대한기계확회 주최 제11회 전국학생설계경진대회(2021년)



참가부	대학부					
참가분야	공모주제 () / 자유주제 (ㅇ)					
참가팀명	드론팀					
설계제목		벽면 이동이 가능한 틸트 구조 자세 변환 드론				
지도교수/교사	(소속) 숭실대	(소속) 숭실대학교 기계공학부 (성명) 안형준				
대표자	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소	
(신청인)	강찬익	숭실대학교 기계공학부				

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	강찬익	숭실대학교 기계공학부 3 학년	
2	이동효	숭실대학교 기계공학부 3 학년	
3	정규환	숭실대학교 기계공학부 3 학년	
4			
5			
6			

설계 요약문

참가분야	공모주제 () / 자유주제 (ㅇ)
참가팀명	드론팀
설계제목	벽면 이동이 가능한 틸트 구조 자세 변환 드론
대표자명	강찬익
요약문	 1) 설계배경 및 목적 매년 노후 시설물은 빠른 속도로 증가하고 있다. 준공 이후 30년이 지난 노후 시설물은 현재 17.5%이지만 10년 뒤 27%로 증가할 예정이다. 증가하는 시설물 점검 수요를 해결하기 위해 서보모터를 이용하여 자세를 바꾸며 벽면 근접 비행 또는 부착하여 시설물 점검 임무를 수행할 수 있는 드론의 설계를 목적으로 한다. 2) 설계내용 새로운 드론을 개발하기 위해 자세 변환과 벽면 부착에 적합한 형상을 결 정했고, KS 규격에 따른 드론의 무게를 결정해 안정적인 비행이 가능한 부품을 선정하였다. 프로펠러의 회전반경을 바탕으로 선정한 부품을 장착할 프 레임의 크기를 결정해 프레임을 설계하였고, 드론 자세 제어와 변환에 필요 한 서보모터와 모터마운트로 구성된 틸트부를 설계하였다. 벽면 부착과 이동을 위한 휠-레그 구조를 설계하며 발과 자석 간의 결합 방법, 회전 메커니즘을 개발하였다. 마지막으로, 제어를 위한 PX4 Airframe 제 작, 시뮬레이션을 통한 소프트웨어 및 하드웨어 검증을 진행하여 드론을 설 계하였으며, 실물 제작을 통해 비행 실험을 진행하여 비행 능력 및 벽면 부 착, 바퀴 이동을 확인하였다. 3) 기대효과 위 드론을 통해 시설물 점검 비용이 감소되고, 점검 시간을 단축하여 시설물 점검의 새로운 검사수단으로 자리 잡을 것으로 기대한다. 또한, 정찰 및 감 시 임무, 미래 드론 기술에 기여할 것이며, 오픈 소스인 PX4에 새로운 작동 방식을 적용한 Airframe의 추가로 후속 연구에 도움을 줄 수 있을 것으로 기 대한다.

벽면 이동이 가능한 틸트 구조 자세 변환 드론

강찬익* ·이동효* ·정규환* ·안형준** *숭실대학교 기계공학부

Wall climbing drone using wheel-leg and tilt-rotor

Chan-Ik Kang^{*}, Dong-Hyo Lee^{*}, Kyu-Hwan Chung^{*} and Hyeong-Joon Ahn^{*†} * School of Mechanical Engineering, Soongsil University

Key Words: Drone(드론), Tilt(틸트), Wheel-leg(휠-레그), vertical take-off and landing(수직 이착륙), wall climbing(벽 등반)

초록: 최근 노후시설물이 증가함에 따라 새로운 검사수단으로 드론이 사용되고 있다. 유류탱크와 같은 정밀진단이 필요한 시설물 점검을 위해 벽 이착륙 및 이동이 가능한 드론을 개발하여 시설물 점검에 활용하고자 한다. 본 논문에서는 틸트 구조를 통한 자세 변환이 가능하며, 휠-레그 바퀴를 통해 벽면 이동 및 장애물 극복이 가능한 드론을 개발한다. 드론 형상 선정, 프레임, 틸트부 및 구동부 설계를 통해 드론을 제작하였으며, 영구자석을 체결한 휠-레그 바퀴를 설계하여 철제 구조물 탈부착 메커니즘 을 고안하였다. 최종적으로 실험을 통하여 개발된 드론의 발전 가능성을 확인했다.

Abstract: As the number of old facilities has increased recently, drones are considered as a new platform for inspection. Drones should take off, land, and climb the walls to inspect facilities that require precise diagnosis such as oil tanks. In this paper, we propose a wheel-leg tilt-rotor drone for wall climbing and vertical takeoff and landing. The wheel-legs with permanent magnets were designed to attach and detach steel structures and climb the steel structure. Finally, we confirm the feasibility of the drones with flight experiments.

1. 서 론

한국시설안전공단의 국내 시설물 증가 현황자료⁽¹⁾에 의하면 우리나라 1,2종 시설물 수는 2021년 9월 기준 총 10만 6800여 개다. 준공 이후 30년이 지난 노후 시설물은 현재 17.5%이지만 10년 뒤 27%로 증 가할 예정이다. 시설물의 안전관리에 관한 특별법 제11조 안전점검의 실시⁽²⁾과 제12조 정밀안전진단의 실시⁽³⁾에 따라 시설물은 일정 기간마다 점검을 받아야 하며 증가하는 시설물의 수와 관련 법규로 인해 안전 점검 및 진단에 대한 수요가 증가하고 있다.

수요를 해결하기 위해 새로운 검사수단으로 드론이 사용되고 있다. 기존 드론 형상은 시설물 부착 점 검에 어려움이 있어, 근접 정밀 점검에 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해 틸트를 통한 근접비행 및 바 퀴를 통한 벽면 부착 및 이동을 통해 정밀한 점검이 가능해진다. 틸트를 이용하는 드론에는 VTOL(Vertical Take-off and Landing)이 존재하지만 헬리콥터와 같이 수직 이륙 후 모터를 틸트 비행기

^{*} Corresponding Author, ahj123@ssu.ac.kr

^{□ 2021} The Korean Society of Mechanical Engineers

구조로 전환, 고속으로 비행할 수 있다는 장점을 활용한 구조이므로 시설물 점검에는 적합하지 않은 형 태이다.



연도별 시설물 현황

Fig. 1 Current status of facilities by year⁽¹⁾

본 설계는 시설물 검사의 비용 감소와 검사 시간 단축을 위해 벽면 이동이 가능한 틸트 구조 자세 변 환 드론을 개발하는 것을 목적으로 한다.

2. 설계핵심내용

2.1 설계 문제 정의 및 해결 방안

기존 시설물 점검 드론은 벽면 부착 및 이동을 할 수 없어 구조물의 안전점검 시 작동 한계와 정밀점 검의 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 설계에서는 Tri-copter 형상에서 모터가 상하로 배 치된 Hexa-copter co-axial 드론 형상을 바탕으로 서보모터를 이용하여 기체를 틸트시키고, 휠-레그 구조 바퀴를 설계해 벽면 부착 및 이동 메커니즘을 개발한다. 또한 개발 드론을 제어하기 위한 소프트웨어를 제작한다.



