

# 인공위성발사체 상단부 진동환경시험을 위한 치구설계

## Vibration Fixture design for small satellite launch vehicle environment test

정호경† · 서상현\* · 박순홍\* · 장영순\* · 이영무\*\*

Ho-Kyeong Jeong, Sang-Hyun Seo, Soon-Hong Park, Young-Soon Jang  
and Yeung-Moo Yi

**Key Words** : fixture(치구), vibration(진동), launch vehicle(발사체), satellite(위성), environment test(환경시험), analysis(해석)

### ABSTRACT

Satellite launch vehicle is exposed to some dynamic environment during its flight. Particularly, the safety of launch vehicle structure is surely verified under vibration environment in low frequency range. Sine sweep test is generally performed to describe this low frequency vibration environment. Dynamic property of vibration fixture is considered to get the correct property of target object. This vibration fixture should really be an extension of the armature in the form of a very rigid structure that can transfer the required force at the required frequency. An optimum fixture would have its lower natural frequency about 50% higher than the highest required forcing frequency in order to avoid fixture resonances during the test. In this study, the vibration mode analysis considering the mass of target object to design the vibration fixture. And the modal test of vibration fixture is performed to conform the design.

### 1. 서론

인공위성 발사체에는 비행 중 여러 가지 동적환경에 노출된다. 엔진부의 터보펌프, gust등의 공력하중에 기인한 100Hz이하의 저주파수 대역인 정현파진동, 엔진부의 초음속 제트에 의한 음향 하중으로 주로 발생하는 2000Hz이하의 중, 고주파수 대역인 랜덤 진동, 그리고 페어링 분리, 단 분리시 화약의 폭발에 의해 발생하는 고주파수 대역의 파이로 충격이 대표적이다. 이와 같은 환경 하에서 성공적으로 임무를 수행하기 위해서는 지상에서 미리 동적 환경을 모사하여 시험을 수행하고 전장품 구조체에 대한 검증이 수행하여야 한다.

특히 발사체 구조체의 경우에는 저주파 진동 환경에서 상단 구조체의 안전성 검증이 필수적이다 이와 같은 저주파 진동 환경은 발사체의 주 엔진 점화 및 연소 종료 페어링

분리 등의 이벤트 등에 의해 발사체의 고유, 모드가 가진되어 발생하며, 정현파 소인 진동(sine sweep) 시험을 통해 구현하는 것이 일반적이다.

발사체 및 위성체의 지상 시험은 최대한 실제 환경과 유사한 환경에서 시험을 수행하는 것을 원칙으로 한다. 정확한 동특성 시험을 위해서는 가진기와 가진 대상을 연결하는 치구의 동특성도 중요한 고려 대상이며, 원칙적으로 치구의 고유 모드가 진동환경시험 주파수 범위 내에서 대상물 모드에 영향을 주어서는 안 된다. 발사체와 같은 대형 구조물의 진동시험의 경우 진동 시험 치구의 고유 진동수 또한 저주파에서 발생하는 경우가 많아, 시험 치구 자체의 고유모드가 정확한 시험을 방해하는 요소로 작용한다.

본 연구에서는 소형위성 발사체 상단 구조체의 저주파 진동 환경에 대해서 간략히 소개 하며, 상기와 같은 정현파 진동 규격으로부터 시험영역을 고려한 치구 설계를 수행하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 상단부 진동 환경 시험

##### (1) 진동 환경 시험 규격

소형 위성 발사체의 상단부 진동환경시험은 구조체의 진

† 한국항공우주연구원 구조그룹  
E-mail : hkjeong@kari.re.kr  
Tel: (042)800-2333, Fax: (042) 800-2233

\* 한국항공우주연구원 구조그룹  
한국항공우주연구원  
우주발사체 기술실

\*\*

동 하중에 대한 강도검증 및 상단 구조체 및 탑재물의 진동 환경 검증에 그 목적이 있다. 또한 시험을 통해 탑재물 컴포넌트 진동 환경시험 규격의 적합성 및 KMS 하부 탑재물의 상대 변위 역시 평가할 수 있다.

