

틸트로터 비행체 개념에 대한 기술적 논란 및 비행안전성 논란 분석

안오성*, 김재무**

Synthetic Overview on the Dispute about Tiltrotor Technology and Flight Safety

Oh-sung Ahn*, Jai-Moo Kim**

Abstract

Several decades have passed since tiltrotor technology became a hot issue of debates between aircraft majors, policy maker and mass-media. Although most of those subjects have been officially probed or answered in objective way, biased articles or argues related with the adequacy of this technology still prevail in the way of tilt-rotor development programs, which are totally irrelevant and out-dated. This paper aims to help understanding on those issues in technically balanced manner and the cases of flight test mishaps.

초 록

틸트로터 기술이 항공기 주요 제작사와 정체 입안자 그리고 대중매체의 뜨거운 논쟁주제가 되어온 지도 수십 년이 지났다. 그러한 주제에 대해서 공식적인 조사와 객관적인 방법에 의해 답변이 되어졌음에도 불구하고 틸트로터 기술의 적절성에 대한 우려의 기사나 논란이 여전히 틸트로터 개발프로그램의 발목을 잡으려 할 때가 있는데 이러한 논의에서 거론된 기술적 내용 중 대부분은 사실과 동떨어진 것이다. 이 논문은 그러한 이슈와 비행시험에서 발생했던 사고에 대한 균형 있고도 기술적인 이해를 제공하기 위해 작성되었다.

키워드 : 틸트로터(Tiltrotor), VRS(Vortex Ring State), 복합기(Compound Aircraft), 수직이착륙(VTOL), 자동회전(Auto-rotation)

1. 서 론

틸트로터 항공기 개념의 혁신성과 우수한 성능, 막대한 연구개발 이후에 맺은 실용화 진입 의결 실과 그 이후 지속되는 시장의 관심에도 불구하고

틸트로터의 기술적 안전성에 관한 의문을 제기하는 기사와 오해들이 이 혁신적 기술의 시장 확대에 걸림돌로 작용하고 있다. 본 논문은 틸트로터 기술의 혁신성과 성능적 우위를 조명하고, 논란과 오해를 불러일으키는 주제에 대해 과학적 사실을 토대로 불필요한 오해를 배제하고자 한다.

* 접수일(2007년 12월 14일), 수정일(1차 : 2008년 6월 5일, 2차 : 2008년 6월 17일, 게재확정일 : 2008년 7월 1일)

* 스마트무인기사업단 체계개발팀/ohsung@kari.re.kr

** 스마트무인기사업단 체계개발팀/jmkkim@kari.re.kr

2. 헬트로터 기술은 혁신적인가?

그림 1. 연도별 신개념 수직이착륙 항공기 개발

비록 수많은 항공기 개념이 그동안 연구되고 개발되었지만, 그 모든 항공기들은 논란의 여지없이 크게 두 가지 개념 군으로 나눌 수 있는데 그것은 고정익 항공기와 회전익 항공기이다. 회전익 항공기는 수직이착륙이 가능하여 활주로가 필요 없고 정지비행이 가능하여 그 임무 활용 가능성성이 높지만 고정익 항공기에 비해 비행성능(고속성능, 운용고도 성능, 운용환경 성능 등)에 있어서는 몇 가지 심각한 제한이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 고정익 항공기와 회전익 항공기의 장점을 결합한 실용적이고도 안전한 복합형 항공기에 대한 연구는 언제나 항공공학도들의 꿈이었다. 그럼 2는 다양한 미래형 수직이착륙항공기 연구 개념을 보여주고 있으며 각 개념별로 현재에도 활발하게 연구가 진행되고 있다.

복합형 항공기는 회전익기처럼 수직이착륙을 하지만, 고정익기처럼 고속, 고고도, 장거리 운항이 가능한 항공기이다. 반세기가 넘는 지난기간의 복합형 항공기 연구결과 중에 실용화에 성공한 것은 초음속 영역에서는 Vectored Thrust 방식을 이용한 F-35와 해리어기가 있고, 아음속 영역에서는 텔트로터 방식을 이용한 V-22가 있다.

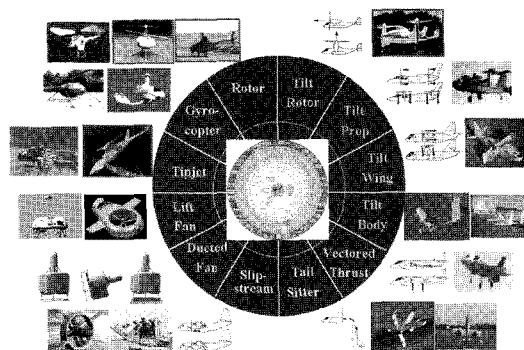


그림 2. 미래형 수직이착륙항공기 연구동향

그림1은 이러한 복합항공기 실용화에 얼마나 많은 시간과 그에 상응하는 예산이 투입되었는지를 가늠할 수 있게 해준다.

