

# 폼 코어 샌드위치 구조물에서 복합재료 스킨의 이방성 특성이 전자기파 투과 특성에 미치는 영향에 관한 연구

신현수\*, 전흥재\*\*

## Effects of Anisotropic Properties of Composite Skins on Electromagnetic Wave Propagation in the Foam Core Sandwich Structures

H. -S. Shin and H. -J. Chun

KEY WORDS : Anisotropic, Electromagnetic Wave, Transmittance, Foam Core Sandwich Structure

### ABSTRACT

In this study, efforts were made to understand the propagation of electromagnetic wave through the foam core sandwich structure by the analytical model. Foam core sandwich structure is composed of glass/epoxy composite skins and foam core. Transmittance and reflectance of the arbitrary linearly polarized incident TEM waves through the unidirectional composites, foam and foam core sandwich structures were determined as functions of thickness, fiber orientation of composites, incident angle and polarization angle by the analytical model. From the results of the analysis, the general tendency of transmittance and reflectance of electromagnetic wave through composites, foam and foam core sandwich structures was obtained.

### 1. 서론

항공기의 노즈 레이돔(nose radome)은 항공기의 레이더 시스템(radar system)을 보호하는 부전도성 차폐막으로 구조적 안전성, 가벼운 중량 그리고 레이더 투명성의 기능 조건을 요구한다. 이런 조건을 만족시키기 위하여 레이돔은 곱힘강성 및 강도 그리고 내충격성이 우수한 코어(core)와 복합재료 스킨(skin)으로 이루어진 샌드위치 구조재(sandwich structure)로 제작되고 있다. 특히, 최근에 들어서는 기존의 하니콤 코어(honeycomb core)보다 수분에 의한 영향이 적은 코어부를 폼(foam)으로 대체한 폼 코어 샌드위치 구조재를 사용하는 레이돔에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이는 일부 선진국을 중심으로 군수 및 민간 항공기에 적용되고 있다<sup>(1)</sup>. 샌드위치 구조물을 레이돔의 소재로서 사용하기 위해 다양한 이방성 복합재료 구조물에서 전자기파(electromagnetic wave) 투과 특성에 대한 연구가 진행되어왔다.<sup>(2-4)</sup> 그러나, 지금까지의 연구들은 해석에서 간단한 2 차원 모델을 이용하여 복합재료 스킨의 이방성 특성을 고려하였

기 때문에 전자기파 입사각에 따른 복합재료의 이방성 특성의 영향을 고려하기 어려워 이방성 복합재료 소재의 레이돔에 대한 전파 투과성 연구에 한계가 있었다.

본 논문에서는 폼 코어 샌드위치 구조 레이돔 설계시 고려해야하는 전자기파의 입사각과 복합재료의 보강섬유 방향에 따른 이방성 특성의 영향에 대해 3 차원적으로 해석이 가능한 모델을 개발하고, 두께와 적층 방법에 따른 폼 코어 샌드위치 구조물의 전파 투과 특성을 비교 연구하였다.

### 2. 해석 모델

폼 코어 샌드위치 구조 모델은 폼 양면에 복합재료 적층판(laminate)이 붙어 있는 형상을 가진다. 이는 Fig. 1 에 도시되어 있다. 본 연구에서는 Fig. 1 에서 보여지는 바와 같이 편향각  $\delta$  인 TEM 파(transverse electromagnetic wave)가 폼 코어 샌드위치 구조에 임의의 입사각  $\phi$  로 입사되는 것으로 가정하였다. 폼과 복합재료는 각기 두께( $d_{\text{Foam}}$ ,  $d_{\text{Comp}}$ )에 대해서 층내의 반사파간의 간섭에 의해 전파투과성이 달라지기 때문에 폼 코어 샌드위치 구조물의 구성을 위해 두께에 대해서 별도로 고려

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\* 연세대학교 기계·전자 공학부 기계공학과

해야 한다. 폼 코어 샌드위치 구조물의 스킨인 복합재료 적층판은 보강섬유의 방향( $\theta$ )이 바뀌면서 전자기파 전파에 영향을 미치므로 각각의 층(ply)을 독립적으로 고려하였다.

