

유전자 알고리즘을 이용한 폼코어 샌드위치 구조물의 전파 투과성 최적화에 관한 연구

신현수* · 전흥재** · 박근식***

Optimal Design for Maximum Transmittance of Electromagnetic Wave through Foam Core Sandwich Structures Using Genetic Algorithm

H. -S. Shin, H. -J. Chun and K. -S. Park

KEY WORDS : Transmittance, Electromagnetic Wave, Foam Core Sandwich Structure, Optimal Design

ABSTRACT

In this paper, the analytical model to understand the propagation of electromagnetic waves in the foam core sandwich structures was proposed. Using the analytical model, efforts were made to find the optimal stacking sequence of composite skins for maximum transmittance of electromagnetic wave. Numerical analyses of unidirectional composites and foam 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 were obtained. Based on the general tendencies, optimal stacking sequences of composite skins for the maximum transmittance of electromagnetic wave were found with certain ranges of incident angle using genetic algorithm(GA).

1. 서론

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 곱힘강성 및 강도 그리고 내충격성이 우수한 코어(core)와 복합재료 스킨(skin)으로 이루어진 샌드위치 구조재(sandwich structure)로 제작되고 있다. 이전까지는 코어부에 하니콤(honeycomb)을 사용하는 하니콤코어 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 전

자기파(electromagnetic wave) 투과 특성에 대한 연구가 다양하게 진행되어왔다.⁽²⁻³⁾ 그러나, 이전에 제시된 해석 모델들은 입사각에 따른 이방성 복합재료 스킨의 영향을 고려하기 어려워 입사각에 따른 전자기파 투과율 향상을 위한 폼코어 샌드위치 구조물의 최적 설계 연구를 할 수가 없었다.

본 논문에서는 폼코어 샌드위치 구조 레이돔 설계시 고려해야 하는 전자기파의 입사각과 복합재료의 보강섬유 방향에 따른 이방성 특성의 영향에 대해 3 차원적으로 해석이 가능한 모델을 개발하고, 유전자 알고리즘을 이용하여 다양한 입사각 범위에서 전파 투과성 향상을 위한 폼코어 샌드위치 구조물의 최적 설계에 관하여 연구하였다.

2. 이론

전파투과 해석 모델

폼 코어 샌드위치 구조 모델은 폼 양면에 복합재료 적층판(laminate)이 붙어 있는 형상을 가지며 Fig. 1 에 도시되어 있다. 본 연구에서는 편광각 δ 인 TEM 파(transverse electromagnetic wave)가 폼 코

* 연세대학교 기계공학과

** 연세대학교 기계·전자 공학부 기계공학과

*** 연세대학교 기계공학과

어 샌드위치 구조에 임의의 입사각 ϕ 로 입사되는 것으로 가정하였다. 복합재료 적층판 스킨은 보강 섬유각(θ)이 바뀌면서 전자기파 전파에 영향을 미치므로 각각의 층(ply)을 독립적으로 고려하였다.

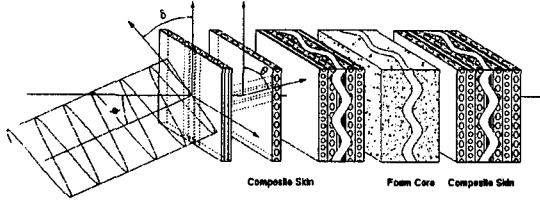


Fig. 1 Schematic drawing showing the incident TEM wave entering the sandwich structure

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.

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \bar{E}_0 e^{j(\omega t - [\omega \sqrt{\mu_0 \epsilon^*}] \bar{u} \cdot \bar{r})} = \bar{E}_0 e^{-[\alpha] \bar{u} \cdot \bar{r}} e^{j(\omega t - [\beta] \bar{u} \cdot \bar{r})} \\ &= \bar{E}_0 A e^{j(\omega t - [\beta] \bar{u} \cdot \bar{r})} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, ϵ^* : complex permittivity,

$$[\alpha] = [T]^{-1} [\alpha_0] [T], \quad [\beta] = [T]^{-1} [\beta_0] [T],$$

\bar{u} : propagation vector, \bar{r} : position vector,

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

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

$A = e^{-[\alpha] \bar{u} \cdot \bar{r}}$: attenuation coefficient,

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

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

폼코어 샌드위치 구조물에 전기장의 세기(electric field intensity)가 E_0 인 전자기파가 입사되는 경우, m 번째 층에서 전기장 벡터(electric field vector)는 Fig. 2에 도시된 바와 같다.

