

# 대한기계학회 주선

## 제13회 전국학생설계경진대회(2023년)

# 설계 최종 보고서

참가부	대학부 ( ✓ )				
참가분야	공모주제 ( ✓ ) / 자유주제 (   )				
참가팀명	KIT-IRL				
설계제목	산악지형 극복 소방 로봇				
지도교수/교사	(소속) 금오공과대학교 (성명) 주백석 (연락처) (이메일)				
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
	이성우	금오공과대학교 기계공학과			

## 참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	이영준	금오공과대학교 기계시스템공학과 / 4학년	
2	김재원	금오공과대학교 기계시스템공학과 / 3학년	
3	이장협	금오공과대학교 기계시스템공학과 / 3학년	
4	이성우	금오공과대학교 기계공학과 / 3학년	

## 설계 요약문

참가분야	공모주제 ( ✓ ) / 자유주제 (   )
참가팀명	KIT-IRL
설계제목	산악지형 극복 소방 로봇
대표자명	이성우
요약문	<p>소방 로봇의 개발은 꾸준히 진행되었으나 산악지형과 같은 비평탄 지형이나 장애물이 많은 지형에 대한 접근성은 여전히 한계가 있다. 기존에 상용화된 소방 로봇들은 캐터필러나 드론, 바퀴 형식 등으로 구동하며, 화재가 발생한 장소에 따라 저마다의 장점과 한계점들을 가지고 있다. 캐터필러 구동 방식은 지면에 접촉하는 면적이 넓어 비평탄 지형인 산악지형이나 장애물이 많은 험난한 지형에서 안정적으로 주행할 수 있지만, 바퀴 구동 방식에 비해 기동성이 떨어지는 단점이 있다. 비행이 가능한 드론 소방 로봇은 높은 산악 지형이나 사람이 접근하기 어려운 지역에 쉽게 접근할 수 있지만, 강한 바람이 부는 환경에서는 사용하기 어렵다는 문제와 주파수 혼선 시 통신 문제, 배터리 용량 부족 문제 등의 단점이 있다. 이러한 제약을 캐터필러 방식과 바퀴 구동 방식의 장점을 합친 8-Wheel robotic platform을 활용하여 극복하려 한다. 8-Wheel robotic platform은 바퀴를 사용하여 주행하기 때문에 기존의 바퀴 구동 방식처럼 기동성이 높다. 또한, 바퀴가 몸체에 고정되어 있지 않고 회전할 수 있는 링크 구조로 되어 있어 캐터필러 방식처럼 험지 극복이 안정적이다. 더불어 주행 간에 안정적인 모니터링을 확보하기 위해 3축 짐벌을 이용하여 비평탄 지형에서도 화면의 기울어짐이나 외부 진동으로 흔들림을 최소화하였다. 이를 통해 화재 현장의 상황을 정확히 파악한 후 팬틸트 방향으로의 제어가 가능한 소방 노즐을 회전시키고 방수 명령이 떨어졌을 때 물을 정확히 분사한다. 제안한 소방 로봇을 활용할 경우 사람과 소방차의 진입이 어려운 현장에서 화재를 신속하고 안전하게 진압하여 화재로 인한 인적·물적 피해를 최소화할 수 있을 것이라 기대된다.</p>
설계프로젝트의 입상 이력	

# 산악지형 극복 소방 로봇

이성우\* · 이영준\*\* · 김재원\*\* · 이장협\*\* · 주백석\*\*†

\*금오공과대학교 기계공학과

\*\*금오공과대학교 기계시스템공학과

## Firefighting Robot for Overcoming Mountainous Terrain

Seongwoo Lee<sup>\*</sup>, Youngjun Lee<sup>\*\*</sup>, Jaewon Kim<sup>\*\*</sup>, Janghyeop Lee<sup>\*\*</sup> and Baeksuk Chu<sup>\*\*†</sup>

<sup>\*</sup> Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology

<sup>\*\*</sup> Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

(Received September 11, 2023)

**Key Words:** Firefighting robot(소방 로봇), 8-Wheel robotic platform(8개 바퀴 로봇 플랫폼), Pan-tilt mechanism(팬틸트 메커니즘), 3-Axis gimbal principle(3축 짐벌 원리), Mountainous terrain(산악 지형)

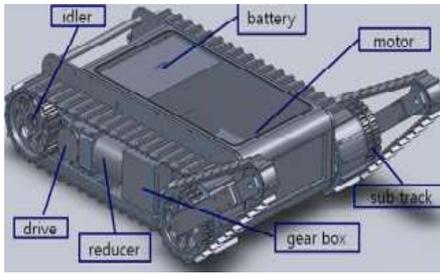
**초록:** 본 연구에서 제안하는 로봇은 사람이나 소방차가 접근하기 어려운 화재 현장에 투입할 수 있는 산악지형 극복 소방 로봇이다. 산악지형과 같은 험지를 신속하고 안정적으로 극복하기 위해 8-Wheel robotic platform을 설계하였고, 3축 짐벌 구조를 적용한 카메라를 이용하여 비평탄 지형에서 발생하는 화면의 기울어짐이나 외부 진동으로 흔들림을 최소화한 안정적인 모니터링을 할 수 있도록 하였다. 이를 통해 화재 현장의 상황을 파악한 후 팬틸트 방향으로 제어가 가능한 소방 노즐을 사용하여 정확한 물 분사가 가능하도록 하였다. 이를 활용하면 기존의 소방 로봇의 단점을 보완하면서 산악지형을 비롯한 다양한 지형에서 활용할 수 있을 것이다.

**Abstract:** The proposed robot in this study is a firefighting robot designed for difficult fire scenes inaccessible to humans or fire trucks, such as mountainous terrains. To swiftly and stably conquer rugged terrains, we developed an 8-Wheel robotic platform and integrated a 3-Axis gimbals camera to ensure stable monitoring by minimizing screen tilt and vibrations caused by uneven surfaces. This enables the robot to assess the fire scene and accurately spray water using a pan-tilt controlled firefighting nozzle. By addressing existing firefighting robot limitations, this solution can be effectively utilized in various terrains, including mountainous regions.

## 1. 서론

2017년부터 해마다 평균 약 550건의 산불이 발생하고 있으며, 피해 금액은 약 천억 원에 달한다. 이러한 피해 현황은 소방 로봇의 개발을 통해 완화할 수 있다. 기존 선행연구 조사 결과, 소방 로봇의 개발은 꾸준히 진행되었지만, 여전히 산악지형에 대한 접근성에 한계가 있다는 점을 알게 되었다. 기존 소방 로봇에 대한 특허 및 논문 조사 결과 가장 많이 나온 구동부 방식이 캐터필러나 바퀴 구동이다. Fig. 1(a)과 Fig. 1 (b)처럼 기존의 캐터필러 구동 방식은 지면에 접촉하는 면적이 넓어 계단과 같은 실내 지형과 산악지형과 같은 비평탄 지형을 안정적으로 극복할 수 있다는 장점이 있지만 신속한 화재 진압이 중요한 현장에 투입되기에는 기동성이 부족하다는 단점이 있다. 또한, Fig. 1(c)과 Fig. 1(d) 같은 바퀴 구동 방식은 캐터필러와 달리 신속하게 화재 진압을 할 수 있다는 장점이 있지만, 계단이나 험지, 비평탄 지형에서의 장애물 극복이 어렵다는 단점이 있다.

그래서 본 연구에서는 캐터필러와 바퀴 구동 방식의 장점을 합친 8-Wheel robotic platform을 제안하였다. 바퀴 구동계를 메인링크와 이에 연결되는 2개의 서브링크로 구성되고, 메인링크와 서브링크 간에 베어링을 연결하여 회전을 자유롭게 하여 바퀴가 몸체에 고정되어 있지 않고 회전할 수 있는 링크 구조로



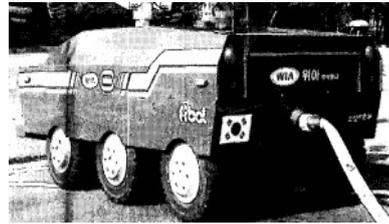
(a) Firefighting robot with sub-track platform



(b) Firefighting robot using caterpillar



(c) 4-Wheel driven firefighting robot



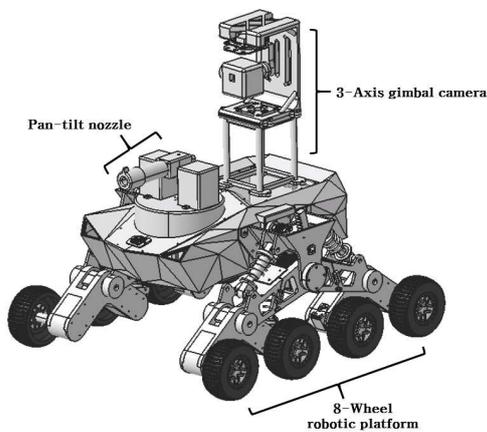
(d) 6-Wheel driven firefighting robot

**Fig. 1** Conventional firefighting robot

다양한 지면 상황에서도 항상 높은 마찰을 유지하여 안정적인 주행을 가능하게 한다. 또한, 기존의 소방 로봇에 장착된 카메라들은 단순 고정 방식으로 되어 있어 산악지형에서의 주행 시 경사진 곳이나 나무뿌리, 장애물 등에 의해 화면의 기울어짐 또는 흔들림이 발생하게 된다. 모니터링이 불안정하다는 점을 3축 짐벌을 이용한 카메라를 사용하면 기울어진 화면을 교정하고 흔들림을 최소화할 수 있다. 또한, 팬틸트 방향으로 제어가 가능한 노즐을 이용해 비평탄 지형에서도 원하는 각도로 조절하여 화재 지점을 향해 물을 정확히 분사하여 화재를 진압할 수 있도록 한다.

