

## 고속 수직이착륙기 개발동향과 스마트무인기 개발사업

글 / 안 오 성 ohsung@kari.re.kr

한국항공우주연구원 스마트무인기기술개발사업단 체계종합그룹

### 초 록

헬리콥터와 같은 전통적인 수직이착륙항공기는 이착륙시 활주로가 필요로 하지 않는 장점이 있으나 고속비행 및 고고도 성능에 있어서는 고정익기에 뒤떨어진다. 고효율의 엔진개발에 따라 고정익 항공기가 최대속도 및 성능이 비약적으로 발전한데 비해, 헬리콥터의 최대속도는 160~170 kts (300~315 km/h) 수준으로 제한되어왔고 장거리 운항에서 필수적인 고고도 운항능력에 있어서도 4km 이상의 고도에서 효율적인 비행을 수행하는 데에는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 지난 반세기 동안 다양한 신개념 비행체 연구가 수행되었다. 스마트무인기기술개발사업단에서는 항공선진국의 이러한 연구개발동향 및 그 결과를 종합하여 미래적 신개념 비행체 대안을 모색하였고, 그 결과 틸트로터 개념을 선정하여 상세설계를 종료한 상태이다. 이러한 경과에 대한 요약과 현재 활발히 진행중인 항공선진국의 미래형 수직이착륙 항공기 개발기종의 현황, 성능비교를 통해 고속, 고고도 수직이착륙 항공기 개발에 관한 세계적 추세와 본 사업의 연관성을 고찰해 보았다.

주제어: 수직이착륙 항공기, 틸트로터, 항공산업, 신개념 비행체, 스마트 무인기

### 1. 서론

헬리콥터와 같은 전통적인 수직이착륙항공기는 이착륙시 활주로가 필요로 하지 않는 장점이 있으나 고속비행 및 고고도 성능에 있어서는 고정익기에 뒤떨어진다. 제트 추진 시스템 성능의 비약적인 발달과 더불어 고정익 비행체의 최대속도 성능은 계속된 신장을 거듭했지만 엔진의 축마력에 의존해야 하는 수직이착륙 항공기는 추진시스템 발전의 혜택을 충분히 누리지 못해 성능의 차이는 더욱 커졌다. 또한, 로터를 이용하는 수직이착륙 비행체 개념인 경우, 전진비행시 로터의 회전으로 인한 과도한 항력 증가가 있

다. 즉, 로터블레이드는 공기를 로터의 회전속도와 비행체의 전진속도의 벡터 합으로 지나가기 때문에 비행체의 속도가 마하 0.15~0.2 수준만 되어도 회전하는 블레이드 끝단에서의 상대속도는 항력이 급격히 증가하는 임계 마하수(0.8 ~ 0.85)에 도달하는 단점이 있다. 이러한 한계로 인해 헬리콥터의 최대속도는 160~170 kts 수준으로 제한되었다. 이를 극복하기 위해 지난 반세기 동안 다양한 신개념 비행체 연구가 수행되었다. 지난 반세기 동안, 미국을 비롯하여 영국 프랑스 등에서 수행된 이러한 다양한 신개념 비행체 연구결과 양산개발에 성공한 비행체는 “틸트제트”와 “틸트로터” 단 두 가지 개념뿐이다.

### 1.1 신개념 수직이착륙기 개념선정과정

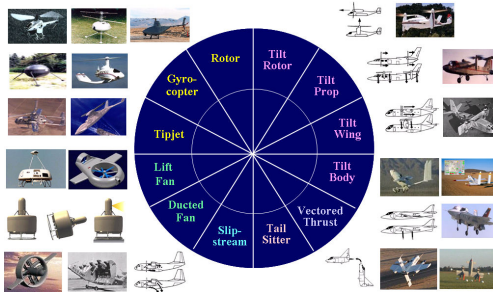


그림1. 미래형 수직이착륙항공기 연구동향

위 두 가지 개념 외에, 보다 경제적이고 보다 실용적인 수직이착륙 항공기 개념 구현을 위해 다양한 비행체 개념이 항공선진국인 미국과 프랑스, 영국, 독일 등에서 지금도 계속 연구되고 있다. 스마트무인기 기술개발 사업단에서는 지난 수십 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 해외 유수의 연구단체와 공동으로 수행하였다.