아음속 방식보다 초음속 방식이 먼저 실용화에 성공한 이유는 복합형 항공기의 주된 수요처인 군(Military)이 우선적으로 초음속 복합형 항공기 개발에 예산이 투입된 원인도 있지만, 항공기 설계 관점에서는 초음속 방식의 복합기가 아음속 방식 대비 난이도 면에서 유리하기 때문이다. 즉, 초음속 복합기의 경우 비추력(T/W : Thrust

over Aircraft Weight)이 1.2 이상으로 설계되어 엔진출력만으로도 수직이착륙에 충분한 파워가 제공되지만 아음속 복합기의 경우 비추력이 0.2 ~ 0.25 정도로 설계되기 때문이다. 즉 항공기 무게의 20% ~ 25% 파워만을 제공하는 엔진을 장착하고, 그 엔진의 축마력을 이용하여 회전의 항공기처럼 로터 블레이드를 회전시켜 수직이착륙에 필요한 추력을 발생시켜야 한다.

표 1. 텔트로터 세대별 기술적 특성: 1~3세대

세대	항공기 FF~종료 ¹⁾	로터시스템 특성	비행제어 시스템특성	비고
1	XV-3 '56~'66	-Fully Articulated -3 Blade	-Manual Control -Bad HQ and Pilot Work Load	텔트로터의 비행동특성개념연구기
	XV-15 '79~'03	-Gimbal Hub -3 Blade	-Dual SCAS Augmentation on Mechanical Control -Single Pilot covers all Flight Control Work	텔트로터 실용화 기초기술연구 : 조종안정성, 동특성연구, 하중경감, 고속안정성등. 700시간비행
2	V-22 (MV-22 EMD) '89~'00	-Gimbal Hub -3 Blade -Elastomeric Bearing	-Tripple FCS -Full FBW -Autopilot	최초실용화 운용성능 검증 시험종료 단계 발생한 사고 조사와 설계 개선을 위해 잠정중단됨.
	V-22 (VMX-22) '02~'05	-Gimbal Hub -3 Blade -Elastomeric Bearing	-Tripple FCS -Full FBW -Autopilot -VRS Protection	안전성 개선후 운용성능 검증 시험종료. 05년 전면양산승인

또한, 초음속 복합기의 경우 분사되는 엔진후류의 방향을 전환하는 단순한 개념이지만, 아음속 복합기의 경우 고속 회전하는 탄성체 블레이드를 안정적으로 90도 회전시켜야 하므로 공탄성 문제와 관련된 매우 위험하고, 어려운 설계 기술을 요구하기 때문이다.

아음속 복합기로서 유일하게 실용화에 성공한 텔트로터 항공기는 로터 및 비행제어시스템 관련 5세대로 분류할 수 있다.(표1,2) 스마트 무인기는 Eagle Eye와 동일한 수준의 제 4세대 텔트로터 비행체로서, 가장 진보된 텔트로터 기술과 가장 진보된 무인항공기 기술, 즉 전자동 자세제어 및

이륙부터 착륙까지 사전 입력된 프로그램대로 자동비행 및 비상상황 대처가 가능한 최신무인항공기 설계기술을 접목한 비행체이다. 그중 자동돌방지 및 적응제어 등은 이글아이 보다 진보된 스마트제어 기술로서 국내자체개발 진행 중이다.

표 2. 텔트로터 세대별 기술적 특성: 4~5세대

세대	항공기 FF~종료	로터시스 템 특성	비행제어 시스템특성	비고
4	TR-911 '94~'98			최초무인텔트로터. 50시간 비행.[1]
	A TR-918 G L E '06~'07 E Y TR-916 E '08~'12	-Gimbal Hub -3 Blade -Elastomeric Bearing	-Dual FCS -Full Authority FBW -Full Autopilot -Full Automatic Flight -Target Auto-tracking -Automatic Engine Control by DFCC -Rudder-less	양산형납품을 위한성능입증기, 성능입증 미완상태에서 사고 발생 후 프로그램진행 잠정중단 09~'11성능입증시점후, '12년부터 '24년 까지45대납품 계획이 있으나, '14년 이후로 연기됨[2]
	Smart UAV, '06~'12		-Dual FCS -Full Authority FBW -Full Autopilot -Full Automatic Flight -Target Auto-tracking -Automatic Engine Control by DFCC -Rudder-less	세계2번째 무인텔트로터기. 미국 이 외의 국가에서 최초로 독자개발에 성공한 텔트로터기.
		-Gimbal Hub -3 Blade -Semi-Elastomeric Bearing	-Collision Avoidance -Reconfigurable Control -Adaptive Control	최신 텔트로터 기술 만이 아니라 최첨단무인항공기 기술과 전자동 제어, 비행, 충돌방지 등의 스마트 기술을 접목
	BA609 '03~'10 인증완료 : '10예정		-Tripple FCS -Full FBW -Autopilot -Automatic Fuel Control by DFCC -Power Lever Tactile Cueing system	최초상용유인 텔트로터기. FAA와 텔트로터 전용인증베이시스를 만들고 비행시험 진행중
		-Gimbal Hub -3 Blade -Elastomeric Bearing		

