

## 인증비행시험 안전관리 및 위험도 평가기법 연구

최주원\*

### A Study on the Safety Management and Risk Assessment of the Certification Flight Test

Joo-Won Choi

#### ABSTRACT

Certification flight test is very risky and there are many hazards. Because the flight test is performed with the aircraft, that is safety and flight characteristics are not proven. And the test items and conditions are critical. If there is loss of aircraft during certification flight test, the certification program, development period can be delayed. Therefore, maintaining safety of the aircraft during flight test is very important. There are not much flight test experiences in Korea. However, developed nations has long history of flight test and experiences of flight test accidents. Based on these experiences, they has developed systematic management methods for the flight test safety. In this study, I would like to introduce safety management and risk assessment of the certification flight test.

Key Words: Flight Test, Safety assessment, Safety Management, Type Certification

#### 1. 서 론

항공기의 인증과정에서 최종 적합성 검증과 안전성 평가는 비행시험을 통하여 수행된다.

인증과정에서의 비행시험은 제작자의 자체 비행시험과 인증당국의 주관 하에 수행하는 공식 인증비행시험으로 구분된다. 그리고 제작자의 비행시험은 다시 개발목적의 비행시험과 인증기준의 적합성을 자체인증하기 위한 비행시험으로

구분된다. 인증비행시험의 특징은 항공기의 비행특성과 안전성이 검증되지 않은 상태에서 수행됨으로 위험도가 상당히 높다는 것이며, 또한 비행시험 항목과 시험조건 역시 항공기의 운용 중 발생할 수 있는 최대 극한조건에서 수행되어야 하는 특성이 있어, 많은 사고의 가능성이 존재한다는 점이다.

미국과 유럽의 항공 선진국들에서는 과거 많은 항공기 개발과 더불어 비행시험을 수행해 왔으며, 수많은 비행시험 사고와 경험을 바탕으로 체계적인 인증비행시험의 안전관리와 위험도 평가 기법들을 개발하여, 문서화하여 적용하고 있다.

우리나라의 경우 군용항공기 개발의 경험은

†2011년 3월 3일 접수 ~ 2011년 3월18일 심사완료

\* 정회원, 한국항공우주연구원

연락처, E-mail: choijw@kari.re.kr

있으나, 민간항공기 인증의 경험은 없는 상태이다. 그러나 현재 한국항공에서 국내 최초로 형식증명을 신청하여 민간분야의 인증비행시험을 준비 중에 있다. 이에, 인증비행시험에 대한 위험도평가와 비행시험 안전관리 체계 등을 검토하여 제시하고자 한다.

## 2. 인증비행시험 항목 및 요구도

인증과정에서의 비행시험은 시제기의 저속/중속 활주시험으로부터 시작되어, 점차 속도를  $V_{LOF}$ 까지 가속하는 고속활주 시험을 수행한 이후 초도비행 Profile을 수립하여 기본적인 비행을 수행하게 된다.

이후 점차 속도-고도 등 비행영역을 넓히게 되고 영역확장 비행시험 이후부터는 개발요구도의 만족성 여부를 검증하는 개발비행시험과 인증기준에 따른 감항요구도에 대한 적합성입증을 위한 인증비행시험을 수행하게 된다.

인증비행시험의 경우 FAR/KAS Part 23/25의 고정익 감항기준과 Part 27/29의 회전익 항공기의 감항기준이 있다. 각 Part 별로 비행시험으로 적합성이 검증되는 항목의 비율은 약 40~50% 정도이며, 이 중 가장 많은 비행시험이 요구되는 부분이 전기체의 비행특성을 평가하는 부분인 Subpart B "Flight" 부분이다.

다음은 일반적으로 인증과정 중 수행되는 비행시험 항목들이다.