그림 2. 진보된 수직 이착륙 항공기 개발 프로그램

위 개념들 중에서 5, 6 번의 개념은 고속성능에 있어서 한계가 있고, 7번 개념은 수직 이착륙보다는 단거리 이착륙을 이용하는 개념이므로 스마트무인기 비행체 개념 검토 대상에서 제외되었으며 나머지 5개 개념에 대한 기초연구가 수행되었다. 각각의 개념에 대한 기술적 특성과 성능 및 미래 신개념 비행체 개념으로서의 적합성 등을 검토한 결과 1,2,3 번의 개념으로 그 대상이 압축되었고 이 세 가지 개념에 대한 보다 심도 있는 연구를 통한 비교검토가 이루어

졌다. 신개념 비행체 개발에 있어서 개념선정의 중요성은 매우 크다. 그것은 기술적 적합성, 미래적 가능성, 개발 위험도 및 실용성 등이 종합적으로 검토되어야 하기 때문이다. 이러한 평가는 비행체 개발에 관한 오랜 경험과 이해의 토대위에 각각의 개념에 관한 심도 있는 연구가 필요하다. 이러한 중요성을 감안하여 비교 평가의 엄정을 기하기 위해 스마트 무인기 사업단에서는 GIT (미국)와 같은 해외의 유명 항공기 연구기관, Bell(미국) 과 Elbit(이스라엘) 과 같은 선진 수직이착륙 비행체 개발업체와의 공동연구 및 정보교환을 통해 엄정한 비교평가를 추진하였다.

이러한 과정을 통해 틸트로터 비행체 개념이 가장 적합한 것으로 평가 되었다. 특히, 3개의 후보개념중 고속성능과 장시간 운용성능에 있어서 틸트로터가 가장 우수한 것으로 평가되었다.

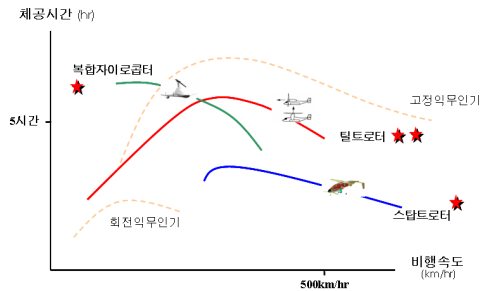


그림 3. 신개념 항공기 주요 성능 비교 (스마트 무인기 사업단)

미래형 수직이착륙 비행체 개념의 선정은 사업의 성패에 있어 매우 중요한 요소인 점을 감안하여, 미국의 GIT에 독자적인 비교평가를 의뢰한 결과 아래와 같이 사업단의 자체 평가와 유사한 결과를 보여주었다.

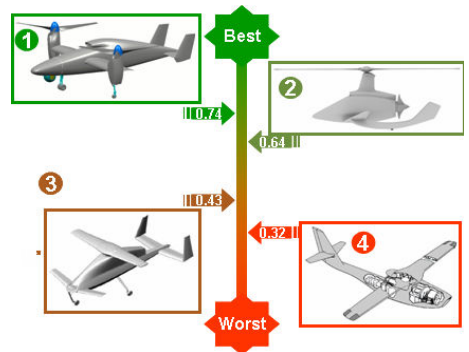


그림 4. 신개념 항공기 비교 결과(GIT)

항공기 개념설계로 유명한 GIT는 미국 내부에서 진행되는 미래형 비행체 개발관련 정보획득이 용이한 점을 살려서, 성능뿐 아니라, 개발 위험도, 실용성, 비용, 기술적 가용성 등을 종합적으로 비교 평가하였다.

이러한 항공기 개념에 관한 방대한 비교평가 연구결과를 토대로 사업초기에 기획한 스탑프로터 (Stopper Rotor, 또는 Canard / Rotor Wing) 개념이 아닌, 틸트로터 개념을 채택하여 이후의 설계개발을 추진하게 되었다.

