

고주파 충격에 의한 전자부품 고장 방지 설계

Designing Electronics for High Frequency Shock

이 종 학[†] · 강 동 석^{*} · 최 지 호^{*} · 강 영 식^{*} · 이 창 민^{*}

Jong-Hak Lee, Dong-Seok Kang, Ji-Ho Choi, Young-Sik Kang and Chang-Min Lee

(Received September 7, 2015 ; Revised October 12, 2015 ; Accepted October 12, 2015)

Key Words : Isolation(절연), Pyrotechnic Shock(파이로 충격), Circuit Card Assembly(회로 카드 조립체)

ABSTRACT

In this study, stability designing electronics mounted on launch vehicle for shock load(low/high frequency band) could be derived. For the low-frequency shock loads, CCA(circuit card assembly) has secured the structural integrity over the best natural frequency techniques. For the high-frequency shock load, the structural integrity could be ensured with applying device such as the insulation pad. When the EAR is applied, insulation effect of part application is good more than whole application.

기 호 설 명

- A : 충격가진 증폭비
- B : 부품길이에 평행한 PCB길이(in)
- C : 부품상수
- f_d : 목표 공진주파수(Hz)
- f_n : 충격가진 주파수(Hz)
- G : 충격가진 가속도(g)
- h : PCB 두께(in)
- L : 부품길이(in)
- r : 부품의 상대위치 계수
- CCA : Circuit card assembly
- PCB : Printed circuit board

1. 서 론

미사일, 위성과 같은 로켓 발사체에 탑재되는 전자부품들은 수송 및 운용 도중 다양한 동적 하중에

의한 외란에 노출된다. 전자부품들은 수송 시에는 저주파 대역(100 Hz 미만)의 충격 및 저주파 대역(2,000 Hz 미만)의 불규칙 진동 외란에 노출되며, 운용 중에는 저주파 대역의 충격 및 진동에 더하여 고주파 대역(1,000 Hz 이상)의 충격 외란에 노출될 수 있다^(1,2). 전자부품이 저주파 대역의 충격, 진동 외란에 노출될 경우에는 주로 상대 변위에 의한 PCB 및 부품의 리드선 파손에 의해 고장이 발생할 수 있으며, 고주파 대역의 충격 외란에 노출될 경우에는 대부분 절대 가속도에 의한 부품 파손으로 고장이 발생할 수 있다. 절대 가속도에 의한 부품 파손의 사례로 오실레이터와 같은 부품 내부의 크리스탈 소자 파손 및 작고 가벼운 부품의 구조적 변형 유발 등이 있다.

고주파 대역 충격 외란의 대표적인 사항으로 파이로 충격이 있다. 일반적인 발사체는 비행 중 임무 수행을 위해 단 분리, 페어링 분리 등을 수행하게 된다. 이러한 여러 분리 이벤트는 주로 화약을 이용하여 구송을 해제하거나 구조물을 절단하는 분리 장

[†] Corresponding Author ; Member, LIG Nex1
E-mail : leejonghak27@lignex1.com
^{*} Member, LIG Nex1

A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2015 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Heung Soo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

치를 사용하게 되는데, 이 때 화약의 폭발로 인해 구조적으로 매우 큰 천이 진동 현상이 유발되게 된다. 이러한 현상을 파이로 충격이라고 한다. 파이로 충격은 일반 진동 현상과 매우 다른데 작용 시간이 10~30 ms 정도로 매우 짧다는 것과 이 때 유발되는 천이 진동이 분리장치의 종류에 따라 10 kHz 이상의 고주파 대역까지 100~10 kG의 상당히 큰 가속도의 값을 갖는다는 것이다. 파이로 충격에 의해 발사체 내부에 장착된 전자부품의 기능이 비정상적으로 나타나거나 순간적으로 오작동이 유발되어 발사체의 임무 실패를 초래할 수 있어 파이로 충격에 대한 대비는 상당히 중요하다. 이 논문에서는 발사체에 탑재되는 전자부품에 충격저감장치를 적용하여 충격 외란에 강건한 설계에 대해 기술하였다.

