

탄소섬유강화 복합재료의 전자파 차폐특성

심환보 · 서민강 · 박수진[†]

한국화학연구소 화학소재연구부

(2000년 8월 11일 접수)

Electromagnetic Interference Shielding of Carbon Fibers-Reinforced Composites

Hwan-Boh Shim, Min-Kang Seo, and Soo-Jin Park[†]

Advanced Materials Division, Korea Research Institute of Chemical Technology,

P.O. Box 107, Yusong, Taejeon 305-600, Korea

[†]e-mail : psjin@pado.kRICT.re.kr

(Received August 11, 2000)

요약: 본 연구에서는 섬유등급, 배향각 및 적층방법을 달리하여 제조한 탄소섬유강화 복합재료의 제조변수에 따른 전자파 차폐 특성에 관하여 고찰하였다. 그 결과, 탄소섬유강화 복합재료의 전자파 차폐효과는 섬유의 배향각도에 크게 좌우되었다. 특히 0°의 배향각에서는 섬유의 등급에 따른 영향을 나타내었으며, 동일한 탄소섬유라 할지라도 배열방향에 따른 전기적 성질의 변화, 즉 전기적 이방성이 클수록 차폐효과는 커졌다. 각각의 적층방법에 따라 제조된 모든 시편은 83~98%의 차폐효과를 나타내었으나, 대칭구조와 비대칭구조에서는 적층각도가 커짐에 따라 차폐효과가 소폭 감소하였다. 그러나 반복구조에서는 위의 두 가지 구조와는 다른 경향을 나타내었으며, 특히 90° 반복구조의 경우 측정 주파수 전 영역에 걸쳐 90% 이상의 차폐력을 나타내었다.

ABSTRACT: In this work, the electro-magnetic interference (EMI) characteristics of PAN-based carbon fibers-reinforced composites are investigated with difference to manufactural parameters, i.e., fiber grade, fiber orientation angle, and laminating method. As a result, EMI shielding effectiveness (SE) of the composites greatly depends on a fiber orientation in composite angle. Especially, the fiber grade affects SE of composites in case of orientation angle of 0°. Then the SE become greater as the change of electric character according to the arrangement directions, i.e., electrical anisotropy in the same constituent materials. This is due to the skin effect which is represented in the surface of electro-magnetic wave in high-frequency range. In all cases according to lamination methods, the composites represents SE of 83~98% over. Whereas, in symmetric and unsymmetric laminate structures, the SE decreases slightly as the laminate angles of composites increases. On the contrary, the repeating laminates structure shows the opposite tendency. Especially, 90° repeating laminate structure shows the SE more than 90% over the measuring frequency.

Keywords: electromagnetic interference (EMI), fiber orientations, shielding effectiveness (SE), microwave.

서론

문명이 고도화됨에 따라서 정보전달과 에너지원에 대한 관심이 급속도로 증가하고 있는 추세이며, 항공

·선박 통신, 고속도로 통신, 개인 휴대 통신, 그리고 위성 통신에 이르기까지 정보 전달 면에 있어 전자파의 이용과 발전속도는 현재 매우 빠르게 진행되고 있다. 또 다른 응용 면으로는 세라믹의 고속 소결로,

의료용 기구, 입자 가속기, 태양 에너지 전송, 가정용 전자레인지, 식품가공 등의 에너지원으로서도 전자파는 광범위하게 이용되고 있다.

이와 같이 다양한 전자기파 응용면에서, 특히 통신수단의 발달은 필연적으로 전자파의 주파수 스펙트럼을 확장·세분화하여 이용하게 되었으며,¹ 이에 따라 현재 우리가 위치하고 있는 공간에는 무수히 많은 전자파들이 존재한다. 그러나 전자파를 차단해야 하거나 또는 특정 주파수만을 필요로 하는 기기에는 불필요한 요소로 작용하여 오작동의 원인이 되고 있다. 따라서, 현재 전자기파에 의한 문제는 물, 대기의 물질 오염에 이어 무형의 공간 오염이라 정의되고 있으며, 예기치 못하는 사고 및 상황을 유발시킬 수 있다. 이러한 현상은 각종 물체에 의해 반사되어 나온 전파와 예기치 않게 누설된 전파에 기인하며, 불요불급한 전파의 반사는 각종 전자기기에 심각한 전파장애와 인체에 유해한 요소로 작용하고 있다. 이러한 피해현상을 전자파 장애(electro-magnetic interference, EMI)라 일컬으며, 이러한 EMI의 영향은 밀집도가 크고 정밀한 부품을 많이 사용하는 장비일수록 민감하기 때문에 소형화, 고집적화, 고속화, 소전력화 및 다기능화를 지향하는 현대 전기·전자 및 통신 산업에 있어서 치명적인 장애요소로 대두되고 있다.²

