

# 적층된 외피를 갖는 샌드위치로 구성된 위성체 안테나 시스템의 모드 해석과 파손안전성 판별

오세희\*, 한재흥\*\*, 오일권\*, 신원호\*, 김천곤\*, 이인\*, 박종흥\*\*

## Modal Analysis and Failure Safety Estimation for the Satellite Antenna System Composed of Sandwich Structure with Laminated Face Sheet

Se-Hee Oh\*, Jae-Hung Han\*\*, Il-Kwon Oh\*, Won-Ho Shin\*,  
Chun-Gon Kim\*, In Lee\*, and Jong-Heung Park\*\*

KEY WORDS : KORSAT3, Satellite, Antenna, Composite Lamination, Mode, Sandwich

### ABSTRACT

Satellite system experiences severe mechanical loads during the launch period. Therefore, positive margin of safety of the satellite system must be demonstrated for every possible mechanical loading condition during the launch period. This paper presents modal and stress analysis result due to quasi-static loads for the satellite antenna system. The failure tendency for the sandwich construction of the satellite antenna system has been studied with various lamination angles of unidirectional prepreg.

#### 기호설명

- S.F. : 안전계수 (Safety factor)
- M.S. : 안전율 (Margin of safety)
- $I_{T_{sai-Wu}}$  : Tsai-Wu failure index
- $\tau_{transverse}$  : Transverse shear stress

#### 1. 서 론

전세계적으로 통신 사용량의 증가에 따라 통신 위성을 발사하는 국가와 그 횟수가 증가하고 있다. 통신위성에 탑재되는 통신관련 장비는 크게 나누어 안테나와 중계기(송수신기)로 구성된다. 통신 위성용 안테나는 위성 본체 내부에 주로 탑재되는 다른 탑재체들과는 달리 위성 본체 외부로 돌출되어 있어 발사 및 운용 시 극심한 기계/우주환경

하중을 받게 된다. 안테나와 같은 통신 위성 탑재 물들은 한 번 발사되면 다시 수리가 되지 않는 구조물이므로 이러한 과도한 하중 상태에서 구조적 안전성이 보장되어야 한다. 위성 안테나에 가장 가혹한 기계적 하중이 가해지는 시기는 바로 발사체에 탑재되어 우주로 발사되는 시기이다.

위성이 발사 단계에서 접하게 되는 하중 조건은 발사체의 가속에 의한 준정적 하중, 천이성 저주파 진동, 음압 하중, 그리고 발사체 이륙, 단 분리, 위성과 발사체간의 분리 등에서 발생하는 충격 하중 등이 있다. 본 연구는 통신 위성 안테나 구조물을 개발하기 위한 기초적인 연구로서 구조물의 진동이나 음압 하중 해석에 필수적으로 연관되는 진동 모드의 경향을 파악하였다. 그리고 발사체의 가속에 의한 준정적 하중이 작용할 때 각 부재별 안정성을 판별하였다.

본 연구의 목적은 위성 안테나 구조물의 모드 해석과 안정성 판별로 구조물의 기본적인 특성을

\* 한국과학기술원

\*\* 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소

파악한 뒤 구조물을 효율적으로 개선시키기 위해 구조물에 사용된 샌드위치 구조물의 면재(Face sheet)에 다양한 적층각의 일방향 프리프레그 조합을 사용하여 원하는 진동 모드와 보다 가볍고 안정적인 시스템을 구성하고자 하는 것이다.

## 2. FE 모델과 경계조건

### 2.1 유한요소모델

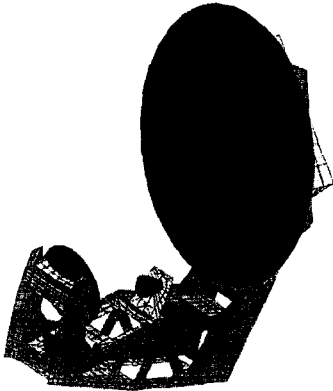


Fig. 1 FE modeling for the antenna system.

Fig. 1 에 위성 안테나 시스템의 유한요소 모델을 나타내었다. Fig. 1 에 보인 안테나는 음섯 이중 반사판 안테나로, 사용 주파수 대역은 Ka (30/20 GHz) 대역이다. 안테나의 기하학적 형상은 참고 문헌 [1]에 소개된 바와 같이 전기적 특성 해석을 통하여 결정되었다. 안테나의 사용 주파수는 Pre-processor 는 MSC/PATRAN 을 사용하였으며, 사용한 요소는 ABAQUS 에서 제공하는 2 차원 쉘 요소로서 3 절점 요소인 S3R 과 4 절점 요소인 S4R 이다. 전체 요소 수는 2153 개였으며, 전체 절점 수는 2053 개였다.

