

스마트무인기 로터-드라이브 시스템 개발

이 글에서는 헬리콥터기와 같은 수직이착륙과 프로펠러기와 같은 순항비행을 가능하게 하는 스마트무인기의 핵심 시스템들로서 블레이드, 허브 및 로터 피치조종장치로 이루어진 로터 시스템과 엔진으로부터 로터 시스템까지 동력을 전달하는 드라이브 시스템에 대하여 간략히 소개하고자 한다.

스마트무인기에서 채택한 틸트 로터 비행체와 같은 수직이착륙 비행체에서는 추력발생부와 동력전달계통의 설계가 비행체 설계의 성패를 좌우하는 핵심적인 부분으로, 설계, 제작 및 조립에까지 많은 시간과 비용이 소요되며, 고유의 노하우 및 오랜 경험이 요구되는 부분이다. 특히 틸트 로터 비행체는 로터축을 포함하고 있는 파일런부를 수직 및 수평으로 상황에 맞게 가변시켜 수직이착륙 및 순항비행을 하므로, 블레이드는 헬리콥터의 로터 역할과 프로펠러기의 프로펠러 역할을 동시에 효율

적으로 해야 하며, 허브, 로터 피치조종장치 및 드라이브 시스템은 이러한 블레이드를 원활하게 구동시키고 안정적으로 조종하도록 설계하여야 한다. 로터 시스템은 크게 로터 블레이드, 허브, 피치조종장치로 나눌 수 있으며, 이러한 시스템들은 드라이브 시스템을 비롯한 비행체의 다른 시스템들과 원활히 연동될 수 있고 동적인 불안정성이 없도록 설계되어야 한다. 스마트무인기의 로터 시스템에 대한 전반적인 설계 결과 및 성능은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 로터 개수 : 2

- 로터당 블레이드 개수 : 3
- 블레이드 재질 : 탄소/유리 섬유 복합 재료
- 허브 형태 : 등속 조인트를 사용한 짐발 형태의 허브
- 로터 반경 : 1.43m(4.7ft)
- 로터 회전수 : 1200~1600 rpm
- Disk Loading : 670~770 N/m² (14~16lb/ft²)
- 회전익 모드 최대 로터 추력 : 1,000~1,150kg(2,300~2,500lb)
- 고정익 모드 최대 로터 추력 : 180~200kg(400~450lb)
- Figure of merit/propeller

스마트무인기 로터 시스템의 가장 큰 특징은 현재 미국 특허로 제한되어 있는 탄성체 베어링을 이용한 등속 조인트 개념을 탈피하여 자동차용 등속 조인트를 채용한 짐발 허브를 자체 설계하였다는 점이다.

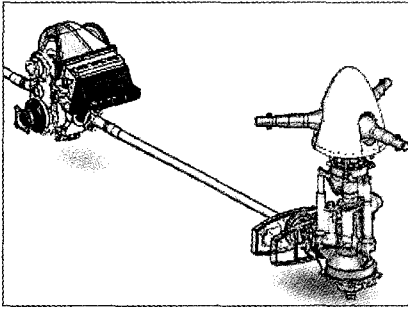


그림 1 우현 쪽에서 본 로터 - 드라이브 시스템 조립체 3차원 모델(로터 블레이드 제외)

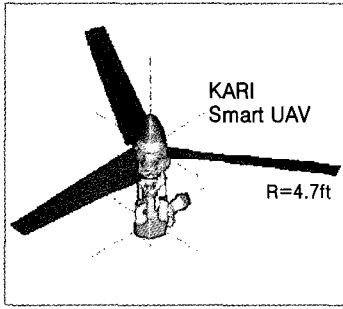


그림 2 블레이드가 장착된 스마트무인기 로터 시스템

efficiency : 0.8 이상
스마트무인기의 드라이브 시스템은 크게 중앙 기어박스, 파일런 기어박스, 기어박스 연결축, 로터 축 및 파일런 전환 장치로 구성되며, 스마트무인기에 탑재되는 PW-206C 엔진에서 나오는 동력을 로터까지 원활하게 전달하는 역할을 한다. 중앙 기어박스와 파일런 기어박스에 장착되는 동력전달용 베벨기어는 마찰에 의한 동력전달손실을 최소화하기 위해 수퍼 피니시 가공기법을 적용하였고, 베어링의 선정에도 각별한 주의를 기울였다. 전체적인 드라이브 시스템의 설계 결과 및 성능은 다음과 같다.

