韓國精密工學會 2003 年度 春季學術大會論文集

발사환경에 대한 인공위성 전장품의 구조진동 해석

박태원*(아주대 기계공학과), 정일호**, 한상원**(아주대 기계공학과대학원),
김성훈***(한국항공우주연구원)

Structural Vibration Analysis of Electronic Equipment for Satellite under Launch Environments

T. W. Park(Mech. Eng. Dept. Ajou), I. H. Jung, S, W, Han(Grad, Mech. Eng. Ajou), S, H, Kim(KARI)

ABSTRACT

The impulse between launch vehicle and atmosphere can generate a lot of noise and vibration during the process of launching a satellite. Structurally, electronic equipment (KOMPSAT 2 , RDU : Remote Drive Unit) of a satellite consists of aluminum case containing PCB (Printed circuit boards). Each PCB has resistors and IC (Integrated circuits). Noise and vibration of wide frequency band are transferred to the inside of fairing, subsequently creating vibration of the electronic equipment of the satellite. In this situation, random vibration can cause malfunctioning of the electronic equipment of the device. Furthermore, when the frequency of random vibration meets with natural frequency of PCB, fatigue fracture may occur in the part of solder joint. The launching environment, thus, needs to be carefully considered when designing the electronic equipment of a satellite.

In general, the safety of the electronic equipment is supposed to be related to the natural frequency, shapes of mode and dynamic deflection of PCB in the electronic equipment. Structural vibration analysis of PCB and its electronic components can be performed using either FEM(Finite Element Method) or vibration test. In this study, the natural frequency and dynamic deflection of PCB are measured by FEM, and the safety of the electronic components of PCB is being evaluated according to the results.

This study presents a unique method for finite element modeling and analysis of PCB and its electronic components. The results of FEA are verified by vibration test. The method proposed herein may be applicable to various designs from the electronic equipments of a satellite to home electronics.

Key Words : Printed Circuit Boards (인쇄회로기판), Random Vibration (랜덤진동), FEA (유한요소해석), Satellite (인공위성), Electronic Component(전기소자)

1. 서론

위성은 발사과정에서 발사체와 대기의 충돌에 의해 발생하는 소음 및 진동에 의해 매우 열악한 환경에 놓이게 된다. 이때 발생하는 소음과 진동은 발사체 내부로 전달되어 위성 및 내부 전장품을 가진한다. 소음 및 진동에 의한 가진은 전장품 내부의 PCB(Printed circuit boards) 및 전기소자에 영향을 미쳐, 전장품의 기능저하 및 파괴를 유발할 수 있다.

구조적으로 위성 전장품은 박스형태이며, 내부에 여러 장의 PCB가 부착되어있다. PCB에는 여러 개의 전기소자가 납접에 의해 부착되어 있어서, 발사과정 중 발생하는 랜덤진동은 전기소자에 전달되게 된다. 따라서 랜덤진동에 의한 PCB의 가진은 전기소자의 피로파괴를 유발할 수 있으며, 특히 랜덤진동이 PCB의 고유진동수와 일치할 경우, 전기소자 납접부분의 피로 파괴를 유발한다. 따라서 위성 전장품의 설계 및 제작과정에서는 발사환경이 전장품에 미치는 영향에 대한 안정성 평가가 이루어져야 한다.[4]

일반적으로 전기소자의 안정성은 PCB의 고유진동수와 모드형상 및 동적처짐량에 관련된다고 알려져 있다.[2] 따라서 본 연구에서는 위성 전장품 중 하

나인 RDU(Remote Drive Unit)를 모델로 하여, 내부 Frame에 고정된 PCB를 1차시스템으로 모사하고, 동적처짐량과 고유진동수 사이의 관계에 대한 이론식을 구성하는 것과 동시에, PCB와 전기소자에 대한 유한요소모델링 방법에 대해 연구를 진행하였다. 또한 PCB에 대한 고유진동수 실험을 수행하였다. 실험결과와 유한요소해석 결과를 비교 분석하여 해석의 신뢰성을 검증함과 동시에 안정성을 평가하였다.

