

우주 발사체용 부품의 번인시험 적용방안

박종찬*, 전영두**, 정의승***, 박정주****

Application Method of Burn-In Test to the Components for Space Launch Vehicle

Jong-Chan Park*, Young-Doo Chun**, Eui-Seung Chung***, Jung-Joo Park****

Abstract

A space launch vehicle is a very complex system composed of many kinds of components. It is necessary for even a small piece of components in it to be free of defects, malfunctions and to operate normally for the sake of the mission success. For these reasons, a variety of tests are carried out. Burn-in test is to detect latent material and workmanship defects which occurs early in the components use. Developed countries for the space technology have considered the burn-in test for flight vehicles in the standard test documents and performed it. Referred to the documents, application methods of burn-in test will be considered for the components of domestic space launch vehicles such as KSLV-I in this document.

초 록

우주 발사체는 수많은 부품으로 이루어져 있기 때문에 개발 성공을 위해서는 사소한 부품 하나라도 그 기능을 제대로 발휘하고 고장이 없어야 한다. 이를 위해서 우주 발사체용 부품 및 시스템 개발에는 수많은 시험을 수행하게 된다. 일반적으로 번인시험(burn-in test)은 생산된 제품이 재질이나 작업자의 미숙에 의해 초기 사용기간 중 발생될 수 있는 고장 요인을 찾아내기 위한 시험을 통칭한다. 해외 선진국의 경우 번인시험에 대해 규격으로 기술하고 있으며 이에 따라 시험을 수행한다. 본 논문에서는 KSLV-I과 같이 국내에서 개발될 우주 발사체용 부품에 대한 번인시험 적용방법에 대해 고려해 보고자 한다.

키워드 : 번인시험(burn-in test), 수락시험(acceptance test),
우주 발사체(space launch vehicle)

1. 서 론

우주 발사체는 한 국가의 과학기술 수준의 척도가 되는 지표로서 많은 국가들이 국가적인 지

* 체계종합팀/jcpark@kari.re.kr

*** 체계종합팀/ces@kari.re.kr

** 체계종합팀/ydchun@kari.re.kr

**** 우주발사체체계실/jjpark@kari.re.kr

원 하에 기술개발에 박차를 가하고 있는 분야 중 하나이다. 우주 발사체에는 일반적으로 10^5 단위의 부품수가 사용된다고 알려져 있는데 이는 그만큼 우주 발사체의 개발이 복잡하고 어려움을 단적으로 나타낸다고 할 수 있다. 수많은 부품으로 이루어진 우주 발사체의 개발 성공을 위해서는 사소한 부품 하나라도 그 기능을 제대로 발휘하고 고장이 없어야 한다. 이를 위해서 우주 발사체용 부품 및 시스템 개발에는 수많은 시험을 수행하게 된다.

일반적으로 번인시험(burn-in test)은 생산된 제품이 재질이나 작업자의 미숙에 의해 초기 사용기간 중 발생할 수 있는 고장요인을 찾아내기 위한 시험을 통칭한다[1]. 번인시험은 반도체 부품제조와 같은 대량생산 산업에서부터 원자력 발전소용 부품과 같은 초정밀 고신뢰성 산업에까지 다양하게 적용되고 있다. 우주 개발 관련 해외 기술 선진국은 우주 발사체 및 위성을 포함한 개념인 우주 비행체에 대해 번인시험과 관련한 다양한 규격을 확보하고 적용하고 있다. 하지만 국내에서는 우주 개발의 역사가 짧고, 특히 우주 발사체의 경우 현재 개발 중인 KSLV-I이 최초의 개발이기 때문에 우주 발사체용 부품에 대하여 번인시험을 포함한 다양한 시험에 대해 검토하고 적용하여 독자적인 규격을 확보할 필요가 있다.

이에 본 논문에서는 우주 발사체에 대한 번인 시험에 대해 해외 우주 비행체 관련 규격서[2~6]를 참조하여 적용방안을 모색해 보고자 한다.

2. 일반적 의미의 번인시험

2.1 번인의 필요성

2.1.1 고장의 정의

‘고장’이란 어떤 제품이 요구 기능을 수행하지 못하게 되는 사건(event)을 의미한다. 여기서 ‘요구 기능을 수행하지 못함’이란 제품의 기능 중에서 특정 기능이 수행될 수 없는 경우뿐만 아니라, 제품이 기능을 수행하지만 그 성능이 요구수준(설계자에 의해 결정된 성능규격을 의미)을 만

족하지 못하는 경우를 포함한다.