- 중앙 기어박스

- Max input power : 550 ~600shp
- Max input rpm : 6,000 rpm
- Max input torque : 700 N-m
- Gear ratio of center gear box 1.5 : 1
- 파일런 기어박스
- Max output rpm : 1,600 rpm
- Max output torque : 1,300N-m
- Gear ratio : 2.5:1
- 드라이브 시스템 무게 : 83kg 이하
- 파일런 전환각 : 0~100도(고정익 모드 : 0도)

- 파일런 전환각속도 : 2~8 degree/sec

로터 블레이드

틸트 로터 항공기의 로터 블레이드는 단일 형상의 블레이드가 회전익, 고정익의 두 가지 비행모드에서 운용되어야 하므로 통상적으로 프로프로터(propurator)라 칭하며, 이 프로프로터는 공력적으로 회전익의 로터와 고정익의 프로펠러 요구 성능을 동시에 만족할 수 있도록 설계가 이루어져야 한다. 회전익 로터의 경우 비교적 비틀림각(twist)이 작고, 고형비(solidity)가 크고, 끝단 속도(tip speed)가 클수록 필요 마력(required power)이 적게 소요되는 경향을 보이는 반면, 고정익 프로펠러의 경우는 이와 반대의 경향을 보인다. 따라서 스마트무인기의 블레이드는 설계 파라미터의 변화에 대해 서로 상충되는 경향을 보이는 회전익/고정익 설계점을 적절히 절충하여 공력 설계를 수행하였다.

공력 설계를 통해 결정된 블레이드의 외부 형상을 기준으로 다음과 같은 네 가지 목적을 만족시키도록 블레이드의 구조 설계를 수행하였다. 첫째로, 하중의 급작스런 증가를 유발하는 구조적 공진을 피하도록 구조 설계를 수행하였으며, 둘째로 비행 중에 인가되는 극한 하중에도 어느 정도 여유를 가지고 견딜 수 있도록

록 충분한 강성을 가지게 설계를 수행하였다. 셋째로, 충분한 피로 강도를 확보하여 목표 수명 동안 사용이 가능하도록 설계를 수행하였으며, 마지막으로 제작이 쉽고 제작품들 사이에 형상 및 성능의 편차가 최소화되도록 설계를 수행하였다.

로터 허브

광범위한 연구를 통해 틸트 로터용 허브는 허브 중심에 대해 로터 디스크면이 자유롭게 기울어지는 개념이 여러 측면에서 유리하다는 것이 알려졌다. 로터 디스크면이 허브 중심에 대해 회전 자유도를 가지면 헬리콥터 모드로 비행 시에 공탄성 안정성을 확보할 수 있고, 사이클릭 피치를 인가하였을 때 발생하는 과도한 블레이드 하중을 경감시킬 수 있다. 그리고 고정익 모드로 비행 시에 로터 디스크면에 평행한 방향으로 작용하는 하중의 진동에 의해 유발되는 휠플러터현상도 많이 완화되는 것으로 알려져 있다. 초기의 틸트 로터기인 벨사의 XV-3의 경우도 원래 3개의 블레이드를 장착한 관철형 로터 허브를 사용하였으나, 비행시험 중 로터 시스템을 비롯한 기체에 심각한 불안정성이 발생하여 이를 2개의 블레이드를 장착한 시소형 허브로 교체함으로써 이 문제를 해결하였다. 최근의 틸트 로터기들은 거의 대부분 3개의 블

레이드를 장착한 짐발 형태의 로터 허브를 사용하고 있는데, 이는 벨사의 동역학자인

Troy-Gafey에 의해 고안되었다. 짐발 허브는 3개의 로터 블레이드가 회전하면서 만들어 내는 로터 디스크면이

어떤 방향으로든 자유롭게 플랩 운동을 할 수 있는 개념으로, 이를 통해 고정익 모드로 비행 시에 로터 시스템의 안정성을 충분히 확보할 수 있다. 스마트무인기의 경우도 역시 자동차용 기계적 등속 조인트를 이용하여 3개의 블레이드를 장착한 짐발 형태의 로터 허브를 설계하였다.

