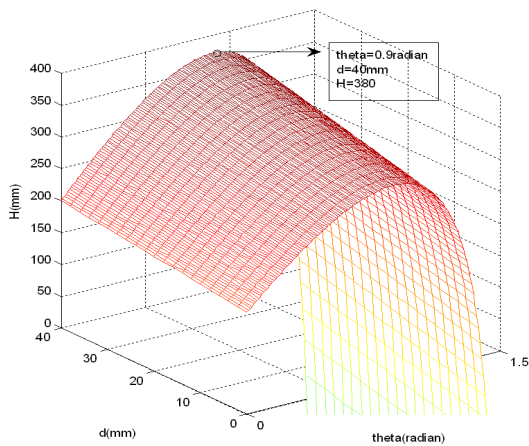


Fig. 6 Obstacle height (H) with d, θ

Table 2 Design parameters

l	Total length of a robot body	500(mm)
d	Distance from center to C.G point	40(mm)
r	Radius of a wheel	90(mm)
b	Length of a flipper	290(mm)
θ	Attack angle	50°
m_1	Mass of battery part	4.4(kg)
m_2	Mass of motor part	2.4(kg)
x_1	Distance from center to m_1	198(mm)
x_2	Distance from center to m_2	250(mm)

3. 충격흡수 구조설계

3.1 소형 UGV 의 내충격 설계

한편 수직장애물에서 낙하하는 경우에도 운용 가능하기 위해서는 내구성과 내충격성을 지녀야 한다. 트랙형 주행 플랫폼의 경우 험지 주행에 탁월하지만 바퀴형 플랫폼이 가지는 타이어 탄성효과가 없어 충격에 취약하다. 이를 해결하기 위해 현가장치의 장착이 가능하지만,^{8,9} 장치의 추가로 인해 소형·경량의 플랫폼이라는 목적과 상충된다. 따라서 본 연구에서는 추가의 현가장치 없이 트랙의 스프라켓 역할을 하는 휠의 재질과 형상의 변화로 플랫폼의 내충격 성능을 높이고자 하였다.

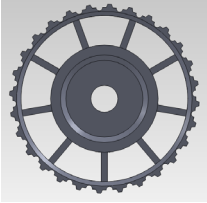
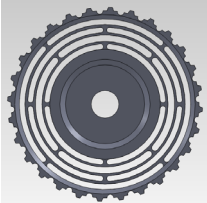
보통 트랙을 구동하는 스프라켓의 재질과 구조는 탄성을 보유하고 있지 않아 외력이 그대로 반작용력에 반영되어 충격에 취약하다. 즉 외부의 충격에너지가 소산없이 구동축에 전달되어 축에 걸리는 하중이 크게 된다. 반면에 휠이 탄성을 가지면 외부의 충격에너지가 휠의 탄성에너지에 축적되고 남은 에너지가 구동축에 전달된다. 따라서 재질과 구조의 변형을 통하여 휠에 탄성을 부여한다면 시스템의 충격에 대한 안정성을 보장할 수 있다. 이에 내충격 휠을 제안하고 모의실험을 통하여 검증하였다.

3.2 재질과 구조에 따른 내충격 특성

트랙을 구동하는 스프라켓은 치가 있는 원형의 휠로 모터 축으로 동력을 전달받아 치에 맞물린 트랙을 구동시키는 역할을 한다. 보통의 휠은 플랫폼과 동일한 알루미늄 재질로 디스크모양이며 무게를 줄이는 절삭을 통해 특정 바퀴살 모양이 존재하는 형태이다. 본 연구에서는 휠의 시제를 Table 3 과 같이 형태와 재질의 두 가지 인자에 대해 각각 두 가지 수준으로 나누었다. Type A 는 일반적인 바퀴살이 있는 형태이고 Type B 는 제안된

형태의 휠 구조로 바퀴살을 Fig. 7 과 같이 설계하여 응력의 분산과 탄성 효과를 내도록 하였다. 두 형태의 비교 대상간 부피는 동일하다. 또한 재질은 알루미늄 시제를 경량화하기 위해 가벼우면서도 내구성이 우수한 아세탈과 초고분자 폴리에틸렌(UHMW)을 선정하였다.