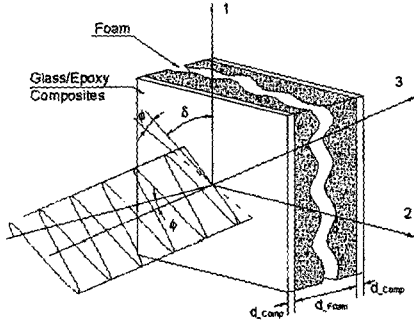


Fig. 1 Schematic drawing showing the incident TEM wave entering the sandwich structure

Fig. 2 는 본 모델에 적용된 스킨으로 다양한 보강섬유 방향을 가지도록 적층된 복합재료 적층판의 세부 구조를 도시적으로 보여준다.

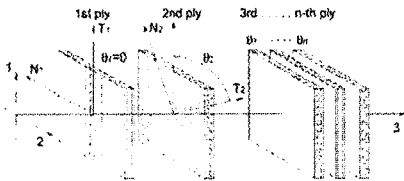


Fig. 2 Schematic drawing showing the skin made up of several unidirectional plies stacked together at various orientations

각 층은 보강섬유 방향  $\theta_n$  로 적층되는 일방향성 복합재료이고 각각의 두께는 동일하다고 가정하였다.

폼과 복합재료 스킨 모두 비자성체이므로 투자율(permeability)은 진공중의 투자율과 동일하다고 볼 수 있다( $\mu \approx \mu_0$ ). 이때 전기장의 파동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_0 e^{j(\omega t - [\omega \sqrt{\mu \epsilon^*}] \vec{u} \cdot \vec{r})} = \vec{E}_0 e^{-[\alpha] \vec{u} \cdot \vec{r}} e^{j(\omega t - [\beta] \vec{u} \cdot \vec{r})} \\ &= \cos \delta \cos \phi E_0 e^{-[\alpha] \vec{u} \cdot \vec{r}} e^{j(\omega t - [\beta] \vec{u} \cdot \vec{r})} \vec{i} \\ &\quad + \sin \delta \cos \phi E_0 e^{-[\alpha] \vec{u} \cdot \vec{r}} e^{j(\omega t - [\beta] \vec{u} \cdot \vec{r})} \vec{j} \\ &\quad + \sin \phi E_0 e^{-[\alpha] \vec{u} \cdot \vec{r}} e^{j(\omega t - [\beta] \vec{u} \cdot \vec{r})} \vec{k} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon^*$ : complex permittivity,  
 $[\alpha] = [T]^{-1} [\alpha_0] [T]$ ,  $[\beta] = [T]^{-1} [\beta_0] [T]$ ,

$\vec{u}$ : propagation vector,  $\vec{r}$ : position vector,

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} : \text{rotating tensor,}$$

$$\omega : \text{angular velocity, } \alpha_{0ij} = \frac{\omega \mu g_{0ij}}{2 \beta_{0ij}},$$

$$\beta_{0ij} = \sqrt{\frac{\omega \mu (\omega \epsilon_{0ij} + \sqrt{\omega^2 \epsilon_{0ij}^2 + g_{0ij}^2})}{2}} \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

$[g_0]$ 와  $[\epsilon_0]$ 는 복합재료의 주방향에 대한 전도율 텐서(conductivity tensor)와 유전율 텐서(permittivity tensor)이다.

각 층을 적층하여 만들어진 폼 코어 샌드위치 구조물에 전기장의 세기(electric field intensity)가  $E_0$  이고, 진동수가  $f$  인 전자기파가 입사되는 경우, 구조물 내의  $m$  번째 층에서 전기장 벡터(electric field vector)는 Fig. 3 에 도시된 바와 같다.

