

## 복합재료 다층 표면안테나구조의 설계 및 응력해석

유치상\* (포항공과대학교 대학원 기계공학과), 황운봉 (포항공과대학교 기계공학과)

### Design and Analysis of Composite Multilayer Surface-Antenna-Structure

C. S. You (Mecha. Eng. Dept., POSTECH), W. Hwang (Mechanical Eng. Dept., POSTECH)

#### ABSTRACT

“Structural surface becomes an antenna.” The integration of antennas into structural body panels is a new high payoff technology. It emerged from the need to improve structural efficiency and antenna performance. In this paper, we developed new design concept for the structural surface which transmits and receives the electromagnetic signals, and it is termed Surface-Antenna-Structure (SAS). Design procedure was presented including structure design, material selection and design of antenna elements, which was processed according to the communication with KORSAT satellite at Ku-Band (12.25 – 12.75 GHz). The final demonstration article was 350×200×7.5mm flat antenna panel. Experimental results for antenna performances were in good agreements with design requirements. Also structural analysis was performed with SAS, estimating stress distributions under simply supported condition with Laminated Plate Theories and Navier Solutions. The SAS concept can be extended to give a useful guide to manufacturers of structural body panels as well as antenna designers, promising innovative future communication technology.

**Key Words** : Surface-Antenna-Structure (표면안테나구조), Composite Materials(복합재료), Laminated Plate Theories (적층판 이론), Microstrip Antenna (마이크로스트립 안테나)

#### 1. 서론

현재 국내외 복합재료 및 지능구조 연구소에서는 자동차, 항공기 등 운송체의 중량감소, 성능향상, 스틸스 기능 강화 등을 위한 신개념의 재료에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구의 일환으로 미국의 국방연구소에서는 군사용 항공기의 표면을 안테나로 이용하여 구조, 공기역학적으로 효율을 증가시키고 동시에 안테나의 기능을 향상 시키고자하는 연구가 1990년대 초부터 시작되어 현재까지 활발히 진행되고 있다. 이러한 개념의 구조를 스마트 스킨(smart skin) 또는 CLAS (conformal load-bearing antenna structure)라고 하며, 안테나의 기능을 가지면서 구조 자체에 부과되는 강도 및 강성 등의 요건을 만족하는 구조의 설계 및 제작에 대한 기술의 축적이 이루어지고 있다[1-4]. 이와 같이 국외에서는 전자통신분야와 구조역학분야가 하나로 통합하여 통신기능을 수행하는 지능구조물에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 반면, 국내에서의 이러한 복합적인 분야에서의 연구실적은 아직까지 전

무하다. 이러한 복합재료 다층 표면안테나구조는 자동차와 선박 등 항공기 이상으로 많은 수의 안테나를 필요로 하는 운송체로 확산시켜 적용 가능하

다. 본 연구의 목적은 구조체 표면이 안테나의 기능을 하는 복합재료 표면안테나구조(SAS: Surface-Antenna-Structure)를 설계 제작하여 안테나의 성능을 입증하고, 복합재료 적층판 이론과 Navier Solution 을 통해서 비대칭의 다층 샌드위치 구조로 이루어진 SAS 의 단순지지 상태에서의 응력분포를 해석하고 구조적 거동을 예측하는 것이다.

#### 2. 기본 설계개념

표면안테나구조의 기본 설계개념은 마이크로스트립 평면안테나 요소를 삽입시킨 복합재료 다층 샌드위치구조이다(Fig. 1). 각 층은 서로 다른 기계적 물성을 지니고 있어 구조적으로 각각 다른 성능을 나타낼 뿐만 아니라 안테나의 성능을 위해 각각 다른 전기적인 특성을 보여야한다.

외부 표면판(facesheet)은 구조체의 가장 바깥에 위치한 요소로 면내하중을 담당하고 전체적인 판재 좌굴저항에 기여하며, 저속충격과 환경에 대한 저항을 갖게 한다. 전기적으로는 신호를 받고 전달하는 안테나의 보호막과 같은 역할을 한다. 외부 표면판의 재료는 신호 감쇠와 반사 손실을 최소화하기 위해 반드시 낮은 유전체적 성질과 낮은 손실 특성을 가져야한다. 판의 두께와 유전율은 안테나의 성능과 구조적 성능을 함께 나타내므로 이의 선택은 매우 중요하다. 중간층의 유전체는 구조적인 측면에서 위 부분과 아랫부분의 부하의 전달 작용을 한다. 전기적으로 윗면에는 slot 을 포함하며 아랫면에 위치한 feedline 의 성능을 좌우한다. 허니콤 코어는 전체 구조의 굽힘 하중에서 유도된 판재 사이의 전단력을 전달하고, 안테나에서 요구하는 공기층을 제공한다. Shielding plane 은 시스템이 안테나 윗부분으로의 방사를 원치 않을 경우 뒤로 방사되는 신호를 없애기 위한 것이며 신호를 반사시키기 위해 보통 금속 도체를 사용한다. 가장 아랫면에 shielding plane 을 포함하는 레이어를 지지대(supporter)라고 명하며 이는 전기적으로 안테나의 성능에 영향을 미치지 않으며 구조적으로 면내 하중을 담당하고 전체 구조의 굽힘 및 좌굴에 대한 저항력을 향상시킨다.