고장이 발생하는 비율인 고장률을 시간의 함수로 나타낸 곡선을 흔히 ‘욕조곡선(Bathtub Curve)’라고 한다. 욕조곡선은 그림 1과 같이 크게 ‘초기고장(early failure)’, ‘우발고장(random failure)’ 그리고 ‘마모고장(wearout failure)’ 세 부분으로 나뉜다.

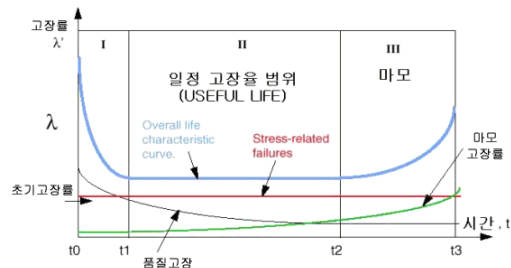


그림 1. 욕조곡선

일반적으로 제품이 생산되어 납품되거나 시장에 출하되면 초기에 높은 고장률을 갖다가(그림 1 중 I : 초기 고장기간), 품질이 안정화되면서 고장률도 낮은 상태로 거의 일정하게 유지된다(그림 1 중 II : 우발 고장기간). 이후 제품의 열화에 의해 고장률이 다시 증가하게 되는데(그림 1 중 III) 이를 마모 고장기간이라 한다. 각 구간에 대한 자세한 설명은 참고문헌 [1]에 언급되어 있다.

2.1.2 초기 고장기간

제품이 생산되어 납품되거나 시장에 처음 출하되면 잠재적인 설계 및 제조상의 결함으로 인해 초기 고장률이 높게 된다. 이러한 결함은 제조자의 출하 검사 시엔 양품으로 판정되지만 저장, 물류 및 소비자의 사용에 이르는 과정에서 스트레스를 받아 결함이 드러나며 고장이 발생하게 된다. 이와 같이 제품의 초기 사용기간 중 발생하는 고장은 제품의 재질 상 결점, 작업자의 실수, 설치나 운반 미숙 등에 의해 발생하는 경우가 많다. 이는 제품의 품질관리 미숙에 의해 발생하는 고장이므로 품질고장(quality failure)이라고도 한다. 제조사에서는 이 기간을 초기 유동

기간 또는 품질안정화 기간이라고도 한다.

2.1.3 번인의 필요성

번인(burn-in)이란 사전적 의미로는 ‘전처리(preprocessing)’ 혹은 ‘길들이기(aging)’의 의미를 갖는다. 생산 공정 시 제품의 품질을 높이기 위해 출하 전 정상 혹은 가속조건 하에서 검사를 실시하여 제품의 고장률을 낮추고 신뢰성을 높이기 위한 스크리닝(screening) 활동을 필요로 한다. 즉, 제품의 출하품질을 향상시키기 위해 제품 수명시간의 일부(초기 고장기간)을 소진시키는 활동이 필요한데 이를 번인이라고 한다.

2.2 번인시험의 정의

앞에서 살펴본 바와 같이 번인은 제품의 고장률을 낮추기 위한 활동을 의미하는데 ‘번인시험(burn-in test)’이란 이와 같은 활동을 구체적으로 수행하기 위한 시험을 의미한다. 즉, 생산된 제품이 재질이나 작업자의 미숙에 의해 초기 사용기간 중 발생될 수 있는 고장요인을 찾아내기 위한 시험을 통칭하여 번인시험이라고 한다. 번인시험 외에 유사한 용어로 ‘런인시험(run-in test)’, ‘웨어인시험(wear-in test)’ 등이 사용되는데, 이 두 용어는 기계 부품이나 제품의 시험을 언급할 때 사용되고, 전기전자 부품의 시험에는 주로 번인시험이라는 용어가 사용되나, 이 용어들을 모두 통칭하여 번인시험이라는 용어가 가장 널리 사용된다.

2.3 번인시험의 적용 대상

번인시험은 제품의 초기 불량 및 고장을 검출하는 것이 목적이므로 제품의 수준이 복잡하지 않을수록 고장을 검출하기가 용이하며 시험의 비용이 적게 든다. 따라서 번인시험은 유닛 및 유닛을 구성하기 이전 단계인 서브어셈블리(subassembly) 수준 혹은 부품(part) 수준에 대해 시험을 수행하는 것이 일반적이다.(여기서 유닛, 서브어셈블리 및 부품의 개념은 MIL-STD-1540C의 정의를 따른다.) 예를 들어, 전장품의 경우 다이오우드, 컨덴서, IC 회로, PCB 기판 등에 대해

시험하거나, 기계 시스템의 경우 밸브류, 분사기, 구동부 부품 등에 대해 적용된다.