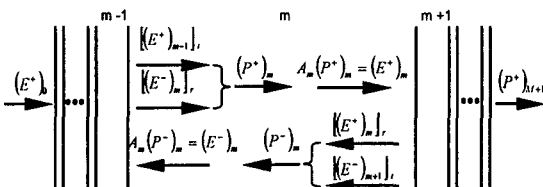


Fig. 2 Schematic drawing showing electric field vectors at the m -th ply

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.⁽⁴⁾

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

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.⁽⁵⁾

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

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

반사율 텐서를 이용하여 전기장 벡터를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$(E^+)_r = -[r] (E^+)_t, \quad (E^-)_r = [r] (E^-)_t \quad (5)$$

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

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

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

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

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

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

임의의 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.

유전자 알고리즘

복합재료에서 적층판의 최적의 적층순서를 찾기 위한 최적화 기법은 다양하게 연구되어져 왔으나 복합재료의 특성상 변수인 적층각이 이산적이기 때문에 이산적인 변수에 적합한 유전자 알고리즘을 이용하는 것이 바람직하다.⁽⁶⁾ 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 전파투과성이 최대가 되는 복합재료 스킨의 적층순서를 찾았다. 유전자 알고리즘은 유전적 계승과 생존경쟁이라는 자연현상을 재생산, 교배, 돌연변이라는 알고리즘 형태로 모델링한 확률적 최적화 기법이다. Fig. 3은 본 연구에서 사용한 단순 유전 알고리즘(Simple Genetic Algorithm: SGA)의 순서도이다.

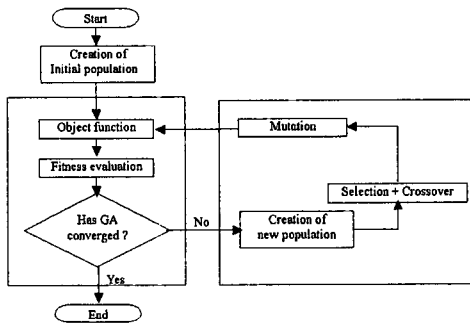


Fig.3 Simple GA procedure

1989년에 Holland에 의해서 개발된 단순 유전 알고리즘은 해를 찾는 능력이 뛰어나지만 국부해에 빠질 우려가 있기 때문에 본 연구에서는 재생산에서 순위에 기초한 선택(Rank-based Selection)과 유전적 계승에서 가장 우수한 개체가 계승되게 하는 엘리트 전략(Elitist Strategy)를 추가하였다.

3. 결과 및 고찰

항공기 레이돔의 소재로 일반적으로 사용되는 폼과 glass/epoxy 복합재료 스킨을 해석 모델의 소재로 선택하였다. Table 1.은 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 [$\Omega^{-1}m^{-1}$]	6.69×10^{-11}	3.3×10^{-2}	2.3×10^{-2}	2.2×10^{-2}
Frequency [GHz]	10			

glass/epoxy 복합재료가 완전 성형된 후의 값이며

폼은 Airex R82.110의 값을 사용하였다.

위 상수를 이용하여 폼과 복합재료의 전자기파 투과 특성을 알아보았다. Fig. 4는 폼과 복합재료의 입사각에 따른 투과율과 반사율을 보여준다. 입사각이 증가하면서 반사율이 감소함으로 상대적으로 투과율이 좋아져야 하지만 Fig. 4로부터 입사각이 증가하면 전자기파의 진행 거리가 증가하기 때문에 투과율이 감소한다는 것을 알 수 있다. Fig. 4 (a)에서 복합재료의 경우 보강섬유 방향의 유전율이 크기 때문에 입사각이 증가하면서 보강섬유 방향으로 진행하는 파의 성분이 커져 감쇠가 많이 일어나게 되고 Fig. 4 (b)의 등방성인 폼보다 경사가 급하게 나타나는 것을 알 수 있다.

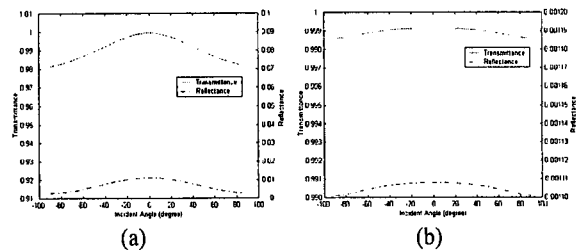


Fig. 4 Transmittance and reflectance of TEM wave through (a) glass/epoxy composites(0.3mm) and (b) foam(7mm) as a function of incident angle (polarization angle $\delta=0$, fiber orientation $\theta=0$)