소형 위성 발사체의 상단 구조체의 저주파 진동환경은 단분리면에서의 진동레벨로 정의된다. 표 1은 단분리면 정현파 진동 규격이며, 이를 바탕으로 진동 환경 시험 치구 설계를 수행 하였다.

표 1 단분리면의 정현파 진동 환경

Frequency range, Hz	Vibration acceleration, G	
	X	Y , Z
5 to 100	1.0	0.85

## (2) 시험 대상 및 방법

상단부 진동 환경시험 시 사용된 모델은 상단 구조 개발 모델을 사용하였으며, 위성의 경우 실물형 위성을 사용할 수 없기 때문에 SC simulator를 이용한다. 또한 KM의 경우에 실물형 모델을 사용할 경우, 표 1의 주파수 조건으로 가진 할 수 없기 때문에 mass simulator를 사용하였다. 각 탑재물들 역시 등가의 질량으로 묘사한 mass simulator를 이용한다. 그림 1에 진동환경시험 대상인 상단부를 나타내었다.

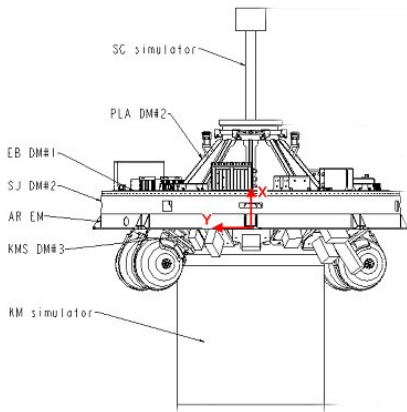


그림 1 진동 환경 시험 대상

## 2.2 진동 환경 시험 치구 설계

### (1) 설계 요구 조건

○ 1차 고유진동수(lower natural frequency) > 150Hz  
적절한 진동 시험치구는 가진 시험 중 치구와의 공진을 피하여야 하며, 일반적으로 1차 고유진동수(lower natural frequency)가 요구되는 최대 가진 주파수(highest required forcing frequency)의 50%이상 높아야 한다. 상단부 진동환경시험 치구의 가진 주파수는 100Hz 이므로 요구되는 1차 고유진동수는 150Hz 이상이 되어야 한다.

○ 무게 및 체결 조건

치구 및 상단부의 무게는 가진 레벨의 중요한 기준이 된다. 시험대상인 상단부의 하중은 대략 2300kg으로서, 가진기에 큰 하중이 가해질 것으로 예상되므로, 원활한 가진 및 운용을 위해 최대한 가볍게 설계해야한다.

시험치구와 시험대상의 체결은 상단부의 AR(Adapter Ring)의 상단이, 시험치구와 가진기의 체결은 가진기 슬립테이블과 치구 하부 바닥면이 연결된다. 그러므로 시험치구를 슬립테이블에 먼저 체결한 후 상단부와 체결하여야 하므로, 이를 고려한 설계가 필요하다.

상단부 KM 지지부에 부착되는 탑재물들 및 KM mass simulator 의 전체 전장을 고려하여 진동 시험 시 발생할 수 있는 간섭을 회피하는 설계가 필요하다. 또한 시험 시 진동 data를 획득하기 위한 센서 케이블의 설치 통로가 필요하다.

### (2) 치구 설계

상기의 요구 조건 및 상단부의 기본 사양을 바탕으로 진동환경시험 치구를 그림 2 및 표 2와 같이 설계 하였다.

