발사체 시스템의 검증 프로세스

Verification Processes of Launch Vehicle System

전영두*, 정의승, 박정주, 조광래(한국항공우주연구원)

1. 서 론

발사체를 구성하는 하드웨어나 소프트웨어가 설계요구조건 및 성능요구조건에 합당한지 확인하기 위해 사업 전 과정에 걸쳐 검증작업이 수행된다. 초기설계단계에서부터 제작/조립/발사의 전 개발단계 걸쳐, 최소단위 구성품에서부터 전기체 조립체에 이르기까지 수행될 검증작업은 체계적으로 계획하고 관리되어야 한다. 이는 설계 인증, 제작공정 및 절차 확인, 작업자 숙련도와 내재된 결함 확인, 비행용 물품의 수락, 조립의 완전성 확인, 발사준비 체크 및 리허설, 발사 및 발사후 성능평가 등의 검증작업을 포함한다. 사업초기부터 계획되고 잘 짜여진 검증프로그램은 시스템의 위험도를 낮추고 시스템 개발동안 사업 관리자가 올바른 결정을 할 수 있도록 시기적절하게 정보를 제공해주며, 저비용/고신뢰도의 시스템구현을 가능하게 한다.

일반적으로 검증계획은 사업의 예산, 요구성능, 일정에 종속되므로 기술적 측면, 가용예산범위, 허용일정에 근거하여 최적의 검증방안을 수립해야 한다. 특히 발사체와 같은 우주시스템의 경우 한정된 개발수량, 높은 신뢰도, 극한환경에서의 성능보장과 같은 요구조건으로 인해 일반적인 산업체계나 군수체계의 검증절차나 방식을 그대로 적용하는 것은 바람직하지 않다. 이 때문에 가용 자원을 최대로 활용하면서 위험도를 줄일 수 있는 사업 고유의 최적화된 검증계획을 수립할 필요성이 있다. 이때 시험항목을 도출하는 과정에서는 각 시험별 필요성의 등급을 상/중/하로 분류하고 이에 필요한 인력/비용/시설/기간 등의 자원을 명확히 하여, 이를 바탕으로 사업관리자가 필수 시험항목을 선정하고 집중 관리를 할 수 있도록 해야 한다.

본 논문에서는 우주발사체 시스템 개발과정에서 수행되는 검증관리에 대한 일반론적 개념[1-6]을 정리하여 소개하고자 한다.

2. 발사체 시스템의 검증 프로세스

발사체의 검증체계는 개념설계 단계에서부터 발사 후 결과검토까지의 사업전반에 걸쳐 발사체나 지상지원 장비의 설계/개발/인증/수락의 지표와 기준이 된다. Fig. 1은 발사체 시스템에서 일반적으로 적용하는 검증 프로세스를 보여준다.

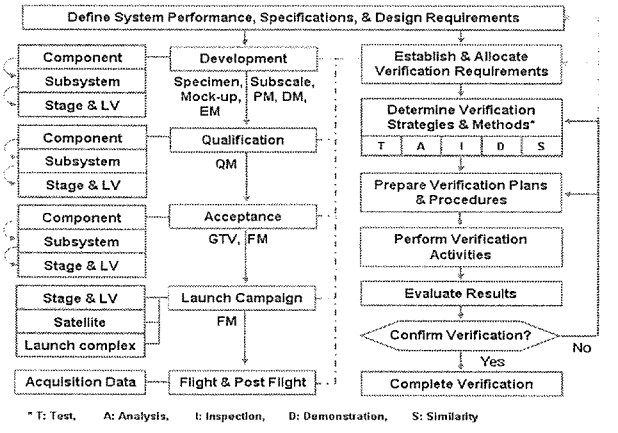

Fig. 1 Flow-diagram of verification processes of launch vehicle systems

2.1. 검증방식

(1) 분석

분석검증은 해석적 혹은 실험적 자료를 바탕으로 검증하는 방식으로서, 검증대상의 모델링 정확성과 사용된 전제 조건 및 가정이 물리적으로 타당해야 한다. 분석을 통해 검증할 경우에는 모델링의 부정확성과 설정조건에의 오차요인을 감안하여 검증여유분을 고려해야하며, 규정된 규격만족을 충분히 보장할 수 있도록 검증기준을 설정해야 한다.