### 2.2 경계조건

Fig. 2 에는 안테나 시스템의 경계 조건을 나타내었다. 본 연구에서 다루는 안테나는 위성의 Nadir 패널에 고정되는 팬넬 탑재형 안테나로 위성 본체에 대해 고정 지지된다. 안테나 구조물과 위성 본체의 열적/기계적 정합은 특별히 제작된 4 개의 bracket 을 사용하여 이루어지나, 안테나의 구조적 해석을 위해서는 이 네 곳에 고정 지지 경계 조건을 부과하는 것이 타당하다.

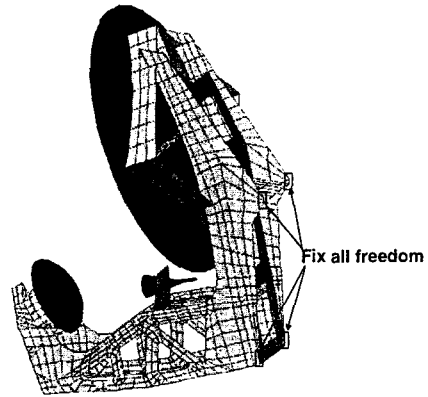


Fig. 2 Boundary condition for the antenna system.

## 3. 재료선택과 요구조건

### 3.1 재료선택

최근 발사되는 통신 위성용 안테나 구조물은 경량화 및 강성 조건을 동시에 만족시키기 위하여 샌드위치 구조물이 많이 사용된다. 우주 환경에서의 열변형을 최소화하기 위해 면재는 주로 탄소계열의 복합재료를 사용하였고, 심재(core)는 알루미늄 또는 Kevlar 하니콤 구조가 널리 사용된다.

당초 설계된 Ka 대역 안테나 구조물 (이하 기준 구조) 은 심재로 Hexcel, Inc.의 HRH49-1/4-2.1 를 사용하였다. 샌드위치 구조물은 대부분의 하중을 면재가 지지하므로, 전체 시스템의 거동에서 면재의 역할이 매우 중요하다. 기준 구조물의 주 반사판과 지지부, 부분사판 등에는 탄소계열의 Xn50A/RS-3 가 면재로 사용되었고, 타워패널부분에는 Kevlar 계열의 Kevlar49/Ex1515 가 사용되었다.

Table 1. Material properties for base system.

|                             | Face sheet |                 | Core                |
|-----------------------------|------------|-----------------|---------------------|
|                             | Xn50A/RS-3 | Kevlar49/Ex1515 | HRH49-1/4-2.1       |
| E (MPa)                     | 70330      | 19310           | 174.4               |
| G (MPa)                     | 25370      | 5240            | 19.58(L)<br>7.31(W) |
| $\nu$                       | 0.32       | 0.334           |                     |
| $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 1600       | 1450            | 33.62               |
| Xt (MPa)                    | 194.9      | 252.3           | -                   |
| Xc (MPa)                    | 99.3       | 38.6            | 0.69                |
| S (MPa)                     | 82.7       | 102             | 0.21                |

Table 1. 에는 기준 구조에 사용된 재료의 기계

적 물성을 나타내었다. 면재는 모두 직조형식으로 제조된 것으로 0.254mm의 두께를 갖는다. 면재의 특성을 살펴보면 Kevlar 면재가 밀도는 낮아서 무게 감소 효과는 있지만, 압축 강도가 상대적으로 매우 낮은 것을 알 수 있다.

직조된 면재는 제조시 그 강성과 강도가 결정되어 버리므로 시스템이 요구하는 강성과 강도를 만족시키기 위해서는 이에 적합한 물성의 재료를 선택하거나 두께를 변화시키는 수 밖에 없다. 그러나 일방향 프리프레그(Unidirectional prepreg)를 사용하면 이들을 다양하게 적층하여 여러가지 특성을 지니는 재료를 제조할 수 있으므로 시스템의 요구조건을 만족시키는데 많은 편리성을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 Kevlar 면재가 사용된 부분을 탄소 계열의 일방향 프리프레그를 사용하여 다양한 적층각으로 적층하여 구성하였을 때 거동변화를 살펴보았다.

