

# 샌드위치 복합재료 탑재부 개발

박재성\*·정호경\*·서상현\*·이영무\*\*

## Development of composite sandwich equipment bay

Jaesung Park, Ho-Kyeong Jeong, Sang-Hyun S. and Yeong-Moo Yi

### Abstract

KSLV-I 2단 탑재대를 복합재료 샌드위치 구조물로 설계/제작하였다. 축소형 탑재대를 제작하여 진동 특성을 측정하고, 측정된 결과를 이용하여 실물형 탑재대를 설계하였다. 탑재물의 중량을 포함하여 1차 고유진동수가 150 Hz가 되도록 설계하였으며 실제 시제를 제작하여 동특성을 측정하였다.

**Key Words:** 복합재료 샌드위치 구조물, 탑재대, 고유진동수.

### 1. 서 론

복합재료 샌드위치 구조는 높은 비강성을 갖고, 비교적 다양한 형상을 일체로 성형하여 제작할 수 있기 때문에 항공우주구조물에 적합하다. 특히 높은 강성이 요구되는 경량 구조물을 샌드위치 심재의 전단강성과 두께를 증가시켜서 쉽게 구현할 수 있다.

2007년 발사를 목표로 개발되고 있는 KSLV-I의 2단부 탑재대에 복합재료 샌드위치 구조물을 적용할 예정이다. 기존의 KSR-III 발사체는 전자, 과학 탑재대를 알루미늄 소재로 제작하여 개발한 바 있다. 탑재물의 정상 작동을 위해서 탑재대에 요구되었던 1차 고유진동수가 비교적 높은 100~150Hz 범위였고, 탑재대의 경계조건은 원형

평판의 바깥쪽 끝단을 지지하는 형태였다. 초기 설계 후 시제품에 대한 시험결과 끝단의 경계조건이 단순지지 형태에 가까웠고, 그에 따라 높은 1차 고유진동수를 얻기 위하여 평판 아래에 보강대를 구성하는 구조로 변경한 바 있다. 구조변경에 의하여 중량이 증가하였으며 초기 설계 요구조건을 초과하였다. KSLV-I에 요구되는 중량 조건을 만족하기 위해서는 금속재료 평판보다는 복합재료 샌드위치 평판을 적용하는 것이 효과적이라는 판단을 하였다.

국외 타발사체에서 복합재료 샌드위치 평판을 탑재대로 사용하는 경우는 일본의 M-V 발사체와 아리안 발사체를 예로 들 수 있다. 발사체에 복합재료를 적용하는 범위가 점차 늘어나고 있는 것을 감안하면 향후 효율적인 발사체 개발을 위해서 탑재부에 복합재료 샌드위치 평판을 적용하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 KSLV-I에 적용될 복합재료 샌드위치 평판의 설계/개발 과정을 수록하였다. 현재 축소형 탑재대와 실물형 개발 시제를 제작하여 다양한 시험을 수행하고 있다.

\* 한국항공우주연구원 우주발사체 기술실 구조그룹

\*\* 한국항공우주연구원 우주발사체 기술실

## 2. 복합재료 샌드위치 탑재부 개발

### 2.1 설계 요구조건

새로 개발 중인 KSLV-I의 경우에는 탑재대의 형상이 그림 1과 같이 환형 평판이며 경계조건은 안쪽과 바깥쪽 끝단이 2단 구조물에 체결되는 형태이다. 바깥쪽 지름은 약 2000 mm이고, 안쪽 지름은 1000 mm 정도이다. 이번 탑재대의 경우에도 1차 고유진동수가 150Hz 이상으로 요구되었고, 초기 설계 중량은 27 kg 정도가 주어졌다. 탑재되는 탑재물의 총중량은 약 100 kg 정도이며, 고유진동수 해석에 탑재물의 중량을 고려해야 한다.

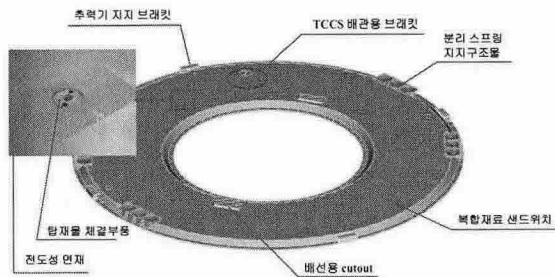


그림 1 KSLV-I 탑재부 형상

### 2.2 축소형 탑재대 제작/시험

복합재료 샌드위치 탑재대의 제작성과 진동특성을 파악하기 위하여 축소형 탑재대 시제를 제작하였다. 제작된 축소형 탑재대는 축소형 페어링 분리시험에 적용되어 탑재대에서의 분리 충격 측정에도 적용된다. 그림 2는 축소형 탑재대 시제의 제작 도면을 나타낸다. 외경은 1 m 급으로 제작하였으며 탑재가 가능한 공간은 최대폭 240 mm이다. 지지구조물과의 체결형태를 판단하기 위하여 바깥쪽은 복합재료 플랜지를 통해 체결할 수 있는 형태로 제작하였으며 안쪽은 샌드위치 구조물에 인서트를 삽입하여 체결하도록 제작하였다. 탑재 공간을 최대한 크게 하려면 인서트를 통한 체결방법이 유리하지만 체결 강도면에서는 복합재료 플랜지 형태보다 떨어진다. 향후 실물형 탑재대는 외부 구조물과의 간섭을 피하고 체결강도를 극대화하기 위하여 복합재료 플랜지 타입을 채택할 예정이다.