(2) 상사

상사검증은 기존에 이미 인증 완료된 물품과의 상사성을 이용하여 대상물을 검증하는 방식이다. 이때 기존 물품은 검증대상물에 비해 동일한 기준이나 더 심한 기준에서 인증이 이뤄졌어야 한다. 상사법은 대상물의 형상, 적용방식, 사전 시험자료 등에 대한 평가와 검토를 수행하며, 종종 분석법과 같이 이용된다. 형상, 적용방식, 시험조건 등에서 차이가 있는 경우에 상사 검증법을 이용하기위해서는 분석이나 필요한 시험이 부가적으로 수행되어야 한다.

(3) 시험

시험검증은 일반적으로 많이 이용되는 방식으로서, 규정된 환경조건하에서 대상물이 설계/성능 요구조건을 만족시키는지 실제로 확인하며, 직접적으로 대상물의 성능을 측정하거나 분석검증에 필요한 자료를 제공한다. 만일 비용, 안전, 용이성, 일정 측면에 어려움이 없다면 시

험을 통한 검증방식이 선호된다.

(4) 모사

모사검증은 모의시험장비나 모의운용구성을 이용하여 실제 하드웨어나 소프트웨어의 기능적 성능이나 운용특성을 검증하는 방식이다. 특히 비행기체에 장착된 점화기 회로나 폭파 회로를 검증하는데 있어 실제로 점화하지 않고 이를 모사할 수 있는 모의시험장비로 대체하여 점검해야 하다.

(5) 검사

검사검증은 대상물에 대한 육안점검이나 관련 기록점검을 통해 검증하는 방식으로서, 보통 제작/인증/수락/조립/발사전 단계에 걸쳐 수행되며, 주로 대상물의 외형, 치수, 마감상태, 표식, 청결 등과 같은 외적특성이나 조립시의 접속상태를 확인한다. 설계기록과 실제 대상물을 비교하여 형상 및 사용된 재료나 구성품의 적합성을 검사하고 기록과 대상물의 일치성을 확인한다.

2.2. 조립체 수준

(1) 파트

파트는 단품으로서 더 이상 분해될 수 없거나 분해되면 본래의 기능이 상실되는 품목을 나타낸다. 예로서 전선, 전기소자(저항, 칩, 릴레이, DC/DC 컨버터), 배관단품(배관, 벨로즈), 체결품(볼트, 너트, 리벳), 기계부품(기어, 터빈날개, 회전축), 센서단품(가속도, 스트레인, 온도, 압력 센서)이 해당된다.

(2) 서브조립체

서브조립체는 2개 이상의 파트로 구성되지만, 일반적으로 그 자체로는 독립적인 기능이 부여되지 않는다. 서브조립체는 파트수준으로 분해가능하며 필요시 해당 파트를 교체할 수 있다. 예로서 인쇄회로판, 커넥터, 하우징, 기계조립체(단품체결부)가 해당된다.

(3) 유닛(컴포넌트)

유닛은 2개 이상의 서브조립체로 구성되고, 그 자체에 독립적인 기능이 부여되어 완전한 독립개체로 관리되며, 일반적으로 개발과정에서 인증시험이나 수락시험이 이뤄지는 최소단위로 분류된다. 예로서 전장품, 배터리, 밸브, 터보펌프, 연소기, 가스발생기, 파이로장치, 구동기, 탱크, 날개 등이 해당된다.

(4) 서브시스템

서브시스템은 기능적으로 연관있는 2개 이상의 유닛(컴포넌트)을 전선이나 파이프, 구조물로 연결하여 구성한다. 예로서 자세제어시스템, 엔진시스템, 전자탑재시스템, 항법유도시스템, 추력벡터제어시스템 등이 해당된다.

(5) 섹션

섹션은 기체 길이방향으로의 마디에 해당되며 전기체 조립시 서로 연결되는 모듈을 나타낸다. 예로서 산화제 탱크부, 연료탱크부, 탱크연결부, 엔진부, 단연결부 등이 해당된다.

(6) 단 및 전기체

단은 전기체의 이륙후 비행중에 분리되는 단위이며, 전기체는 각 단과 페어링이 모두 조립된 발사체 상태를 나타낸다.