불요 전자파에 대한 장애현상을 방지하기 위해서는 일차적으로 발생원에서 전자파가 기준치 이상 누설되지 않도록 하는 것이 무엇보다 중요하며, 피해 대상 기기측에서도 불요 전자파의 침입을 차단시키는 노력이 또한 요구된다. 이러한 목적으로 전자파 차폐재료가 이용되고 있으며, 그 재료로서 전기적 특성이 잘 알려진 금속재료를 전통적으로 많이 사용하여 왔다. 그러나 근래에 들어 금속재료에 비해 값이 싸고, 가벼우며, 가공하기가 쉬운 플라스틱 재료 또는 복합재료 등이 개발되어 전기 및 전자제품의 외장재로 기존의 금속재료를 대체해 나가고 있는 실정이다.³

플라스틱 재료는 대부분의 전자파를 투과하는 특성을 가지고 있어 충전재를 함께 사용하는 것이 효과적이다. 지금까지 주로 사용된 전자파 차폐용 복합재료는 고분자 기지재에 각종 금속섬유나 세라믹 분말을 첨가하여 만들었다.⁴ 복합재료 제작에 사용된 전형적인 기지재료로는 에폭시 수지, 페놀수지, 실리콘 고무, 폴리테릴렌 등이 사용되었으며, 첨가재료로는 전도성

손실재료로서 알루미늄, 은분말, 은도금 유리구, 니켈도금 흑연분말 등이 널리 사용되어 왔다.⁵ 또한 자성 손실 첨가재료로서 각종 페라이트 분말 및 카르보닐 철 분말이 사용되고 있으며,⁶⁻⁹ 유전 손실재료로 lead magnesium niobate-PbTiO₃ (PMN-PT) 세라믹 또는 BaTiO₃ 등이 검토되고 있다.¹⁰ 이러한 전형적인 복합재료의 개발 이외에도 플라스틱에 금속을 도금화 하는 방법, 구조의 다층화 방법 등을 통해 성능 개선을 도모하고 있다.¹¹

이상에서 언급한 바와 같이 지금까지 주로 사용된 전자파 차폐용 복합재료는 고분자 기지재에 각종 금속 단섬유나 분말을 첨가하여 제조하였기 때문에 비중이 크고, 기계적 물성이 떨어지는 문제점이 있다. 따라서 기계적 충격이나 진동이 심한 전자기기 경우에는 그 사용이 제한적이므로 기계적 내구성을 요하는 전자파 차폐재료로 고강도의 연속 및 단섬유가 함유된 복합재료의 사용과, 근본적으로 전자파 차폐효과는 높은 전기전도 특성에 기인하기 때문에 우수한 차폐재료로 낮은 전기저항 특성을 갖는 섬유가 현재 요구되고 있다.

전자기학 이론에 근거하여 볼 때 탄소섬유 복합재료에서의 전파반사 및 흡수특성은 구성재료의 고주파 전기특성(전기 전도도, 유전상수 및 손실계수)과 기하학적 구조(복합재료 두께, 섬유배열)에 의해 결정된다. 따라서 탄소섬유의 재질개선(열처리 및 형상 변화에 따른 전기전도도 향상), 섬유의 배열방법(적층 순서, 섬유의 배열각도) 등의 변수를 통한 전파반사 및 흡수손실 개선, 그리고 고주파 전기특성의 체계적 제어에 관한 연구가 필요하나 현재 이에 대한 보고가 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 탄소섬유강화 복합재료의 제조변수에 따른 재질특성(전기전도도) 변화와 이에 따른 전파반사 및 흡수특성에 관하여 고찰하고자 하였으며, 전기전도 특성이 크게 다른 탄소섬유를 선정하여 복합재료를 제조하고 전자파 차폐특성을 연구하였다. 또한 탄소섬유 강화 복합재료의 경우 섬유의 길이 방향과 수직 방향으로 전기전도도의 이방성이 크기 때문에 적층방향에 따른 전자파 차폐특성이 크게 달라질거라 예상되므로 적층각을 0°, 30°, 60° 및 90°로 변화시켜 대칭 적층(symmetric laminates), 비대칭 적층(unsymmetric laminates), 반

복 적층 (repeating laminates) 등의 방법으로 복합 재료를 제조한 후 그것이 전자파 차폐특성에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

실 험

재 료. 본 연구에서 탄소섬유 복합재는 한국화이바(주)의 PAN계 고강도 및 고탄성을 탄소섬유에 에폭시 수지로 함침시켜 만든 프리프레그를 사용하였으며, 각각의 기본 물성을 Table 1에 나타내었다.