- ▶ 초도 비행시험 (지상활주시험 및 초도비행)
- ▶ 기본 비행시험 (속도/고도 보정시험 등)
- ▶ 구조 비행시험 (하중 비행시험, 플러터 시험 등)
- ▶ 동력계통 비행시험
- ▶ 성능 비행시험 (이착륙성능, 상승성능, 순항성능, 실속성능 등)
- ▶ 조종성/안정성 비행시험 (조종성 시험, 동안정성 시험 등)
- ▶ 탑재장비 성능 입증 비행시험 (항법장비, 계기, 전기장치, 착륙장치 등)

## ▶ 운용제한사항 입증 비행시험

### 2.1 인증비행시험 소요시간

인증과정에서의 일반적인 소요시간은 소형항공기 급의 경우 신청부터 비행시험 완료 기간이 3년이고 수송급 항공기의 경우 5년이다. 특히 형식증명 신청 시점을 신청자들의 경우 PDR 시점으로 잡기 때문에 일반적으로 비행시험기간은 소형항공기의 경우 18개월, 수송급 항공기의 경우 약 2년 정도 수행한다.

이 기간 중 신청자의 개발/적합성입증 비행시험과 인증당국의 적합성검증 비행시험이 수행되게 된다. 또한 요구되는 비행시간은 소형항공기의 경우 500~1,000 비행시간 정도 이다.

### 2.2 비행시험 조건

인증비행시험 중 실시하는 비행시험들은 항공기의 운용 중 발생할 수 있는 비행특성을 검증하기 위한 것이기 때문에 항공기의 극한 조건에서 비행을 하게 되며, 또한 일반 운용 중에는 발생 빈도가 희박한 위험한 비행상태를 모사하여 시험하게 된다. 이러한 시험들로는 최대중량/후방하중제한 상태에서의 실속, 스핀시험, 플러터시험, 최대 제한하중계수 기동에서의 조종력 시험, 저속/저고도/OEI 비행안정성 시험, VNE 속도를 초과하는 속도에서의 시험 등이 있다.

이러한 고위험도 시험들은 인증과정에서 필수적으로 요구되는 시험들로 반드시 해당시험의 위험요소들을 파악하고 이에 대한 위험도 저감 절차를 개발하는 위험도평가와 저위험도 상태에서부터 점차적으로 시험영역을 넓혀가거나, 체계적으로 위험도를 관리하는 방법 등의 안전관리가 요구된다.

## 3. 비행시험 위험도평가 기법

비행시험의 위험도를 평가하여 위험도를 고위험도/중위험도/저위험도로 구분하고 위험도 수

Probability Severity	High	Probable	Occasional	Remote	Improbable
Catastrophic	Avoid				
Hazardous		High			
Major			Medium		
Minor					Low
No safety Effect					

Fig 1. 비행시험 위험도의 산정

준에 따라 안전관리를 차등 적용하게 된다.

비행시험의 위험도 평가는 다음과 같이 위험 요소의 확인, 정성적/정량적 위험도 산정 그리고 위험도를 저감하기 위한 위험도 저감절차 개발의 순서로 진행된다.

- ▶ 위험요소의 확인
- ▶ 정성적/정량적 위험도 산정
- ▶ 위험도 저감절차의 개발

### 3.1 위험요소의 확인 (Identifying hazards)

비행시험 위험요소의 확인은 위험도 평가의 첫 단계로 세부 비행시험계획서를 검토하여, 비행시험 절차와 조건 그리고 비행영역과 항공기의 성능/특성, 비행환경 등을 종합적으로 고려하여 해당 시험에서 발생할 수 있는 위험요소들을 발체하는 것이다.

위험요소의 확인은 해당 비행시험의 기동과 절차 그리고 시험조건이 첫 번째 기준이 되며, 이후 비행환경 등의 외부요인들이 고려되어야 한다. 동일한 시험이라 하더라도 시계, 기상, 주야간, 고도 등 환경적인 요소들이 비행시험 위험도에 영향을 미치기 때문에 위험요소의 확인은 종합적으로 검토되어야 한다.

- ▶ 상세 비행시험계획서의 검토
- ▶ 시험절차, 시험조건, 시험기동, 비행특성, 시험환경 등의 종합적 검토
- ▶ 발생 가능한 잠재 위험요소의 발체

### 3.2 정성적/정량적 위험도의 산정 (Quantifying/Qualifying Risk Level)

확인된 위험요소들에 대해서는 그림 1과 같이 사고의 심각도와 발생 가능한 빈도를 고려하여 위험도를 고위험도, 중위험도 그리고 저위험도로 구분하여 산정한다. 또한 항공기의 개발특성과 항공기의 개발 성숙도에 따라 고위험도 보다 높은 수준의 비행제한 등급을 산정하기도 한다.