2. 본 론

2.1 충격 절연 방법 및 효과도 분석

(1) 저주파/고주파 대역 충격 절연 방법

전자부품의 충격 외란에 대한 안정성을 확보하기 위해 충격절연장치(저주파 특성의 절연계) 및 충격저감장치(고주파 특성의 절연계)가 사용되며 각 특성은 아래와 같다.

① 충격절연장치

- 모든 주파수 대역의 충격 하중 절연에 우수
- 많은 변위량으로 충격 하중 감소
- 과도한 스웨이 공간 필요
- 상황에 따라 저주파 진동/충격 하중을 증폭

② 충격저감장치

- 이종 물질의 강성 차이에 의해 충격 하중 전달을 반사
- 면접촉을 최소화 하여 충격 하중 전달을 최소화
- 고주파 대역, 큰 가속도 충격 하중의 50% 이상 절연 효과
- CCA의 저주파 대역 충격 하중에 대한 내구성 필요

(2) CCA 공진주파수 최적화

저주파 대역의 충격 하중에 대하여 CCA의 구조

건전성을 확보하여야 한다. CCA는 PCB에 여러 가지 전자부품들이 부착된 조립체를 말하며, Fig. 2는 발사체에 사용되는 CCA의 한 종류이다. CCA의 경우 충격가진에 대한 허용 상대변위를 최소화 시켜야 한다. CCA의 허용 상대변위는 식 (1)에 의해 계산할 수 있다³⁾.

$$Z = \frac{0.00132B}{Chr\sqrt{L}} \tag{1}$$

여기서 B, C, h, r, L 은 각각 부품 길이에 평행한 PCB길이, 부품상수, PCB두께, 부품 상대위치 계수, 부품길이이며, Fig. 1에서 시각적으로 확인할 수 있다. 250 G(5 ms)의 충격이 가해질 때, 충격가진에 대한 CCA의 상대변위는 식 (2)에 의해 구할 수 있다.

$$Z = \frac{9.8GA}{f_n^2} \tag{2}$$

여기서 G, A, f_n 는 각각 충격가진 가속도, 충격가진 증폭비, 충격가진 주파수이다. 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 CCA의 목표 공진주파수를 식 (3)에서 계산할 수 있다.

$$f_d = \left(\frac{9.8GAChr\sqrt{L}}{0.00132B} \right)^{0.5} \tag{3}$$

여기서 f_d 는 CCA의 목표 공진주파수이다. Table 1은 계산을 위한 각 파라미터들이 나타나 있으며, 실제 값들은 취약한 부위의 전자부품을 기준으로 적용된 것이다. 계산결과 규정된 저주파 충격 하중에 최적화된 CCA의 공진주파수는 160 Hz이다. 고주파

Table 1 Parameters for calculation of desired CCA resonance frequency

L [in]	C	h [in]	B	r	f_n [Hz]	G	A	f_d [Hz]
0.7	1	0.06	10	0.98	97	250	2.93	163

Table 2 Specification of material

Material	Density [kg/m ³]	Young's modulus [GPa]	Damping ratio
Teflon	2,200	0.50	0.05
EAR	960	0.02	0.50

충격하중에 대한 응답은 구조물의 감쇠특성만을 고려 시, 약 1,500 g 정도의 크기를 나타낸다. 발사체에 주로 탑재되는 전자부품인 오실레이터는 크리스털 소자로 이루어져있으며, 고주파대역의 고 가속도 하중에 쉽게 파손이 될 수 있으며, 이 연구의 대상 장비에 탑재된 오실레이터는 1,000 g 미만의 가속도 하중에서 신뢰성을 갖도록 규정 되어 있다⁽⁴⁾. 따라서, 이 연구에서는 각각의 주요 구성품들이 다음과 같은 제한 조건을 갖도록 설계를 하는데 목적이 있다.

