

## 육상 및 공중에서 운용 가능한 무인기의 개발

Hemisphere wheel passive wheel을 이용한 육상 및 공중에서  
동시 운용 가능한 쿼드로터 형상 설계 및 제작

과제번호 2022-8

### 01 서론

#### 1. 서론

UAV는 Unmanned Ariel Vehicle의 줄임말로, 조종사가 비행체에 직접 탑승하지 않고 지상에서 조종하거나, 사전 프로그램 된 경로에 따라 자동 혹은 반자동으로 비행하는 무인 기체를 뜻한다. 현대에는 인공지능을 탑재하여 자체 환경판단에 임무를 수행하는 비행체도 개발되고 있다.

UAV의 한 종류인 쿼드로터(Quadrotor)는 충전식 배터리를 이용하여 4개의 전동모터로 구동하는 회전익 무인기를 말한다. 고정익 항공기와는 달리, 활주로가 없어도 제자리에서 자유롭게 이륙, 착륙을 할 수 있다는 점, 제자리 비행(Hovering)과 3축 방향 모두 자유로운 비행이 가능하다는 점, 가벼운 무게와 높은 경제성 등이 큰 장점으로 꼽힌다. 이러한 장점 덕분에, 여러 UAV 중에서도 민간, 군사 분야를 넘나들며 다양하게 활용되고 있으며, 이에 발맞춰 중요성 또한 점점 커지고 있다.

위 상기한 특성들로 인해 Quadrotor는 군에서 활발히 사용되고 있다. 그 예로 이라크 군사작전

및 러시아-우크라이나 전쟁에서도 적군 공습, 정찰, 감시 등의 임무를 수행한 것으로 알려져 있다[1]. 해외의 사례 뿐만 아니라 우리 군에서도 여러 방면에서 활용되고 있다. 육군에서 진행중인 Army TIGER 4.0 사업에서 4차 산업혁명의 주역인 AI기술과 더불어 드론 기술을 군에 도입하려는 움직임이 활발히 일어나고 있다[2]. 그리고 육군에서는 드론 봇 전투단을 만들어 드론 기술을 전문적으로 다루고 훈련할 수 있는 환경을 조성함과 동시에 전문 드론 정비병을 모집하여 드론이 실전투력으로 운용될 수 있도록 하는 등 여러 노력을 기울이고 있다[3]. 공군에서는 지능형 스마트 비행단 구축을 진행하는 사업을 추진하여 기지방호에 활용하는 방안을 검토 중에 있으며[4], 해군에서는 해상 드론을 활용해 조난자 탐색구조 훈련을 실시하는 등 후방 작전에도 적극적으로 도입하고 있다[5].

하지만 후술할 내용에서 나오듯이, 군 내의 드론 도입에 있어 한계점들이 분명하고, 실전에 투입되는 UAV는 대부분 고정익 형상을 띠고 있어 크기가 크다[6]. 이로 인해 속도가 중요시 되는 소부대 전투에서 제한되는 기동성으로 인해 활용되기

가 어렵고, 드론을 활용한 감시 및 정찰 활동이 불가피할 경우, UAV를 소지하고 있는 상급부대에 후방지원을 요청하여 첩보를 받고 있는 실정이다. 이렇게 후방지원에 의존하는 요소가 많아지면 작전 및 전투를 제때 진행하는데 차질이 빚어질 변수가 많아진다. 더불어 상공에서 자료를 관측하게 되면 고성능의 카메라를 사용해야 하므로 비용적인 측면에서도 고가의 가격을 형성하게 된다.

이러한 현상에 주목하여 본 조는 소부대 전투 상황에서 즉각 활용가능한 드론을 만드는 것을 목표로 연구를 진행하였다. 기존에 고안되었던 passive wheel이 가지고 있는 문제들에 주목하여 새로운 형상을 고안하였다. 또한, 제안하는 passive wheel을 활용해 육상과 공중 모두에서 침투가 가능하도록 하여 기동의 제한을 없애고 저가 생산을 가능케 하고자 했다.

## 2. 선행연구 분석

상기한 쿼드로터의 장점에도 불구하고, 배터리 시스템의 한계로 운용거리 및 비행시간이 짧으며 충돌 시 구조적 안정성이 낮아 여러 지형에서의 활용은 제한되고 있다. 이러한 쿼드로터의 단점을 보완하기 위해 다양한 선행연구들이 진행되어왔다.

