

이방성 복합재료의 전자기파 투과특성 Electromagnetic Wave Propagation in Anisotropic Composite Structures

전홍재* 신현수**
Chun, Hung-Jae Shin, Hyun-Su

ABSTRACT

The knowledge of interaction of electromagnetic waves in composite structures is important for designing the shielding structure for antenna such as radome. Recently, radomes are constructed in the form of foam core sandwich structures that have many mechanical advantages such as high strength, long fatigue life, low density and adaptability to the intended function of structure. However, the propagation of electromagnetic waves is affected by high anisotropic permeability and loss tangent of the composite skin. In this study, the analytical model to understand the propagation of electromagnetic waves in the anisotropic composites and foam core sandwich structures with composite skins was proposed. Numerical analyses of unidirectional composites and foam core sandwich structure as a function of incident angle were performed. From the results of analysis, the general tendencies of transmittance of electromagnetic wave through composites and foam core sandwich structure were obtained.

1. 서 론

본 논문에서는 고성능 항공기 레이돔 설계시 전파투과성에 대해 고려되어야 하는 전자기파의 입사각에 따른 영향과 복합재료의 보강섬유 방향에 따른 이방성 특성의 영향을 3차원적으로 해석이 가능한 모델을 개발하고, 다양한 복합재료의 적층 방법에 따른 폼코어 샌드위치 구조물의 전파 투과 특성을 비교 연구하였다. 항공기의 노즈 레이돔(nose radome)은 항공기의 레이더 시스템(radar system)을 보호하는 부전도성 차폐막으로 구조적 안전성, 가벼운 중량, 레이더 투명성 등의 기능 조건을 요구한다. 이 때문에 레이돔은 굽힘강성 및 강도 그리고 내충격성이 우수한 코어(core)와 복합재료 스킨(skin)으로 이루어진 샌드위치 구조체(sandwich structure)로 제작되고 있다. 이전까지는 코어부에 하니콤(honeycomb)을 사용하는 하니콤 코어 샌드위치 구조물을 이용하였으나 수분에 의한 영향이 크다는 단점이 있었다.¹⁾ 이에 새로운 코어재로서 폼(foam)을 사용하는 폼코어 샌드위치 구조물을 이용한 레이돔 개발에 관하여 연구가 활발히 진행되고 있다. 지금까지 복합재료 스킨을 사용하는 샌드위치 구조물을 레이돔의 소재로서 사용하기 위해 이방성 재료에서 전자기파(electromagnetic wave) 투과 특성에 대한 연구가 다양하게 진행되어왔다.²⁻⁵⁾ 그러나, 지금까지의 연구에서는 입사각에 따른 이방성 복합재료의 전파투과성에 대한 연구는 거의 없었다.

본 논문에서는 고성능 항공기 레이돔 설계시 전파투과성에 대해 고려되어야 하는 전자기파의 입사각에 따른 영향과 복합재료의 보강섬유 방향에 따른 이방성 특성의 영향을 고려해 해석이 가능한 모델을 개발하고, 다양한 복합재료의 적층 방법에 따른 복합재료와 폼코어 샌드위치 구조물의 전파 투과 특성을 비교 연구하였다.

* 연세대학교 공과대학 기계공학부, 부교수

**연세대학교 대학원 기계공학과

2. 이론 모델

폼코어 샌드위치 구조 모델은 폼 양면에 복합재료 적층판(laminate)이 붙어 있는 형상을 가진다. 이는 Fig. 1에 도시되어 있다.

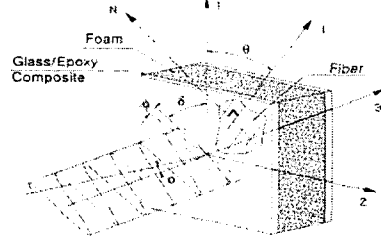


Fig. 1 Schematic drawing showing the incident TEM wave entering the sandwich structure

본 연구에서는 Fig. 1에서 보여지는 바와 같이 편광각 인 TEM파(transverse electromagnetic wave)가 폼코어 샌드위치 구조에 임의의 입사각 로 입사되는 것으로 가정하였다. 폼코어 샌드위치 구조물의 스킨인 복합재료 적층판은 보강섬유의 방향이 바뀌면서 전자기파 전파에 영향을 미치므로 각각의 층(ply)을 독립적으로 고려하였다. Fig. 2는 본 모델에 적용된 스킨인 다양한 보강섬유 방향을 가지도록 적층된 복합재료 적층판의 세부 구조를 도시적으로 보여준다.