로터 피치조종장치

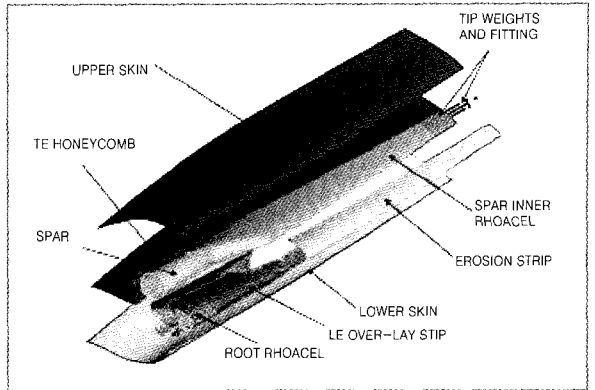


그림 3 로터 블레이드 구성품의 적층 구조

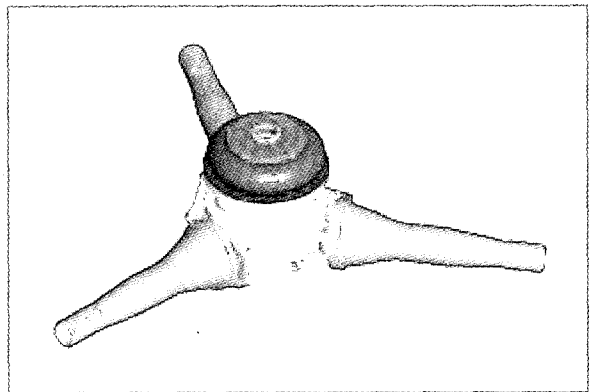


그림 4 자동차용 등속 조인트를 이용한 스마트무인기 짐발 허브 조립체

로터 피치조종장치는 스와시플레이트 조립체와 이를 구동시키는 작동기로 나눌 수 있다. 스마트무인기에 채택된 스와시플레이트는 일반적인 형태로 회전부와 비회전부가 베어링으로 결합되어 있는 형상이다. 아래에 위치한 비회전부를 작동기를 이용하여 들어주거나 기울여주면 이러한 변위가 그대로 회전부에 전달되고 회전부에 연결된 피치링크가 이를 로터 블레이드에 전달하여, 결

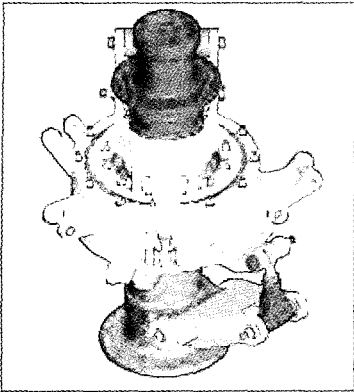


그림 5 피치조종장치의 핵심 구성품인 스와시플레이트가 회전축과 비회전축에 고정된 모습

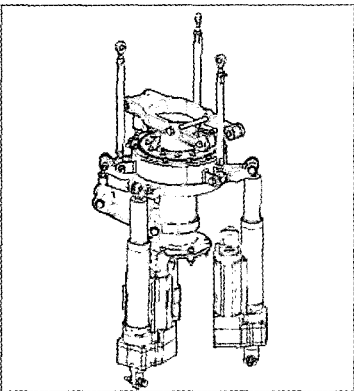


그림 6 작동기를 포함한 전체 로터 피치조종장치 조립체



그림 7 엔진의 동력을 파일런 기어박스로 전달하는 중앙 기어박스

국 조종입력에 의한 피치변화가 이루어진다.

로터 피치조종을 위하여 사용하는 작동기는 크게 유압식과 전기식으로 나뉘는데 스마트무인기는 전기식 작동기를 이용한다. 유압식과 전기식 작동기는 성능 및 비용 측면에서 우열을 가리기 힘들지만, 스마트무인기의 피치 조종 요구도에 맞는 사양의 상용 유압식 작동기를 구하기가 어렵고 자체적으로 유압식 작동기를 제작하는 방안은 위험부담이 너무 커, 결국 전기식 작동기를 채택하였다. 스마트무인기는 3개의 전기식 작동기를 원주방향으로 등간격으로 위치시켜 블레이드의 피치를 조종하며, 각각의 작동기는 모터를 2개씩 장착하는 방향으로 이중화하여 신뢰성을 높였다.