2.4 번인시험 적용 기본원칙

일반적으로 산업계에서 적용하는 번인시험의 기본 원칙은 다음과 같다.[1]

- ① 양산되는 모든 제품에 대해 100% 시험할 것.
- ② 번인시험은 결함이 없는 제품에 성능열화 또는 파괴 등의 영향을 주지 않으면서 제품의 설계결함과 작업자 및 공정에서 유발된 결함을 찾아야 함.
- ③ 선별력(screening strength)을 최대화할 수 있도록 시험이 설계되어야 함.

3. 우주 발사체 관련 번인시험

3.1 관련 규격서

우선 본 논문에서 사용하는 ‘우주 비행체’ 및 ‘우주 발사체’라는 용어에 대한 정의부터 언급하도록 한다. ‘우주 비행체’라는 용어는 참고문헌 [2]의 ‘Flight System’과 동일한 의미로 발사체(launch vehicle), 상단부(upper stage), 궤도 비행체, 위성 등을 모두 포괄한 개념이다. ‘우주 발사체’는 상단부 및 위성 등을 일정 궤도까지 올리는 역할을 하는 비행체를 의미한다. 우주 비행체와 관련된 해외의 규격서 및 문서 중 번인시험에 대해 내용이 언급되어 있는 문서는 아래와 같다. 본 문서에서는 아래 규격서 중 번인시험에 대해 비교적 상세히 언급되어 있는 ②와 ③의 내용을 비교, 검토하여 우주 발사체 시스템 및 부품에 대한 번인시험 적용여부에 대해 파악하도록 한다.

- ① MIL-STD-1540C : Test Requirements for Launch, Upper-Stage and Space Vehicles
- ② MSFC-HDBK-670 : NASA Marshall Space Flight Center General Environmental Test Guidelines for Protoflight Instruments and Experiments (1991)
- ③ MIL-HDBK-340A : Test Requirements for Launch, Upper-Stage and Space Vehicles Vol I

: Baselines (1999)

④ MIL-HDBK-340A : Test Requirements for Launch, Upper-Stage and Space Vehicles Vol II : Application Guidelines (1999)

⑤ ISO/DIS 15864 : Space Systems - Unmanned Spacecraft Design, Performance and Quality Assessment - General Test Methods for System, Subsystem and Unit Levels(2003)

3.2 MSFC-HDBK-670에 언급된 번인시험

MSFC-HDBK-670[4]은 NASA Marshall Space Flight Center에서 protoflight용 부품 및 시스템에 대한 환경시험 내용을 정리한 규격서이다.

3.2.1 번인시험 적용대상 및 단계

일반적으로 우주시스템용 부품 및 시스템의 개발 시 제작하는 모델의 단계인 개발모델(DM : Development Model), 엔지니어링 모델(EM : Engineering Model), 기타 비행용이 아닌 지상시험에서만 필요로 하는 모델(GTM : Ground Test Model) 등을 제작하여 인증시험(QT : Qualification Test), 수락시험(AT : Acceptance Test) 등의 많은 시험단계를 거쳐 최종적으로 비행모델(FM : Flight Model)을 제작하고 시험하여 우주비행체로 사용한다. 현재 국내에서 개발 중인 KSLV-I 역시 이와 유사한 과정을 따르고 있다. 하지만 이와 같은 복잡한 개발 및 시험과정을 수행함에 따라 과도한 비용 및 시간을 소모하고 있음을 개선하고자 한 NASA는 “protoflight”라는 개념적 단계를 도입하여 비행용 모델 생산에 필요한 비용을 70% 절감을 한 사례를 바탕으로, protoflight용 하드웨어의 환경시험을 위한 본 규격서를 작성하였다. Protoflight용 하드웨어란, 새로운 설계안을 바탕으로 비행용 모델에 적용하기 위한 하드웨어로 KSLV-I의 경우로 비교하면 EM과 FM용 하드웨어의 중간적인 성격을 갖는 하드웨어라고 할 수 있다. Protoflight용 하드웨어는 그림 2와 같은 개발 및 시험단계를 거치는데 부품(component) 수준에 대해서는 인증/수락시험(qualification/acceptance test)이라고 하는 시험단계를 거친다. 인증/수락시험(qualification/