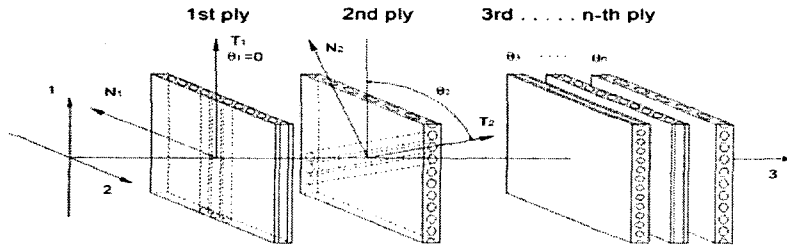


Fig. 2 Schematic drawing showing the skin made up of several unidirectional plies stacked together at various orientations

각 층은 보강섬유 방향 θ_n 로 적층되는 일방향성 복합재료이고 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.

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

여기서, $[\alpha] = [T]^{-1}[\alpha \circ \mathbf{I}]$, $[\beta] = [T]^{-1}[\beta \circ \mathbf{I}]$,
 \vec{u} : propagation vector,
 \vec{r} : position vector

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

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

ω : angular velocity

$[\mathbf{g}_0]$ 와 $[\varepsilon_0]$ 는 복합재료의 주방향에 대한 전도율 텐서(conductivity tensor)와 유전율 텐서(permittivity tensor)이다.

각층에서 감쇠율을 결정하는 전자기파의 진행 경로를 구하기 위해 스넬의 법칙(Snell's law)을 이용하여 각층의 굴절각을 계산한다. 스넬의 법칙을 이용하기 위해 1-3평면을 따라 전파하는 전자기파의 위상속도(V)를 구하면 다음과 같다.

$$V_1 = \frac{\omega \sin \phi}{\beta_{11} \sin^2 \phi + \beta_{33} \cos^2 \phi}$$

$$V_2 = 0$$

$$V_3 = \frac{\omega \cos \phi}{\beta_{11} \sin^2 \phi + \beta_{33} \cos^2 \phi} \quad (2)$$

m 번째 층과 $m+1$ 번째 층 사이의 위상속도와 입사각으로 스넬의 법칙을 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{|V_m|}{\sin \phi_m} = \frac{|V_{m+1}|}{\sin \phi_{m+1}} \quad (3)$$

식 (3)으로부터 굴절각(ϕ_{m+1})을 구하면 다음과 같다.⁶⁾

$$\phi_{m+1} = \sin^{-1} \left(\sqrt[3]{\frac{n + \sqrt{n^2 + 4m^3/27}}{2}} - \sqrt[3]{\frac{-n + \sqrt{n^2 + 4m^3/27}}{2}} \right) \quad (4)$$

여기서, $m = \frac{(\beta_{33})_{m+1}}{(\beta_{11})_{m+1} - (\beta_{33})_{m+1}}$,

$$n = \frac{\sin \phi_m \{ (\beta_{11})_m \sin^2 \phi_m - (\beta_{33})_m \cos^2 \phi_m \}}{(\beta_{11})_{m+1} - (\beta_{33})_{m+1}}$$

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

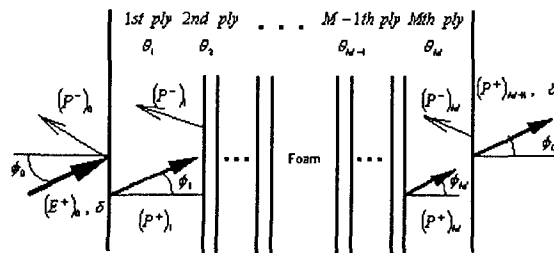


Fig. 3 Schematic drawing showing electric field vectors at foam core sandwich structure

