

스마트무인기 비행체 형상 개발

이 글에서는 스마트무인기 기술개발사업에 있어서 미래형 신개념 비행체를 어떤 과정을 통해서 개념을 구현하고 설계하게 되었는지, 그리고 선정된 틸트 로터 비행체의 기술적 과제 및 특성에 대해 소개한다.

선진국의 수직이착륙 행체 개발의 기술 동향

헬리콥터와 같은 전통적인 수직이착륙항공기는 이착륙 시 활주로를 필요로 하지 않는 장점이 있으나 고속비행 및 장기체공 성능에 있어서는 고정익기에 뒤떨어진다. 제트 추진 시스템 성능의 비약적인 발달과 더불어 고정익 비행체의 최대속도 성능은 계속된 신장을 거듭했지만 엔진의 추마력에 의존해야 하는 수직이착륙 항공기는 추진 시스템 발전의 혜택을 충분히 누리지 못해 성능의 차이는 더욱 커

졌다. 또한, 로터를 이용하는 수직이착륙 비행체 개념인 경우, 전

진 비행 시 로터의 회전으로 인한 과도한 항력 증가가 있다. 즉,

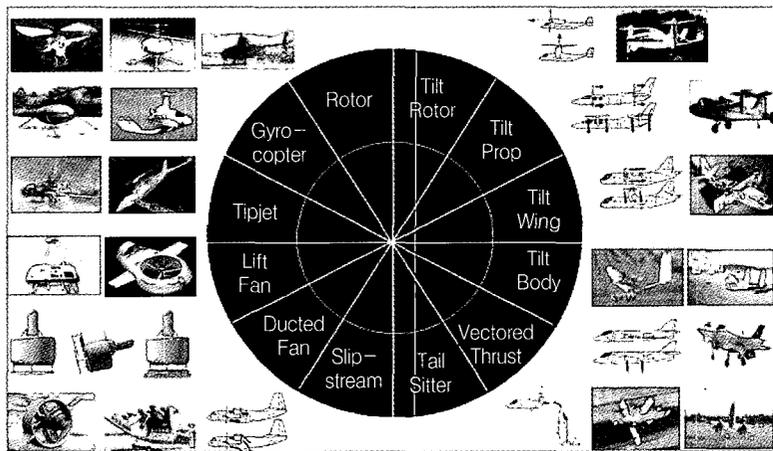


그림 1 다양한 수직이착륙 무인기 신개념 연구개발 개요

안 오 성 | 한국항공우주연구원 스마트무인기사업단, 선임연구원
김 재 무 | 한국항공우주연구원 스마트무인기사업단, 책임연구원

e-mail : ohsung@kari.re.kr
_e-mail : jmkim@kari.re.kr

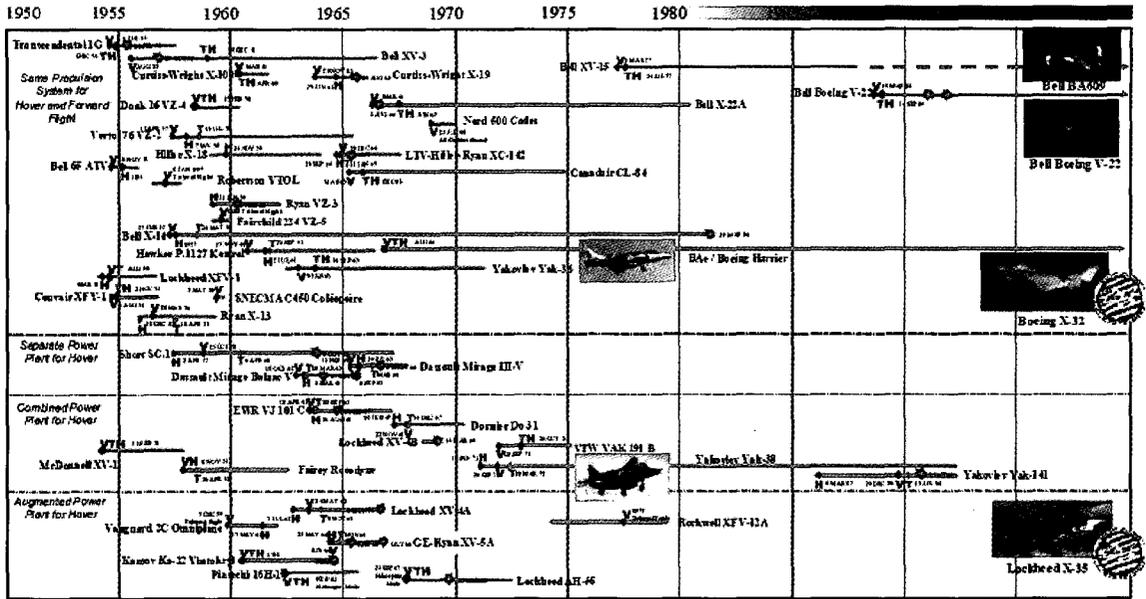


그림 2 신개념 수직이착륙 비행체 개발 현황

로터 블레이드는 공기를 로터의 회전속도와 비행체의 전진속도의 벡터 합속도로 지나가기 때문에 비행체의 속도가 마하 0.2 수준만 되어도 회전하는 블레이드 끝단에서의 상대속도는 항력이 급격히 증가하는 임계 마하수에 도달하는 단점이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 지난 반세기 동안 다양한 신개념 비행체 연구가 수행되었다.

그러나 미국을 비롯하여 영국 프랑스 등에서 수행된 이러한 다양한 신개념 비행체 연구결과 양산개발에 성공한 비행체는 '틸트 제트'와 '틸트 로터' 단 두 가지 개념뿐이다.

'틸트 제트' 개념은 수직 이착륙을 위해 로터시스템을 사용하