## 2. 로봇 기구부 설계

### 2.1 로봇 전체 구조



(a) Mechanical parts



(b) Final product

**Fig. 2** Overall structure

## 산악지형 극복 소방 로봇

Fig. 2(a)와 같이 8-Wheel robotic platform, Pan-tilt nozzle, 3-Axis gimbal camera 3가지의 기구부로 나눌 수 있다. 8-Wheel robotic platform은 8개의 바퀴를 사용하여 비평탄 지형에서도 신속하고 안정적인 주행을 할 수 있게 하였고, 3-Axis gimbal camera는 물체가 중심축을 기준으로 움직이는 반대 방향으로 회전하여 구조물의 움직임과 관계없이 항상 수평 상태를 유지하게 해준다. Pan-tilt nozzle은 각도를 원하는 대로 조절하여 화재가 발생한 곳을 향하여 정확히 분사해 화재를 진압할 수 있도록 한다. Fig. 2(b)는 최종 결과물의 모습을 나타낸다.

### 2.2 시스템 하드웨어(H/W) 구성

본 시스템의 하드웨어는 Fig. 3과 같이 구성된다. 전체적인 하드웨어를 제어하기 위한 마이크로 컨트롤러로 OpenCR 보드를 선정하였다. OpenCR 보드에는 다이내믹셀 모터와 직접적으로 연결 가능한 RS485 회로가 내장되어 있어, 별도의 추가 부품 없이 모터를 제어 가능한 장점이 있다. 또한, 11.1V의 리튬 폴리머 배터리를 전압원으로 사용할 수 있도록 배터리 연결 단자가 내장되어 있어서 전압을 조절하기 위한 추가 부품을 사용하지 않아도 된다. 결과적으로 OpenCR을 사용하여 불필요한 부품 사용을 최소화하고, 회로를 간소화하여 경량화된 시스템을 구축한다. 더불어 카메라 모듈인 OV2640을 이용하여 사용자에게 외부 환경을 실시간으로 전송하며, 제어 및 데이터 통신으로 블루투스 모듈인 HM-10을 사용하였다.

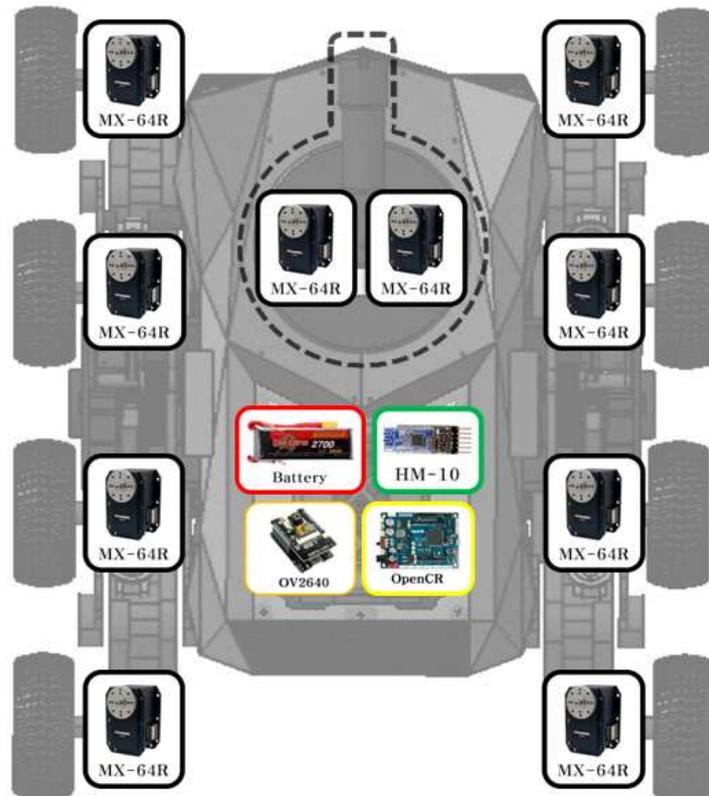


Fig. 3 H/W configuration

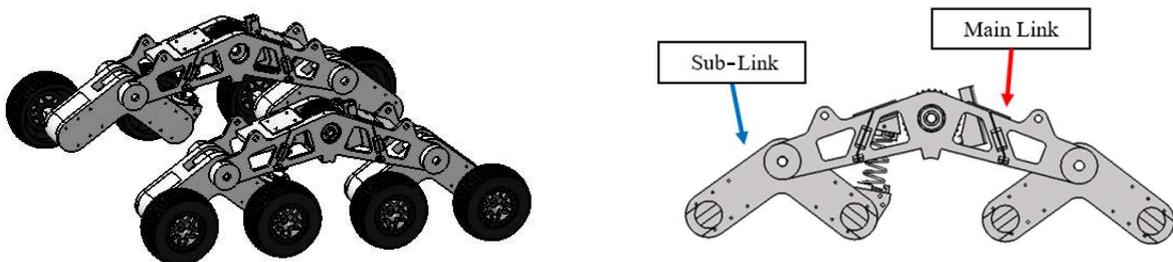
8-Wheel robotic platform과 팬틸트 메커니즘을 적용한 노즐, 랙 기어 동작을 동작하기 위해 다수의 모터를 사용하였다. 랙 기어에는 2개의 모터를 사용하였으며, Fig. 3에는 별도로 기재하지 않았다. 그 외에 로봇을 제어하기 위해 구성되는 부품들의 상세 정보는 Table 1에 정리하였다.

**Table 1** Specifications of control system

Component	Model	Specification
Controller	OpenCR 1.0	Input Voltage : 5V (USB VBUS), 5-24 V (Battery or SMPS) - Default battery : LI-PO 11.1V 1,800mAh 19.98Wh Extension pins : 32 pins (L14, R18) (*Arduino connectivity) Sensor module x 4 pins Extension connector x 18 pins Communication circuits : USB (Micro-B USB connector) RS485 (B4B-EH-A / Dynamixel)
Motor	Dynamixel MX-64R	Resolution : 360° in 0.088° increments over 4096 steps Input Voltage : 10~14.8 [V] (Recommended : 12V) Stall Torque : 6.0 [N·m]
Camera	OV2640	Pixel : 2MP FOV : 160°
Bluetooth	HM-10	Bluetooth V4.0 BLE
Pump	26820200	Max pressure: 200 PSI Displacement: 7.6 LPM

2.3 8-Wheel robotic platform 구조

8-Wheel robotic platform 구조는 Fig. 4(a)와 같이 8개의 바퀴를 사용하여 주행하기 때문에 바퀴 구동 방식처럼 높은 기동성을 가지고 있어 신속하게 화재 현장에 도달할 수 있고, 바퀴가 몸체에 고정되어 있지 않고 회전할 수 있는 링크 구조로 되어 있어 캐터필러 구동 방식처럼 장애물 극복이 뛰어나 산악 지형과 같은 비평탄 지형을 안정적으로 극복할 수 있다. 바퀴 구동계는 Fig. 4(b)와 같이 메인링크와 이에 연결되는 2개의 서브링크로 구성 및 설계하였다. 바퀴 하나당 각 하나의 모터가 사용되기 때문에 서브링크 하나에 모터가 2개 장착되도록 설계하였다.



(a) The overall shape of the link structure

(b) Link structure side view

**Fig. 4** 8-Wheel robotic platform

2.3.1 서브링크 설계

이 로봇은 험지를 주행하기 때문에 많은 이물질이 바퀴 구동부에 침투할 수 있어 Fig. 5(a)와 같이 모터의 외부를 케이스로 완전히 덮어 주었고, 모터의 배선 연결 부위에 홈을 파주어 배선의 길이가 부족한 점을 보완해 주었다. 전면부는 모터의 회전부에 맞게 구멍을 뚫어 허브를 조립할 수 있도록 설계하였고, 메인링크와 서브링크를 연결하기 위해 서브링크 중앙에는 베어링 및 축이 들어갈 구멍을 뚫어 설계하여 베어링을 서브링크 양쪽 중앙에 끼워주고 이 서브링크를 메인링크와 함께 축으로 연결해 주어 서브링크의 자유로운 회전이 가능하다. 하지만 계단을 등반할 때 첫 번째 서브링크가 어느 각도 이상으

## 산악지형 극복 소방 로봇

로 회전하면 서브링크가 제자리로 돌아오지 않는 문제점과 첫 번째 바퀴의 접지가 제대로 되지 않아 마찰력이 부족하다는 문제점이 있다. 이를 서브링크와 메인링크 사이에 스프링을 넣어 해결하였다. 계단을 등반할 때 서브링크가 회전하게 되면 스프링이 인장되어 발생하는 인장력으로 과도한 회전을 막아주고, 첫 번째 바퀴의 마찰력을 높여준다. 또한, 계단을 극복하고 서브링크가 제자리로 돌아올 때는 스프링이 압축되어 발생하는 압축력으로 메인링크와 허브 간의 충돌을 방지하였다. 최종적으로 조립된 형상은 Fig. 5(b)와 같다.

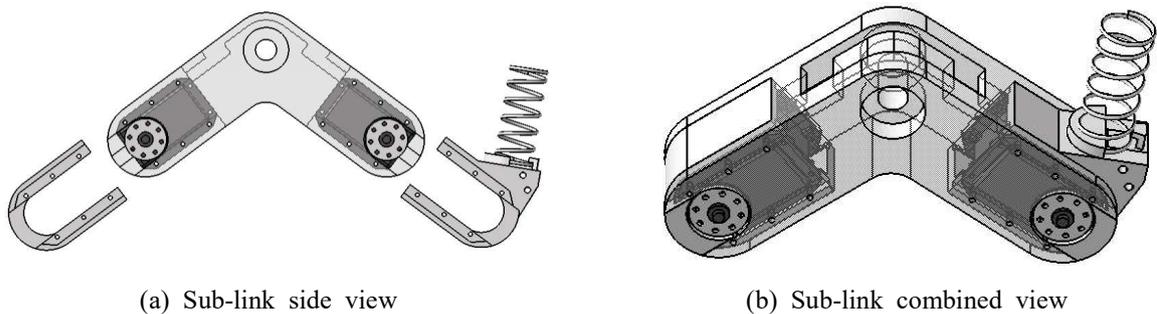


Fig. 5 Sub-link design

### 2.3.2 메인링크 설계

메인링크는 3D 프린터의 높은 정밀함과 시간의 단축, 구조적 강성을 고려하여 3개의 부품으로 나누어 조립하는 방식으로 설계하였다. 서브링크와 메인링크를 연결하는 부분에 베어링과 축이 들어갈 구멍을 뚫어주었고, 서브링크와 연결된 스프링이 고정될 부분도 각도에 맞춰 설계하였다. Fig. 6(a)와 같이 메인링크는 몸체에 축과 함께 서스펜션으로도 연결되기 때문에 서스펜션 연결부도 고려하여 설계하였다. 추가로 뒤에서 설명할 랙 기어를 넣기 위한 공간도 만들어 주어 조립하면 전체 형상은 Fig. 6(b)와 같다.