2. Electronic Component의 안전율분석

Electronic Component는 PCB에 납접으로 연결되어있어 진동에 의한 PCB의 처짐에 매우 취약하다. 이에 Electronic Component의 안정성 평가를 위해 PCB를 1차시스템으로 모사하였다. 1차시스템의 운동방정식은

$$mY'' + cY' + kY = P_0 \cos \omega t \tag{1}$$

와 같다. 1차 시스템에서 Input Force에 대한 Output Force의 관계는 다음과 같다.[3][1]

$$Q = \frac{F_0}{P_0} = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta \frac{\omega}{\omega_n})^2}{[(1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2)^2 + (2\zeta \frac{\omega}{\omega_n})^2]}} \tag{2}$$

계의 기반가속도에 대한 질량의 가속도응답스펙트럼은 식 (3)과 같이 System의 전달률 Q에 관련된다.

$$P_{out} = Q^2 P_{in} \tag{3}$$

식 (2)를 식 (3)에 대입하면

$$P_{out}(f) = \frac{1 + (2\zeta \frac{\omega}{\omega_n})^2}{[(1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2)^2 + (2\zeta \frac{\omega}{\omega_n})^2]} P_{in}(f) \tag{4}$$

와 같다. 여기에서 P는 입력과 응답의 PSD(Power Spectral Density)이다. System의 응답은 Random Vibration Input에 대한 Mass의 응답으로 얻을 수 있다. 일반적으로 Input PSD(P_{in})는 알려져 있다. System을 Lightly Damped System으로 생각하고, 식 (4)를 전 주파수 대역에 대해 적분하여 제곱근을 취해 Mass의 가속도 응답에 대한 RMS 값을 구하면

$$G_{out}^2 = \frac{2\pi f_n P_{in}}{8\zeta} \qquad \leftarrow Q = \frac{1}{2\zeta},\ Q \cong \sqrt{f_n}$$

$$G_{out-rms} = \sqrt{\frac{\pi}{2} f_n P_{in} Q} = = \sqrt{\frac{\pi}{2} f_n^{\frac{3}{2}} P_{in}} \tag{5}$$

와 같이 Random Vibration Input에 대한 1차시스템의 응답을 구할 수 있다. 식 (5)에서의 Q값은 많은 실험으로부터 얻어진 근사식이다.[2] 식 (5)로부터 통계학적 신뢰도 99.7% Level을 갖는 응답의 최대가속도는

$$G_{out-max} = 3 G_{out} \cong \sqrt{\frac{\pi}{2} f_n^{\frac{3}{2}} P_{in}} \tag{6}$$

이다. 식(6)에서 구한 최대 가속도 값으로부터 기판의 최대 처짐은 가속도와 Displacement의 관계식에서 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_{max} = \frac{9.8\, G_{out-max}}{f_n^2} \tag{7}$$

위의 식(7)에서 구한 최대 처짐은 System의 최대 가속도 응답에 대한 PCB의 최대처짐량이다. PCB의 형상에 대한 요소들을 감안한 최대허용처짐량은 일반적으로 다음의 실험식을 이용한다.[2]

$$\delta_{allow} = \frac{0.00022 B}{C \cdot h \cdot R \cdot \sqrt{L}} (in) \tag{8}$$

B = 전기소자에 평행한 PCB edge 길이
L = 전기소자의 길이
h = PCB의 두께
c = 소자의 Type에 따라 달라지는 상수

=1.00	standard Dual In-line Package
	Pin grid array with perimeter wires
	Leaded chip carrier
=1.26	Side-brazed Dual In-line Package
=2.25	Leadless Ceramic Chip Carrier

R = Relative position factor for component

여기서 R은 다음의 식(9)로부터 구할 수 있다.

$$Z = Z_0 \sin \frac{\pi X}{a} \sin \frac{\pi Y}{b} \tag{9}$$

여기에서 a와 b는 PCB의 길이와 폭이고, X와 Y는 a와 b에 대해 Component 위치에 대한 비율이며 Z_0는 PCB의 초기 처짐이다. 식(8)과 (9)를 이용해 구한 최대허용처짐량과 식(7)에서 구한 최대처짐량 및 우주환경에 적용되는 일반적인 안전계수 1.4를 이용하여 PCB의 안전율을 구하면 다음과 같다.

$$Margin\ of\ safety = \frac{\delta_{allow}}{1.4 \times \delta_{max}} - 1 \geq 0 \quad (10)$$

식 (10)은 안전율이 0보다 큰 경우에 안전함을 뜻한다.[2]

3. PCB 유한요소해석 및 Vibration Test

앞의 2장에서 거론한 PCB의 최대처짐량을 구하기 위해 단일 PCB에 대한 유한요소해석 및 진동 Test를 실시하였다. 유한요소해석 및 진동 Test를 통해 PCB 고유진동수를 구하였다.