배 향각에 따른 시편제조. 프리프레그 (15 cm × 15 cm) 135 plies를 일방향으로 적층한 후 80 °C 1 h, 130 °C 1 h, 1 MPa 성형조건 하에서 복합재료를 제조하였다. 제조된 복합재료의 밀도는 1.36 g/cm³, 섬유체적 함유율은 60%를 나타내었다. 적층 복합재료를 0°, 30°, 60°, 그리고 90°로 섬유 배향각을 고려하여 가로, 세로 각각 약 1 cm 정도로 절단한 후, 이를 전자파 차폐특성 시험에 사용하였다.

적층방법에 따른 시편제조. 프리프레그의 적층수는 24 plies로 동일하게 한 후 Table 2와 같이 적층한 다음 앞서의 성형조건과 같은 방법으로 복합재료를

제조하였다.

전기전도도 측정. 전자기파에 대해 0°, 30°, 60°, 그리고 90°로 각각 일정한 배향을 한 탄소섬유강화에폭시 복합재료의 전기적 특성 (저항, R)을 KEITHLEY 580 Micro-Ohmmeter를 사용하여 4단자법에 의하여 측정하였으며, 아래의 식 (1)에 의하여 체적저항 (ρ_v)을 계산한 후 재료의 상대적인 값을 비교하였다.¹²

$$\rho_v = \left(\frac{E}{L_v} \right) \left(\frac{A}{t} \right) = \frac{R_v A}{t} \quad (1)$$

여기서, E 는 시편에 가해진 전압 (V), L_v 는 측정된 전류 (A), R_v 는 측정된 저항 (R), t 는 시편의 두께 (cm), 그리고 A 는 전극의 접촉 단면적 (cm²)을 나타낸다.

전자기파 차폐측정. 차폐측정 장비로는 HP사의 HP8510C와 HP8753D 두개의 회로망 분석기 (Network Analyzer)를 사용하였다.

결과 및 고찰

전자파 차폐이론. 전자파 차폐는 외부의 전자기파를 실내용 시스템 내로 투과되지 않도록 임의의 재료에 의해 그 파를 흡수 혹은 반사시키는 개념이다. 즉 차폐능력은 물체 위에 입사된 전자기파를 얼마나 많이 감쇠하는가로 정의된다.

이론적인 전자파 차폐효과 (shielding effectiveness, SE)¹³는 무한히 큰 차폐면에 의해 신호의 송·수신부를 구분하고, 차폐면에 수직으로 입사하는 전자파가 반사·흡수되고, 투과하는 기구에 의해 결정된다. 일정한 입사전력 P_i 에 대해 재료를 통과해 수신되는 수신전력을 P_t 라 하면 재료의 SE는 다음 식 (2)와 같다.¹⁴

$$SE \text{ (dB)} = 10 \log \left(\frac{P_i}{P_t} \right) \quad (2)$$

재료의 두께와 전기적 특성을 고려하여 계산하면 식 (2)는 아래의 식과 같이 유도되어진다.¹⁵

Table 1. Characteristics of the Carbon Fibers Used in This Work

prepreg (commercialized)	tensile strength (GPa)	modulus (GPa)	elongation (%)	diameter (μ m)	density (g/cm ³)
HCU075	2.9	353	1.1	6.2	1.80
CU0753	3.7	235	1.6	7.0	1.77

Table 2. Laminate Orientation Codes Used in This Work

codes	symmetric [0/ θ] _{2S}	unsymmetric [0/ θ] _{3T}	repeating [0/ θ] _{3R}
	0		
	θ	θ	θ
	0	θ	0
laminate	θ	θ	θ
examples	θ	0	0
	0	0	θ
	θ	0	0
	0		

$$SE(dB) = 20 \log \left[e^{\alpha t} \frac{(1+K)^2}{4K} \left\{ 1 - \left(\frac{K-1}{K+1} \right)^2 e^{-2\alpha t} \right\} \right] \quad (3)$$

$$= 20 \log(e^{\alpha t}) + 20 \log \left\{ \frac{(1+K)^2}{4K} \right\} + 20 \log \left\{ 1 - \left(\frac{K-1}{K+1} \right)^2 e^{-2\alpha t} \right\} \quad (4)$$

여기서, K 는 전자파 임피던스(Z_w)와 차폐재료 임피던스(Z_m)의 비, t 는 재료의 두께, γ 은 전자파의 전파상수($=\alpha + j\beta$), α 는 전자파의 감쇠상수이다.