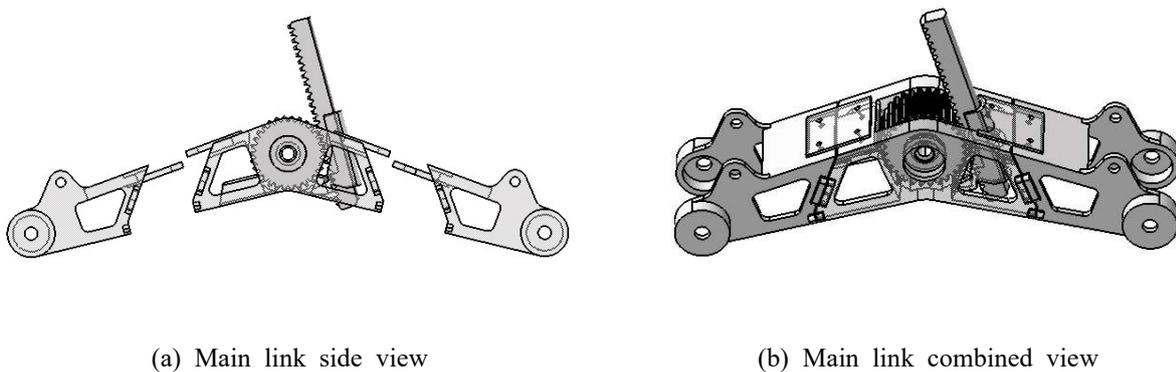


Fig. 6 Main link design

### 2.3.3 랙 기어부 설계

높고 연속적인 장애물을 등반하지 못할 때 사용되는 기구부로 Fig. 7(a)와 같이 기어를 회전시켜 회전 운동을 랙 기어의 직선 운동으로 변환하는 구조이다. 이를 통해 Fig. 7(b)와 같이 서브링크를 강제로 밀어내어 계단을 극복할 수 있게 된다. 기어는 총 4개가 사용되었고 평 기어 3개와 랙 기어 1개로 구성되었다. 로봇의 무게를 견디며 서브링크를 밀어내야 하기 때문에 큰 힘이 필요하게 되는데, 이를 위해 평 기어를 각각 12, 20, 30의 잇수로 설계하여 기어비를 2.5로 설정하였다. 결과적으로 모터의 토크를 2.5배 더 강하게 사용할 수 있었다.

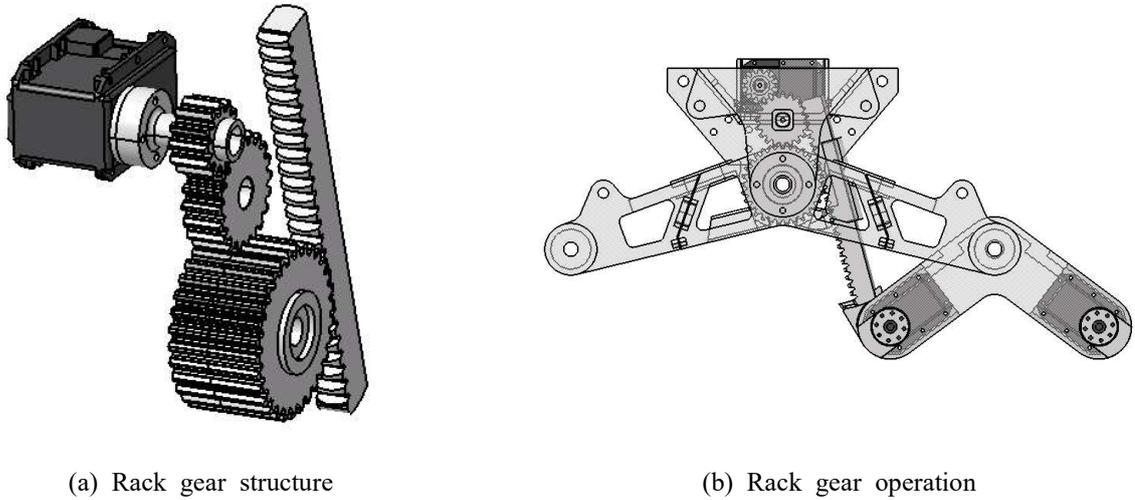


Fig. 7 Rack gear design

### 2.3.4 충격완화 장치 설계

산악지형과 같은 험지에서 주행할 때, 장치에 가해지는 충격을 완화하려는 방안으로 Fig. 8처럼 서스펜션과 에어 바퀴를 사용하였다. 일반 바퀴보다 충격 흡수에 효과적으로 에어 바퀴를 사용하여 불규칙한 바닥 면에서도 안정적인 주행을 하고, 착지 시 발생하는 충격을 최소화한다. 에어 바퀴는 일반 바퀴보다 무게가 가벼우므로 8개의 바퀴를 사용하는 본 작품에서 경량화하는 데에 적합하다. 또한, 본 시스템에서는 주행 환경 특성상 낙차 지형이 많으므로 Pitch 방향의 충격이 많이 발생한다. 이를 완화하기 위해 몸체와 메인링크 간에 서스펜션을 연결하여 낙차로 인한 충격을 최소화하였다.

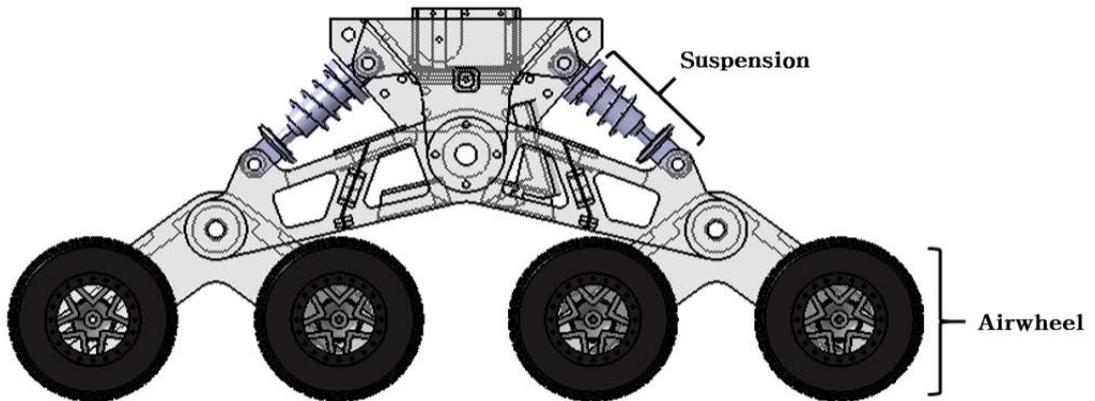


Fig. 8 Shock absorption method

### 2.4 3축 짐벌 기술의 원리

짐벌은 공중에 있는 물체가 중심축을 기준으로 물체가 움직이려 하는 반대 방향으로 회전하여 구조물의 움직임과 관계없이 항상 정립 상태를 유지하게 해주는 장치이다. 구조물이 회전하면 짐벌에 내장된 관성 측정 장치가 축의 회전을 추적하고 그에 따라 모터가 반대 방향으로 회전하여 수평을 유지한다. 3축 짐벌은 Fig. 9와 같이 회전체의 움직임으로부터 Roll, Pitch, Yaw 방향마다 모터가 위치해 전후, 상하, 좌우 전방위적으로 흔들림을 바로잡을 수 있다. 이에 따라 산악지형과 같은 비평탄 지형에서 흔들림 없이 안정적인 모니터링을 통해 화재 현장을 정확히 인식하고, 노즐을 조준할 수 있어 신속한 화재 진압이 가능하다.

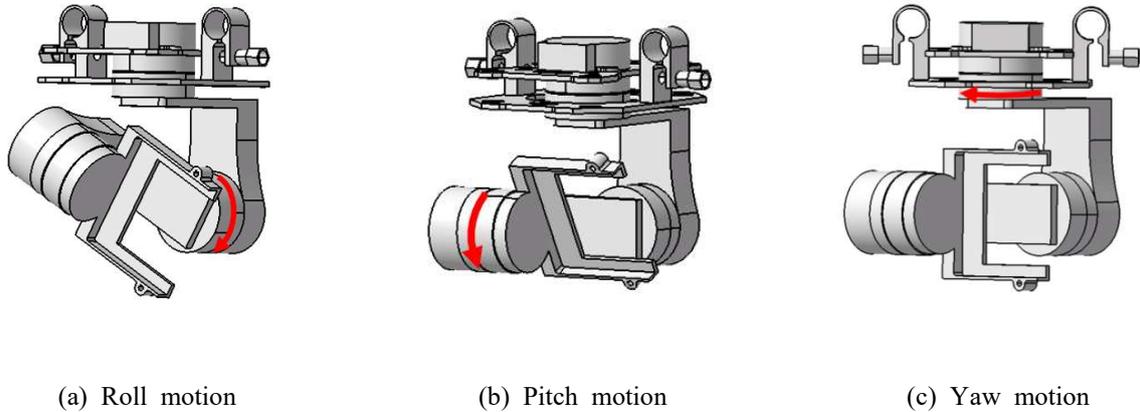


Fig. 9 Gimbal mechanism

2.5 팬틸트 메커니즘의 원리와 구현

소방 임무를 수행하기 위해 팬틸트 메커니즘을 노즐에 활용하여 비평탄 지형에서도 각도를 원하는 대로 조절하고, 화재가 발생한 곳을 향하여 정확히 분사해 화재를 진압할 수 있도록 한다. 이를 구현하기 위해 Pan(좌우 회전)과 Tilt(상하 기울기) 방향을 제어하는 2개의 모터를 사용하였다. Fig. 10(a)은 노즐 하단부의 원판 구조물과 모터를 연결하여 팬 방향 운동을 제어한다. 모터는 본체에 고정되어 있지만 원판 구조물은 본체와 직접적으로 연결되어 있지 않으므로, 모터가 회전하는 방향에 따라 원판 구조물이 회전하게 된다. Fig. 10(b)은 노즐과 연결된 두 개의 사각기둥을 모터와 연결하여 틸트 방향 운동을 제어한다. 두 개의 사각기둥은 원판 구조물에 고정되어 있어서 원판 구조물의 회전 방향에 따라 움직이며, 노즐 기준 우측 사각기둥에 모터를 삽입하여 노즐의 움직임을 제어한다. 이러한 설계 방식으로 두 개의 모터를 이용하여 팬틸트 메커니즘을 구현하였다.