① CCA(circuit card assembly)

- 목표 공진주파수: 160 Hz

② CCA 장착 하우징 조립체

- 목표 공진 주파수: 320 Hz 이상
 ; Octave rule 적용
 ; Global mode 기준

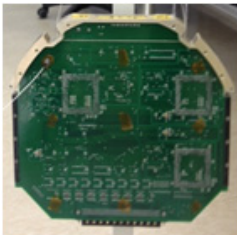


Fig. 1 Schematic of CCA

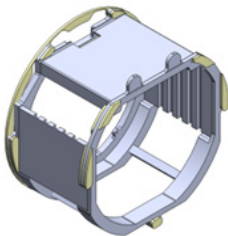


Fig. 2 Shock isolator - whole application

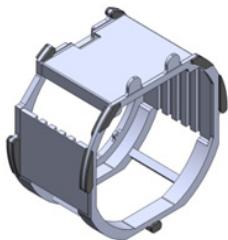


Fig. 3 Shock isolator - partial application

③ 최대 가속도 응답

- 고대역 충격 하중: 1,000 g 미만

(3) 고주파 대역 충격 하중 저감 설계

고주파 대역의 충격 하중을 저감하기 위해 충격 하중 전달 경로에 나일론, 테프론, EAR 재질의 절연패드를 조립하여 충격 저감 장치를 구성하였다. Figs. 2, 3과 같이 절연패드 미적용, 전체 적용, 부분 적용 형상 별로 효과도를 분석하였다.

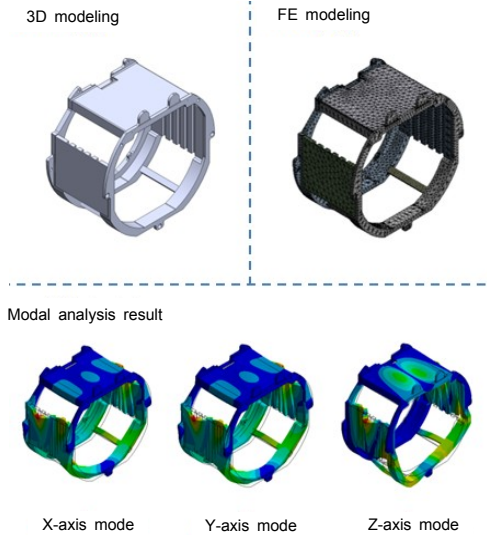


Fig. 4 Modal analysis(non-isolator pad)

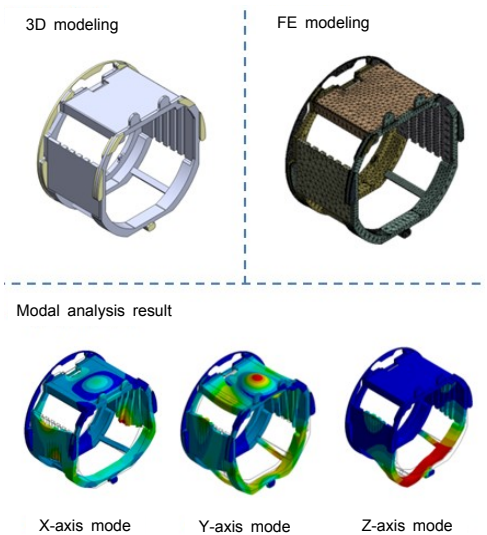


Fig. 5 Modal analysis(isolator pad-whole application)

CCA의 강건 설계를 위한 공진주파수를 확인하기 위해 모드시험과 모드해석을 수행하였다. Figs. 4, 5, 6은 각 형상 별 모드해석 부분을 나타낸다. Fig. 7은 모드시험용 가진기를 나타낸다. 모드시험은 가진기를 이용하여 1,000 Hz까지 random신호를 이용하였다.