경계면에서 입사된 전자기장 벡터에 대해 투과된 크기는 $(E)_t$ 로, 반사된 크기는 $(E)_r$ 로 표현하였다. 반사된 벡터 중 오른쪽으로 진행하는 벡터의 크기는 $(E^+)_r$ 로, 왼쪽으로 진행하는 벡터의 크기는 $(E^-)_r$ 로 표현하였다. 경계면으로 들어가는 전자기파와 나가는 전자기파의 양은 같아야 하므로 다음과 같이 경계조건이 표현된다.⁷⁾

$$\begin{aligned} E^+ &= (E^+)_t + (E^+)_r \\ E^- &= (E^-)_t + (E^-)_r \end{aligned} \quad (5)$$

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

$$\begin{aligned} P^+ &\equiv (E^+)_t + (E^-)_r \\ P^- &\equiv (E^-)_t + (E^+)_r \end{aligned} \quad (6)$$

이방성 재료에서 반사 텐서는 다음과 같다.⁸⁾

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

(7)

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

식 (7)을 이용하여 반사되어 나오는 전기장 벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} (E^+)_r &= [r](E^+) \\ (E^-)_r &= [r](E^-) \end{aligned}$$

(8)

각 층을 통과하는 전자기파는 감쇠하게 되는데 감쇠인자(A)를 적용하여 파동방정식을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\vec{E} = \vec{E}_0 A e^{j(\omega t - [\beta] \vec{u} \cdot \vec{r})}$$

(9)

여기서, $A = e^{-[\alpha] \vec{u} \cdot \vec{r}}$

Fig. 4는 Fig. 3에 도시된 부분 중 m번째 층에 대하여 식 (5)-(6)을 적용하여 각 전기장 벡터를 도시한 것이다.

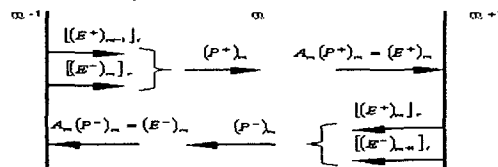


Fig. 4 Schematic drawing showing electric field vectors at the m-th ply

식 (5)에 식 (6)-(9)를 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (P^+)_m &= [(E^+)_{m-1}] + [(E^-)_m] \\
 &= (E^+)_{m-1} - [(E^+)_{m-1}] + [(E^+)_{m-1}] + [(E^-)_m] \\
 &= (E^+)_{m-1} - [r]_{(m-1)(m)} (E^+)_{m-1} + [r]_{(m-1)(m)} (E^+)_{m-1} + [(E^-)_m] \\
 &= ([I] - [r]_{(m-1)(m)}) [A]_{m-1} (P^+)_{m-1} + [r]_{(m-1)(m)} [A]_{m-1} (P^-)_{m-1} \\
 (P^-)_m &= [(E^+)_{m+1}] + [(E^-)_m] \\
 &= (E^-)_{m+1} - [(E^-)_{m+1}] + [(E^-)_m] \\
 &= (E^-)_{m+1} - [r]_{(m)(m+1)} (E^-)_{m+1} + [r]_{(m)(m+1)} (E^-)_{m+1} + [(E^-)_m] \\
 &= ([I] - [r]_{(m)(m+1)}) [A]_{m+1} (P^-)_{m+1} + [r]_{(m)(m+1)} [A]_{m+1} (P^+)_{m+1}
 \end{aligned} \tag{10}$$

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

임의의 TEM파($(E^+)_0$)가 입사했을 때, 입사, 반사, 투과 에너지 선속(energy flux)은 다음 식으로부터 얻을 수 있다.⁹⁾

$$F_i = \frac{|(E^+)_0|^2}{2Z_0}, \quad F_r = \frac{|(P^-)_0|^2}{2Z_0}, \quad F_t = \frac{|(P^+)_{M+1}|^2}{2Z_0} \tag{11}$$

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

임의의 TEM파가 입사했을 때, 식 (10)을 이용하여 반사되는 전기장 벡터($(P^-)_0$)와 투과된 전기장 벡터($(P^+)_{M+1}$)를 구할 수 있고, 이를 식 (11)에 대입하면 반사율과 투과율을 간단히 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. 유전율과 전도율은 완전 성형된 glass/epoxy 복합재료와 폼(Airex R82.80)의 값을 선택하였다.