위험도의 산정 시 첫 번째 기준은 해당 위험요소의 심각도와 발생빈도이며, 여기에 시험절차와 조건에서 요구되는 시험기술과 조종사의 Workload가 함께 고려되어야 한다. 또한 시험의 고도와 속도 그리고 요구되는 비행환경도 주요 고려사항이며, 항공기에 설정된 중량, 무게중심, 속도한계, 하중계수 한계 등도 해당 시험조건과 함께 고려하여 위험도를 산정해야 한다. 다음은 위험도 산정시의 고려사항들이다.

- ▶ 위험요소의 심각도 및 발생빈도
- ▶ 요구되는 시험기술 및 조종사의 Workload
- ▶ 시험고도 및 속도
- ▶ 항공기의 운용제한사항(Weight, C.G., Speed, Load factor)
- ▶ 내외부 시험환경(기상, 활주로, 시계 등)

위험도 수준의 산정은 다소 정성적인 판단이 필요하며, 일반적인 시험항목이 아닐 경우 판단의 기준은 다음과 같다.

Table 1. 시험항목 별 위험도 수준 지침서 (FAA Order 4040.26A)

High risk test	Medium risk test	Low risk test
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Spin test</li> <li>▪ Max. energy rated take-off test</li> <li>▪ High speed test above VNE</li> <li>▪ Limit load factor test</li> <li>▪ In-flight thrust reverser deployment test</li> <li>▪ Autorotation test</li> <li>▪ H-V determination test</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Engine off tests</li> <li>▪ Low altitude tests</li> <li>▪ Unusable fuel determination test</li> <li>▪ Icing test</li> <li>▪ Abnormal operation</li> <li>▪ Emergency tests</li> <li>▪ Low &amp; high speed S&amp;C test</li> <li>▪ Asymmetric thrust reverse test</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Normal operational tests</li> <li>▪ Basic system function test</li> <li>▪ Trailing cone test</li> <li>▪ Climb performance test</li> </ul>

- ▶ 고위험도 시험 : 주의에도 불구하고 인적/ 물적으로 심각한 위험이 존재하는 시험
- ▶ 중위험도 시험 : 일상적인 항공기 운영상태보다 위험도가 높은 시험
- ▶ 저위험도 시험 : 일상적인 운영상태와 비슷한 수준의 위험도

비행시험 위험도의 경우 그동안 수많은 사고와 비행시험 경험을 통해 항공 선진국들에서는 주요 시험항목들에 대한 위험도 수준을 가이드 라인으로 제시하고 있다. 가장 대표적인 가이드 라인은 미 연방항공청(FAA)에서 내부 지침서로 발간한 FAA Order 4040.26A "Aircraft certification service flight safety program" 이 있다.

일반적으로 시험항목별 위험도 수준은 표 1과 같으며, 고위험도 수준의 시험항목들은 다음과 같은 시험들이 있다 : 스핀시험, 최대 에너지이륙포기 시험(max. energy rejected take off test), VNE 속도를 초과하는 시험, 최대 제한하중계수 시험, 비행 중 역추력 장치 전개시험, 회전익 오토로테이션 시험, 회전익 속도-고도 결정시험(H-V determination test)

### 3.3 위험도 저감절차의 개발 (Risk mitigation procedures)

위험요소들의 위험도가 고위험도 또는 중위험

도인 시험들에 대해서는 시험의 안전을 위해 위험도를 저감시킬 필요가 있다. 위험도를 저감시키는 방법으로는 시험조건 또는 절차들을 위험도가 감소되는 방향으로 재설정하는 방법, 위험도가 낮은 고고도에서 수행 후 점차 저고도에서 실시하는 Build-up 방법, 비상시 회복기동을 도와주는 스핀회복 낙하산의 장착과 같은 능동적 위험도 저감방법 등이 있다. 이러한 부분들을 절차화하여 비행시험에 적용해야 한다.