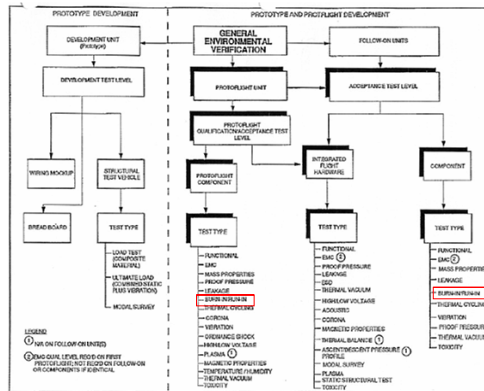


그림 2. General Environmental Verification Diagram

acceptance test)은 KSLV-I의 경우와 비교할 때 인증시험과 수락시험의 특징을 합하여 한 번에 시험을 수행하는 것을 의미하는데, 하드웨어의 설계한계까지의 하중에 대해(인증시험 조건) 실제 비행에 필요한 시간동안 시험(수락시험 조건)하는 단계이다. 그림 2 및 그림 3에 나와 있는 바와 같이 번인시험은 protoflight 하드웨어의 부품 수준에 대해서만 시험을 수행한다. 번인시험을 반드시 수행해야 하는 부품군은 다음의 그림 4에 나와 있듯이, 전기전자 부품, 유압액추에이터 구동부, 전기액추에이터 구동부, 밸브류, 트러스터 및 엔진류 등이다.

TEST	TEST SEQUENCE RECOMMENDATION ⁽¹⁾	
	COMPONENT	PAYLOAD
Functional ⁽²⁾	1	1
Static Structural Test		
Modal Survey	2	2
Leakage	2, 5, 10	5, 7
Ordinance Shock	3	N/R
Vibration ⁽³⁾	4	4
Acoustic ⁽³⁾	4	4
Thermal Balance	N/R	8
Thermal Vacuum ⁽⁵⁾	7	9
Burn-In/Run-In ⁽⁴⁾	6	N/R
Proof Pressure	8	3, 6
Humidity	9	N/R
EMC	11	10

NOTES: (1) Every test included in this document is not listed in this table. This is a general guide for test sequencing.
(2) Functional tests shall be conducted prior to and following each environmental test.
(3) Do not perform both vibration and acoustic noise at the payload level.
(4) Burn-In should precede Thermal Vacuum for electronic hardware.
(5) Includes Corona Testing / Evaluation

그림 3. General Environmental Test Sequence Recommendation for Selected Tests

TEST	REFERENCE PARAGRAPH	ELECTRONIC EQUIP.	ANTENNAS	RECHARGERS OR ADAPTERS	INSTRUMENTATION	PROPULSION SYSTEMS	VALVES	FLUIDS OR PROPELLANTS	PRESSURE VESSELS OR TUBES	BEADABLES	THRUSTERS OR IGNITERS	HEAT SENSORS	OPTICAL EQUIP.	INSTRUMENTATION SENSORS	STRUCTURES
FUNCTIONAL	2.2.1	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
VERIFICATION	2.2.2	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
ACOUSTIC NOISE	2.2.2.2	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
ORDNANCE SHOCK	2.2.2.3	R	O	R	R	O	R	R	O	R	O	R	R	O	O
MASS PROPERTIES	2.2.2.4	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
PROOF PRESSURE	2.2.2.5	R	O	R	O	O	R	R	O	R	O	R	O	O	O
LEAKAGE	2.2.2.6	R	O	R	O	O	R	R	O	R	O	R	O	O	O
STATIC STRENGTH	2.2.2.8	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
THERMAL SHOCK	2.2.3.1	R	O	R	R	O	R	R	O	R	R	R	R	O	O
THERMAL CYCLING	2.2.3.2	R	O	R	R	R	O	R	O	R	O	R	O	O	O
TEMP/HUMIDITY	2.2.3.4	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
EMC	2.2.4	R	R	O	R	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
RSD	2.2.4.4	R	R	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
OCCLUSION	2.2.4.6	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
MAGNETIC INTERFERENCE	2.2.4.6	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
WEAR-IN	2.2.6	R	O	R	R	O	R	R	O	R	O	R	R	O	O
VIBRATION	2.2.6	R	O	R	R	R	R	R	O	R	O	R	R	O	O
VOLTAGE	2.2.7	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
PLASMA	2.2.7	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
TOXICITY	2.2.8	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O

LEGEND: R = Required
O = Optional (An evaluation must be made for each application to determine if the test should be conducted.)