1) FF : First Flight

종료: 개발/운용검증시험종료

이러한 진보된 기술을 단번에 개발하는 위험을 최소화하기 위해, 비행제어로직개발 및 검증용으로 40% 축소기를 제작하였고, '06년 수동호버비행성공, '07년 반자동전환비행, '08년 자동전환비행에 성공하였다. 이는 틸트로터 개념설계를 시작한 '04년 이후 5년 만의 결실로서, 벨사와 같이 수십 년간의 선행연구투자나 틸트로터에 관한 경험에 전무한 환경에서 독자적으로 이루어낸 결실이다. 특히 벨사도 무인 틸트로터의 실용화 개발에는 10년 이상의 연구기간이 이미 소요 되었고 향후, 기준 계획인 2012년 실용화 진입도 2014년 이후로 연기되었다.

이러한 관점에서, 최근 축소형 모델의 자동전환비행의 성공은 국내 항공기 개발사에 이정표가 될 만한 매우 큰 기술적 의의와 가치가 있다고 할 수 있다. 오랜 기술개발과 투자를 거친 벨사의 실용화 성공과 4세대, 5세대 틸트로터기 개발 추진은, 기존의 주요 수직이착륙기 제작사들을 자극하여 틸트로터에 벼금가는 성능의 혁신적인 수직이착륙기 개발이 추진되고 있으나 가까운 미래에 틸트로터를 능가하는 기술이 실용화되기는 어려울 것으로 보인다. [1]

“틸트로터 기술은 혁신적인가?”라는 의문은 틸트로터 연구가 오래전에 시작되고 이미 실용화가 완성되었다는 의미일 것이다. 그러나 분명한 것은, 이 기술은 막대한 기술개발투자 이후 최근에야 실용화 진입을 하였으며, 진입장벽이 매우 높은 첨단기술이라는 점이다.

3. 틸트로터의 장점(회전익대비)

틸트로터 비행체에 관한 기술적 논란을 거론하기 전에 틸트로터 비행체의 기술적인 우수성에 대한 이해가 필요하다. 바로 그 우수성이 여러가지 논란과 우려에도 불구하고 틸트로터가 실용화에 성공하고 그 활용처가 확대되고 있는지, 또 지속적인 연구개발이 필요한지를 설명하는 진정한 이유이기 때문이다.

회전하는 블레이드 및 로터 허브에서 발생하는 공기저항의 증가로 인해 속도와 체공성능이

제한되고, 운용 고도의 제한, 속도와 고도 제한의 복합작용으로 인한 운용환경의 제한, 그리고 지상 접근 시 소음의 문제로 그 활용성 및 성장에 한계를 갖고 있었다.

이러한 한계를 극복할 필요가 항공기 운용자의 관점에서 절실한 욕구로 존재했기 때문에 그림2에서 보이는 바와 같이 다양한 연구개발이 진행되었고 지금도 진행 중인 것이다.

3.1 고속성능 및 고고도 운용 성능

틸트로터는 헬리콥터보다 2배 이상 빠른 속도로 비행이 가능하고 고고도 성능은 1.5배 우수하며, 고고도에서의 고속성능은 3배 이상 우수하다. (그림3 참조 - 미국, 벨사 제공, 틸트로터 항공기의 최대속도 프로파일은 스마트무인기보다 최대 속도가 낮게 설계된²⁾ 벨사의 Eagle-Eye 기준임.)

헬리콥터의 최대속도³⁾는 비행체 전진속도가 높아질수록 회전하는 날개(블레이드)의 끝단에서 발생하는 강력한 공기 충격파에 의한 저항으로 인해 300km/h(170kts) 가 물리적 한계로 알려져 있다. 또한 실제 경제적 운용속도⁴⁾는 140 ~ 220 km/h(75 ~ 120 kts) 범위에서 결정된다. 경제적 운용속도기준으로 보면 기존 헬리콥터는 동급의 터보프롭엔진을 사용하는 프로펠러 항공기(경제

2) 벨사의 무인기(이글아이)의 최대속도가 스마트보다 낮은 이유는 벨사는 실용성 관점에서 최대속도보다는 체공시간을 늘리는 테네 주안점을 두었고, 스마트무인기에서는 향후, 유인기 기술개발이 가능한 수준의 고성능 로터-블레이드 및 공기역학적 설계기술 개발을 위해 목표를 높게 설정하고 추진하였기 때문이다.

