## *대한기계학회 주최* 제11회 전국학생설계경진대회(2021년)

# 설계 최종 보고서

참가부	대학부 ( 〇 )								
참가분야		공모주제 (							
참가팀명		WCC (Wall Climbing Car)							
설계제목		프로펠러 추력을 이용한 벽면 주행 점검 로봇							
지도교수/교사		(소속)한양대학교ERICA 기계공학과 (성명)최준명 교수							
_!!!	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소				
대표자 (신청인)	엄승환	한양대학교 ERICA 기계공학과							

## 참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	엄승환	한양대학교 ERICA 기계공학과 / 4학년	
2	곽현주	한양대학교 ERICA 기계공학과 / 4학년	
3	김보석	한양대학교 ERICA 기계공학과 / 3학년	
4	남재현	한양대학교 ERICA 기계공학과 / 3학년	
5	박형진	한양대학교 ERICA 기계공학과 / 3학년	
6	이창호	한양대학교 ERICA 기계공학과 / 3학년	

## 설계 요약문

참가분야	공모주제 ( ) / 자유주제 ( O )
참가팀명	WCC (Wall Climbing Car)
설계제목	프로펠러 추력을 이용한 벽면 주행 점검 로봇
대표자명	엄 승 환
	해당 로봇은 두 개의 프로펠러에서 발생하는 추력을 이용하여 지면 뿐만 아니라 벽면을 자유롭게 주행 가능한 로봇이다. 최근 댐, 교량, 원자력발전소의 상부 돔 등 사회 기반 시설의 안전 점검 문제에서 사람의 역할을 대체하는 로봇 및 탐지 시스템의 개발이 대두되고 있다. 현재 가장 각광받는 유관 기술로서 기반 시설 점검용 드론 개발에 대한 연구가 활발하나, 이는 넓은 시야에서의 탁월한 맵핑 효율과는 대조적으로 작은 결함을 발견하는 기능에서는 취약점을 보인다. 따라서 초 근접 촬영이 가능한 벽면 탐지 로봇 및 탐지 시스템의 개발이 필요한 실정이 다.
요약문	본 연구팀이 개발한 로봇은 차체 프레임, 프로펠러와 프로펠러 지지대 부분, 서 스펜션과 조향 장치 부분으로 구성된 벽면 주행 가능 로봇이다. 프로펠러에서 발 생하는 추력을 베어링과 지지대를 통하여 안정적으로 분산시키고 로봇을 수직 벽면에서도 지탱할 수 있도록 설계하였다. 서스펜션은 더블 위시본 타입을 바탕 으로 설계하였으며, 조향장치는 애커먼 장토식으로 벽면 주행 중 차량의 상하· 좌우 운동을 소화할 수 있도록 설계하였다.
	해당 로봇이 벽면에서 주행할 때에는 자이로 센서를 통해 자세를 측정하고 상보 제어를 통해 입력 시그널을 보정한다. 벽면을 오르는 과정에서 차체의 기울어짐 정보를 기반으로 프로펠러 지지대의 Pitch와 Roll을 회전시켰으며, 이를 통해 벽 면 주행 중에도 최적의 각도로 프로펠러 축이 상시 유지되는 것을 특징으로 한 다.
	해당 로봇은 주로 콘크리트 재질 외벽에서 벽면에 붙어 주행하면서 내장된 초음 파탐지기와 카메라를 통해 벽면부 표면 비파괴검사를 시행할 수 있다. 벽면 주행 시연 및 탐지 성능평가 결과 기존 사람이 수행하던 외벽 점검 기준에 부합하는 최소선폭 0.1mm 수준의 크랙을 탐지할 수 있음이 확인되었다.
설계프로젝트의 입상 이력	- 출품작명 : 구조물 점검에 활용 가능한 벽면 주행 로봇 - 출품대회명 : ciro 2021 지능형창작로봇경연대회 - 수상 내역 : 영상 발표 부문 장려상

### 프로펠러 추력을 이용한 벽면 주행 점검 로봇

엄승환\*·곽현주\*·김보석\*·남재현\*·박형진\*·이창호\*·최준명\*† \*한양대학교 ERICA 공학대학 기계공학과

#### Wall climbing inspection robot using propeller thrust

Seunghwan Um\*, Hyeonju Gwak\*, Boseok Kim\*, Jaehyun Nam\*, Hyungjin Park\*, Changho Lee\* and Joonmyung Choi\*<sup>†</sup> \* Department of Mechanical Engineering, Hanyang University ERICA

Key Words: Inspection(점검), Climbing(등반), Propeller(프로펠러), Adhesion Forces(부착력)

초록 : 프로펠러 추력을 이용한 벽면 주행 점검 로봇, 이하 WCC(Wall Climbing Car)는 지면 및 벽면에 서 주행이 가능하며 댐, 교량, 원자력 발전소 상부 돔의 균열을 점검하는 로봇이다. 해당 로봇은 프로펠 러로 추력을 발생시키고 조향장치를 이용해 주행 중 방향전환이 가능하다. 로봇은 벽면에서 이탈하지 않은 상태로 방향을 전환하기 위해, 자이로 센서를 통해 벽면에서 Yawing 정도를 측정하여 프로펠러 지 지대의 Pitch와 Roll을 실시간으로 함께 회전시킨다. 또한 카메라와 초음파 장치를 이용해 외벽 점검 기 준에 부합하는 크기의 균열을 탐지할 수 있다. 따라서 본 로봇은 기존의 육안 점검의 위험성을 극복하 고, 점검에 드는 비용과 시간을 감소시킬 수 있다.

**Abstract**: The WCC(Wall Climbing Car) is a robot that uses propeller thrust to check cracks in infrastructure. The robot uses a propeller thrust and steering system so that it can travel from the wall freely. To rotate the WCC without lifting the body from the wall, the Pitch and Roll of the propeller support are modulated through a gyro sensor based on the Yawing degree. In addition, the camera and ultrasonic device were equipped to detect cracks of sizes that meet the criteria for the crack inspection. Therefore, the WCC overcomes the dangers of existing visual inspection and reduces the cost and time required for inspection.

#### 1. 서 론

교량이나 댐과 같은 사회 기반 시설은 사전 점검을 통해 안전을 유지해야 한다. Fig. 1 (a) 와 같이 기 존에는 사람이 직접 관측하는 방식이나 사다리차를 이용하는 방법 등으로 검사를 진행해왔지만 이러한 방법은 시간과 비용이 많이 소요되고 안전상의 문제도 있다. 기술이 발전하면서 사람의 작업을 Fig. 1 (b)와 같이 드론과 같은 소형 무인 로봇으로 대체하는 움직임이 생기고 있다. 드론은 산업 환경에서 넓 은 지형을 빠르게 맵핑(Mapping) 하는 데에 유용하지만 작은 크기의 균열을 탐색해야 하는 정밀한 검사 는 어렵다. 그 이유는 기체 안정성 문제 때문으로 일정 거리 이상은 접근할 수 없으며, 카메라의 성능을 높여서 검사하려면 그만큼 비용이 증가하기 때문에 경제적이지 못하다. 따라서 이러한 기반 시설 점검 임무를 수행할 수 있으며 드론과 RC 차량의 장점을 융합한 새로운 로봇을 제시하고자 한다.



Fig. 1 Common methods to inspect cracks on walls : (a) Visual inspection (b) Inspection using a drone

해당 로봇은 2개의 프로펠러에서 발생하는 추력을 이용하여 지면뿐만 아니라 벽면에서도 이동이 가능 한 RC 차량형 로봇이다. 탄소섬유 파이프와 3D 프린트를 이용하여 제작하였으며, RC 모듈과 배터리를 통해 무선 원격 작동이 가능하다.

점검 대상은 주로 콘크리트 재질로 이루어진 댐이나 저수지, 교량, 원자력 발전소 상부 돔 등이다. 이 러한 장소는 안전을 위해 사전에 점검이 이루어져야 하며, 특히 원자력 발전소 상부 돔은 오랜 기간 점 검이 이뤄지지 못했고 명확한 점검 방법도 제시되지 않아 위험성이 거론되었다. 따라서 해당 로봇을 통 해 벽면을 주행하여 목표지점으로 이동하고, 카메라 혹은 비파괴 검사 장치 등을 이용하여 점검을 수행 한다.

#### 2. 설계핵심내용

2.1 설계 문제 정의

2.1.1 사전 기술 조사 및 회피 전략

프로펠러의 추력을 이용하여 벽면에서 이동할 수 있는 로봇<sup>(1,4)</sup>들은 여럿 존재한다. 첫 번째로 프로펠 러의 배치와 Payload에 관한 고찰을 진행해 보면 프로펠러를 겹쳐서 사용하는 로봇<sup>(1, 2)</sup>의 경우 프로펠러 의 추력을 온전히 로봇을 벽면에 밀어붙이는 방법을 사용한다. 이런 경우 로봇의 크기가 작아질 수 있 다는 장점이 있지만, Payload의 크기는 마찰계수라는 하나의 변수에 종속된다. 따라서 이 로봇의 경우에 는 무게가 1.66kg으로 상당히 가볍지만 마찰계수가 0.4에 불과하여 5kg의 큰 추력을 낼 수 있음에 비해 600g의 매우 작은 Payload를 가진다. 반대로 프로펠러의 방향이 전환되는 로봇<sup>(3)</sup>의 경우에 추력과 마찰 력을 동시에 사용한다는 점에서 추력을 효율적으로 이용할 수 있다. 하지만 해당 로봇의 경우 벽면을 수직으로만 올라갈 수 있고, 옆으로 이동 시 롤 축을 기준으로 하는 회전이 없으므로 로봇<sup>(2, 3)</sup>과 같이 추력에 의한 마찰에만 의지하기 때문에 수평 이동할 수 없을 것이다. 그리고 둘의 장점을 섞은 로봇<sup>(4)</sup>도 존재하지만, 검사용 로봇에 맞지 않게 유선으로 로봇이 작동하고 검사 장비를 탑재할 만한 공간이 부족 하여 실제 기능을 위해선 설계 변경이 불가피하다. 또한 무선으로 로봇을 전환 시 WCC가 가동 가능한 시간과 동등한 성능을 가지기 위해 약 1kg의 배터리가 필요하다. 이러한 결과 로봇이 들 수 있는 Payload의 크기는 줄어들 수밖에 없고 위의 로봇에 비과괴 검사를 위한 장치를 탑재하기 어려워질 수밖 에 없다. 또한 수평 주행 역시 로봇<sup>(4)</sup>과 같은 결과일 것이다. 또한 Andreas Papadimitriou<sup>(4)</sup> 등의 연구에 의하면 로봇<sup>(6,8)</sup>들은 가벼운 구조로 설계되어 있어 적은 무게만 적재할 수 있다.