지 않고 순전히 추진시스템에 의존하는 비행체 개념으로서 신개념 추진/제어시스템 개발에 따른 막대한 비용이 소모되며, 동일한 이륙중량에 대해 소모되는 연료 소모율이 틸트 제트의 5배 수준이므로 때문에 임무운용 시간이 짧고, 초음속임무 수행을 위한 높은 추력이 요구되는 전투기의 경우에만 적용이 타당한 개념으로서 영국에서 개발된 Harrier와 미국의 JSF 비행체가 있다.

'틸트 로터' 개념은 기존의 가용한 엔진으로 구현 가능한 비행체 개념으로서, 헬리콥터와 고정익 항공기의 장점을 결합한 비행체 개념이다. 즉, 엔진의 출력수준과 연료소모율에 있어서 틸트 제트 비행체의 20% 수준의 엔진

마력으로 수직이착륙이 가능하고 이륙 후에는 로터를 프로펠러처럼 90도 회전하여 프로펠러 항공기와 같이 고속으로 비행하는 개념이다. 엔진의 사이즈가 고정익 항공기에 비해 다소 큰 점과 로터 블레이드가 고정익 모드에만 최적화되어 설계될 수 없는 설계상의 제약으로 인해 고정익 보다 성능이 떨어지지만, 기존 헬리콥터와 고정익의 비행성능의 차이에 비하면 매우 발전된 개념으로서 수직이착륙의 기능이 요구되면서도 고속 성능과 장거리 운용이 필요할 경우에 적합한 개념이다.

실제로 이 비행체 개념이 미해군의 커다란 주목을 받고 있는 것과 상용화가 진행되고 있는 이

유도 이러한 운용성능 면에서의 장점 때문이다.

스마트무인기 비행체 개념 개발 과정

위 두 가지 개념 외에, 보다 경제적이고 보다 실용적인 수직이착륙 항공기 개념 구현을 위해 다양한 비행체 개념이 항공 선진국인 미국과 프랑스, 영국, 독일 등에서 지금도 계속 연구되고 있다.

위 개념들 중에서 5, 6번 개념은 고속성능에 있어서 한계가 있고, 7번 개념은 수직 이착륙보다는 단거리 이착륙을 이용하는 개념이므로 스마트무인기 비행체 개념 검토 대상에서 제외되었으며 나머지 5개 개념에 대한 기초 연구가 수행되었다. 각각의 개념에 대한 기술적 특성과 성능 및 미래 신개념 비행체 개념으로서의 적합성 등을 검토한 결과 1·2·3번의 개념으로 그 대상이 압축되었고 이 세 가지 개념에 대한 보다 심도 있는 연구를 통한 비교검토가 이루어졌다. 신개념 비행체 개발에 있어서 개념 선정의 중요성은 매우 크다. 그것은 기술적 적합성, 미래적 가능성, 개발 위험도 및 실용성 등이 종합적으로 검토되어야 하기 때문이며 이러한 평가는 비행체 개발에 관한 오랜 경험과 이해의 토대위에 각각의 개념에 관한 심도 있는 연구가 필요하기 때문이다.