중앙 기어박스

중앙 기어박스는 스마트무인기의 동력원인 PW-206C 엔진이 제공하는 동력을 입력받아 날개 양 끝에 달린 파일런 기어박스까지 전달한다. 효율적이고 안전한 동력 전달을 위하여 베벨기어를 사용하는데, 입력 기어와 출력 기어의 비율은 1.5 : 1의 기어 감속비를 가진다. 구조적 안정성을 충분히 확보하면서 무게를 최소화하도록 기어박스 하우징 및 기어를 설계하였고, 2,000시간의 수명을 가진 베어링을 제외한 모든

구성품들이 4,000시간 이상의 수명을 가지도록 설계하였다.

기어 설계는 AGMA 표준인 ANSI/AGMA 2005-C96 "Design Manual for Bevel Gears"와 ANSI/AGMA 2003-B97 "Rating the Pitting Resistance and Bending Strength of Generated Straight Bevel, Zerol Bevel and Spiral Bevel Gear Teeth"를 기준으로 하였다. 기어의 재질은 침탄강 SAE/AMS 6265 혹은 AGMA 923-A00 Grade 3 또는 그에 상응하는 재료를 사용하는 것으로 설계하였다. 특히 드라이브 시스템 손실의 대부분을 차지하는 기어의 마찰을 줄이기 위해 슈퍼 피니시 가공기법을 도입하였다. 이 가공기법은 기어의 연마 이후에 적용되는데, 약 2.5mm 정도 기어 표면을 정밀하게 다듬어 미세한 표면의 흠집까지 제거한다. 이 공정을 거치게 되면 기어 표면은 거울처럼 매끄러워져서, 마찰 계수가 대폭 감소되고 피로수명은 대폭 증가하게 된다. 슈퍼 피니시 처리를 거치지 않은 기어를 사용할 경우 처리를 거친 기어에 비해 마찰에 의한 발열량이 훨씬 큰데, 이를 냉각시키기 위해 추가적으로 장착되는 장치의 비용에 비해 슈퍼 피니시 처리에 드는 비용이 훨씬 적게 소요되는 것으로 알려져 있다.

기어제작에 수퍼 피니시 가공기법을 적용하여 전체 드라이브 시스템의 손실을 대폭 경감시켰으며, 비행 모드에 따라 파일런을 전환시켜주는 파일런 전환 장치를 다중화 개념을 채택하여 성공적으로 설계하였다.

파일런 기어박스

중양 기어박스를 통과하면서 1차적으로 감속된 회전수는 최종적으로 날개 양쪽 끝단의 파일런 내부에 장착되는 파일런 기어박스를 통과하면서 로터 블레이드의 운용 회전수에 맞게 감속된다. 따라서 엔진 축의 회전수는 6,000rpm을 상회하지만 파일런 기어박스를 통과한 최종 로터 블레이드 구동축의 회전수는 1,200~1,600rpm으로 감속된다. 이러한 감속 및 동력전달기능 이외에도 파일런 기어박스는 비행 모드 전환을 위하여 파일런부를 수직에서 수평까지 90도 넘는 각을 회전시킬 수 있는 기능을 하도록 설계하였다.

파일런 기어박스 설계 시 또 다른 중요한 고려사항은 파일런 기어박스와 날개 끝단이 기계적으로 접합되는 연결부의 설계이다. 이 연결부의 강도는 스마트무인기가 고정익 모드로 고속 비행할 때 발생하는 윙플러터현상에 가장 큰 영향을 미치는 파라미터

로, 스마트무인기가 비행할 수 있는 최대 속도인 500km/h의 속도에서도 윙플러터가 발생하지 않도록 충분한 강도를 가지게 설계하였다. 최종적으로 상세설계된 파일런 기어박스는 모든 설계요구조건을 충분히 만족시키며, 첨단 소재와 전산구조해석기법을 적용하여 경량의 무게를 가지도록 설계되었다.

파일런 전환장치

파일런 전환장치는 파일런을 일정한 각속도로 회전시키다가 특정 입력 각에 도달하면 공기력과 로터 회전력 및 관성력을 견디면서 파일런의 위치를 고정하는 역할을 하여, 파일런을 회전익 모드에서부터 고정익

모드까지 임의의 자세로 변환하는 기능을 한다. 또한 파일런 전환 장치의 작동기는 로터 시스템이 공력적으로나 구조적으로 안정성을 유지하면서, 지상공진이나 고정익 모드 비행 시에 윙플러터 불안정성이 발생하지 않도록 충분한 강성을 가져야 한다.