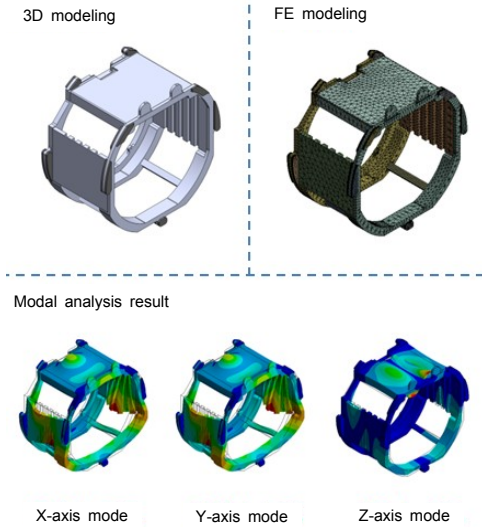


Fig. 6 Modal analysis(isolator pad-partial application)



Fig. 7 Schematic of excitor

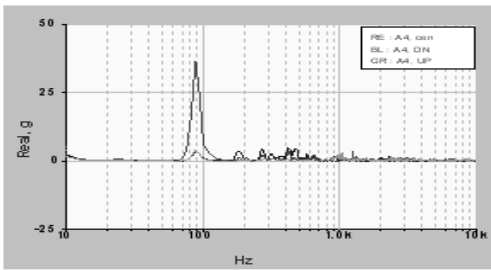


Fig. 8 Modal test result of CCA

모드시험 결과 CCA는 목표 공진주파수에 비해 약 44%가량 낮은 90 Hz의 공진주파수를 보였다. Fig. 8은 CCA의 공진주파수 시험 결과를 나타내며, Fig. 9는 CCA의 모드해석 FE 모델링 형상이다. 모드해석을 위해 PCB는 셸 요소로, 주요 전자부품은 점 질량으로 모델링하였다. 해석은 상용소프트웨어인 ANSYS를 사용하였다. 모드해석 결과 CCA의 공진주파수는 모드시험에서와 같이 90 Hz로 나타났다. 목표 공진주파수를 갖기 위해서는 보다 강건한 설계가 이루어져야 함을 알 수 있다. CCA를 보호하기 위해 설계된 하우징의 진동특성을 확인하기 위해 하우징의 모드해석을 수행하였다. 하우징의 전체모드가 CCA의 목표 공진주파수에 근접하면 이로 인해 PCB에 탑재된 전자부품의 피로파괴를 유발할 수 있기 때문에 하우징의 진동특성 해석 역시 중요한 요소이다. 해석은 충격 절연계를 적용하기 전과 두 가지 재질의 충격 절연계를 적용한 후의 경우에 대하여 수행하였다. 각 형상 별로 모달 분석을 통해 각 축 별 유효한 공진주파수를 추출하였으며, 그 값을 적용하여 versed-sine 바닥 가진, 타격시험⁽⁵⁾ 값을 이용한 arbitrary acceleration 바닥 가진, 불규칙 진동 바닥 가진 조건으로 충격 및 진동 절연 효과도를 분석하였다. 가진 방향은 CCA에 가장 많은 영향을 기여하는 X축으로 설정하였다. 효과도 분석 결과 versed-sine 바닥 가진에 대해 충격 저감 장치의

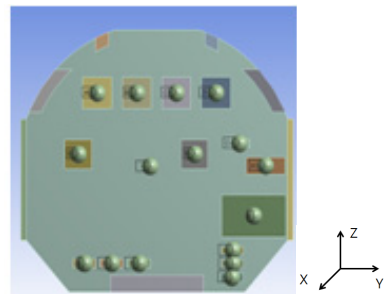


Fig. 9 FE modeling of CCA

Table 3 Natural frequency of electronics

	Non isolator pad[Hz]	Nylon [Hz]	Teflon [Hz]	EAR [Hz]
Whole application	2,074	1,774	1,600	644
Partial application	2,074	1,414	1,027	457