Fig. 2 Design direction schematic

2.2 기존 연구 및 특허 분석

본 팀이 진행하는 '벽면 이동이 가능한 틸트 구조 자세 변환 드론'의 벽면 부착방식은 Table.1과 Table.3의 기존 연구, 특허와 자석을 이용해 부착한다는 점, 벽면 부착 이후에는 바퀴를 회전시킬 모터만 이용하여 이동한다는 점, 벽면에 착지한 후, 고정된 위치에서 모터의 추력 없이 유지될 수 있는 점에서 명백한 차별점이 존재한다. 그러므로 벽면 이동이 가능한 틸트 구조 자세 변환 드론은 개발 가치가 있 다.

Table.1 Investigate and analyze prior studies⁽⁴⁾

논문명	WANCHEOL MYEONG, HYUN	MYUNG, 2019, Development of	a Wall-Climbing Drone Capable			
220	of Vertical Soft Landing Using a	of Vertical Soft Landing Using a Tilt-Rotor Mechanism, IEEE Access (Volume:7), 4868-4879				
논문 내용	벽면 부착 시 발생하는 충격을 줄이기 위한 틸트로터 메커니즘과 저속 자세 변경에 대한 연구					
유사점	모터추력을 통한 벽면 부착	모터 틸트를 통한 자세 변경	벽면 부착 후 이동			
차별점	자석과 곤충모방 바퀴를 이용한 부착	쿼드롭터가 아닌 Y6형태로 드론 형상 차이점 존재	모터추력을 통한 이동이 아닌 바퀴 회전으로 이동			

Table.2 Related patent search results⁽⁵⁾

	Vtol drone = 국내: 30 건, 해외: 766 건	र्टे 0404 रूपे रोगो
검색어	Tilt drone = 국내: 176 건, 해외: 6372 건	종 8404건 검색 (유사트허·3거)
	Wall climbing drone = 국내: 3 건, 해외: 1057 건	

Table.3 Investigate and analyze prior patent⁽⁶⁾

특허명	벽면 이동형 드론 유닛의 자율 운용 방법 및 시스템 (1020190148451)				
특허 내용	복수 센서를 이용하여 벽면 인식/접근, 벽면 착지, 벽면 이동 및 벽면 탈착을 위한 틸팅 벽면 이동형 드론 유닛의 자율 운용 방법 및 시스템				
유사점	벽면 부착을 위한 틸트 각도 감지를 통한 벽면 착지 안정 화 프로세스 자율수행	모터추력을 통한 벽면 부착	GPS 정보 없는 자율 운용		
차별점	송신기를 통한 단계별 조작	자석을 이용한 부착	GPS 정보 기반 수동 / 자율 운용		

2.3 설계 방법

2.3.1 드론의 전체적 구조

드론은 하드웨어부와 소프트웨어부로 구성된다. 하드웨어부는 드론의 형상을 만들며, 부품을 장착하는 프레임, 자세변환을 위한 틸트부, 벽면 부착 및 이동을 위한 바퀴부로 구성되며, 소프트웨어부는 모터 배치 등 형상에 따른 파라미터를 제어하는 Airframe, 모터의 출력을 제어하는 Mixer로 구성된다.



Fig. 3 Structure of the drone

2.3.2 드론의 형상 설정

개발하는 드론은 수직으로 호버링을 할 수 있어야 한다. 사각 형상은 총 모터의 50%만 사용 가능할 수 있지만, 삼각 형상 사용 시 총 모터의 66.7%를 사용할 수 있다. 따라서 틸트 시, 더 많은 모터를 사 용하기 위해 삼각형 형상을 이용하였다. 삼각형 형상 중 Tri-copter 형상에서 모터가 상하로 배치된 Hexa-copter co-axial 형상을 사용하였다. Hexa-copter co-axial 형상은 모터가 각 축에 위, 아래로 배치된 Co-axial 시스템을 사용하여 프로펠러가 회전하면 발생하는 모멘트를 위, 아래 역방향으로 회전해 상쇄시 켜 기체를 안정적으로 제어할 수 있다는 장점이 있다.

드론 형상	Quad-copter	Tri-copter	Hexa-copter co-axial	
그림				
수평 호버링 시 사용 모터	1,2,3,4	1,2,3	1,2,3,4,5,6	
수직 호버링 시 사용 모터	1,3	1,2	1,2,5,6	
수직 호버링 중 사용되는 모터 비율	50%	66.7%	66.7%	
모멘트 안정성	0	Х	0	

Table 4	Comparison	of the	drone	airframes ⁽⁷⁾
1 auto.4	Comparison	or the	urone	annames

2.3.3 부품 선정

항공안전법 시행령 및 항공안전법 시행규칙 개정안⁽⁸⁾에 따라 드론은 무게에 따라 KS 1~4종으로 구분 된다. 제작 및 실험을 위해 최대이륙중량 2kg 이하 KS 4종 드론으로 설계한다. 따라서 드론 모터, 서보 모터, 배터리, 전원보드 등의 무게를 고려하여 드론의 총 무게는 1.8kg로 가정하고 안전계수를 부여하여 최대 2.0kg로 가정하여 Table.5와 같이 이에 적합한 부품을 선정하였다.

	모터 선정	프로펠러 선정	배터리 선정	틸트 서보모터 선정
성과	Co-axial 시스템의 효율 확인, 모터비 교, Kv값과 최대 추 력을 바탕으로 적합 한 모터 선정	이론식과 실험값을 이용하여 추력 계산을 통한 부품 선정		필요 하중에 맞는 제품 선택
선정 부품	Sunnysky X2212-13 980Kv	APC 10inch 프로펠러	4cell (14.8V) 5200mAh 35C 배터리	DS3218 PRO

Table.5 Selection of drone component

2.3.3.1 모터 선정

드론에 적합한 모터를 선정하는 기준은 모터의 속도 상수와 추력이다.



Fig. 4 Flight status by the position of the throttle lever

Fig. 4는 조종기 쓰로틀의 영역별 제어 상태를 나타낸다. 드론의 안정적인 상태는 쓰로틀이 중앙에 위 치했을 때 호버링이 가능해야하며, 이는 모터 최대 추력의 절반에 해당한다. 따라서 최대 추력이 드론의 설정 무게인 2kg의 두 배가되는 4kg 이상이어야 하며, 수직 호버링시 4개의 모터로만 비행해야하므로 4 개의 모터의 최대 추력이 4kg 이상 되어야 한다. 모든 조건을 고려했을 때 드론에 사용되는 모터는 각 모터의 최대추력이 1kg 이상이 되어야 틸트 전, 후 자세에서 안정적인 비행이 가능하다.