스마트무인기 기술개발 사업단에서는 지난 수 십 년간의 수직이착륙 비행체의 연구결과를 검토하고 최근까지 그 실용성 및 기술적 적합성에 있어서 주목을 받아온 개념을 선정하여 미래지향적이면서도 고성능의 성능을 실현할 수 있는 비행체 개념구현을 위한 연구를 수행하였다.

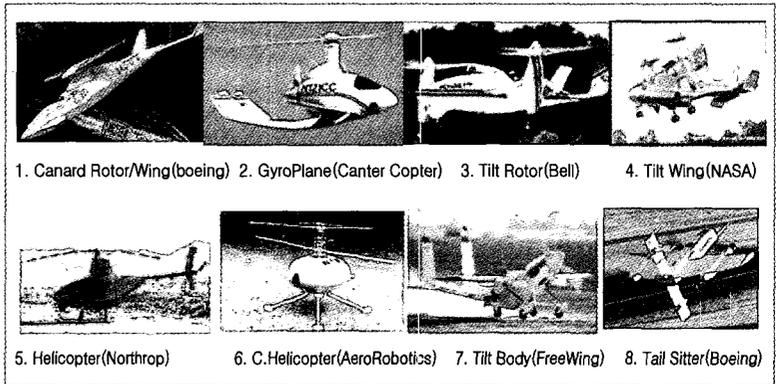


그림 3 진보된 수직 이착륙 항공기 개발 프로그램

이러한 중요성을 감안하여 비교평가의 엄정을 기하기 위해 스마트무인기 사업단에서는 GIT와 같은 해외의 유명 항공기 연구기관, Bell과 Elbit과 같은 선진 수직이착륙 비행체 개발업체와의 공동 연구 및 정보교환을 통해 엄정한 비교평가를 추진하였다.

이러한 과정을 통해 틸트 로터 비행체 개념이 가장 적합한 것으로 평가 되었다. 특히, 3개의 후보 개념 중 고속성능과 장시간 운용성능에 있어서 틸트 로터가 가장 우수한 것으로 평가되었다.

미래형 신개념 비행체 개념을 정의하기 위한 위와 같은 노력을

통해 항공 선진국에서 지난 반세기 동안 막대한 투자를 통해 밝혀낸 다양한 기술적 개념의 장단점과 특성을 파악할 수 있었고, 최종적으로 선정된 틸트 로터 개념의 추진에 있어서도 단순히 이 개념이 현재 주목받고 있는 개념이기 때문이 아니라, 그 개념이 갖는 위험성과 도전성, 그리고 기술적 과제 및 특성, 개발 위험도 등에 대해 파악할 수 있었다. 이러한 스마트무인기사업단의 체계적인 의사결정 시기를 전후하여 스탑트 로터 형태의 비행체의 비행시험의 실패와 지연사태가 벌어지면서, 전세계적으로 항공기

틸트 로터 비행체의 기술적 과제 및 특성

성공적인 틸트 로터 비행체 개발을 위한 핵심적 기술은 다음과 같다. 비행체 사이징 및 형상개발 기술, 엔진제어를 통한 로터 RPM 제어기술, 진동제어 및 공탄성 설계기술, 단순화되고 신뢰성 높은 로터 허브시스템 설계기술, 고성능/고신뢰성 드라이브 시스템 설계기술, 자동비행제어기술 및 신경망적응제어기술, 저속 및 고속 운영영역에 동시에 최적화된 날개 설계기술, 좌우로터피치 차동제어를 통한 자세제어기술, 틸트 로터 특성을 고려한 다중화설계 및 안정성증강 설계기술, 로터의 후류효과를 반영한 공력설계 및 비행제어시스템 설계기술 등이 틸트 로터를 위해 필요한 대표적인 도전적 기술영역들이다.