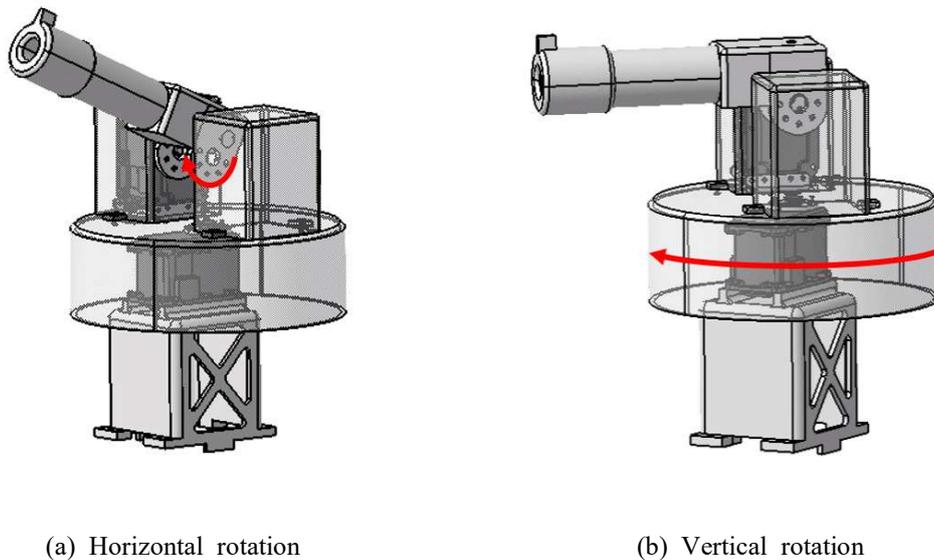


Fig. 10 Pan-tilt mechanism for nozzle control

### 3. 장애물 극복 메커니즘

로봇이 극복하는 산악 지형은 여러 주행 방해요소가 존재한다. 요철 지형이나 작은 바위와 같은 장애물 등이 있는데 이런 지형은 Fig. 11(a)와 (b)에서 나타낸 사진과 같이 8-Wheel robotic platform으로 문제 없이 극복할 수 있다. 하지만 계단과 같이 연속적으로 높은 턱을 가진 장애물에서 8-Wheel robotic platform은 바퀴의 하중 분배 문제로 극복하지 못하는 모습을 보이는데, 그 이유와 해결 방법에 대하여 공학적으로 분석해 보고자 한다.



(a) Terrain

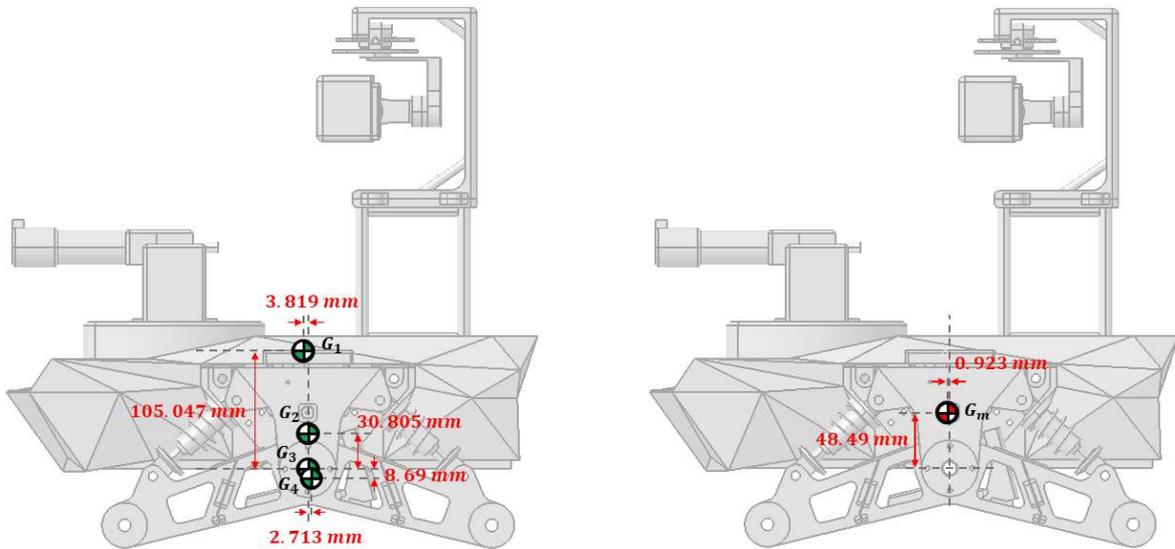


(b) High obstacle

Fig. 11 Surmountable environments

#### 3.1 질량중심 해석

분석하기에 앞서 로봇 본체와 서브링크 질량중심이 필요하므로 먼저 로봇 본체의 질량중심을 구해본다. 로봇 본체는 Fig. 12(a)와 같이 카울과 짐벌 및 팬틸트로 이루어진 part 1, 서스펜션과 볼트 및 너트로 이루어진 part 2, 중심축과 배선 및 배터리로 구성된 part 3, 메인링크와 베어링 등으로 이루어진 part 4로 나눌 수 있다. 각 파트의 질량중심은 순서대로  $G_1, G_2, G_3, G_4$ 이며 각 지점은  $m_1, m_2, m_3, m_4$ 의 질량을 가진다. 이를 이용하면 아래와 같이 로봇 본체의 질량중심을 구할 수 있다.



(a) Center of mass of parts

(b) Overall center of mass

Fig. 12 Center of mass of main body

산악지형 극복 소방 로봇

- $m_1, m_2, m_3, m_4$  = Mass of part 1, part 2, part 3, part 4  
 $G_1, G_2, G_3, G_4$  = Center of mass of part 1, part 2, part 3, part 4  
 $m_m$  = Mass of main body (total parts)  
 $G_m$  = Center of mass of main body

$$\bar{X} = \frac{\sum m_k x_k}{\sum m_k}, \quad \bar{Y} = \frac{\sum m_k y_k}{\sum m_k} \quad (\bar{X}, \bar{Y} = \text{Coordinate value of center of mass of main body}) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \frac{(1874.49g)(-3.819mm) + (1004g)(0mm) + (514g)(0mm) + (1107.54g)(0mm)}{4500.03g} \\ &= -0.923mm \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \bar{Y} &= \frac{(1874.49g)(105.047mm) + (1004g)(30.805mm) + (514g)(0mm) + (1107.54g)(-8.69mm)}{4500.03g} \\ &= 48.49mm \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 로봇 본체의 질량중심은 Fig. 12(b)와 같이 메인링크의 중심축으로부터 x축 방향 -0.923mm, y축 방향 48.49mm 지점에 있다는 것을 알 수 있다. 하지만 여기서 -0.923mm라는 수치는 무시할 수 있을 정도로 작다. 그렇기에 수치를 0으로 근사함으로써 로봇 본체의 질량중심이 메인링크의 중심축 상에 존재한다고 가정하고 공학적인 분석을 진행할 예정이다.

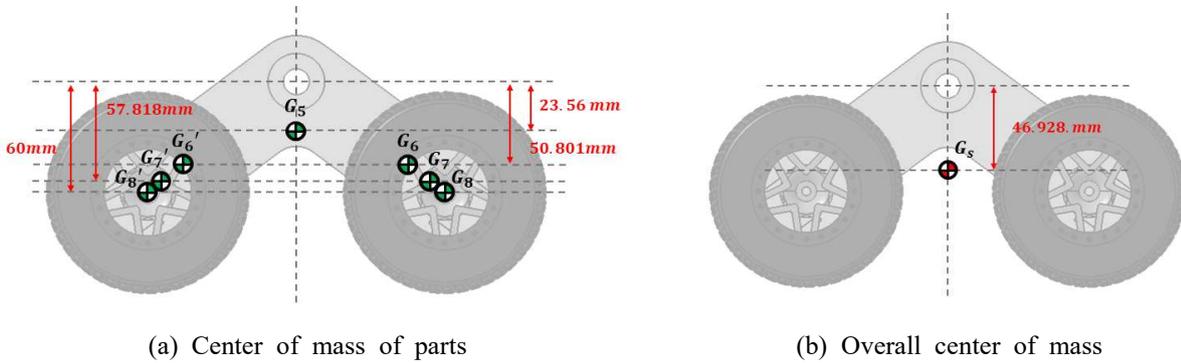


Fig. 13 Center of mass of sub-link

다음으로 서브링크의 질량중심을 구하고자 한다. 서브링크는 Fig. 13(a)와 같이 ‘스’자 모양의 프레임인 part 5, 모터로 이루어진 part 6, 모터 덮개인 part 7 그리고 바퀴와 허브로 이루어진 part 8로 나눌 수 있다. 각 파트의 질량중심은 순서대로  $G_5, G_6, G_7, G_8$  이며 각 지점은  $m_5, m_6, m_7, m_8$  의 질량을 가진다. 여기서 서브링크의 형태는 좌우 대칭이기에 질량중심의 x선 상의 위치는 서브링크의 중심선 위에 존재하게 된다. 나머지 y선 상의 위치는 아래와 같이 구할 수 있다.