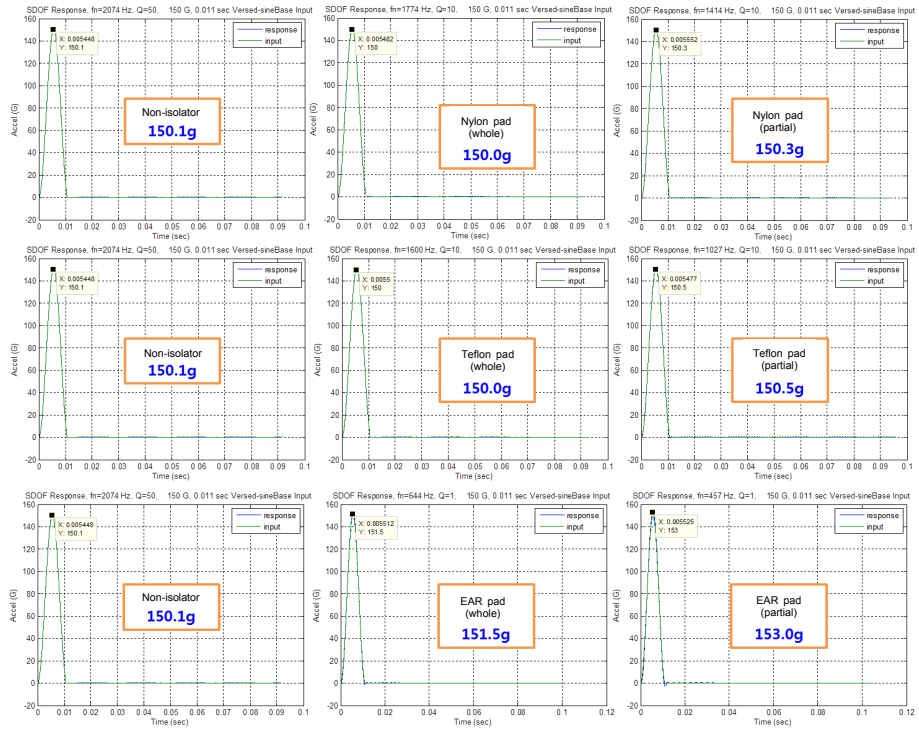


Fig. 10 Response analysis(versed-sine base excitation)