3) 헬리콥터의 최대속도를 비교할 때에는 실용적 기술 범위에서의 지표여야 비교하여야 한다. 즉 비실용적 Thrust Loading¹⁾ 을 이용한 속도기록 (214 kts를 기록한 AH-56 경우 Pusher를 위한 엔진출력 추가로 총 Thrust Loading 은 0.45)이거나 제트엔진을 장착한 경우를 제외하여야 한다. Thrust Loading은 단위이륙중량에 대한 엔진의 최대 마력 수준을 의미한다. 이 값이 작아야만, 연료 소모율 및 기타 성능이 우수한 실용적 설계가 가능하다. 틸트로터의 Thrust Loading은 0.25를 넘지 않는다. 따라서 최대속도 비교를 위한 헬리콥터의 실용적 Thrust Loading은 0.25이어야 한다.

4) 최대속도와 경제운용속도를 나누어 언급함은 헬리콥터의 최대속도와 틸트로터의 경제운용속도가 비교되는 혼선을 피하기 위함임.

적 운용속도 400 ~ 500km/h) 속도의 50%에 불과하다고 할 수 있으며 제트여객기에 비해서는 20% 수준에 불과하다고 할 수 있다.

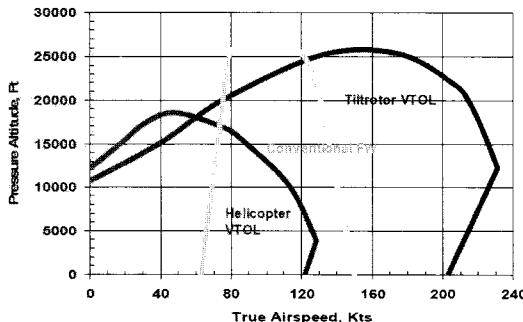


그림 3. 일반헬기 및 프로펠러 비행체 대비 털트로터의 속도성능과 고도성능 [3]

털트로터로는 600km/h(350kts)의 속도까지 실용적 엔진추력으로 가능함이 비행시험을 통해 입증되었고 (XV-15: 345 kts, in dive, 1986 ; V-22: 342kts, level, 25,000ft, 2000) 경제적 운용속도 기준으로는 XV-15 경우 561km/h (303kts; V-22 경우 510km/h, 275kts)가 이미 입증되었다.[1]

또한 고고도 운용성능에 있어서 헬리콥터는 최대 운용고도는 5km수준이며 실용최대운용고도는 3km 수준으로서, 이보다 높은 고도에서는 속도가 급격히 감소하는 특징이 있다. 털트로터는 최대운용고도가 8km(25,000ft)이고 최대실용운용고도는 5km ~ 6km 로서 헬리콥터의 2배 수준에 달한다. 특히 고도가 올라갈수록 운용속도가 급격히 헬리콥터와 달리, 고고도에서도 빠른 속도를 유지할 수 있다. 이러한 고속, 고고도 운용특성은 생존성 및 다양한 활용성에 있어서 매우 중요한 특성이다.

스마트무인기의 최대속도는 500km/h(270 kts)이고, 경제적 운용속도는 400km/h 이다.

3.2 장거리운용성능과 고속성능의 상관성

비행체의 임무 반경은 고속성능의 제곱에 비례하여 증가하게 된다. 아래 그림은 해상에서 모선에서 출발하여 200km 멀어진 임무지역에서 임

무를 수행하고 돌아오는 운용의 경우 50km/h의 Head Wind 조건의 운용환경에서 체공시간대비 최대속도의 중요성을 보이는 것이다.

결과적으로 설계순항속도가 400km/h 수준인 고속 수직이착륙 비행체는 1.6 시간에 임무를 수행 할 수 있지만, 순항속도가 140km/h 수준인 전통적인 회전익 비행체 (또는 소형 고정익 경우에도) 6시간이 지나도 모선으로 돌아오기 어렵게 된다.

이것은 장거리 운용성능에 있어서 고속 성능의 실용성을 잘 반증해 준다. 저속 성능만이 요구되는 영역에서는 여전히 전통적인 회전익 항공기가 최선의 선택이다. 그러나 다음과 같은 실제적이고 독보적인 시장의 요구가 있는 경우에는 고속성능을 보유한 비행체가 매우 유리한 위치를 차지할 수 있게 되는 것이다.

