

## KSLV-I 하이드라진 추력기 제어기의 진동 해석 및 검증 시험

김지훈\*, 정호락\*\*, 전상운\*\*\*, 최형돈\*\*\*\*

### The Vibration Analysis and Verification Test of Hydrazine Thruster Control Unit for KSLV-I

Ji-Hun Kim\*, Ho-Lak Jung\*\*, Sang-Woon Jeon\*\*\*, Hyung-Don Choi\*\*\*\*

#### Abstract

Electronic components for space launch vehicles are exposed to a severe vibrational environment at launch and flight. The structural reliability of each component can be verified using mathematical approaches. In order to verify the structural reliability, an important parameter is the natural frequency of PCB(Printed Circuit Board) assembly mounted electronic components on and housing mounted PCB assembly in. In this paper, in order to find natural frequencies of PCB assemblies and the housing of hydrazine TCU(Thruster Control Unit), FEM(Finite Element Method) is adapted. The analytical result of FEM is verified by experimental method.

#### 초 록

우주발사체에 적용되는 전자부품들은 발사 및 비행 중 극심한 진동 환경에 노출이 된다. 각각의 부품들의 구조적인 신뢰성은 수학적인 접근 방법을 통해서 검증될 수 있다. 이를 위해서는 전자부품들이 장착되는 PCB(Printed Circuit Board) 조립체 및 PCB 조립체가 장착되는 하우징에 대한 고유주파수가 주요한 인자에 해당이 된다. 본 논문에서는 하이드라진 TCU(Thruster Control Unit)의 PCB 조립체와 하우징의 고유주파수들을 구하기 위해서 유한요소해석을 이용하였으며 이를 실험적인 방법을 통하여 검증하였다.

키워드 : 추력기 제어기(thruster control unit), 발사체(launch vehicle), 진동해석(vibration analysis), 진동시험(vibration test), 고유주파수(natural frequency)

\* 제어그룹/jihun@kari.re.kr

\*\* 제어그룹/hlj@kari.re.kr

\*\*\* 제어그룹/swjeon@kari.re.kr

\*\*\*\* 제어그룹/hdchoi@kari.re.kr

## 1. 서 론

우주 발사체에 탑재되는 전자 부품은 일반 상용으로 사용되는 전자 부품과는 달리 발사 시 유발되는 극심한 발사 진동환경에 노출되게 된다. 특히 이륙시와 천음속 비행시 공력의 작용 및 엔진의 연소에 의한 진동과 엔진 점화, 단분리에 의한 충격 등이 발생한다.[1][2]

발사체로부터 전달되는 진동하중의 경우 우주 발사체에 탑재되는 전자 부품에 대해 직접적인 영향을 주게 되고, 이로 인해 소자 및 부품단위의 파손을 유발하게 되고, 임무수행에 많은 문제를 초래하게 된다. Steinberg에 의해 진동 환경조건에 대한 전자부품의 영향에 대한 연구가 체계화 되었고, 진동 환경에 대한 SMT(Surface Mounted Technology) 및 소자와 기판간의 Inter-connection 파손 및 수명예측 등에 대한 연구가 많은 과학자들에 의해 진행되었다.[3][4]

수학적 모델의 확립은 극심한 진동환경에 대한 설계 안정성을 입증하는데 널리 사용되어진다. 특히 하우징, 기판, 그리고 부품 및 소자 단위의 파손 및 수명예측을 수행함으로써 주어진 임무수행에 대한 충분한 예측이 가능하게 된다. 설계적 관점에서의 해석모델은 실제 진동 가진을 이용한 시험을 통하여 설계/해석의 신뢰성 등을 검증하게 된다.

본 논문에서는 소형위성 발사체(KSLV-I)에 적용되는 TCU에 장착이 되는 전자소자의 구조적인 신뢰성을 예측하는 데에 중요한 인자인 PCB 조립체와 하우징의 고유주파수를 구하고 검증하는 방법을 보여주고 있다. 하우징 및 PCB 조립체에 대해 해석적 모델을 확립하고 해석적으로 고유주파수를 구하였다. 이 결과는 전자소자의 신뢰성을 수학적으로 예측하는 데에 사용된다. 해석적으로 구한 고유주파수를 시험적인 방법으로 검증하여 해석적 모델의 타당성과 제작된 TCU에 장착되어 있는 전자소자의 신뢰성을 확인하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 기계적 설계