## 2. 신개념 수직이착륙기 개발동향

### 2.1 틸트 제트 - 록히드 사

“틸트제트” 개념은 수직 이착륙을 위해 로터시스템을 사용하지 않고 순전히 추진시스템에 의존하는 비행체 개념으로서 신개념 추진/제어시스템 개발에 따른 막대한 비용이 소모되며, 동일한 이륙중량에 대해 소모되는 연료소모율이 틸트로터의 4 ~ 5배 수준이므로 임무운용 시간이 짧고, 초음속임무 수행을 위한 높은 추력이 요구되는 전투기의 경우에만 적용이 타당한 개념으로서 영국에서 개발된 Harrier 와 미국의 F-35 (또는 JSF) 비행체가 있다. F-35 비행체의 최대속도는 마하 2 이다.

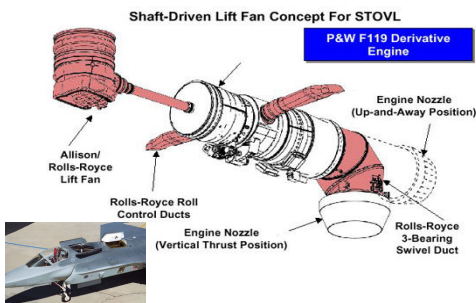


그림 5. F-35 흡/배기 덕트 개념

### 2.2 틸트로터 - 벨 사

“틸트로터” 개념은 기존의 가용한 엔진으로 구현 가능한 비행체 개념으로서, 헬리콥터와 고정익 항공

기의 장점을 결합한 비행체 개념이다. 즉, 엔진의 출력수준과 연료소모율에 있어서 틸트제트 비행체의 20% 수준의 엔진마력으로 수직이착륙이 가능하다. 이륙 후에는 로터를 프로펠러처럼 90도를 회전시켜 프로펠러항공기와 같이 고속으로 비행하는 개념이다.

틸트로터기는 엔진의 요구출력(추력중량비)이 일반 회전익 항공기에 비해 다소 큰 점과 로터블레이드가 회전익과 고정익 모드에 대해 동시에 최적설계되어야 하기 때문에 고정익보다는 순항성능이 떨어지는 단점이 있다. 그러나 기존 헬리콥터가 가질 수 없는 고속성능을 낼 수 있고, 고정익 비행기가 반드시 필요한 활주로가 필요없다는 점에서 매우 발전된 개념이다. 따라서 틸트로터기는 수직이착륙의 기능이 요구되면서도 고속 성능과 장거리 운용이 필요할 경우에 적합한 개념이다.

실제로 이 비행체 개념이 미해병대에 커다란 주목을 받고 있는 것과 해안감시를 목적으로 상용화가 진행되고 있는 이유도 이러한 운용성능 면에서의 장점 때문이다.

하지만, 활주로 없이 고속비행이 가능한 틸트로터 개념은 2000년도 4월에 발생한 V-22의 양산형 개발기의 사고로 인해 ‘틸트로터 개념자체가 VRS(Vortex Ring Status)에 취약한 근본적인 결함을 갖고 있다’ 고 하는 헬리콥터 산업계의 비판으로 위기에 직면하였다.

이에 대해 2001년 5월에 조직된 미의회의 ‘Blue Ribbon’ 팀은 틸트로터 개념자체의 근본적인 결함을 발견되지 않았으며, 논란이 되는 VRS와 관련하여서는 사고 당시의 조건에서는 헬리콥터도 VRS에 빠질 수밖에 없다고 보고하였다. 또한 틸트로터 개념은 VRS와 관련하여 전통적 헬리콥터대비 장점과 단점을 가지고 있는데, 단점으로는 VRS에 빠지면, 좌우 수직추력의 불균형으로 매우 불안정한 상태에 빠질 수 있다는 점이다. VRS는 비행체의 수직 하강율(Decent Rate)이 클 때 잘 발생한다. 또한 아래의 그림 6과 같이 하강각(Decent Angle) 과 전진속도와 상관관계를 갖는다.