- 넓은 임무반경
- 빠른 임무 응답시간
- 저속과 고속 및 장/단거리의 다양한 임무수행

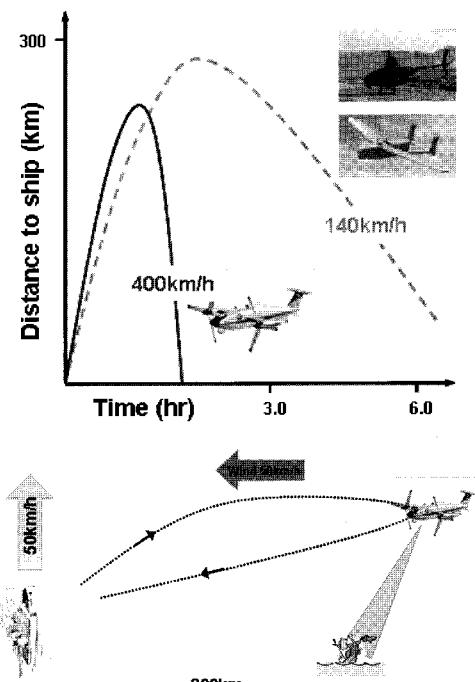


그림 4. 장거리운용성능에 있어서 고속성능 효용성

3.3 장거리운용성능과 고도성능의 상관성

장거리 운용성능과 관계된 또 다른 중요 요소로서 고고도 성능이 있다. 미국 해양경찰청이나 국경감시, 또는 국내에서도 그 소요가 확인된 200km에 달하는 임무를 무인기로 하기 위해서는 통신가시선(Line of Sight)이 확보되어야 하는데, 헬리콥터의 경우 운용고도가 낮아 먼 거리 까지 비행해 나가더라도 무인비행체로서 운용은 어렵게 되는 단점이 있다.

따라서 스마트무인기의 경쟁기종으로서 기존 유인헬기를 무인기로 개조하여 세일즈에 나선 Fire Scout의 경우는 임무반경이 200km로 나와 있지만, 실제적으로 이러한 임무반경으로 운용하려면 고도 5km 이상 운용이 가능함이 임증이 되어야 하는 기술적 과제가 남아 있다. 이를 위해서는 상당한 큰 출력의 엔진탑재를 해야 하는 부담이 발생하고, 그 결과 Fire Scout 이 내세우는 체공성능은 현격하게 줄어들게 될 것이다.

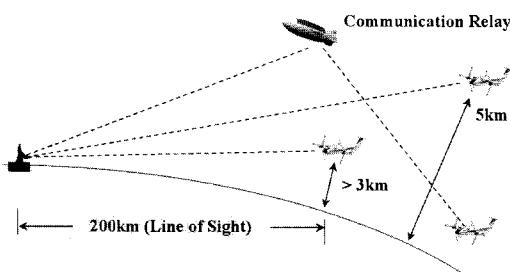


그림 5. 장거리운용성능에 있어서 고도성능 효용성

3.4 양항비와 체공성능

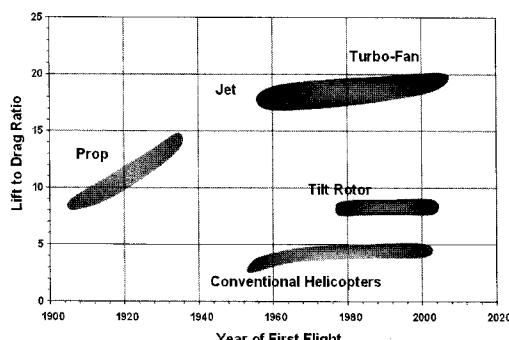


그림 6. 여러 가지 항공기의 L/D 이력[4]

기존의 회전익기는 양항비가 5 수준이며 틸트로터는 8 이상의 수준이다. 간단히 말하면 틸트로터 비행체의 항력은 기존 회전익기의 60% 수준밖에 되지 않는다. 그러나 이러한 차이는 경제운용속도 기준이며 고속으로 갈수록 이 차이는 급격히 커진다. 이러한 공기역학적 특성 때문에 틸트로터 비행체는 수직이착륙이 가능한 고속비행체이면서 동시에 체공성능에 있어서도 불리하지 않다.

3.5 소음

헬리콥터는 BVI Noise (Blade Vortex Interaction Noise)현상에 의해 굉장히 큰 소음이 발생한다. 즉 회전하는 날개에 의해 생성된 강렬한 볼텍스를 뒤따라 오는 회전익이 부딪히면서 일정한 간격으로 매우 큰 소음을 생성하는 것이다. 틸트로터는 대부분의 운용을 고정익 모드로 하므로 소음은 현격하게 줄어든다. 또한 헬리콥터와 같이 수직이착륙 할 때에도, 회전 블레이드의 반경이 짧아 고 RPM으로 회전하게 되어, 볼텍스의 강도는 매우 잘게 나뉘어지게 되고 따라서 소음 수준도 일반 헬리콥터의 Tail Rotor 수준으로 낮아지게 된다.

저소음 특성은 고속, 고고도 성능과 함께 저탐지성, 생존성 측면에서 매우 중요한 특성이다.

