

# 우주비행체 개발과정에서의 재시험 방안

## Retest Schemes during Development of Space Vehicles

전영두\*, 정의승, 박정주, 조광래(한국항공우주연구원)

### 1. 서 론

일반적으로 새로운 제품의 개발과정이나 기존 제품의 고유설계를 변경할 경우에는 제품이 수명주기 동안 겪게 될 운용상에 축적될 피로뿐만 아니라, 제품의 성능검증을 위해 거치게 되는 일련의 수락/검사시험 등에 기인하는 피로가 함께 고려되어 설계되어야 한다. 그러나 초기예상과 달리 시험도중 제품에 문제가 발생하거나 이상한 시험결과가 나타나서, 이 문제점을 해결/수정한 후 재시험을 수행해야 할 경우가 종종 발생한다. 특히 인공위성이나 발사체와 같이 혹독한 환경조건에서 작동/운용되어야 하는 우주비행체의 개발과정에서는 이러한 열악한 환경조건을 반영한 각종 시험과정에서 제품의 성능저하나 각종 문제점이 발생하기 쉬워서, 재시험을 수행해야 할 경우의 빈도가 다른 제품들에 비해 상대적으로 높은 편이다. 또한 대부분 고가의 구성품들로 구성되어 있고, 시험조건의 까다로움으로 인해 시험비용 역시 상대적으로 높기 때문에, 재시험으로 인한 제품의 파손이 발생하거나 시험회수가 증가하게 되면 효율적인 프로그램 관리가 어려워진다.

보통 '재시험'이라하면 피시험체의 이상이나 이와 관련된 기타 요인에 의하여 이전에 피시험체에 수행되었던 시험을 반복하는 것을 의미한다. 이는 시험에 사용된 설비나 장비 시스템 문제에 기인되거나 피시험체의 이상으로 인해 발생될 수 있는데, 우주비행체 전체 시스템이나 이를 구성하는 컴포넌트의 인증시험이나 수락시험 도중에 예상치 못한 문제점들이 발생할 수 있다. 이렇듯 시험 도중에 문제가 발생하게 되면, 먼저 시험 실패 원인분석을 수행해야하고 경우에 따라 이를 수정하기 위하여 우주비행체나 컴포넌트의 재설계나 재작업이 수행될 필요가 있다. 일반적으로 재설계나 재작업이 발생했을 경우에는 수정작업의 적합성을 검증하기 위해 실패이전에 수행된 시험들의 재수행이 요구될 수 있으며, 수정작업의 적합성에 대한 확신을 극대화하기 위해서는 이전의 모든 시험을 재수행하는 것이 바람직할 수 있으나, 이 경우 종종 비용측면과 일정측면에서 막대한 손실이 유발되기 때문에 실질적으로 이러한 재시험방안을 채택하기 힘든 경우가 대부분이다. 따라서 실패특성, 요구되는 재설계나 재작업 정도, 수정작업 범위가 기존 시험들에 미치는 영향을 고려하고 수락 가능한 범위의 위험도를 감수하여 재시험 정도를 절충하고 결정해야될 필요성이 있다.

본 논문에서는 극한환경조건에서 작동/운용되어야 하는 인공위성이나 발사체 같은 우주비행체의 컴포넌

트, 서브시스템, 시스템에 대해 가혹한 환경시험도중 발생할 수 있는 재시험의 기본적인 적용원칙들에 대해 간략히 요약/정리한다.

### 2. 기본적인 재시험 적용원칙

우주비행체에 대한 시험방안 및 요구조건 항목들은 미군 표준서인 MIL-STD-1540C<sup>(1)</sup>에 잘 나열되어 있고, 특히 탑재체의 환경시험에 관해서는 미국항공우주국의 규격서인 GEVS<sup>(2)</sup>에서 체계적으로 다루고 있으며, 유럽항공우주규격서인 ECSS<sup>(3)</sup>에서는 재시험이 필요한 경우를 언급하고 있으므로, 이를 참조하여 재시험에 대한 기본원칙을 설정할 수 있다.