NOTES:
(1) Functional tests shall be conducted prior to and following each environmental test.
(2) On special equipment.
(3) An evaluation must be made to determine if the component type is such that an acoustic or vibration test is optional.
(4) The correct spring test is dependent on the susceptibility of the component to a vacuum environment.
(5) Acoustic noise tests are also to be run on isolated components and glass.
(6) An evaluation will determine if thermal cycling should be performed at vacuum. Operate equipment which is designed to function in a vacuum.
(7) An evaluation will determine if proof tests are required.
(8) An evaluation will determine whether a burn-in or run-in test should be performed.

그림 4. Components Qualification/Acceptance Tests

3.2.2 번인시험 수행 방법

전기전자 부품류의 경우 인증/수락시험을 완료하기 전까지 총 300시간의 작동시간을 가져야 한다. 특히 이 중 마지막 100시간에서는 고장이 발생하여서는 안된다. 300시간의 작동시간에는 그 이전에 수행한 기능시험 및 열진공/주기 시험 등의 시험 시간이 모두 포함된다. 기계 부품류의 경우 실제와 동일한 작동 조건 하에서 작동 시험을 수행한다. 본 규격서에는 기계 부품류에 대한 구체적인 시험조건 및 기간 등에 대한 언급은 없으며 개별 경우에 따라 시험을 수행한다는 단서 조항만 있다.

3.3 MIL-HDBK-340A에 언급된 번인시험

MIL-HDBK-340A[5,6]는 발사체, 상단부, 궤도 비행체 등의 시험 시 일정한 기준 및 수행방법을 제시하기 위해 작성된 핸드북이다.

3.3.1 웨어인시험 적용대상 및 단계

이 규격서에는 웨어인(wear-in) 시험을 유닛(unit)의 수락시험 단계에서 수행하도록 명시한

다. “유닛(unit)”이란 독립적인 기능이 부여된 개발개체를 의미하며 인증 및 수락시험의 최소 단위가 된다. 예를 들어 유압 액추에이터, 트러스터, 밸브, 배터리, 트랜스미터 등이다. 그림 5에 우주 비행체용 유닛의 수락시험 수행여부를 나타낸 표가 있는데, 이에 의하면 MMA(moving mechanical assembly, 예를 들어 김발구동부, 모터, 클러치, 스프링, 댐퍼 등), 밸브 및 추진계통 부품, 트러스터 등이 웨어인시험 대상이 되며, 시험단계는 유닛의 측정(ispection) 후 기능시험을 수행하기 전이다.

Test	Reference Paragraph	Suggested Sequence	Electrical and Electronic	Antennas	MMA	Solar Array	Batteries	Valve or Propulsion Component	Pressure Vessel or Component	Thruster	Thermal	Optical	Structural Component
Inspection ¹	4.5	1	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Functional ²	7.4.1	3	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Leakage ³	7.4.9	4,7,12	R	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Shock	7.4.6	5	O ⁴	—	—	—	—	—	—	—	—	—	O
Vibration	7.4.4	6	R	R ⁵	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Acoustic	7.4.5	6	O	R ⁵	—	—	—	—	—	—	—	—	R ⁵
Thermal Cycle	7.4.2	8	R	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Thermal Vac	7.4.3	9	R ⁵	O	R ⁵	O	R ⁵	R	O	R	R	R	O
Wear-in	7.4.10	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Proof	7.4.8	—	—	O	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pressure Proof/Load	7.4.7	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	O ⁶
EMC	7.4.11	13	O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Recommended vehicle qualification requirements:
R = baseline requirement (high probability of being required)
O = "other" (low probability of being required; 3.3.2)
— = not required (negligible probability of being required)

Notes:
1 Required before and after each test as appropriate. Include special tests as applicable (6.2).
2 Discretionary for sealed or low-pressure components.
3 Applicable only to sealed or low-pressure components.
4 Required when shock levels are high (7.4.4).
5 Either vibration or acoustic, whichever is more appropriate, with the other discretionary.
6 Test required if composite materials are used. The test may be waived if proven non-destructive evaluation methods are used with well-established acceptance and repair criteria.
7 Excluding hydraulic components for launch vehicles.
8 Not required for hardware that cannot be recharged after testing.