Table 2. Material properties for various unidirectional Gr/Ep prepreg.

|                                | Torayca<br>(P3051) | SKC<br>USN-1250 | HFG<br>125NS | T300/<br>5208 |
|--------------------------------|--------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Stiffness (Modulus unit : Gpa) |                    |                 |              |               |
| E1                             | 127.9              | 134             | 141.1        | 137.8         |
| E2,E3                          | 9.4                | 10.3            | 8.65         | 10            |
| G12,G13                        | 4.2                | 5.5             | 5.45         | 5.5           |
| G23                            | 3.1                | 3.2             | 4.23         | 4.1           |
| v12, v13                       | 0.28               | 0.33            | 0.3          | 0.3           |
| v23                            | 0.52               | 0.53            |              | 0.6           |
| Strength (Unit : MPa)          |                    |                 |              |               |
| Xt                             | 1726               | 1758            | 1682.2       | 1498          |
| Xc                             | 1051               |                 | 1078         | 1489          |
| Yt, Zt                         | 61                 | 52              | 74.5         | 65            |
| Yc, Zc                         | 141                | 207             | 132.1        | 200           |
| S                              | 61                 | 52              | 103.6        | 86            |
| Density (kg/m <sup>3</sup> )   |                    |                 |              |               |
| ρ                              | 1520               |                 | 1500         | 1540          |

Table 2.에는 면재에 사용가능한 여러가지 일방향 복합재의 기계적 물성들을 나타내었다. 각 재료의 특성을 살펴보면 HFG 125NS의 상대적 강성과 강도가 비교적 높은 값을 지니며, 밀도 또한 낮은 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 HFG 125NS를 샌드위치 구조물의 면재로 사용하여 해석을 수행하였다.

### 3.2 요구조건

본 연구에서는 안테나의 진동 모드 해석과 발

사 시 준정적 하중을 고려한 관성 하중에 대한 정적 해석을 수행하였다. 위성 안테나의 고유 진동수는 버스체와의 동적 연성과 밀접하게 관계되므로 시스템 차원에서 요구하는 최소 고유 진동수보다 크도록 설계되어야 한다. 본 연구에서 다루는 Ka 대역 안테나 모델의 경우에는 구조물의 고유진동수가 45Hz 이상이어야 한다.

관성력의 부과를 위한 하중 조건은 x, y, z의 각 방향으로 30g 라는 가속도 조건이 부과되었다. 비행 모델의 하중 시험 조건은 각 방향 24g 이나 인공 모델의 경우 안전계수 1.25를 부과하여 30g의 가속도를 부과하여 시험하고 구조 설계 시에도 30g의 하중을 고려한다.

관성력에 의한 준정적 해석시 요구조건은 시스템에서 발생한 응력으로 인한 안전율 (Margin of Safety)이 0보다 큰 값을 가져야 한다. 본 연구에서는 샌드위치 구조물의 면재와 심재에 대하여 다음과 같은 안전율 식을 사용하였다.

Face sheet :

$$M.S._{\text{facesheet}} = \frac{1}{I_{\text{TsaI-Wu}} \times S.F.} - 1 \quad (1)$$

Core :

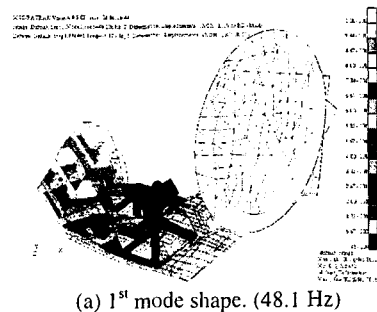
$$M.S._{\text{core}} = \frac{\tau_{\text{transvers.strength}}}{\tau_{\text{transvers.analysis}} \times S.F.} - 1 \quad (2)$$

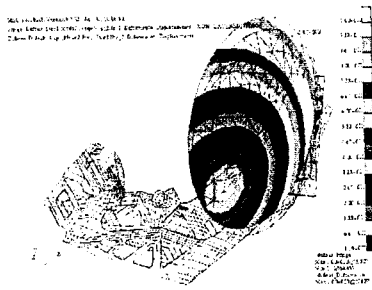
본 연구에서는 모든 안전계수를 1.25로 동일하게 적용하였다.