#### (1) MIL-STD-1540C<sup>(1)</sup>

하드웨어의 설계가 변경될 때마다 필요하다면 재시험이 수행되는 것이 바람직하고 이러한 변경사항에 관계된 모든 문서는 반드시 개정해야 한다. 재설계된 하드웨어에 대한 재시험을 수행할 경우에는 반드시 재설계사항을 검증할 수 있고, 이전 시험항목에 대한 성능저하가 없음을 확인할 수 있어야하며, 새로운 문제가 발생하지 않다는 것을 보여줄 수 있는 제한적 시험이 수행되어야 한다. 또한 요구되는 시험과정에서 이상이 발생될 경우 재시험이 반드시 수행되어야 하는데, 이때 적절한 실패분석을 통하여 재시험 타입과 범위를 결정해야하고, 실패의 원인 및 증상 분석, 최소 교체항목을 통한 해결방안을 고려해야 한다. 특히 인증시험이나 수락시험 중에 문제가 발생할 경우, 반드시 시험을 중단하고 이상을 검증해야 한다. 만일 시험 셋업이나 시험 소프트웨어, 시험 장비에 기인된 이상일 경우, 원인을 수정한 후 중단된 시험시점을 고려한 재시험을 수행하여 가능한 피시험체가 과도한 스트레스를 받지 않도록 한다. 만일 피시험체에 이상원인이 있을 경우 실패분석과 적절한 수정작업 및 문서작업이 정상적으로 완료된 후 시험을 재개해야 하며, 피시험체가 요구규격과 요구조건에 합당함을 검증해야 한다.

#### (2) NASA GEVS<sup>(2)</sup>

시험실패가 발생될 때는 적절한 수정작업이 수행된 후, 피시험체의 성능이 만족되는지 입증하기 위한 재시험을 수행해야 하며, 특히 컴포넌트의 재설계와 같은 수정작업이 요구될 경우는 이전에 수행된 시험의 적합성에 영향을 끼칠 수 있으므로, 반드시 필요한 범위까지는 재시험을 수행해야 한다. 그리고 시험실패상황은 모두 기록되고 보고체계에 따라 보고/관리 되어야 한

다. 만일 시험진행 중에 피시험체가 설계주기를 넘어 작동함으로 인해 마모/손상되거나 더 이상 시험진행을 하기에 부적절하게 된 경우는 여분으로 교체하여 계속 시험을 진행할 수 있다. 그러나 만일 이러한 교체가 시험결과에 심각한 영향을 줄 경우에는 성능이 만족되는지 입증하기 위한 필요한 범위까지는 반드시 재시험을 수행하고 교체 후 수행된 시험결과와 타당성을 확인해야 한다.

(3) ECSS-E-10-03A<sup>(3)</sup>

일반적으로 재시험이 수행될 경우는 다음과 같이 크게 5가지로 분류할 수 있다.

인증, 수락, 준비행시험 중 실패 또는 이상발생시: 시험도중에 발생한 실패나 이상은 기록되어 보고되어야 하고 검토회의를 통해 추후 재시험의 필요성과 구현방안(재시험범위)을 결정해야하고, 실패원인 제거/수정 후 재시험을 수행해야 하고, 이를 통해 수정결과를 확인해야 한다.

인증시험완료 후 설계변경 발생시: 인증시험이 완료된 후 설계변경이 발생할 경우나 이미 수락시험이 완료된 부분품에 대한 개정/개선작업이 일어났을 경우, 형상관리위원회는 재수행 되어야할 인증시험의 범위를 결정하여 개정/개선 성능을 확인하기 위한 시험을 반드시 수행해야 한다.

수락시험후 비행하드웨어의 장기보관시: 납품후 발사까지의 기간이 6개월 이상 길 경우에는 상태 확인을 위한 주기적 체크가 반드시 수행되어야 하고, 특히 배터리류나 특수 운할 구동기구와 같은 하드웨어에 대해서는 주기적인 유지/보수가 요구되며, 노후화에 민감한 제품은 반드시 비행전에 성능 및 상태를 확인해야 한다.