Fig. 5 Co-axial motor thrust tester

드론 형상 결정을 통해 Hexa-copter co-axial로 드론을 제작하기 위해 co-axial로 모터를 구성 시 발생하는 추력 효율을 알아야 한다. 이를 위해 Fig. 5와 같은 추력 테스트기를 설계하고 하고 2가지 종류의 모터로 실험을 진 행하였다. single-rotor 상태와 co-axial 상태에서 모터와 프로펠러가 발생시키는 추력을 throttle이 50%, 100%일 때 저울로 5번 측정한 평균을 비교하여 single-rotor에 대한 co-axial의 효율을 결정하였다. 실험 에서 통제변인은 배터리 3cell(11.1V), ESC 15A, 프로펠러 8inch이며, 조작변인은 single-rotor, co-axial 구 성이다.

Table.6 Thrust of Sunnysky x2304-1480Kv

Summuslay v2204 1480Ky	Thrust			
Sunnysky X2304-1480KV	Throttle 50%	Throttle 100%		
Single-rotor	282g	636g		
Co-axial	350g	550g		
<u>क</u> े के	86.	5%		

Table.7 Thrust of Sunnysky Scorpion HK2520 1580Kv

스코피 ◊ 11V2520 1590V···	Thrust			
프들퍼콘 HK2520 1580KV	Throttle 50%	Throttle 100%		
Single-rotor	522g	966g		
Co-axial	447g	809g		
효율	85	%		

Table.5, Table.6의 실험에서 알아낸 효율에 안전계수를 적용하여 Co-axial의 효율은 80%로 결정한다. 실험을 통해 얻은 Co-axial의 효율과 평상시와 틸트 시 사용되는 모터의 수를 고려하여 모터 하나 당 필 요한 최대 추력을 계산한다.

Table.8	Thrust	needed	for	1	Motor
---------	--------	--------	-----	---	-------

Position	사용되는 모터 수	모터 하나당 필요 추력
Normal position	6개	750g
Tilt position	4개	1125g

모터 1개당 필요한 추력을 나타난 Table.8에 따라서 1125g의 최대 추력을 낼 수 있는 모터가 필요하 다. 최대 추력을 만족하고 적절한 속도상수 Kv를 가지는 SUNNYSKY X2212-13 980kv를 사용하기로 한 다. SUNNYSKY X2212-13 980kv 모터는 10inch 프로펠러, 4Cell (14.8V) 배터리, 40A ESC를 사용하면 모 터 하나당 1150g의 추력을 발생시킨다. Normal position에는 2760g, Tilt position에는 1840g의 드론을 제어 할 수 있다. 드론의 무게를 1800g으로 가정하였으므로 제어할 수 있다.

2.3.3.2 프로펠러 선정 프로펠러 크기에 따른 추력식은 다음과 같다.

 $T = \frac{\pi}{4} D^2 \rho v \Delta v$

T=thrust[N], D=propeller diameter [m], v=velocity of air at the propeller [m/s], Δ v= velocity of air accelerated by propeller [m/s], ρ =density of air [1.225 kg/m³]

SUNNYSKY X2212-13 980kv, 배터리 4Cell(14.8V), ESC 40A, 프로펠러 9inch를 사용할 때 최대 추력은 940g이다. 이를 통해 프로펠러 크기에 따른 추력을 9, 10inch의 프로펠러의 추력 비는 81/100임을 이용하여 이론식을 통해 알아보았다. 프로펠러의 크기를 제외한 조건은 모두 같다.

$$T_9: T_{10} = 9^2: 10^2, \ T_{10} = \frac{100}{81} T_9 = 1175g$$

 T_0 : 프로펠러 9inch를 사용할 때 최대 추력, T_{10} : 프로펠러 10inch를 사용할 때 최대 추력

Table.9 Thrust by propeller size

Throttle Prop. size	50%	100%
9inch	470g	940g
10inch	588g	1175g

실험을 통해 Table.9와 같이 프로펠러의 크기가 커질수록 추력의 크기도 증가함을 확인했다. 따라서 8, 9inch가 아닌 10inch의 프로펠러를 사용하기로 한다.

2.3.3.3 배터리 셀 선정

SUNNYSKY X2212-13 980kv, 배터리 4Cell (14.8V), ESC 40A, 프로펠러 9inch를 사용할 때 최대 추력 은 940g이다. 이를 통해 추력은 배터리의 셀의 개수, 전압과 비례하므로 3Cell과 4Cell의 추력 비는 3/4임 을 이용하여 추력을 구하였다. 배터리의 셀을 제외한 조건은 모두 같다.

$$T_3: T_4 = 3:4, \ T_3 = \frac{3}{4} T_4 = 705g$$

 T_3 : 프로펠러 9inch를 사용할 때 최대 추력, T_4 : 프로펠러 10inch를 사용할 때 최대 추력

Table.10 Thrust by battery cell

Throttle Battery Cell	50%	100%
3Cells (11.1V)	352g	705g
4Cells (14.8V)	470g	940g

배터리의 셀이 많아질수록, 추력도 증가함을 알 수 있었다. 따라서 4Cell (14.8V) 배터리를 사용하기로 한다. 배터리 방전율은 ESC가 40A를 사용하므로 방전전류가 77A인 5200mAh 35C를 사용하기로 한다. 선정한 부품은 Fig. 6과 같이 배선되며 각각의 모터의 시그널 선은 배전반의 I/O PWM IN과 PX4의 I/O PWM OUT과 연결되고, 서보모터는 AUX 채널에 배정되어 배전반의 FMU PWM IN과 PX4의 FMU PWM OUT으로 연결된다.



Fig. 6 Drone wiring diagram

Table.11 Dimension of the drone

Flight Controller	Holybro Pixhawk4
Motor	Sunnysky x2212-13 980Kv
ESC	X-Rotor 40A ESC
Propeller	APC 10 x 4.5
Servo motor	DS3218 Pro
Power management board	Holybro PM07
RC	R9DS / AT9
Battery	4Cell (14.8V) 5200mAh 35C

2.3.4 드론 프레임 설계

KS 4종 드론을 만족하기 위해 최대이륙중량 2kg 내에서 드론을 제작해야 한다. 선정한 부품의 무게는 1,170.9g이므로 드론 프레임은 829g 내에서 설계해야 한다. 드론의 구동부 바퀴와 바퀴를 고정해 줄 구동부 프레임이 포함되어야하므로 안전성을 확보하며 최소한의 무게로 프레임을 제작한다.

드론 프레임은 드론 제어기, 배전반, 배터리를 비롯한 드론 구동을 위한 BLDC 모터, 서보모터를 장착 을 고려해 설계한다. 선정한 프로펠러의 크기는 10inch이다. 10inch는 254mm로 드론의 프레임은 양 프로 펠러가 장착되기 위한 최소 한 변의 길이는 254mm이다. 2.3.2에서 결정한 Hexa-copter co-axial 드론 형상 을 만족하기 위해서는 모터가 정삼각형의 형태로 배치되어야한다. 따라서 최소 한변의 길이가 254mm 크기로 제작되어야한다. 하지만 모든 프로펠러가 간격 없이 배치되는 것은 드론의 안전성과 구동부 부 착을 위해 불가능하므로, 프로펠러 사이의 간격을 결정하여야 한다.

