

## 특정두께를 갖는 이방성복합재 구조의 전자파 응답특성 연구

A Study on Electromagnetic Absorption Characteristics of  
the Anisotropic Composite Structure with Specific Thickness

정헌달, 김덕주, 이윤상  
국방과학연구소

### ABSTRACT

A user friendly computer code(EMCOMST; Electro-Magnetic response for COMposite STructures) was developed which provides with computations of the response characteristics such as reflectance and transmittance to the incident wave angles, frequencies, composite thicknesses, ply orientations, and types of backplate as the linearly polarized transverse electro-magnetic wave is emitted to the advanced composite structures.

In this investigation were reviewed the electromagnetic characteristics of the continuous orthotropic fiber-reinforced organic matrix composites with or without ferrite fillers, which are actively applied to low-weight and high-strength aircraft structures. Also were calculated the response of the three layered compound structures which have appropriately stacked above-mentioned materials as transmitting layer, absorbing layer, reflection layer, respectively under the specific thickness constraints for mechanical strength design requirements. For the composite structures presented in this study, minimum reflectance value less than -5dB can be obtained in the frequency range of 4 to 12 GHz. In addition, analysis of structures attached isotropic radar absorbing materials(RAM) is facilitated by putting the material properties in the material input card entries adequately.

주요기술용어 : Electromagnetic wave(전자파), Dielectrics(유전체), Orthotropic(직교 이방성),  
Reflectance(반사율), Transmittance(투과율), Reflection Loss(반사손실량)

### 1. 서론

군사용 전파흡수구조물의 설계 목적은 주어진 운용주파수에 대하여 입사레이다파의 에너지를 흡수하고 수신레이다로 돌아가는 에너지를 최소

로 하여 무기체계의 레이다 단면적(Radar cross section)을 감소시키기 위함이다. 그러므로 이를 위해 구조물의 기하학적인 형상화에 의해 조절하거나, 무기체계표면에 전파흡수재(Radar absorbing material)를 부착하여 레이다 단면적을 감

소시킴으로써 무기체계의 생존성을 향상시키고 있다. 그러나, 전파흡수재의 부착으로 인한 외부 형상 변화 및 중량 증가로 항공기와 같은 비행체 구조물은 상당한 성능저하를 초래하게 된다. 따라서 최근에는 비행체 구조물 설계시에 성능 향상을 위하여 비강도 등의 기계적 특성이 우수한 비금속 고등복합재를 사용하고 동시에 낮은 레이더 단면적을 갖는 전파흡수 구조물(Radar absorbing structures)을 개발하는 것이 일반적인 추세이다.<sup>[1][2]</sup> 또한, 각종 무선통신과 전자장비의 사용이 최근 급증함에 의해 발생하는 전자파간의 상호간섭으로 인하여 다수의 수신기와 디지털기에 장애를 주게 되어 오동작으로 인한 사고가 발생할 뿐만 아니라 인체에도 막대한 피해를 주게 된다. 따라서 전자파 차폐 및 EMI 대책으로서 광대역 주파수 범위에서 전자파의 흡수능력이 우수한 전파흡수재의 개발에 대한 연구가 진행되고 있으며 특히 휴대용 전자장비의 경우에는 두께가 얇고 경량인 구조물의 개발에 노력을 기울이고 있다.<sup>[3]</sup> 현재까지 개발되어 사용 중인 여러 가지 형태의 전파흡수재를 고찰하면 다음과 같다. 초기에 개발된 전파흡수재로는 전자기파의 정합에 의한 흡수 원리를 이용한 Salisbury Screen 과 Jaumann 흡수재가 있으며, 흡수재 내부에서 전자기파에너지의 손실을 유도하여 소멸시키는 다층경사흡수재와 피라미드형 전파흡수재가 있다. 또한 이 두 가지 흡수원리를 이용한 단층의 유전손실성 Dallenbach 층과 첼페라이트를 함유한 페인트등이 있다.<sup>[4][5]</sup> 그러나 이런 흡수재들은 협대역 주파수 흡수특성을 가지거나 기계적 특성이 매우 취약한 단점이 있다. 또한 코팅형의 경우 흡수능력이 최대가 되기 위해 전파흡수재의 두께를 일정하게 유지해야 하는 제작상의 문제와 빈번하게 보수를 해야하는 단점이 있다. 또한 이와 같은 전파흡수재에 대응하여 저주파인 VHF 영역에서

부터 수십 GHz 까지의 초광대역범위에서 선택적으로 운용되는 첨단 추적시스템의 개발이 진행되고 있으며 이런 문제점을 동시에 해결하기 위하여 구조물자체가 경량이며 고강도를 유지하고 광대역 주파수범위에서 전파흡수능을 가지는 고등복합재료개발이 시도되고 있다. 대부분의 비금속 유전성 복합재는 상대유전율이 3~4 정도이며, 0.001~0.02 정도의 매우 낮은 손실정접값을 가지므로 유전손실은 미약한 반면 전자기파의 투과는 용이하게 된다. 또한 탄소나 흑연으로 구성된 강화섬유의 경우 유리섬유와는 달리 전자기파에 대한 반사 및 손실 특성이 매우 우수하다.<sup>[1]</sup> 따라서 유전성 고등복합재를 이용한 흡수재의 경우, 일반적으로 전면에는 투과성이 우수한 석영, 유리섬유 및 아라미드섬유로 강화된 플라스틱복합재를 흡수층으로 사용하고, 매트릭스레진에는 전자기파의 손실을 증가시켜 주기 위해 도전손실을 유발하는 탄소, 흑연 등을 첨가하거나 자성손실을 유발하는 철페라이트 화합물을 첨가하는 방안이 모색되고 있다.<sup>[5]</sup>

본 연구에서는 선형편광 TEM파(Transverse Electro-Magnetic Wave)가 이방성 고등복합재로 제작된 구조물에 입사될 때 구조물의 반사율과 투과율이 입사파의 편광각 및 주파수, 구조물의 적층각, 두께, 배면층 종류(금속층 또는 자유공간층)등에 따라서 어떻게 반응하는가를 예측할 수 있는 전산프로그램을 개발하였다. 또한 개발된 전산프로그램을 이용하여 상기에서 언급한 구조용 복합재의 응용가능성을 검토하기 위해 단일복합구조재의 두께 및 주파수에 따른 반사응답특성을 계산하였다. 한편, Glass-Fiber/ Epoxy(또는 Glass-Fiber/Epoxy + Ferrite Powder), Carbon-Fiber/Epoxy 및 Graphite-Fiber/Epoxy 재료를 각각 흡수층, 손실층 및 배면층으로 구성하여 4~12 GHz 주파수범위에서 전자기파 반사

특성을 검토하였다.