비행체 사이징 및 형상 개발 기술

틸트 로터 비행체의 사이징 및 형상개발 기술은 헬리콥터 비행체 및 고속프로펠러 비행체 각각에 대한 설계기술을 동시에 필요로 하며, 이 두 가지 비행체를 최적으로 복합화하여 비행체를 구현하기 위한 사이징 및 형상개발 기술이 요구된다. 스마트무인기 사업단에서는 자체적인 연구를 통해 독자적인 비행체의 사이징 및 형상개발 절차를 정립하였다. 독자적인 틸트 로터 비행체

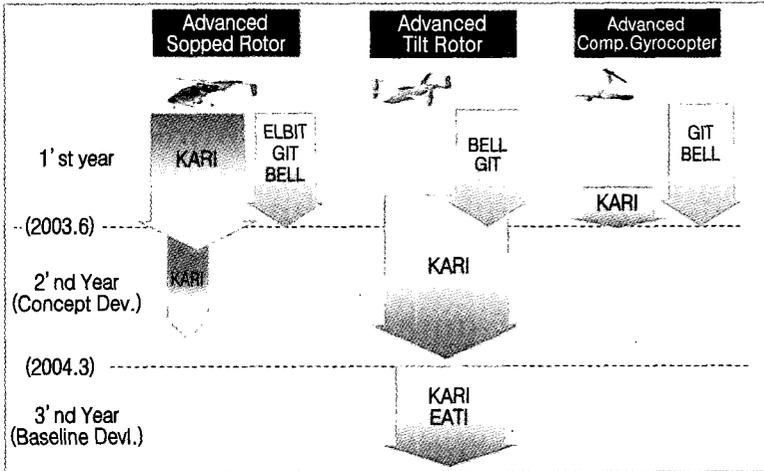


그림 4 비행체 형상 개념 선정 과정 및 참여기관

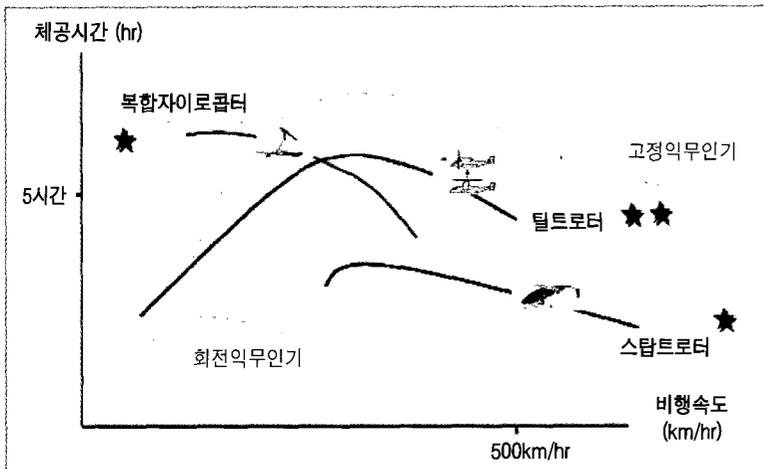


그림 5 3개 후보기종에 대한 공력 성능 비교 연구 결과

연구개발자들의 관심 영역에서 멀어진 반면, 틸트 로터 개념의 경우 V22의 설계 수정형에 대한 성공적인 비행시험완료 및 인증 획득(2005), 2007년 인증획득을 목표로 민수용으로 개발 중인 BA609의 순조로운 개발진행, 무인기로 개발된 Eagle Eye 프로

그램의 개발성공 및 2007년 시장진입을 목표로 한 양산형의 순조로운 개발 진행과 이에 대한 미국해양경찰청의 대량 주문 및 미국 내부의 다양한 적용분야에서 관심이 증폭되어 비행체 개념 선정에 대한 자체연구결과의 신뢰성에 힘을 실어 주었다.