최종적으로 선정한 부품은 Table.11과 같다.



Fig. 7 Design of drone center part

간격을 결정하기 위해 선정한 부품이 배치될 드론의 중심부를 먼저 설계한다. 중심부에는 GPS, 드론 제어기, 수신기, 배전반이 배치되어야 한다. 각 부품은 비행 중 피치(Pitch) 각이 90도 이상 회전하여도 각 부품이 위치를 유지할 수 있도록 부품의 크기에 맞춰 설계하였다. 공간을 최대한 활용하기 위해 상단과 하단 모두 활용할 수 있는 구조로 설계하였다.



Fig. 8 Side view of drone center part

배터리는 드론 부품 중 가장 무거워 배터리 배치를 통해 드론의 무게 중심을 조절할 수 있다. 구동부 설계를 통해 무게중심을 결정해야하므로, 유동적으로 배터리 위치를 조절할 있도록 Fig. 8과 같이 설계 한다.



Fig. 9 Stress analysis of lower frame - 508 -

Fig. 9를 통해 설계한 프레임의 구조가 수직 호버링으로 인한 하중을 받았을 경우 안정성을 파악하였 다. 프레임이 안정적으로 고정되어 있으며, 프레임 결합 부분의 폰 미세스 응력이 집중되지만 최대 2MPa로 Cubicon사 ABS의 인장 항복강도인 43MPa를 넘지 않아 사용에 적합하다.



Fig. 10 (a) Drone frame decomposition (b) Drone frame assembly

드론 프레임을 3D프린팅으로 제작하기 위해 ABS로 소재 설정 후 Inventor iProperties로 확인한 질량은 383g이다. 이는 프레임의 내부채움이 100% 기준으로 3D프린팅을 위해 내부채움을 20%로 변경할 경우 100g으로 계산된다. 따라서 무게를 만족하며, 구조적 안정성을 지닌 드론 프레임이라 평가할 수 있다.



Fig. 11 Position of motor

설계한 드론 프레임을 통해 2.3.2에서 결정한 Hexa-copter co-axial 형상을 만들기 위해 Fig. 11과 같이 모터를 배치해야한다. 파란색 원은 10inch 프로펠러의 회전 반경으로 프레임과 적절한 거리를 선정해야 한다. 모터 사이의 거리가 짧으면 비행 안전성이 떨어지지만, 기동성이 좋아지게 된다. 따라서 안정적 비행을 위해 대중적으로 많이 사용되는 드론의 대각선으로 크기를 나타내는 F650 규격을 사용한다. 2.3.5 틸트부 설계

드론의 자세 제어를 위해 틸트-로터 구조를 사용한다. 틸트부는 2개의 BLDC 모터, 1개의 서보모터, 모터마운트로 구성되어 있으며 드론의 자세 변환 및 자세 제어 역할을 한다.



Fig. 12 Drone tilting part

틸트부는 Fig. 12와 같이 카본파이프, 서보모터 마운트, 서보모터, 모터혼, 모터마운트, BLDC모터 순으 로 결합된다. 각 부품간 체결은 볼트를 사용하며, 카본파이프와 서보모터마운트의 체결은 무두볼트를 사 용하여 고정한다.

서보모터가 축을 회전시키는 구조와 서보모터가 모터마운트를 회전 시키는 두 가지 경우를 설계하였 다. Table.12는 그 두 가지 방법을 나타낸다. 서보모터가 축을 회전 시키는 방식은 모터마운트와 축 사이 의 거리만큼 축 휨이 발생해 축 회전에 간섭이 발생하며, 또한 진동이 발생하여 정밀한 모터 각도 제어 의 어려움이 있다. 반면, 모터마운트를 서보모터에 연결하는 경우 서보모터 혼을 통해 직접 체결하기 때 문에 축 휨 또는 축 진동이 발생하지 않아 안정적인 비행과 제어가 가능하다.



Table.12 Tilting method

서보모터에 모터마운트를 체결하기 위해서는 서보모터 부하를 줄이기 위해 모터마운트 경량화가 필요 하다. 구조적 안정성은 유지하며 경량화를 위해 응력해석을 바탕으로 설계하였다. 모터마운트는 10g으로 서보모터 축 방향 부하에 영향을 주지 않는다. 비행시 모터마운트에 가해지는 모터의 최대추력인 10N을 Co-axial 구조로 위아래에서 가했을 때, Fig. 13 (a)에서 최대 폰 미세스 응력은 9.635MPa로 Cubicon ABS 의 인장 항복강도인 43MPa를 넘지 않아 사용에 적합하다. 또한 체결부에 응력집중이 일어나며 안전계수 가 2.08로 측정되었다. 모터가 최대추력인 상황은 상승 비행 중인 상황이므로 외부 충격이 없어 비행 중 안전성에 문제없을 것으로 판단한다.



Fig. 13 Stress analysis of (a) servomotor mount (b) shaft

Hexa-copter co-axial 형상에서 3,4번에 해당하는 후방 모터는 Fig. 13 (b)와 같이 서보모터 없이 모터마 운트가 축에 체결되는 구조이다. 비행 시 축과 모터마운트, 프레임이 안정적으로 고정되며 모터 최대 추 력시 구조적으로도 안전함을 확인했다.

2.3.6 바퀴부 설계

우리는 유류탱크와 같은 철제 시설물을 점검하기 위하여 기체를 벽면에 부착해야한다. 벽면 부착을 위해 자석을 사용한다. 자석에는 영구자석과 전자석이 존재하는데, 경량화를 위해 드론의 특성상 전자석 보다 가볍고, 전력 소모가 없는 영구 자석을 사용하기로 한다.



Fig. 14 Wheg (Wheel-leg) component

벽면 부착, 이동을 모두 실현 가능하게 할 구조를 선정해야한다. 원형 바퀴를 사용할 경우 벽면과의 접촉 면적이 적어 기체가 벽면에서 떨어질 위험성이 존재한다. 자석이 많은 면적에 접촉할 수 있는 다 른 모양의 바퀴를 사용해야한다. 우리는 그 대안으로 휠-레그 구조인 Wheg 바퀴를 사용하고자 한다.
Wheg 바퀴란 Wheel-leg의 약자로 곤충의 이동 방식을 모방하여 바퀴의 단순성과 발의 장애물 제거 이 점을 결합한 형태이다. 이동 중 적어도 한 면이 벽면과 부착되어 안전성이 뛰어나다. 따라서 드론의 벽 면 부착 및 이동을 위해 우리에게 적합한 Wheg 구조를 설계하고자 한다. Wheg의 구성 Fig. 14와 같이 은 메인 바디, 자석과 결합할 TPU Sheet, 메인 바디와 연결할 커버로 구성되며 자석 및 구동부를 선정해 야 한다.

2.3.6.1 메인 바디 설계

메인 바디 설계 시 모양, 바퀴 기둥 끝부분과 벽면 사이 각도, wheg 가장자리의 곡면, 바퀴 가장자리 들 사이 빈 공간의 크기, 바퀴의 지름을 고려하였다.