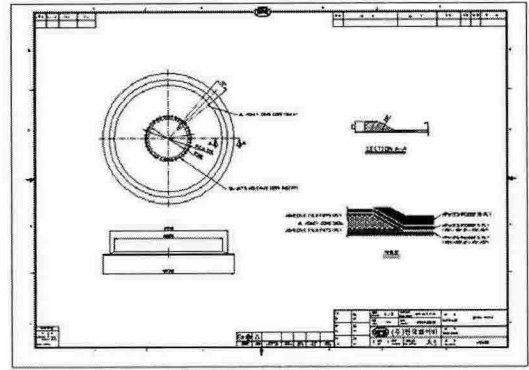


그림 2 축소형 탑재대 제작 도면

축소형 탑재의 진동 특성을 파악하기 위하여 진동시험을 수행하였으며 결과로부터 실물형 탑재대의 고유진동수를 예측해 보았다. 축소형 탑재대의 진동시험은 충격 망치(impact hammer)를 이용하는 모달 테스트 방식으로 수행하였다. 모달 테스트의 수행을 위해 다수의 B&K 4507B004 가속도계, KISTLER 9722A2000 충격 망치를 사용하였으며, 신호의 수집 및 분석을 위해서는 PULSE3560D 시스템을 사용하였다. 모달 테스트를 위한 경계 조건으로는 다음 그림과 같이 시편을 매어 달아서 자유 경계조건으로 하였다.

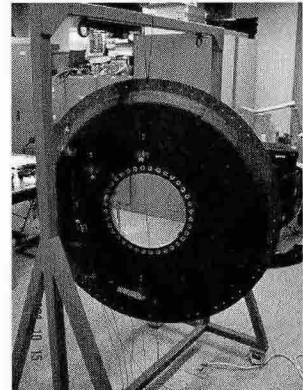


그림 3 축소형 시제 모달시험

시험시 가속도계는 축소형 탑재대 배이의 고유진동수를 측정하기 위해서 6개를 사용하였으며 위치는 그림 4와 같고, 모달 테스트를 수행하기 위해 충격 망치를 이용하여 가진하였다.

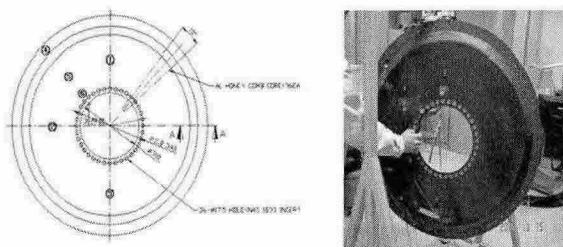


그림 4 축소형 시제 모달시험 센서 위치

축소형 탑재대 베이의 고유 진동수 및 감쇄율(damping ratio)은 표1 과 같다.

모드	고유 진동수 (예측)	고유 진동수 (시험)	오차 (%)	Damping ratio (시험)	모드 형상
1st	124 Hz	121 Hz	2.48%	5.65%	
2nd	264 Hz	218 Hz	21.1%	1.74%	
3rd	322 Hz	301 Hz	7.0%	1.3%	
4th	409 Hz	440 Hz	7.0%	1.58%	

표 1 축소형 탑재대 모달 시험 결과

시험과 예측된 고유진동수 값이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 오차가 큰 2차 모드의 경우는 탑재대 안쪽에 인서트를 삽입하기 위하여 수지를 포팅(potting)한 부분이 다른 부분에 비해서 밀도가 높기 때문이다. 해석에서는 탑재대 전체에 고르게 질량을 분포시켰기 때문에 실제 시제와는 차이가 발생하며 굽힘이 주요한 변형 형상인 2차 모드의 경우는 그 효과가 크게 나타나기 때문으로 판단된다. 향후 불균일한 밀도 분포를 고려하면 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다.