두 번째로 이동 방법 즉, 바퀴에 대해 고찰하면 로봇<sup>(1, 2, 4)</sup>의 경우 낮은 베이스를 갖고 있다. 작은 바 퀴를 사용하는 로봇<sup>(1, 4)</sup>은 벽면의 돌출물을 회피하기 어렵고, 표면이 고르지 못한 벽면에서 주행 시 벽 면과의 유격이 발생하여 접지력 손실로 인한 추락을 일으킬 수 있다. 로봇<sup>(2)</sup>의 경우에는 궤도 바퀴를 이 용하여 접지력은 높일 수 있으나 이우섭 등의 연구<sup>(5)</sup>에서와 같이 단일 궤도 로봇의 경우 안정성 범위가 부족하여 지형을 극복하는 데 한계가 있다는 단점이 있다.

프로펠러의 배치와 이동 방식에 대한 분석을 바탕으로 안전 점검용 로봇의 개선 및 회피할 점은 다음 과 같다. 첫째, 기존 로봇들과 다르게 벽면에서 수직, 수평 방향으로 이동하기 위해 프로펠러를 피치 (Pitch)와 롤(Roll) 축을 기준으로 동시에 회전시키는 설계가 필요하다. 둘째, 추가 장비의 탑재를 위해 적 절한 공간과 Payload를 확보해야 한다. 셋째, 돌출물을 극복하기 위한 높은 차체가 필요하다. 넷째, 안정 적인 주행을 위한 충격 감쇠 장치가 필요하다.

2.1.2 설계문제 정의

벽면 주행이 가능한 로봇을 설계하는 데 필요한 부분들을 차체(Car body)부, 프로펠러 회전부, 섀시 (Chassis) 부로 정의하였다.

차체부는 4개의 섀시부와 2개의 프로펠러 회전부를 연결하기 위해, 추가 장비의 탑재를 위해 H 형태 의 프레임으로 설계한다. 차체의 무게는 Payload와 직결되기 때문에 가볍고 견고해야 한다.

프로펠러 회전부는 브러쉬리스 모터, 프로펠러, 프로펠러 모터 지지대, 프로펠러 지지대, 서보 모터 지 지대로 이루어져 있다. 브러쉬리스 모터는 프로펠러를 회전시켜 추력을 발생시키고, 이 추력으로 차체의 무게와 Payload를 띄울 수 있어야 한다. 프로펠러는 차체의 너비를 결정하는 가장 큰 요인이기 때문에 규격을 가장 먼저 결정한다. 프로펠러 모터 지지대는 브러쉬리스 모터를 고정하는 부분이다. 프로펠러의 추력을 직접 받는 부품이므로 강도를 우선시한다. 프로펠러 지지대는 롤 축을 기준으로 프로펠러 모터 지지대를 회전시킬 수 있는 기능을 지녀야 한다. 서보 모터 지지대는 프로펠러 지지대를 회전시키고, 차 체 프레임과 연결되는 부품이다. 서보 모터를 이용하여 프로펠러 지지대를 피치 축을 기준으로 회전시 키고 프로펠러의 추력과 프로펠러 지지대를 지지하기 때문에 견고한 구조로 설계한다.

섀시부는 바퀴, 기어드 모터, 서스펜션 부, 조향 부로 이루어져 있다. 바퀴는 바닥의 장애물을 피하는 것과 동시에 피치 축을 기준으로 프로펠러 지지대가 회전할 때 프로펠러와 프로펠러 지지대가 바닥과 부딪히지 않아야 하므로 이를 고려하여 높은 차체를 갖도록 설계해야 한다. 기어드 모터는 차체가 지면 과 벽면에서 이동할 수 있는 구동력을 제공하고, 정지 상태에서 바퀴가 굴러 미끄러지지 않게 일정한 토크를 가하여 미끄러지지 않는 역할을 한다. 서스펜션은 바퀴와 차체가 충격을 받았을 때 그 힘을 흡 수하여 안정적인 주행이 가능하게 한다. 상하 운동을 반복하기 때문에 마모가 일어나기 쉬워 부품을 교 체할 수 있는 구조로 설계해야 한다. 조향장치는 서보 모터를 이용하여 바퀴의 각도를 변화시키는 장치 이다. 큰 조향각을 갖는 것과 서스펜션의 상하 움직임도 고려하여 설계한다.

2.1.3 설계 제약 조건

첫 번째 제약 조건은 모터의 출력이다. 해당 로봇은 가벼운 무게를 지닌 동시에 큰 출력을 가진 브 러쉬리스 모터를 선정해야 한다. 가벼운 무게를 위해 일반적으로 사용되는 드론용 브러쉬리스 모터는 1.5~2kg대의 추력을 가지고 있으며, 이는 충분한 Payload를 확보하기에는 부족하다고 예상되었다. 따라서 2.5~3kg대의 추력을 가지는 브러쉬리스 모터의 시장조사가 필요했다. 두 번째 제약 조건은 차체의 소재 이다. 탄소 섬유판은 가벼운 무게와 높은 강도로 드론과 글라이더에 자주 사용되는 소재이지만 높은 가 격대와 원하는 형상대로 제작하기 어렵다는 조건 때문에 잦은 설계 변경과 강성 실험에는 부적절했다. 따라서 비교적 빠른 생산과 수정이 용이한 3D 프린팅 방식을 선택했고 소재는 PLA를 사용했다. 세 번 째 제약 조건은 빠르게 회전하는 프로펠러는 큰 각운동량을 가져 차체의 기울어짐에 따라 프로펠러의 각도를 변화시키기 위해선 큰 토크를 가지는 서보 모터가 필요하고, 적합한 성능을 가지는 서보 모터의 시장조사가 필요했다. 2.2 설계2.2.1 전체적인 설계



Fig. 2 The three main components of WCC (a) The overall design (b) The propeller rotation part (c) Car body part (d) Chassis part

WCC의 최종 설계 모습은 Fig. 2과 같이 나타난다. 이는 위에서부터 프로펠러 회전부, 차체(Car body) 부, 섀시(Chassis) 부로 나누어 설계되었다. Fig. 2 (b) 프로펠러 회전부는 PLA 소재의 3D 프린터 출력물 과 4개의 서보 모터, 2개의 브러쉬리스 모터로 구성된다. 브러쉬리스 모터는 개당 2.65kg의 추력을 발생 시키고, 2개의 서보 모터는 프로펠러 모터를 피치, 롤 축을 기준으로 회전을 시켜 원하는 방향으로 추력 의 방향을 바꿀 수 있다. Fig. 2 (c)의 차체부는 16mm의 탄소 섬유 파이프를 교차하여 H 형태로 만들었 고 메인보드와 배터리, 통신 모듈을 탑재한다. 차체의 모든 작동은 Arduino Mega 2560이라는 Microcontroller를 이용하여 작동 및 제어되고 기어드 모터와 서보 모터에 충분한 전력을 공급하기 위해 방전율이 높은 4셀 LiPo 배터리를 사용하였다. 또한 조종기와 원거리의 통신을 위해서 RF 통신 모듈을 사용하였고 200m 이상을 통신할 수 있게 해준다. Fig. 2 (d) 섀시부는 8mm 파이프와 3D 프린터로 링크 부품들을 제작하였고 충격 완충을 위해 RC카용 쇼크 업소버(Shock Absorber) 부품과 결합하여 완성하였 다. 4개의 바퀴는 섀시부에 설치된 기어드 모터와 연결되며 유니버설 조인트(Universal Joint)를 이용해 조향이 이루어진다.

2.2.2 프로펠러 회전부 설계

가) 프로펠러 지지대

Fig. 3는 프로펠러 회전부의 전체적인 형상이다. 프로펠러와 모터는 차체를 벽에 밀착시키는 주된 힘 인 추력을 발생시킨다. Fig. 3 (a)의 프로펠러 지지대는 프로펠러로 인한 추력을 차체로 전달하며, 피치 축 회전을 가능하게 하는 서보 모터와 연결된다. Fig. 3 (b)의 프로펠러 모터 지지대는 추력으로 인한 하 중을 견디고, 프로펠러의 롤 축 회전을 가능하게 한다. 추력 방향 변화는 각각 Fig. 3 (c), (d)의 서보 모 터를 이용하여 피치, 롤 축을 기준으로 회전시켜 도모한다. 이와 자이로 센서를 이용하여 로봇은 벽면을 주행하면서 자동으로 추력의 방향을 변화시켜 안정적인 주행을 가능하게 한다.

프로펠러 지지대 부분에선 추력에 의한 프로펠러 지지대의 변형이 주요한 문제 상황이며, 피치와 롤 회전이 원활하게 이루어져야 한다. 이러한 문제를 해결하는 최적의 형상 구조와 베어링을 이용한 하중 분산 구조를 설계하고자 하였다. 설계 시 주의사항은 하중을 버틸 수 있으면서 무게는 최대한 가볍게 하는 점이다. 또한 서보 모터, 프로펠러 모터, 베어링, 회전축 결합 부품 등이 설치될 수 있어야 하며, 내부에서 프로펠러 롤 회전이 가능해야 한다. 가벼운 무게를 위해 근본적인 설계가 끝나고 구조 최적화



Fig. 3 Components of propeller parts (a) Propeller support (b) Propeller motor support (c) Pitch rotating servo motor (d) Roll rotating servo motor (e) Servo motor support (f) Shock absorber connencting parts (g) Frame pipe connecting parts (h) Servo motor (Steering system)

설계를 통한 경량화 과정을 거친다. 이후 제작 과정에서 발생한 문제점은 3D 프린터의 출력 크기 제한 이다. 따라서 설계된 프로펠러 지지대를 4등분하고 이음새와 추가하여 볼트와 너트를 통해서 안정적으 로 연결하였다.