3.1 PCB 유한요소해석

본 연구에 모델이 된 RDU는 내부에 13장의 PCB가 내장되어있다. 각각의 PCB는 Spacer로 연결되어 있다. Spacer는 Frame에 의해 지지되며, Frame은 Outer Box에 고정되어있다. 유한요소모델은 Spacer와 PCB만을 모델링 했으며, 모델링은 2가지 방향으로 이루어졌다. Model 1은 PCB와 Spacer만을 모델링하고, 부착된 Component는 모델링 하지 않았다. 이 경우 Component는 보드의 질량에 포함하여 PCB의 밀도에 반영하는 방법으로 적용하였다. Model 2는 Model 1에 Component를 추가한 것이다. PCB에는 많은 전기소자와 반도체가 부착되어 있다. 그 중에서 PCB의 고유진동수와 Mode Shape에 영향을 줄만한 것을 선정하여 모델링 하였으며, 포함되지 않은 소자들은 Model 1과 같이 PCB의 밀도에 반영하였다.

Table 1. PCB material properties

size(길이×폭×두께)	189×82.3×1.6(mm)
PCB material properties (Polyimide-Glass)	탄성계수 = 17926(N/mm^2)
	프아송비 = 0.17
	밀도:3.1E-9($N\text{-}sec^2/mm^1$)
Spacer material properties (Alumium 6061)	탄성계수 = 68258(N/mm^2)
	프아송비 = 0.33
	밀도:2.7E-9($N\text{-}sec^2/mm^1$)
Component material properties Seramic	탄성계수 = 2.8E5(N/mm^2)
	프아송비 = 0.23
	밀도:3.6E-9($N\text{-}sec^2/mm^1$)
Node	3466개
Element	1700개

Model 1에 대한 FE Model은 Fig 1과 같다. Model 1에 대한 Material Properties는 위의 Table 1과 같고, 다만 PCB에 component가 포함되지 않았으므로, component의 질량을 PCB의 질량에 반영하여 부피로 나눠 밀도를 다시 계산하였다. 첫 번째 모델의 밀도는 4.457E-9($N\text{-}sec^2/mm^1$)이다.

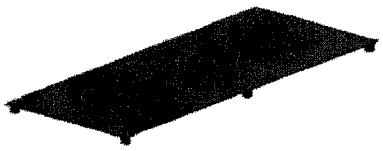

Fig 1. Model 1 - 3D Mesh

위의 Fig 1에 대한 유한요소 해석결과는 아래의 Fig 2와 같다. 해석은 NASTRAN 70.7을 이용하였다. 유한요소 해석결과 Fig 2의 1st mode는 566.83Hz를 얻었다.

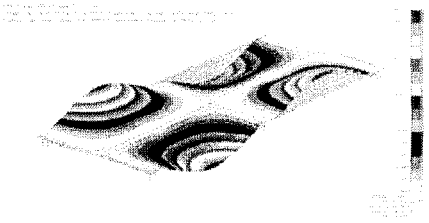

Fig 2. Model 1 - 1st mode : 566.83Hz

두 번째 모델에 대한 FE Model은 아래의 그림 Fig 3와 같고, 해석결과는 Fig 4와 같다. component를 추가한 결과 PCB의 1st mode는 첫 번째 모델보다 약 200Hz 이상 높은 772.12Hz의 해석 값을 얻었다.

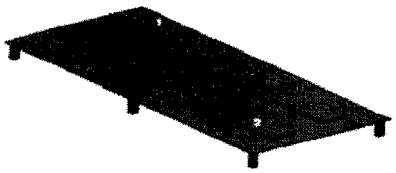

Fig 3. PCB and Component(Model 2)- 3D Mesh

Fig 4. Model 2 - 1st mode : 772.12Hz

위의 유한요소해석 결과를 비교해 보면 Component의 유무에 따라 PCB의 고유진동수 및 mode shape에 차이가 있음을 알 수 있다. 현재 Component의 모델은 PCB에 Node를 공유하는 형식으로 모델링 하였다. 아직 PCB와 Component를 연결하는 Lead Wire에 대한 모델링은 이루어지지 않았다. 이 부분은 PCB의 진동특성을 보는 유한요소의 크기와 Lead Wire에서의 요소 크기가 현저하게 차이를 보이므로 해석상 수치적으로 많은 문제점을 발생시키기 때문이다. 따라서 이에 대한 해결 방안으로 현재 Lead Wire 부분을 스프링 요소와 같은 것으로 간략화 하여 모델링 하는 방법을 모색 중이다.[5]

3.2 PCB Vibration Test

Vibration Test는 아래의 Fig 5의 개념도에 보는바와 같은 구성으로 이루어졌다.