메인 바디는 사각형의 구조를 가지고 이는 벽면 부착 시 바퀴의 구조적인 형태로 인해 정지 상태를 유지하기 위해 서보모터가 부담해야 하는 토크를 덜어주게 되는 이점을 지니고 있다. 또한, 가장자리 간 의 간격은 지름 15mm 자석 2개를 사용할 것이기 때문에 간격은 30mm를 초과하게 설계하였다.



Fig. 15 Maximum height and angle between main body and wall

Wheg 메인 바디에 부착되어 벽면과 접촉하는 유연한 부분을 wheg sheet라고 한다. 부착된 wheg sheet 가 떨어지지 않은 상태에서 다음 sheet가 부착되도록 하기 위해서는 벽면과 평행한 0°보다 각이 커야한 다. 본 설계에서는 10.5°의 각을 부여하였다. wheg 가장자리의 곡면은 wheg 기둥의 지지를 통해 회전할 때 연속적인 움직임을 부여하기 위해 곡면으로 설계하였으며, 벽면상에 존재할 수 있는 장애물을 극복 할 수 있도록 바퀴 사이 빈 공간을 설계하였다. 위 설계를 종합하여 바퀴의 지름은 108mm으로 설계하 였다.

2.3.6.2 TPU Sheet 설계

TPU 시트는 자석을 고정하고 유연성을 이용하여 벽면에서 기체가 떨어지지 않게 하는 부분이다. 자석 과 바퀴 간의 결합 방법은 다음과 같다. TPU 소재의 유연함과 탄성을 이용하여 위로 올라갈수록 좁아지 는 로프트 형태의 Fig. 16 자석 고정부에 자석을 밀어 넣어, 추가적인 접착제가 없더라도 자석이 안정적 으로 위치할 수 있도록 한다.



Fig. 16 TPU Sheet

TPU 시트는 직접적으로 벽면과 닿는 부분으로 미끄럼 하중을 견뎌야 한다. 이는 표면의 상태별로 상 이하다. 표면이 비교적 매끈한 경우, 감압 접착제 또는 건식 접착제를 이용하고 표면이 거친 경우, 가시 나 갈고리같은 표면이 거친 소재를 시트에 부착하는 것이 효과적이다.⁽⁹⁾ 우리는 미끄러운 표면이지만 마 찰력을 증가 시키는 사포를 이용해 미끄럼 하중을 견디도록 한다.

2.3.6.3 자석 선정

드론의 바디가 벽에 부착하기 위해선 중력에 의한 관성 모멘트를 극복할 수 있는 부착력이 필요하다. 바디 질량에 따라 자석이 감당해야 하는 질량은 아래와 같이 구한다. Fig.17는 계산⁽¹⁰⁾에 사용한 자유물 체도를 나타낸다.



Fig. 17 Free Body Diagram of drone

$$m_1 = -W\sqrt{a^2 + h^2} \times \cos(\pi - \theta^\circ - \tan^{-1}(\frac{h}{a}))$$

= $-W\sqrt{0.381^2 + 0.111^2} \times \cos(\pi - 90^\circ - \tan^{-1}(\frac{0.111}{0.381}))$
= $1.76 \, kg$

N: normal force applied to the front wheel-legs [N]
 T: tangential force applied to the front wheel-legs [N]
 h: distance between wall and center of gravity [m]

a: The distances from the center of mass to the equivalent centers of force of the front and rear feet [m]

W: weight [N] m_1 : mass that magnet can handle [kg]

자석과 표면 사이의 거리가 자석의 두께에 비해 얇으므로, $F = \frac{B^2 A}{2\mu_0}$ 이론식을 사용한다. MISUMI사 의 네오디뮴 카탈로그를 통해 가우스 자속 밀도가 3,100G~3,300G의 크기를 가진 직경 15mm, 두께 5mm 인 원형 자석을 선정하고 다음 식⁽¹¹⁾을 통해 자석 1개당 들 수 있는 무게를 도출한다.

$$\begin{split} m &= \frac{B^2 \times A}{2\mu_0 \times g} = \frac{0.31^2 \times \frac{\pi}{4} \times 0.015^2}{2 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 9.81} = 0.69 \, kg \\ m \times n &= \frac{B^2 \times A}{2\mu_0 \times g} \times n = \frac{0.31^2 \times \frac{\pi}{4} \times 0.015^2}{2 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 9.81} \times 4 = 2.76 kg \\ \mathbf{F} : \text{force} \end{split}$$

A : the cross-section of the area of the pole in square meters B : the magnetic induction exerted by the magnet μ_0 : the permeability of a vacuum

앞부분 wheg가 회전하면서 부착될 수 있는 최소 자석의 개수가 4개이므로 2.76kg으로 계산된다. 이는 이론값이므로 검증을 위해 실험을 진행하였다. 저울을 통해 10회 부착력을 측정결과 평균 0.65kg으로 이 론값과 0.04kg 차이를 보였다. 즉, 최적의 자석 개수는 3개로 2.07kg을 감당하는 것이지만, 바퀴에 불균 일하게 자석을 설치할 경우, 각각의 바퀴의 RPM에 영향을 주어 구동에 악영향을 주게 된다. 그러므로 최적의 자석 개수는 0.65kg×4 = 2.6kg의 질량을 부담할 수 있는 4개가 적절하다.

2.3.6.4 구동부 모터 선정

구동부의 RPM이 높으면 wheg 구동 시 위아래로 진동이 발생해 시설물 점검 결과에 영향을 미칠 것 으로 판단한다. 따라서 모터의 구동 속도보다는 토크를 바탕으로 모터를 선정한다.

중력에 의한 관성 모멘트로 인해 모터에 요구되는 토크는 다음 식과 같다.

 $T_1 = 2.0 kg \times 9.81 m/s^2 \times h_1 = 2.0 kg \times 9.81 m/s^2 \times 11.115 \, cm = 217.78 \, \textit{N}^* \, cm$



Fig. 18 Wall attachment by Wheg & Center of mass

모터가 2개이므로 모터 1개가 부담해야 하는 토크는 다음과 같다. 217.78 N*cm/n = 217.78 N*cm/2 = 108.89 N*cm



Fig. 19 Measuring the force of magnetic

자석의 부착력에 의해 모터에 요구되는 토크는 Fig. 19의 실험적 측정으로 도출하였다. $r \times (m_{measure} - m_{wheg}) \times g = 4.25 cm \times (0.975 kg - 0.051 kg) \times 9.81 m/s^2$ = 36.620 N^{*} cm

r : distance from surface to center of the wheg $$m_{measure}$$: Mass that measured by Hand scale

 m_{wheg} : wheg's mass

g: gravity

비행을 위해 무게가 가벼워야 하므로 무게 대비 고토크의 성능을 지닌 무한회전 서보모터를 구동부 모터 선정하였다. 토크 합에 해당하는 토크 성능을 낼 수 있는 무한회전 서보모터를 만들기 위해 기존 의 고토크를 가진 서보모터의 회로를 변경하여 무한회전이 가능하도록 개조하였다. Fig. 20은 서보모터 를 개량한 사진과 그 회로도를 나타낸 것이다.