## 2. 다층형 흡수구조재의 설계

### 2-1. 이론적 고찰

본 연구에서 핵심이 되는 파동현상에 대한 수학적 해석의 기본은 Maxwell 이론으로 부터 유도되는 일반 파동방정식이다.<sup>[6]</sup> 유전체, 자성체 또는 도체 등의 일반 매질에 대하여 전자기파의 전파를 고려하면

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{i} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

이고 여기서 E는 전기장도벡터, B는 자속밀도벡터, H는 자기장도벡터, i는 전도전류에 의한 전하의 이동에 따른 전류밀도벡터이고 D는 변위전류밀도벡터이다. 상기의 Maxwell 전자기기본방정식이 성립하면 전기장도벡터, E에 대한 Gauss 발산정리와 자기장도벡터, H에 대한 Gauss 발산정리가 성립함을 알 수 있고 벡터량 D와 E, i와 E 및 B와 H사이의 관계는 각각 다음과 같다.

$$\mathbf{D} = [\epsilon] \mathbf{E} \quad (3)$$

$$\mathbf{i} = [\sigma] \mathbf{E} \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = [\mu] \mathbf{H} \quad (5)$$

여기서  $[\epsilon]$ ,  $[\sigma]$  및  $[\mu]$ 은 각각 매질의 유전률행렬, 도전율행렬 및 투자율행렬이며 그들의 크기는 일반적으로 3x3이다. 식(1)에 회전연산(Curl operation)을 취하여 식(2)에서 식(5)까지를 대입

하고 매질내에 진전하가 존재하지 않을 때를 고려하면 다음과 같이 전기장도벡터, E에 대한 파동방정식을 간략하게 쓸 수 있다.

$$\nabla^2 \mathbf{E} = [\mu][\sigma] \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + [\mu][\epsilon] \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (6)$$

식(6)의 해를  $\mathbf{E}(x, y, z, t) = \mathbf{E}_o(x, y, z) e^{j\omega t}$ 라고 가정하여 대입하면 공간좌표상에서의 변수 x, y 및 z 만으로 Helmholtz 방정식을 유도할 수 있다.

즉,  $\nabla^2 \mathbf{E}_o = j\omega[\mu][\sigma] \mathbf{E}_o - \omega^2[\mu][\epsilon] \mathbf{E}_o$ 이며, 여기서  $\omega$ 는 입사되는 전자기파의 주파수이고 특수한 경우로서 전자계의 세기벡터, E<sub>o</sub>의 전자파 평면상의 좌표, x 및 y에 대한 각각의 도함수가  $\frac{\partial \mathbf{E}_o}{\partial x} = \frac{\partial \mathbf{E}_o}{\partial y} = 0$  이고 전자기파가 진행하는 z-방향으로는 전기장도벡터, E<sub>oz</sub>이 없는 선형편광 평면파(Linearly Polarized Transverse Electromagnetic Wave)의 경우에 다음 방정식으로 쓸 수 있다.

$$\left( \frac{\partial^2 \mathbf{E}_{ox}}{\partial z^2} \right) + \omega^2 \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{cx} & \epsilon_{cy} \\ \epsilon_{cx} & \epsilon_{cy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{ox} \\ \mathbf{E}_{oy} \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

또는

$$\nabla^2 \mathbf{E}_o + \omega^2 [\mu][\epsilon_c] \mathbf{E}_o = 0 \quad (8)$$

이며, 여기서  $[\epsilon_c]$ 는 복소유전상수행렬로서 다음과 같다.

$$[\epsilon_c] = [\epsilon] - j \frac{[\sigma]}{\omega} \quad (9)$$

### 2-2. 기하학적 모델

본 연구에서 고려한 기하학적 모델은 Fig.1에서 보는 바와 같이 N개의 적층판으로 구성된 복합구조평판이고 각 적층판재는 기지조직에 단일 방향으로 정렬된 섬유로 되어 있으며 x 축과 섬유

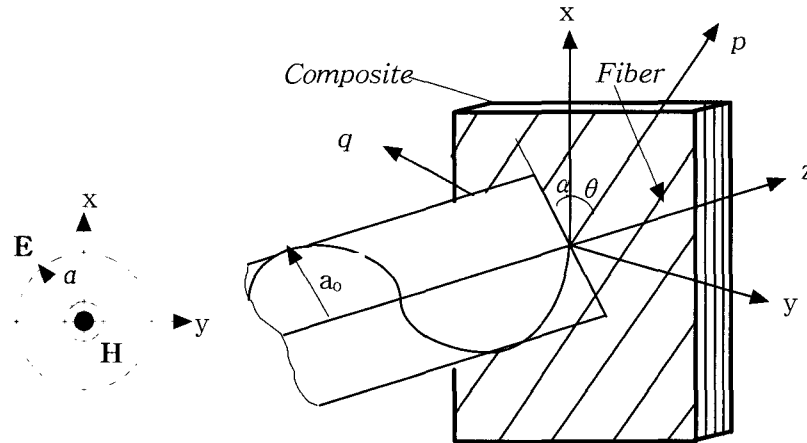


Fig.1. Geometry of the analysis composite structure model and linearly polarized TEM wave

유방향,  $p$  와 이루는 각은  $\theta$  이다. 또 복합판재는 한쪽 면에서 전자기장에 노출되어 있고 입사되는 전자기장은  $xy$ -평면상에서 구속되어 있다. 즉 입사파는 선형편광 평면파이고 파동의 진행방향은 평면에 수직이라고 가정하며  $x$ 축과 전계벡터와 이루는 각을 편광각(Polarization Angle),  $\alpha$  로 표시한다. 본 연구에서는 이론적 개념 및 해석기법을 주로 검토하기 위하여 해석모델을 복합판재의 전자기 특성치가  $z$  축방향으로만 변하는

일차원 문제로 취급하기로 한다.<sup>[7]</sup> Fig.2는 선형편광 평면파가 법선방향으로 입사되는 복합구조물모델로서 첫 번째층은 입사층이고 자유공간으로 되어 있으며  $N+1$  번째층은 완전도체 또는 자유공간모델이다. 각 층간의 경계면에서의 반사계수행렬은  $[r_{ij}]_m$  이고, 각 층내에서 경감계수행렬은  $[A_{ij}]_m$  으로 나타내며, 흡수재내에서 지수함수적으로 감소하는 것으로 가정한다.

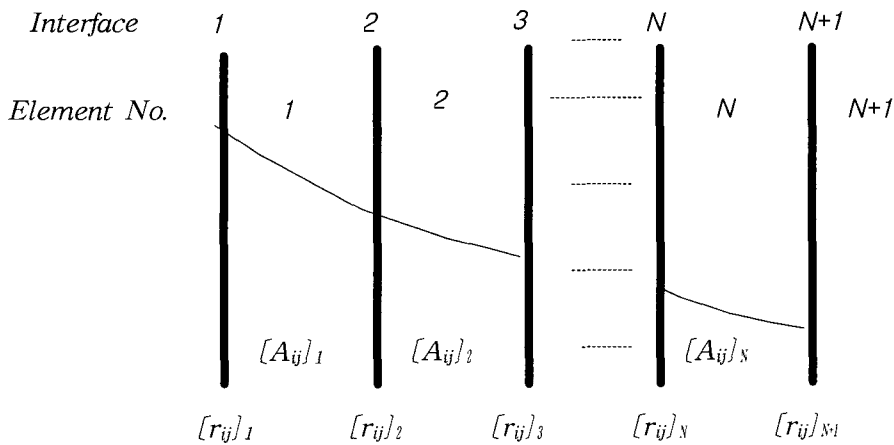


Fig.2. Multilayered radar absorbing structure with TEM wave

2-3. 전파특성식

Fig.3에서 보는 바와 같이 편광된 전자기파는 매질 내에서 투과 또는 반사과정을 거치면서 왼쪽 또는 오른쪽에서 경계면에 접근하게 된다.