4. 틸트로터 기술의 논란점

항공기 설계개량과 최적화에 관계된 특정개념들은 언제나 그에 수반되는 단점(신뢰성, 중량, 비용, 기타성능의 저하)을 동시에 파생한다. 항공기 운용 및 통합 성능 관점에서 단점을 최소화하고 장점을 최대화 하는 것이 항공기 설계특성이며 혁신적 개념의 도입은 더욱 그러하다. 따라서 성능의 관점에서 틸트로터 기술에 문제제기를 하는 것은 그 문제되는 성능이 전술한 3장의 놀라운 성능혁신에 견주어 보았을 때 어떤 것이 더 중요한가를 따지면 된다.

그런데 논란이 되는 것이 성능의 문제가 아니

라, “안전성과 관계된 문제를 일으키는가?”라는 의문이 발생하면 이는 상황이 달라진다. 텔트로터 반대론자들은 V-22의 1차 개발(‘89~‘00)기간에 발생한 4건의 사고 중 2000년 4월에 발생한 3번째 사고와 관계된 VRS 문제와 지금까지 V-22가 비행한 총 26,000 시간 동안[5] 단 한 번도 발생한 적이 없는 Auto-rotation 조건에 대한 취약성을 들어 텔트로터 기술에 근본적인 문제가 있다고 주장하고 있다. 결론부터 말하면 텔트로터 기술은 이 두 가지 안전특성에 있어서, 공기역학적 관점에서는 헬리콥터에 비해 불리한 특성이 있다. 하지만, 비행체 전체 시스템 관점에서 도입된 보완설계 즉, “Design Solution”으로 인해 해결되었거나, 경우에 따라서는 보다 유리한 특성을 갖고 있으며 이는 ‘02 ~ ‘05년 동안 성공적으로 수행된 V-22의 2차 운용성능검증시험과 2001년 발행된 미 의회 보고서를 통해 입증된 바이다.

4.1 VRS (Vortex Ring State)

텔트로터 개념은, 2000년도 4월에 발생한 V22의 양산형 개발기의 사고로 인해 ‘텔트로터 개념 자체가 VRS(Vortex Ring State)에 취약한 근본적인 결함을 갖고 있다’고 하는 헬리콥터 산업계의 비판으로 위기에 직면하였다.

VRS는 비행체의 수직 하강율(Decent Rate)이 클 때 잘 발생하며, 하강각, 전진속도와 상관관계를 갖는다.

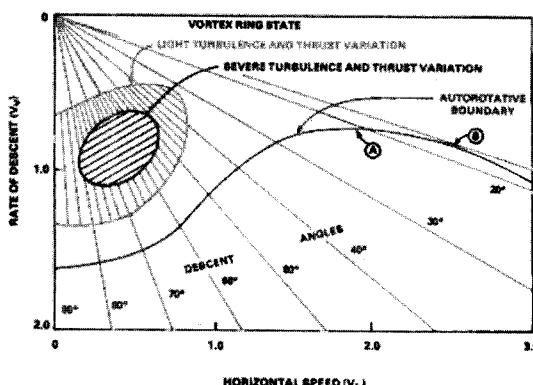


그림 7. Vortex Ring State Region

그림7에서 보여주는 바와 같이 회전의 항공기가 착륙을 위해 전진속도를 낮추어 수평비행속도가 낮은 상황에서 하강율과 하강각도가 큰 경우, 회전의 항공기의 블레이드에서 발생한 후류가 다시 블레이드 상단으로 올라오는 현상이 발생하는데, 이 경우 추력을 급격히 감소하여 매우 위험한 상황이 되는데 이것을 VRS라고 한다.

‘00년 12월 발생한 4번째 추락 사고(VRS와 무관한 유압라인 고장과 고장모드 비행제어로직 설계의 문제로 발생)로 인해 텔트로터 기술의 안전성에 대한 논란이 다시 거세지면서, V-22 프로그램은 양산승인 직전에 전면 비행중단조치와 함께 의회조사가 진행되었다. 미 의회에 의해 조직된 ‘Blue Ribbon’ 팀은 ‘01년 5월에 발간된 보고서[6]에서 “텔트로터 개념자체의 근본적인 결함은 발견되지 않았으며, 논란이 되는 VRS와 관련하여 사고 당시의 조건에서는 헬리콥터도 VRS에 빠질 수밖에 없다”고 하였다.

