

한국항공우주연구원의 충격시험설비 및 운용 현황

◦ 김 홍 배* • 이 상 설* • 문 상 무* • 우 성 현**

Shock Test Facilities and their Application at KARI SITC

Hong-Bae Kim, Sang-Seol Lee, Sang-Mu Moon, Sung-Hyun Woo

ABSTRACT

Shock environments are generally classified two categories ; One is mechanical shock environments encountered in handling, transportation, and service environments. The other is pyrotechnic shock (or pyroshock) environments generally initiated by firing of an ordnance item to separate or release a structural member of fastener. The objective of this paper is to present a set of shock test methods – specific characteristics induced by many shock test devices, test objects properties, and shock environments. In addition, it is introduced the application of shock test in Korean aerospace development program and others with shock test facilities of Korea Aerospace Research Institute .

1. 개 요

한국항공우주연구원(이하 ‘항우연’)의 우주시험동(Satellite Integration and Test Center, SITC)은 인공위성과 발사체와 같은 우주비행체의 시스템 및 부품을 시험하기 위하여 국내 최초로 건립된 첨단시험시설로서 고신뢰성이 요구되는 제품에 대한 구조/동특성, 열진공, 열제어 및 전자과환경 등에 대한 시험과 분석을 수행할 수 있으며, 산/학/연의 공동활용으로 관련개발품의 개발비를 절약하고, 시설의 가동률을 높이며 위성관련 기술의 공유 및 기술확산의 효율화를 유도하도록 노력하고 있다.

본 논문에서는 항우연 우주시험동에서 운영중인

설비 중 발사환경 시험 장비인 충격시험설비의 기능 및 특징을 중심으로 충격시험의 형태와 수행방법, 국내의 위성 및 발사체 개발분야 및 일반 산업분야에서의 운용사례에 대하여 알아보기로 한다.

2. 충격 시험

충격시험은 제품을 수송하거나 정상 운용하는 중에 받게 되는 반복성이 없는 충격환경(Table1.)으로부터 얼마까지 견디어 내는가, 또는 어느 정도에서 파괴되거나 오동작을 일으키는가를 확인하며, 제품의 사용자에게 제공할 신뢰할 수 있는 충격 가용환경의 한계를 얻고자 수행한다. 따라서 제품의 사용환경과 수송방법등에 따라 충격의 세기, 지속시간 등 충격환경이 다르게 되며, 이에 대

* 정희원, 한국항공우주연구원, 연구원

** 한국항공우주연구원, 연구원

한 정확한 시험을 위해서는 제품이 받게 되는 충격환경의 특징을 분석하고, 이에 맞는 시험 장치와 방법을 선택하는 것이 중요하다.

Table 1. 충격환경의 종류와 특징[1]

	Mechanical Shock	Pyrotechnic Shock
충격원	Drop, crash, impact 등	기폭성 분리장치의 폭발 등
주파수 범위	10,000Hz 까지 (대부분 < 2,000Hz)	100 to 1,000,000Hz
지속시간	< 1sec (대부분 < 100msec)	< 20msec
충격세기	수천 G 이내	300 ~ 300,000G
시험장비	Drop Shock Device, Electrodynamic Shaker	Actual Explosive Device, Mechanical Simulator(resonator), Electrodynamic Shaker

3. 가진기를 이용한 충격시험

항우연은 위성체 시스템 및 부품의 진동환경시험을 위해 두 대의 중대형급 전자기식 가진기 시스템을 보유하고 있다. 이들 시스템의 사양은 Table 2 와 같으며, 이를 이용하여 부품 및 시스템 수준의 충격시험을 함께 수행하고 있다.

Table 2 Electrodynamic shakers and Its Shock Performance(KARI)

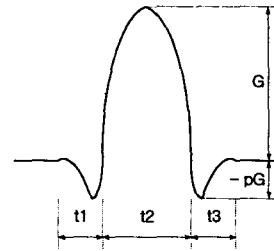
Model	Shock Test Performance
LDS V994 Electromagnetic Shaker	Half sine peak bump : 801kN Acceleration : 180g Displacement : 63.5mm
LDS V964 Electromagnetic Shaker	Half sine peak bump : 267kN Acceleration : 210g Displacement : 50.8mm

전자기식 가진기는 임의의 파형을 반복성있게 구현하는 장점이 있으나, 전자기력의 기계적인 변환에 대한 제한과 가진부의 고유진동수로 인해 최대 200g, 3kHz 이하의 충격환경만을 모사할 수 있는 제약을 가지고 있다.

가진기를 이용한 충격시험 방법은 가진기를 제어하는 신호의 유형에 따라 단일파형의 고전적인 충격시험과 SRS 를 이용한 충격시험, Wavelet

Modification 을 이용한 충격시험으로 구분된다.