표 2. 진동 환경 시험 치구 기본 사양

설계 사양	
직경	2010mm
높이	1.25m(KM 실물형 적용 불가)
두께	45mm(외경: 2010, 내경: 1920)
소재	AL 6061
무게	1153 kg(실측 : 1074kg)
제작	주조

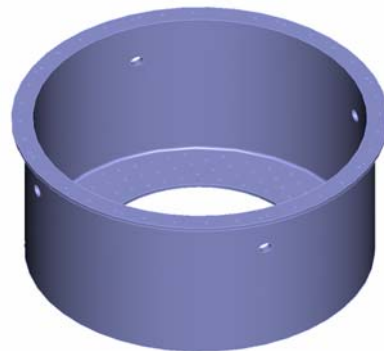


그림 2 진동 환경 시험 치구 형상

### 2.3 치구 모드 해석 및 모달시험

진동 환경시험 치구의 경우 가장 중요시 되는 설계 조건은 치구 자체의 주파수 요구 조건이다. 구조 하중의 경우 상단부 무게가 2300kg으로 치구가 충분히 견딜 수 있으나, 시험 시 가진 주파수와 치구의 공진 주파수가 일치 또는 근접한 상황이 발생할 경우 상단부의 진동 특성을 정확히 측정하기 어렵다. 상단부 진동환경시험 치구의 가진 주파수는

100Hz 이므로 요구되는 1차 고유진동수는 150Hz 이상이 되어야 한다.

표 3. 진동 환경 시험 2단부 기본 사양

설계 사양	
직경	2m 급
높이	약 2.6 m
무게	약 2300 kg
무게 중심	체결부로부터 약 -400mm

**(1) 2단 질량을 고려한 해석**

진동 환경 치구의 설계 시 해석은 상단의 질량을 고려한 해석을 수행하여야 한다. 진동환경시험에 사용될 상단부의 형상은 그림 1과 같으며, 사양을 표 3에 나타내었다.

해석시 Pre/Post는 MSC.Patran 으로 Solver로는 MSC.Nastran을 사용하였다. 진동 시험 치구 해석 모델을 그림 3에 나타내었는데, 상단을 집중질량으로 가정하여 무게 중심 위치에 배치시켰으며, AR과 치구의 체결조건을 묘사하기 위해 8군데를 MPC로 구속하였다. 가진기 슬립테이블과 치구 하부 바닥면이 체결되므로 치구 바닥의 X, Y, Z 를 구속하였다.

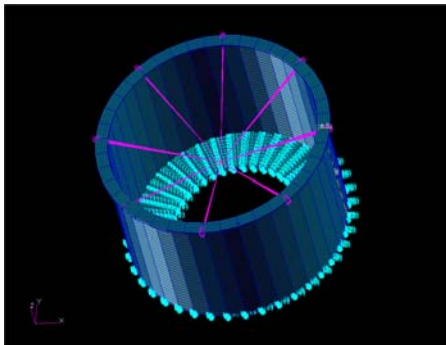
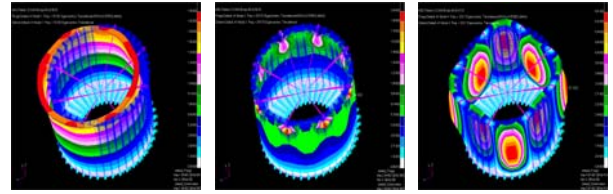


그림 3. 진동시험 치구 해석 모델(질량 고려)

표 4. 진동 시험 치구 모드 해석 결과

모드	주파수
1차	152.6 Hz
2차	284.8 Hz
3차	329.7 Hz
4차	360.5 Hz
5차	381.8 Hz
6차	416.2 Hz

진동시험 치구 모드 해석 결과를 표 4 및 그림 4에 나타내었다. 진동 시험 치구의 첫 번째 고유 모드는 전체 치구 밴딩 1차 모드로서 152.6Hz에 나타난다. 이 값은 치구의 1차 고유진동수 요구 조건인 150Hz 이상을 만족한다.



(a) 1차 모드 (b) 2차 모드 (c) 3차 모드  
그림 4 진동 시험 치구 모드 형상

**(2) 2단 질량을 고려하지 않은 해석**

치구의 제작 후 모달 시험을 통해 동특성을 파악하여 치구가 원하는 주파수 설계 사양대로 제작되었는지 여부를 판단할 필요가 있다.