- $m_5, m_6, m_7, m_8$  = Mass of part 5, part 6, part 7, part 8  
 $G_5, G_6, G_7, G_8$  = Center of mass of part 5, part 6, part 7, part 8  
 $m_s$  = Mass of sub-link (total parts)  
 $G_s$  = Center of mass of sub-link

$$\bar{X} = \frac{\sum m_k x_k}{\sum m_k}, \quad \bar{Y} = \frac{\sum m_k y_k}{\sum m_k} \quad (\bar{X}, \bar{Y} = \text{Coordinate value of center of mass of sub-link}) \quad (4)$$

$$\bar{X} = 0mm \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \bar{Y} &= \frac{(104g)(-23.56\text{mm}) + 2(126g)(-50.801\text{mm}) + 2(22g)(-57.818\text{mm}) + 2(145g)(-60\text{mm})}{750g} \\ &= -46.928\text{mm} \end{aligned} \quad (6)$$

따라서 서브링크의 질량중심은 Fig. 13(b)와 같이 서브링크의 중심선 상에 존재하며, y축 방향 -46.928mm 지점에 있다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 계단 극복 해석

앞에서 구한 질량중심을 이용하여 계단을 극복하지 못하는 이유에 대해서 공학적으로 분석해 보고자 한다. Fig. 14(a)는 연속적으로 높은 턱을 극복하지 못하는 상황을 나타낸 사진이며, 이를 공학적으로 분석하기 위하여 Fig. 14(b)와 같이 서브링크와 몸체를 분리하여 각각 자유물체도를 나타내보았다. 편의상 자유물체도에는 짐벌과 팬틸트 구조를 생략하여 나타내었다.

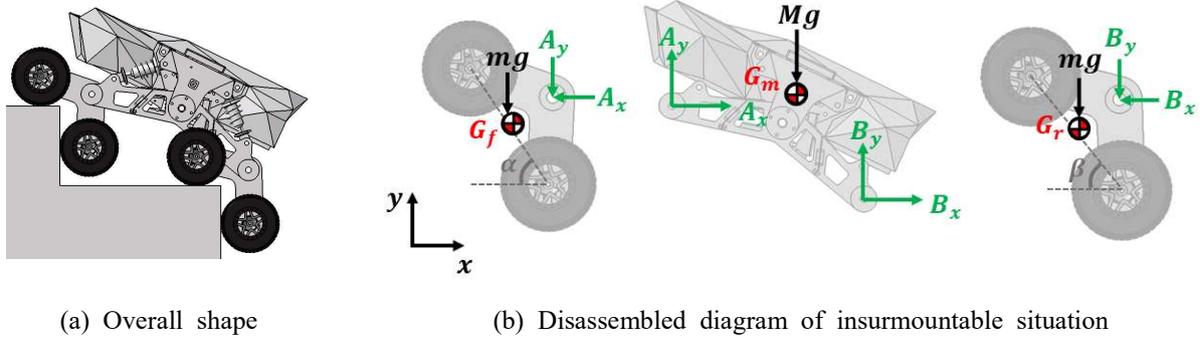


Fig. 14 Insurmountable situation

자유물체도를 분석하기에 앞서서 앞으로 사용할 기호들이 나타내는 바를 Fig. 15(a), Fig. 15(b)과 같이 정리하였으며, 이미 정해져 있는 상숫값은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 System parameters

Symbol	Value [Unit]	Symbol	Value [Unit]	Symbol	Value [Unit]
$m$	0.75 [kg]	$R$	0.0545 [mm]	$S_4$	0.325 [mm]
$M$	2.25 [kg]	$r$	0.025 [mm]	$\theta_1$	9.28 [°]
$d_1$	0.047 [mm]	$S_1$	0.1 [mm]	$\theta_2$	36.87 [°]
$d_2$	0.081 [mm]	$S_2$	0.15 [mm]	$\alpha$	56 [°]
$D$	0.0985 [mm]	$S_3$	0.16 [mm]	$\beta$	51.5 [°]

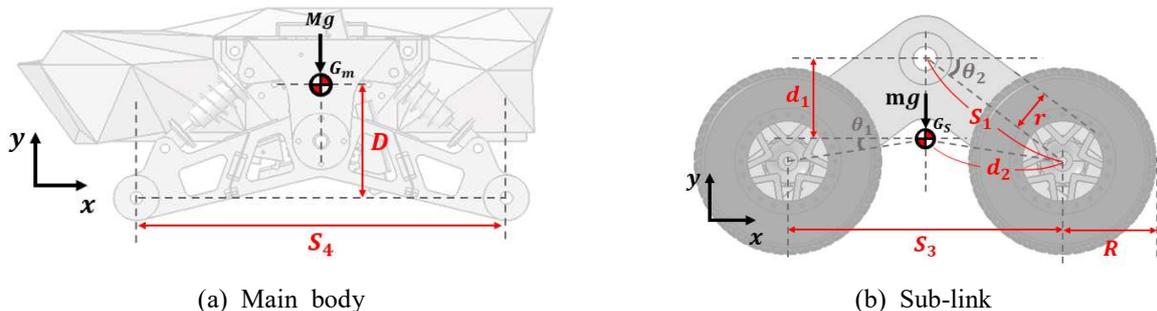


Fig. 15 Geometric parameters presentation

본격적으로 해석하기 위해 먼저 Fig. 16에 나타나 있는 2개의 서브링크와 로봇 본체를 순서대로 분석해 보자. 2가지 서브링크의 경우 아래와 같이 3개의 힘과 모멘트 평형식을 가지며, 각 식은 Fig. 16에 나타난 각도와 삼각함수의 원리를 이용하여 도출하였다. Fig. 16(a)의 경우는  $N_1, N_2, A_x, A_y$ 의 미지수를 Fig. 16(b)의 경우는  $N_3, N_4, B_x, B_y$ 의 미지수를 가진다. 로봇 본체인 Fig. 16(c)도 마찬가지로 3개의 힘과 모멘트 평형식을 가지며  $A_x, A_y, B_x, B_y$ 의 미지수를 가진다.

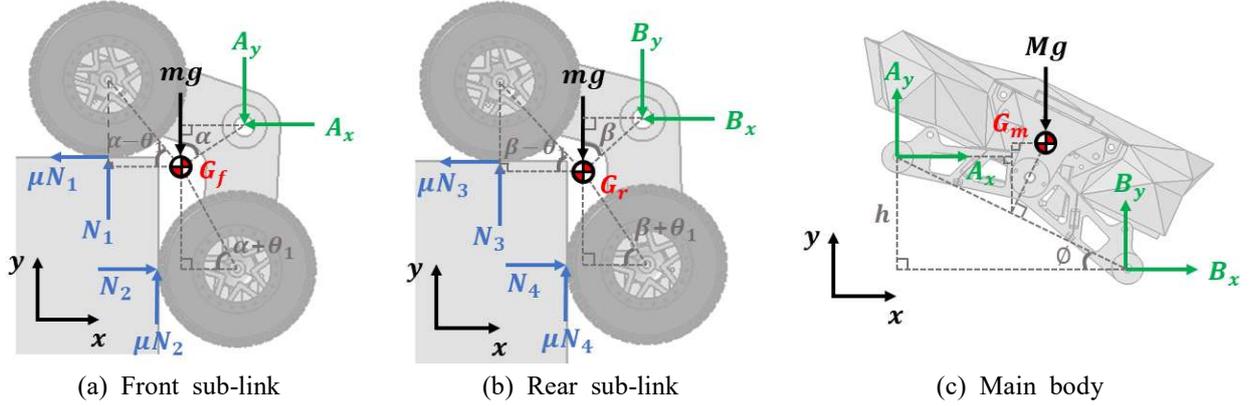


Fig. 16 FBD of sub-link & main body

$$\sum F_x = 0, \quad -A_x - \mu N_1 + N_2 = 0 \quad (7)$$

$$\sum F_y = 0, \quad -A_y + N_1 + \mu N_2 - mg = 0 \quad (8)$$

$$\sum M_c = 0, \quad -d_1 \cos \alpha \times A_x + d_1 \sin \alpha \times A_y + d_2 \cos(\alpha - \theta_1) \times N_1 + (d_2 \sin(\alpha - \theta_1) - R) \times \mu N_1 + (R - d_2 \cos(\alpha + \theta_1)) \times \mu N_2 - d_2 \sin(\alpha + \theta_1) \times N_2 = 0 \quad (9)$$

$$\sum F_x = 0, \quad -B_x - \mu N_3 + N_4 = 0 \quad (10)$$

$$\sum F_y = 0, \quad -B_y + N_3 + \mu N_4 - mg = 0 \quad (11)$$

$$\sum M_c = 0, \quad -d_1 \cos \beta \times B_x + d_1 \sin \beta \times B_y + d_2 \cos(\beta - \theta_1) \times N_3 + (R - d_2 \sin(\beta - \theta_1)) \times \mu N_3 + (R - d_2 \cos(\beta + \theta_1)) \times \mu N_4 - d_2 \sin(\beta + \theta_1) \times N_4 = 0 \quad (12)$$

$$\sum F_x = 0, \quad A_x + B_x = 0 \quad (13)$$

$$\sum F_y = 0, \quad A_y + B_y - Mg = 0 \quad (14)$$

$$\sum M_A = 0, \quad D \csc \phi \times Mg - h \times B_x - h \cot \phi \times B_y = 0 \quad (15)$$

$$h = S_2 + 2S_1 \times \cos\left(\frac{\alpha + \beta - 2\theta_2}{2}\right) \sin\left(\frac{\beta - \alpha}{2}\right) \quad (16)$$

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{h}{S_4}\right) \quad (17)$$

도출한 식들을 통해 알 수 있는 사실은 바퀴의 마찰력을 최대한 살리기 위해서 필요한 하중이 서브링크의 자유 회전에 의해 계단의 수직 벽면 방향으로 분산된다는 것이다. 물론 수직 벽면에 가해지는 하중이 증가하면 그만큼 바퀴가 위로 올라가려는 힘인 마찰력  $\mu N_2, \mu N_4$  값이 증가하지만, 증가한 하중만큼

서브링크의 반시계방향 회전을 방해하는 모멘트도 커지기 때문에 계단을 극복하기 매우 어렵다. 이를 극복하기 위해서는 이런 방해 요소를 전부 상쇄하고도 남은 만큼 강한 토크의 모터와 미끄러지지 않는 타이어와 지면이 필요하지만, 이 또한 매우 어려운 조건이다. 따라서 계단을 극복하기 위해서는 계단의 수직 벽면으로 분산되는 하중인  $N_2, N_4$ 의 크기를 작게 하거나 힘의 방향을 바꿔야 한다. 그래서 이 문제를 랙 기어부를 설계함으로써 해결하였다.