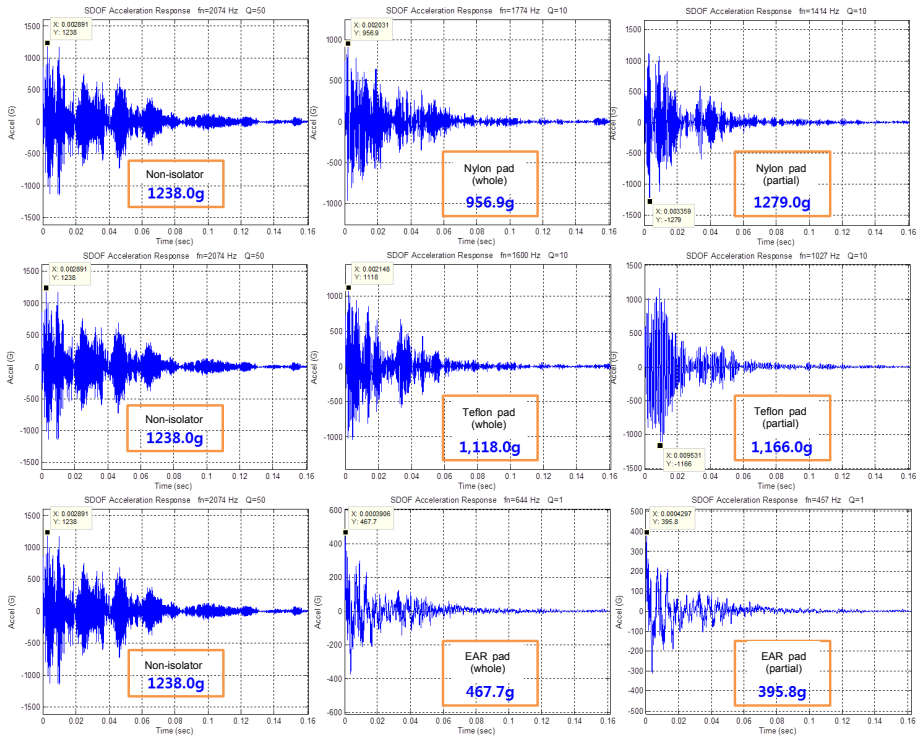


Fig. 11 Response analysis(arbitrary acceleration base excitation)

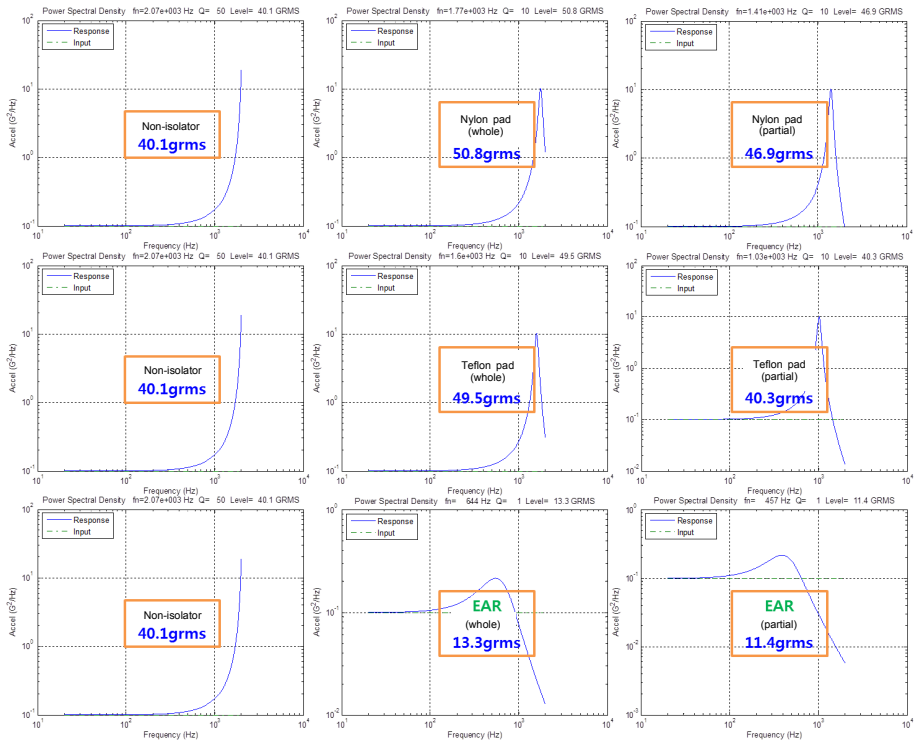


Fig. 12 Response analysis(random vibration base excitation)

Table 4 Response for dynamic loads

	Versed-sine [g]	Arbitrary acceleration [g]	Random vibration [grms]
Non-isolator pad	150.1	1,238.0	40.1
Nylon pad (partial)	150.3	1279.0	46.9
Nylon pad (whole)	150.0	956.9	50.8
Teflon pad (partial)	150.5	1,166.0	40.3
Teflon pad (whole)	150.0	1,118.0	49.5
EAR pad (partial)	151.5	395.8	11.4
EAR pad (whole)	153.0	467.7	13.3

효과는 거의 없는 것으로 분석되었으며, arbitrary acceleration 바닥 가진에 대해서는 재질 별 및 형상 별로 큰 효과가 있는 것으로 분석되었다. 또한, 불규칙 진동에 대한 응답 분석 결과 감쇠비가 큰 EAR 재질 적용 시 절연 효과가 크게 분석되었다.