Hybrid Terrestrial and Aerial Quadrotor (HyTAQ)는 공중에서 쿼드로터의 이동이 에너지 소비가 크다는 점에서 착안해, 동일한 동력(Actuator)으로 육상에서도 이동할 수 있도록 Rolling cage를 장착했다. 실험 결과, 공중에서만 운용되는 시스템에 비해 HyTAQ는 4배 이상의 운용거리와, 6배 이상의 운용 시간의 이점을 가질 수 있었다[7]. UAV with a Passive Rotating Spherical Shell(PRSS)는 재난 현장에서 장애물의 방해나 이착륙의 어려움을 극복하기 위해 구형

의 Spherical Shell과 3축 회전 짐벌(Gimbal)을 장착해 생존성을 높였다[8]. 상기한 연구를 바탕으로 Spherical shell의 모양을 Geodesic dome 중 풀러렌(Fullerene) 구조로 하는 것이 최적이라는 것을 밝혔다. 더불어, 구조를 만드는 데 필요한 연결부(joint)에 에어포일(Airfoil) 형상을 적용해 항력을 감소시켜 비행성능을 개선할 수 있었다[9].

그럼에도 불구하고, 해당 형상을 적용함으로써 얻는 부가적인 단점 또한 존재한다. Rolling cage를 장착한 경우 롤 기동만 수행할 수 있기 때문에 에너지 소비가 적은 육지에서는 회전과 같은 기동을 하기 어렵고 오직 직선운동만 가능하다. Passive Rotating Spherical Shell (PRSS)의 경우, 다수의 Joint에 하중이 집중되며, 하나의 Joint가 손상되었을 시 전체 형상의 내구성에 많은 영향을 미친다. 더불어 다수의 조인트에서 발생하는 요란(Wake)들이 합쳐지며 전체 항력에 추가되는데, 이는 UAV만 있는 항력의 2~2.5배의 크기이다.

본 연구에서는 쿼드로터 본래의 한계점인 구동 시간을 연장하고, Hemisphere shell의 형상을 적용해 문제점을 해결하고자 한다.

## 02 본론

### 1. 본론

#### 1.1 형상 설계

본 연구는 Quadrotor에 두 개의 Hemisphere shell로 이루어진 Passive wheel을 장착한 형태의 무인기를 설계 및 제작하였다. Hemisphere shell 구조로 인해 안정적인 저고도 비행이 가능하며, Passive wheel의 Rolling을 통해 험난한

지형에서도 지면에 접촉한 채로 육상에서 원활히 이동할 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 차별화된 Passive wheel 설계 및 제작을 통해 내구성 확보, 비행 시 안정성 증대 그리고 항력에서의 이점을 유지하는 것을 목표로 하였다.

Passive wheel의 대표적인 형상으로는 Spherical shell, Cylindrical shell (Rolling Cage) 두 종류가 있다. Spherical shell은 정다각형 Polygon이 조합된 형태로 구성하는 방법으로, 대칭적인 구조로 인해 충돌 시 높은 안정성을 유지한다는 강점을 가진다. Cylindrical shell은 비교적 단순한 형태로 제작이 간단하고, 높은 내구성을 가진다는 장점이 있다.



Fig 1. Inventor 2023을 이용해 설계한 형상

시각화를 위해 Ring spoke를 한 쌍만 연결했고 Hemisphere passive wheel의 회전방향은 화살표로 표기했다.

Spherical shell이 가지는 안정성의 이점을 유지하며 Cylindrical shell의 높은 내구성과 제작에서의 편리함을 덧붙이고자 두 구조를 절충한 형상인 Hemisphere shell을 고안하였다. Hemisphere shell은 반경이 다른 여러 동심원을 중첩한 형태로 구성하였다. Ring 형태를 각각