Table 1 Input constants for analysis

Relative Permeability	Foam	Glass/Epoxy Composites		
		Longitudinal Direction	Transverse In-Plane Direction	Transverse Out-of-Plane Direction
	1.3	4.6	3.4	3.3
Conductivity [$\Omega^{-1}m^{-1}$]	2.1×10^{-4}	3.3×10^{-2}	2.3×10^{-2}	2.2×10^{-2}
Thickness [mm]	7	0.3		
Frequency [GHz]	10			

Fig. 5는 복합재료와 폼의 입사각에 따른 투과율 및 반사율을 보여준다. 입사각이 증가하면서 반사율이 감소하므로 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. 6은 두께의 변화에 대한 복합재료와 폼의 입사각에 따른 투과율 및 반사율을 보여주고 있다. Fig. 6 (a)에서복

합재료인 경우 투과율 및 반사율이 두께의 증가에 대하여 단순 감소를 하는 것이 아니라 증감이 반복되는 현상을 보여주고 있으며 이는 주어진 조건에서 최상의 투과율을 얻기 위한 최적의 두께를 결정하는데 유용하게 쓰일 수 있다. 반면 폼은 같은 두께 범위에서 단순 감소하는 경향을 보여준다.

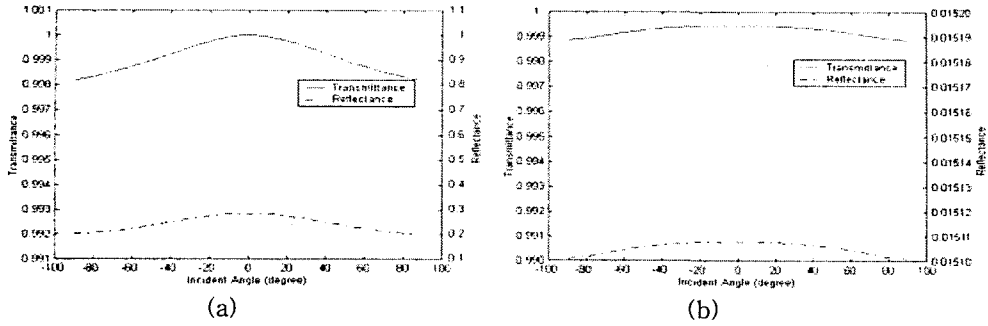


Fig. 5 Transmittance and reflectance of TEM wave through (a) glass/epoxy composites and (b) foam as a function of incident angle (polarization angle $\delta = 0$, fiber orientation $\theta = 0$)

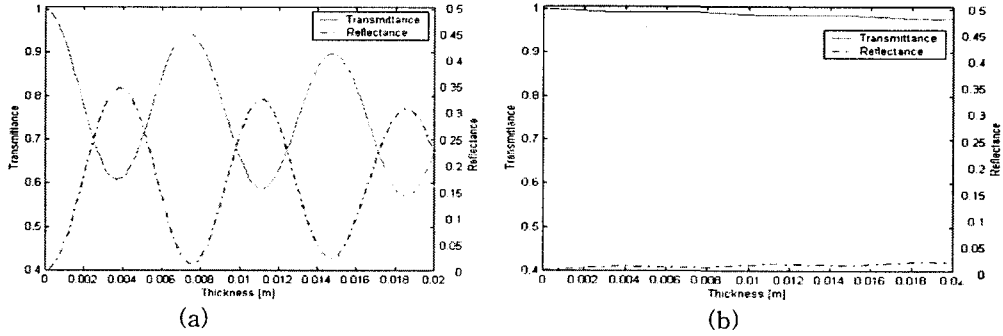


Fig. 6 Transmittance and reflectance of TEM wave in (a) the glass/epoxy composites and (b) the foam as a function of thickness (polarization angle $\delta = 0$, incident angle $\phi = 0$, fiber orientation $\theta = 0$)

Fig. 7 (a), (b)는 복합재료에 대한 투과율의 변화를 입사각과 편광각 및 입사각과 보강섬유 방향에 대해 각각 보여주고 있으며 투과율은 입사각과 보강섬유의 방향에 대한 변화보다 입사각과 편광각에 변화에서 폭이 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러므로 폼코어 샌드위치 구조물에서 전파 투과 특성은 입사각과 편광각의 함수로 구했다.