표 3. VRS 현상 관련 텔트로터의 장점

의회보고서 내용	기술적 분석
VRS에 진입하는 Decent Rate 가 일반헬기보다 높은 이유는 텔트로터의 Disc Loading이 일반헬기에 비해 1.5 ~ 2배 높게 설계되어, 블레이드 후류의 속도가 높기 때문이다. 이 점은 헬기보다 높은 속도의 Decent Rate에서 VRS 현상이 발생함을 의미한다.	VRS에 진입하는 Decent Rate 가 일반헬기보다 높은 이유는 텔트로터의 Disc Loading이 일반헬기에 비해 1.5 ~ 2배 높게 설계되어, 블레이드 후류의 속도가 높기 때문이다. 이 점은 헬기보다 높은 속도의 Decent Rate에서 VRS 현상이 발생함을 의미한다.
고도가 충분하다면 VRS에서 텔트로터 비행체의 Roll 현상은 자동적으로 VRS에서 벗어나게 할 수 있다. (헬기의 경우 파일럿의 숙련된 조작 필요)	헬기의 경우 VRS에서 벗어나는 조작을 하기가 어렵다. 텔트로터는 VRS에서 좌우롤이 발생하는데 고도가 충분하면 이러한 를 현상으로 인해 VRS에서 자동으로 벗어날 수 있는 특징이 있다.
텔트로터 좌우의 나셀을 회전할 수 있는 특징으로 인해, 나셀을 조금만 회전하여 주면 쉽게 VRS에서 벗어나올 수 있다. (즉 VRS 진입전에 Pilot Warning이 적절히 제공되어야 한다.)	텔트로터는 헬기에 비해 회전의 모드비행중에도 나셀의 회전을 이용하여 VRS에서 쉽게 벗어나올 수 있다. 따라서, 고정익 항공기의 Stall 진입전 VRS 진입전에 Pilot Stall Warning 장치가 제공되듯, VRS Warning이 제공되면 VRS대응에 매우 유리하다.

표 4. VRS 현상 관련 텀트로터의 단점과 대안

의회보고서 내용	기술적 분석과 대안
디스크 로딩이 크기 때문에 (조종사의 비숙련 조작에 따라)갑자기 높은 Decent Rate가 발생 가능하다.	텀트로터의 Disc Loading이 일반 헬기에 비해 1.5 ~ 2배 높게 설계됨으로 갖는 특성이지만, 바로 그 이유 때문에 장점 1항으로 언급된 바와 같이 높은 Decent Rate에서 VRS에 빠지는 장점과 대칭되는 단점이다. 또한, 장점 3항에서 언급된 바와 같이 VRS Warning 시스템을 이용하여 조종사가 사전에 대처할 있도록 하면 이 문제는 해결된다.
저고도에서 VRS 상태에 빠질 경우 텀트로터는 좌우 롤현상이 발생하면서 날개가 땅에 먼저 닿게 되는 위험이 있다.(헬기의 경우 롤발생 없이 Hard Landing을 하게 된다.)	이러한 단점은 장점 2항에서 언급한 고고도에서의 자동 VRS 탈출 기능에 대칭되는 단점이다. 이러한 단점을 극복하기 위해 수정 모델에서는 VRS Warning 시스템이 도입되었고, 착륙접근시 하강을 관련 조종사 안전교육 및 비행특성 사전교육으로 극복되었다고 할 수 있다.

논란이 되는 VRS관련 표3, 4와 같은 유리한 점과 불리한 점, 그리고 이를 극복하기 위한 대안제안이 있었으며 이는 V-22 개량형에 반영되어 겸중이 완료되었다. 그리고 3차 사고의 원인을 편대비행착륙조건에서 해당 조종사의 무리한 조작이 원인이라 보고하였다.

위와 같은 의회보고에 따라 2002년 9월 개량된 VMX-22, CV-22로 비행시험에 재개되었고, 운용영역 확장, 급강하, 전투기동, 저속기동, 편대비행, 함상운용, 공중급유, 운용소프트웨어검증시험 등이 성공적으로 종료되어 2005년 9월 20일 양산형에 대한 인증획득을 공표하였다.

4.2 Auto-Rotation

Auto-Rotation은 엔진아웃 상태나, 동력전달계통에서 문제가 발생할 경우, 로터 블레이드의 관성 회전력을 이용하여 착륙하는 기능을 말한다. 이를 로터의 관성회전력에 의존하기 때문에 블레이드가 끌 수록 유리하다. 즉, Disc Loading이 일반헬기에 비해 1.5 ~ 2배 수준으로 설계되

는 텀트로터의 경우 이 문제에 취약할 수 밖에 없다. 군용으로 개발된 V-22에는 Auto-Rotation 기능 요구도가 존재하지 않았으며, 대부분의 임무 운용이 고정익 모드로 운용되고, 2개의 엔진을 이용하여 좌우에 각각 동력전달이 가능한 배업 시스템 설계특성으로 문제가 되지 않았다. 그러나 안전성에 관한 요구도가 군용기에 비해 보다 높은 상용 유인기로서 개발되는 BA609의 인증 관련하여서 이 문제와 관련한 많은 논의가 있었던 것으로 전해진다. 헬기와 달리 Auto-Rotation으로 비상착륙하지 않고, 고정익 비행체와 같이 무동력 할강으로 착륙접근을 하는 방안도 고려되었고 관련하여 블레이드가 지상에 먼저 닿는 문제를 해결하기 위해 Touch down 직전에 Flare하는 방안과, 이러한 비상착륙조건에서 블레이드가 먼저 땅에 닿더라도 기체파손에 영향을 주지 않도록 처리하는 방안 등이 FAA와 함께 검토되었다고 전해진다.