### 3. 실물형 탑재대 설계

#### 3.1 기본 설계

KSLV-1의 2단부 형상을 살펴보면 탑재대는 구조하중을 지지하는 주구조물이 아니기 때문에 탑재공간의 제공과 동특성 요구조건 등으로 설계된다. 탑재 공간은 환형 탑재대의 윗면만을 사용하여도 충분한 공간을 제공할 수 있을 것으로 판단되며 탑재물의 크기는 탑재대 최대폭에 맞추어 설계, 제작되어야 할 것이다. 동특성 요구조건은 탑재대의 1차 고유진동수가 150 Hz 이상으로 규정되어 있다. 고유진동수 조건은 탑재대의 크기와 탑재물 질량을 고려할 때 상당히 엄격한 규정이다. 최대한 비강성을 높이기 위하여 탄소섬유 복합재(HPW193/RS1222)와 강성이 가장 큰 알루미늄 허니컴 심재(CR-III 5056 hexagonal aluminum honeycomb)를 사용하였다. 탄소 섬유 복합재료는 섬유 130도 성형 재료이며 직조형태의 프리프레그 형태로 제공된다. 각 소재의 기계적인 물성은 표 2와 같다.

표 2 해석에 사용된 재료물성

	Face Carbon/Epoxy	Core CR-III 1/8-5056-0.002
$E_1, E_2$	61.8, 61.8 GPa	0.01, 0.01 MPa(가정)
$G_{12}, G_{13}, G_{23}$	4.250, 4.250, 3.0 GPa	0.01(가정), 986, 351.6 MPa
$\nu$	0.045	-
$\rho$ ( $g/mm^3$ )	$1.54 \times 10^{-3}$	$1.297 \times 10^{-4}$

요구조건으로부터 사이징된 환형 탑재대의 고유진동수를 예측해 보면 그림5와 같다. 1차 고유진동수가 130 Hz이지만 해석에 적용된 탑재물의 중량이 10% 정도 무겁고, 실물형 탑재대의 크기가 해석 모델에 비해서 조금 더 작기 때문에 실물형의 경우에는 150 Hz 근방에서 1차 고유진동수가 나타날 것으로 판단된다.

Mode	Natural Freq (Prediction)	Mode shape
1st	130 Hz	
2nd	131 Hz	
3rd	135 Hz	
4th	140 Hz	

Total mass : 118.7 kg (equipment = 103.7 kg)

그림 5 실물형 탑재대 고유진동수 예측

### 3.2 실물형 탑재대 제작/시험

설계된 실물형 탑재대의 제작 도면은 그림 6과 같다. 탑재물의 위치, 깃아웃 위치 등은 상세하게 반영하지 않은 개발시험용 시제 도면이다.

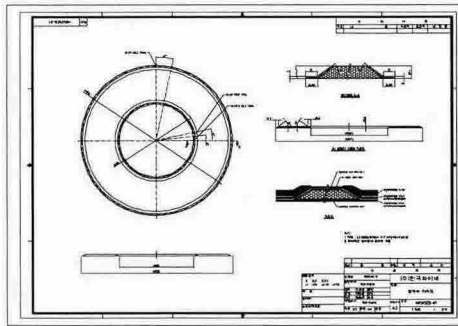


그림 6 실물형 탑재대 제작도면

제작된 시제품에 대하여 자유경계조건 하에서 모달시험을 수행하였다. 센서의 부착위치와 시험체의 형상은 그림 7과 같고, 시험 결과는 표 3과 같다. 해석과 비교하면 각 모드별로 오차값이 틀리지만 약 10% 내외로 예측할 수 있다. 실제 탑재대가 2단 구조물에 체결된 상태에서의 고유진동수가 중요하기 때문에 자유경계조건 결과만으로 설계조건을 만족한다고 판단할 수는 없다. 일반적으로 구조물 체결부위는 고정지지와 단순지지의 중간형태로 판단된다.

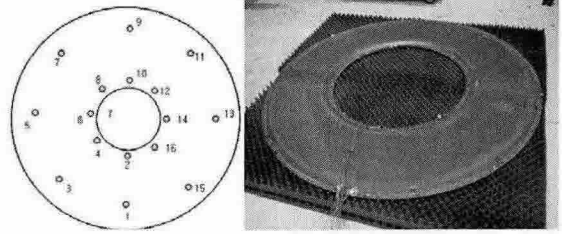


그림 7 실물형 탑재대 모달시험

표 3 실물형 시제 모달 시험 결과

모드	고유진동수	Dampin ratio	모드 형상	
1st	34.2 Hz	11.9%		
2nd	67.9 Hz	18.7%		
3rd	79.7 Hz	7.7%		
4th	112.6 Hz	6.1%		
5th	143.5 Hz	4.1%		

## 4. 결론

복합재료 샌드위치 구조를 적용하여 KSLV-I 2 단부에 적용될 탑재대 시제품을 설계/제작하였다. 샌드위치 구조물의 진동특성을 시험을 통해서 측정하였고, 해석결과와 비교하였다.

향후 시제품 제작 과정에서의 문제점을 보완하여 최종 탑재대의 설계/제작을 수행할 예정이다.

## 후기

본 연구는 소형위성발사체(KSLV-I) 개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다.