Fig. 1 은 본 논문에서 설계한 복합재료 표면안테나구조의 형태 및 각각의 레이어에 따른 치수 그리고 사용된 재료를 나타낸다.

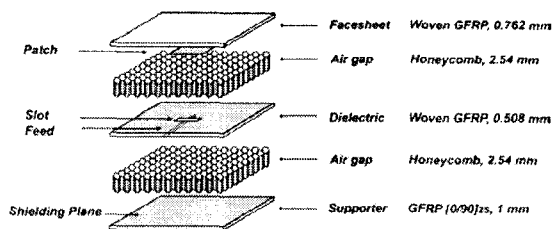


Fig. 1. Exploded view of surface-antenna-structure

### 3. 안테나 설계 및 제작

본 논문에서 설계하고자 하는 안테나는 무궁화 위성의 위성체 제원을 이용하는 위성방송이나 위성 인터넷서비스를 위한 수신전용 안테나로 중심주파수는 12.5 GHz 이며 500 MHz 이상의 대역폭과 20dBi 이상의 이득을 요구한다.

Fig. 2 는 본 논문에서 설계한 전체 안테나요소들을 보여주며 Fig. 3 은 제작한 각 층의 형상을 보여준다. 단일 안테나에서 패치의 형태는 직사각형

모양이며 12.5 GHz 에서 공진 하도록 설계하였다. 개구면의 형태는 작은 크기로 coupling 의 양을 극대화 시키기 위하여 dog-bone 모양으로 하였으며, 급전선의 폭은 100Ω의 특성임피던스를 기준(0.3mm)으로 설계하였다.

전체 안테나 요소는 16×8 배열안테나로 설계하였다. 급전구조는 대역폭을 높이기 위해 병렬구조로 하였으며, 삽입손실특성을 높이기 위해 위아래를 180° 위상차이를 주어 대칭으로 설계하였다. 또한, 중심으로부터 각 소자에 들어가는 전력이 3dB 씩 줄어드는 3dB tapered feed network 으로 설계되어 이득의 효과를 높이고자 하였다. 제작된 표면안테나 구조의 크기는 350×200×7.5 mm 이다.

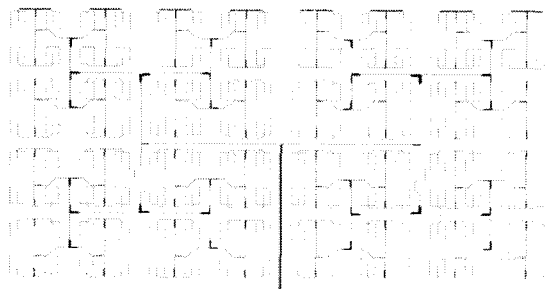
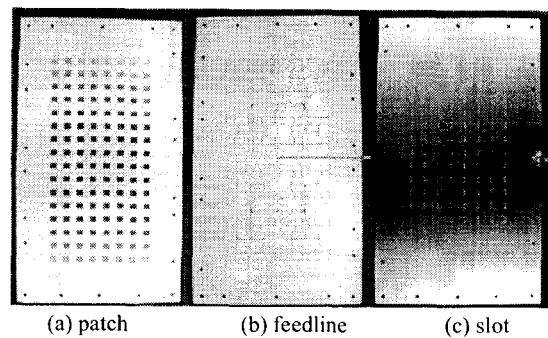
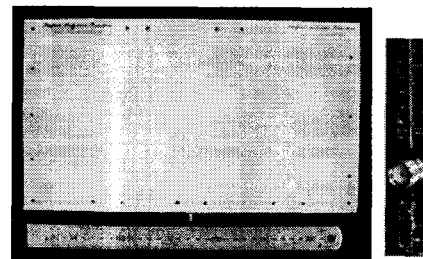


Fig. 2. 16×8 antenna elements



(a) patch (b) feedline (c) slot



(d) full structure and sideview

Fig. 3. 16×8 antenna elements

#### 4. 안테나 성능

제작한 안테나는 HP 사의 8510 Network Analyzer 를 이용하여 입력반사계수를 측정하였으며, Nerfield System, Inc.를 이용하여 방사패턴 및 이득을 측정하여 성능을 설계조건과 비교하였다.