### 3.3 랙 기어부를 이용한 계단 극복

앞서 말했듯이 계단을 극복하기 위해서는 계단의 수직 벽면에 가해지는 하중인  $N_2, N_4$ 의 크기를 줄이거나 방향을 바꾸어야 한다. 이를 위해 랙 기어 구조를 메인링크 중심부에 장착하여 계단을 극복할 때 랙 기어가 아래로 내려가도록 설계하였다. Fig. 17에서 나타내는 과정과 같이 랙 기어가 내려오게 되면 뒤쪽 서브링크가 강제로 지면에 대하여 수평이 되도록 힘을 받는다. 이 때문에 차량 앞쪽에서부터 두 번째와 네 번째 바퀴가 계단의 모서리에 접촉하게 되고, 결과적으로 계단을 극복하게 된다.

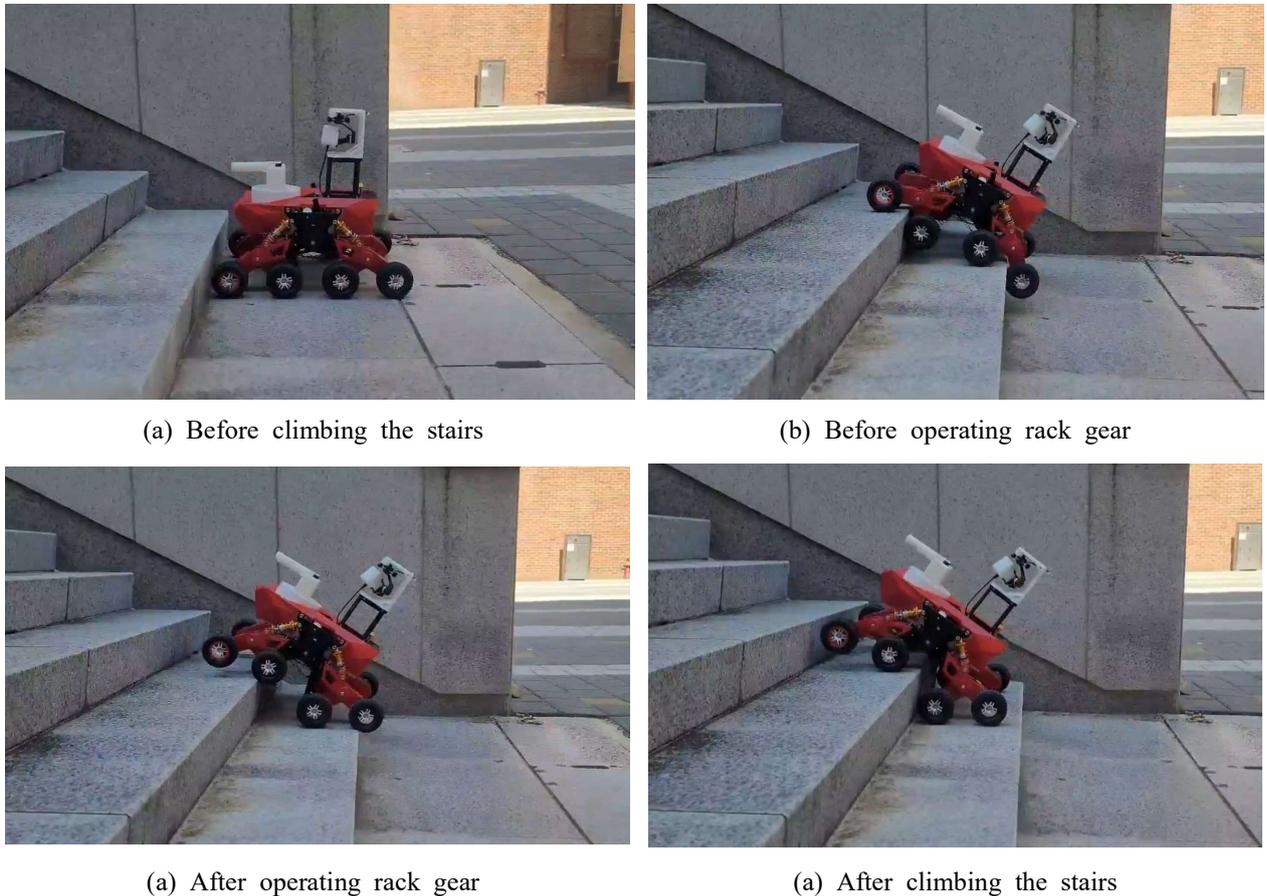
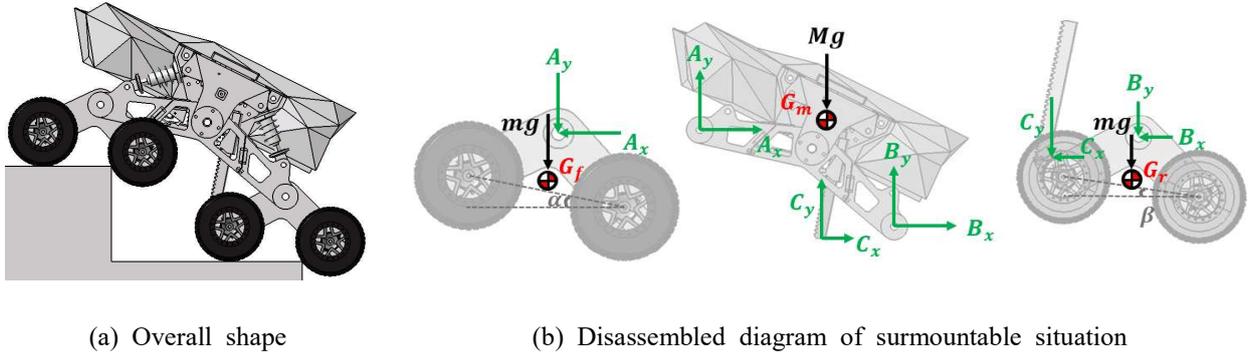


Fig. 17 Stair climbing experiment

랙 기어 구조를 이용하여 계단을 극복하는 상황이 Fig. 18(a) 그림이다. 이를 공학적으로 분석하기 위해서 Fig. 18(b)와 같이 서브링크와 몸체를 분리하여 분석해 본다. 또한, 이를 계산하기 위해 필요한 상숫값들을 Table 3에 나타내었다.

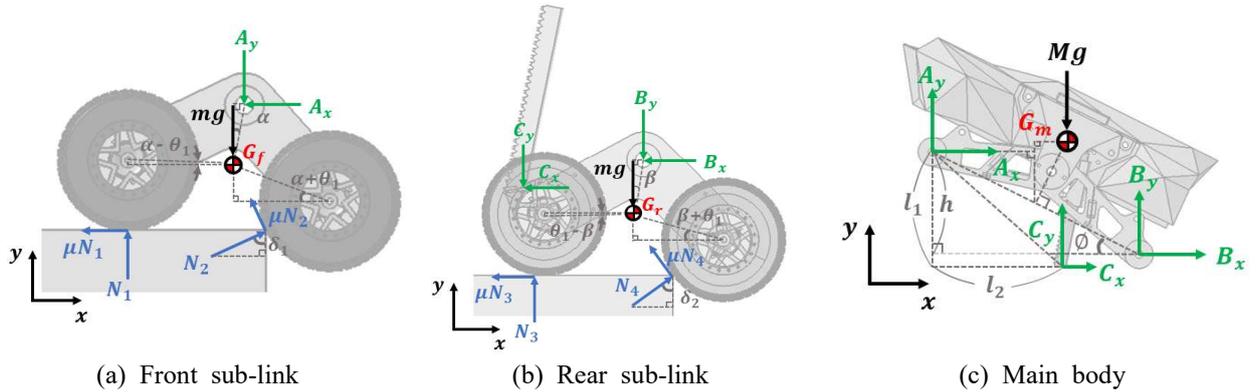
**Table 3** System parameters of surmountable situation

Symbol	Value [Unit]	Symbol	Value [Unit]	Symbol	Value [Unit]
$m$	0.75 [kg]	$R$	0.0545 [mm]	$S_4$	0.325 [mm]
$M$	2.25 [kg]	$r$	0.025 [mm]	$\theta_1$	9.28 [°]
$d_1$	0.047 [mm]	$S_1$	0.1 [mm]	$\theta_2$	36.87 [°]
$d_2$	0.081 [mm]	$S_2$	0.15 [mm]	$\alpha$	11.5 [°]
$D$	0.0985 [mm]	$S_3$	0.16 [mm]	$\beta$	8.29 [°]



**Fig. 18** Surmountable situation using rack gear

앞서 계단을 극복하지 못하는 상황과는 다르게 현재는 계단을 극복하는 상황을 다루기 때문에 로봇이 정지, 또는 등속 운동 상태라고 볼 수 없다. 따라서 동역학 문제이며 Fig. 19의 세 개의 파트들의 x 방향과 y 방향 가속도 그리고 각가속도는 엄밀히 따지자면 모두 다르기에 이를 고려해 각 파트를 분석해 보면 아래의 식들로 정리가 된다. 식 (28)과 (29)는 상숫값  $l_1, l_2, \delta_1, \delta_2$ 을 구하기 위한 식이다.