그림 5. Unit Acceptance Test Baseline

3.3.2 웨어인시험 수행 방법

우주 비행체에 적용되는 기계 부품류 중 수락 시험 시 웨어인시험을 수행하도록 언급되어 있는 부품류는 실제 작동시간보다는 작동횟수를 고려하는 것이 더 적절할 수 있다. 예를 들어 트러스터의 경우 1회 사용주기는 1회의 분사 외에 분사 시작, 정상 상태, 분사 중지 등의 일련의 과정이 포함된다. 이러한 기계 부품류의 웨어인시험은 총 15회의 시험주기 및 총 서비스 수명의 5% 중 큰 값으로 시험기간을 고려한다. 서비스 수명이란 유닛의 제조 완료 후부터 모든 시험, 이송, 발사, 귀환, 재사용 등을 모두 고려한 시간이다. 웨어인시험 시 압력 및 온도 조건은 유닛의 초기

고장모드를 판별하는데 문제가 없다면 대기압, 상온으로 시험해도 무방하다. 필요한 경우 온도 조건은 작동환경 시의 경우와 동일하게 할 수 있다. 기계 부품류 중 부스터 탱크와 같이 극히 제한된 사용 주기를 갖는 경우 웨어인시험을 수행하지 않는다.

3.4 MSFC-HDBK-670 및 MIL-HDBK-340A 비교 검토

3.4.1 시험 대상물

MSFC-HDBK-670와 MIL-HDBK-340A의 가장 큰 차이점은 전기전자 부품의 번인시험 수행여부에 대한 것이다. MSFC-HDBK-670에서는 그림 4에 나와 있듯이 전기전자 부품을 번인시험에 포함하는데, MIL-HDBK-340A에서는 그림 5와 같이 전기전자 부품에 대해서 시험 수행여부가 아예 빠져있다. MIL-HDBK-340A는 1985년에 제정된 MIL-HDBK-340을 1999년에 개정한 문서로 1985년판에는 MSFC-HDBK-670에서 언급한 것과 동일하게 전기전자 부품에 대한 번인시험의 수행여부 및 수행방법을 언급하였었다. MIL-STD-1540B(1982년)와 1540C(1994년)[3]에도 340과 340A에서와 같이 전기전자 부품에 대한 번인시험 수행여부가 빠져있는데 이는 미군규격에서 많은 시험을 통해 자체적으로 전기전자 부품에 대한 번인시험 수행을 더 이상 수행하지 않아도 될 정도의 신뢰성을 확보한 것이 아닌가 하는 추측을 하게 한다. 2003년에 공표된 ISO/DIS 15864[6]는 궤도 비행체 및 위성의 시험에 초점을 맞춘 규격서라는 점에서 발사체와는 다소 성격이 상이할 수 있으나, 서브시스템 및 유닛에 대해 수락시험 및 비행시험 시 전기전자 부품에 대한 번인시험을 반드시 수행하도록 하고 있다. 나머지 부품들에 대해서는 MMA에 대해 번인시험을 필수가 아닌 선택사항으로 한 것 외에는 위에서 고려한 두 규격서와 동일하다. 따라서 시험은 충분한 경력 및 데이터를 확보하지 못한 경우 보수적인 측면에서 접근을 하는 것이 필요하므로 국내 우주 발사체 개발 시엔 앞서 언급한 규격서

들에서 번인시험을 수행하도록 언급된 모든 품목들인 전기/전자, MMA, 밸브, 트러스터 등에 대해 번인시험을 수행하는 것이 적절할 것으로 고려된다.

3.4.2 시험환경 조건

번인시험을 수행하는 환경조건으로 압력과 온도가 언급이 된다. MSFC-HDBK-670의 경우 구체적인 조건이 언급되어 있진 않지만 부품이 실제 처하는 환경조건을 모사해 번인시험의 환경조건으로 고려할 것을 언급하고 있다. MIL-HDBK-340A의 경우 시험의 목적에 부합하는 경우 압력 조건에 대해서는 대기압으로, 온도조건은 경우 상온으로 시험을 수행하도록 언급되어 있다. 이는 문헌 [6]에도 동일하게 언급되어 있다. 우주 발사체의 경우 궤도 비행체나 위성에 비해 비행 시간이 짧으며 비행 시 부품이 노출되는 환경조건이 양호한 편이다. 따라서 우주 발사체용 부품에 대한 번인시험 시 환경조건은 후자의 경우에 따라 상온 대기압으로 시험하는 것이 적절할 것으로 예상된다.