Fig. 20 (a) Servo motor using potentiometer (b) Servo motor using a resistor

서보모터는 가변저항이 존재하며 기어가 회전하며 가변저항이 같이 회전함에 따라 V_{out} 에 걸리는 전 압이 달라지는 원리로 각도를 제한한다. 각도제한 없이 서보모터를 사용하기 위해 Fig. 20 회로도와 같 이 저항을 배치하게 된다면 V_{out} 에 일정한 전압이 걸려 무한회전이 가능하게 된다.

해당 서보모터는 20kg 질량을 1cm 거리에서 들 수 있는 성능을 가지고 있다. 위에서 요구되는 토크인 38.642 *N***cm* + 108.89 *N***cm* = 147.532 *N***cm*를 충족하는 토크를 지니고 있으므로 구동부 서보모터 조 건을 충족한다.

2.3.6.5 바퀴 고정부 설계

바퀴 고정부는 Fig. 21과 같이 서보모터의 기어와 서보모터 혼을 볼트로 결합, 바퀴축은 원기둥형태 가 아닌 육각기둥 형태로 토크 전달 시 내부에서 바퀴 축이 헛돌지 않도록 설계하였다. 바퀴 축에 wheg 를 삽입한 뒤, 바퀴 커버를 볼트로 고정해준다. 설계를 통해 바퀴가 안정적으로 서보모터의 토크를 전달 받을 수 있다.



Fig. 21 Wheg fix parts

2.3.6.6 구동부 프레임 설계

드론 높이의 경우, 앞서 선정한 10inch 프로펠러로 인해 10inch / 2 = 5inch = 127mm 이하의 높이 이 하로 낮추지 못한다. 또한, 표면의 장애물과 간섭하지 않도록 바닥과 바퀴의 중심 간 최소 높이인 40.016 mm를 추가하여 높이는 127 + 40.016 = 167.016 mm로 Fig. 22 (a)와 같이 설계하였다. 또한, 틸트 부 서보모터가 회전하며 발생하는 프로펠러의 회전반경에 닿지 않도록, 바디정면 기준 좌우 각각 최대 116.815mm 이내에 바퀴부가 존재하도록 설계하였다. 뒤쪽 다리 부분은 Fig. 22 (b)와 같이 뒷 구동부 다 리와 커버 사이에 베어링이 위치하도록 하여 뒷바퀴가 마찰의 영향을 적게 받으며 회전할 수 있도록 설 계하였다. 또한 뒤쪽 프로펠러와 간섭이 없도록 설계하였다.



(a) (b) Fig. 22 (a) Front leg of frame (b) back leg of frame

2.3.7 소프트웨어 설계

오픈소스 자동 조종 시스템인 Pixhawk4(PX4)를 통해 드론의 비행을 제어하였다. PX4는 시뮬레이터 프 로그램으로 PX4 SITL (software in the loop)를 지원하며 이를 통해 알고리즘 및 안정성 점검이 가능하다. 그 중 PX4가 권장하는 오픈 소스 3D 로봇 시뮬레이터인 Gazebo를 사용하였다. PX4와 Gazebo는 ROS(Robot Operating System)기반 플러그인을 통해 통신 프로토콜 MAVLink로 통신하여 SITL을 실행한 다. Fig. 23은 시뮬레이션의 데이터 흐름을 나타낸다.



Fig. 23 Data flow of simulation

드론의 소프트웨어를 설계하기 위해 사용한 개발환경은 Fig. 14와 같다. Table.14 Development environment

소프트웨어	버전
Ubuntu	18.04 (Bionic Beaver)
ROS	Melodic
Gazebo	Gazebo9
Q-Groundcontrol	Daily 21-06-13
VisualStudio Code	1.59.0



Fig. 24 Explanation of Pitch, yaw, roll

Fig. 24는 드론에 가해지는 힘과 자세를 나타내는 pitch, yaw, roll을 나타낸다. 본 드론을 제어하기 위 해 전방의 모터는 지면과 수평해야 한다. 제어기는 센서로 Pitch각을 인지하여 서보모터 제어를 통해 전 방의 모터마운트들이 지면과 수평이 유지되도록 한다.

앞서 설계한 드론의 모델링을 시뮬레이션에 사용하기 위해 Solidworks의 URDF exporter를 사용하여 질 량, 무게중심, 링크와 조인트의 특성 등 로봇의 물리적 특징을 ROS와 통합하는데 필요한 URDF(Unified Robot Description Format) 파일로 변환한다. 이를 Gazebo 명령어를 통해 SDF 파일로 변환시키고 모터, 통신, 센서 등 구동에 필요한 플러그인을 추가했다.

플러그인은 C++ 라이브러리로 Gazebo에서 개체 이동, 추가 및 제거, 센서 데이터 접근 등 다양한 일 을 수행할 수 있다. 본 SDF 파일에는 Table.15와 같은 플러그인을 사용하였다.

플러그인 코드	플러그인 코드 설명
<plugin <br="" name="front_left_top_motor_model">filename='libgazebo_motor_model.so'></plugin>	플러그인이 제어할 모터의 조인트와 링크를 지정하고, 회전방향을 결정하며, 모터의 통신 번호를 할당하고, 통신으로 모터의 속도를 제어한다.
<plugin <="" name="mavlink_interface" td=""><td>IMU를 포함한 다양한 센서, QGC, 모터 채널과</td></plugin>	IMU를 포함한 다양한 센서, QGC, 모터 채널과
filename='libgazebo_mavlink_interface.so'>	통신할 수 있도록 한다.
<plugin <="" name="gazebo_imu_plugin" td=""><td>관성 측정 장치를 추가하며 가속도나 각속도를</td></plugin>	관성 측정 장치를 추가하며 가속도나 각속도를
filename='libgazebo_imu_plugin.so'>	측정한다.
<plugin <="" name="magnetometer_plugin" td=""><td>자력계를 추가하며 주위 자기장의 변화를</td></plugin>	자력계를 추가하며 주위 자기장의 변화를
filename='libgazebo_magnetometer_plugin.so'>	측정한다.
<plugin <br="" name="barometer_plugin">filename='libgazebo_barometer_plugin.so'></plugin>	기압계를 추가하며 주위 기압변화를 측정한다.
<plugin <="" name="groundtruth_plugin" td=""><td>상태 추정기를 추가하며 기체의 현재 상태를</td></plugin>	상태 추정기를 추가하며 기체의 현재 상태를
filename='libgazebo_groundtruth_plugin.so'>	알 수 있게 한다.

Table.15 Plugin

검증하고자 하는 Airframe과 Mixer를 CMake 파일에 추가하여 올바르게 빌드 될 수 있도록 하고, PX4 Gazebo SITL 폴더에 SDF 파일 및 Mesh 파일을 추가한다. 이후 Fig. 25와 같이 기체를 제어할 수 있는 지상국 시스템인 Q-Groundcontrol를 사용하여 Gazebo에서 기체의 움직임을 보며 기체와 통신 및 조종한 다. 비행을 마친 후 PX4 빌드 파일에 있는 로그 파일과 로그 분석 프로그램을 사용하여 비행을 평가할 수 있다.