다음은 위험도 저감방안의 예시이다 :

- ▶ 시험절차 또는 조건의 재설정
- ▶ Build-up 시험 계획
  - 안전한 중량/CG 수행 후 임계조건시험실시
  - 고고도 시험수행 후 저고도 시험 실시
- ▶ 항공기 기체 회복 또는 보호를 위한 장치의 장착 : 스핀회복낙하산 장착, Tailskid 장착, 조종사 낙하산 장착
- ▶ 추적항공기 또는 텔레메트리 시스템 감시를 통한 비행시험 조건
- ▶ 비행시험 승무원의 특별 교육/훈련

## 4. 비행시험 안전관리 기법

비행시험 안전관리는 비행시험 위험도평가, 문서화 및 위험도별 비행시험 실시의 승인 권

한, 위험도 평가의 제3자를 통한 검증 등을 포함하며, 각 단계별로 검증하고 확인하도록 관리하여 안전한 비행시험이 수행될 수 있도록 하는 것이 목적이다.

현재는 항공선진국들을 중심으로 오랜 비행시험 역사와 경험으로 비행시험 안전관리에 대한 체계적인 절차와 방법들이 일반화 되어 있다.

#### 4.1 THA (Test Hazard Assessment)

THA는 비행시험 위험도평가의 Worksheet로 각 비행시험 항목의 위험요소별로 하나씩 만들어지고 이를 통해서 비행시험 위험도평가, 위험도저감방법 및 절차 등을 명시한다.

이후 THA는 비행시험계획서에 첨부되고 비행시험 전 TRB/SRB(Technical/Safety Review Board)를 통해 그 적절성에 대해서 다시 제3자의 평가를 받는다. 또한 고위험도 시험의 경우 THA를 통해 비행시험을 자체 승인하고 관리하게 됨으로 THA는 비행시험 안전관리의 수단이 된다.

THA Worksheet에는 최소 다음의 내용이 포함되어야 한다.

- ▶ 시험항목(Test title)
- ▶ 확인된 위험요소 및 위험도(Hazard/Risk Level)
- ▶ 위험요소의 원인(Cause)
- ▶ 위험요소에 대한 비행시험 영향성(Effect)
- ▶ 위험도 저감절차(Minimizing Procedures)
- ▶ 시정조치(Corrective Actions)
- ▶ 최종 위험도(Final Risk Level)

위험요소 및 위험도는 해당 비행시험 항목의 절차와 조건에서의 위험요소와 초기상태의 위험도를 의미하며, 이에 대한 원인들과 비행시험에 미칠 수 있는 영향성을 분석하여 명시한다.

위험도 저감절차는 주어진 절차와 조건에서 시험을 실시할 때 해당 위험요소에 대한 위험도 수준을 저감시킬 수 있는 방법을 절차화하는 것이다. 시정조치는 위험요소의 원인을 발생하지 않도록 하기 위한 방안으로 추후 위험도 저감절차와 시정조치는 비행시험 계획 단계에서 반영

되도록 하여야 한다. 또한 이러한 내용들을 Test card에 반영하여 비행시험요원들이 알고 있도록 하여야 하고 비행 전 브리핑 시에도 다시 확인되도록 하여야 한다.

최종 위험도는 위험도 저감절차를 반영한 이후의 위험요소에 대하여 산정된 최종 위험도 수준을 의미하며, 만약 위험도가 여전히 고위험도 수준 이상이 될 경우에는 안전을 위하여 별도의 관리가 필요하게 된다.

THA는 위험도평가와 위험요소 그리고 위험도 저감절차가 종합적으로 제시되며, 많은 부분들이 정성적인 평가와 경험을 필요로 한다.

#### 4.2 SRB (Safety Review Board)

SRB는 비행시험프로그램 전반, 시험절차 및 비행시험 각 항목별 위험도평가결과 등을 종합적으로 제3자를 통해 검토하는 회의이다. 보통 비행시험을 주관하는 자의 프로젝트 매니저가 의장이 되고 각 기술 분야별 엔지니어들과 검사관 등이 주관하고 비행시험에 경험이 많고 해당 비행시험에 직접적인 관련이 없는 사람들이 위원이 되어 비행시험절차와 안전 관련사항들을 종합적으로 검토하는 회의체이다.

일반적으로 SRB의 의견들을 반영하여 비행시험계획서와 위험도저감절차 및 평가결과를 업데이트하여 최종 비행시험계획서를 개발하게 된다.

SRB는 보통 비행시험절차, 조건 등 비행시험 계획서를 검토하는 TRB(Technical Review Board)와 병행하여 실시되며, 비행시험의 중요한 Milestone의 하나이다. SRB에서는 최소 다음의 사항들을 검토해야한다.