경계면, m의 왼쪽 및 오른쪽에서 접근하는 전계벡터를 각각  $(E_i^+)_{m-1}$  및  $(E_i^-)_m$  라고 하면 경계면을 통해서 오른쪽 방향 및 왼쪽 방향으로 나오는 각각의 전계벡터,  $(P_i^+)_{m-1}$  및  $(P_i^-)_{m-1}$  는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(P_i^+)_{m-1} = ([I] + [r_{ij}]_m)(E_i^+)_{m-1} - [r_{ij}]_m(E_i^-)_m \quad (10)$$

$$(P_i^-)_{m-1} = [r_{ij}]_m(E_i^+)_{m-1} + ([I] - [r_{ij}]_m)(E_i^-)_m \quad (11)$$

여기서  $[I]$ 는 단위행렬이며 m+1 번째 경계면에 도달하는 전계벡터,  $(E_i^+)_{m-1}$  은 m 번째 경계면에서 출발하는 전계벡터,  $(P_i^+)_{m-1}$  와 경감계

수행렬,  $[A_{ij}]_m$  과의 곱으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(E_i^+)_{m-1} = [A_{ij}]_m (P_i^+)_{m-1} \quad (12)$$

같은 방법으로 전계벡터,  $(E_i^-)_m$  및  $(P_i^-)_{m-1}$  사이의 관계식도 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(E_i^-)_m = [A_{ij}]_m (P_i^-)_{m-1} \quad (13)$$

식(12) 및 (13)을 식(10) 및 (11)에 대입하면

$$(P_i^+)_{m-1} = \{ [I] + [r_{ij}]_m \} [A_{jk}]_{m-1} (P_k^+)_{m-1} - [r_{ij}]_m [A_{jk}]_m (P_k^-)_m \quad (14)$$

$$(P_i^-)_{m-1} = [r_{ij}]_m [A_{jk}]_{m-1} (P_k^+)_{m-1} + \{ [I] - [r_{ij}]_m \} [A_{jk}]_m (P_k^-)_m \quad (15)$$

이고, 전자기파가 매질내로 들어오는 전면경계면, m=1 에서 다음 식이 성립한다.

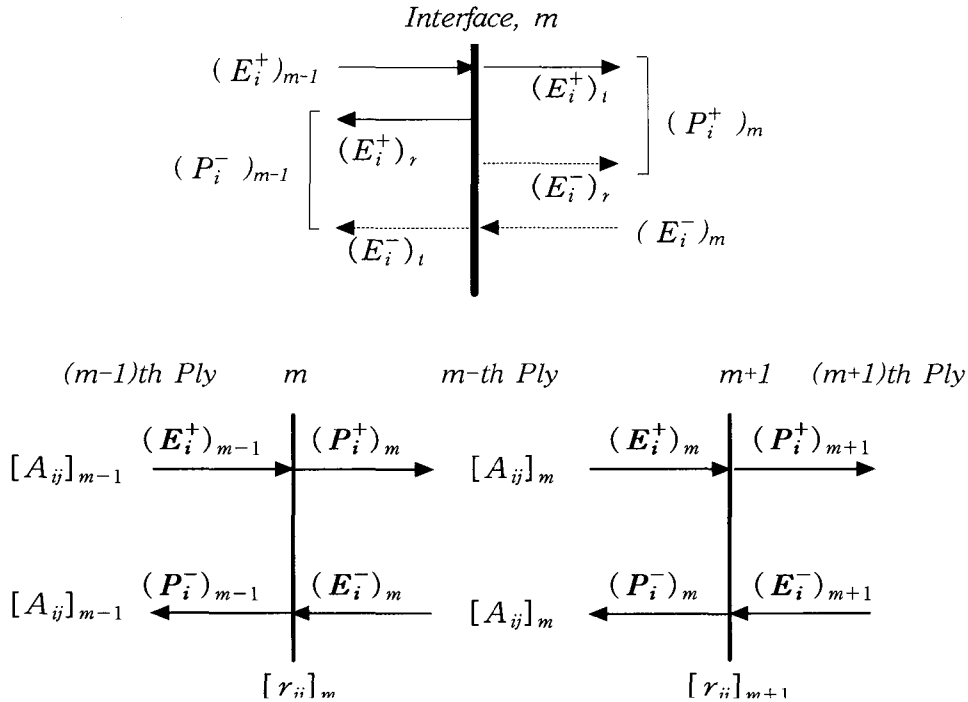


Fig.3. Illustration of the incidence,reflected, and transmitted electric field vectors at an interface, m and in the m-th ply

$$(E_i^+)_o = (E_i)_o \quad (16)$$

$$(E_i^-)_1 = [A_{ij}]_1 (P_j^-)_1 \quad (17)$$

여기서 입사되는 전계벡터,  $(E_1)_o$  및  $(E_2)_o$  은 각각  $(E_i^+)_o$  의 x 및 y 방향의 편광성분이며 식(10) 및 (11)에 대해서  $m=1$  인 경우를 고려하면

$$(P_i^+)_1 = \{[\Gamma] + [\gamma_{ij}]_1\} (E_j^+)_o - [\gamma_{ij}]_1 [A_{jk}]_1 (P_k^-)_1 \quad (18)$$

$$(P_i^-)_o = [\gamma_{ij}]_1 (E_j^+)_o + \{[\Gamma] - [\gamma_{ij}]_1\} [A_{jk}]_1 (P_k^-)_1 \quad (19)$$

이고, 또 전자기파가 들어오지 않는 후면경계층,  $m=N+1$  에서 다음 방정식이 성립한다.

$$(E_i^+)_N = [A_{ij}]_N (P_j^+)_N \quad (20)$$

$$(E_i^-)_{N+1} = 0 \quad (21)$$

식(10) 및 (11)에 대해서  $m=N+1$  인 경우를 고려하면

$$(P_i^+)_N = \{[\Gamma] + [\gamma_{ij}]_{N+1}\} [A_{jk}]_N (P_k^+)_N \quad (22)$$

$$(P_i^-)_N = [\gamma_{ij}]_{N+1} [A_{jk}]_N (P_k^+)_N \quad (23)$$

이고, 정리하면 N개의 복합재로 제작된 판재에 대하여 식(14), (15), (18), (19), (22) 및 (23)은  $2N+2$ 개의 미지수,  $P_i^+$  및  $P_i^-$  를 갖는 연립방정식이다. 식(22)를  $(P_i^+)_N$  에 대해서 풀고 이를 식(23)에 대입하여 다시 쓰면

$$(P_i^+)_N = [A_{ij}]_N^{-1} \{[\Gamma] + [\gamma_{jk}]_{N+1}\}^{-1} (P_k^+)_N \quad (24)$$

$$(P_i^-)_N = [\gamma_{ij}]_{N+1} \{[\Gamma] + [\gamma_{jk}]_{N+1}\}^{-1} (P_k^+)_N \quad (25)$$