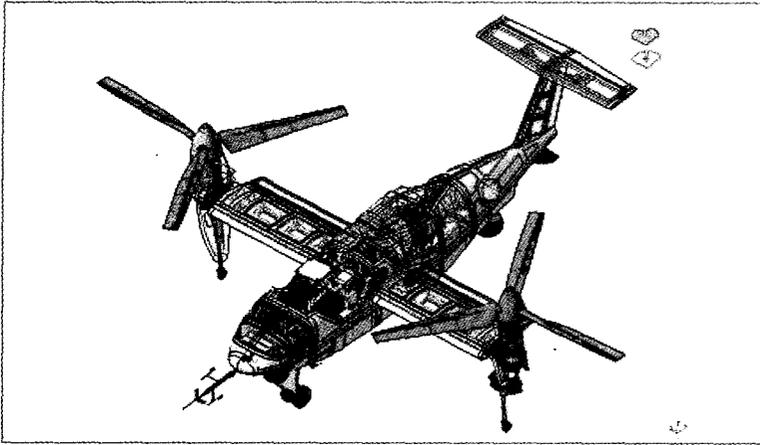


그림 6 스마트무인기 상세설계 완료 설계 결과

사이징 및 형상개발 기술 확보로 인해, 그 이후 수행된 기본설계 및 상세설계 단계를 통해, 형상변경이 최소화되고 조기에 비행체 사이즈 및 형상이 확정될 수 있게 되었다. 뿐 아니라 비행체의 경량화 소형화를 가능하게 하기 위해 3차원 디지털 목업을 이용한 최적 배치설계 및 장탈착성 사전점검, 기능적 유사 시스템의 기능통합을 통한 무게 및 장착 공간 최소화, 신뢰성, 무게를 동시에 고려한 시스템의 단순화 등이 비행체 형상 개발에 있어서 중요하게 고려되었다.

엔진제어를 통한 로터 RPM 제어 기술

비행체시스템 개발에 있어서 엔진시스템은 매우 중요한 부분이다. 또한 수직이착륙이 가능하면서도 고속 전진비행이 가능한 복합형 비행체의 개발은 대부분

새로운 개념의 엔진을 요구한다. 그러나 신개념의 엔진 개발은 비행체 개발 자체보다 더 막대한 비용이 필요한 문제점이 있다. 이러한 제약에도 불구하고 틸트 로터 개발자들은 매우 위험하면서도 가치 있는 도전을 하였다. 그것은 엔진 개발사에서 제공한 엔진제어시스템(FADEC)을 사용하지 않고, 비행체 개발자가 개발하는 비행제어 컴퓨터가 엔진을 직접 제어하는 기술이다. 이 기술은 엔진제어에 대한 심도 있는 기술이 있어야 가능한 영역이다.

틸트 로터 개발을 위해 이 기술이 필요한 이유는, 프로펠러 모드로 비행 시 로터의 RPM을 줄이면 항력이 줄어들어 효율적인 전진 비행과 고속전진비행이 가능하기 때문이다. 스마트무인기 개발사업에서도 비행제어 컴퓨터가 엔진을 직접 제어하는 방식을 적용하여 개발을 진행 중이다.

진동제어 및 공탄성 설계기술

틸트 로터 항공기의 로터 진동 특성 및 공탄성 안정성 설계 요구조건은 헬리콥터에 비하여 훨씬 복잡하다. 이는 헬리콥터모드 및 프로펠러모드의 2가지 RPM 운용조건과, 헬리콥터 블레이드 기능 및 고정익 항공기의 프로펠러 기능을 동시에 수행함에 따라 훨씬 큰 로터 피치 운용범위를 가지기 때문이다. 우선 두 가지 모드의 운용조건에서 로터 시스템의 고유진동수가 로터의 회전 주파수와와 공진현상이 발생하지 않도록 설계되어야 한다. 로터 허브 및 블레이드의 강성 분포와 질량 분포에 대한 반복적인 설계 과정을 거치게 되며, 이를 통해 최적의 로터 고유진동수 분포를 갖도록 설계한다. 또한 틸트 로터는 고속전진 비행 시에 발생하는 헬플러트 불안정성 현상뿐만 아니라 회전익 모드에서 일반 헬리콥터의 공탄성 불안정 현상이 발생하지 않도록 설계되어야 한다.

단순화되고 신뢰성 높은 로터 허브시스템 설계기술

틸트 로터 항공기는 일반 프로펠러 항공기와 달리 수직이착륙이 이루어지는 회전익 모드와 파일론 전환모드에서 비행체 자세 제어를 위한 로터추력 방향의 제어 기능이 요구된다. 이를 위해 틸트 로터 항공기는 로터 회전면의 방향제어를 위한 사이클릭 피

치 조정 기능과 로터 회전면의 플래핑 자유도를 갖도록 설계된다. 스마트무인기에는 다양한 형태의 허브 중 공탄성 안정성 특성에서 큰 장점을 가지는 짐발허브가 적용되었으며, 짐발허브는 고전적인 유니버설 조인트나 상당한 고가의 탄성체 베어링을 적용하는 대신 상용화되고 신뢰성 높은 자동차용 등속조인트를 구면베어링과 조합한 시스템을 구현하여 저가 및 고신뢰도 특성을 갖도록 독창적으로 설계되었으며 이와 관련하여 1건의 국내특허가

출원되었다.