**Fig. 19** FBD of sub-link & main body of surmountable situation

$$\sum F_x = 0, \quad -A_x - \mu N_1 + N_2 \sin \delta_1 - \mu N_2 \cos \delta_1 = ma_{x,1} \quad (18)$$

$$\sum F_y = 0, \quad -A_y + N_1 + N_2 \cos \delta_1 + \mu N_2 \sin \delta_1 - mg = ma_{y,1} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \sum M_c = 0, \quad & -d_1 \cos \alpha \times A_x + d_1 \sin \alpha \times A_y + d_2 \cos(\alpha - \theta_1) \times N_1 + (R - d_2 \sin(\alpha - \theta_1)) \times \mu N_1 \\ & - (d_2 \cos(\theta_1 + \alpha) - R \sin \delta_1) \times (\mu N_2 \sin \delta_1 + N_2 \cos \delta_1) \\ & - (d_2 \sin(\theta_1 + \alpha) + R \cos \delta_1) \times (N_2 \sin \delta_1 - \mu N_2 \cos \delta_1) = I_s \ddot{\theta}_{s,1} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\sum F_x = 0, \quad -B_x - C_x - \mu N_3 + N_4 \sin \delta_2 - \mu N_4 \cos \delta_2 = ma_{x,2} \quad (21)$$

$$\sum F_y = 0, \quad -B_y - C_y + N_3 + N_4 \cos \delta_2 + \mu N_4 \sin \delta_2 = ma_{y,2} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \sum M_c = 0, \quad & -d_1 \cos \beta \times B_x + d_1 \sin \beta \times B_y + d_2 \cos(\theta_1 - \beta) \times N_3 - (R + d_2 \sin(\theta_1 - \beta)) \times \mu N_3 \\ & - (d_2 \cos(\theta_1 + \beta) - R \sin \delta_2) \times (\mu N_4 \sin \delta_2 + N_4 \cos \delta_2) \\ & + (d_2 \sin(\theta_1 + \beta) + R \cos \delta_2) \times (N_4 \sin \delta_2 - \mu N_4 \cos \delta_2) \\ & - (d_1 \cos \beta - (l_1 - h)) \times C_x - (h \cot \phi - l_2 - d_1 \sin \beta) \times C_y = I_s \ddot{\theta}_{s,2} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\sum F_x = 0, \quad A_x + B_x - C_x = Ma_{x,3} \quad (24)$$

$$\sum F_y = 0, \quad A_y + B_y - C_y - Mg = Ma_{y,3} \quad (25)$$

$$\sum M_A = 0, \quad D \csc \phi \times Mg - h \times B_x - h \cot \phi \times B_y - l_1 \times C_x + l_2 \times C_y = I_m \ddot{\theta}_m \quad (26)$$

$$C_x = C_y \times \tan(\phi - 15^\circ) \quad (27)$$

$$l_1 = h + S \times \sin(\theta_2 - \beta) - r \cos(\theta_2 - \beta) \quad (28)$$

$$l_2 = h \times \cot \phi - S \times \cos(\theta_2 - \beta) - r \sin(\theta_2 - \beta)$$

$$\delta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{R - S_3 \sin \alpha}{R}\right) \quad (29)$$

$$\delta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{R - S_3 \sin \beta}{R}\right)$$

도출한 식과 힘의 방향을 통해 알 수 있는 사실은 계단 극복이 불가능한 상황인 Fig. 16(a)와 (b)에서  $N_2, N_4$  반력의 방향이 우측이었던 것에 반해, 이번 랙 기어가 작동한 상황인 Fig. 19(a)와 (b)에서는 우측 상단으로 변했다는 것이다. 이에 따라 로봇의 진행을 방해하려는 힘인  $N_2, N_4$ 의 x축 방향 힘 성분의 크기가 감소하였다. 또한  $N_2, N_4$  힘의 방향이 바뀌므로 마찰력  $\mu N_2, \mu N_4$ 의 방향도 바뀌게 되었고, 덕분에 마찰력의 x축 방향 힘 성분이 로봇의 추진력을 증가시켜 주는 작용을 하였다. 이러한 원리에 근거하여 계단을 극복할 수 있었다.

## 4. 로봇 시스템 및 제어 알고리즘

### 4.1 운영 환경

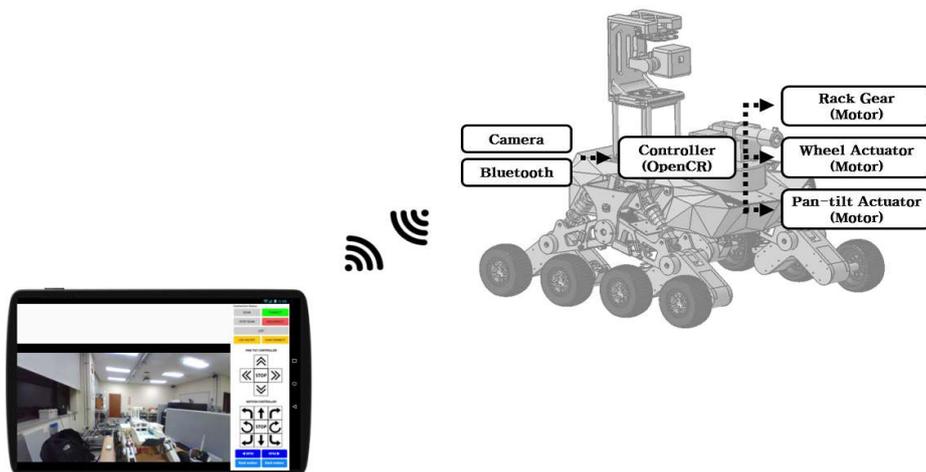


Fig. 20 Operational environment

## 산악지형 극복 소방 로봇

'산악지형 극복 소방 로봇'은 Fig. 20과 같이 블루투스 모듈을 이용해 모바일 기기와 로봇을 연결하고, 카메라 센서를 통해 로봇의 상황을 사용자가 실시간으로 모니터링하여 로봇의 움직임을 원격 제어할 수 있도록 한다.

### 4.2 앱 인벤터를 이용한 시스템 제어 알고리즘

앱 인벤터는 안드로이드 운영 체제용 앱을 개발하는 도구이다. 텍스트 기반의 복잡한 프로그래밍을 대신하여 사용자들이 필요한 코드 블록을 끌어당기거나 붙여서 안드로이드 장치에서 실행할 응용 프로그램들을 만들 수 있다. Fig. 21은 앱 인벤터로 개발한 앱의 화면 구성을 나타낸 것으로, 로봇의 기본적인 동작과 속도, 노즐의 방향, 랙 기어의 동작을 제어한다.

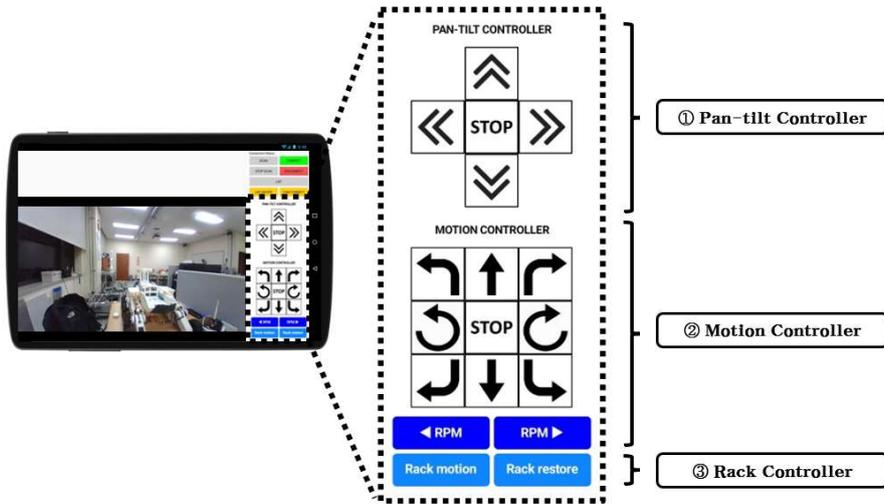


Fig. 21 Monitoring panel

본 시스템은 Fig. 22과 같이 모바일 기기와 블루투스 모듈을 연결하여 데이터를 송수신하는 방식으로 시스템을 제어한다. 모바일 기기에서 특정 기능을 수행하는 버튼을 누르면 설정된 데이터를 블루투스 모듈로 송신하고, 블루투스 모듈과 연결된 마이크로 컨트롤러에서 데이터를 수신하여 안정적인 모니터링과 8-Wheel robotic platform, 랙 기어의 제어, 팬틸트 방향의 노즐 제어를 가능하게 한다. 이를 통해 신속하게 이동 및 화재 현장을 인식하고 노즐을 정확히 조준하여 화재를 진압한다.