자전거, 드론 등의 프레임에 사용되는 탄소섬유는 가볍고 튼튼하다는 장점이 있지만, 비용상의 한계가 있어 본 연구에는 사용하지 않았다. 따라서 대체 소재로 빠른 제작이 가능하고 상대적으로 저렴한 3D 프린팅 방식을 이용하였고, 견고한 내구성을 지녀야 했기 때문에 설계와 해석, 강도 실험을 진행하였다. 부품을 제작하기 전에 CATIA 프로그램을 이용하여 설계하고, 프로펠러의 추력이 가해질 때 구조의

변형 정도나 응력 해석을 위해 ANSYS 프로그램을 이용하였다. 부품을 제작한 후에는 강도 실험을 통하 여 부품의 사용 가능성을 확인하였다. 프로펠러 지지대는 상하 지지판을 기둥이 받치는 형태로 설계했 을 때, 무게와 내구성 면에서 가장 우수하면서 상대적으로 제작이 간편하였다. 최종 프로펠러 지지대의 형상은 프로펠러를 감싸는 원주 형태이고 중심에는 프로펠러 모터가 배치된다. 지지대의 90° 위치마다 피치와 롤 축 연결부가 존재한다. 이음새 부분은 분할 제작된 부분으로 강도가 취약하기에 역삼각형 구 조로 끼워 맞추면서 결합하고 볼트로 고정한다. 이후 경량화를 위해 불필요한 부분은 최소화하는 과정 에서 기둥과 지지판 두께 조절, 프린팅 내부 채움 수치 조정 등의 방법을 이용한다. 부품은 응력 해석과 변형률 분석을 통해서 적합성을 판단하였다. 최종 제작물에 관한 결과는 Fig. 4와 같고, 해석 조건과 결 과는 Table. 1과 같다. Fig. 4 (a)는 변형 정도에 대한 해석으로 최대 변형 3.5858mm으로 프로펠러의 회 전에 영향을 주지 않고, Fig. 4 (b)의 응력 해석 결과 최대 응력은 PLA 재료의 항복 강도인 50MPa보다 작은 5.6043MPa이다. 따라서 형상, 재료, 부품의 무게를 고려해 파손 강도를 견딜 수 있는 적합한 설계 결과물을 얻는다.



Fig. 4 Structure analysis of propeller support assembly (a) Total deformation (b) Stress distribution

Table. 1 Property values for analysis of propeller support assembly

	Element size	Orthogonal quality	Skewness	Nodes	
Value	3.02 mm	0.73398	0.26442	126661	

나) 서보 모터 지지대

Fig. 3 (c) 서보 모터 지지대는 프로펠러 지지대와 연결되어 추력과 지지대의 무게를 지탱하며 차체 프 레임과 Fig. 3 (g) 프레임 파이프 연결 부분에서 연결된다. 해당 부품은 피치 서보 모터를 고정하고 프로 펠러 지지대의 높이를 위한 기둥 역할을 하며, Fig. 3 (f)에서 서스펜션 부품과도 연결되어 서로 고정하 는 기능이 있다. 특히 바퀴 부분의 부품 중 쇼크 업소버를 함께 지지해 주어 하중을 고르게 분산하고, 쇼크 업소버 지지대의 휨 현상을 방지한다.

서보 모터 지지대는 프로펠러 지지대의 무게와 프로펠러의 추력을 받기 때문에 추력으로 인한 좌굴을 해석하여 설계의 적절성을 판별하였으며 구조 최적화와 경량화 과정을 거쳤다. 또한 프로펠러 지지대가 바닥 및 정면과 충돌하지 않도록 치수를 조절하여 설계하였다.

서보 모터는 동력을 지지대의 회전에 직접 전달하기 위해 Fig. 5와 같이 Fig. 5 (l) 알루미늄 소재 파이 프와 Fig. 5 (k) 베어링을 결합하고 알루미늄 파이프와 연결을 위해 Fig. 5 (j) 조인트 부품을 설계, 제작 하였다. 서보 모터와 조인트 사이 연결을 위해서 Fig. 5 (k) 브라켓 부품을 이용한다.

서보 모터-브라켓-조인트-알루미늄 축-베어링-각 지지대 순으로 연결하고 서보 모터와 프로펠러 지지대 를 연결하는 축에 베어링을 사용하여 하중을 분산시킨다.



Fig. 5 Parts to connect servo motor to each support parts (i) Bracket (j) Joint (k) Bearing (l) Aluminum axis

2.2.3 섀시부 설계

가) 서스펜션

서스펜션(Suspension)은 자동차의 구조 장치로서 돌출물과의 충격이 차체나 탑승자에게 전달되지 않게 충격을 흡수하는 장치로 벽면 주행 시 돌출물에 의한 충격을 흡수하여 바퀴의 접지력 손실을 방지한다. 따라서 서스펜션 장치를 통해 벽면에서 차체의 주행 안정성을 보장해 준다. 또한 로봇의 약간의 험로를 주행하고 장애물을 넘을 수 있도록 보조해 준다.

부품 설계 목표와 주요 사항은 다음과 같다. 벽면 주행 시 충격을 흡수하고 벽면상의 장애물을 극복 할 수 있을 정도로 설계 목표를 설정한다. 목표를 바탕으로 필요한 쇼크 업소버의 성능을 설정하고, 기 어드 모터 사용과 조향 장치를 고려하여 설계한다. 또한 기어드 모터의 공간과 조향 링크가 상하·전후 운동할 수 있도록 공간을 확보해야 한다는 사항이 있다. 서스펜션과 함께 주행 능력을 향상시키고 안정 적인 주행을 위해 사륜구동 방식을 사용한다.

서스펜션은 더블 위시본(Double Wishbone) 식 서스펜션을 참고하여 설계하였다. 해당 방식의 특징 중 서스펜션의 운동 시 캠퍼 각 변화가 최소화되어 바퀴와 노면 사이의 마찰력 변화가 적다는 점이 더블 위시본 형태를 참고한 주요 이유이다. 또한 다른 서스펜션 타입과 비교하여 특정 부품에만 응력이 집중 되지 않는 구조이며, 설계를 변경하는 데 있어 비교적 제약이 적다는 이점이 있다. Fig. 6은 전반적인 서 스펜션 설계 부분이다. Fig. 6 (a)의 쇼크 업소버 지지대(Shock Absorber Support)라는 부품을 쇼크 업소버 (Shock Absorber)에 맞춤 설계하여 어퍼(Upper) 암과 연결하였다. Fig. 6 (c)의 H 형태의 어퍼 암과 Fig. 6 (d)의 로어 암이 컨트롤 위시본(Control Wishbone)으로 존재하고 어퍼 암에 Fig. 6 (b)의 쇼크 업소버가 연 결되어 진동을 감쇠한다. Fig. 6 (e)의 기어드 모터 케이스는 킹핀을 축으로 회전하며 기어드 모터를 고 정시키는 역할을 한다. 일반적인 더블 위시본 타입은 서스펜션과의 연결부가 로어 암에 존재하는 로우



Fig. 6 Components of suspension parts (a) Shock absorber support (b) Shock absorber (c) Upper arm (d) Lower arm (e) Geared motor case (f) Wheel (g) King pin



Fig. 7 Double wishbone type (a) Collision between the geared motor and the shock absorber (b) Low mount type (c) High mount type (d) Distributed load in high mount type

마운트 방식을 사용하지만, 이 로봇은 사륜구동으로 설계되었기 때문에 로어 암과 어퍼 암 사이에 기어 드 모터 케이스가 위치한다. 따라서 Fig 7 (a), (b)와 같이 기어드 모터의 전선과 쇼크 업소버의 충돌을 피하기 위해 Fig. 7 (c)와 같이 연결부를 어퍼 암으로 이동시킨 하이 마운트 방식을 사용하였고, Fig. 7 (d)와 같이 위로 이동한 쇼크 업소버 지지대를 지지대 부품과 연결하여 지지대가 받는 하중을 분산시켰 다.

바퀴 구동을 위한 기어드 모터는 두 개의 위시본 사이에 위치하며 모터에 맞춤 설계한 케이스에 배치 한다. 케이스는 조향 서보 모터와 유니버설 조인트로 연결되어 조향 작동한다. 설계 시 주요 사항은 프 로펠러 추력이 작용 시 조향을 위한 유니버설 조인트가 수평이 되도록 쇼크 업소버의 위치를 설계하는 것이다. 이것은 서보 모터를 이용한 조향의 정확성을 높이고 유니버설 조인트를 밀고 당기는 각도를 최 대한 비슷하게 맞추기 위함이다. 먼저 쇼크 업소버의 압축 정도를 실험하여 수직 12N에 약 9mm만큼 줄 어드는 것을 파악한다. 추력의 합력은 약 51N이며 수직 벽면에서 프로펠러를 45°로 설정할 때 바퀴 당 9N이 전달된다. 이를 바탕으로 조향 시 안정성과 편의성을 위해 유니버설 조인트가 서보 모터와 기어드 모터 사이에서 수평하게 위치할 수 있도록 쇼크 업소버와 서스펜션 어퍼 암의 연결 위치를 조절하여 설 계한다.