3.4.3 시험 수행 단계

번인시험을 개발 검증단계에서 언제 수행할지에 대해서는 참고한 모든 규격서에서 공통적으로 수락시험(AT) 단계에서 수행할 것을 언급하고 있다. 규격서의 성격 상 MSFC-HDBK-670에서는 다른 규격서와는 다르게 인증/수락시험 단계로 언급이 되지만 그 성격 상 다른 규격서의 수락시험 단계와 유사하다고 파악된다.

수락시험 단계 중 번인시험의 순서에 대해서는 양 규격서의 내용이 다소 차이가 있다. 우선 MSFC-HDBK-670에서는 그림 3과 같은 순서로 제시가 되어 있다. 이에 반해 MIL-HDBK-340A에서는 그림 5에서 확인할 수 있듯이 시험 대상품의 측정 및 육안검사 등을 마친 뒤 기능시험을 수행하기 이전에 웨어인시험을 먼저 수행하도록 되어있다. 이는 전기전자 부품을 시험대상에 포함하고 있지 않은 MIL-HDBK-340A의 경우 기계 부품류의 전처리 및 초기 고장 가능품목을 미리 선별하고자 한 의도로 고려된다. 참고로 ISO/

DIS 15864에서는 그림 6과 같이 환경시험 항목 중 가장 마지막에 번인시험을 수행하도록 되어 있다. 번인시험의 방법 중 기능시험 및 열진공/주기 시험 등의 시간을 번인시험의 수행 시간에 포함하도록 한 MSFC-HDBK-670의 개념을 고려한다면 ISO/DIS 15864에서 제안된 바와 같이 환경시험 항목 중 가장 마지막에 번인시험을 하는 것이 적절하다고 판단된다.

Test	Reference paragraph	Suggested sequence*	Minimum test series ^b														
			Electron and electronics	Antenna	MMA	Solar array	Battery	Wire	Propulsion	Pressure vessel	Thrustor	Thermal	Optical	Structural			
Functional	7.1	2,14	R	R ¹	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
EMC	7.2	15	O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Magnetic field	7.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Antenna pattern	7.4	-	-	R ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Optical alignment	7.5	3,12	-	O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	O
Physical property	7.6	1,17	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Dynamic balance	7.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Launcher/spaceraft interface	7.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Static load	7.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acceleration	7.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modal survey	7.11	5	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Sinusoidal vibration	7.12	6	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Random vibration	7.13	7	R	R ¹	R	R ¹	R	R	R	R	R	R	R	R	R ³	R	R ³
Acoustic	7.14	7	O	R ¹	-	R ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	R ³	O	R ³
Shock	7.15	8	O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Thermal balance	7.16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Thermal vacuum	7.17	10	R	O	R	O	R	O	R	O	R	O	R	O	R	O	R
Thermal cycle	7.18	9	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Pressure	7.19	11	-	-	O	-	R	R	R	R	O	-	-	-	-	-	-
Leakage	7.20	4,13	O	-	O	-	R	R	R	O	R	-	-	-	-	-	-
Burn in and wear in	7.21	16	R	-	O	-	R	-	R	-	R	-	R	-	R	-	-

*The test sequence suggested may be modified according to the efficiency of the operation, schedule of test facilities, and effects to detect malfunctions. However, the following principles may not be changed:
1) Functional tests shall be conducted at the beginning and end of each environmental test, at minimum.
2) The leakage test and alignment check shall be conducted at the beginning and end of the environmental tests, at minimum.
¹R: recommended, O: optional, -: not required
³Either random vibration or acoustic test is recommended, whichever is more appropriate, with the other discretionaly.
⁴Usually, antenna pattern test is performed as part of functional test.

그림 6. AT Items & Sequence in ISO/DIS 15864

3.4.4 시험 수행 방법

번인시험이란 어떤 특별한 절차 및 방법을 갖는 시험이 아니라 시험 대상품이 번인시험을 통해 초기 고장모드가 발생하는지를 확인하는 시험이며, 시험 후 정상작동이 될 수 있도록 전처리를 하는 시험이다. 따라서 번인시험은 대개의 경우 일반 기능시험이나 진동시험, 열주기시험 등의 방법으로 수행하게 된다. 앞서 언급한 두 규격서에도 번인시험을 수행하는 구체적인 절차 및

방법 등에 대해서는 언급되어 있지 않다. 두 규격서에서 공통적으로 언급하고 있는 사항은 ① 작동을 대표하는 조건 하에서, ② 부품의 기능을 점검할 수 있는 시험을, ③ 정해진 시간동안 수행한다는 것이다.