이 되고, 식(24) 및 (25)를 간단한 형태로 쓰면

$$(P_i^+)_N = [\xi_{ik}]_{N+1} (P_k^+)_N \quad (26)$$

$$(P_i^-)_N = [\eta_{ik}]_{N+1} (P_k^+)_N \quad (27)$$

이다. 여기서

$$[\xi_{ik}]_{N+1} = [A_{ij}]_N^{-1} \{[\Gamma] + [\gamma_{jk}]_{N+1}\}^{-1} \quad (28)$$

$$[\eta_{ik}]_{N+1} = [\gamma_{ij}]_{N+1} \{[\Gamma] + [\gamma_{jk}]_{N+1}\}^{-1} \quad (29)$$

이며 이 행렬은 매질내에서의 경감계수행렬과 경계면에서의 반사계수행렬로 구성되어 있고 매질의 전자기특성치와 두께가 주어지면 계산되는

값이며 참고문헌<sup>[8]</sup>로부터 계산과정을 확인할 수 있다. 또 식(14)를  $m=N-1$ 인 경계면에서  $(P_0^+)_N$  향으로 전계벡터를 구하기 위해 식(14)에 식(26)과 (27)을 대입하면

$$(P_i^+)_N = [A_{ij}]_N^{-1} \{[\Gamma] + [\gamma_{jk}]_N\}^{-1} * \{ (P_k^+)_N + [\gamma_{ki}]_N [A_{lp}]_N (P_p^-)_N \}$$

또는

$$(P_i^+)_N = [\xi_{ik}]_N (P_k^+)_N \quad (30)$$

이다. 식(15)에 식(30)과 (27)을 대입하면 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$(P_i^-)_{N-1} = [\gamma_{ij}]_N [A_{jk}]_{N-1} (P_k^+)_N + \{[\Gamma] - [\gamma_{ij}]_N\} [A_{jk}]_N (P_k^-)_N$$

또는

$$(P_i^-)_{N-1} = [\eta_{ik}]_N (P_k^+)_N \quad (31)$$

이고, 같은 방법으로  $m=2$ 일 때까지 반복계산한다. 따라서

$$(P_i^+)_1 = [\xi_{ik}]_2 (P_k^+)_N \quad (32)$$

$$(P_i^-)_1 = [\eta_{ik}]_2 (P_k^+)_N \quad (33)$$

이다. 여기서 식(18)을  $(E_i^+)_o$  에 대해서 풀고 식(32) 및 (33)을 대입하면

$$(E_i^+)_o = [\xi_{ik}]_1 (P_k^+)_N \quad (34)$$

이고 다시 이 식을 식(2-19)에 대입하여 정리하면

$$(P_i^-)_o = [\eta_{ik}]_1 (P_k^+)_N \quad (35)$$

이다. 식(34)를  $(P_k^+)_N$  에 대해서 풀고 이 값을 식(35)에 대입하면 첫 번째 경계면,  $m=1$ 에서 반사전계벡터,  $(P_i^-)_o$  를 구할 수 있다. 즉,

$$(P_i^+)_N = [\xi_{ij}]_1^{-1} (E_j^+)_o \quad (36)$$

또는

$$(P_i^+)_N = [T_{ij}] (E_j^+)_o \quad (37)$$

이고

$$(P_i^-)_o = [\eta_{ij}]_1 [\xi_{jk}]_1^{-1} (E_k^+)_o \quad (38)$$

또는

$$(P_i^-)_o = [R_{ij}] (E_k^+)_o \quad (39)$$

이때  $[T_{ij}]$  및  $[R_{ij}]$ 을 각각 전체투과계수 (Overall Transmission Coefficient)행렬 및 전체반사계수 (Overall Reflection Coefficient)행렬 이라고 하며 다음과 같다.

$$[T_{ij}] = [\xi_{ij}]_1^{-1} \quad (40)$$

$$[R_{ij}] = [\eta_{ij}]_1 [\xi_{jk}]_1^{-1} \quad (41)$$

또 반사율(Reflectance)은 입사에너지에 대한 반사에너지의 비로서 표시할 수 있고 투과율 (Transmittance)은 입사에너지에 대한 투과에너지의 비로서 나타낼 수 있으며 입사에너지,  $e_{inc}$ , 반사에너지,  $e_r$ , 및 투과에너지,  $e_t$ 는 각각 다음과 같다.

$$e_{inc} = \frac{|(E_i^+)_o|^2}{2Z_o} \quad (42)$$

$$e_r = \frac{|(P_i^-)_o|^2}{2Z_o} \quad (43)$$

$$e_t = \frac{|(P_i^-)_{N+1}|^2}{2Z_o} \quad (44)$$

여기서  $Z_o$ 는 자유공간의 임피던스이고  $120\pi$  [ $\Omega$ ]의 값을 갖는다. 식(42)부터 (44)를 이용하여 반사율과 투과율을 구하면 각각 다음과 같다.

$$R \equiv \frac{e_r}{e_{inc}} = \frac{|(P_i^-)_o|^2}{|(E_i^+)_o|^2} \quad (45)$$

$$TR \equiv \frac{e_t}{e_{inc}} = \frac{|(P_i^-)_{N+1}|^2}{|(E_i^+)_o|^2} \quad (46)$$

또 식(45)는 전력량의 비로 표시된 반사율이며

반사손실량(Reflection loss, dB)으로는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\text{Reflection Loss} \equiv 10\log_{10}R[\text{dB}] \quad (47)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 사용재료의 복소유전율 및 복소투자율

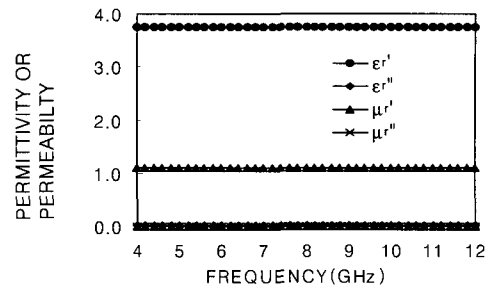
본 연구에 사용된 섬유강화복합재료의 종류는 Table.1과 같다.<sup>[8]</sup> GLA시편은 매트릭스로서 에폭시수지인 YD-011과 YD-128을 혼합하여 사용하고, E-Glass Mat로 만들어진 프리프레그를 이용하여 제조한 라미네이트이다. 또한 상기의 GLA시편에 저주파역에서의 전파흡수능을 향상시키기 위해 일반적인 고상반응법을 이용하여 평균 입도가 4  $\mu\text{m}$ 인 스피넬 결정구조의 Ni-Zn계 페라이트분체를 각각 30wt%, 40wt% 첨가한 GLF30, GLF40 시편의 재료정수를 이용하였다. CAR시편은 매트릭스로 YD-128 에폭시를 사용하고, 유리섬유에 비해 유전손실이 큰 PAN계 Toray T-300 탄소섬유를 등축으로 배열한 라미네이트이다. GRA시편은 배면반사체로 반사가 매우 큰 특성을 가진 그래파이트(AS)를 강화섬유로 사용하고 매트릭스로는 에폭시수지인 3501-6을 사용한 재료이다.