Fig. 25 QGC, Gazebo Communication

PX4는 파라미터와 모터 번호를 지정하는 Airframe, 조종 명령을 구동기 명령으로 변환하는 Mixer와 제 어기를 통해 움직임이 결정된다.

우리는 두 개의 서보모터를 이용하여 자세를 변경하고, 수직 또는 임의의 각도로 호버링하는 드론을 만들고 자 한다. 하지만 기존 Airframe에는 우리가 원하는 형상이 존재하지 않아 새로운 Airframe을 제작해야한다. 따라서 VTOL Duo Tailsitter를 기반으로 새로운 Airframe을 제작하였다. VTOL은 멀티콥터 모드인 MC 모드와 고정익 모드인 FW 모드로 이루어져있고, Tailsitter는 수직으로 이륙하여 자세를 변경하여 수평으 로 비행하는 VTOL을 뜻한다. VTOL은 MC(Multi-copter)모드로 비행하다가 일정 피치각을 넘거나 모드 변경 조작을 실시하면 FW(Fixed-wing)모드로 전환하여 자세를 변경한다. VTOL Duo Tailsitter를 기반으로 Airframe을 제작하기 위해 변경해야 하는 파라미터는 모터의 개수, elevon과 유속센서의 유무이다. 또한 elevon을 통한 자세 제어를 서보모터로 대신하기 위해 Table.16과 같이 믹서를 설정했다.

Airframe parameter	설명
VT_MOT_COUNT 4	VT 모드일 때 추력을 제공하는 모터 숫자
VT_MOT_ID 1234	VT 모드일 때 추력을 제공하는 모터 채널 번호
VT_ELEV_MC_LOCK 0	MC 모드에서 elevon을 사용하지 않음
CBRK_AIRSPD_CHK 162128	우소세서르 체크차지 아으
airspeed	기득센지를 제그이지 않는
FW_ARSP_MODE 1 airspeed	센서가 없는 기체를 위해 유속센서 비활성화

Table.16 Airframe plugin

VTOL Duo Tailsitter는 2개의 모터를 사용하지만 원하는 기체는 4개의 모터를 사용하므로 파라미터인 param set-default VT_MOT_COUNT 4, param set-default VT_MOT_ID 1234를 이용하여 FW모드일 때 전방 의 모터 4개를 사용하도록 한다. 또한 기체 Yaw와 추력을 합산하는 믹서를 작성하여 모터를 제어한다.

Elevon을 서보모터에 할당하여 pitch를 제어한다. param set-default VT_ELEV_MC_LOCK 0를 이용하여 MC모드일 때 elevon을 사용하지 않는다. elevon의 믹서는 Aux 채널에 할당하고 VT모드일 때 pitch를 제 어하도록 한다. 유속센서 없이 기체를 작동시키기 위해 param set-default CBRK_AIRSPD_CHK 162128과 param set-default FW_ARSP_MODE 1를 사용해 유속센서 제어기를 비활성화 한다.

3. 결과 및 토의

3.1 최종 시제품 및 작동원리

우리는 드론의 하드웨어와 소프트웨어를 설계하며, 드론의 형상을 결정하고 벽 이동에 적합한 드론의 프레임을 응력해석과 역학적 수식을 바탕으로 설계하였다. 또한 곤충모방 바퀴를 설계하여 벽 부착 및 이동을 원활하게 하였으며, 이를 구현하기 위해 TPU 3D Printing을 통해 유연한 구조를 제작, 수직으로 벽을 올라갈 수 있는 벽면 부착 메커니즘을 제작하였다. 이를 통해 벽면 이동 및 부착이 가능한 시제품 을 제작하였다. 설계에 따른 최종 결과물은 Fig. 26과 같다.



Fig. 26 Wall climbing drone using wheel-leg & Tilt Rotor mechanism







Fig. 27 (a) Horizontal hovering (b) Changing attitude (c) Vertical hovering (d) Attaching to the wall

드론의 작동순서는 Fig. 27과 같다. (a) 수평 상태로 이륙하여 호버링 또는 원하는 장소로 이동 (b) 서보모터 틸트를 통한 자세 변경 (c) Pitch각 인식을 통해 서보모터 제어 수직 호버링 (d) 벽면 부착 및 이동

일련의 과정을 통해 시설물 점검을 수행할 수 있도록 한다. 탈착은 부착의 역순이다.





(b)

Fig. 28 Tilting parts (a) Before tilting (b) After tilting

틸트부는 드론의 자세제어를 위한 부분이다. 서보모터를 통해 틸트를 구현하였으며 틸트 전 Fig. 28 (a)와 같이 드론 프레임과 수평으로 위치하며, 틸트 후 Fig. 28 (b)와 같은 드론 프레임과 수직인 형상이 다. 틸트부는 설계와 동일하게 모터, 모터 마운트, 서보모터 혼, 서보모터로 구성된다. 모터마운트에는 모터가 상하로 배치된 Co-axial을 구현하였다.



Fig. 29 (a) Side view of Wheg (b) Front view of Wheg

구동부는 벽면 부착 및 이동을 위한 부분이다. 옆면에서 보았을 때 Fig. 29 (a), 앞면에서 보았을 때 Fig. 29 (b)인 형상을 가진다. Wheg 바퀴는 단단한 소재인 ABS로 이루어진 바퀴 몸통과 유연한 TPU로 이루어진 바퀴 시트로 구성된다. 바퀴를 회전시키기 위해 바퀴를 고정하는 바퀴 축과 커버, 서보모터와 연결하는 서보모터 혼을 제작하여 서보모터와 연결하였고 안정적인 벽면 부착 및 이동을 확인하였다.



Fig. 30 Wheg sheet

Fig. 30과 같이 접착제 없이 TPU의 로프트 구조 설계로 자석이 고정될 수 있음을 검증하였다. 자석은 벽면 부착 및 이동 중에도 안정적으로 위치하며 상황에 따라 자력이 다른 자석으로 교체도 용이하다. 또한 바퀴가 회전하며 시트와 프로펠러의 간섭이 없음을 확인하였다.



Fig. 31 Wheg machanism verification by Wheg model

설계한 Wheg 바퀴의 벽면 부착, 이동 능력을 검증하였다. 벽면에 부착 후 바퀴가 회전하는 메커니즘 은 Fig. 31과 같다. 바퀴는 벽면 부착 후 바퀴부 서보모터가 작동하며 회전한다. 회전 후 다음 시트가 벽 면과 근접하면 자석 인력에 의해 회전이 유도되어 시트가 벽면과 부착된다. 일련의 과정이 반복되며 벽 면 이동시 적어도 하나의 시트가 벽면에 부착됨을 확인하였다.