Fig. 8 Vector Loop equation (a) The load is not applied (b) Driving on the ground (c) Driving on the wall

시뮬레이션 프로그램을 통해 알아본 결과 두 형태는 조향각이 작아지므로 적절하지 않았고, Fig. 8 (b) 같이 어퍼 암이 수평인 상태가 조향을 하기에 최적이라는 결론이 나왔다. 결론적으로 평소의 차체는 Fig. 8 (a)처럼 지면에서 떠 있는 상태를 유지하고, 추력을 받으면 쇼크 업소버가 압축되어 어퍼 암이 수평이 되게 하는 것이 목표이다. 어퍼 암을 수평이 되게 영향을 주는 변수는 파이프로부터 쇼크 업소 버와 어퍼 암의 연결부까지의 거리 x로, 이것을 결정하기 위해 다음과 같은 과정을 거친다. Fig. 8에서 벡터 AB를 표현하기 위해 벡터 AB의 위상각 6를 정의하였고, 벡터 루프식을 통해 6와 x를 구했다.

> $\overrightarrow{OB} = \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AB}$ = (20.23 + 77.90cos $\theta$ , 84 - 77.90sin $\theta$ )  $\begin{cases} x = 20.23 + 77.90cos \theta \\ 12 = 84 - 77.90sin \theta \end{cases}$  $\theta = sin^{-1} \frac{84 - 12}{77.90} = 67.36$ x = 20.23 + 77.90cos 67.36 = 49.99

실험을 통해 쇼크 업소버의 길이는 20.78mm/1kgf 로 변화함을 측정했다. 쇼크 업소버의 길이는 하중에 대해 선형적으로 변화하기에 줄어든 쇼크 업소버의 길이는 Fig. 8 (b)와 같이 97-19.10 = 77.90mm이다. B 의 좌표를 벡터 루프식을 써서 위와 같이 구하면  $\theta = 67.54^\circ$ , x≒50mm이다. x에 해당하는 위치에 쇼크 업소버를 연결하여 추력을 받았을 때의 조향각을 최적화하였다.

다음은 조향각에 대한 설계로 대부분의 모빌리티는 애커먼 장토식(Ackerman Jeantaud type)으로 조향이 이루어진다. 설계 시에는 애커먼 장토식에 기인하여 조향각 및 최소 회전반경을 구하고, 이를 바탕으로 전달 각을 고려한 링크 구조를 바퀴와 서스펜션이 연결되는 위치에 설계하였다. 조향장치의 초기 모델 은 구동 범위가 차체의 프레임에 걸리는 문제점이 발생하였고, 조향각이 제한되어 회전반경이 과도하게 늘어나는 문제가 발생하였다. 이에 대한 해결방안으로 CATIA 프로그램 상에서 차체와의 거리를 고려하 여 시뮬레이션을 통해 개선을 진행하였다. 서보 모터 브라켓의 회전 각도에 따른 기어드 모터 케이스의 회전 각도를 알기 위해 좌표평면에서 링크를 표현한다.



Fig. 9 Calculating the steering angle using a 3D diagram (a) Diagram of steering system when system pulled (b) Diagram of steering system when system pushed

z축은 휠의 회전축, Fig. 9 (a)의 A1C1는 유니버설 조인트, y축에 평행하며 B를 지나는 직선은 서보 모터의 회전축이다. θ'은 기어드 모터 케이스의 회전 각도, Ø은 서보 모터 브라켓의 회전 각도이다. 서보 모터의 브라켓 팔은 BC1에서 BC2로 회전하고 당겨지는 유니버셜 조인트로 인해 휠의 팔은 OA1에서 OA2로만큼 회전한다. A1C1과 A2C2의 유니버셜 조인트의 길이는 같으므로 이를 이용해서 식을 세운다.

$$\begin{split} L &= \sqrt{(L+l\,\cos \varnothing -r\,\sin \theta')^2 + (r-r\,\cos \theta')^2 + (l-l\,\sin \varnothing)^2} \\ \theta' &= \sin^{-1} \! \left( \frac{k_3}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} \right) \!\! - \tan^{-1} \frac{k_1}{k_2} \\ \begin{cases} k_1 &= r^2 \\ k_2 &= Lr + lr\cos \varnothing \\ k_3 &= 2r^2 + 2l^2(1-\sin \varnothing) + 2Ll\cos \varnothing \end{split}$$

OA의 길이 r=37.5mm, AC의 길이 L=75mm, BC의 길이 l=16.5mm이고, 조향 가능한 각도는 당길 때 Fig. 9 (a)로 30°, 밀 때 Fig. 9 (b)로 24°임을 구할 수 있다. 이 결과는 시뮬레이션 툴을 이용해서도 확인 할 수 있다. 계산한 조향 각도를 이용해 해당 로봇이 애커먼 장토식으로 작동하는지 다음과 같이 점검 할 수 있다. 이때 축간거리 L = 530mm, 킹핀 사이 거리 J = 520mm, 바퀴와 킹핀 사이 거리 r = 50mm, 바깥쪽 앞바퀴의 조향 각도 *α* = 20.2°, 안쪽 앞바퀴의 조향 각도 *β* = 30°이다. 애커먼 장토식에서 최소 회전 반경을 구하면 약 1435mm로 축간 대비 약 2.75 배이다.

Fig 10과 같이 왼쪽 앞바퀴의 중심 점 A를 원점 (0,0)으로 잡으면 AD와 BD와 CD는 다음과 같이 나타난다.

$$AD: y = -(\tan \alpha)x$$
  $BD: y = -(\tan \beta)(x - 0.52)$   $CD: y = -0.53$ 

이 식들에서 AD와 BD의 교점은 다음과 같으며 CD 위에 위치해야 한다.

$$x = \frac{0.52 \tan\beta}{\tan\beta - \tan\alpha}, \quad y = -\frac{0.52 \tan\alpha \tan\beta}{\tan\beta - \tan\alpha}$$

각 a, β에 대한 관계식은 다음을 만족한다. 각각 α와 β에 각각 측정값인 20.2°와 30°를 넣어서 계산하면 값은 1.014로 53/52=1.019와 일치하며 검증된다는 것을 알 수 있다.

$$\frac{53}{52} = \frac{\tan\alpha\tan\beta}{\tan\beta - \tan\alpha} = 1.014$$

조향각 α, β는 각각 다음의 4가지 치수, 유니버설 조인트 길이와 조향 서보 모터의 브라켓의 반경 길 이, 기어드 모터 중심부터 유니버설 조인트까지 길이, 조향 서보 모터 회전각에 의해 복합적으로 결정되 며 애커먼 장토식 점검에는 실제 측정값을 이용한다.



Fig. 10 Ackerman Jeantaud type streeing

다) 바퀴 형상 및 타이어

가벼우면서 튼튼한 바큇살을 위해 하중을 분산할 수 있는 구조가 필수적이며 차체 하중과 프로펠러 추력에도 변형이 없어야 한다. 일반적으로 바퀴 직경이 클수록 장애물을 넘기 쉬우며 접지에 이득이 있 다. 마찰계수가 높을수록 동일한 수직항력에서 더 큰 마찰력을 얻을 수 있으므로 해당 로봇이 주로 사 용될 콘크리트와의 마찰계수를 확인한다. 일반적으로 고무와 콘크리트 사이 마찰계수는 정지마찰계수  $\mu_s = 1.0$ , 운동마찰계수 $\mu_k = 0.8$ 로 매우 큰 값을 가지고 실험을 통하여 실제 마찰계수를 측정한다. Fig. 11, Fig. 12과 같이 콘크리트 소재의 벽면 타일과 도르래를 이용한 실험 장치를 구성하였고, 실험 카트 위에는 벽면에서 로봇이 프로펠러 추력에 의해 수직 방향으로 받는 힘과 동일한 36N을 올린다.

운동마찰계수를 계산하는 과정은 아래 수식과 같다.

(1) 
$$\sum F_x = T - F_f = T - \mu_k N = Ma$$
,  $\sum F_y = N - Mg = 0$   
(2)  $\sum F_y = mg - T = ma$  (3)  $H = \frac{1}{2}at^2$ 

수식(1)과 (2)를 연립하면 운동 마찰계수  $\mu_k = \frac{mgt^2 - (m+M)2H}{Mgt^2}$ 를 구할 수 있다.

추의 무게 m, 수직 벽면 방향 합력 M, 설정 시간 t를 기준으로 H 값을 측정하여 운동마찰 계수를 얻을 수 있다. 실험 결과로 사용된 고무판은  $\mu_k = 0.81$ 의 운동 마찰 계수를 가지는 것으로 확인되었다.





Fig. 11 Method of measuring friction force by experiment

Fig. 12 Actual experiment



Fig. 13 Design of wheel (a) Modeling of wheel (b) Analysis of stress distribution of wheel

Table.	2	Property	values	for	analysis	of	wheels
		1 2			2		

	Element size	Orthogonal quality	Skewness	Nodes
Value	2.2 mm	0.69295	0.30494	122730

바퀴 설계 최종 형상은 Fig. 13 (a)와 같다. 바퀴 테두리에 있는 홈에 선정한 고무판을 붙여서 제작한 다. ANSYS 프로그램을 이용한 해석 결과 최대 응력은 Table. 2와 Fig. 13 (b)와 같이 ABS 재료가 가지 는 항복강도인 30MPa보다 작은 0.738MPa으로 응력이 바큇살을 따라 분산되는 안정적인 구조임을 알 수 있다.

2.2.4 부품 경량화 및 최적화 설계

서보 모터 지지대는 하중을 잘 견디는 구조 등을 고려하여 후보를 선정하고 부품에 가해지는 무게를 지탱할 수 있는지, 갑작스러운 충격에 버틸 수 있는지를 파악하기 위한 실험을 진행했다. 이러한 과정을 통해 지지대를 선정하여 경량화를 진행하였다. Fig. 14는 서보 모터 지지대의 파괴 실험을 진행한 모습 이다.



Fig. 14 Fracture experiment of servo motor support and pitch support, It was broken when mass of 1.5kg weight dropped from height of 30cm.