Table 3 Simulation Type

Wheel Structure	Material	Properties
Type A 	Material 1 Acetal	Young's Modulus : 2.7(GPa)
		Density : 1.41 (g/cm2)
		Poisson's Ratio : 0.35
Type B 	Material 2 UHMW. PE	Young's Modulus : 0.9(GPa)
		Density : 0.93 (g/cm2)
		Poisson's Ratio : 0.35

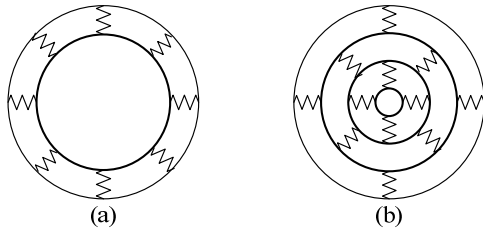


Fig. 7 Tire structure (a), Suggested wheel structure (b)

3.3 유한요소 해석

모델링과 해석은 상용 설계 및 시뮬레이션 프로그램인 SolidWorks 에서 이루어졌으며, 낙하/충격 Simulation 를 이용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 8 에서 보는 것과 같이 한 쌍의 휠과 구동축으로 구성된 조립체에 6kg 의 질량을 인가하여 0.5m 에서 낙하시킨 후, 충격에 의해 휠에 걸리는 최대응력을 분석하였다. 구조와 재질이 다른 4 가지의 시제에 대한 시뮬레이션 결과값을 정리하면 Table 4 와 같다.

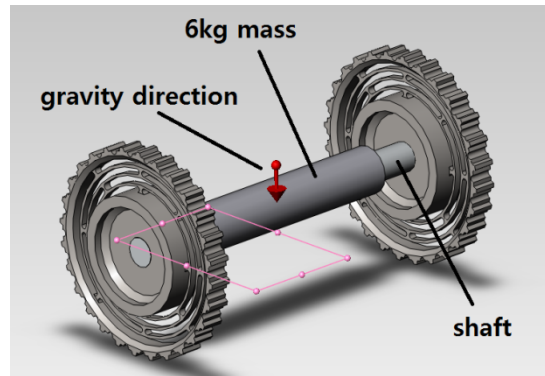


Fig. 8 Simulation Setup

Table 4 Simulation Result

No	Structure	Material	σ_{yield} (MPa)	σ_{max} (MPa)
1	Type A	Acetal	58.8	299
2		UHMW.PE	38	96
3	Type B	Acetal	58.8	49
4		UHMW.PE	38	16

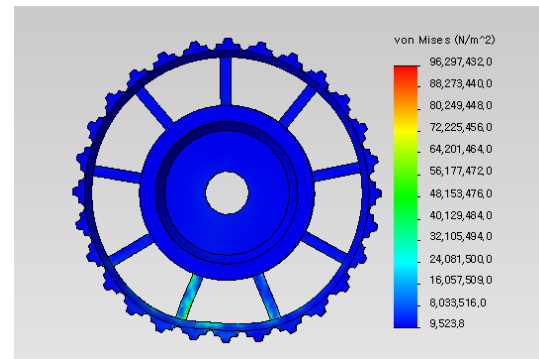


Fig. 9 Stress distribution (No.2)

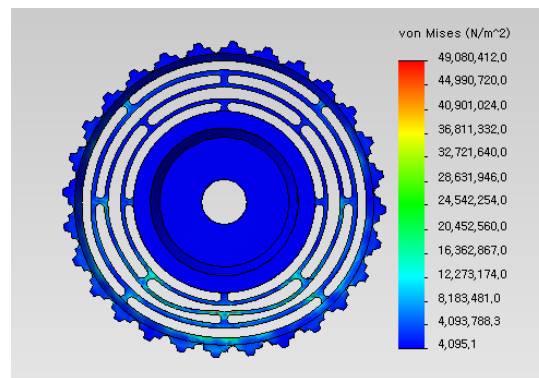


Fig. 10 Stress distribution (No.3)

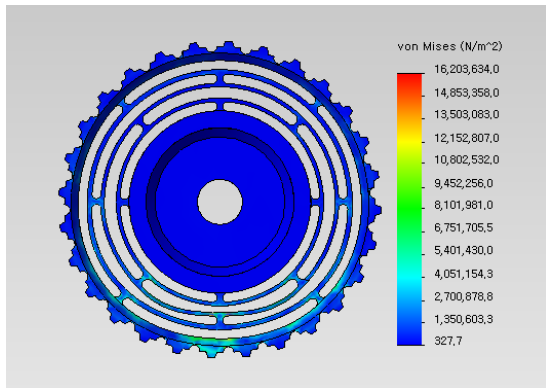


Fig. 11 Stress distribution (No.4)

제안된 휠 구조인 Type B 에 전달되는 최대응력은 Type A 에 비해 평균 16.6% 수준으로 감소하였고 UHMW 재질은 아세탈에 비해 32.4% 수준으로 감소하였다.