재사용될 하드웨어: 재사용될 하드웨어는 숨겨진 손상여부의 확인을 위해 전반적인 검사가 수행되어야 하며, 이를 통해 축적된 피로 및 남아있는 피로수명을 확인해야 한다. 만일 재사용될 때의 환경조건이나 적용형상이 다를 경우에는 반드시 델타인증시험을 수행해야 한다.

인증시험을 거친 하드웨어의 비행시: 프로그램 이상 일정과 비용측면에서 인증시험을 거친 하드웨어를 비행용으로 사용할 경우에는, 비행에 수락될 수 있도록 재처리하는 과정을 평가하여 인증시험 및 재처리로 인한 과도한 스트레스나 축적된 피로가 제품성능에 영향이 없음을 확인해야 한다. 따라서 재처리 후에는 반드시 전과정의 수락시험을 수행하거나 재처리 범위에 따라 일부분의 수락시험 수행하여 성능을 검증해야 한다.

3. 재시험 적용시의 권장사항

컴포넌트와 우주비행체 시스템의 재시험 적용사항은

일반적으로 설계개념에서부터 서로 다른 요구조건으로 인해 재시험 개념이 상이하게 적용된다<sup>(4)</sup>. 보통 시스템 수준의 경우 초기에 컴포넌트의 장/탈착을 감안하여 설계되며 시험실패시 컴포넌트의 교체작업을 고려하여 사전에 조립/시험 및 운용방안이 계획되어진다. 그런 반면에 컴포넌트의 경우, 구성 부품의 반복 장/탈착이나 부분 교체를 초기 설계시에 크게 고려하지 않기 때문에 재시험에 대한 대비책이 시스템 수준에 비해 불확실한 경우가 대부분이다. Fig. 1은 시험이상이 발생했을 때의 전형적인 활동방안을 나타낸다.

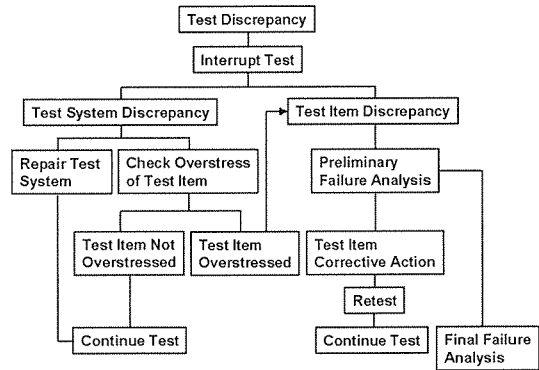


Fig. 1 Activity after test discrepancy

3.1 컴포넌트의 재시험

컴포넌트에 대한 재시험 수행과정은 Fig. 2에 잘 나타나 있다. 만일 컴포넌트에 대한 요구조건 변경이나 시험실패 이후에 피시험체에 대한 요구수정사항이 상사성에 의한 인증법을 사용하기에 부적절한 상황이 발생했을 경우에는 '주요 재시험 대상'으로 분류되고, 이러한 설계변경요인은 기존에 수행된 시험들에 대한 타당성을 저하시킨다. 먼저 요구조건 변경에 따른 측면을 살펴보면 다음과 같다.

기능적 입력/출력 요구조건: 이전에 시험수행된 컴포넌트의 요구조건과 달리 전기적/기계적 성능 요구조건이 변경될 경우에는 기존에 수행된 시험 결과가 더 이상 타당성이 없게 된다.

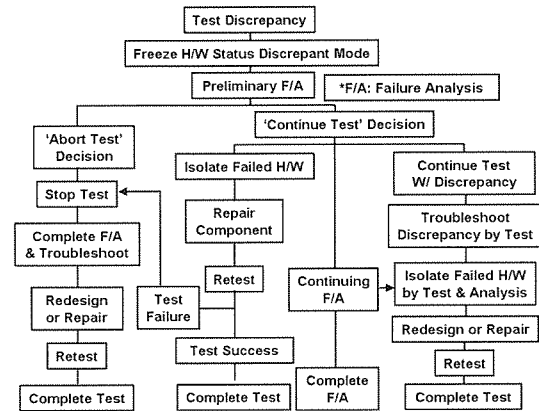


Fig. 2 Component test activity after discrepancy

환경적/수명주기적 요구조건: 열, 진공, 진동, 음향, 충격, 가속도, 전자파, 습도, 피로, 마모 등과

같은 적용환경 및 수명주기 요구조건이 기존 시험수행된 조건에 비해 더 악화되면 기존에 수행된 시험결과와는 더 이상 타당성이 없게 된다.