제작하여 회전축 및 Spoke로 연결하는 방식을 채택하여 제작이 용이하도록 하였고, 4개의 서로 다른 반경을 가진 Ring들이 연결된 Envelope는 여전히 Sphere의 곡률을 가지도록 디자인하여 대칭성으로 인한 안정성 및 항력 감소 효과를 유지할 수 있도록 설계하였다. 무인기는 두 개의 독립적인 Hemisphere shell이 가운데 메인 회전축을 기준으로 Quadrotor를 감싸고 있는 형태로 구성되어 있다. 베어링을 통해 각 Shell이 독립적으로 회전할 수 있으며, 이축회전 또한 가능하므로 Pitching과 Yawing을 통해 얻는 제어에서의 이점이 존재한다. 이는 충돌 시 안정성을 높이는데 큰 기여를 할 것으로 기대된다. 각 Ring frame의 내부에는 직선형 spoke로 바퀴살과 같은 형상으로 quadrotor의 메인 축과 연결하고, ring frame 사이로는 곡선형 spoke로 연결하여 하중을 지지하고 충격을 분산할 수 있도록 하였다. 기존에 제시된 Passive wheel에 비해 높은 내구성을 가짐을 응력 실험을 통해 확인하였다.

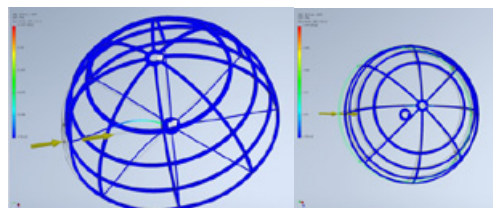


Fig 2. Von mises 응력 시뮬레이션 결과  
(좌 : 직선형 Spoke 연결,  
우 : 직선형 Spoke 연결하지 않은 형상)

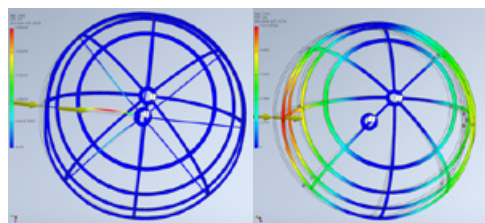


Fig 3. Von mises 응력 시뮬레이션 y축 변위 결과  
(좌 : 직선형 Spoke 연결,  
우 : 직선형 Spoke 연결하지 않은 형상)

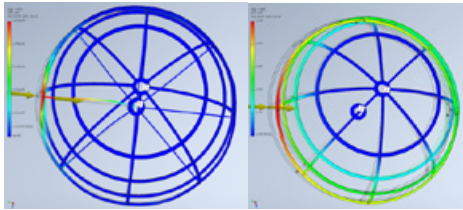


Fig 4. Von mises 응력 시뮬레이션 x축 변위 결과  
(좌 : 직선형 Spoke 연결,  
우 : 직선형 Spoke 연결하지 않은 형상)

직선형 Spoke를 연결하지 않았을 때와 Spoke를 연결하여 Hemisphere shell을 완성하였을 때, 두 가지 상황에 대하여 시뮬레이션을 통해 응력 실험을 진행하였다. Figure 1에서 직선형 Spoke가 연결된 경우, Shell에 응력을 가했을 때 충격이 Spoke로 분산되어 실제 Shell에는 응력이 매우 적게 부하됨을 확인할 수 있었다. 직선형 spoke가 연결되지 않은 경우에는 힘이 상대적으로 내구도가 약한 각 spoke간의 joint의 집중되는 경향을 보였다. 따라서, x축과 y축 변위는 직선형 Spoke가 연결되어 하중을 분산시키기 때문에 Shell의 변위가 작은 반면, 직선형 Spoke가 없는 경우 존재하는 y축 변위를 토대로 Shell에 뒤틀림이 발생하며, 전반적으로 x축 방향으로 Shell이 이동함을 확인할 수 있었다. 특히, x축 방향의 변위의 경우 직선형 spoke가 있는 경우에는 0.0004065mm의 미미한 변형이 발생했지만, 직선형 spoke가 없는 경우엔 최대 0.8723mm의 변형이 발생했다. 따라서, 직선형 spoke를 통해 구성한 바퀴살 형상이 충돌 및 육상 이동 시 효과적으로 충격을 분산시켜주며 전체적인 Shell의 내구도를 향상 시켜주는 것을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