재질이 같고 구조가 다른 2 번과 4 번의 결과에서 2 번은 현가장치의 부재로 하중이 바퀴살에 직접 전달되어 충격에 취약한 반면, 4 번의 경우 얽혀 있는 바퀴살들이 탄성 변형 내에서 에너지를 축적하기 때문에 낙하 충격을 흡수하는 결과를 나타낸다. 구조가 같고 재질이 다른 3 번과 4 번의 결과에서도 4 번의 초고분자 폴리에틸렌에 가해지는 응력이 작음을 확인할 수 있다. 이것은 UHMW 재질이 아세탈에 비해 변형 에너지가 큰 특성에 기인한 것으로 판단된다.

따라서 UHMW 로 Type B 와 같이 제작된 휠은 충격 시 응력이 한곳으로 집중되지 않고 휠 전체로 분산되며 탄성 변형으로 인해 로봇으로 전달되는 충격 에너지가 감소할 것으로 예상된다.

4. 플랫폼 제작 및 실험

4.1 플랫폼 제작

최종적으로 제작된 플랫폼은 트랙 구동 방식의 주행로봇으로 앞부분에 탈착 가능한 플리퍼가 부착된 형태이다. 로봇의 본체는 크게 앞쪽의 모터와 뒤쪽의 배터리로 구성되며 그 사이에는 로봇의 전반적인 관제를 담당하는 SBC 보드 및 센서로 구성된 전장부가 위치한다. 또한 기본적인 전후방 카메라가 내장되어 있어 실시간으로 영상을 확인할 수 있다.

Fig. 13 의 (a)는 탈착 및 충전이 용이하도록 제작된 배터리 팩이고 (b)는 내충격 성능 향상을 위

한 초고분자 폴리에틸렌 재질의 충격흡수 휠구조이다. 이들은 앞서 제시된 설계 변수와 구조에 의해 제작되었으며 로봇에 그대로 적용되었다.

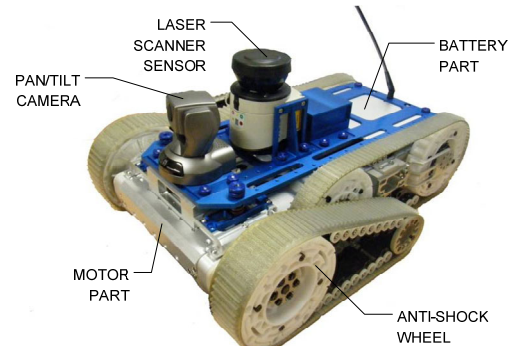


Fig. 12 SUGV

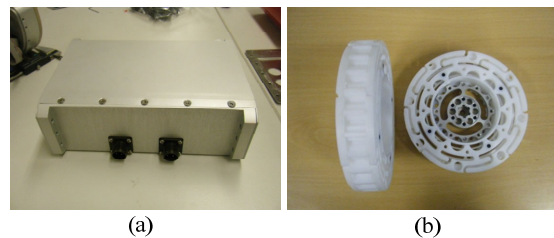


Fig. 13 Battery pack (a), Anti-shock wheel (b)

4.2 수직 장애물 극복 시뮬레이션 및 구동실험

앞서 제시한 설계 변수의 타당성을 확인하기 위해 동역학 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 다물체 동역학 해석 상용 프로그램인 RecurDyn 을 이용하였다. 제시된 설계 변수를 바탕으로 해당하는 위치에 질점을 부여하는 방식으로 3D 모델을 제작하였다. 시뮬레이션을 수행한 결과, Fig. 14 와 같이 해석과 유사한 최대 40cm 의 단차를 극복함을 확인하였다.

플랫폼 제작 후 실제 시제를 이용하여 장애물 극복 실험을 수행한 결과 Fig. 15 에서 보는 것과 같이 40cm 높이의 나무 단차 극복에 성공하였고 올라간 장애물에서의 낙하는 Fig. 16 에서 보는 것과 같다.