	Propeller Motor Support	Suspension UpperArm	Servomotor Support		Pitch Support		Total
Quantity	2	4	1	1	1	1	10
Before	72.4 g EA	31.9 g EA	86.2 g	58.7 g	49.5 g	45.6 g	512.4 g
After	54.0 g EA	26.1 g EA	66.3 g	57.5 g	48.6 g	41.5 g	426.3 g
Ratio of change	25.41 % EA	18.18 % EA	23.09 %	2.04 %	1.18 %	8.99 %	16.80 %

Table. 3 Mass difference of each parts after lightweighting by modified design









Fig. 15 Progress of lightweighting by modified design (a) Propeller motor support (b) Suspension upperarm (c) Servo motor support (d) 2nd Modification of pitch support

모든 부품을 완성한 후에는 차체의 무게를 줄일 수 있도록 Fig. 15과 같이 최적화를 진행했다. 결과적 으로 Table. 3과 같이 총 86.1g을 감량하였다.

2.2.5 점검용 카메라 및 다용도 팔 설계

가) 점검용 카메라

점검용 카메라는 벽면 주행 시 벽면 표면의 균열을 조사하는 역할을 한다. 카메라는 다용도 팔이 수 직으로 바닥에 닿는 지점을 바라보게 30°로 기울어져 있고, 카메라의 렌즈와 접촉 지점과의 거리는 233mm로 210mm의 초점거리보다 길게 설계되었다.

Fig. 16 (a) 카메라 고정부와 Fig. 16 (b) 카메라 지지대의 후면은 발열을 고려하여 열을 방출하기 쉽게 위로 뚫린 형태로 설계되었고, Fig. 16 (c) 파이프 고정부는 위아래에 볼트와 너트를 이용해 압력을 가하는 방식인 클램프 고정 장치를 참고하여 설계했다.



Fig. 16 Commponents of camera fixture (a) Camera fixing part(b) Camera support (c) Fixing part

나) 다용도 팔 설계

Fig. 17 (a) 다용도 팔은 벽면에서 균열에 대한 표시나, 비파괴 검사를 실행할 수 있도록 벽과 로봇 본 체 사이의 140mm의 거리를 극복할 수 있는 메커니즘으로 설계되었다. 4절 링크를 이용한 구조로 서보 모터의 회전을 수직 운동으로 변환해 주는 장치로 총 153mm의 수직거리를 이동할 수 있다. 다용도 팔 의 끝부분에는 결합부를 만들어 균열부에 표시를 할 수 있는 Fig. 17 (b) 스프레이, Fig. 17 (c) 도장 장치 를 교체 사용할 수 있도록 설계하였다. 추후 결합부에 상황에 따른 센서나 비파괴 검사 장비를 부착하 여 접촉하는 방식으로 응용할 수 있다.



Fig. 17 Application of multifunctional arm (a) Design of multifunctional arm (b) Multifunctional arm equipped with spray (c) Multifunctional arm equipped with stamp

2.3 제어2.3.1 서보 모터 선정



Fig. 18 Rotation of propeller support to maintain the thrust direction for lifting the body

Fig. 18와 같이 로봇이 벽면에서 안정적으로 주행하기 위해서는 추력의 방향을 항상 로봇을 떨어지지 않는 방향으로 두어야 하기에 프로펠러 지지대를 Pitch, Roll 축에 대해 회전시킨다.

Fig. 19와 같이 프로펠러의 회전축을 기울이는 데에는 서보 모터를 사용한다. 빠르게 회전하는 프로펠 러는 높은 각운동량을 가지기 때문에 프로펠러의 각운동량을 변화시키기 위해서는 큰 토크를 서보 모터 가 필요하다. 처음 각운동량 *L*<sub>1</sub>과 회전축을 △θ만큼 기울인 나중 각운동량 *L*<sub>2</sub>를 식으로 나타내면 아래 와 같다.

$$L_1 = L_1 \hat{k}$$
  
$$\overrightarrow{L_2} = L_1 (-\hat{j} \sin \Delta \theta + \hat{k} \cos \Delta \theta)$$



Fig. 19 Angular momentum diagrams of rotating propeller and propeller support

토크는 각운동량의 시간 변화율과 같고  $\Delta \theta$ 를 작은 각도라고 가정하면  $\sin \Delta \theta \approx \Delta \theta$ ,  $\cos \Delta \theta \approx 1$  로 근사할 수 있다. 식을 정리하면 아래와 같다.  $\omega_n$  는 프로펠러의 각속도,  $\omega_{\theta}$ 는 회전축의 각속도로 둔다.

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} \approx \frac{\vec{L}_2 - \vec{L}_1}{\Delta t} = \frac{L_1(-\hat{j}\sin\Delta\theta + \hat{k}(-1 + \cos\Delta\theta))}{\Delta t} \approx \frac{L_1(-\hat{j}\Delta\theta)}{\Delta t} = -L_1\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\hat{j} \approx -L_1\omega_\theta\hat{j} = -I_z\omega_p\omega_\theta\hat{j}$$
$$\frac{\tau}{\omega_\theta} = I_z\omega_p = (1.8 \times 10^{-5} kg \cdot m^2) \times (1100 \times 14.8 \, rpm) = 0.0307 kg \cdot m^2/s$$

따라서 회전축을 기울이는 데에 필요한 서보 모터는 토크를 각속도로 나눈 값이 0.0307  $kg \cdot m^2/s$ 이상 이어야 한다는 조건을 만족해야 한다.

Operating speed를 rad/s로, Torque를 N·m로 변환하고 계산한다.

$$\omega_{\theta} = \frac{60^{\circ}}{0.17 \ s} \frac{\pi \ rad}{180^{\circ}} = \frac{\pi}{0.51} \ rad/s$$
  
$$\tau = 9.4 \ kgf \cdot cm \times \frac{1 \ m}{100 \ cm} \times \frac{9.81 \ kg \cdot m/s^2}{1 \ kgf} = 0.92214 \ N \cdot m$$
  
$$\frac{\tau}{\omega_{\theta}} = \frac{0.92214 \ N \cdot m}{\frac{\pi}{0.51} \ rad/s} = 0.17604 \ kg \cdot m^2/s \ > I_z \omega_P = 0.0307 \ kg \cdot m^2/s$$

위 결과에 따르면 MG996R은 조건을 만족하고, 본 로봇에 사용할 수 있다. 선택한 모델인 MG996R의 사양은 Table. 4와 같다.

Table. 4	Specifications	of motor	(MG996R)
----------	----------------	----------	----------

Name	Weight	Dimension	Stall torque	Operating speed	
MG996R	55 g	40.7×19.7×42.9 mm	9.4 kgf·cm	0.17 s/60°	

2.3.2 벽면에서의 최적의 Pitch 각도

경사면에서 차체가 주행하기 위한 Pitch 각도를 구하기 위해 Fig. 20과 같이 Free body diagram과 Kinetic diagram을 작성하고 아래의 운동 방정식을 푼다. 벽면과 바퀴 사이의 마찰계수는 안전계수를 두 어 0.7로 설정한다.

$$\sum F_a = ma_a, \ \sum F_b = 0, \ \sum M_{point G} = 0$$

운동 방정식을 통해 구한 수직력  $N_1$ ,  $N_2$ 와 가속도  $a_a$ 는 아래와 같다.

$$\begin{cases} N_1 = mg(0.25 + 0.5\frac{\mu d}{L})\cos\Psi + F_t(0.5 + \frac{\mu d}{L})\cos\theta_p - \frac{F_t c}{L}\sin\theta_p \\ N_2 = mg(0.25 + 0.5\frac{\mu d}{L})\cos\Psi + F_t(0.5 + \frac{\mu d}{L})\cos\theta_p + \frac{F_t c}{L}\sin\theta_p \\ a_a = \mu g \cos\Psi - g \sin\Psi + \frac{2\mu F_t}{m}\cos\theta_p + \frac{2F_t}{m}\sin\theta_p \end{cases}$$



Fig. 20 Mechanical diagram at climbing situation (a) Free body diagram (b) Kinetic diagram

차체가 경사면에 붙은 채로 주행하기 위해서는  $N_1 > 0, N_2 > 0$   $a_a > 0$ 을 모두 만족해야 한다. 이를 통해 Pitch 각도  $\theta_p$ 의 범위를 구한다. 아래의 식은 각각을 만족하는 Pitch 각도  $\theta_p$ 의 범위이다.

$$N_{1} \geq 0 \rightarrow (first)_{N_{1}} \langle \theta_{P} \langle (final)_{N_{1}} \rangle \\ \left\{ (first)_{N_{1}} = -(final)_{N_{1}} + 2(-90^{\circ} + |\Gamma_{-1}|) \\ (final)_{N_{1}} = -\Gamma_{-1} + \sin^{-1} \left( \frac{mg \left( 0.25 + 0.5 \frac{\mu d}{L} \right)}{F_{t} \sqrt{\left(\frac{c}{L}\right)^{2} + \left( 0.5 + \frac{\mu d}{L} \right)^{2}}} \right) \\ \Gamma_{-1} = \sin^{-1} \left( \frac{-\left( 0.5 + \frac{\mu d}{L} \right)}{\sqrt{\left(\frac{c}{L}\right)^{2} + \left( 0.5 + \frac{\mu d}{L} \right)^{2}}} \right)$$

$$N_{2} > 0 \rightarrow (first)_{N_{2}} \langle \theta_{P} \langle (final)_{N_{2}} \rangle$$

$$(first)_{N_{2}} = -\Gamma_{2} + \sin^{-1} \left( \frac{mg \left( -0.25 + 0.5 \frac{\mu d}{L} \right)}{F_{t} \sqrt{\left(\frac{c}{L}\right)^{2} + \left( 0.5 - \frac{\mu d}{L} \right)^{2}}} \cos \Psi \right)$$

$$(final)_{N_{2}} = -(first)_{N_{2}} + 2 \left( 90^{\circ} - |\Gamma_{2}| \right)$$

$$\Gamma_{2} = \sin^{-1} \left( \frac{\left( 0.5 - \frac{\mu d}{L} \right)}{\sqrt{\left(\frac{c}{L}\right)^{2} + \left( 0.5 - \frac{\mu d}{L} \right)^{2}}} \right)$$

$$\begin{array}{rcl} a_a & > & 0 & \rightarrow & (first)_{a_a} & \langle & \theta_P & \langle & (final)_{a_a} \\ \\ \left\{ (first)_{a_a} = & - & \alpha + \sin^{-1} \left( \frac{mg}{2F_t} & \sin(\Psi + \beta) \right) \\ (final)_{a_a} = & - & (first)_{a_a} + 2(90^\circ - |\alpha|) \\ \alpha = & \sin^{-1} \left( \frac{\mu}{\sqrt{1 + \mu^2}} \right) &, \quad \beta = & \sin^{-1} \left( \frac{-\mu}{\sqrt{1 + \mu^2}} \right) \end{array}$$

위의  $N_1$ ,  $N_2$ 와  $a_a$ 의 범위를 그래프로 그리면 Fig. 21과 같다. 그래프의 가로축은 경사면의 각도이고, 세로축은 Pitch 각도이다. 위의 식에서 (first), (final)은 각각 아래 첨자에 있는 값을 통해 구한 범위의 첫 값과 끝값을 나타낸다.