틸트로터의 특징은 항공기를 수직으로 들어올리기 위해 회전날개의 회전면에 걸리는 하중(회전면하중 : Disc Loading)이 일반헬리콥터보다 크다는 점이다. 이는 헬리콥터와 프로펠러의 특징을 최적으로 조합하기 위한 어쩔 수 없는 선택이다. 일반 헬리콥

터의 회전면하중이 8~13 (sq.ft/lb) 인 반면, 틸트로터 비행체의 회전면하중은 13~17(sq.ft/lb) 수준의 분포를 갖는다. V-22의 경우에는 함상탑재 요건에 따라 로터 회전면의 지름이 38ft로 제한되고, 해군의 여러 가지 요구조건이 추가되면서 이륙중량이 증가함에 따라, 회전면하중이 20(초기설계)에서 증가하여 22수준까지 되었다. 회전면하중이 클수록 VRS의 원인이 되는 하강률이 쉽게 커지는 문제가 있다. 그러나 Blue Ribbon 팀은 틸트로터 비행체는 일반헬기에 비해 VRS 현상과 관련한 장점으로써 다음 세 가지를 들었다.

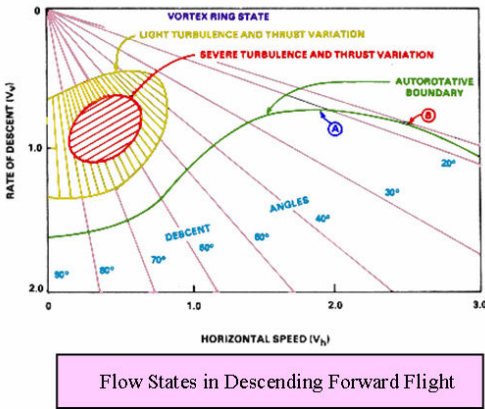


그림 6. Vortex Ring Status Region

1) VRS에 진입하는 하강율이 일반헬기보다 높다는 점. (즉 이점은 헬기보다 높은 속도의 하강율 영역에서 VRS 현상이 발생하며, 하강율 자동제한기로 해결 될 수 있음을 의미한다.)

2) 고도가 충분하다면 VRS에서 틸트로터 비행체의 이상 롤운동 현상은 자동적으로 VRS에서 벗어나게 할 수 있다. (헬기의 경우 파일럿의 숙련된 조작이 필요)

3) 틸트로터 좌우의 나셀을 기울일 수 있는 특징으로 인해, 나셀을 조금만 기울이면 쉽게 VRS에서 빠져나올 수 있다. (즉 VRS 진입전에 조종사 경고장치가 적절히 기능하여야 한다.)

이러한 의회보고에 따라 2002년 9월 개량된 VMX-22, CV-22로 비행시험이 재개되었다. 운용영

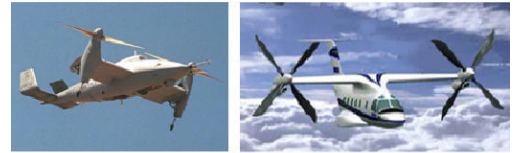
역 확장, 급강하, 전투기동, 저속기동, 편대비행, 함상운용, 공중급유, 운용소프트웨어 검증시험 등이 성공적으로 종료되어 2005년 9월 20일 양산형에 대한 인증획득을 공표하였다.

V-22의 성공에 힘입어, 2007년 인증획득을 목표로 민수용으로 개발중인 BA609의 순조로운 개발진행, 무인기로 개발된 Eagle Eye 프로그램의 개발성공 및 2007년 시장진입을 목표로 한 양산형의 순조로운 개발 진행, 이에 대한 미국해안경비대의 대량 주문이 이어지고 있다. 또한 무인기로 대체 가능한 잠재수요에 대한 관심을 증폭시켜 틸트로터 비행체는 미래형 수직이착륙 비행체 개념으로서 다시 주목을 받고 있다.



V22

BA609



Eagle Eye

Euro Tilt (ERICA)

그림 7. 현재진행중인 틸트로터 프로그램

V-22는 2000년도에 고도 7.6km(25,000ft)에서 633km/h(342kts)의 최고속도를 기록하여 헬리콥터보다 2 배이상 빠른 속도로 비행할 수 있음을 입증하였다.