단일파형 시험방법은 half-sine, saw-tooth, rectangular, trapezoidal 등의 단일 시간파형을 부과하는 시험으로, 파고와 주기로 충격수준을 결정하게 되는데, 가진기 시스템의 최대전류(peak force level)와 최대전압(peak velocity level), 행정에의해 제한을 받으며, 주파형의 전후로 반대방향의 펄스를 가하여 가진기의 부과 충격량을 극대화시킬 수 있으며, 보통 10%를 넘지 않는다.[2]



$$G = \frac{2RP \times 10^{-3}}{(t_2)^2 (1 + 2P) \left(1 + \frac{Ma}{Mb}\right)}$$

t2 in main pulse period, sec.
G in acceleration Unit
R in Relative Displacement, mm
Ma : shaker armature mass
Mb : shaker body mass

Figure 1. Classical Shock Signal

순간적인 충격가진은 가진기 몸체의 반작용을 유발하며 이는 상대적으로 충격수준을 감소시키는 결과를 가져오므로 충격시험의 경우 이들 반력에 의한 몸체의 움직임도 함께 고려를 해야한다.

$$d = S \frac{Mt}{Mb}$$

d = Displacement (pk to pk)

S = Test Displacement(travel of the armature wrt the body, mm)

Mt = Total moving mass, kg

Mb = Shaker body mass, kg

가진기의 보호를 위한 isolation 시스템을 작동시키지 않고 충격시험을 수행하여 충격력을 최대화시키기도 한다[2].

충격응답스펙트럼(SRS, Shock Response Spectrum)을 이용한 충격시험은 제품이 받게되는 시간영역에서의 충격환경을 과도상태의 주파수영역의 스펙트럼으로 변환한 SRS 를 이용하여 가진기의 입력을 제어하는 방법으로 pyroshock 에 의한 구조물 공진등의 영향을 시험할 때, 충격환경이 시간영역에서 복잡한 형상을 가지는 경우에 사용하는 방법이다.

SRS Modification 방법은 가진기의 최대충격한계를 넘어서 시험을 해야 하는 경우의 방법으로 부과하고자 하는 시간파형을 SRS 로 전환한 후 이틀다시 긴 시간영역의 파형으로 수정하여 가진기의 입력을 제어하는 방법으로 동일한 주파수별 가속도치를 지닌 여러 개의 wavelet 형태의 정현파를 그림 2 의 과정과 같이 합성하여 시험대상물의 정상거동 영역까지 충격부과시간을 충분히 늘려 가진기의 요구 가속도레벨을 낮추게 되며, 변환 전보다 지속시간은 증가하지만 최고 충격치를 30% 이하로 줄일 수 있어 가진기의 성능제한을 넘는 충돌 충격시험의 경우에 대해 수행할 수 있다 [1][3][4].

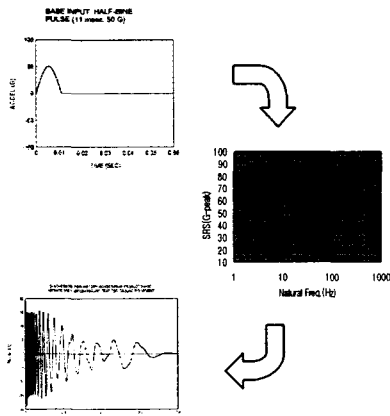


Figure 2. SRS-wavelet Modification Method.

위성체의 분리장치에 의한 충격환경시험은 대부분 SRS 를 이용하여 수행하며, 항우연에서는 우리별 2, 3 호 시스템(그림 3) 및 다목적 실용위성용 국산화 부품시험을 이 방법을 이용하여 진행하였으며, 1ton 에 달하는 대형 방산전자장비의 충격시험에는 Wavelet Modification 방법을 이용하여 300G 에 달하는 충격시험을 성공적으로 수행하였다.

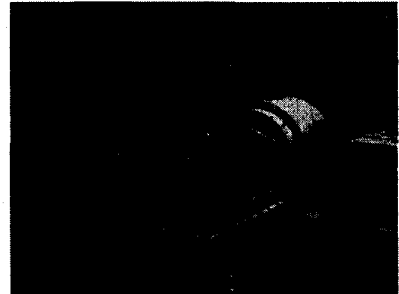


Figure 3. Shock Test with Electrodynamic shaker (KAISTSAT 4 EM, KARI)

4. Drop Shock Test Machine

가장 단순한 충격시험 장치로는 지구중력이 가지는 위치에너지를 이용한 드롭방식의 충격시험기로 항우연은 6000G 까지 가할 수 있는 소형 충격시험기를 가지고 있다. 이는 시편을 고정된 드롭테이블을 정한 높이에서 자유 낙하 시키므로써 충격가속도를 제어할 수 있으며, 테이블과 충돌하는 임팩트 패드의 재질에 따라 파형과 충격주기를 조절할 수 있다. 임팩트 패드는 재질이 무를수록 피크형상이 원만해지고 충격지속시간이 길어지며, 보통은 강철, 알루미늄 재질의 패드에 부직포 형태의 시트를 여러 개 겹쳐 사용하므로써 파형과 주기를 정밀하게 제어하기도 한다.