본 논문의 TCU는 시제품으로 발사환경 시험 입증 모델로 개발되었고, 직육면체 구조의 하우징에 4장의 PCB 조립체와 파워 공급박스 및 각종 커넥터로 구성된다. 하우징의 경우 알루미늄을 기계가공 하여 제작하였다. 아래의 Fig. 1과 2는 TCU 및 PCB 조립체의 형상을 나타낸다.[5]

일체형 하우징에 윗면과 아랫면 커버로 구성 되어지고 각 커버는 일체형 하우징에 볼트를 이용하여 고정되게 된다. TCU를 우주 발사체 베이에 장착하기 위해서 8개의 Lug를 가지고 있으며 커넥터가 장착되는 면과 그 반대 면에 있는 Lug 2개는 강성을 증가시키기 위해서 설계하였으며 해석 및 시험을 통해 그 유용성을 검토하려고 한다.

PCB 조립체의 경우 CCA(Conduction Cooled Assembly)와 Wedge-lok을 이용하여 하우징에 장착이 되는 구조이다. CCA는 Rib를 가지고 있으며 이를 통해서 PCB 조립체의 강성을 증가시킨다. 이는 PCB 조립체의 고유주파수를 높여 PCB 조립체의 처짐량을 줄여서 장착되는 전자소자의 파손을 방지하는 역할을 수행한다.

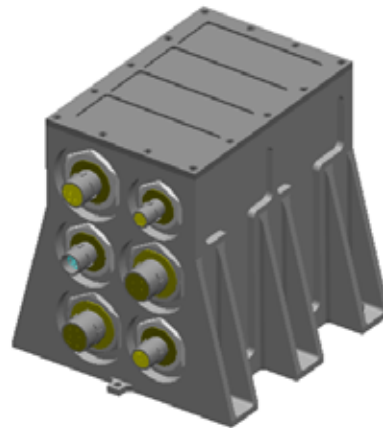


Fig. 1 Configuration of TCU

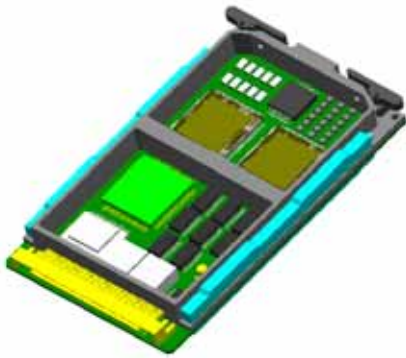


Fig. 2 PCB Mounting Configuration

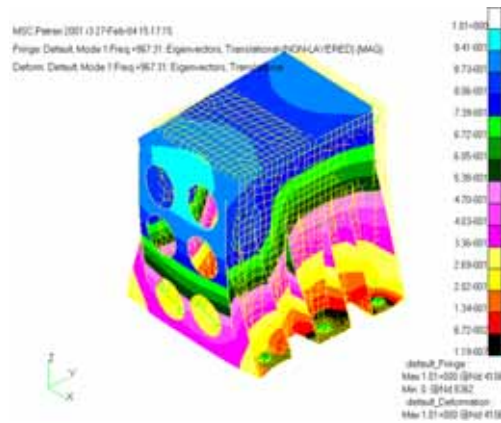


Fig. 3 TCU 1st Mode for Y axis(967 Hz)

## 2.2 진동해석

본 논문에서는 TCU 진동해석을 크게 두 가지 부분에 대해서 수행하였다. 첫째는 하우징 및 PCB 조립체, 커넥터 등의 종합적인 모델을 통해 하우징의 고유주파수를 구하였다. 이렇게 구한 하우징의 고유주파수 값은 PCB 조립체와의 공진을 피하기 위해서 Octave Rule에 따라 PCB 조립체의 고유주파수와 충분히 이격되도록 하우징 설계에 반영하였다. 즉, 하우징의 고유주파수가 PCB 조립체의 고유주파수의 2배가 되도록 충분한 강성을 가지도록 하우징을 설계하였다.

둘째로는 PCB 조립체를 구성하는 전자소자와 PCB의 Inter-connection 파손 가능성에 대한 분석을 위해서 PCB 조립체의 고유주파수를 구하였다. 구해진 고유주파수는 수학적 예측을 통한 기관의 처짐을 예측하여 소자의 장착에 대한 안정성을 평가하는 데에 사용하였다.