2.3. 모델 정의

(1) 개발모델 (시제)

개발모델은 새로운 하드웨어의 개발과정에서 요구되는 제작공정개발이나 개발시험 등을 수행하기위해 필요한 모델에 해당되며, 일반적으로 새로운 개념의 설계나 기존 하드웨어의 주요설계변경이 있을 경우 제작된다. 개발모델의 경우 기능시험이 주로 수행되며, 일부 품목에 대해선 환경시험이 수행될 수 있다. 구조물의 경우 개발단계에서 항복하중이나 극한하중에 대한 설계 여유분 확인이 필요하고, 압력용기나 압력구조물의 경우 누설압력이나 파단압력에 대한 설계 여유분 확인이 필요하므로 개발모델을 이용하여 변형이나 파손특성 시험이 이뤄진다. 엔진의 경우 설계진행과정에서의 요구되는 수류시험과 같은 비연소 시험이나 초기 연소특성을 확인할 수 있는 개발모델을 이용하여, 설계성능을 확인하고 연소시험에서의 위험성을 낮출 수 있다.

(2) 엔지니어링모델

엔지니어링모델은 최종적으로 개발될 비행용 모델의 제작공정 확립과 인증시험 기술의 개발과정에서 이용될 모델로서, 설계/제작/조립/시험이 설계성능과 요구조건을 충족시킬 수 있는지 확인하는데 사용된다. 엔지니어링모델은 일부 특성을 제외하곤 외형이나 조립성 및 기능적 측면에서 비행용 모델과 일치해야 하며, 기능시험과 환경시험이 수행되어야 한다. 최종적으로 단이나 전기체 수준의 조립을 통하여 기계적 체결 및 전기적 접속사항에 대한 점검이 이뤄질 수 있어야 한다.

(3) 인증모델

인증모델은 비행용 모델의 인증시험에 사용되며, 구성재료나 부품, 제작공정, 형상, 성능이 비행모델과 완전히 동일해야한다. 유닛이나 서브시스템에 대한 인증모델은 실제 비행모델이 수명 전기간 동안 겪게 되는 하중조건과 환경조건에 비해 더 심한 조건에서 인증시험을 거치게 되므로, 인증시험을 거친 인증모델은 실제 비행기체에는 사용될 수 없다. 특히 전기체에 대한 지상인증을 위해 비행모델과 완전히 동일하게 제작된 지상인증시험용 모델을 이용하여 지상연소시험을 수행하기도 한다. 이는 발사장에서 발사지원시설이나 장비와의 모든 접속사항을 인증하는 것과 발사장에서의 운용절차와 발사 시나리오의 개발을 목적으로 하며, 발사체와 발사지원시설간의 전기접속, 공압이나 유압, 연료와 산화제 배관 등의 접속사항을 최종적으로 검증하고, 위성 모사체와 발사체간의 접속사항을 인증한다.

(4) 비행모델

비행모델은 실제 위성을 임무궤도에 투입시킬 발사체를 구성하며, 수락시험을 거치게 된다.

2.4. 개발단계별 검증

(1) 개발단계

개발시험을 통해, 설계방식이나 이론분석법의 타당성을 확인하거나 설계안의 장/단점을 분석하고 최대 설계하중을 검증하며, 필수 설계데이터를 획득하여 실패모드를 규정할 수 있다. 개발시험은 실제 환경에 비해 더 심한조건으로 시험될 수 있다. 다른 시스템에서 사용 중이거나 이미 검증된 제품의 경우 개발시험은 필요치 않으나, 새로운 기술이나 재료로 개발되어지는 모든 제품의 경우는 개발시험을 통하여 그 설계의 타당성을 확인해야 한다. 개발시험은 향후 인증시험과 수락시험과의 연계성을 고려하여 계획되고 수행되어야 하며 개발시험의 결과는 제품의 신뢰도 평가자료로 이용될 수 있도록 해야 한다.

(2) 인증단계

인증시험은 제품이 제작에서부터 비행에 이르기는 전 기간동안 겪게 되는 최대예상치(수락시험조건)보다 심한 조건으로 수행되며, 이를 통해 비행모델의 최소한의 설계 여유분을 확인한다. 그러나 인증시험을 수행하기에 앞서 수락시험 하중수준을 통과해야 하는 요구조건이 있다. 만일 인증시험을 통과한 제품에 대한 형상설계변경이나 재료 및 제작과정이 변경될 경우 다시 최종모델에 대한 인증시험을 수행해야 한다. 더 심한조건의 다른 시스템에서 사용 중이거나 이미 검증된 제품의 경우 인증시험은 필요치 않으나, 새로운 기술이나 재료로 개발되어지는 모든 제품의 경우는 인증시험을 통하여 그 설계의 타당성을 검증하고 설계 여유분을 확인해야 한다.