Fig. 21의 그래프를 통해서 θ<sub>p</sub>의 교집합은 다음과 같은 범위로 확인되고, 여러 기울기 벽면에서도 위 의 범위 내의 Pitch 값을 적용하면 벽면에서의 안정적인 부착이 가능하다.

$$(first)_{a_{a}} \langle \theta_{P} \langle (final)_{N}$$

또한 로봇이 주로 구동되는 환경인 90°의 벽면에서 로봇의 바퀴와 벽면 사이의 마찰계수에 따른 가능 한 Pitch 각도를 찾기 위해 위의 계산 식에서 90°인 상황으로 국한 시키면, Fig. 22과 같이 90° 벽면에서 마찰계수에 따른 필요한 Pitch 각도를 구할 수 있다. 결과적으로 마찰계수  $\mu = 0.7$  인 경우, 수직면에서 는 대략 6°~76°의 Pitch 각도를 사용하면 벽면에서의 안정적인 주행이 가능하고, 실제로 사용할 때는 평 균값인 40°~45° 부근을 사용한다. 실험적인 검증은 아래의 3. 결과 및 토의 부분에서 다룰 예정이다.



Fig. 21 Relationship between pitch degree with inclined degree



Fig. 22 Relationship between pitch degree with friction coefficient at vertical wall

2.3.3 벽면에서의 회전

벽면에서 방향을 전환할 때 차체는 Yaw 축을 기준으로 회전한다. 이에 따라서 프로펠러의 Pitch, Roll 축에 대한 회전이 수반되어야 벽면에서의 안정적인 주행이 가능하다. 차체의 Yaw 회전에 따른 Pitch, Roll 회전을 제어하기 위해 3차원 회전 변환을 이용하여 계산한다. 회전 변환 행렬을 사용하는 상황을 가정하고, 프로펠러의 회전축 방향이 [0, 0, 1]에서 [0, -sinθ, cosθ]가 되도록 회전 변환 행렬을 곱하면 z 에 따른 x, y의 회전각 관계를 구할 수 있다.

$$Rot_{Y} \bullet \left( Rot_{P} \bullet Rot_{R} \bullet \begin{bmatrix} 0\\0\\F \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 0\\-Fsin\theta_{p}\\Fcos\theta_{p} \end{bmatrix}$$

Yaw 축에 의한 회전 변환 후 Pitch 축과 Roll 축에 의한 3차원 회전 변환을 계산하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$Rot \bullet \begin{bmatrix} 0\\0\\F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \cos\beta & \cos\alpha \sin\beta \sin\gamma - \sin\alpha \cos\gamma & \cos\alpha \sin\beta \cos\gamma + \sin\alpha \sin\gamma \\ \sin\alpha \cos\beta & \sin\alpha \sin\beta \sin\gamma + \cos\alpha \cos\gamma & \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma - \cos\alpha \sin\gamma \\ -\sin\beta & \cos\beta \sin\gamma & \cos\beta \cos\gamma \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} 0\\0\\F \end{bmatrix}$$

위에서 구한 회전 각도를 만족하는 Pitch 각도  $\theta_p$ 와 Roll 각도  $\theta_r$ 는 Yaw 각도  $\theta_y$ 로 표현할 수 있는데, 그 식과 그래프는 Fig. 23와 같다.

$$\theta_p = \sin^{-1}(-\sin 45^\circ \sin \theta_y)$$
$$\theta_r = \cos^{-1}\left(\frac{\cos 45^\circ}{\cos \theta_p}\right)$$



Fig. 23 Graph of pitch and roll degree calculated by the yaw degree

Fig. 24와 같이 차체의 기울기는 Yaw 축을 기준으로 하며 자이로 센서를 통해 상시 측정된다. 측정된 기울기 값을 받아 계산하여 Pitch와 Roll 축에 입력하면 Fig. 25과 같이 프로펠러 지지대와 프로펠러 모 터 지지대가 회전한다.



Fig. 24 Each axis of pitch, roll, yaw of robot



Fig. 25 Changing of pitch, roll degree by tilt of gyro sensor

#### 3. 결과 및 토의

3.1 안정성 검증

로봇의 최종 목적은 댐, 교량, 원자력 발전소 등에 올라 목적을 수행하는 것에 있다. 실험은 실험실 내의 환경에서 1차 검증 후 건물의 외벽에서 2차 실험을 하는 것으로 진행되었다. 1차 실험으로 Fig. 26 과 같이 큰 유리창에서 로봇이 오를 수 있는지 확인한다. 로봇은 유리 벽면에서 추락 사고를 방지하기 위해 줄을 이용하여 Fig. 26 (a)와 같이 벽면에서 시작하고 모든 줄에는 장력이 들어가지 않는다. Fig. 26 (b)와 같이 프로펠러의 추력을 이용하여 벽면에 안착하고, 바퀴를 이용하여 안정적으로 벽면을 오른다.



Fig. 26 Experiment for performance of robot (a) settling on the wall by thrust of propeller (b) climbing the wall with thrust and power of motor



Fig. 27 Experiment of maximum weight of load when angle of pitch changed (a) Pitch angle  $10^{\circ}$  (b) Pitch angle  $20^{\circ}$  (c) Pitch angle  $30^{\circ}$  (d) Pitch angle  $40^{\circ}$  (e) Pitch angle  $45^{\circ}$  (f) Pitch angle  $50^{\circ}$  (g) Pitch angle  $60^{\circ}$  - 346 -



Fig. 28 Relationship between Maximum weight of load and angle of pitch

이후 Fig. 27 실험에서 가장 큰 Payload를 들 수 있는 최적의 피치 각도를 찾기 위하여 피치 각도를 10°씩 돌리며 로봇이 들 수 있는 최대 Payload를 측정한다. Fig. 27 (d), (e)와 Fig. 28에서 보면 로봇은 약 40°~45° 부근에 최고 무게인 1350g의 추가 무게를 들 수 있는 것으로 확인된다. 이는 2.3.2 벽면에서 최 적의 Pitch 각도 계산 부분의 가정을 실험적으로 검증한 것이다. 또한 실험적으로 피치 각도가 70° 이상으로 커지면 앞바퀴가 접지력을 잃고, 10°보다 작아진다면 무게를 이기는 힘이 부족한 것을 검증하였다.

#### 3.2 주행 능력 시험

3.2.1 전체적인 로봇의 움직임 모습



Fig. 29 The performance of Robot moving from floor to wall

로봇은 바닥에서 벽면으로 이동하여 검사 지점을 확인한 후 다시 복귀한다. 로봇은 벽면에서의 주행 을 위해 크게 가) 바닥에서 벽면으로 이동, 나) 벽면에서 수직 주행, 다) 벽면에서 방향 전환, 라) 벽면에 서 수평 주행의 과정을 거치며 벽면에서 움직인다. 각각의 단계에 대한 실험이 진행된 후 최종적으로 위의 Fig. 29의 전체적인 실험이 진행되었다.

#### 가) 바닥에서 벽면으로 이동

바닥에서 벽면으로 이동하기 위해서 Fig. 30 (b)와 같이 앞쪽의 프로펠러의 각도가 180° 뒤집혀서 Fig. 30 (c)와 같이 차체의 앞바퀴를 띄운다. 그 후 벽면에 앞바퀴가 안착하면 바닥에서 벽면으로 오르기 위해 Fig. 30 (d)와 같이 계산된 피치 프로펠러 각도에 접근하며 벽면을 오른다. 벽면에 4개의 바퀴가 안 착한 뒤 Fig. 30 (c)와 같이 벽면을 오른다. 로봇에 감긴 줄은 비상시의 추락으로 인한 파손을 방지하기 위함으로 줄에는 장력이 들어가 있지 않음을 확인할 수 있다.



Fig. 30 Process of robot's state change from floor to wall (a) Initial state (b) The front propeller rotates 180° (c) Lifting front of body by thrust of propeller (d) From the groud up the wall (e) Climbing wall

#### 나) 벽면에서의 수직 주행



Fig. 31 Climbing wall, maintaining angle of pitch of 45 degree (a) Settle on the wall (b) Move up to 3m height (c) Move up to peak of the wall

Fig. 31 실험에서 로봇은 45°의 프로펠러 피치 각도를 유지한 채 콘크리트 타일로 이루어진 수직면을 약 3m 올라가며 안정적인 벽면 주행이 가능함을 확인하였다.

#### 다) 벽면에서 방향 전환

로봇은 자이로 센서를 이용하여 벽면에서 Yaw 축의 기울어짐을 측정한다. 측정한 값을 바탕으로 Pitch와 Roll 축을 회전시켜 벽면에서 안정적인 방향 전환이 가능하다. Fig. 32 (a)와 같이 프로펠러는 거 의 Pitch 축을 기준으로만 회전하고 있다. 이어서 Fig. 32 (b)에서 Fig. 32 (d)로 가는 동안 프로펠러는 자 동으로 Roll 축 기준으로 회전한 것을 확인할 수 있다.