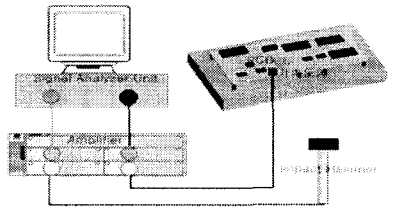

Fig 5. Vibration Test set

PCB는 별도로 제작된 치구에 고정하였다. 실제 PCB는 Aluminum으로 된 Spacer와 Frame에 의해 Outer Box에 고정된다. Fig 5에서 보는 치구는 이것을 모사한 것이다. Test 결과는 아래의 Fig 6과 같다.

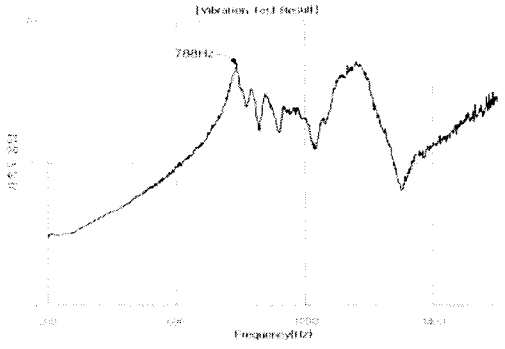

Fig 6. Vibration Test - 1st Mode : 788Hz

Test 결과에서 PCB의 1st Mode가 788Hz로 3.1의 Model 2의 결과와 매우 유사한 값을 얻을 수 있었다. 따라서 유한요소모델에서 component를 모델에 포함시키는 것이 유효한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

3.3 Component의 안전율

Fig 2의 2번 Component에 대해 안전율을 구해보면 다음과 같다. 유한요소 해석으로 구한 고유진동수 772.12Hz과 Input PSD $0.16G^2/HZ$를 이용하여 PCB의 최대처짐량을 구하였다. PCB의 허용처짐량은 Table 1에서의 PCB Size와 component의 길이 35.5mm, 그리고 c = 1.00과 r = 0.27을 식 (8)에 대입하여 구한다.[2][4] PCB의 최대처짐량과 허용처짐량을 식 (10)에 대입하여 구할 수 있다. 결과는 아래와 같으며, 안전율이 0보다 크므로 안전한 것으로 평가된다.

1st frequency	δ_{max}(mm)	δ_{allow}(mm)	안전율
772.12Hz	0.0036	0.0814	15.15

4. 결론

지금까지 PCB를 간단한 1차시스템으로 모사하고, 고유진동수와 동적처짐량을 이용하여 Component의 안전율을 계산함으로서 안정성 평가를 할 수 있음을 보였다. 또한 PCB의 정확한 고유진동수를 유한요소해석으로 구하기 위해서는 Component를 유한요소모델에 포함시키는 것이 타당함을 확인하였다.

따라서 보다 신뢰성 있게 PCB의 안정성을 평가하기 위해서는 Component의 정확한 모델링 방법에 대한 연구가 필요하다. 특히 Lead Wire를 모델에 포함시키는 방안에 대한 연구가 가장 시급하다. 또한 본 연구에서는 한 장의 PCB에 대해서만 연구를 진행하였지만, 전체 PCB와 Spacer, Frame, Outer Box를 포함한 System 전체를 해석하여 각각의 부품간의 상관관계의 영향에 대한 평가도 필요하다.

참고문헌

1. Lonard Meirovitch, Elements of vibration analysis Internation Edition, McGRAW - HILL Book Company, 1986
2. Dave S. Steinberg, Vibration analysis for electronic equipment, Jonh Wiley & Sons inc, 2000
3. Leonard Meirovitch, Analytical Methods in vibrations, The Macmillan Company, 1967
4. 김홍배, 서현석, "발사 시 야기되는 랜덤진동을 고려한 위성체 전장품 설계 및 검증에 대한 연구", 한국소음진동공학회지, 제 10권, 제 6호, pp.971~976, 2000
5. K. J Kim, Estimation of operational strain from vibration measurement: An application to lead wire of chips on printed circuit boards, Journal of sound and vibration, 210(5), 567-579, 1998