당초 2008년을 목표로 했던 BA609의 인증은 2010년으로 미루어졌지만, FAA 인증절차상 인증 시험이 시작된 이상 인증 Basis 유효기간(Part 23 급은 3년, Part 25급은 5년)을 넘기면 인증기준이 재조정 되는 률을 고려하여 2010년을 넘기지 않고 인증이 종료될 것으로 예상된다. [7]

BA609가 동력상실 상태에서 어떤 운용개념과 설계 대안을 선택하였는지는 2010년까지는 공개되지 않을 전망이다. 그러나 분명한 것은, 인증 과정의 특성상 논란이 된 “무동력 비상착륙”에 관해 이미 합당한 Design Solution과 겸중방안이 존재한다는 사실이다.

5. 결론 및 전망

텀트로터 비행체 설계기술은 항공기개념 진화 과정에서 가장 최근에 이루어진 혁신적인 기술이다. 이 기술은 수십 년의 투자와 기술개발 후, '02~'05년 실시된 제 2차 운용성능검증시험을 통해 어렵게 군용실용화에 성공하였으며 무인화, 상용유인기로 지속적인 진화/개발이 진행중이다.

지금도 텀트로터의 기술적 문제와 안전성 문제를 제기하는 기사가 국내외에서 가끔씩 제기되

곤 한다. 그 이유는 텔트로터 기술의 진입장벽이 높으면서도 현격한 성능적 비교우위를 갖는 특성으로 인해, 고속 수직이착륙 항공기 시장에 있어서 특정 항공사가 시장을 독점하는 현상에 대한 견제 노력의 일환이라고 할 수 있다.

하지만 그러한 기사에서 거론되는 기술적 논란 사항은 대부분 텔트로터 기술에 대한 통합적 이해도가 부족하거나, 해당 문제를 “비행체 시스템” 차원이 아닌 공기역학적 관점에서만 주목한 결과라 판단된다. 이러한 혁신적 비행체 개념에 부수적인 단점들은 적절한 설계보완 조치로 극복 되었고 검증되었다고 할 수 있다.

즉 미 의회차원의 진상조사를 통해 “텔트로터 개념 자체의 근본적인 결함은 발견되지 않았다”고 이미 결론이 났으며, 논란이 되었던 VRS 취약성은 오히려 헬리콥터 대비 장점이 더 크며, VRS Warning 시스템 도입으로 이 문제에서 완전히 자유한 항공기가 되었다.

텔트로터가 갖는 놀라운 성능, 즉 고속, 고고도, 높은 양항비, 임무반경, 저소음 특성에 기초한 텔트로터 기술의 우수성은 여전히 유효하며, 텔트로터 기술은 계속 진화하고 있다. 3세대 텔트로터인 V-22의 05년 실용화 진입이후, 4세대, 5세대 텔트로터가 실용화 진입을 위해 연구개발이 진행중이다. 스마트무인기는 4세대 텔트로터기의 기술에 벼금가능 기술과 성능을 목표로 국내독자 기술로 개발되고 있다는 점에서 그 의의와 기술적 도전성이 매우 크다고 할 수 있다. 또한, 이러한 관점에서 40% 축소기를 이용한 자동전환 비행 및 자동비행의 성공은 그 기술적 의의가 매우 높다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 안오성, “텔트로터비행체 개발추세와 고속 VTOL기 개발경쟁”, 한국항공우주연구원 항공우주 산업기술동향 제5권 제1호, 2007.7
2. Aviation Week지 기사. “Coast Guard Sidelines VUAVs And Eyes Alternatives”, www.aviationweek.com, 2007.5.23

3. Bell Helicopter, "Eagle Eye Pocket Guide", 2004.
4. Weiner, S., "X2 Technology - A New Perspective on Helicopters," AHS Annual Forum 63, 2006.
5. M.E. Rhett Flater (AHS Executive Director), The Times지 편집자에 보낸 항의 서한. (2007년 9월27일자 타임지에 게재된 “A Flying Shame”이라는 기사에 대한)
6. John R. Dailey, "Report of the panel to review the v-22 program", April 30, 2001
7. http://ain.gcnpublishing.com/content/news/single-news-page/article/in-the-works-bellagusta-ba609-tiltrotor/?no_cache=1&cHash=b3d3188b0f