식 (4)에서 첫째 항을 흡수손실(adsorption loss, A)이라 하고, 두 번째 항을 반사손실(reflection loss, R)이라 하며, 세 번째 항을 다중반사에 의한 보정항(multi-reflection correction, M)이라 부른다. 따라서 전자파 차폐효과는 아래의 식 (5)에 나타난 것처럼 입사하는 전자파의 흡수와 반사, 그리고 매질의 경계면 사이에서의 다중반사의 합으로 이루어지고, 차폐하고자 하는 전자파의 특성에 따라 이들 각각의 손실을 활용하여 효과적으로 전자파를 차폐시킬 수 있음을 알 수 있다.¹⁹

$$SE(dB) = A + R + M \quad (5)$$

즉, 전자기 에너지가 임의의 물체(차폐재료)에 도달하면 반사, 투과 및 흡수의 세 가지 형태로 전자기파의 운동경로가 분산된다. 여기서 시스템 내부에 기준을 두면 반사 및 흡수를 합해서 차폐란 의미로 쓰인다.¹⁸

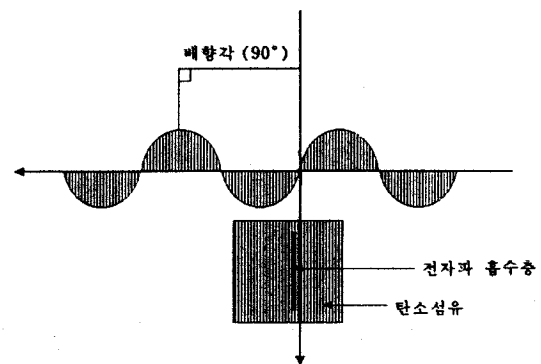
섬유의 배향각에 따른 효과

전기적 특성. 탄소섬유강화 플라스틱은 탄소섬유의 전도성 때문에 $10^{-2} \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 정도로 고탄성률이 고강도 탄소섬유에 비해 낮은 저항률을 나타낸다. 이는 고탄성률 쪽이 열처리 온도에 따른 흑연화가 보다 잘 진행되어 있어 분자 배향이 섬유의 축방향으로 효과적으로 구성되어 있기 때문이다.¹⁸ 따라서 본 연구에서는 고탄성률과 고강도 섬유를 선택하여 분자배향에 따른 복합재료의 체적저항을 알아보았으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

본 결과에서 나타난 것처럼, 강화된 섬유의 배향각이 30°씩 커짐에 따라 체적저항 값은 대략 2배 정

Table 3. Volume Resistivity as to the Fiber Orientation

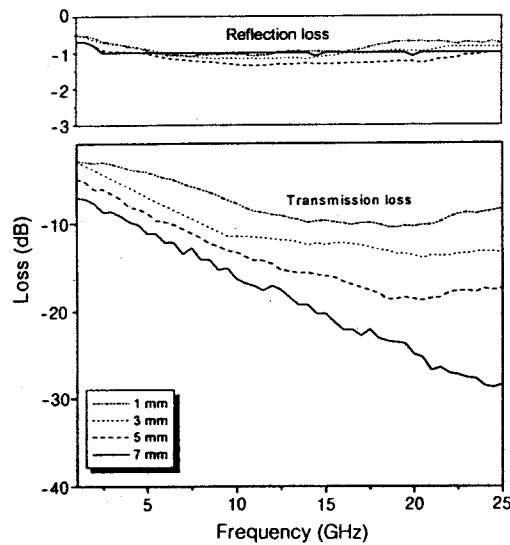
sample names	fiber orientation (degree, θ)	vol. resist. $\times 10^{-1} \rho_v$ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	$\rho_{v\theta}/\rho_{v0}$
HCU0753	0	0.283	1
	30	0.770	2.721
	60	4.210	14.880
	90	8.780	31.025
CU0753	0	0.512	1
	30	1.010	1.973
	60	2.090	4.098
	90	4.070	7.950