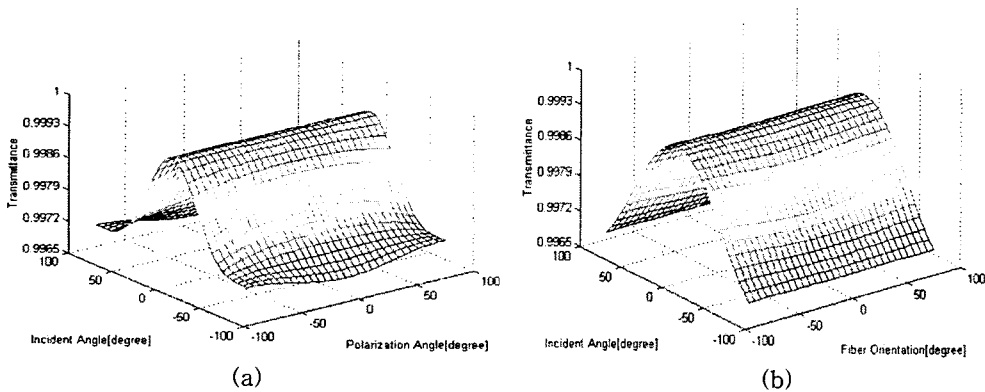


Fig. 7 Transmittance of TEM wave in the glass/epoxy composites as functions of (a) polarization and incident angles and (b) fiber orientation and incident angle

Fig. 8 (a), (b), (c)는 각각 $[0_3]$ -foam- $[0_3]$, $[0/15/30]$ -foam- $[30/15/0]$ 그리고 $[0/30/60]$ -foam- $[60/30/0]$ 으로 적층된 폼코어 샌드위치 구조에 대한 투과율의 변화를 보여주고 있다. 투과성에 대한 입사각의 영향은 $[0_3]$ -foam- $[0_3]$, $[0/15/30]$ -foam- $[30/15/0]$, 그리고 $[0/30/60]$ -foam- $[60/30/0]$ 의 순으로 적용을 알 수 있다. 이는 복합재료 스킨의 전자기적 이방성 특성이 앞에서 언급한 순으로 적어졌기 때문이다. 이는 스킨의 두께가 두껍다면 편광각이 0도에서 입사조건이 나쁜 경우에 투과율이 매우 나쁠 수 있다는 것을 의미한다. 결국, 투과율이 같은 재료로 된 폼코어 샌드위치 구조라고 하더라도 스킨의 적층 방법에 따라서 전자기파 투과율이 달라짐으로 레이돔의 기계적 강성을 유지하는 범위에서 적절한 적층 방법을 모색해야 함을 알 수 있다.