하우징의 유한요소해석을 위해서 하우징 및 하우징 커버 등은 2차원 요소를 이용하여 모델링하였고, 전면에 부착되는 커넥터는 강체연결을 이용한 집중질량으로 모델링 하였다. 내부의 파워공급 박스는 2차원 요소로 모델링 하였고 PCB의 경우 강체연결을 통한 집중질량으로 모델링 하였다.

Fig. 3과 4에 TCU 하우징에 대한 모드해석 결과를 보여주고 있다.

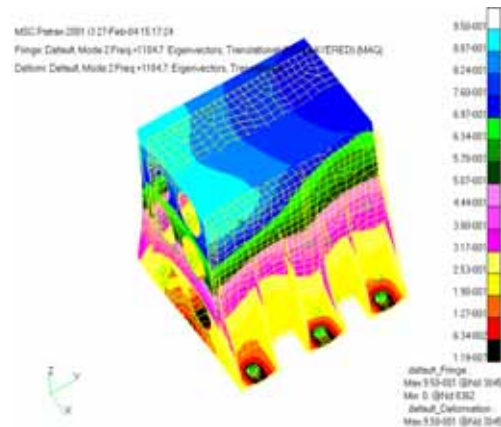


Fig. 4 TCU 2nd Mode for Z-axis(1105 Hz)

해석결과를 살펴보면 우선 측면방향 Y축에 대한 모드 특성이 1차모드로 나타났고, 고유주파수는 약 967 Hz이다. 2차 모드는 측면방향 Z축에 대하여 발생하였으며, 1105 Hz의 값을 갖는다.

Fig. 5는 TCU CPU 보드 조립체에 대한 모드 해석 결과를 보여주고 있다. 고유주파수는 472Hz였으며, 고정되지 않은 양끝단의 변형이 가장 컸으며, 추후 이부분에 대한 고정을 통해서 강성 증가의 효과를 얻을 수 있겠다. 또한 CCA의 프레임에 의해서 고정이 되는 부분의 변형이 상당히 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 결과는 다음 절에서 시험 값과 비교를 통해서 모델 비교 분석을 수행하였다.

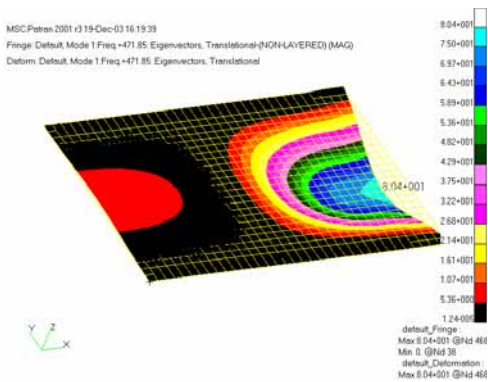


Fig 5. TCU CPU 보드 조립체(472Hz)

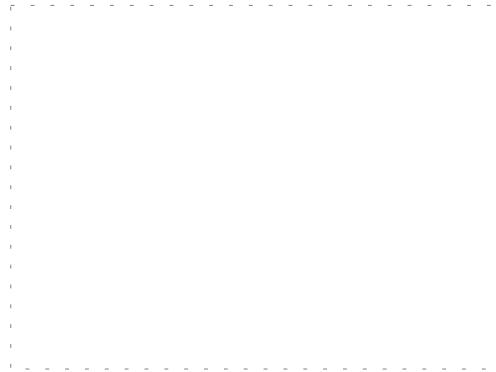


Fig. 6 CPU 보드 조립체

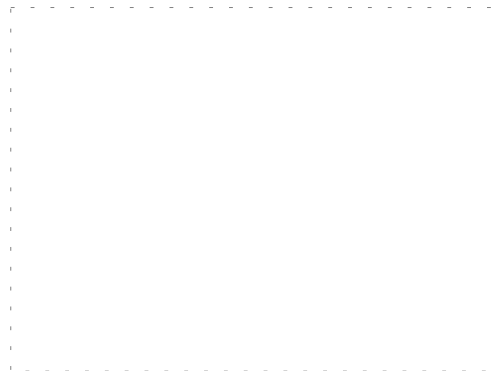


Fig. 7 아날로그 보드 조립체

### 2.3 검증시험

하우징 및 보드의 진동해석 결과를 확인하기 위해서 검증시험을 수행하였다. 검증 시험은 두 가지 항목에 대해서 수행이 되었다. 첫째, 하우징 및 각 보드의 고유주파수를 측정하였다. 이는 실제 하우징 및 PCB 조립체의 고유주파수를 측정하여 해석을 통해서 구해진 고유주파수와 비교하여 수학적 예측을 통해서 구해진 소자의 장착에 대한 신뢰성의 유효성을 검증하기 위함이다. 둘째, TCU Lug 6개, 8개 체결 시 각각의 고유주파수를 측정하였다. 이는 소자의 안정성 확보를 위해서 Lug의 체결 방법을 결정하기 위함이다.