열/온도 효과 및 동적 반응: 재설계가 기존 형상과 다름으로 인해 열/온도 효과나 동적 반응이 달라지면 기존의 열/온도시험과 동적시험의 타당성은 없어진다.

재질/제작 공정: 재설계에 의해 재질이나 제작공정의 변화가 열/온도 효과나 정/동적 반응의 차이를 가져오면 기존 시험결과와 타당성이 없어진다.

질량, 크기, 기계/전기적 형상: 이러한 요인이 열/온도 효과나 정/동적 반응의 차이를 가져오는지 여부에 대한 분석이 요구된다.

이와 더불어 콤포넌트 재작업에 따른 측면을 살펴보면 다음과 같다.

분해/재조립 분량: 수정 및 재조립을 위한 접근성 확보를 위해 콤포넌트의 상당량 분해가 필요하다면 비록 실제의 수리가 상대적으로 간단하더라도 대부분 기존시험의 타당성을 잃어버리게 된다.

분리/재연결 분량 및 복잡성: 부품이 쉽게 교체 가능하고 이 과정에서 주위 부품들한테 손상을 입힐 가능성이 낮다면 수정 후 기능을 확인한 뒤 실패시험을 재수행할 수 있다. 그러나 납땜과 용접을 요하는 수리의 경우 주위 하드웨어에 손상을 줄 위험이 높기 때문에 기존시험의 타당성을 대부분 잃어버리게 된다.

수정 기술: 콤포넌트를 수정/수리하는 과정의 조건이 기존의 정해진 프로세스(자동화된 툴링, 납땜, 용접 등)나 기술 등이 서로 상이할 경우 기존 제작과정에서 수행된 시험의 타당성은 없어지게 된다.

교체부품의 스크리닝 부족: 기존에 수행된 시험에서 콤포넌트를 구성하는 부품들에 대한 스크리닝을 포함한다면, 스크리닝이 적절하지 않은 부품으로 새로 교체할 경우 기존 시험의 타당성은 없어지게 된다.

앞서 언급된 '주요 재시험 대상'에 해당될 경우, 수정 후 기존 수행된 시험의 재수행하는 것이 일반적으로 권장되는데, 이때에는 재시험이 콤포넌트에 끼치는 피로 축적을 분석해야 하고, 비행모델의 수탁시험전에 재설계된 콤포넌트의 재인증이 이뤄져야 한다. 그러나 만일 '주요 재시험 대상'에 해당되지 않을 경우에는 일반적으로 시험실패 분석결과를 바탕으로 실패시험을 재수행하는 것이 권장된다.