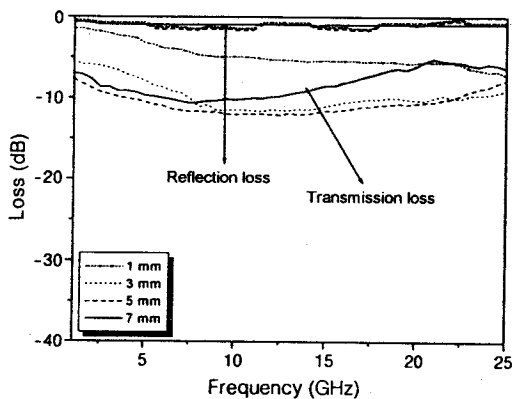
Scheme 1. Shielding effectiveness (SE) of CFRC according to the 90° fiber orientation angle.

도를 나타내었다. 본 실험에서 전기저항 값이 적은, 즉 배향각 0°를 가지는 시편이 이론적으로는 가장 우수한 전자기파의 반사효과를 얻을 수 있으나, 본 실험에서 사용한 재료는 섬유강화 복합재료로서 이는 열적, 전기적 이방성을 나타내므로 실제 배향각도별로 측정된 차폐효과에서는 Scheme 1에 나타난 것처럼 배향각이 전자기파 진행과 수직인 90°에서 최대 효과를 나타내었다. 이는 도전손실을 고려할 때 전기장과 수평방향으로 놓인 섬유배열의 영향 때문이라 사료된다. 즉, 전기장이 저항 도전체와 평행에 놓일 때 전류가 발생하며, 이것은 저항 열손실로 전자기파가 흡수되는 기구로 고려될 수 있기 때문이다.¹⁴

Figure 1(a)는 235 GPa의 인장 탄성률을 가지는 고강도 탄소섬유로 일방향 적층 복합재료를 제조한 후 이의 섬유 축에 대한 90° 방향에서의 두께에 따른 투과 및 반사손실에 대한 주파수(1 GHz~25 GHz) 분산특성을 나타낸 것이다. 그림 상단부의 fit-



(a)



(b)

Figure 1. Reflection and transmission loss as to sample thickness. (a) Electromagnetic waves are perpendicular to fiber orientation and (b) electromagnetic waves are parallel to fiber orientation

ting은 반사손실을 나타낸 것으로 뚜렷한 차이를 보이는 투과손실에 비해 전체적으로 큰 값이며 상당량을 반사하나 그 값의 차이는 상대적으로 미약하였다. 그리고 반사손실보다 투과손실 기울기가 커지는 것은 고주파로 됨에 따라 반사에 의한 차폐보다는 흡수에 의한 손실차폐에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 이는 전도성 평판의 표피 효과와 비교해 볼 때 섬유는 작은 직경 ($>10 \mu\text{m}$)으로 인해 표피효과에 의한 흡수

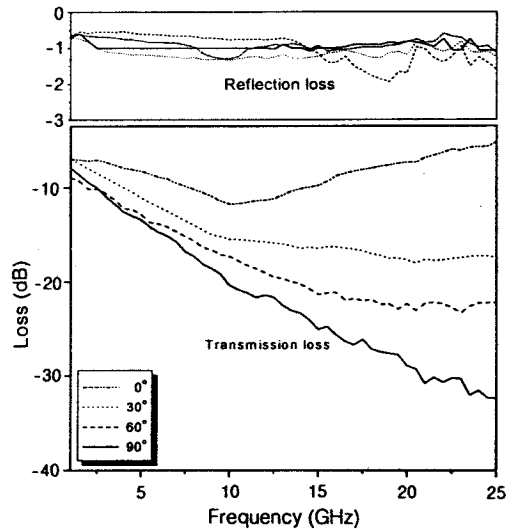


Figure 2. Reflection and transmission loss as to fiber orientation angles (sample thickness: 7 mm).