고성능/고신뢰성의 드라이브 시스템 설계 기술

스파이럴 베벨기어에 의한 동력 전달 및 속도 변환, 고성능 고수명의 테이퍼롤러베어링을 적용한 기어 구동축, 오일 제트에 의한 건식 강제순환방식의 윤활 및 냉각계통, 엔진으로부터 로터까지 동력전달을 위한 수퍼크리티컬(super-critical) 복합재료 구동축, 비행모드와 수직이착륙모드의 전환을 위한 파일론 전환장치

등에 대한 기술이 필요하다. 드라이브장치는 틸트 로터 항공기의 핵심기술과제로서 특히, 파일론 전환에 따른 시스템의 안정성 및 신뢰성을 충분히 고려하여야 하며 또한, 고속의 회전 장치들로 인한 과도한 열과 동력 손실을 방지하기 위해 수퍼피어싱(super-finishing) 베벨기어의 사용 및 고성능 열교환기를 적용한 강제순환 윤활장치의 설계 기술을 확보하여야 한다. 그러나 가장 중요한 것은 엔진과 로터 사이를 연결하는 핵심 장치로서, 엔

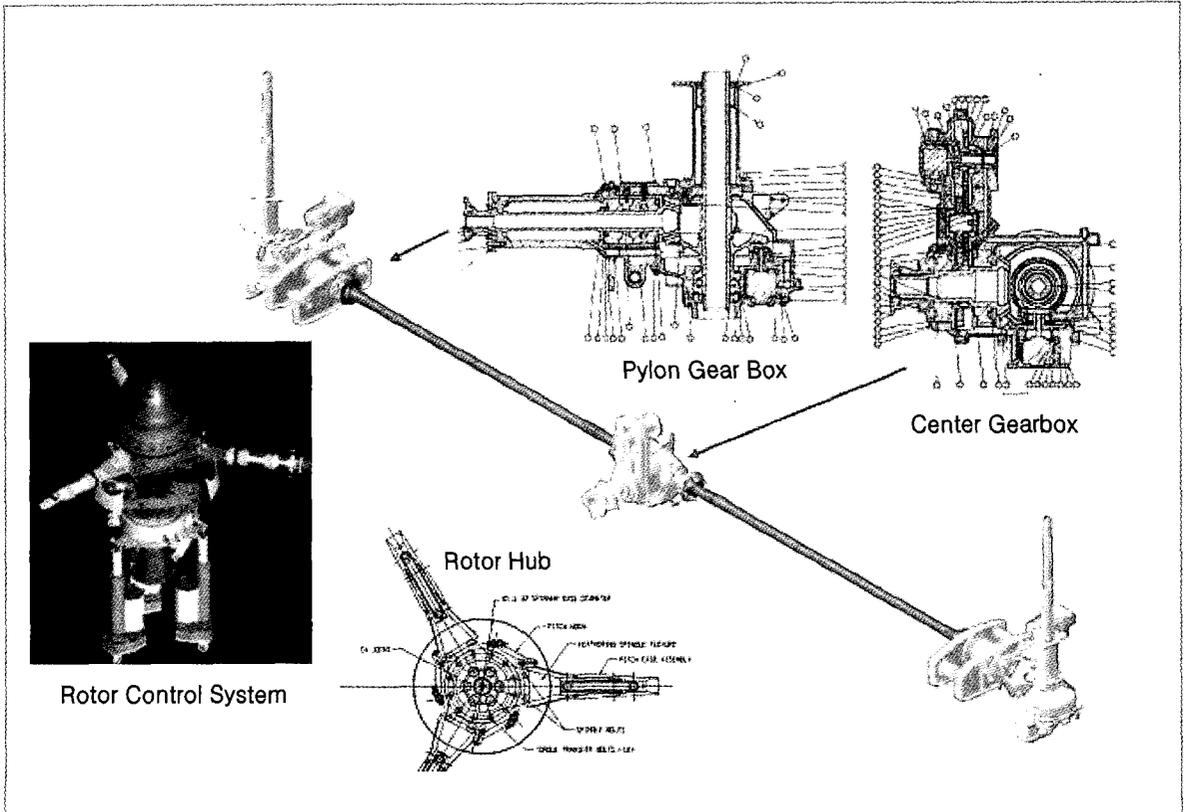


그림 7 로터 및 드라이브 시스템 설계 개발 결과

진과 로터장치는 물론, 대부분의 모든 시스템들과의 물리적, 전기적 인터페이스를 고려한 수많은 반복적인 설계 과정이 필요한 체계설계 기술이 무엇보다 신중히 고려되어야 한다. 특히, 틸트 로터 항공기의 핵심기술의 하나인 파일론 전환장치와 관련하여 1건의 국내특허가 출원되었다.