## 4. 기준 구조물의 해석결과

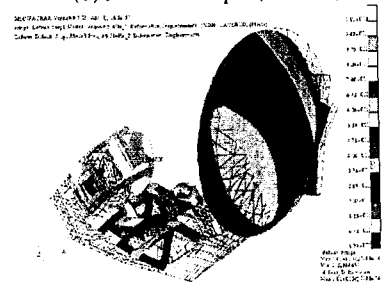
### 4.1 모드해석

Fig. 3에는 직조된 면재를 사용한 기준 구조의 모드 형상을 나타내었다. 시스템의 첫번째 고유진동수는 48.1 Hz로서 요구조건인 45 Hz를 만족함을 알 수 있다.

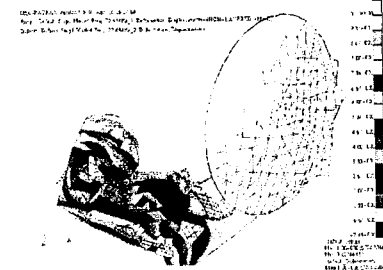




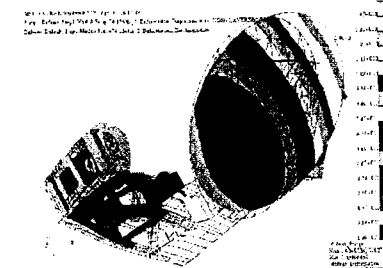
(b) 2<sup>nd</sup> mode shape. (56.6 Hz)



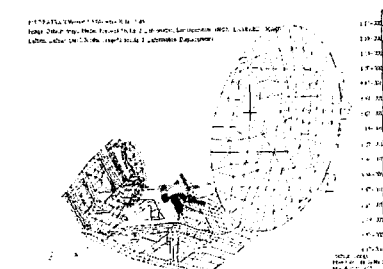
(c) 3<sup>rd</sup> mode shape. (69.2 Hz)



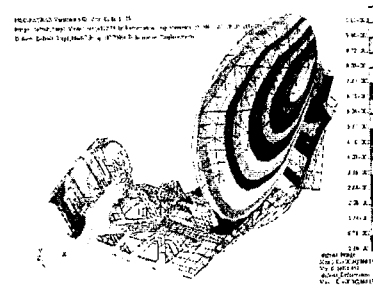
(d) 4<sup>th</sup> mode shape. (72.7 Hz)



(e) 5<sup>th</sup> mode shape. (74.1 Hz)



(f) 6<sup>th</sup> mode shape. (83.6 Hz)



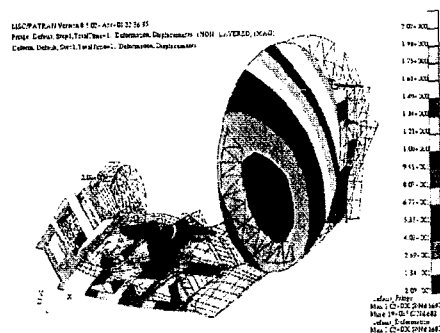
(g) 7<sup>th</sup> mode shape. (112.8 Hz)

Fig. 3 Mode shape of original system.

#### 4.2 준정적 해석

Fig. 4는 안테나 시스템에 x, y, z 각 방향으로 30g의 가속도로 인한 관성력의 준정적 하중이 가해질 때의 변형 형상을 나타내고 있다. x 방향의 하중에 대해서는 부반사판에서 2mm 정도의 최대 변위가 발생하였고, y 방향 대해서는 역시 부반사판에서 4.6mm 정도의 변형이 발생하였다.

Table 3.에는 각각의 하중에 대하여 면재와 심재에서의 안전율을 나타내었다. 결과를 보면 y 방향의 하중에 대해서 면재의 안전율이 (-)값을 나타낼 수 있다. 안전율이 (-)인 부분은 전체 구조물을 고정 지지하는 bracket 부분이다. 이러한 파손이 발생하는 이유는 이 부분의 외피로 사용된 재료인 Kevlar49/Ex1515의 면내 압축강도가 다른 재료에 비하여 현저히 떨어지기 때문이다. Kevlar49/Ex1515의 밀도는 다른 재료에 비하여 낮은 값을 가져 무게 감소 효과가 있지만, 면내 압축강도가 현저히 떨어지므로 이 부분은 다른 재료로 전환하는 것이 안전하다고 생각된다.



(a) X-direction



과가 45Hz 이상으로서 요구 조건을 만족하며 전체적으로 원래 시스템에 비하여 높은 고유진동수를 가짐을 알 수 있다. 이는 원래 시스템에 비하여 구조 강성이 증가하였음을 의미한다.