시험은 전자소자에 큰 영향을 줄 수 있는 Z축과 Y축에 대해서 수행을 하였다. 이 중 Y축 방향이 전자소자가 장착되는 면과 수직으로 가장 큰 영향을 주는 방향이다. 각 보드 조립체와 하우징에 가속도계를 설치하였다. 각 보드 조립체에 가속도계를 장착할 경우 모드해석 시 고유치가 가장 큰 곳에 장착을 하여야 가속도 신호가 크게 나오므로 그곳에 장착하여야 한다. 하지만 대부분 전자소자가 장착이 되어있어서 장착이 불가능하다. 그러므로 가속도계가 장착이 가능한 곳에 고유치가 가장 큰 곳에 가속도계를 설치하였다. Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8은 가속도계가 장착된 CPU 보드 조립체, 아날로그 보드 조립체, 밸브 구동 보드 조립체를 보여주고 있다.

Fig. 8 밸브 구동 보드 조립체

각 보드에 가속도계를 장착한 후에 TCU를 재 조립하였다. Fig. 9는 가진기 위에 장착된 TCU를 보여주고 있다. 각 보드에 장착된 가속도계의 신호선을 빼기위해서 홀을 가지고 있는 커버를

재제작하였으며, 가진 방향에 대한 하우징의 고유주파수를 측정하기 위해서 가진방향의 하우징 상부에 가속도계를 장착하였다. 또한 가진력의 특성을 측정하기 위해서 TCU가 장착되는 Base Plate에 3축 가속도계를 장착하였다.

Fig. 9 TCU 장착 모습

Fig. 10은 Y축 가진 시의 CPU 보드 조립체에서의 주파수 응답특성을 보여주고 있다. 6개의 Lug를 체결했을 때 측정값을 보여주고 있다. 5G의 정현파 진동을 주었다. 930Hz 정도에서 피크가 나타났으며, 가속도값은 440 정도이다. 이 주파수는 하우징의 고유주파수로 추정된다. 500Hz 정도에서 미약한 2번째 피크가 나타난다. 이는 보드의 고유주파수로 추정된다. 보드 조립체의 고유주파수와 하우징의 고유주파수가 잘 분리된 것으로 판단되며, 보드 조립체의 주요 가진 성분은 보드 조립체의 고유주파수 보다는 하우징의 고유주파수에 해당이 된다.

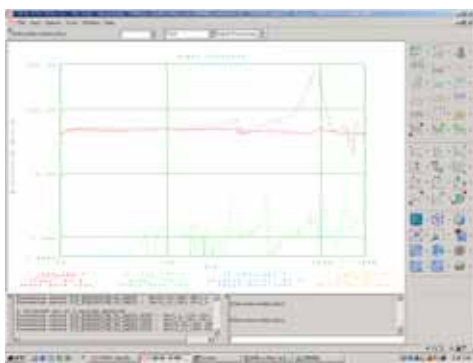


Fig. 10 Y축 주파수 응답 곡선 (6 Lug)

Table. 1은 시험한 결과를 정리한 것이다. Y축 가진 시 첫 번째 피크가 500Hz에서 두 번째 피크가 930Hz에서 발생하였다. Z축에 대해서는 1127 Hz에서 피크가 발생하였다.

Table. 1 Result of Verification Test

가진축	고유주파수	비고
Y	500 Hz	1st mode
Y	930 Hz	2nd mode
Z	1127 Hz	1st mode

Table. 2는 앞의 구조해석을 통해서 구한 CPU 보드 조립체와 하우징의 고유주파수와 실험을 통해서 구한 CPU 보드 조립체와 하우징의 고유주파수를 비교한 것이다. 각 항목에 대해서 28Hz, 37Hz, 22Hz의 오차가 존재하며 이는 허용범위 이내로 해석치를 통해서 검토한 전자소자의 신뢰성 평가가 타당함을 확인할 수 있다.