(a)

(b)

Fig. 32 Attached drone (a) Side view of attached drone (b) Front view of attached drone

3.2 최종 설계 결과물의 장단점

본 설계에는 크게 3가지의 장점이 있으며, 자세를 전환하고 벽에 부착 및 이동하는 드론을 개발함에 의의를 지닌다.

첫째, 벽면 부착 및 이동이 가능하다. 휠·레그 구조 바퀴와 벽면 이동 메커니즘 설계를 통해 벽면 부 착과 이동이 구현하였다. 벽면 부착을 통해 안정적인 상태에서 시설물을 정밀 점검 할 수 있다.

둘째, 자세제어가 가능하다. 자세제어가 가능한 드론을 통해 다양한 각도의 벽면에 부착이 가능하며 좁은 틈을 가진 구조물 통과가 용이해진다.

셋째, 드론과 벽면 부착 로봇의 장점을 모두 사용가능하다. 비행을 통해 대략적인 검사를 실시하고, 정밀한 검사가 필요한 부분을 선정할 수 있어 비행 및 부착 후 정밀한 검사가 가능하다. 이를 통해 검 사 시간을 절약할 수 있어 효율적이다.

단점으로는 2가지가 있다.

첫째, 기동시간이 짧다. 모터를 많이 사용하므로 소모되는 전류도 많다. 기체가 무거울수록 소모되는 전류 또한 많아지므로 재료 변경을 통해 드론의 질량을 감소시키거나, 유선 배터리 연결을 통해 문제를 해결할 수 있다.

둘째, 본 드론은 3D 프린터로 제작되어 무게 및 강도에 한계가 존재한다. 추후 카본을 이용하여 제작 한다면, 경량화 및 프레임 안정성 향상의 효과를 얻을 수 있을 것이다.

3.3 활용방안 및 기대효과

Table.17 Expecting effect

시설물 점검	정찰, 감시 임무 수행	미래 드론 기술에 기여
 노후 시설물 증가로 인한 사 회적 문제 해결 비용 감소, 시간 절약, 한 번 에 여러 탱크 검사 가능 적은 인력으로 더 많은 검 사 가능 벽면에 부착, 이동하여 검사 가 이루어지기 때문에 더욱 정 밀한 검사 가능 	 구조물에 드론이 부착 가능 함에 따라 장기간 은닉 정찰 및 감시 임무 수행 가능 드론은 군집비행이 가능함에 따라 유동적으로 전장의 상황에 맞게 원하는 감시구역 설정 및 감시 가능 사물 인식 및 추적기능을 추가하게 될 경우, 드론형 부비 트랩으로 발전 가능 	-오픈 소스인 PX4에 새로운 Airframe의 추가로 후속 연구 에 도움 -후속 연구를 통해 드론 기반 시설물 점검 시장의 확대 가능 성 증가 및 경제적 파급효과 초 래

보도자료에 따르면 SK이노베이션은 울산CLX 원유저장탱크 정기검사에 드론을 도입하여 탱크 30기에 대한 검사비용이 9억원에서 5천만원 수준으로, 기당 검사비용이 최대 1억원에서 2~3백만원 수준으로 줄 어들 전망이라 말한다.⁽¹²⁾ 연구를 통해 벽면 착륙 및 이동 기술이 개발된다면 이보다 더 많은 경제적 효과를 불러올 것으로 기대한다.

4. 결론

증가하는 시설물 점검 수요를 해결하기 위해 벽 부착 및 이동이 가능하며 자세가 전환되는 드론을 개 발하였다.

기존 드론은 비행을 통한 시설물 점검만 가능하여 미세한 균열을 판단하는 정밀 진단에 적용하기 어 려움이 있다. 본 논문은 이런 문제를 해결하기 위해 드론을 개발하기 위해 드론의 형상을 결정하고, 부 품을 선정, 형상에 적합한 프레임을 설계, 자세 전환을 위한 틸트부 설계, 벽면 부착 및 이동을 위한 바 퀴부 설계, 드론 구동을 위한 소프트웨어 제작을 통해 시설물 점검 시제품을 제작하였다. 이후 다음과 같은 결론을 내렸다.

(1) 설계와 시제품 제작을 통해 틸트부로 자세 전환이 가능하고, 휠-레그 바퀴의 안정적인 이동을 확 인하여 벽면 부착이 가능한 틸트 구조 자세 변환 드론의 가능성을 확인하였다. 후속 연구를 통해 발전 가능하다고 판단한다.

(2) 휠-레그 바퀴를 사용해 다양한 철제 벽면에서 장시간 부착 및 안정적 이동 가능함을 확인하였다. 이를 통해 프로펠러를 통한 비행 점검보다 안정적이며 정밀한 시설물 점검이 가능할 것으로 기대한다.

(3) 시설물 점검 시 경비 및 시간이 절감되고, 적은 인력으로 더 많은 검사가 가능하며, 작업자의 안전 사고를 예방할 수 있어 큰 경제적, 산업적 효과가 있을 것이라 기대한다. 본 연구를 통해 드론을 통한 시설물 점검 분야의 발전에 도움을 줄 수 있을 것이라 판단한다.

후 기

논문 작성에 많은 도움을 주신 안형준 교수님께 진심으로 감사드립니다. 설계와 시제품 제작 환경을 지원해준 숭실대학교 지능기전시스템 실험실에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 시설물통합정보관리시스템 (FMS), "시설물통합정보관리시스템 (FMS),",https://www.fms.or.kr/com/mainForm.do, 2021.09.11.
- (2) 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법, 제3장, 제1절, 제11조
- (3) 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법, 제3장, 제1절, 제12조
- (4) WANCHEOL MYEONG, HYUN MYUNG, 2019, Development of a Wall-Climbing Drone Capable of Vertical Soft Landing Using a Tilt-Rotor Mechanism, IEEE Access (Volume:7), 4868-4879
- (5) Kipris, "특허정보넷 키프리스", http://www.kipris.or.kr, 21.09.12
- (6) 명현, 명완철, 2019, 특허출원 제 10-2019-0148451, the Korean Intellectual Property Office
- (7) Github, "Airframes Reference", https://github.com/PX4/PX4-Autopilot/edit/master/Tools/px4airframes/markdownout.py, 2021.09.11.
- (8) 항공안전법 시행규칙, 제10장, 제306조
- (9) Kathryn Daltorio Mini-Whegs, Andrew D. Horchler, 2009, Mini-Whegs TM Climbs Steep Surfaces Using Insect-inspired Attachment Mechanisms, Int. J. Rob. Res, 28, 285-302
- (10) Hwa-cho Yi, Eun-chan Kim, Seung-chul Han, 2002, Guideline for the Design of Wall-Climbing Mobile Robot Using Permanent Magnetic Wheels, 한국정밀공학회 학술발표대회 논문집, 548-553, pp. 6
- (11) Cardarelli, François, 2008, Materials Handbook: A Concise Desktop Reference (Second ed.). Springer, ISBN 9781846286681, p. 493
- (12) Sk이노베이션,"장충체육관 크기 원유저장탱크 드론 검사 도입…, 스마트 플랜트 성과", http://www.skinnovation.com, 20.05.13