### 5.3 준정적 해석

Table 6.에는 y 방향으로 30g 의 준정적 하중이 주어질 때 각 적층 방법에 대한 면재와 심재에서의 안전율 결과를 나타내었다. 기존 시스템의 결과에서 알 수 있었듯이 구조물이 y 방향에 대하여 넓은 평판의 형상을 하고 있어서 y 방향의 하중에 대해서 가장 취약한 특성을 지니고 있었다. 모든 최대 응력은 구조물의 고정 지지부에서 발생하였다. 고정 지지부의 구조물들을 일방향 프리프레그를 사용하여 적층판으로 구성하였을 때 원래 시스템에서 발생한 파손경향은 나타나지 않았다. 이는 원래 시스템에 사용된 Kevlar 면재의 낮은 면내 압축강도로 인하여 압축응력에 취약한 특성을 압축 하중에 우수한 특성을 지니는 재료로 교체함으로써 구조적으로 보강되어 발생한 결과이다. 전체적으로 해석결과가 매우 안정적인 경향을 나타내었다. 이는 30g 라는 가속도는 매우 큰 값이지만, 전체 구조물의 무게가 매우 적어 시스템에는 파손을 유발시킬 정도의 관성력이 발생하지 않기 때문이다.

면재와 심재의 두께를 줄인 경우 전체적인 무게는 0.2-0.25kg 정도가 감소되었다. 안전율은 그와 함께 조금 떨어지거나 오히려 증가하였다. 즉 현재 해석한 경우에 대해서는 시스템이 기계적으로는 매우 안정적인 상태이며, 각 부분별로 면재와 심재의 최적화를 수행하면, 전체적인 요구조건을 만족시키며 더 가벼운 효율적인 구조물의 설계가 가능하다고 생각한다.

Table 6. Margin of safety and mass of each lamination case for y-direction inertial load.

|        | Face sheet | Core | Mass (Kg) |
|--------|------------|------|-----------|
| Origin | -0.42      | 1.15 | 2.79      |
| (1)    | 4.16       | 1.99 | 2.84      |
| (2)    | 4.16       | 1.99 | 2.84      |
| (3)    | 4.76       | 2.36 | 2.84      |
| (4)    | 4.76       | 2.36 | 2.84      |
| (5)    | 4.03       | 2.2  | 2.61      |
| (6)    | 5.2        | 2.3  | 2.66      |

## 6. 결론

통신위성 안테나 구조 개발을 위한 기초 연구로서 기계적 구조 해석에 대한 방법을 정립하고, 진동 모드 해석과 준정적 하중에 대한 각 구조 부분들에 대한 안전율을 계산하였다. 본 연구에서 비교 기준으로 삼았던 직조된 면재를 사용한 기존 안테나 시스템은 고유 진동수의 조건은 만족하였으나, 준정적 하중에 대해 bracket 과 같이 응력이 집중되는 부위에 대해서는 안정적인 경향을 나타내주지 못하였다. 이러한 문제점의 해결을 위하여 구조물의 고정 지지부에 일방향 프리프레그를 다양한 각도로 적층한 면재를 사용하여 샌드위치 구조물을 구성한 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 자유 진동 해석에 대해서는 모두 요구 조건을 만족하였으며, 준정적 하중에 대해서도 해석 결과가 안전한 것으로 나타났다. 위성 안테나 개발을 위해서는 본 연구에서 다룬 하중 이외에 사인 진동에 의한 하중, 음압 진동에 의한 하중 등을 추가로 고려하여야 하고, 기계적 하중외에 우주 궤도 환경에서의 환경 하중에 대한 영향에 대해서도 연구되어야 할 것이다. 안테나 구조를 구성하는 샌드위치 구조의 면재와 심재에 대한 두께, 적층각 등을 변수로 최적화를 수행하면 이와 같은 여러 가지 요구 조건을 효율적으로 만족시키는 설계가 가능하리라 생각된다.

## 참고문헌

- 1) 한재홍, 윤소현, 엄만석, 박종홍, 이성팔, "통신방송위성용 안테나 개념 설계," 한국항공우주학회 추계학술발표대회 논문집, 2000, pp. 195-199.
- 2) Tom Bitzer, *Honeycomb Technology*, Chapman & Hall.
- 3) *Hexcel Honeycomb*, Hexcel Corporation.
- 4) 이인 외, *인공위성 구조설계 및 동역학/제어 설계*, 인공위성 기술 단기 강좌, 한국항공우주학회, 1997.