Fig. 4 의 반사계수 특성을 보면 안테나 설계대역인 12.25-12.75 GHz 에서 -10dB 이하의 특성을 갖으므로 설계조건에 부합됨을 확인하였다. Fig. 5 에서는 안테나의 방사패턴을 보여준다. E-plane 에서 약 9°, H-plane 에서 약 5°의 빔폭을 나타낸다. 안테나의 이득은 전체 관심대역에서 약 19dBi 이상으로 설계치 보다 약간이 줄어듦을 확인하였는데, 이는 구조적인 성능을 위한 facesheet 의 두께 및 물성 때문에 생긴 전파의 손실로 고려되어진다.

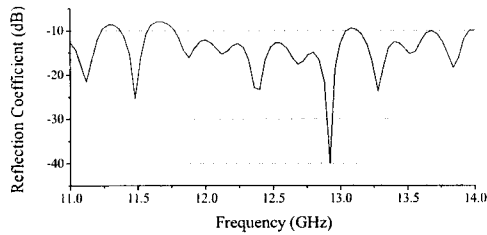


Fig. 4. Reflection coefficient

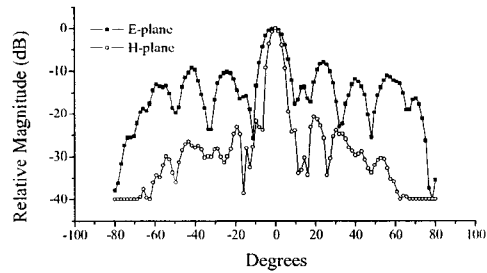


Fig. 5. Radiation patterns

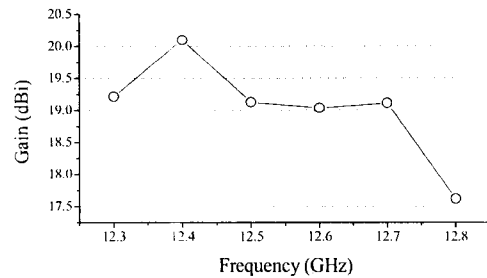


Fig. 6. Gain characteristics

#### 5. 구조 해석

본 논문에서는 비대칭의 다층 샌드위치 구조로 되어있는 SAS 의 구조해석을 전단변형을 고려하여 두꺼운 복합재료 적층판의 해석에 이용하는 1 차 전단변형 이론 (FSDT, First-order Shear Deformation Theory)과 3 차 전단변형 이론(TSDT, Third-order Shear Deformation Theory)을 이용하여 수행하였다. 또한 Navier Solution 방법을 이용하여 단순지지 조건에서 SAS 의 응력분포를 해석하고, 구조적 거동을 예측하였다. 본 구조의 좌표는 Fig. 7 과 같고, 해석에 사용한 가정은 다음과 같다.

- (1) 심재에서의 면방향 응력( $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ )은 무시한다.
- (2) 면재에서의 두께방향 응력( $\sigma_{xz}, \sigma_{yz}$ )은 무시한다.
- (3) 두께방향의 변형은 일어나지 않는다. ( $\epsilon_{zz} = 0$ )

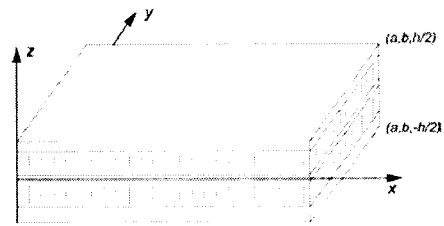


Fig. 7. Coordinate system

##### 5.1. 1 차 전단변형 이론

1 차 전단변형이론에서는 판재의 변형후 변위분포가 두께에 따라 선형적으로 변한다고 가정한다. 두께에 따른 변위와 변형률 분포는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u &= u_0(x, y, t) + z\phi_x(x, y, t) \\ v &= v_0(x, y, t) + z\phi_y(x, y, t) \\ w &= w_0(x, y, t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial w_0}{\partial y} + \phi_x \\ \frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_y \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Eq. (1)과 (2)를 이용하여 힘과 변형률과의 관계를 구하면 전단력과 전단 변형률 사이의 관계에서

전단보상값 (Shear correction factor,  $K$ )을 다음과 같이 추가시켜 준다.

$$\begin{Bmatrix} Q_y \\ Q_x \end{Bmatrix} = K \begin{bmatrix} A_{44} & A_{45} \\ A_{45} & A_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial w_0}{\partial y} + \phi_y \\ \frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_x \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $K$ 는 구성관계식에서 선형분포를 같은 전단응력과 평행방정식에서 비선형분포를 같은 전단응력의 차이를 보상에 준다.