항우연에서는 이 자유낙하식 충격시험기를 수정하여 직접 대상체를 가격하여 충격을 가하는 직접 충격시험과 테이블을 이용한 간접충격시험을 동시에 할 수 있는 복합충격시험기를 제작하여 사용하고 있으며, 테이블에 스프링을 장착할 수 있도록

하여 낮은 충격치까지 조절할 수 있다.

그림 4 는 항우연의 복합충격시험기로 테이블을 이용하여 소형 전자부품박스들의 충격시험을 수행하고 있으며, 원자로의 핵연료봉 지지구조물의 파손시험등 직접충격시험도 다수 수행하였다.

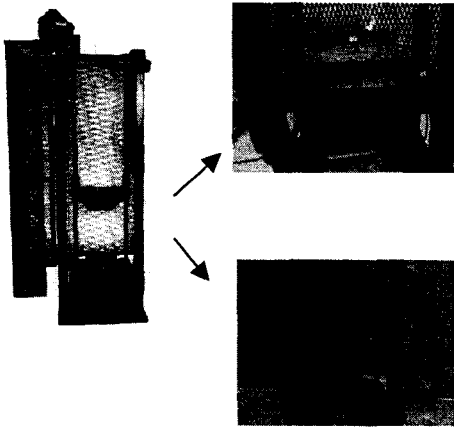


Figure 4. Complex Drop Shock Machine(KARI)

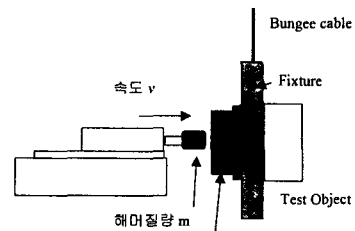
5. Pyro-Shock Test Machine

다단계 발사체의 단분리, 발사체로부터 탑재체(위성체등)의 분리, 위성체 부착물의 분리 및 전개등에 사용되는 분리 시스템은 일반적으로 폭발성 물질을 이용하여 분리시스템의 고정장치를 분리시키는 방법을 사용하는데, 이러한 과정에서 수 kHz의 고주파대역까지 높은 에너지가 구조물로 전달된다. 이러한 충격환경을 “Pyrotechnic Shock” 또는 “Pyroshock”라 부르며 그 응답 스펙트럼의 특징은 저주파수 대역에서부터 응답 스펙트럼의 최고점까지는 +6dB/Oct의 등속도 선과 일치하며, 충격원으로 멀어짐에 따라 그 크기는 줄어드나, 최저 15% 이하로는 줄어들지 않는 형태를 이루며, 최고치가 고주파대역까지 일정치를 유지되는 형상으로, 그 크기는 충격원으로부터 멀어짐에 따라 급격하게 줄어든다(Table 3).

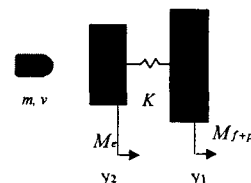
Table 3. Pyroshock 의 특징[8]

구 분	Near-Field	Mid-Field	Far-Field
충격원으로부터의 거리	within 6 in	6 ~ 24 in	beyond 24 in
최고가속도(G)	5000 ~	1000~5000	~ 1000
주파수범위	100kHz 이상 유지	10kHz 이상 유지	10kHz 이하
충격형태	주로 충격파	충격파+구조물공진	주로 구조물공진

이러한 영역별 특징에 따라 Near-Field에서의 충격시험 및 폭발장치에의해 분리되는 전체 시스템에 대한 충격시험에는 직접 폭발분리장치를 기폭하여 충격을 가하게 되나, Far-Field에 놓은 부품들에 대한 충격시험은 앞에서 언급한 가진기를 이용하거나 공진장치(resonator)를 이용한 pyroshock 시험장치를 사용한다. 충격시험기 공진장치의 1차모드 공진주파수가 충격스펙트럼의 둔치 주파수(Heel Frequency)와 일치하도록 하고, 공진장치를 해머 등으로 가격하면 공진장치의 1차 모드운동이 고정장치를 통과하여 시험대상물을 가진하게 되며 시험대상물은 해머의 충격을 공진장치에의해 변조시켜진 충격스펙트럼으로 전달받게된다(그림 5). 가진 주파수 변조를 위한 공진기의 강성에 비해 충격해머, 시험대상물 고정장치 등은 강체로 취급할 수 있으므로 그림 5(b)와 같이 이상화할 수 있다[9].