### 2.3 코액시얼 복합헬리콥터-시콜스키 (Coaxial with Pusher)



그림 8. 시콜스키사의 X2 기술검증기

벨사에 미래형 수직이착륙 항공기에 주도권을 빼앗긴 시콜스키사는 동축로터(coaxial rotor)와 추진식 프로펠러(pusher)를 복합한 X2 개발프로그램을 2005년 1월 시작하였고, 동년 9월 미정부로부터 개념 및 기본설계에 관한 계약을 받았다. [2]

X2 개념은 틸트로터와 같이 로터를 기울여야 하는 불안정한 구간을 통과하지 않아도 되는 장점이 있으며, 이륙성능에 있어서 우수하다. 그러나 근본적으로 로터의 회전을 유지하면서 후방의 프로펠러 추력에 의한 비행속도 증가는 이미 1960년까지 많은 연구가 이루어진 복합 헬리콥터개념의 AH-56 Cheyenne(Lockheed), Rotodyne (Fairey Aviation), XV-1(McDonnell)와 유사한 개념이다.



그림 9. 복합헬리콥터 개념연구 사례

유일한 특징적 차이는 동축로터 개념을 도입하였다는 점이다. 동축로터 개념의 도입으로 수직이륙 효율성은 높아졌지만, 헬리콥터가 갖는 근본적인 속도 제한은 동일하다. 동축로터 개념의 도입은 로터의 회전면 면적을 줄여서 전진비행시 저항을 줄이는 데에 기여하겠지만, 그 영향은 제한적일 것이다. 전진속도를

증가시키기 위해서는 XV-1에서 도입한 바와 같이 로터의 회전속도를 줄이는 개념의 도입이 필요하다.

이는 자이로(Gyro)모드로 전환하든지, 터보샤프트엔진의 출력 RPM을 제어함으로써 가능하다. 자이로모드를 이용한 로터 회전수 줄이는 기술은 자이로 모드에서의 로터 블레이드의 안정성 확보를 위한 최소한의 회전수 유지가 필요하다. 즉, 풍차효과에 의한 강제적인 회전유지(Wind-milling)가 필요하다. 이러한 특성은 비행속도 증가를 다시 제한한다. 엔진 출력 RPM 제어는 틸트로터에서 적용하고 있는 매우 고난이도의 기술이다. 이는 엔진제어 만이 아니라, 2개의 운용 RPM 영역에서 로터 시스템의 회전수가 로터 블레이드의 고유진동수와 적절한 고유진동수의 이격(Separation)이 필수적이기 때문이다. 틸트로터는 회전의 모드로 운용하는 비행영역이 제한적이기 때문에 2개의 RPM 모드로 운용시 이러한 이격이 비교적 용이하다. 그러나 동축로터 개념의 경우는 이 또한 매우 비현실적이 될 가능성이 높다. 결과적으로 동축로터 개념의 헬리콥터는 단일 RPM으로 운용하게 될 것이며 이 경우 최대속도의 증가는 제한적이게 될 것이다. X2 항공기는 위에서 예시한 두 가지 개념의 로터회전속도 감소없이 추진되는 것으로 예상된다. 따라서 AH-56 Cheyenne의 최대속도를 제한적으로 추월하는 데에 그칠 것이다. 1960년대까지 이루어진 3개 개념의 최대속도는 다음 표 1과 같다.

표 1 복합헬리콥터의 속도기록

항공기명칭	최대속도	년도
XV-1	322 km/h	1956
Rotodyne	307 km/h	1959
AH-56 Cheyenne	396 km/h	1967

AH-56 Cheyenne 이 타 개념에 비해 월등히 높은 최대속도를 보인 이유는 개념의 우수성 때문이 아닌, 엔진의 T/W가 0.45나 되는 과도한 추력을 이용한 덕으로써, 경제적 유용성으로는 의미가 없다. 틸트로터의 경우 T/W가 0.25 이하 수준이다. (일반 헬기의 경우 : 0.16 ~ 0.18)X2를 개발하는 시콜스키사는 최대속도 463km/h(=250kts) 달성을 주장하지만, 틸트로터 수준의 추력비 (0.25)로 이러한 속도를 달성하기 위해서는 항력 감소와 관련한 커다란 기술적

도전에 직면할 것이며, 이 전의 복합헬리콥터와 같이 그 실용성에 한계를 드러낼 가능성이 높다.