스마트무인기의 파일런 전환장치는 초당 1도에서 3도까지 파일런의 위치를 변환시킬 수 있다. 기존의 상용 작동기를 약간 개조하는 방향으로 파일런 전환 작동기를 개발하였는데, 신뢰성을 향상시키기 위해 작동기당 2개의 모터를 사용하여 하나의 모터가 작동불능상태에 빠지더라도 나머지 하나의 모터로 작동기 구동이 가능하도록 하였다. 최종적인 설계 형상은 28V의 기어모터(작동기당 두 개의 모터) 로 구동되는 정밀 볼 스크루 작동기로 결정하였다. 이러한 작동기는 파일런 전환 시에 양쪽 파일런 각의 차이

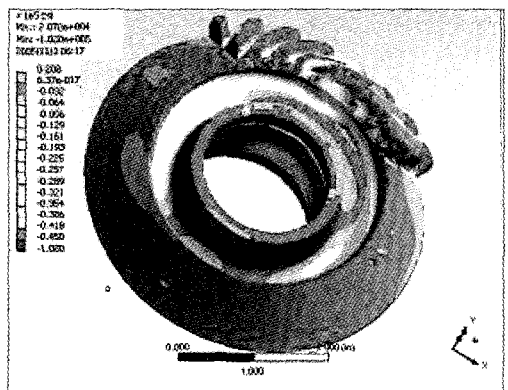


그림 8 ANSYS를 이용한 중양 기어박스 베벨기어의 응력 해석 결과

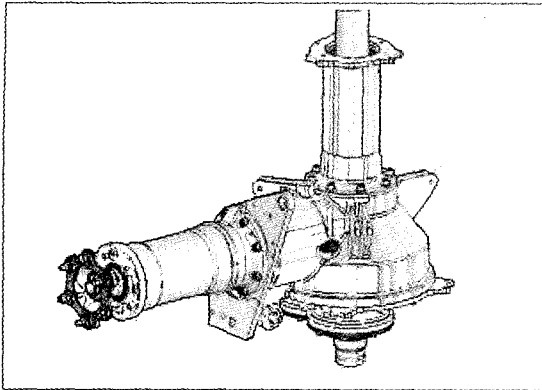


그림 9 엔진의 동력을 전달받아 최종적으로 로터 구동축을 회전시키는 파일런 기어박스

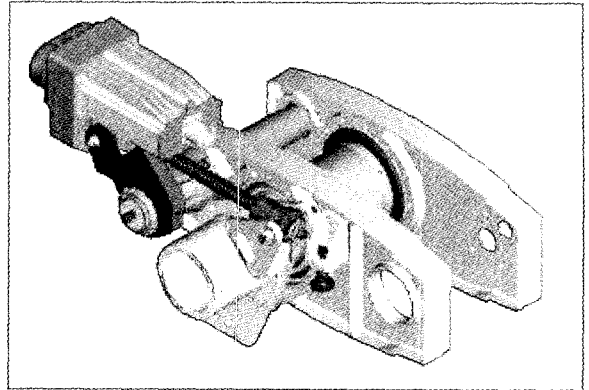


그림 10 파일런 전환장치가 왼쪽 날개 끝단에 장착된 모습

가 발생하지 않도록 전자제어방식에 의한 동기화를 통해 제어된다. 이상으로 스마트무인기의 비행체를 구동시키는 핵심 시스템인 로터-드라이브 시스템을 간략히 살펴보았다. 스마트무인기 개

발을 통해 확보된 로터-드라이브 시스템의 해석, 설계 능력은 현재 수요가 점점창출되고 있는 전세계 수직이착륙 무인기 시장을 선점할 수 있는 공고한 기술적 기반을 제공하고, 차후 한국에서 개

발될 회전익 유·무인기의 로터-드라이브 시스템 설계에도 폭넓게 응용될 수 있을 것으로 확신한다.

기계용어해설

베르누이의 방정식(Bernoulli's Theorem)

1개의 관내를 점성이 없는 유체가 일정한 상태로 끊임없이 흐를 때, 그 유로 내의 어느 점에서나 위치 수두, 속도 수두, 압력 수두의 총합이 일정한 것.

베릴륨 청동(Beryllium Bronze)

담금질한 후 시효경화시키면 기계적 성질이 합금강에 뒤떨어지지 않고 내식성도 우수하여 기어, 판 스프링, 베어링 등에 쓰이는 것으로, 구리에 베릴륨 1~2.5%가 함유되어 있는 합금.