(a) Schematic Discription



(b) Idealized Model

Figure 5. Pyroshock Test using Resonator

공진장치는 시험하고자 하는 대상체의 질량과 부과해야할 충격스펙트럼에 따라 그 설계가 달라야 하며, 냄비형 공진장치의 경우 둔치주파수와 형상과의 관계는 다음식에 의해 결정된다.

$$f_1 = 2.03^2 \frac{\pi^2}{d^2} \sqrt{\frac{Et^3}{12\rho(1-\nu^2)}}$$

f_1 : Resonator 1st resonance frequency
 d : Resonator diameter
 t : Resonator thickness

항우연은 이 같은 개념으로 직접 공진형 충격시험기를 설계, 제작하여, 위성체 부품 및 과학로켓의 전자부품들에 대한 충격시험을 계속해서 수행하고 있다. 시편의 고정부는 치구의 형상에 따라 3 축의 방향 전환이 가능하도록 하였으며, 가격부인 해머 부분은 자유로이 Force transducer 를 설치할 수 있도록하여, 충격량을 측정하기도 한다.

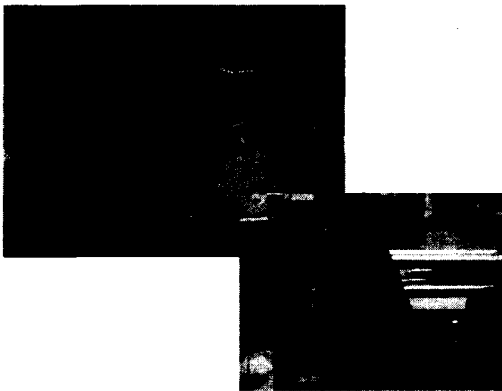


Figure 6. Pyroshock test machine in KARI

6. 결 론

기계적인 충격, 폭발, 음압 등 충격원의 다양함과 설치조건에 따른 충격현상의 다변화는 충격시험 기법의 연구 및 시험장치의 개발이 지속적으로

요구되며, 최적의 시험을 위한 충격환경의 정확한 예측, 측정센서 및 측정점의 선정, 측정오차의 최소화 등 국내 우주개발 및 일반 산업체의 제품개발에 있어서 충격환경시험 기법의 체계화와 규격화가 절실하게 요구되고 있다. 본 논문은 항우연에서 그동안 수행해 왔던 충격시험 및 그 장치의 다양한 활용을 소개하므로써 충격환경에 대한 연구 및 기술을 교류하고, 나아가서는 국내 충격관련 기술의 세계화를 앞당기고자 함이다. 향후 국내에서 개발될 우주비행체의 경우도 이러한 일련의 연구개발을 통하여 축적된 기술을 바탕으로 충격관련연구가 계속될 것이며, 조기에 기술 선도국이 되기 위해서는 관련분야 연구자들의 협조 및 노력이 요구된다.

7. 참고 문헌

- (1) "Environmental Engineering Considerations and Laboratory Test", *USA Military Standard MIL-STD-810F*, January 2000.
- (2) V994/964 Electrodynamic Shaker Manual, *Ling Dynamic System*, UK, 1995.
- (3) Tom Irvine, "Shock Response Spectrum Testing for Commercial Products", Rev.3, *Vibrationdata.com*, July 1999.
- (4) David O. Smallwood, "Shock Testing on Shakers by Using Digital Control", Institute of Environmental Sciences technology monograph, 1987.
- (5) Tom Irvine, "Simple Drop Shock", *VibrationData.com*, Sept. 1998.
- (6) Instruction Manual L.A.B. Free Fall Shock Machine (Model SD-10-66-30), LAB Equipment Inc., December, 1995.
- (7) Moening, C.J., "Pyrotechnic Shock Flight Failure", *Institute of Environmental Sciences Pyrotechnic Shock Tutorial Program, 31st Annual Technical Meeting, Inst. Envir. Sc.*, Apr. - May 1985.
- (8) Daniel R. Mulville, "Pyroshock Test Criteria", *NASA Technical Standard NASA-STD-7003*, May 18, 1999.
- (9) 김홍배, 오진호, 문상무, 우성현, 이상철 "우주비행체 분리장치 작동에 의한 충격현상 모의시험기 개발", 한국소음진동공학회 2000년 추계학술대회, 2000년 11월.