- ▶ 비행시험항목, 시험절차 및 조건
- ▶ 고위험/중위험도 시험에 대한 위험도평가 결과검토
- ▶ 위험요소와 잠재적 위험도에 대한 평가
- ▶ 위험도저감절차의 검토
- ▶ 비행안전과 관련된 운용제한사항 검토
- ▶ 시험장비의 장착에 관한 검토
- ▶ 최근의 형상변경사항을 포함한 항공기의 형상

- ▶ 제작자가 선수행한 지상, 비행, 구조시험 결과

#### 4.3 문서화 및 계획의 승인

비행시험 위험도평가, SRB 의견을 반영한 시험계획서에 SRB 검토가 종료된 THA 결과를 첨부하고 문서화하여 관리한다.

이후 전체적인 비행시험계획서와 위험도평가 결과는 프로젝트 매니저가 최종 승인하여 관리하게 되며, 인증비행시험의 경우 비행시험계획서와 THA에 대하여 감항당국의 승인이 필요하다.

비행시험항목 중 위험도평가결과의 승인권한은 시험항목의 위험도 수준에 따라 다음과 같이 차등 적용되어 관리된다.

- ▶ 고위험도 시험: 프로젝트매니저 또는 비행시험매니저
- ▶ 중위험도 시험: 비행시험조종사 또는 비행시험 매니저
- ▶ 저위험도 시험: 비행시험조종사 또는 엔지니어

이는 최종적으로 비행기에 탑승하는 비행시험요원들과 총괄 담당 프로젝트 매니저에게 비행시험 준비상태 및 시험 안전관련 사항들을 다시 확인시키어 안전한 비행시험 운용이 될 수 있도록 하기 위한 것이다.

#### 4.4 비행시험의 실시

비행시험은 승인된 비행시험계획서와 THA를 바탕으로 한 Test card에 따라 수행되게 된다. Test card에는 시험절차와 조건 그리고 시험환경과 안전 또는 기타 비행시험에 참조해야 할 사항들이 제시되게 된다.

또한 비행전 브리핑을 통해 비행시험 이전에 최종적으로 안전관련 사항과 시험조건, 항공기의 상태 등을 확인하게 된다.

비행전 브리핑에서 점검해야 할 일반사항 외의 비행시험 안전관련 사항들은 다음과 같다.

- ▶ 비행시험계획서의 승인 및 개정 여부
- ▶ 최소장비목록 대비 부작동 장비/시스템

- ▶ 합치성검사여부 및 이전비행 대비 변경사항
- ▶ 중량 및 C.G.(이륙/시험 중량 및 C.G.)와 Ballast 장착여부 및 장착성
- ▶ 탑재 연료량
- ▶ 시험조건 대비 항공기 성능 및 운용한계
- ▶ 단계별 시험절차 및 제한사항
- ▶ 비상절차 및 위험도 저감절차
- ▶ 위험도 저감방법의 사용가능 여부
- ▶ 항공기회복장치 및 비상탈출장치 여부

## 5. 결 론

인증비행시험은 안전성과 비행특성이 입증되지 않은 항공기로 위험한 시험항목들을 극한조건에서 검증하는 것으로 비행시험 자체가 상당히 위험하다. 또한 비행시험 중 발생하는 사고들은 대부분 대형사고로 이어져 인명의 손실과 항공기의 손실을 초래할 수 있다.

인명의 손실은 말할 것도 없고 인증과정에서의 항공기 손실은 인증기준의 변경으로 인한 재설계 및 재시험을 통한 입증, 개발 프로그램의 지연 그리고 막대한 비용의 증가를 초래하게 된다. 이에 따라 비행시험의 안전관리는 항공기 개발과정에서 상당히 중요한 요소이다.

우리나라의 경우 민간항공기 인증을 처음 시작하는 상황이지만 그동안 군용항공기 비행시험 경험을 바탕으로 민간항공기 비행시험 기술과 안전관리 부분에도 많은 연구와 투자로 항공 선진국들과 같이 체계화되고 안전한 항공기 개발 및 비행시험 수행이 될 수 있도록 해야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] FAA Order 4040.26A, "Aircraft certification service flight safety program, 2001