Table 1. Fiber-reinforced composites used in multi-layered absorber

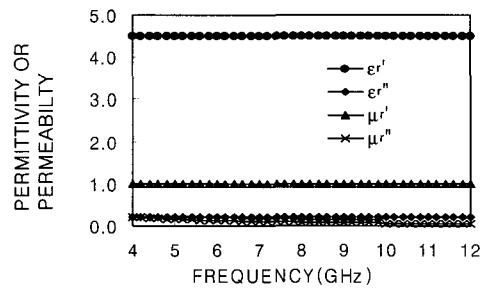
Mat'l I.D	Fiber	Ply 방위	Filler	Matrix
GLA	E-Glass	Fabric	None	Epoxy
GLF30	E-Glass	Fabric	NiZn Ferrite (30wt%)	Epoxy
GLF40	E-Glass	Fabric	NiZn Ferrite (40wt%)	Epoxy
CAR	Carbon (T-300)	Fabric	None	Epoxy
GRA	Graphite(AS)	0°	None	Epoxy

Fig.4는 상기에서 언급한 섬유강화복합재료의 복소유전율과 복소투자율을 나타내고 있다. Fig.4(a)는 페라이트가 첨가되지 않은 GLA시편으로 주파수에 따라 거의 일정한 값을 갖고,  $\mu_r''$  과  $\epsilon_r''$ 은 무시할 정도로 작으므로 본 연구에서는  $\epsilon_r' \approx 3.75$ ,  $\mu_r' \approx 1.1$ ,  $\epsilon_r'' = \mu_r'' = 0$  으로 가정하였다. Fig.4(b)는 GLA시편에 Ni-Zn계 페라이트를 30wt% 첨가한 GLF30시편의 재료정수로 페라이트의 재료특성에 의해  $\epsilon_r'$ 은 4.5로 증가하고,  $\mu_r'$ 은 1.0정도로 감소하며 이들 재료 특성치도 주파수에 따라 거의 일정한 값을 갖는 것으로 가정하였다. 그러나 페라이트 첨가에 의해 투자손실항인  $\mu_r''$ 은 저주파역인 4GHz에서 0.21 정도의 값을 갖고, 주파수 증가에 따라 서서히 감소하는 특성을 나타낸다. Fig.4(c)와 같이 페라이트 함량이 40wt%로 더욱 커지면  $\epsilon_r'$ 은 4.75로 더욱 증가하고  $\mu_r''$ 은 4GHz에서 0.31 정도의 값을 갖는다. Fig.4(d)는 섬유배열이 등방성인 CAR시편의 복소유전율과 복소투자율을 나타낸다.  $\epsilon_r'$ 은 4GHz에서 23 정도의 값으로부터 서서히 감소하여 12GHz에서는 15 정도의 값을 가지며,  $\epsilon_r''$ 은 주파수 증가에 따라 약간 증가하는 경향을 보이나 대략 7.5 정도의 값을 가진다.

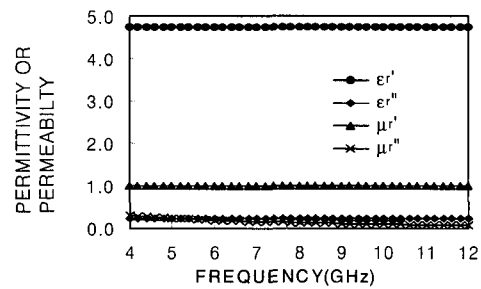
GLA, GLF30 및 GLF40의 유리섬유복합재의 복소유전율과 복소투자율은 섬유에 평행인 방향과 수직인 방향으로 거의 동일한 값을 가지며, 탄소섬유복합재인 CAR의 경우에도 섬유배열이 fabric이므로 방향에 따른 재료특성차이는 없는 것으로 고려하였다. 그러나 탄소섬유복합재료의 경우 탄소섬유의 높은 전기전도도로 인해 전기적으로 부도체인 유리섬유와는 달리 유전상수와 유전손실이 상당히 크게 되고, 또한 섬유배열에 따른 이방성이 두드러진 특징을 가진다.



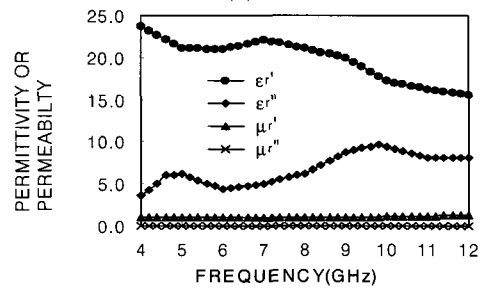
(a) GLA



(b) GLF30



(c) GLF40



(d) CAR

Fig.4. Material constants ( $\epsilon_r, \mu_r$ ) vs frequency spectra of the fiber-reinforced composites



3-2. 전산프로그램의 검증

본 연구에서 개발한 전산프로그램의 검증을 위해서 등방성(Isotropic)재료와 직교이방성(Orthotropic) 섬유강화복합재료에 대하여 반사율을 고찰하였다. 이때 사용된 이론식은

$$R = \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right|^2$$

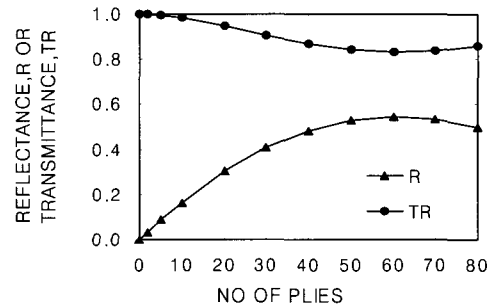
이며, 이 식을 이용하여 계산된 해는 본 전산프로그램(EMCOMST)을 이용하여 구한 해와 정확히 일치함을 확인하였다.<sup>[9]</sup> 또한 상기 Table.1에서 언급한 각각의 재료들과 CAR 시편과 동일한 성분으로 0° /45° 방위로 적층한 CFU-45를 배면층으로 설계하여 제작한 3층형 복합재구조물인 GLA(5mm)/CAR(2mm)/CFU-45 (3mm)와 GLF40(4mm)/CAR(2mm)/CFU-45 (3mm)(이때 괄호안 수치는 각 층의 두께임)에 대하여 4~12GHz의 주파수범위에서의 반사손실량(Reflection Loss) 실측치<sup>[8]</sup>와 본 전산프로그램(EMCOMST)을 이용하여 구한 반사손실량이 잘 일치함을 확인하므로써 본 전산프로그램(EMCOMST)의 신뢰성을 확보할 수 있었다.

3-3. 단일복합재의 두께 및 주파수에 따른 응답특성

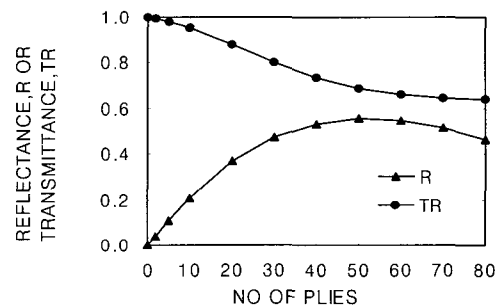
3-3-1 일정주파수에서의 두께에 따른 응답특성  
입사파의 주파수를 4GHz로 고정하고 GLA, GLF30, GLF40, CAR 및 GRA의 두께에 따른 반사특성을 검토하기 위해 반사율과 투과율을 고찰하였다.