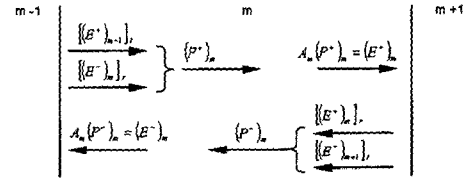


Fig. 3 Schematic drawing showing electric field vectors at the  $m$ -th ply

경계면에서 입사된 전자기장 벡터에 대해 투과와 반사된 크기는 아래 첨자  $t$  와  $r$  로 표시 했고, 진행방향에 따라 윗첨자  $+$ (오른쪽),  $-$ (왼쪽)로 표시하였다. 경계면으로 들어가는 전자기파와 나가는 전자기파의 양은 같아야 하므로 경계조건은 다음과 같다.<sup>(5)</sup>

$$E^+ = (E^+)_t - (E^+)_r, \quad E^- = (E^-)_t - (E^-)_r, \quad (2)$$

그리고, 구조 내부에서 층의 경계에서의 전기장 벡터는 다음과 같이 정의한다.

$$P^+ \equiv (E^+)_t + (E^-)_r, \quad P^- \equiv (E^-)_t + (E^+)_r, \quad (3)$$

이방성 재료의 경계에서 반사율 텐서는 다음과 같다.<sup>(6)</sup>

$$r_{ij}^* = \frac{(N_{ij})_{m-1} - (N_{ij})_m}{(N_{ij})_{m-1} + (N_{ij})_m} \quad (4)$$

여기서,  $[N] = [T]^{-1} [N_0] [T]$ ,  $N_{0ij} = \sqrt{\mu / \epsilon_{0ij}}$

반사파들은 층간을 진행하며 위상차가 발생하고 이 위상차에 의한 간섭에 의해  $m-1$  과  $m$  번째 층의 경계에서의 반사율 텐서는 다음과 같이 표현된

다.

$$r = \left( (r^*)_{(m)(m+1)} + (r^*)_{(m+1)(m+2)} e^{i\zeta} \right) \times \left( 1 + (r^*)_{(m)(m+1)} (r^*)_{(m+1)(m+2)} e^{i\zeta} \right)^{-1} \quad (5)$$

여기서,  $\zeta = 2d_{m+1} \cos(\theta_{m+1}) \left[ \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon^*} \right]$

식 (2)에 식 (3)-(5)을 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} (P^+)_m &= \left( [I] + [r]_{(m-1)(m)} \right) [A]_{m-1} (P^+)_{m-1} - [r]_{(m-1)(m)} [A]_m (P^-)_m \\ (P^-)_m &= \left( [I] - [r]_{(m)(m+1)} \right) [A]_{m+1} (P^-)_{m+1} + [r]_{(m)(m+1)} [A]_m (P^+)_m \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $[I]$ 는 단위행렬이고,  $[A]$ 는 감쇠 텐서 (attenuation tensor)이다.

입의 TEM 파( $(E^+)_0$ )가 입사했을 때, 입사, 반사, 투과 에너지 선속(energy flux)은 다음 식으로부터 얻을 수 있다.

$$F_i = \frac{|(E^+)_0|^2}{2Z_0}, \quad F_r = \frac{|(P^-)_0|^2}{2Z_0}, \quad F_t = \frac{|(P^+)_{M+1}|^2}{2Z_0} \quad (7)$$

여기서,  $Z_0$ 는 진공중에서의 임피던스( $\approx 120\pi$ )이다.

입의 TEM 파가 입사했을 때, 식 (6)을 이용하여 반사된 전기장 벡터( $(P^-)_0$ )와 투과된 전기장 벡터( $(P^+)_{M+1}$ )를 구할 수 있고, 이를 식 (7)에 대입하면 반사율과 투과율을 구할 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

항공기 레이돔의 소재로 일반적으로 사용되는 폼과 glass/epoxy 복합재료 스킨을 해석 모델의 소재로 선택하였다. Table 1은 해석에 사용된 재료의 전자기적 특성 값이다.

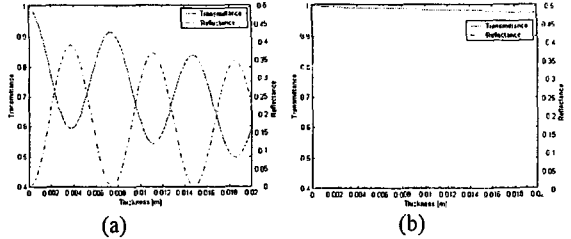
Table 1 Input constants for analysis

	Foam	Glass/Epoxy Composites		
		Longitudinal Direction	Transverse In-Plane Direction	Transverse Out-of-Plane Direction
Relative Permeability	1.115	4.6	4.4	4.3
Conductivity [ $\Omega^{-1}m^{-1}$ ]	$6.69 \times 10^{-13}$	$3.3 \times 10^{-2}$	$2.3 \times 10^{-2}$	$2.2 \times 10^{-2}$
Frequency [GHz]	10			

glass/epoxy 복합재료가 완전 성형된 후의 값이며 폼은 Airex R82.110의 값을 사용하였다.