Fig. 32 Experiment about Controlling angle of propeller by gyro sensor (a) Rotation of propller based on Pitch axis (b) Angle of propeller controlled by gyro sensor (c) Stable change of direction (d) Changing angle of propeller on Roll axis

라) 벽면에서 수평 주행



Fig. 33 Horizontal driving on the wall (a) Climb on the wall as horizontal (b) Stable driving (c) Move up to 3m without slip

Fig. 33은 프로펠러의 추력이 롤 축을 45° 회전하여 벽면에서 주행하는 실험으로, 로봇은 중력 방향의 미끄러짐 없이 약 3m의 거리를 이동할 수 있었다.

위와 같이 가), 나), 다), 라)의 실험을 거치면서 수직 벽면으로의 안정적인 이동 및 주행이 가능한 것 을 확인하였다. WCC는 이러한 성능을 이용하여 점검이 필요한 지점을 원격으로 확인하고, 기존 육안 점검방식의 위험성을 감소시킨다.

#### 3.2.2 다양한 시설에서 활용 방안

최종적으로 로봇은 댐이나 교량 점검, 원자력 발전소 상부 돔 점검에 사용된다. Fig. 34 (a)와 같이 댐 에서 상황을 가정하여 경사면에서의 주행에 대한 실험, Fig. 34 (b)와 같이 교량과 비슷한 수직 벽에서 주행 실험, Fig. 34 (c)에서 원자력 발전소 상부 돔의 상황을 가정한 곡면에서의 주행 실험을 진행하였 다.



Fig. 34 Practical uses of WCC at each different condition of wall (a) A wall with a slope (b) A flat wall (c) A curved wall

#### 3.3 활용방안 및 기대효과



Fig. 35 Standard of crack scale and photo of crack taken by drones (a) Standard of crack scale (b) photo taken by SenseFly's drone (c) photo taken by Flyability's drone

드론과 차량의 장점을 융합한 WCC는 프로펠러의 추력을 이용하여 지면뿐만 아니라 벽면에서의 주행 이 가능한 로봇이다. 무게에 비해 큰 추력으로 로봇에 추가적인 장치를 탑재할 수 있으며 드론보다 가 깝게 접근할 수 있다는 장점으로 WCC는 댐, 교량, 원자력 발전소 상부 돔과 같은 시설물 점검에 활용 할 수 있다. WCC는 댐에서 안전 진단용 활용할 수 있다. 국토 안전관리원 기준으로 국내 댐에서 안전 점검 기준에 해당하는 손상에는 균열, 박리, 박락, 철근 노출, 누수, 백태 등이 있고, 해당 균열을 카메라 로 확인할 수 있다. 그중 가장 흔한 손상이 균열이며, 보수, 보강의 규모 파악과 공사비의 산출에 필요 한 중요한 데이터이다. Fig. 35 (a)에서 보면 균열 스케일 기준을 실제 크랙과 비교하여 균열폭이 0.05mm 이상인 크랙의 길이를 표시하는 것을 원칙으로 하는데, 머리카락보다 가는 굵기이기 때문에 거 리가 있다면 육안으로 판단하는 것이 쉽지 않다. 이를 해결하기 위해 최근 드론을 이용하여 검사를 진 행하는 방식이 도입되었지만, Fig. 35 (b)에서 보듯이 현재 senseFly 사의 카메라는 1pixel 당 0.4mm~0.6 mm의 단위까지만 확인할 수 있고, Fig. 35 (c) Flyability 사의 엘리오스2는 1pixel 당 0.18mm까지도 측정 이 가능하나 역시 국내 기준에는 미치지 못하는 수치이다. 이런 점에서 WCC는 벽면에 직접 접촉하기 때문에 1만 원 이하의 저렴한 카메라로도 0.1mm의 균열까지 관찰할 수 있어 동일 성능의 드론 카메라 를 탑재한다면 안전 기준인 0.05mm 이하의 크랙도 확인 가능할 것이다. 또한 기존의 드론이 수행하지 못하는 타음 법, 초음파 조사 등이 가능하다는 점에서 조사 방법의 다양화가 가능하다. 경우에 따라 크 랙의 길이를 표시하기 위해서 에어 스프레이 등을 이용해 멀리서도 알아볼 수 있는 흔적을 남기는 기능 도 추가할 수 있다.



Fig. 36 Example of WCC application in bridge inspection

Fig. 36의 사진과 같이 교량에서도 댐과 같은 균열, 박리, 박락, 철근 노출, 누수, 백태 등을 카메라로 확인할 수 있다. 이 경우에도 역시 크랙의 조사가 필수적이지만, 댐과 달리 교량에서는 구조물 특성상 로봇이 적용 가능한 부위가 달라진다. 콘크리트 교량에서 점검할 부위에는 콘크리트 바닥판과 기둥에 해당하는 교각이 있는데 국토안전관리원 기준으로 콘크리트 교량에서는 바닥판과 교각에서 0.1mm 이상 의 균열이 발견되면 손상이 시작되었다고 본다. 해당 로봇은 90° 수직면의 주행이 가능하므로 교각판 측 면의 균열, 박리, 박락, 철근 노출 등을 촬영하고 기록할 수 있다. 추가로 교각 기둥의 경우 노후화에 따 른 이동, 처지거나 기울어짐을 측정해야 하는 경우도 있어 WCC에 장착된 자이로 센서를 이용하여 기둥 의 기울기를 측정하는 방향으로 발전할 수 있다.

최근 원자력 발전소의 라이너 플레이트의 부식으로 인한 두께 감소 문제가 발생했으며, 한빛 원자력 발전소 4호기에는 라이너 플레이트 배면의 콘크리트 벽면에 콘크리트가 채워지지 않은 공동이 발견되었 다. 이러한 공동을 조사하는 데에는 비파괴 검사가 필수적이기 때문에 벽면 주행 로봇처럼 벽면에 접촉 하여 비파괴 검사를 수행할 수 있는 로봇이 필요하다. 또한 현재 격납고의 상부 돔 및 이음새는 접근이 어렵다는 이유로 육안점검만 시행되고 있다. 해당 로봇의 Payload는 1.35kg이기 때문에 한국수력원자력 에서 제시한 초음파 검사 장비인 38DL PLUS Ultrasonic Thickness Gage(816.5g)와 별도의 탐촉자(모델명 D7906 또는 D7908)<sup>(9)</sup> 을 탑재한 후 Fig. 37과 같이 원자로 상부 돔의 점검 부위를 점검하는 데 무리가 없다.

WCC를 활용하여 위 사례들과 같은 시설물 점검을 수행하게 된다면 현재 점검에 사용되는 산업용 드 론에 비해 경제적으로 우수할 뿐만 아니라 사람의 접근성이 낮은 곳의 점검이 가능해져 효과적인 시설 물 관리 시스템을 기대할 수 있다.



Fig. 37 Example of WCC application in reactor dome inspection

#### 3.4 경제성 분석

Parts	Name	Price(won)	Amount	Total(won)
Propeller motor	SUNNYSKY X2820 1100KV Outrunner Brushless Motor	44,600	2	89,200
Electronic speed controller	[Hobby Wing] Skywalker 80A (2~6S LiPo / OPTO)	39,000	2	78,000
Propeller	[DUALSKY] 11x5.5 MR Carbon Prop - Version.2	18,800	2	37,600
Propeller battery	[Dinogy] Graphene 14.8V 7200mah 80C TRX	109,000	1	109,000
Wheel battery	Turnigy 700mAh 3S 60C Lipo Pack (XT30)	18,000	1	18,000
Servo motor	MG996R	4,400	8	35,200
Bearing	B678ZZ	1,850	12	22,200
Bolt	M3*10 1000ea	8,000	1	8,000
Bolt	M3*20 1000ea	8,000	1	8,000
Nut	M3 1000ea	4,000	1	4,000
Carbon pipe	Inner 6mm, outer 8mm * 1m carbon pipe	14,160	4	56,640
Carbon pipe	Inner 14mm, outer 16mm * 1m carbon pipe	19,500	2	39,000
Shock absorber	TRX4090-B-S-BEBK TRX-4 Aluminum Front/Rear Adjustable Spring Dampers	23,200	2	46,400
Micro controller	Arduino Mega 2560 R3 CH340 [OPEN-TW06-001]	11,980	1	11,980
Communication module	NRF24L01 Long range wireless module	4,100	2	8,200
Wheel motor	12V geared motor (F) / F-1(50rpm)	7,700	4	30,800
Link	MYT160GMBK Axial Yeti Jr. <sub>TM</sub> Aluminum Tie Rods Gun Metal	18,000	1	18,000
Wire	UP-WS12B Silicon Wire 12AWG : silicon wire	3,700	6	22,200
Motor drive	2A L298 motor drive module	2,000	1	2,000
Gyro sensor	MPU-9250 arduino 9 aixs gyro sensor module GY-9250	12,000	1	12,000
Rotation axis	seamless stainless steel tube /outer diameter 3.17~8mm	5,000	1	5,000

Table.	5	The	total	cost	of	manufacturing	a	robot
--------	---	-----	-------	------	----	---------------	---	-------

Camera	ESP32-CAM Module + WIFI (OV2640) [OPEN-TS02-001]	6,710	1	6,710
printing	CUBICON Filament	60,000	1	60,000
	728	,130		

Table. 5를 보면 WCC 1대를 제작하는 데에 대략 730,000원 정도의 비용이 소요되는 것을 알 수 있다. WCC와 비슷하게 점검 등의 기능을 수행할 수 있는 로봇은 산업용 드론이 대표적이고, 이러한 산업용 드론은 대개 2,000,000원 이상의 가격대가 형성되어 있다(DJI - 매빅2 엔터프라이즈 듀얼 : 3,592,000, 매 빅2 엔터프라이즈 유니버설 에디션 : 2,667,000). 이를 통해 WCC는 비슷한 기능을 수행하는 로봇과 가격 면에서 경쟁력을 가질 수 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

사회 기반 시설물 점검의 필요성은 점차 대두되지만 댐이나 교량의 외벽, 원자력 발전소 상부 돔 등 을 점검하는 방법은 뚜렷하게 제시되지 않고 있다. 기존에는 사람이 직접 점검하는 방식을 사용했지만 이러한 방법은 안전사고를 유발할 가능성이 크다. 본 연구를 통해 개발한 Fig. 38 WCC는 벽면에서 안정 적으로 검사 지점에 접근하고, 카메라를 이용하여 점검할 수 있다. 그리고 RC 카를 조종하는 것만큼 쉽 게 조종할 수 있어 드론에 비해 사용자 친화적이다. 또한 해당 로봇은 추가적인 Payload(1.35kg)를 들 수 있어 비파괴 검사를 위한 초음파 검사 장비 등을 탑재할 수 있다. 따라서 본 연구는 안전 점검 분야에 서 WCC를 이용하여 시설물을 점검하는 새로운 방법을 제시하였다.