## 1.2 시스템 구성



Fig 5. 좌 : quadrotor, 우 : Hemisphere shell

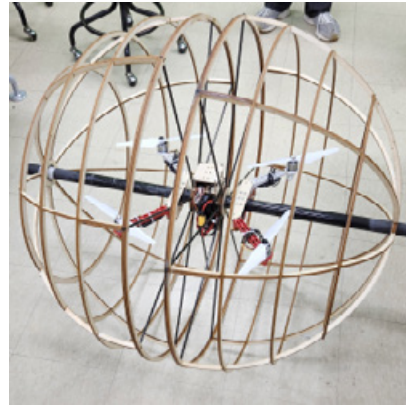


Fig 6. Hemisphere Passive wheel 결합한 Quadrotor

Quadrotor를 관통하는 중심축과 직선형 spoke는 카본 파이프를 사용하였고, 기본적인 프레임은 Resin, 2t 발사나무를 사용하였다. 3D printer를 이용해 작은 크기의 parts와 연결 부분을 제작하고 Hemisphere shell은 Laser cutter를 이용하여 출력 후 적층하는 방식으로 프레임을 제작하였다. 중심축인 Carbon pipe와 Hemisphere shell은 베어링을 통해 적은 마찰로 회전하도록 했다. 항전장비로 DJI 사의 NAZA M V2를 사용하였고 탑재된 PID 제어기를 이용하여 제어했다. 자세한 시스템 구성은 Table 1과 같다.

항전장비	Naza m V2
통신장비	Futaba r7008sb
모터	PolyTronics S2312 (920KV)
변속기	PolyTronics MR-X3 (40A)
배터리	EP Power 6s Lipo (2500mah)

Table 1. Quadrotor 상세 스펙



## 2. 실험 결과

### 2.1 육상 이동



Fig 7. 육상에서 주행중인 Quadrotor  
(좌 : 실내, 우 : 실외)

육상에서 2축회전을 통해 평면상을 자유롭게 이동할 수 있다. 실내와 같이 평평한 바닥 및 아스팔트 바닥과 같이 약간의 요철이 있는 공간에서도 자유롭게 이동할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

### 2.2 공중 이동



Fig 8. 공중에서 이동중인 Quadrotor  
(좌 : 실내, 우 : 실외)

일반적인 쿼드로터와 같이 공중에서 이동할 수 있다. 대기가 안정적인 실내와, 약간의 바람이 부는 실외 환경에서 3축 이동 및 호버링이 가능함을 실험적으로 확인했다.

### 2.3 장애물 주회



Fig 9. 육상에서의 전진 중 장애물 주회

육상에서 앞으로 전진하며 보도블럭과 같은 장애물을 통과하는 실험을 진행하였다. Hemisphere shell이 부드럽게 회전하면서 안정적으로 장애물 장애물을 통과할 수 있음을 확인할 수 있었다.



Fig 10. 공중에서의 전진 중 장애물 주회

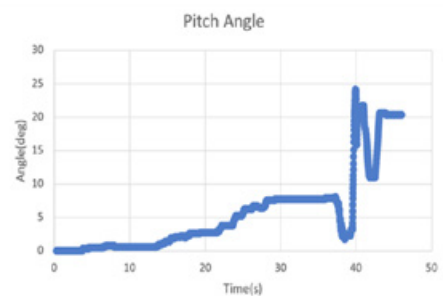


Fig 11. 공중에서 장애물 통과 시 pitch angle 변화

(가로축 : 시간(s), 세로축 : 각도(deg))

공중에서 직진하고 있는 상황에서 큰 장애물을 통과하는 실험을 진행하였다. 육상상황과 마찬가지로 Shell이 회전하면서 Quadrotor의 각도가 크게 변하지 않고 장애물을 통과할 수 있었다.

장애물에 부딪힌 37초부터 쿼드로터가 상승해야 하기에 Pitch각이 줄고, 다시 넘어가면서 pitch 각도가 상승함을 실험적으로 측정할 수 있었다. 이는 Figure 11 graph에서 확인할 수 있다. 최대 pitch 변화는 15도이며, 따라서, Quadrotor가 장애물을 안정적으로 통과함을 확인 할 수 있었다.

## 03 결론

### 1. 결론

본 연구에서는 2개의 Hemisphere shell 형상을 조합한 쿼드로터 시스템을 설계 및 구현하고 이를 실험적으로 검증하였다.

먼저, 제작한 하드웨어의 육상 기동, 공중 기동 운용 가능성을 실험적으로 확인하였다. 이는 육상 및 공중에서 동시 운용을 가능하게 함으로써 기존 쿼드로터와 비교하여 경로 선택의 제약을 받지 않으므로 낮은 피탐 확률을 요구하는 임무에 투입 가능할 것으로 사료된다.