## 2.4 Canard Rotor Wing (XV-50)-보잉



그림10. 보잉의 멈춤식로터 항공기 X-50

로터를 정지시켜 고정익으로 사용하여 멈춤식 로터(Stopped Rotor)라고도 불리는 이 개념은 제트엔진의 후류를 블레이드 끝단으로 보내어 토출되는 유동의 반력으로 로터를 회전, 이륙하는 개념이다. 이로써 복잡한 동력전달장치(transmission)를 없애고, 정지비행시 제트추력을 동체 후방으로 분사하여 고속의 전진비행이 가능하다. 그러나 이 개념은 앞뒤 대칭형의 비효율적인 날개꼴(Airfoil)과, 비틀림각을 줄 수 없는 로터깃형상의 제약, 제트후류를 블레이드 끝단에 보내기 위한 고온소재로 인한 무게증가, 가로세로비가 작은 로터깃에 의한 조종력 증가 및 불안정성 등으로 기술적 적합성이 떨어지는 것으로 판단되며, 최근에 있던 XV-50의 비행시험 실패가 이를 잘 보여준다.

이상과 같은 4가지 비행체 개념이 최근 진행중인 고속 수직이착륙 비행체 개념이며, 그 중 틸트로터 개념이 운용 효율성 과 기술적 검증 면에서 유효성이 입증되었으며, 가장 큰 주목을 받고 있는 비행체 개념이다.

## 3. 결 론

이상으로 지난 반세기 동안 수행되어온 고속 고성능 수직이착륙 항공기 개발동향과 최근의 추세 및 미

래형 항공기로서 적합한 개념에 대해 고찰해 보았다. 스마트무인기 개발사업은 비행체 개념선정에 관한 선진국의 막대한 연구투자 결과를 활용할뿐 아니라, 미래형 신개념 선정을 위한 국제공동 및 독자적 연구를 통해 틸트로터 비행체 개념을 선정하여 지난 3년여 동안 설계 개발에 매진하였다. 틸트로터 개념은 현재 가장 주목받는 미래형 신개념 수직이착륙 개념으로 부상하고 있는데, 이러한 세계추세와 더불어 스마트무인기개발사업은 단순한 신기술개발사업의 의의를 뛰어넘어 진정으로 미래 항공산업시장에서 핵심적으로 필요한 기술개발을 선점할 수 있는 의의를 지니게 되었다. 이는 미래형 신개념 비행체 선정을 위한 초도 기획연구의 엄밀함 덕분이다.

수직이륙이 가능한 고속성능의 항공기 개발은 기술의 발달과 함께 다양한 방향으로 진행되어져 왔으나 그 실용성과 미래적 발전 가능성에 있어서 틸트로터보다 유력한 개념은 없는 상태이다. V-22 개발로 잘 알려진 틸트로터 개념의 비행체는 연구개발을 시작하지 반세기가 지나서야 실용화가 가능했다. 틸트로터기의 실용화를 성공시키기 위해 여러 분야의 기술적인 진보가 필요했다. 그중에서도 특히 로터 시스템, 드라이브 시스템, 컴퓨터 기술의 발전에 의한 전기식 비행제어시스템, 그리고 헬리콥터특성과 프로펠러 특성을 복합한 비행제어 알고리즘 개발 및 이의 신뢰성을 검증하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션 기술의 발전은 틸트로터와 같은 특수형상 비행체의 비행을 가능하게 해주었다. 스마트무인기기술개발사업단에서는 이러한 설계기술을 성공적으로 확보하여 상세설계를 종료하였고 07년에 제작 완료, 08년에 조립 및 지상시험 완료 및 40% 축소기 비행시험을 통한 비행제어로직 검증 완료, 09년에 초도비행시험에 진입할 계획 가운데 성공적으로 진행중이다.

## 참고문헌

1. 안오성, "ADVANCED VTOL CONCEPT FOR SMART UAV PROGRAM", 4th Gyeongnam-Tokai Aerospace Technology Symposium, 2003
2. <http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/x2.htm>