### 5.2.3 차 전단변형 이론

3 차 전단변형 이론에서의 변위의 분포는 다음과 같이 두께에 따라 3 차 곡선 형태로 가정한다.

$$\begin{aligned} u &= u_0 + z\phi_x - c_1 z^3 (\phi_x + c_0 \partial w / \partial x) \\ v &= v_0 + z\phi_y - c_1 z^3 (\phi_y + c_0 \partial w / \partial y) \\ w &= w_0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $c_0$  과  $c_1$  값을 조건에 맞게 선택해줌으로써, 3 차 전단변형 이론에서는 전단보상값이 존재하지 않는다.

### 5.4. Navier Solution

Navier Solution 은 단순지지 경계조건일 때 변위와 하중을 미지수의 합으로 확장시켜, 운동방정식을 이용하여 판재에 작용하는 응력분포를 구하는 방법이다. 각각의 변위와 하중은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} u_0(x, y) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} U_{nm} \cos \alpha x \sin \beta y \\ v_0(x, y) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} V_{nm} \sin \alpha x \cos \beta y \\ w(x, y) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} W_{nm} \sin \alpha x \sin \beta y \\ \phi_x(x, y) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} X_{nm} \cos \alpha x \sin \beta y \\ \phi_y(x, y) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} Y_{nm} \sin \alpha x \cos \beta y \\ q &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} Q_{nm} \sin \alpha x \sin \beta y \end{aligned} \quad (5)$$

### 5.5. 해석 결과

Fig. 8 과 Fig. 9 는 SAS 에 작용하는 응력분포를 보여준다. 비대칭 구조로 인하여 위의 두 면재는 인장 맨 아래 면재에서는 압축응력이 작용하고 있으며, 전단력은 아래 허니콤에 더 크게 작용한다.

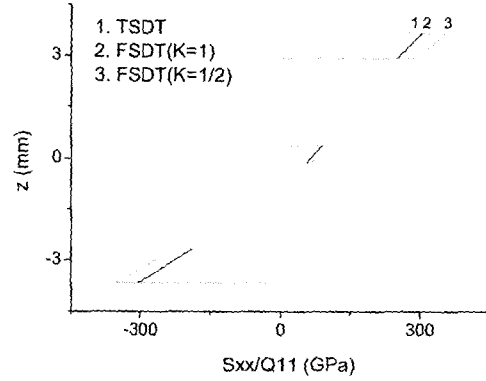


Fig. 8. Sxx distribution at center

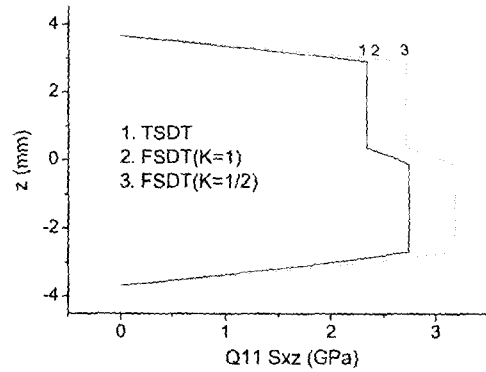


Fig. 9. Sxz distribution at edge ( $x=0$ )

## 6. 결론

본 논문에서 설계 제작한 표면안테나구조는 안테나 성능 측정결과, 설계 조건에 부합하는 결과를 보여주었다. 구조해석의 결과 허니콤에서의 전단력 분포가 일정하기 때문에 FSDT 에서  $K$ 는 1의 값에서 TSDT 와 유사한 결과를 나타내었으며, 본 구조는 단순경계조건에서 최대 약 5KN 의 분포하중에 견딜 수 있음을 확인했다.

## REFERENCES

1. A. Hopkins, et al. 1997. *AIAA SDM Conference*: 521-530.
2. A. J. Lockyer, et al. 1994. *SPIE Smart Structures and Materials*, 2189:172-183.
3. J. Tuss, et al. 1996. *37th AIAA SDM Conference*: 836-843.
4. A. J. Lockyer, et al. 1999. *Part of the SPIE Conference on Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, 3674: 410-424.