5. 결론

본 연구에서는 플리퍼를 장착한 트랙 방식의 SUGV 플랫폼의 수직 장애물 극복 및 자세 복귀를 위한 설계 변수를 제시하였다. 또한 수직장애물에

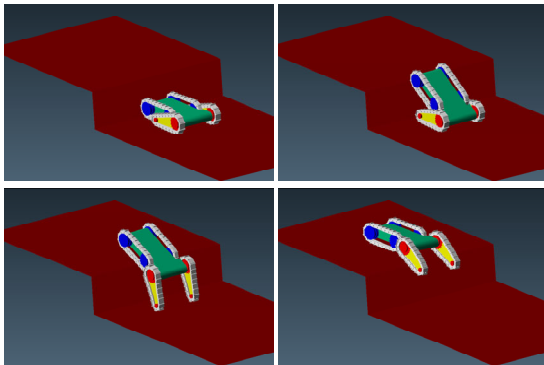


Fig. 14 Simulation of climbing vertical obstacle

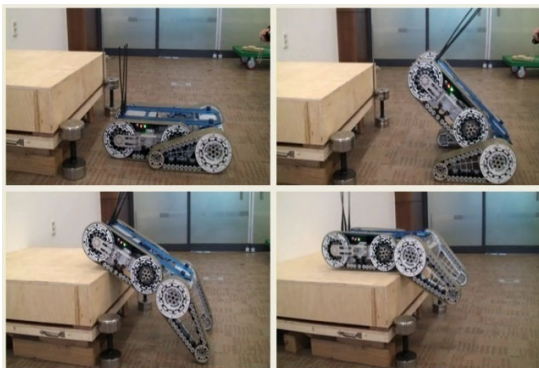


Fig. 15 Experiment - Climbing

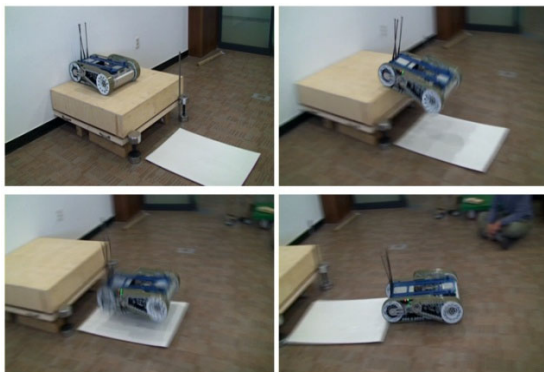


Fig. 16 Experiment - Falling off

서 낙하할 때 충격을 흡수할 수 있는 휠구조와 재질을 제시하였다.

설계 변수 제시는 로봇의 설계에 필요한 기하학적 변수를 분석하는 과정으로 시스템의 디자인에 가장 기본적인 단계이다. 로봇이 수직 단차를 극복하는 과정을 분석하여 무게중심의 위치, 폴리퍼의 길이, 배터리의 장착 위치 등을 결정할 수

있는 근거를 마련하였다. 이를 실제 플랫폼 제작에 반영하였으며 모의 실험과 실제 실험을 통하여 수직 장애물 극복 성능을 확인하였다.

또한 내충격 휠 설계를 위해 재질 및 구조를 다르게 한 형태들을 모의실험으로 분석하였고, 그 결과로 초고분자 폴리에틸렌 재질로 제작된 제안 구조를 선정하여 로봇에 적용하였다.

참고문헌

1. Yamauchi, B. M., "Packbot: a versatile platform for military robotics," *Unmanned Ground Vehicle Technology VI*, Vol. 5422, No. 1, pp. 228-237, 2004.
2. Choi, K. H., Jeong, H. K., Hyun, K. H. and Kwak, Y. K., "Obstacle Detection and Driving Mode Control for a Mobile Robot with Variable Single-tracked Mechanism," *J. of the KSPE*, Vol. 25, No. 2, pp. 65-71, 2008.
3. Lee, C. H. and Kwak, Y. K., "Double-tracked Mobile Robot For Hazardous Environment Application," *Advanced Robotics*, Vol. 17, No. 5, pp. 447-459, 2003.
4. Siegwart, R., Lamon, P., Estier, T., Lauria, M. and Piguert, R., "Innovative design for wheeled locomotion in rough terrain," *J. of Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 40, No. 2-3, pp. 151-162, 2002.
5. Matthies, L., Xiong, Y., Hogg, R., Zhu, D., Rankin, A. and Kennedy, B., "A Portable, Autonomous, Urban Reconnaissance Robot," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 40, No. 2-3, pp. 163-172, 2002.
6. Eiji, N. and Sei, N., "Leg-wheel robot; a futuristic mobile platform for forestry industry," *Proceedings of the 1993 IEEE/Tsukuba International Workshop on Advanced Robotics*, pp. 109-112, 1993.
7. Liu, J., Wang, Y., Ma, S. and Li, B., "Analysis of Stairs-Climbing Ability for a Tracked Reconfigurable Modular Robot," *International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, pp. 36-41, 2005.
8. Kim, J. H., Choi, H. D., Kim, J. W. and Jeon, U. C., "Optimum Design of Suspension on Impulse to AGV," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 361-365, 2002.
9. Kim, J. H., Seo, Y. B., Choi, J. W. and Yoo, W. S., "A Study on the Suspension System modeling and Left

Eigenstructure Assignment Control Design for Performance Improvement of an Automotive Suspension System," J. of the KSPE, Vol. 16, No. 11, pp. 81-88, 1999.