Fig.5(a)는 프리프레그 한 장 두께가 0.15mm인 E-Glass/Epoxy복합재(GLA)의 두께에 따른 반사특성을 나타낸 그림으로 80 plies의 두께까지 최대 반사율(Reflectance), R은 0.54 정도이며, 반면에 투과율(Transmittance), TR은 최소 0.83이상의 큰 값을 가진다. 또한 Fig.5(b) 와

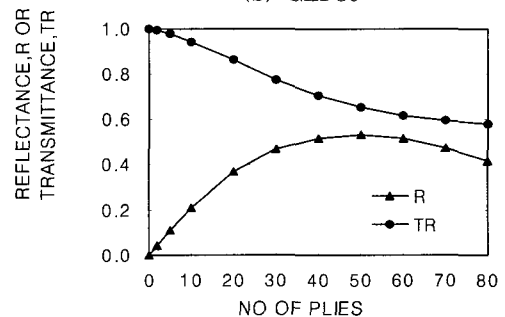
(c)는 매질내 흡수특성이 우수한 Ni-Zn계 페라이트자성체를 각각 30wt%, 40wt% 첨가하여 응답특성을 고찰한 결과이다. Fig.5(b)에서 보는



(a) GLA



(b) GLF30



(c) GLF40

Fig.5. The vibration in reflectance and transmittance of E-Glass/Epoxy unidirectional composite as a function of the number of plies (h0=0.15mm, Fabric, f=4.0GHz)

바와 같이 GLF 30의 80 ply의 두께에서 반사율은 0.46이고 투과율은 0.64로 감소하고, 40wt% 첨가하게 되면, 그림 5(c) 에서와 같이 반사율과 투과율은 각각 0.42, 0.58로 더욱 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 페라이트 첨가에 의하여 Glass-Fiber/Epoxy복합재 구조물의 전자기파에 너지의 흡수손실량이 증가함을 알 수 있다.

Fig.6은 CAR시편의 두께에 따른 응답특성을 나타낸 그림으로, 반사율과 투과율은 두께에 따라 매우 민감하게 변함을 알 수 있다. Fig.4(d)에서와 같이 탄소섬유는  $\epsilon_r''$ 이 큰 유전손실특성을 가지므로 Glass-Fiber /Epoxy복합재에 비해 흡수손실이 증가하게 되나 반면에 반사도 증가하게 되어 탄소섬유복합재만으로는 흡수재로서 사용하기 어렵다.

Fig.7은 섬유배열이 [0]M 적층인 Hercules AS4/3501-6 Graphite/Epoxy인 GRA시편의 두께에 따른 응답특성을 나타낸 그림으로 두께가 얇은 경우, 즉 20 ply 이하인 경우에는 편광각에 따라 반사율과 투과율은 상당한 차이가 있다. 편광각,  $\alpha=90^\circ$  인 경우에는 반사율은 낮고 대부분의 전자기파는 계면을 통하여 투과되지만 편광각이

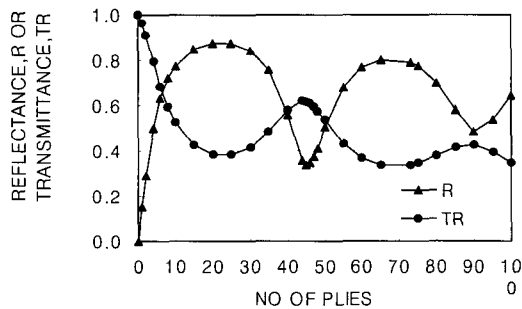
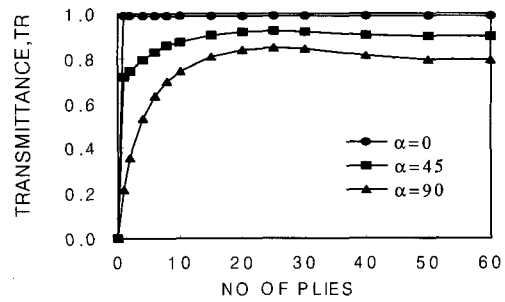
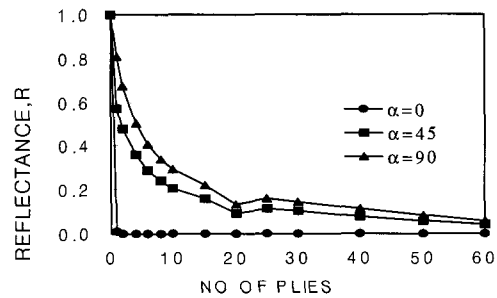


Fig.6. The variation in reflectance and transmittance of T-300 Carbon-Fiber/Epoxy fabric composite as a function of number of plies ( $h_0=0.165\text{mm}$ , Fabric,  $f=4.0\text{GHz}$ )



(a) reflectance



(b) transmittance

Fig.7. The variation in reflectance and transmittance of AS/3501-6 Graphite-Fiber/Epoxy fabric composite as a function of number of plies ( $h_0=0.165\text{mm}$ , [0]M,  $f=2.45\text{GHz}$ )

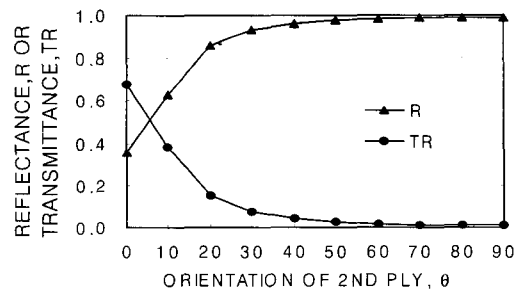


Fig.8. The variation in reflectance and transmittance of AS/3501-6 Graphite-Fiber /Epoxy fabric composite with fiber orientation angle of second ply for two-ply laminate( $h_0=0.165\text{mm}$ , (0/ $\theta$ ),  $f=2.45\text{GHz}$ ,  $\alpha=90^\circ$ )

감소함에 따라서 반사율은 증가하고  $\alpha=0^\circ$  인 경우에는 반사율은 대단히 높아서 거의 1.0에 도달하고 실제적으로 모든 전자기파는 반사해 버린다. 그러므로 편광각이  $90^\circ$  근방에서만 투과특성이 양호하고 그의 경우에는 거의 투과되지 않는다는 사실을 알 수 있다. 그러나 두께가 20 ply 이상인 경우에는 편광각( $\alpha$ )에 무관하여 반사율은 최소 0.8이상의 매우 큰 반사특성을 가진다. 이는 Table.2에서와 같이 유전손실정접값이 섬유에 평행인 방향과 수직인 방향에 대해 각각 유리섬유에 비해 매우 큰 값을 가지므로 표면에서의 전파 반사율이 크다. 따라서 표면에서의 반사율이 크기 때문에 전파흡수용 복합재의 배면층에서 완전반사체로 매우 적합하다.

Table.2. Material constant and tangent loss of Graphite/Epoxy composite

Present Model (AS/3501-6 Graphite/Epoxy)		
재료정수	유전체	자유공간층
$\epsilon_{pp}'$	1.0	1.0
$\epsilon_{qa}'$	33.0	1.0
$\tan \delta \epsilon_{pp}$	25000.0	0.0
$\tan \delta \epsilon_{qa}$	0.6191	0.0
$\mu_{pp}'$	1.0	1.0
$\mu_{qa}'$	1.0	1.0
$\tan \delta \mu_{pp}$	0.0	0.0
$\tan \delta \mu_{qa}$	0.0	0.0
주파수, GHz	2.45	
Ply 두께, m	0.000165	

\* Normal Incidence and Arbitrarily Polarized Wave

Fig.8은 다층구조물,  $[0/\theta]$ 로 설계할 때 편광각이  $\alpha=90^\circ$  인 경우 2번째 층의 섬유방향에 따른 반사율 및 투과율을 나타낸다.  $\theta$ 가  $10^\circ$  이상에서 계속 증가함에 따라서 반사율은 급속히 증가함을 알 수 있고 이것은 배면층의 섬유방향,  $\theta$

에 의한 반사율이 지배적으로 작용하기 때문이다.