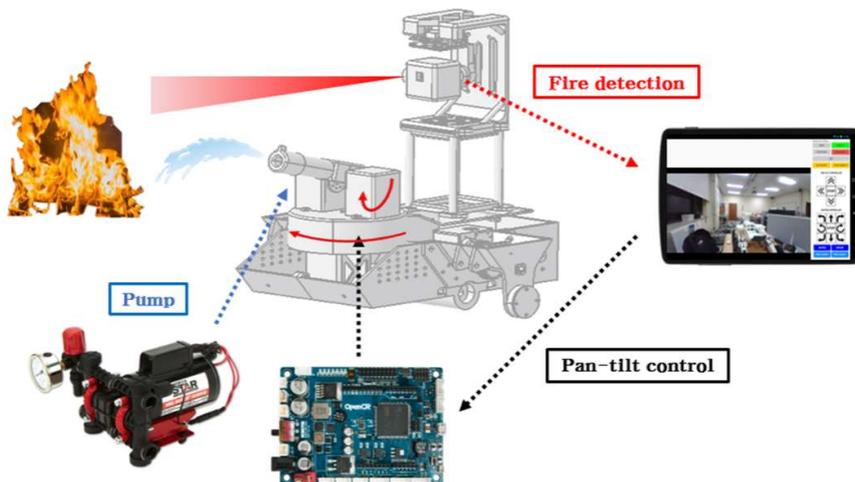


Fig. 22 Motion control operation for fire suppression

## 5. 실험 결과 및 토의

### 5.1 장애물 극복 능력 평가



(a) 15cm obstacle



(b) 22.5cm obstacle

**Fig. 23** Obstacle overcoming ability experiment

완성된 로봇의 장애물 극복 능력을 평가하기 위하여 2가지 실험을 진행하였다. 첫 번째 실험은 Fig. 23에 나타난 것처럼 장애물 높이를 높여가며 극복할 수 있는 최대 장애물 높이를 측정하는 실험이다. 장애물 높이를 조금씩 높여가며 실험해 본 결과 하나의 높은 턱을 가진 장애물은 최대 17cm까지 극복 가능하다는 사실을 알 수 있었다. 설계상 17cm 이상의 장애물을 넘을 때는 Fig. 23(b)와 같이 앞에서부터 세 번째 바퀴가 턱을 넘기 전에 로봇이 뒤로 전복된다는 것을 알 수 있다. 결론적으로 바퀴 지름인 10.9cm의 약 1.6배 정도 되는 장애물을 무리 없이 극복할 수 있다.



(a) 7.5cm stairs



(b) 15cm stairs

**Fig. 24** Stairs overcoming ability experiment

## 산악지형 극복 소방 로봇

두 번째 실험은 연속적인 턱을 가진 장애물의 극복 능력을 측정하는 실험이다. Fig. 24처럼 계단의 높이를 높여가며 실험하였고 랙 기어가 없을 때 와 있을 때를 나누어 진행하였다. 높이를 조금씩 높여가며 실험해 본 결과 랙 기어부를 사용하지 않으면 약 10cm 높이를 가진 계단까지는 극복 가능하다는 사실을 알 수 있었다. 반면 랙 기어부를 사용하는 경우는 17cm 높이의 계단까지 극복할 수 있다. 이 이후부터는 앞선 실험에서와 같이 로봇이 뒤로 전복된다는 것을 알 수 있다. 결론적으로 바퀴 지름의 약 1.6 배 정도 되는 높이의 계단을 무리 없이 극복할 수 있다.

### 5.2 비평탄 지형에서의 모니터링 결과 비교

기존의 소방 로봇에 장착된 카메라는 단순 고정 방식으로 되어 있어 Fig. 25(a)와 같이 경사면과 장애물이 있는 비평탄 지형에서의 주행 시 Fig. 25(b)처럼 화면이 기울어짐이나 진동과 흔들림이 발생한다. 이 때문에 화재 현장으로 이동하는 과정에서 상황을 정확하게 파악할 수 없고, 노즐을 제어하기 위해선 화재가 발생한 지점을 실시간 모니터링을 통해 정확히 파악해야 한다. 또, 화면이 기울어진 각도에 따라 노즐을 제어해야 하므로 정확한 화재 진압이 어려운 단점이 있다. 그래서 Fig. 25(c)와 같이 3축 짐벌을 이용하여 경사면에서 안정적인 모니터링을 할 수 있다.



(a) Tilted situation



(b) Screen without gimbal



(c) Screen with gimbal

**Fig. 25** Comparison of monitoring results on slope

### 5.3 팬틸트 제어를 통한 물 분사 실험

본 실험을 진행하기 위해 호스, 노즐, 고압 펌프를 준비하였고, 팬틸트 시스템을 로봇에 장착하였다. Fig. 26과 같이 물 분사와 동시에 원하는 곳으로 팬틸트 제어가 가능한지 확인하였고, 로봇이 호스를 견인할 수 있는지 확인하였다. 팬틸트 제어를 통해 최대 9m까지 물을 분사할 수 있으며, 안정적으로 호스를 견인할 수 있음을 확인하였다.



(a) Front-facing focus

(b) Left-side focus

Fig. 26 Pan-tilt control experiment

## 6. 결론

연간 수백 건에 달하는 산불 사고로 인한 피해를 최소화하기 위해 화재 현장을 빠르고 안정적으로 진압하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 비평탄 지형과 장애물이 많은 험지에서 발생한 화재에 대응하기 위한 소방 로봇을 제안한다. 기존의 상용화된 소방 로봇들이 가지고 있는 한계점을 극복하고자 캐터필러와 사륜구동 방식의 장점을 합친 8-Wheel robotic platform을 설계하였다. 자유로운 회전이 가능한 서브링크로 인해 다양한 지면 상황에서도 항상 접지를 유지하며 안정적인 주행이 가능하다. 기존의 소방 로봇에 장착된 카메라는 단순 고정 방식으로 되어 있어 주행 시 비평탄 지형에서 화면의 기울어짐과 흔들림이 발생하게 된다. 이 때문에 화재 현장의 상황을 파악하기 어려울 수 있다. 이를 해결하기 위해 3축 짐벌을 사용하여 비평탄 지형에서 화면의 기울어짐과 흔들림을 최소화한 안정적인 모니터링이 가능하다. 또한, 팬틸트 방향으로 제어할 수 있는 소방 노즐을 이용하여 원격으로 화재 지점을 향해 물을 정확히 분사하여 화재를 진압할 수 있도록 한다.

산불은 범지구적으로 일어나는 재난이기에 소방 로봇 분야의 지속적인 발전이 필요하다. 사람이나 소방차의 진입이 어려운 화재 현장에 해당 로봇을 투입하여 신속히 진화에 이바지하고 나아가 소방대원의 안전을 도모하여 화재로 인한 인적·물적 피해를 최소화할 수 있을 것이라 기대된다.

## 후 기

본 프로젝트를 진행하면서 로봇이 가지는 시스템을 구현하기 위해 전공 이외에도 많은 배경지식이 필요하다는 것을 느꼈고, 전공을 벗어나 다른 분야로도 견문을 넓힐 수 있는 계기가 되었습니다. 팀을 구성하여 학부생 수준에서 해결하기 어려운 문제들과 어려움이 있었지만, 다양한 아이디어를 제시하고 공유함으로써 책임감과 협동력을 기를 수 있었고, 각자의 강점을 파악하여 효율적인 팀워크를 진행할 수 있었습니다. 이론적인 지식이 풍부하더라도 실제 시스템에 적용하고 구현하는 능력을 기르지 못한다면 프로젝트를 진행함에 있어서 많은 어려움을 겪게 된다는 사실도 알게 되었습니다. 이번 프로젝트를 통해 아이디어 기획부터 제작까지 모든 과정을 직접 경험함으로써 하나의 작품이 완성되기까지 큰 노력과 공이 들어간다는 것을 깨달았고, 로봇을 완성하더라도 이를 말과 글로써 표현하는 능력 또한 중요하다는 것을 느꼈습니다.

참고문헌

- (1) J. H. Kim, M. J. Kim, Jin Maolin, J. O. Lee, and P. H. Chang, 2007, "Development of Fire-fighting and Rescue Robot for Outdoor Environment using Target Oriented Design Methodology", Journal of Control, Automation, and Systems Engineering, Vol. 13, No. 2, pp. 86~92.
- (2) K. R. Kim, J. T. Kim, 2010, "A Research of the Development Plan for a Highly Adaptable FSR (Fire Safety Robot) in the Scene of the Fire", Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 24, No. 3, pp. 113~118.
- (3) C. R. Lee, D. G. Jeong, Y. R. Kim, J. S. Kim and J. H. Lee, 2020, "Analysis of driving performance of an armored fire fighting robot driven by a four-wheel crawler" The Korean Society of Automotive Engineers, pp. 419-419.
- (4) C. S. Cho, B. S. Kim and Y. D. Joo, 2015, "Development of Fire Reconnaissance Mobile Robot using Double Caterpillar Track", Korean Society for Precision Engineering, pp. 408-409.
- (5) J. H. Kwark and Y. B. Kim, 2009, "Evaluation of Field working Performance for a Water Mist Fire-fighting Robot" Institute of Control, Robotics and Systems, pp. 857-861.
- (6) B. S. Kim, C. S. Cho, K. H. Kim, S. H. Yang and Y. D. Joo, 2014, "Development of Fire Reconnaissance Robot Platform using Caterpillar Track" Korean Society for Precision Engineering, pp. 554-554.
- (7) Y. T. Oh, 2018, "Study of Thermal Barrier Coating on Fire Fighting Robot," Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 20, No. 3, pp. 372-376.
- (8) W. G. Lee, B. Y. Cho, H. S. Lee, K. J. Lee, H. H. Kim and H. M. Shim, 2022, "Warehouse Fire Suppression Robot with Image-based Deep learning", Korea Information Processing Society, Vol. 29, No. 2, pp. 887-889.
- (9) B. S. Ko, J. Y. Park, S. T. Kim, J. K. Lee, T. W. Kim and S. H. Ryue, 2021, "Development of Robot System for Extinguishing Initial Fire in Underground Power Transmission Tunnels", The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 1749-1750.
- (10) H. J. Kang, S. W. Hwang, Y. J. Kim, D. U. Kim and D. S. Hong, 2011, "Development of a remotely controlled robot equipped with a fire extinguisher", Korean Society for Precision Engineering, pp. 1167-1168.
- (11) H. S. Jo and S. H. Seo, 2022, "Development of Autonomous Driving Robot for Fire Suppression", The Korean Society of Automotive Engineers, pp. 2008-2012.
- (12) B. S. Kim, J. S. Cho and Y. D. Joo, 2013, "Development of Mobile Track Platform for Fire Reconnaissance", Korean Society for Precision Engineering, pp. 1559-1560.