Fig. 4로부터 복합재료 적층판의 전자기적 특성이 폼코어 샌드위치 구조물에서 전자기파 투과 특성에 지배적인 영향을 미침을 알 수 있으므로 복합재료 스킨의 적층순서를 최적화하면 전자기파 투과 특성을 향상시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 세 층을 적층한 복합재료 스킨을 가지는 폼코어 샌드위치 구조물에서 여러가지 입사 범위에서 투과율을 최적화하기 위해 유전자 알고리즘을 이용하여 최적의 복합재료 스킨의 적층순서를 찾고 그때의 투과율을 나타낸 것이다. 해석의 편의를 위해 양쪽 복합재료 스킨은 서로 대칭되게 적층한다고 가정하였다. Fig. 5 (a), (b)는 입사각이 $\pm 30^\circ$ 내에서 Fig. 5 (c), (d)는 $\pm 45^\circ$ 내에서 투과율이 최대가 되는 적층순서를 찾고(a, c), 그때 폼코어 샌드위치 구조물의 투과율(b, d)을 나타낸 것이다. Fig. 5 (d)는 (b)에 비해서 최고 투과율은 낮으나 $\pm 45^\circ$ 내의 넓은 구역에서 고르게 높은 투과율을 보였다. Fig. 5 (d)에서 편광각 30° 부근에서 투과율이 낮은 부분이 있는데 이는 복합재료 적층판의 두번째 층과 세번째 층에서 적층각이 90° 차이가 나 층 사이에 임계각 존재하기 때문이다.

4. 결론

본 논문에서는 전자기파 입사각에 따른 폼 코어 샌드위치 구조물의 전파투과성을 알아보기 위해서 3D 해석 모델을 개발하고 이를 이용해 복합재료와 폼에서 전자기파 투과 특성을 알아 보았다. 그리고, 전자기파 투과율의 향상을 위해 유전자 알고리즘을 이용하여 폼코어 샌드위치 구조물 최적 설계에 대하여 연구하였다.

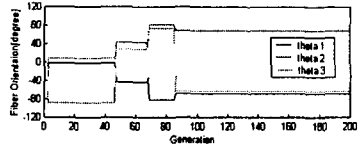
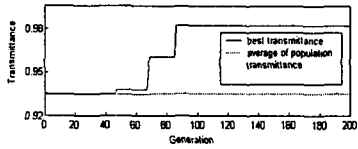
폼과 복합재료에 대한 전자기파 해석결과로부터 복합재료의 경우 이방성 특성에 의해서 폼에 비해 입사각에 의한 투과율 곡선의 굴곡이 심하고, 유전율과 전도율이 커서 감쇠도 많이 발생했음을 알 수 있다. 입사각 $\pm 30^\circ$ 와 $\pm 45^\circ$ 내에서 투과율을 최대화하기 위해 유전자 알고리즘을 이용하여 폼코어 샌드위치 구조물에서 복합재료 적층판의 최적의 적층순서를 알아 보았다. $\pm 45^\circ$ 내로 입사각의 범위를 확대 했을 경우 최고 투과율은 낮아졌으나 범위 내 넓은 구역에서 투과율이 비교적 균일하고 높게 나타났다.

후 기

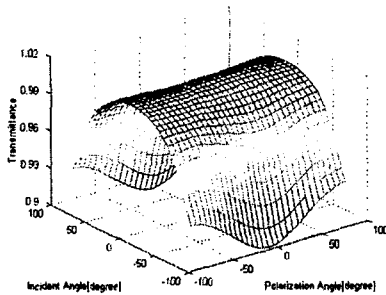
본 논문은 두뇌한국 21 사업의 지원으로 이루어진 것이므로, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

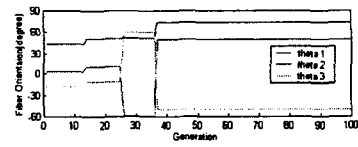
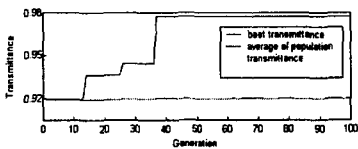
- (1) K. R. Brazier and C. L. Cartwright, "Commercial Aircraft Nose Radomes Using Rigid Foam Core Sandwich Construction", *DIAB*, 1994
- (2) Torres Lima, I., Jr. and Giarola, A.J., "Electromagnetic wave propagation in two dimensional anisotropic dielectric gratings", *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1997, IEEE., 1997, Digest, Vol. 4, pp. 2400-2403
- (3) 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
- (4) 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
- (5) Cornbleet, S., "Microwave Optics", *Academic Press*, 1976
- (6) Jacoby SLS, Kowalik JS, Pizzo JT, "Iterative methods for nonlinear optimization", *Prentice Hall*, 1972



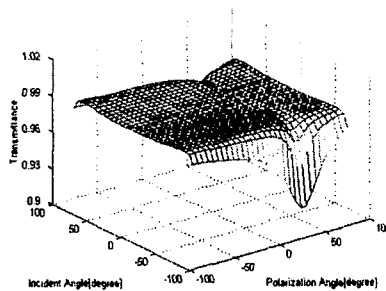
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5 Transmittance versus number of generation and transmittance as functions of polarization and incident angles for (a, b) the maximum transmittance within the range of incident angle between -30 and 30 (stacking sequence : $[765/60]-Foam-[60/\pm 65]$) and (c, d) the maximum transmittance within the range of incident angle between -45 and 45 (stacking sequence : $[70/\pm 45]-Foam-[745/70]$)