Fig. 38 Final design of WCC

로봇 설계 방법에 대한 지도 및 방향성을 검토해 주신 김제혁 박사님께 진심으로 감사드립니다. 여러 부품 및 재료 구매를 위한 지원금을 지원해 주신 한양대학교 ERICA 캠퍼스 공학교육혁신센터에 감사드 립니다. 초기에 필요한 재료 및 부품, 3D 프린팅 지원을 주신 한양대학교 ERICA 캠퍼스 기계공학과 RED 학회에 감사드립니다.

#### 참고문헌

(1) Mohamed G Alkalla, Mohamed A. Fanni, Abdel-Fattah Mohamed, Shuji Hashimoto, 2017, "Tele-operated propeller-type climbing robot for inspection of petrochemical vessels", Industrial Robot, emerald insight, U.K. Bingley, pp. 168~176

(2) Mohamed G Alkalla, Mohamed A. Fanni, Abdel–Fattah Mohamed, Shuji Hashimoto, Hideyuki Sawada, Takanobu Miwa, Amr Hamed, 2019, "EJBot-II: an optimized skid-steering propeller-type climbing robot with transition mechanism", Advanced Robotics, Taylor & Francis online, U.K. London, p. 2

(3) Peng Liang, Xueshan Gao, Qingfang Zhang, Rui Gao, Mingkang Li, Yuxin Xu, Wei Zhu, 2020, "Design and Stability Analysis of a Wall-Climbing Robot Using Propulsive Force of Propeller" Symmetry, MDPI, Swiss Basel, pp. 6~7

(4) Andreas Papadimitriou, George Andrikopoulos, George Nikolakopoulos, 2018, "Design, Development and Experimental Evaluation of a Thrust Vectoring Vortex Climbing Robot", International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE, U.S.A. New Jersey, pp. 1342~1346

(5) Woosub Lee, Sungchul Kang, Munsang Kim, Mignon Park, 2004, "ROBHAZ-DT3: Teleoperated Mobile Platform with Passively Adaptive Double-Track for Hazardous Environment Applications", RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, U.S.A. Piscataway, New Jersey, p. 34

(6) Da Guan, Lei Yan, Yibo Yang, Wenfu Xu, 2014, "A Small Climbing Robot for the Intelligent Inspection of Nuclear Power Plants", International Conference on Information Science and Technology, IEEE Xplore, U.S.A. New Jersey, pp. 484~487

(7) Sungwook Jung, Jae-Uk Shin, Wancheol Myeong, Hyun Myung, 2015, "Mechanism and system design of MAV(Micro Aerial Vehicle)-type wall-climbing robot for inspection of wind blades and non-flat surfaces", International Conference on Control, Automation and Systems, IEEE Xplore, U.S.A. Piscataway, New Jersey, p. 1758

(8) Michael Arigoni, Michael Bischoff, Silvan Fuhrer, David Krummenacher, Dario Mammolo Robert Simpson, Roland Siegwart, 2015, "Vertigo a wall-climbing robot including ground-wall transition", disneyresearch, Swiss zurich pp. 1~2

(9) Facility safety division 1, 2018, "Nuclear power plant safety management status", The board of audit and inspection of Korea, Korea, Seoul, pp. 17~19

(10) Sukgyun Park, Hongchul Rhim, 1998, "Nondestructive Testing of Concrete Structures Using Electromagnetic Wave Techniques", Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol. 10, No. 2, pp. 27~39

#### ※ 별지 : 설계프로젝트의 입상 이력

#### - 출품작명 : 구조물 점검에 활용 가능한 벽면 주행 로봇

#### - 출품대회명 : 지능형창작로봇경연대회

#### - 수상 내역 : 영상 발표 부문 장려상

1) 기 입상 프로젝트의 설계내용 개요

본작품은 기 입상 프로젝트로 'CIRO 2021 지능형창작로봇경연대회'에 출전하여 영상 발표 부문 장려 상을 수상하였다. 해당 프로젝트는 벽에 붙기 위한 조건으로 수직항력과 가속도를 구하고 벽의 재질에 따라 최소한의 추력으로 벽에 붙을 수 있는 Pitch 회전 각도를 분석했다. 또한 시연 영상 발표에 초점이 맞춰진 대회로, 수직인 벽을 오르는 실험 영상을 중심으로 제시되었다. 따라서 이전 프로젝트의 경우 활 용 가능성에 대한 입증과 계산에 대한 검증이 부족하였고, 본 전국학생설계경진대회에서는 이론, 설계 과정, 해석, 추가적인 실험을 통해 로봇의 활용 가능성을 이론적으로 입증한다.

#### 2) 차별점

#### 2.1. 부품 경량화 및 최적화 설계

WCC가 벽에 붙기 위한 성능은 차체의 중량을 줄이는 것에 관계된다. 이번 프로젝트에서는 부피가 크 다고 판단되는 프로펠러 모터 지지대, 서스펜션 어퍼암, 서보모터 지지대의 경량화를 하기 위한 연구를 진행한다.

#### 2.2 부품에 대한 해석

기존의 프로젝트는 3D 프린팅 부품의 파손 가능성에 대해서는 분석하지 않았다. 따라서 이번 프로젝 트에서 하중을 집중적으로 받는 프로펠러 지지대와 바퀴의 구조분석을 진행한다. PLA의 항복강도와 비 교하여 3D 프린팅 부품의 강도와 파손 가능성을 연구하고 문제가 없음을 밝힌다.

#### 2.3. 구체적인 설계과정

기존 시연 영상에서는 서스펜션의 설계 문제를 모델링하고 해결하는 과정이 언급되지 않았다. 이번 프로젝트에서는 설계 치수를 변수로 나타내고 이를 계산식으로 만들어 조향 각도를 계산하는 과정을 기 술한다. 또한 다용도 팔과 카메라 지지대에서 부품의 스펙을 고려한 설계 내용을 추가 하여 탐촉자를 이용하는 비파괴 검사 점검시스템을 구현한다.

2.4. 해석범위의 확장

앞선 프로젝트는 Fig. 39과 같이 수직으로 벽면을 오를 때 최대의 Pitch 의 각도와 마찰 계수의 영향에 대해서만 분석했다. 최대의 Pitch 각도는 단순히 벽에 붙을 수 있는 지에 대한 여부만을 검증하는 연구 였다면, 본 연구에서는 벽면을 주행할 때 벽면에서 떨어지지 않게 하는 차체의 최적의 Pitch와 Roll 각도 를 계산한다. 또한 수직이 아닌 경사면에서 주행할 때 차체에 가해지는 힘을 표시한 자유 물체도를 그 리고, 0 ~ 180° 각도의 경사면에서 벽면에 붙을 수 있는 프로펠러 각도의 범위를 정량적으로 나타낸다.



Fig. 39 Mechanical diagram at vertical situation

#### 2.5. 들 수 있는 무게의 검증

시연 영상에서는 비파괴검사장치를 탑재하는 방향으로 발전 가능하다고 서술하였지만, 이를 이론적으 로 검증하지 못했다. 이번 프로젝트에서 실제로 WCC가 어떠한 최적의 프로펠러의 각도를 가져야 가장 많은 Payload를 들 수 있는지 실험하고, 구체적인 값을 확인 한다.

2.6. 경제성 분석

대표적인 무인 점검 방법인 산업용 드론과 비교하여 경제성 측면에서 경쟁력이 있는지 분석하였다. 기존 점검용 드론의 가격과 본 로봇을 설계하는데 드는 제작 비용을 비교 분석하였으며, 이를 통해 WCC가 Payload 외에도 가격 면에서 경쟁력이 있음을 확인 한다.

2.7. 구동 메커니즘

앞선 대회에서는 WCC의 벽면 등반 시연을 보여주는 것에 집중한 것과 달리, 본 연구에서는 WCC의 구동의 구체적인 메커니즘을 나타낸다. 첫 번째, 바닥에서 벽면으로 오르는 과정을 단계별로 나눠 각 과 정에서 필요한 각도를 알아낸다. 두 번째로 본 연구는 자이로 센서가 실시간으로 측정한 차체의 각도를 3차원 회전 변환을 풀어 Pitch와 Roll 각도 값를 얻고, 이 결과 값을 이용해 수직과 수평을 동시에 자유 롭게 주행하는 동작의 구체적인 메커니즘을 기술 한다.

2.8. 마찰계수 실험

앞선 벽면 재질에 따른 마찰계수 연구에서 더 나아가, 이번 프로젝트는 실제 사용될 바퀴의 마찰계수 를 측정하여 설계의 타당성을 부여한다. 단순히 외부 실험 결과를 인용한 전 연구와 다르게, 본 연구에 서는 보다 정밀한 결과값을 얻기 위해 마찰계수 측정 실험을 진행하였으며, 실제 연구에서 사용하는 바 퀴 재질이 가지는 마찰계수 값을 기반으로 다른 연구를 진행하였다. 이를 통해 연구에서 가지는 정확성 과 신뢰성을 확보하였다.