상기에서 알 수 있듯이 얇은 두께의 E-Glass/Epoxy 복합재(GLA)는 전자기파의 높은 투과성이 요구되는 항공기 레이돔 외피구조물에 적용할 수가 있으며, 또한 전자기파에 민감한 앞전플랩의 구조물외피에 적용하여 대부분의 입사에너지가 구조물 내부로 투과시켜 전파흡수기능을 가진 내부의 하니컴구조에 의해 손실되도록 설계할 수 있다.<sup>[2]</sup>

3-3-2 일정두께에서의 주파수에 따른 응답특성

본 절에서는 시편의 두께를 12mm로 고정시킨 GLA, GLF40 및 CAR시편에 대하여 4~12GHz 범위에서 주파수에 따른 전자기파 응답특성을 고찰하였다.

흡수재 후면이 자유공간에 개방된 경우의 반사율과 투과율은 Table.3과 같다. GLA는 전 주파수범위에서 투과율이 최소 0.82 이상으로 상당히 크며, 페라이트가 첨가된 GLF40의 경우에도 투과율은 0.55~0.63정도로 감소하기는 하나 여전히 투과량이 많음을 알 수 있다. 한편 탄소섬유 복합재인 CAR의 경우에는 투과율이 저주파역인 4GHz에서는 0.34로 GLF40에 비해서 더욱 감소

Table 3. The reflectance and transmittance of GLA, GLF40 and CAR (Back surface open to free space)

Mat GHz	GLA		GLF40		CAR	
	R	TR	R	TR	R	TR
4	0.50	0.86	0.43	0.57	0.79	0.34
5	0.34	0.93	0.28	0.61	0.59	0.27
6	0.05	0.98	0.23	0.63	0.66	0.28
7	0.26	0.95	0.39	0.60	0.67	0.22
8	0.47	0.87	0.49	0.56	0.62	0.16
9	0.54	0.82	0.50	0.55	0.65	0.06
10	0.52	0.84	0.41	0.58	0.63	0.04
11	0.38	0.90	0.25	0.62	0.60	0.04
12	0.10	0.96	0.26	0.62	0.58	0.02

하였으며 주파수가 증가함에 따라 거의 투과가 없는 것으로 나타났으며, 모든 주파수 범위에서 반사율은 최소 0.58이상의 높은 값을 갖는다.

따라서 입사되는 전자파가 흡수재 후면으로 빠져 나가는 것을 방지하기 위해 상기의 세가지 시편에 대하여 GRA를 배면체로 사용한 경우의 반사 및 투과특성을 Table.4에 나타내었다. 이때 GRA는 섬유배열이 [0]8의 섬유배향을 가지며 완전반사체인 금속과 유사한 반사특성을 가진다. 세가지 경우 모두 표에서 보는 바와 같이 전 주파수 범위에서 투과율은 0.02이하로 대폭 감소하였으나, 반사율은 GLA의 경우 전 주파수 범위에서 최소 0.93이상의 매우 큰 값을 나타내었다. 또한 GLF40과 CAR의 경우 GLA에 비해 반사율은 감소하였으나, 여전히 큰 반사특성을 나타낸다.

일반적으로 항공기 구조물설계시 작용하중에 의해서 구조물의 두께가 결정되고 이에 따라 구조물의 중량도 계산된다. 따라서 전자기와 흡수구조물을 설계할때는 최소의 구조중량을 유지하기 위해서 기계적 강도요구조건을 만족하는 두께로 제한을 받게 되며, 또한 특정 주파수범위에서 원하는 흡수특성을 가져야 한다. 초음속항공기의 꼬리날개 외피구조물은 구조강도측면에서 약

80plies의 두께가 요구되며 이때의 반사율은 상기에서 언급한 바와 같이 대단히 크고 흡수손실이 작으므로 전자기와 흡수구조물로 이용하기에는 대단히 불리하다.

3-3-3. 3층형 복합재 구조물의 응답특성

2.2절에서 언급한 바와 같이 4~12 GHz 범위에서 2개층의 흡수재로는 13mm 두께의 외피구조물에 대하여 전파흡수능을 향상시키기 어렵다. 따라서, 흡수재전면에서의 반사를 줄이기 위해 Glass-Fiber/Epoxy복합재인 GLA와 GLF40을 흡수층으로 하고, 흡수재 내부에서의 전자파 흡수손실을 증가시키기 위해 CAR를 손실층으로, 또한 후면에서의 투과를 없애기 위해 반사특성이 우수한 GRA를 배면반사체로 구성된 3층형 복합재구조를 설계하였다.

Fig.9는 흡수층과 손실층의 전체두께를 12mm로 고정시키고 두 층사이의 두께비를 5/7로 조정하여 [흡수층/손실층/배면층]의 3개층으로 구성된 흡수재의 반사특성을 나타낸다. 이때 배면층은 1mm로 고정시켰다.

먼저 흡수층이 E-Glass/Epoxy 복합재인 [GLA/CAR/GRA]의 경우 4GHz에서 -1.4dB정도로 매우 작은 반사손실량을 가지며, 주파수가 증가함에 따라 반사손실량은 점차적으로 증가하여 6.6GHz와 7.6GHz에서 각각 -13.7dB와 -16.1dB의 Double Peak형태의 최대 반사손실을 나타내고, 그 이상의 주파수에서는 점차적으로 반사손실량이 감소하여 -5dB정도를 유지한다. 특히 흡수층이 GLA인 경우 5GHz이하의 저주파대역에서 반사특성이 불량하게 나타난다.

따라서 저주파대역에서의 흡수성능이 뛰어난 페라이트를 30wt% 첨가한 GLF30을 흡수층으로 한 [GLF30/CAR/GRA]의 경우 4GHz에서 -3.7dB정도로 반사손실량이 증가하고, 5.6GHz

Table 4. The reflectance and transmittance of GLA, GLF40 and CAR (Back surface attached to GRA)

Mat. / GHz	GLA		GLF40		CAR	
	R	TR	R	TR	R	TR
4	0.97	0.02	0.58	0.01	0.50	0.02
5	0.98	0.02	0.70	0.01	0.72	0.02
6	0.98	0.02	0.69	0.01	0.67	0.02
7	0.98	0.02	0.58	0.01	0.64	0.01
8	0.97	0.02	0.28	0.01	0.68	0.01
9	0.93	0.02	0.25	0.01	0.64	0.01
10	0.94	0.02	0.58	0.01	0.63	0.01
11	0.97	0.01	0.70	0.01	0.60	0.01
12	0.97	0.01	0.69	0.01	0.58	0.01

와 7.8GHz에서 각각 -15.4dB와 -23.5dB의 Double Peak 형태의 최대 반사손실을 가진다. 또한 -9dB를 기준으로 한 흡수대역폭은 5.0~8.8GHz에 걸쳐 있어 비대역폭 특성이 GLA 흡수층보다 우수하고 특히 6GHz 이하의 저주파대역에서의 반사손실량은 상당히 증가하였다.