자동비행제어기술 및 신경망적응제어 기술

진보된 무인비행체의 개발추세는 이륙부터 임무수행, 착륙까지의 전 과정을 자동으로 비행할 수 있게 개발하는 것이다. 틸트 로터 비행체는 이러한 추세적 요건뿐 아니라, 헬리콥터 모드에서 프로펠러 모드로 전환하는 단계의 중요한 전환구간을 안정적으로 비행하기 위해서는 비행체의 자동비행제어 기술이 필수적이다. 이 구간의 안정적인 자동비행을 위해서는 기존의 개발투자를 통한 비행체의 공력특성에 관한 방대한 데이터 및 경험의 축적이 필요하다. 이러한 자원이 없는 상태에서 스마트무인기사업단에서는 개발위험도를 완화하기 위하여 신경망적응제어기술이라는 매우 진보적인 제어기술을 적용하여 비행제어 시스템의 신뢰성을 높이기 위한 노력을 하고 있다.

저속 및 고속 운영영역에 동시에 최적화된 로터 블레이드 및 날개 설계기술

틸트 로터 비행체의 장점은 고속과 저속의 광범위한 영역에서 실용적인 운용이 가능하다는 점이다. 이는 다양한 임무수행을 가능하게 하는 매우 중요한 장점이다. 이러한 비행체의 특성을 효과적으로 실현하기 위하여 로터 블레이드의 형상(날개 익형 및 비틀림 분포) 및 날개의 형상은 이러한 비행체의 저속/고속 운용개념을 동시에 고려하여 최적화된 설계를 하였다. 날개의 설계에 있어서는 고속성능 개선을 위해 날개의 크기를 줄이고 고효율의 고양력 장치 개발이 필수적인데, 스마트무인기 사업단에서는 자체적인 공력설계기술을 적용하여 매우 효율이 높은 고양력장치를 설계하는 데 성공하였으며, 또한 이 장치를 이용한 가변익형 날개 구현으로 광범위한 속도 영역에서 비행체의 항력을 최소화하는 데에 성공하였다.

좌우로터피치 차등제어를 통한 자세제어기술

틸트 로터 비행체는 좌우에 로터시스템이 나뉜 비행체 특성으로 인해 일반 헬기로는 가능하지 않은 기동이 가능하다. 대표적인 것이 기체의 자세를 기울이지 않고도 비행체가 제자리에서 옆으로 이동하는 비행이 가능하다. 이러한 특성은 좁은 함상에서의 착륙지점 조정과 같은 기동시 매우 유용하다. 이러한 설계 특성은 좌우의 로터 피치를 차등으로 제어

하는 기술을 통해 가능하다. 또한 이 기술은 고전적으로 비행체에 존재해 왔던 러더가 없이 방향조정이 가능한 비행체를 구현할 수 있게 해 주었다. 러더가 없는 비행체의 개념은 틸트 로터 비행체를 반세기 동안 개발해온 미국 벨 사가 중량절감 및 개발비용 축소를 목표로 최신의 틸트 로터 비행체에 도입하기 시작한 도전적인 개념으로서 스마트무인기사업단에서는 이러한 진보적 개념을 적용한 비행제어 시스템을 개발하고 있다.

틸트 로터 특성을 고려한 이중화 설계 및 안정성증강 설계기술

무인 비행체의 신뢰성은, 무인 비행체가 유인공역에 진입하기 위한 필수 요건이다. 비행체개발에 있어서 신뢰성은 언제나 비행체의 중량증가와 비용증가를 의미하기 때문에 개발목표에 맞는 적절한 조정을 위한 심도 깊은 연구가 그 어느 분야 보다 중요한 영역이다. 스마트무인기개발사업단에서는 이중화 적용대상 장비 및 이중화 시스템의 통합에 관해 국내 유수의 학계 및 전문기관과의 협력을 통해 독자적인 이중화 시스템 개념을 구현하였다. 특별히 로터 작동기와 비행제어 조종면 작동기는 최근에 개발이 완료된 고가의 이중화된 전기식 작동기를 적용하였다.