(3) 수락단계

수락시험은 인증된 비행용 하드웨어에 대하여 재료, 제작공정, 조달과정, 작업기량이 비행용으로 적합한지 규격서나 접속관리문서에서 규정한 규격에 만족하는지 확인하는 단계로서, 비행용 하드웨어는 모두 수락시험을 반드시 통과해야 한다. 수락시험은 실제 제품의 제작에서부터 비행에 이르기는 전 기간동안 겪게 되는 최대예상조건으로 시험이 이뤄지며, 수락시험 과정에서 그 설정된 규격의 최대값을 넘지 않도록 주의하고, 시험하중의 축적효과로 인해 하드웨어의 성능감소가 발생하지 않도록 해야 한다. 또한 수락시험 도중에 이상발견으로 인해 시험을 일시 중단한 후 다시 재시험을 수행할 경우에는 특히 신중하게 시험하중의 축적효과를 고려하여 시험시간을 재조정할 필요가 있다.

(4) 발사준비 단계

발사준비는 수락시험을 통과한 하드웨어의 조립, 시험, 검사, 이송, 점검, 운용, 발사체/위성조립, 발사대기에 걸쳐 이뤄지는 일련의 작업단계이다. 발사장으로의 이송 전에 이송준비 최종 점검이 이뤄져야 하며, 발사장으로 이송 후의 모든 발사체 구성품은 발사패드에 세워지기 전에 이상유무의 검사를 수행해야 한다. 발사체가 발사패드에 세워진 후에는 엄비리칼 라인을 통해 지상지원장비와 연결하여 서브시스템과 시스템 수준의 시험이 수행된다. 최종적으로는 추진제의 충진/배출시험과 엔진점화 직전까지의 발사운용절차를 실제 발사 운용시와 동일하게 리허설이 수행된다. 그리고 발사체관련 주요시험이나 위험작업은 위성과 발사체의 결합단계 이전에 대부분 완료되어야 한다. 발사전 최종 검증작업이 이뤄지며, 시스템 상태확인 체크, 지상 네트워크 및 데이터 전송체크, 구역안전 체크, 주요 인자 모니터링, 발사준비 상태 체크 등의 작업이 수행된다.

(5) 발사 및 발사후 단계

발사 직후부터는 발사체의 비행상태와 비행구역 및 안전상태 모니터링에 집중해야하며, 원격측정시스템으로부터의 계측자료를 바탕으로 시스템의 성능평가를 수행해야 한다. 발사후 위성의 임무궤도 투입여부를 확인해야 한다.

2.5. 검증체계 관리

검증계획은 규격서 및 접속관리문서에서 규정된 요구사항을 검증할 수 있도록 구성되어야 하며, 검증수행내역이 빠짐없이 추적가능토록 해야 한다. 검증체계는 하위수준의 조립체에서부터 상위수준의 조립체로 점차적으로 검증되도록 해야 하며, 각 개발단계별로 적절한 검증방식을 이용하여 효과적으로 검증이 수행되도록 해야 한다.

3. 요 약

우주발사체 시스템 개발과정에서의 일반적인 검증프로세스 개념을 소개하였다. 효과적인 검증을 수행하기 위해서는, 초기설계단계에서부터 제작/조립/발사의 전 개발단계 걸쳐, 최소단위 구성품에서부터 전기체 조립체에 이르기까지 수행될 검증작업은 체계적으로 계획하고 관리되어야 한다.

참고 문헌

[1] MIL-STD-1540D, Product Verification Requirements for Launch, Upper Stage, and Space Vehicle

[2] MIL-HDBK-340A, Test Requirements for Launch, Upper Stage, and Space Vehicle

[3] ECSS-E-10-02A, Space Engineering: Verification

[4] MSFC-HDBK-2221, Verification Handbook: Vol. I Verification Process

[5] ISO/DIS 15864, Space Systems - Unmanned Spacecraft Design, Performance and Quality Assessment - General Test Methods for System, Subsystem and Unit Levels

[6] AFM 99-113, Space System Test and Evaluation Process - Direction and Methodology for Space System Testing