Fig. 4는 폼과 복합재료에 대해서 두께에 대한 투과율과 반사율을 보여준다. 복합재료의 경우 적

층 구조가 아닌 단순히 이방성 특성을 지닌 단일 층의 두께로 가정하였다. Fig. 4(a)와 (b) 모두  $\lambda/4$  주기로 투과율이 사인곡선 형태로 나타나지만 복합재료의 경우 감쇠가 크기 때문에 가급적 두께를 줄여야 함을 알 수 있다.  $\lambda/4$ 가 대략 7.5mm이기 때문에 본 논문에서는 폼과 복합재료의 두께를 각



각 7mm와 0.3mm로 하여 해석하였다.

Fig. 4 Transmittance and reflectance of TEM wave through (a) glass/epoxy composites and (b) foam as a function of thickness (polarization angle  $\delta = 0$ , fiber orientation  $\theta = 0$ )

Fig. 5는 폼과 복합재료의 입사각에 따른 투과율 및 반사율을 보여준다. 입사각이 증가하면서 반사율이 감소함으로 상대적으로 투과율이 좋아져야 하지만 Fig. 5로부터 입사각이 증가하면 전자기파의 진행 거리가 증가하기 때문에 투과율이 감소한다는 것을 알 수 있다. Fig. 5(a)에서 복합재료의 경우 보강섬유 방향의 유전율이 크기 때문에 입사각이 증가하면서 보강섬유 방향으로 진행하는 파의 성분이 커져 감쇠가 많이 일어나게 된다는 것을 알 수 있다. 그러므로 Fig. 5(b)의 등방성인 폼보다 경사가 급하게 나타난다.

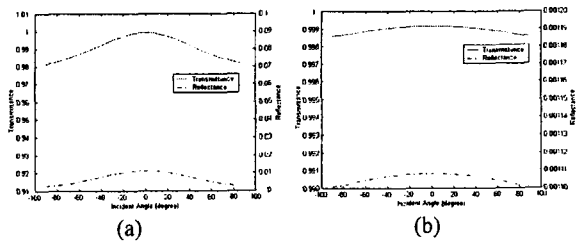


Fig. 5 Transmittance and reflectance of TEM wave through (a) glass/epoxy composites(0.3mm) and (b) foam(7mm) as a function of incident angle (polarization angle  $\delta = 0$ , fiber orientation  $\theta = 0$ )

Fig. 6은 여러 가지 적층 방법으로 세 층을 적층한 복합재료 스킨을 가지는 폼 코어 샌드위치 구조물의 투과율을 나타낸 것이다. Fig. 6(a)-(e)는 인접한 각 층사이의 보강섬유 방향각을 0에서 60도까지 증가시키면서 투과율의 변화를 알아 본 것

이다. 점진적으로 이방성특성이 줄어들면서 투과율의 변화가 완만함을 알 수 있다. 하지만, (f)와 (g)에서 알 수 있듯이 인접한 층의 보강섬유 방향각의 차이가 많이 나면서 임계각이 나타난다. 이는 인접한 복합재료의 보강섬유 방향각의 차가 커지면서 보강섬유 방향에 따라 뒤쪽 복합재료 판의 유전율이 커지면서 임계각이 발생한 것이다.