우선 작동을 대표하는 조건이란, 시험 대상물 주변 압력 및 온도, 작동속도, 입력 전압 등 실제 비행 시의 조건이라고 할 수 있다. 이 중 우주 발사체에 대해서는 앞서 '3.4.2 시험환경 조건' 부분에서 한정하였듯이 상온, 대기압으로 시험하도록 고려한다.

두 번째 항목은 시험 대상물의 작동조건과 연관이 되는데 이는 '부품의 기능을 점검할 수 있는 시험', 즉 기능시험에 해당된다고 할 수 있다. 즉 번인시험을 수행하는 경우 시험환경 조건 하에서 시험 대상물의 기능시험을 수행하게 된다. 우주 비행체의 경우 열주기 및 진공 조건에 노출되므로 진동시험, 열주기시험 혹은 열진공시험을 번인시험으로 수행할 수 있다. 우주 발사체용 부품의 경우 기능시험 수행을 통해 번인시험이 가능하다. 수락시험 단계에서 번인시험 이전에 수행한 시험 중 기능시험 및 진동시험, 열주기시험, 열진공시험 등은 모두 번인시험으로 포함할 수 있다.

번인시험을 수행하는 시간(횟수)은 전기전자 부품의 경우 MSFC-HDBK-670에 언급된 바와 같이 300시간을 수행하며 마지막 100시간에서는 고장이 발생되지 않아야 한다고 언급되어 있다. 기계류 부품의 경우 MIL-HDBK-340A에 의하면 서비스 수명(service life)의 총 기대 반복횟수의 15배 또는 5% 중 큰 값만큼 시험을 수행하도록 언급되어 있다. 그런데 이 값들은 위성과 같이 비교적 장기간 사용되는 우주 비행체를 고려하여 설정된 값으로, 길어야 10~20분 정도 비행하는 발사체의 부품에 대해서는 지나치게 길다고 할 수 있다. 각 규격서에도 시험방법 및 기간에 대해서 적용하는 프로그램 및 시스템의 특성을 고려해 수정하여 적용할 것을 언급하고 있다. 실제로 미국의 지구저궤도용 발사체인 Pegasus의 경우 수락시험 시 번인시험으로 100시간의 시험을 적용한 사례가 있다[7]. 그러므로 국내에서 우주

발사체 개발 시 번인시험을 수행하는 시간은 개발 시스템의 특성, 비행시간 등을 고려하여 적용하는 것이 필요할 것으로 예상된다.

4. 결 론

번인시험에 대한 일반적인 사항 및 우주 비행체의 번인시험에 대한 여러 규격서의 내용을 종합적으로 검토하였다. 이를 통해 국내에서 우주 발사체용 부품의 번인시험을 적용할 시 다음과 같은 사항을 고려하여 적용하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

① 번인시험을 수행할 대상품목은 유닛 수준의 전기전자 부품, MMA, 밸브류, 트러스터로 한정한다.

② 시험환경 조건은 상온, 대기압으로 고려한다.

③ 번인시험은 우주 발사체용 부품의 수락시험 단계에서 수행한다.

④ 번인시험 방법은 전지전자 부품의 경우 MSFC-HDBK-670의 "2.2.5 Burn-In/Run-In Test"에 의거한다. 나머지 유닛의 경우 MIL-HDBK-340A Vol. I의 "7.4.10 Wear-In Test, Unit Acceptance" 및 Vol. II의 "5.16 Life and Wear-In Tests"에 따른다. 하지만 개발하는 발사체의 특성에 따라 시험방법은 적절히 조절할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 김윤광 외, 신뢰성 용어 해설서, 경기도 과천시, 산업자원부 기술표준원, 2005.
2. MIL-STD-1540C, "Test Requirements for Launch, Upper-Stage and Space Vehicles", 1994.
3. MSFC-HDBK-670, "NASA Marshall Space Flight Center General Environmental Test Guidelines for Protoflight Instruments and Experiments", 1991.

4. MIL-HDBK-340A, "Test Requirements for Launch, Upper-Stage and Space Vehicles Vol I : Baselines", 1999.
5. MIL-HDBK-340A, "Test Requirements for Launch, Upper-Stage and Space Vehicles Vol II : Application Guidelines", 1999.
6. ISO/DIS 15864, "Space Systems - Unmanned Spacecraft Design, Performance and Quality Assessment - General Test Methods for System, Subsystem and Unit Levels", 2003.
7. T. Irvine, K. Bumpas, "Pegasus Test Program", IEST, Vol. 5, 1991, pp. 143~151.