다음으로, Von mises 응력 시뮬레이션을 통해 하드웨어의 구조적 강건성을 검증하였다. 응력 실험 결과 직선형 spoke를 활용한 Hemisphere passive wheel의 내구성 개선을 확인할 수 있었다.

기존 선행연구 형상들이 가지는 구조적 단점을 보완함으로써, 장애물 등의 외력이 작용하는 환경에서도 안정적으로 운용될 수 있는 하드웨어를 제시하였다.

육상 및 공중에서의 장애물 주행 성능 또한 검증하였다. 육상에서 보도블럭과 같은 장애물을 안정적으로 주행을 확인하였으며, 공중에서 전진 중 장애물을 통과하는 시나리오의 경우 쿼드로터에 IMU 센서를 부착하여 시간에 따른 pitch angle 변화 경향성을 측정하였다. 실험 결과, 쿼드로터

의 각도가 크게 변하지 않는 안정적인 제어를 통하여 충돌 시의 안정성 저하를 최소화하고, 공중에서 장애물을 주파할 수 있음을 검증하였다.

장애물 주파 성능과 더불어, 2축 회전이 가능한 Hemisphere passive shell은 1축 회전만이 가능한 기존 선행연구 형상에 비해서 뛰어난 장애물 회피 운용을 가능하게 한 것이다.

제시한 하드웨어의 경우 극한 환경서의 이륙 및 다양한 특수 작전(정찰 및 침투)에 적극적으로 활용 가능하며, 더 나아가 군 임무를 넘어서서 야산 고립 및 산불과 같은 재난 상황에서도 범용적으로 활용 가능할 것으로 예상된다.

### 2. 후기

본 연구는 과학기술전문사관 후보생 및 사관학교 생도를 대상으로 하는 제 8회 밀리테크 챌린지 연구 프로그램의 일환으로 수행되었습니다. 과학기술전문사관 지원센터로부터의 연구비 지원을 받아 진행되었습니다.

한국과학기술원 항공우주공학과 시스템 및 제어 연구실(ASCL Lab) 방효충(지도교수), 이동우, 이호형(연구멘토)의 연구 지도로 수행되었습니다. 연구 기간동안 멘토님들의 꾸준한 지도에 감사드립니다.

### 3. 부록

‘2022 한국항공우주학회 추계학술대회’ 포스터 발표 세션에서 본 연구결과에 대한 발표를 진행할 예정입니다.

## 04 참고문헌

- [1] 강한태, 「국방정책연구」 Vol. 35, No. 1, April 2019, pp. 7-33
- [2] 국방 tv. (2019. April 8). [나는 대한민국 군인이다]37회 육군 드론봇 전투단 1부. Retrieved October 05, 2020.
- [3] 병무청. 드론운용 및 정비병 모집. Retrieved October 05, 2020.
- [4] 연합뉴스. (2018. March 23). 드론으로 ‘항공기 조류충돌’ 막는다. Retrieved October 05, 2020.
- [5] 뉴시스. (2022. September 29). 해군, 해상 드론 활용 해상 조난자 탐색구조훈련 실시. Retrieved October 05, 2020.
- [6] 김재우 등 2명, 「미국의 군사용 무인항공기 진화적 개발 사례 분석: 전술/전략급 고정익 무인항공기 중심으로」, 『선진국방연구 Journal of Advances in Military Studies』 Vol. 3 No. 2, 2020, 17-46.
- [7] Kalantari, A., & Spenko, M. (2013, May). Design and experimental validation of hytaq, a hybrid terrestrial and aerial quadrotor. In 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (pp. 4445-4450). IEEE.
- [8] Mizutani, S., Okada, Y., Salaan, C. J., Ishii, T., Ohno, K., & Tadokoro, S. (2015, September). Proposal and experimental validation of a design strategy for a UAV with a passive rotating spherical shell. In 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 1271-1278). IEEE.
- [9] Salaan, C.J., Okada Y., Hozumi, K., Ohno, K., Tadokoro, S. (2016, October). Improvement of UAV's Flight Performance by reducing the Drag Force of Spherical Shell. In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 1708-1714). IEEE.