Table. 2 해석치와 실험치 고유주파수 비교

항목	해석치	실험치	오차
Y축 CPU 보드	472 Hz	500 Hz	28 Hz
Y축 하우징	967 Hz	930 Hz	37 Hz
Z축 하우징	1105 Hz	1127 Hz	22 Hz

Fig. 11은 Y축 가진 시의 CPU 보드 조립체에서의 주파수 응답특성을 보여주고 있다. 8개의 Lug를 체결한 것으로 5G의 정현파 진동을 주었을 때 측정값을 보여주고 있다. 1010Hz 정도에서 피크가 나타난다. 이 주파수는 하우징의 고유주파수로 추정된다. 500Hz 정도에서 미약한 2번째 피크가 나타난다. 이는 보드의 고유주파수로 추정된다. 8개의 Lug를 체결했을 때 6개의 Lug를 체결했을 때 보다 100Hz 정도 고유주파수의

증가를 확인할 수 있었으며, Octave Rule을 만족하고 있다. 즉, 8개의 Lug를 체결함으로써 해서 Y축 방향에 대해서 6개의 Lug를 체결한 것보다 전자소자에 대한 하우징에 의한 진동 영향을 줄일 수 있다.

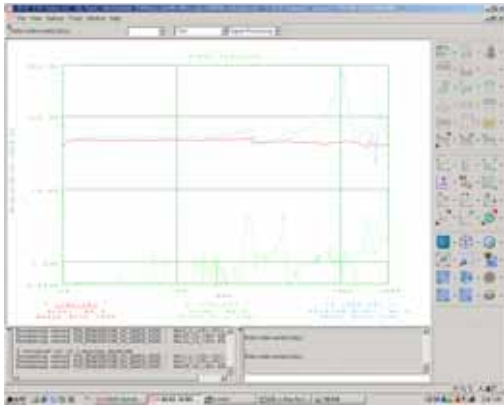


Fig. 11 Y축 주파수 응답 곡선 (8 Lug)

## 5. 결 론

발사체에서 유발되는 극심한 진동 환경에 전자 부품이 정상적인 동작을 하기 위해서는 하우징 및 기판에 대한 설계가 중요하다. 이를 위해 수학적 모델을 이용하여 설계 초기단계에서의 진동학적인 신뢰성 및 안정성을 예측하게 되고, 신뢰성과 안정성을 만족하도록 하우징 및 기판을 설계하게 된다.

본 논문에서는 소형위성 발사체(KSLV-I)에 적용되는 하이dra진 TCU의 PCB 조립체와 하우징의 고유주파수를 FEM을 이용한 해석적인 방법을 통해서 구하였다. 이는 전자소자의 구조적인 신뢰성 및 안정성을 예측하는 데에 중요한 인자이다. 이렇게 구해진 고유주파수는 PCB 조립체와 하우징 설계에 반영이 되었다.

해석적인 방법의 타당성을 검증하기 위해서 PCB 조립체와 하우징에 가속도계를 장착하고 정현파 진동을 가진하여 PCB 조립체와 하우징의

고유주파수를 실험적으로 구하였다. 실험적으로 구한 고유주파수를 해석적으로 구한 고유주파수와 비교했을 때 해석적으로 구한 고유주파수는 오차가 37Hz 이내로 허용범위 이내에 존재했다. 즉, 해석적인 방법으로 구한 고유주파수에 의해서 설계된 하우징과 PCB 조립체에 장착된 전자소자의 예측된 신뢰성과 안정성을 실험적으로 확인하였다.

또한 Y축에 대한 강성 증가를 위해서 Y축 면에 2개의 Lug를 추가로 장착하고 이의 영향을 확인하였다. 6개의 Lug와 비교했을 때 약 100Hz의 고유주파수가 증가함을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. 김지훈, 전상운, 정호락, 최형돈, "KSR-III 탑재부 자세제어 시스템 환경시험", 한국항공우주학회 2002년도 추계 학술 발표회 논문집.
2. 황승현 외 6인, "KSR-III 환경시험 규격", KARI-DIG-TM-2003-001, 한국항공우주연구원, 2003.
3. Steinberg, D. S., *Vibration Analysis for Electronic Equipment*, John Wiley & Sons, 2nd Ed., New York, 1988.
4. Pitarresi, J. M. and A. Akanda, "Random Vibration Response of a Surface Mount Lead/Solder Joint", *ASME EEP*, Vol. 4-1, *Advances in Electronic Packaging*, 1993, pp 207-214.
5. 김지훈, 전상운, 정호락, 최형돈, "KSLV-I 추력기 구동기 및 점검시스템 설계", 한국항공우주학회 2003년도 추계 학술 발표회 논문집.