페라이트첨가량을 40wt%로 증가시킨 GLF40을 흡수층으로 한 [GLF40/CAR/GRA]의 경우 저주파대역에서의 반사손실량이 더욱 증가하여 4GHz에서 -5dB 정도이며 최대반사손실도 5.4GHz와 7.8GHz에서 각각 -18.1dB와 -17.7dB의 Double Peak 형태이며 -9dB를 기준으로 한 흡수대역폭 특성도 향상되었다. 따라서 4~12GHz 주파수범위에서 반사손실량을 -5dB 이상으로 유지하여 입사에너지의 66%를 감소시킬 수 있었다. 그러나 본 연구에서 사용한 시편의 기계적 강도에

대한 허용치를 이용하여 경량 복합재구조물 설계시에 구조물의 두께가 더 이상 요구되지 않음을 입증하여야 할 것이다.

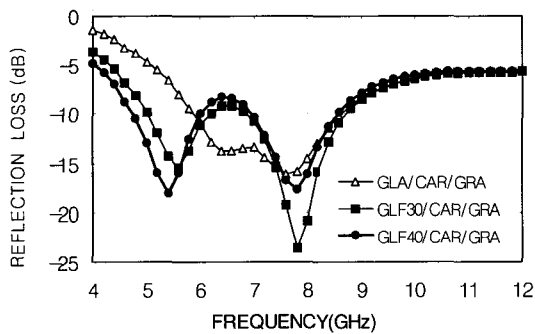


Fig.9. Reflection loss determined in triple-layered composites

#### 4. 결론

본 연구에서는 선형편광 TEM파(Linearly

Polarized Transverse Electro-Magnetic Wave)가 직교이방성복합재로 제작된 구조물에 입사될 때 구조물의 반사율, 투과율 및 흡수율이 입사파의 편광각 및 주파수, 구조물의 적층각, 두께, 배면층종류(금속층 또는 자유공간층)등에 따라서 어떻게 반응하는가를 예측할 수 있는 전산프로그램(EMCOMST : Electro-Magnetic response for COMposite STRuctures)을 개발하였다. 특히 개발된 전산프로그램의 검증을 위해서 등방성 유전체와 직교이방성 섬유강화복합재료에 대하여 이론식에 의한 반사율과 전산프로그램을 이용하여 계산된 해가 정확히 일치하였고, 실제 제작된 섬유강화 복합재에 대하여 주파수에 따른 반사손실량과 전산프로그램(EMCOMST)에 의해 계산된 반사손실량이 잘 일치됨을 확인하므로써 본 전산프로그램(EMCOMST)의 신뢰성을 확보할 수 있었다.

또한 일반적으로 획득가능한 구조용 복합재의 응용가능성을 검토하기 위해 Glass-Fiber/Epoxy (GLA)와 NiZn계 페라이트가 각각 30wt%, 40wt% 첨가된 Glass-Fiber/Epoxy (GLF30, GLF40)의 유리섬유복합재료와 Carbon-Fiber/Epoxy(CAR) 및 Graphite-Fiber/Epoxy (GRA) 복합재료의 전자기파 반사특성을 전산프로그램(EMCOMST)을 이용하여 검토하였고, 4~12GHz의 주파수범위에서 다층의 혼성형 흡수재를 설계하기 위해 전면은 Glass-Fiber/Epoxy복합재인 GLA와 GLF40을 흡수층으로 하고, CAR를 손실층으로, 또한 후면에서의 투과를 없애기 위해 반사특성이 우수한 GRA를 배면반사체로 구성한 3층형 복합재구조물을 설계하여 반사손실량을 계산하였다. 이때 흡수층과 손실층의 전체두께를 12mm, 배면층은 1mm로 고정시키고 흡수층과 손실층의 두께비를 임의로 5/7로 조정하였다. 흡수층이 E-Glass/Epoxy복합재인 [GLA/

CAR /GRA]의 경우 4GHz에서 -1.4dB정도로 8GHz이하의 저주파대역에서 흡수성능이 불량하였고, 페라이트를 30wt% 첨가한 GLF30을 흡수층으로 한 [GLF30/CAR/GRA]의 경우에는 4GHz에서 -3.7dB정도로 반사손실량이 증가하고 비대역폭 특성이 GLA흡수층보다 우수하였으며 특히 6GHz 이하의 저주파대역에서의 반사손실량이 상당히 증가하였다. 또한 페라이트첨가량을 40wt%로 증가시킨 [GLF40/CAR/GRA]의 경우에는 저주파대역에서의 반사손실량이 더욱 증가하였고 흡수대역폭 특성도 향상되었다. 따라서 [GLF40/CAR /GRA]의 3층형 복합재를 이용하면 4~12GHz 주파수범위에서 반사손실량을 최대 -5dB 이상으로 유지하여 입사에너지의 66%를 감소시킬 수 있다.

본 연구에서 수행된 3층형 복합재를 이용한 흡수재는 흡수층과 손실층의 두께비를 임의로 5/7로 조정하여 설계되었으나, 흡수구조재의 성능을 향상시키기 위해서는 각 층의 두께를 변수로 하여 최적화 연구가 반드시 필요하며 또한 구조의 기계적 강도측면에서도 변위나 응력을 구속조건으로 하는 최소 중량에 대한 최적화업무가 앞으로 수행되어야 할 것이다.

EMCOMST전산프로그램을 이용하면 등방성 재료의 RAM뿐만아니라 다층의 복합재로 설계된 구조물에 대한 전자기파 반사특성을 예측할 수 있고 RAM이 부착된 복합재구조물에 대한 응답 특성도 예측할 수 있기 때문에 그 활용도가 대단할 것으로 기대된다.

## 참고 문헌

1. Roger A. Stonier "Stealth Aircraft & Technology From World War II to the Gulf, Part II: Application and Design" SAMPE Journal, Vol.27, No.5, Sep/Oct 1991, pp9
2. Roger A. Stonier "Stealth Aircraft & Technology From World War II to the Gulf, Part I: History and Background" SAMPE Journal, Vol.27, No.4, Jul/Aug 1991, pp9
3. 정연춘, 박동철 "Broadband Absorption Performance of Ferrite/Ferrite Hybrid Absorber" Telecommunication Review, 제7권 6호, 1997, pp765
4. K. J. Vinoy, R. M. Jha "Radar Absorbing Materials: From Theory to Design and Characterization" Kluwer Academic Pub., 1996
5. E. F. Knott, J. F. Schaeffer, M. T. Tuley, "Radar Cross Section" 2nd ed. Artech House, Feb 1993, pp297
6. Edward C. Jordan, "Electromagnetic Waves and Radiating Systems" 2nd ed. Prentice-Hall Inc. 1968
7. W. I. Lee, G. S. Springer, "Interaction of Electromagnetic Radiation with Organic Matrix Composites", J. of Comp. Mat'l, Vol.18, July 1984, pp357
8. 강호중, 김성수, 홍주화 "RCS 감소성 복합재료 연구" TEMD-411-961336, 국방과학연구소, 1996
9. 정헌달, 김덕주 "전자파 흡수특성을 가진 복합재 구조물 설계에 관한 연구" ASDC-401-971605, 국방과학연구소, 1997