진동 환경시험과 동일 한 조건으로 상단을 체결한 상태에서 모달 시험을 수행하여 치구의 특성을 파악할 수 있다면, 가장 좋은 방법이지만, 실제의 경우에는 상단의 진동 연성에 의해 치구 고유의 특성을 판별하기가 쉽지 않다. 그러므로 진동 시험 치구를 Free-Free 상태에서 해석 및 모달 시험을 수행하여 치구의 제작성 및 앞서의 상단 질량을 고려한 해석이 적합한지를 판단해야 한다.

해석시 Pre/Post는 MSC.Patran으로 Solver로는 MSC.Nastran을 사용하였다. 진동 시험 치구 해석 모델을 그림 5에 나타내었으며, 경계조건은 Free-Free 상태로 해석을 수행 하였다.

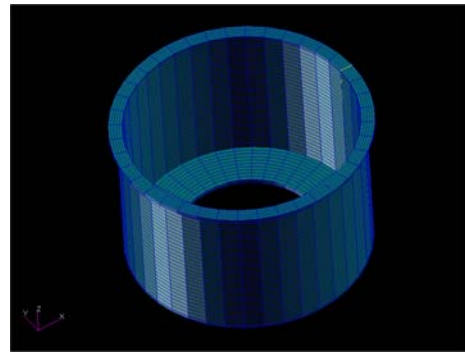


그림 5 진동시험 치구 해석 모델(상단부 질량 고려하지 않음)

표 5. 진동시험 치구 해석결과

모드	주파수
1차	46.6 Hz
2차	124.2 Hz
3차	195.8 Hz
4차	209.4 Hz
5차	223.6 Hz
6차	257.2 Hz
7차	269.2 Hz
8차	337.5 Hz

Free-Free 상태에서의 진동시험 치구 모드 해석 결과를 표 5에 나타내었다. 진동 시험 치구의 첫 번째 고유 모드가 46.6Hz의 낮은 주파수에서 나타났으며, 500Hz 까지 전체 밴딩 모드는 나타나지 않았다.

**(2) 환경시험 치구 모달시험 및 해석과 비교**

치구의 제작 후 모달 시험을 통해 동특성을 파악하여 치구가 원하는 주파수 설계 사양대로 제작되었는지 여부를 판단할 필요가 있다. 진동시험치구의 동특성 요구조건은 상단부 진동환경시험 가진 주파수는 100Hz 이므로, 치구의 1차 고유진동수(lower natural frequency)가 150Hz 이상이 되어야 한다. 일반적으로 진동치구의 1차 고유진동수(lower natural frequency)는 요구되는 최대 가진 주파수(highest required forcing frequency)의 50%이상 높아야하기 때문이다. 이 조건은 치구가 KSLV-I 2단부 및 가진기 슬립 테이블에 체결되어있을 경우의 요구조건이며, 앞서 진동치구의 설계시 이를 고려하여 모달 해석을 수행하여, 이 조건하에서 1차 고유진동수(lower natural frequency)가 150Hz 이상이 됨을 확인하였다.

진동 환경시험과 동일 한 조건으로 상단을 체결한 상태에서 모달 시험을 수행하여 치구의 특성을 파악할 수 있다면 가장 좋은 방법이지만 실제의 경우에는 상단의 진동 연성에 의해 치구 고유의 특성을 판별하기가 쉽지 않기 때문에, Free-Free 상태에서의 해석 및 모달 시험을 수행하여 설계의 타당성 및 제작성을 확인하고자 한다.

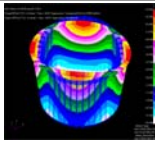
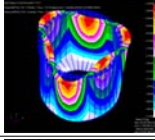
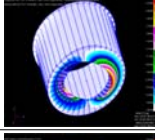
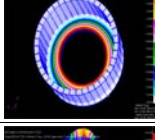
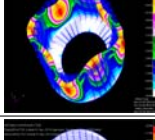
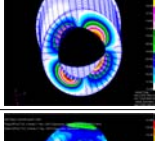
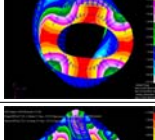
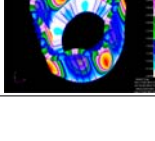
충격 망치(impact hammer)를 이용한 모달 시험을 수행하였다. 사용 센서로는 8개의 B&K 4507B004 가속도계를 사용하였고, 가진을 위해서는 PCB 충격 망치를 사용하였으며, 신호의 수집 및 분석을 위해서는 PULSE3560D 시스템을 사용하였다. 모달 테스트를 위한 경계 조건으로는 시편을 매어 달아서 자유 경계조건으로 하였다. 그림 6에 가진 및 측정 위치를 나타내었다.