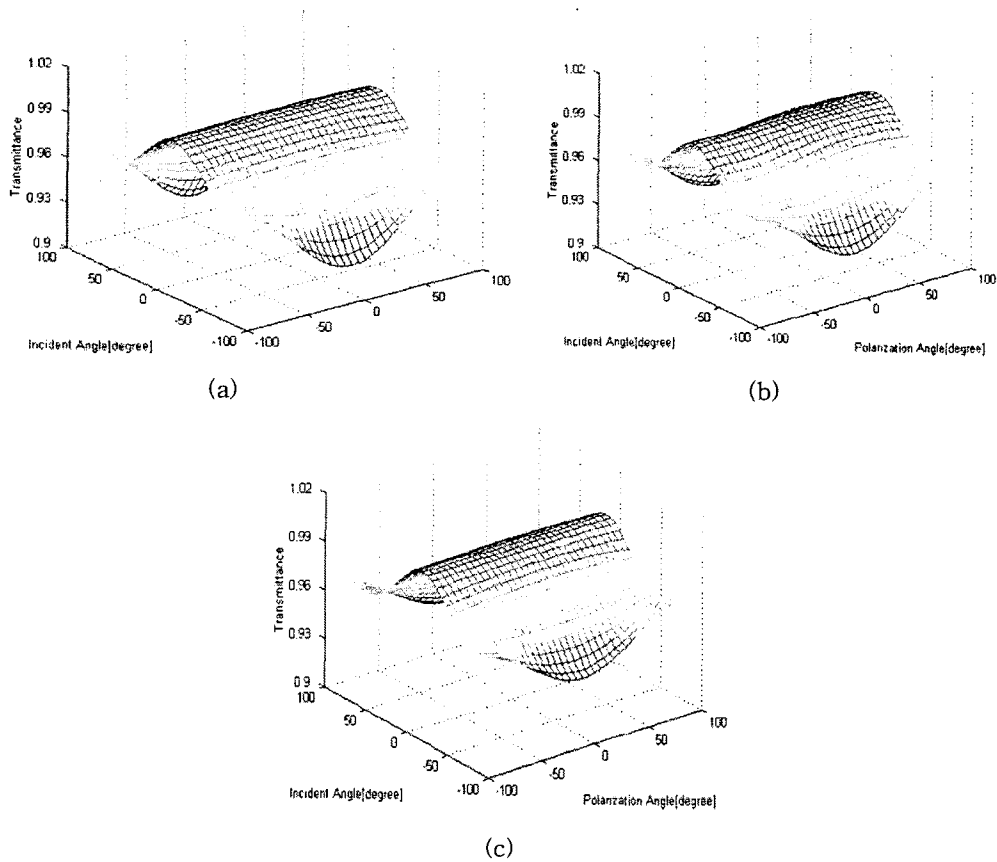


Fig. 8 Transmittance of TEM wave in the foam core sandwich structure (a) $[0_3]$ -foam- $[0_3]$, (b) $[0/15/30]$ -foam- $[30/15/0]$ and (c) $[0/30/60]$ -foam- $[60/30/0]$ as functions of polarization and incident angles

4. 결론

본 논문에서는 다양한 전자기파 입사조건에 따른 폼코어 샌드위치 구조물의 전파투과성을 알아보기 위한 모델을 개발하고 복합재료와 폼, 그리고 샌드위치 구조물에서의 전파 투과성에 대해 고찰하였다.

해석결과로부터 복합재료의 경우 이방성 특성에 의해서 폼에 비해 입사각에 의한 투과율 곡선의 굴곡이 심하고, 유전율과 전도율이 커서 감쇠도 많이 발생했음을 알 수 있다. 복합재료만 보았을 때, 다양한 입사각에 따른 투과율에 대해서 편광각에 따른 영향이 보강섬유 방향에 따른 영향보다 복잡하고 투과율의 변화가 크다는 것을 알 수 있었다.

폼코어 샌드위치 구조물에서 전파투과성은 복합재료 스킨의 적층 방법에 따라 투과율의 변화를 구해본 결과 복합재료의 적층 방법에 따라 전자기파의 투과 특성은 많은 차이를 보이며, 조건이 같은 경우 스킨의 이방성 특성이 줄어들수록 투과율의 변화가 적었다. 이방성 특성이 큰 경우에는 조건에 따라서 투과율이 매우 나쁜 경우도 발생 했다. 입사각에 따른 투과성의 차이가 큰 점을 고려할 때 레이돔의 형상과 전파 장비의 위치에 따라 스킨의 적절한 적층 방법을 찾는 데 이 모델의 적용이 가능할 것이다.

참고 문헌

1. K. R. Braziel 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. Krohn, T.L. and Medgyesi-Mitschang, L.N.; "Scattering from composite materials: a first-order model" Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 1989, Vol. 37, Issue : 2, pp. 219-228
5. 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
6. von Hippel, A. R., "Dielectrics and Waves. New ed", Artech House, 1995
7. 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
8. Cornbleet, S., "Microwave Optics", Academic Press, 1976
9. William H. Hayt, Jr. "Engineering Electromagnetics", McGraw-Hill, 1989