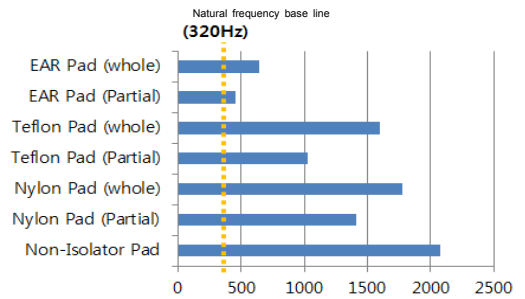


Fig. 13 Natural frequency of system

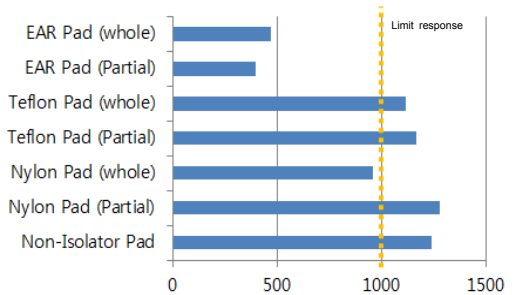


Fig. 14 Response for arbitrary acceleration base excitation

Figs. 10, 11, 12는 각 형상 별 versed-sine 바닥 가진 응답 분석 결과, arbitrary acceleration 바닥 가진 응답 분석 결과, 불규칙 진동 바닥 가진 응답 분석 결과를 나타낸다. 각 분석 결과는 Table 4와 같다. 현상에 대한 분석 결과, versed-sine의 가진의 경우에는 시스템 주파수가 단일 가진 주파수 45.5 Hz(11 ms) 보다 큰 경우로 절연의 효과가 없음을 알 수 있다.

또한, arbitrary acceleration가진과 random vibration가진인 경우에는 가진주파수가 광대역으로 분포되어 있기 때문에 시스템 주파수 이상의 가진력은 감쇠되는 것으로 분석되었으며, 감쇠비가 큰 적용 시 더욱 큰 절연 효과를 기대할 수 있다.

3. 결 론

이 연구를 통해 발사체에 탑재되는 전자부품의 내충격(저주파 대역, 고주파 대역) 설계 방법을 도출할 수 있었다.

저주파 대역 충격 하중에 대해서는 CCA 최적 고유 진동수 기법을 통해 구조건전성을 확보 하였으며, 고주파 대역 충격 하중에 대해서는 절연 패드를 활용한 충격 저감 장치 적용으로 구조건전성을 확보할 수 있었다. Fig. 13은 각 형상 별 고유진동수를 나타내며, Fig. 14는 각 형상 별 가진 응답을 나타낸다. EAR 진동 저감 장치 적용의 경우에는 전체 적용 보다는 부분 적용이 더욱 효과도가 높음을 확인할 수 있었다.

References

(1) Park, J. C., Jeon, Y. D., Jung, W. S., Park, J. J., Cho, K. R., 2006, Simulated Pyroshock Tests of Equipments for KSLV-I Upper Stage, The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences Fall Conference, pp. 815~818.
 (2) Woo, S. H., Kim, H. B., Moon, S. M., Kim, Y. K. and Kim, K. S., 2006, Shock Separation Test of KOMPSAT-2, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 1000~1005.
 (3) Steinberg, D. S., 2000, Vibration Analysis for Electronic Equipment, John Wiley & Sons Inc., 3rd

Edition.

(4) Wijker, J., 2004, Mechanical Vibrations in Spacecraft Design, Springer, pp. 149~200.

(5) NASA-STD-7003, 1999, Pyroshock Test Criteria.



Jong-Hak Lee is a research engineer at Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1. He received his the degree of master from Yonsei University. His research interests are shock/vibration and dynamics.



Dong-Seok Kang is a research engineer at Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1.



Ji-Ho Choi is a research engineer at Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1.



Young-Sik Kang is a research engineer at Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1.



Chang-Min Lee is a research engineer at Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1.