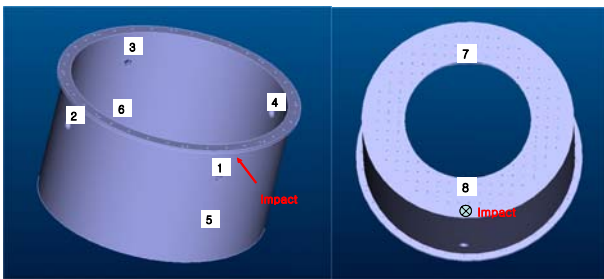
진동 환경 시험 치구의 고유 진동수 및 감쇠율(damping ratio)는 다음 표 6과 같다. 비교를 위해 모달 시험 결과와 함께 치구 설계 시 수행한 해석 결과를 같이 나타내었다.

표 6을 통해 진동 시험 치구 설계시 해석치와 모달 시험 결과가 잘 일치 하는 것을 알 수 있다. 전체적으로 시험시의 고유주파수가 해석보다 약간 높은 주파수에서 나타난다는 것을 알 수 있다.

상단부 무게를 고려한 해석 결과 1차 고유진동수가 152.6Hz에 나타나는데, 표 6의 모달 시험 및 해석의 비교 결과를 반영해 볼 때 실제 상황에서는 약간 더 높은 주파수에서 1차 모드가 나타나리라 예상되며, 위성발사체 상단 기체부 정현과 진동 시험 시 치구의 동특성에 의해 상단부가 영향을 받지 않을 것으로 판단된다.

표 6. 진동 시험 치구 모달 시험 결과

모드	시험 결과		Mode shape	해석치 (Hz)
	고유진동수 (Hz)	Damping ratio		
1st	49	3.43 %		46.6
2nd	128	1.57 %		124.2
3rd	196	1.02 %		195.8
4th	210	0.94 %		209.4
5th	226	0.92 %		223.6
6th	260	0.79 %		257.2
7th	276	0.98 %		269.2
8th	340	0.54 %		337.5



(a) 횡방향 가진 및 측정 위치 (b) 축방향 가진 및 측정 위치  
그림 6. 진동 시험 치구 모달 시험 센서위치

#### 4. 결론

발사체 상단부 진동 환경시험을 위한 진동 시험 치구를 주어진 요구조건 하에서 설계하였다.

진동 환경시험 치구 설계시 상단부 질량을 고려한 모드 해석 수행하였다. 모드 해석 결과 1차 고유 진동수가 152.6Hz로 주파수 설계 요구 조건인 150.0Hz이상을 만족하였다. 하지만, 실제 경계조건 및 기계적 물성의 차이로 인한 오차를 고려해 볼 경우 150Hz 이내에서 1차 고유진동수가 나타날 여지가 있으므로, Free-Free 경계조건 하에서 시험치구의 모드 해석을 수행하였다. 이후 진동 시험 치구를 Free-Free 상태에서 모달 시험을 수행하여 치구의 제작성 및 앞서의 상단 질량을 고려한 해석이 적합한지를 판단하였다. 시험 결과 위성발사체 상단 기체부 정현파 진동 시험 시 치구의 동특성에 의해 상단부가 영향을 받지 않을 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Dave S. Steinbery "VIBRATION ANALYSIS FOR ELECTRONIC EQUIPMENT" THIRD EDITION
- (2) SINGIRESU S. RAO " MECHANICAL VIBRATION" SECOND EDITION