### 3.2 우주비행체 시스템의 재시험

우주비행체 시스템에 대한 재시험 수행과정은 Fig. 2의 콤포넌트의 경우와 유사하다. 그러나 일반적으로 우주비행체 시험은 콤포넌트 시험조건에 비해 약하게 이뤄지고, 부품이나 서브조립체의 시험은 콤포넌트 시험조건에 비해 약조건에서 이뤄진다. 만일 우주비행체 시험 중에 콤포넌트에 이상이 발생할 경우에는, 반드시 콤포넌트나 서브시스템 조립수준의 시험에선 왜 문제가 발생하지 않았는지 확인하는 분석이 뒤따라야 한다. 이는 대부분, 시스템 조립수준에서 존재하는 상호작용이 보다 낮은 조립수준에서는 존재하지 않았거나, 수명주기/시험조건을 초과함으로 인한 축적효과나 콤포넌트의 조립과정에서의 손상가능성이 있다. 일반적으로 우주비행체 시스템의 재설계나 요구조건의 변화는 개발과정동안 거의 발생하지 않지만, 콤포넌트의 경우와 마찬가지로 기능적 입력/출력 요구조건, 환경적/수명주기적 요구조건, 열/온도 효과 및 동적 반응, 재질/제작 공정, 질량/크기/ 기계-전기적 형상 등의 요구조건과 설계변경 요인이 발생할 경우 및 콤포넌트의 배치변경이 요구될 때에는, '주요 재시험 대상'으로 분류되고 대부분의 기존 시험결과와 타당성은 없어지게 된다. 보통 콤포넌트의 수정작업은 우주비행체의 재작업에 비해 주위의 하드웨어가 손상될 가능성이 높은 분해/분리작업이 요구된다. 예를 들어 전기적 콤포넌트는 보통 많은 부품들이 납땜이나 용접으로 조립되어 있는 경우가 많은 반면에, 우주비행체는 설계초기부터 콤포넌트의 조립 및 교체성이 고려된 모듈화 개념을 도입하기 때문에 전기 커넥터의 연결이나 패스너로 고정하는 비교적 단순작업으로 수정이 이뤄질 수 있다. 또한 기계적 콤포넌트의 교체역시 주위에 손상을 가하지 않는 비파괴적인 방법으로 작업을 수행할 수 있는 경우가 대부분이다. 우주비행체 재작업에 따른 측면을 살펴보면, 콤포넌트의 경우와 마찬가지로 분해/재조립 분량, 분리/재연결 분량 및 복잡성, 수정 기술, 교체 콤포넌트의 스크리닝 부족 등에 대한 분석결과에 따라 재시험의 범위가 결정될 수 있다. 만일 요구되는 재작업이 우주비행체의 기본특성에 큰 영향을 끼치지 않고 콤포넌트 수준에서 재시험 검증이 수행될 경우에는 재작업후 기능을 점검한 뒤 실패시험에서 재시험을 수행할 수 있다. 만일 '주요 재시험 대상'에 해당될 경우에는, 수정 후 기존 수행된 시험의 재수행을 권장하며, 재시험이 우주비행체에 끼치는 피로축적을 분석해야 한다. 그러나 만일 '주요 재시험 대상'에 해당되지 않을 경우에는 시험 실패분석 결과를 바탕으로 실패시험을 재수행하는 것을 권장한다. 그리고 우주비행체 시험에 앞서 각 콤포넌트 별 이상발생시의 재시험의 범위, 방법 등에 관한 사전계획을 수립하는 것을 권장한다.

## 4. 요약

본 논문에서는 재시험의 필요성과 우주선진국의 표준규격서에 언급된 재시험철학을 간략히 소개하였고, 우주비행체 개발과정에서 발생하는 재시험의 범위나 수준을 결정하기위한 권장사항을 요약 정리하였다.

기본적으로 콤포넌트에 대한 분해/부품교체/재작업

등이 새로운 공정으로 분류될 경우에는, 기존 수행된 시험에 대한 확신을 저하시키기 때문에 대부분의 기존 시험을 재수행하는 것을 권장하나, 제품에 축적되는 피로를 고려하여 시험주기나 수준을 결정해야 한다. 그리고 우주비행체 시스템에 있어서 수정된 콤포넌트를 교체할 때에는, 재작업이 우주비행체의 기본특성에 큰 영향을 끼치지 않고 콤포넌트 수준에서 재시험 검증이 수행될 경우에는 실패시험에서 재시험을 수행하는 것이 바람직하나, 시스템 전체에 축적되는 피로가 고려되어야 한다.

#### 참고 문헌

- [1] MIL-STD-1540C Test Requirements for Space Vehicles, 1994
- [2] NASA GEVS-SE, General Environmental Verification Specification for STS & ELV Payloads, Subsystems, and Components, 1996
- [3] ECSS-E-10-03A Space Engineering: Testing, 2002
- [4] Retest Considerations for Space Vehicles, Otto Hamberg, IES 1984