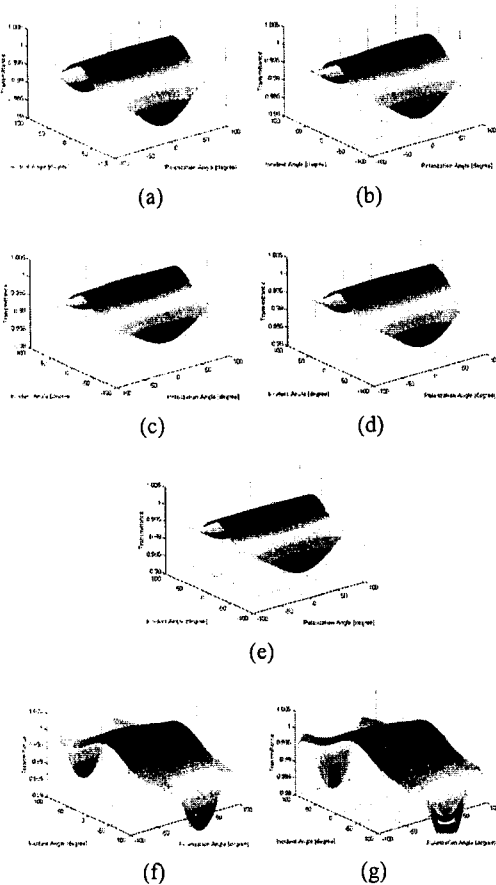


Fig. 6 Transmittance of TEM wave in foam core sandwich structure (a)  $[0_3]$ -foam- $[0_3]$ , (b)  $[0/15/30]$ -foam- $[30/15/0]$ , (c)  $[0/30/60]$ -foam- $[60/30/0]$ , (d)  $[-45/0/45]$ -foam- $[45/0/-45]$ , (e)  $[-60/0/60]$ -foam- $[60/0/-60]$ , (f)  $[0/\sqrt{75}]_2$ -foam- $[0/\sqrt{75}]_2$ , (g)  $[0/\sqrt{90}]_2$ -foam- $[0/\sqrt{90}]_2$  as functions of polarization and incident angles

#### 4. 결론

본 논문에서는 다양한 전자기파 입사조건에 따른 폼 코어 샌드위치 구조물의 전파투과성을 알아보기 위해서 3D 모델을 개발하고 복합재료와 폼, 그리고 샌드위치 구조물에서의 전파 투과 특성을 연구하였다. 3D 모델의 해석에서 입사하는 전자기

파는 TEM 파로 했다.

해석결과로부터 두께에 대하여  $\lambda/4$  주기로 투과율이 사인곡선형태로 변화하고, 복합재료의 경우 이방성 특성에 의해서 폼에 비해 입사각에 의한 투과율 곡선의 굴곡이 심하고, 유전율과 전도율이 커서 감쇠도 많이 발생했음을 알 수 있다.

복합재료 스킨의 적층 방법에 따라 폼 코어 샌드위치 구조물에서 전파투과성은 이방성 특성이 적을수록 투과율이 좋게 나타났으며, 인접한 층에서 보강섬유 방향각의 차이가 크면 임계각이 나타나는 등 투과율이 좋지 못했다. 복합재료 스킨의 적절한 적층 방법에 따라 입사각에 따른 투과성의 차이가 큰 점을 고려할 때 폼 코어 샌드위치 구조의 레이아웃 설계시 이 해석 모델의 적용이 가능할 것으로 보인다.

#### 후 기

본 논문은 두뇌한국 21 사업의 지원으로 이루어진 것이므로, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) K. R. Brazier and C. L. Cartwright, "Commercial Aircraft Nose Radomes Using Rigid Foam Core Sandwich Construction", *DIAB*, 1994
- (2) Sobrinho, C.L.d.S.S. and Giarola, A.J., "Analysis of rectangular anisotropic dielectric waveguide structures", *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1991. AP-S. Digest, 1991, Vol. 1, pp. 500-503
- (3) Torres Lima, I., Jr. and Giarola, A.J., "Electromagnetic wave propagation in two dimensional anisotropic dielectric gratings", *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1997, IEEE., 1997, Digest, Vol. 4, pp. 2400-2403
- (4) O. Poncelet and M. Deschamps, "Reflection and Refraction of an Inhomogeneous Plane Wave on Fluid/Anisotropic Solid Interface", *Ultrasonics Symposium*, 1994. Proceeding., 1994 IEEE, Vol. 2, pp. 753-756
- (5) Lee, W. I. and George S. Springer, "Interaction of Electromagnetic Radiation with Organic Matrix Composites", *Journal of Composite Materials*, 1984, Vol. 18, pp. 357-386
- (6) Cornbleet, S., "Microwave Optics", *Academic Press*, 1976