차폐가 복합재 시스템 전체에 걸쳐 분산되어 있는 섬유로 인해 고주파로 갈수록 더욱 커질 것으로 사료된다.¹⁹

Figure 1(b)는 섬유배향과 전자기파가 평행이 될 때의 주파수 분산특성을 나타낸 것으로 시편 두께에 대한 영향이 그림 (a) 경우와 비교하면 작게 나타났다. 전자기파의 진행과 섬유의 방향이 같기 때문에 투과된 전자기파에 대한 겹치기 (cover) 작용이 일어나지 않기 때문에 일어난 현상으로 사료된다.²⁰ 이처럼 탄소섬유강화 복합재료의 전자파 차폐효과는 일정 주파수 하에서 복합재료의 두께와 주파수 방향에 따른 섬유배향에 큰 영향을 받는다는 것을 알 수가 있다.

Figure 2는 탄성률이 353 GPa인 탄소섬유를 사용하여 제작한 동일한 두께를 가지는 복합재료의 섬유 배향각에 따른 영향을 알아보기 위한 실험으로 전자기파에 대해 0°, 30°, 60°, 그리고 90°의 각도로 전도성 탄소섬유 충전재가 이상 배향됐을 때의 주파수 분산 특성을 나타낸 것이다. 그 결과, 배향각도가 커질수록 투과손실량은 감소하였으며 이는 앞서의 결과와 마찬가지로 전자기파의 진행과 섬유의 배향방향에 따른 겹치기 작용 때문이라 사료된다.

Figure 3은 Figure 2와 동일한 조건으로 제작한 시편에 대한 주파수 크기에 따른 상대적 투과율을 나타낸 것으로 섬유의 배향각도가 커질수록 그 값의 크

기가 상대적으로 감소를 하였으며, 특히 10 GHz 경우에는 거의 선형적으로 줄어들었다. 이상의 결과로부터 탄소섬유강화 복합재료의 경우 차폐효과는 두께 뿐만 아니라 섬유의 배향각에 크게 영향을 받는다고 사료되며 특히 고주파에 대하여 상대적으로 더 큰 차폐효과를 나타내었다.

Figure 4는 탄성률이 각각 235, 353 GPa인 두 종류의 탄소섬유강화 복합재료의 주파수 분산특성을 섬유의 배향각도를 0°와 90°로 한 후 실험한 결과이다. 전자기파와 섬유의 배향이 90°일 경우에는 섬유의 등급에 관계없이 동일한 영향을 받으나 섬유각도가 작아지면서 등급의 차이가 점차로 생겨나 0°에 도달하면 고 탄성률 섬유강화의 경우 평균 -17 dB, 즉 98%, 저 탄성률의 경우 약 -10 dB, 90% 정도의 차폐를 보임으로써 전체적으로 8% 정도의 차폐효과를 나타내었다. 이는 섬유가 표면에서 유사한 구조와 전도도를 가지므로 90° 방향에서의 차폐효과 또한 0°의 결과와 비슷하게 탄소섬유의 탄성률에 따라 약 8% 정도의 차폐효과를 나타낼 거라 사료된다. 한편 0° 방향의 차폐효과가 앞서 고찰한 바와 같이 8% 차이를 나타내는 것은 섬유 단면의 표면 구조가 등급에 따라 다르기 때문에 나타나는 현상이라 사료된다.

전통적인 등방성 재료에서는 체적저항이 작아지면서 차폐효과가 증가하는 것이 일반적인 현상이나 본 실험의 경우 Figure 5에 나타난 것처럼 체적저항이 커지면 오히려 차폐효과가 증대하는 것으로 나타났

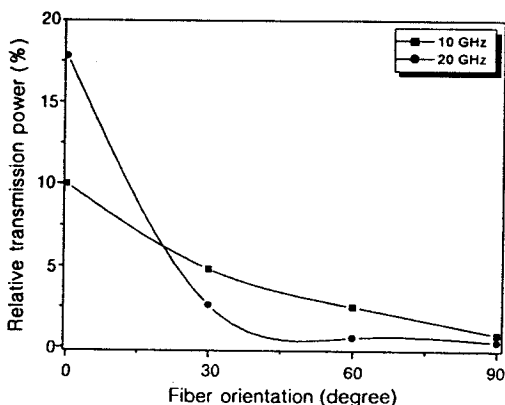


Figure 3. Transmitted power as to fiber orientation angles of CFRC reinforced with 235 GPa carbon fibers.

다. 이는 섬유강화 재료의 제조공정에서 섬유의 분산을 필요에 따라 조절해야만 차폐효과를 효과적으로 얻을 수 있다고 사료된다.

적층 방법에 따른 영향. 섬유강화 복합재료의 최대 장점 중의 하나는 강화섬유의 적층 및 배열방법에 따

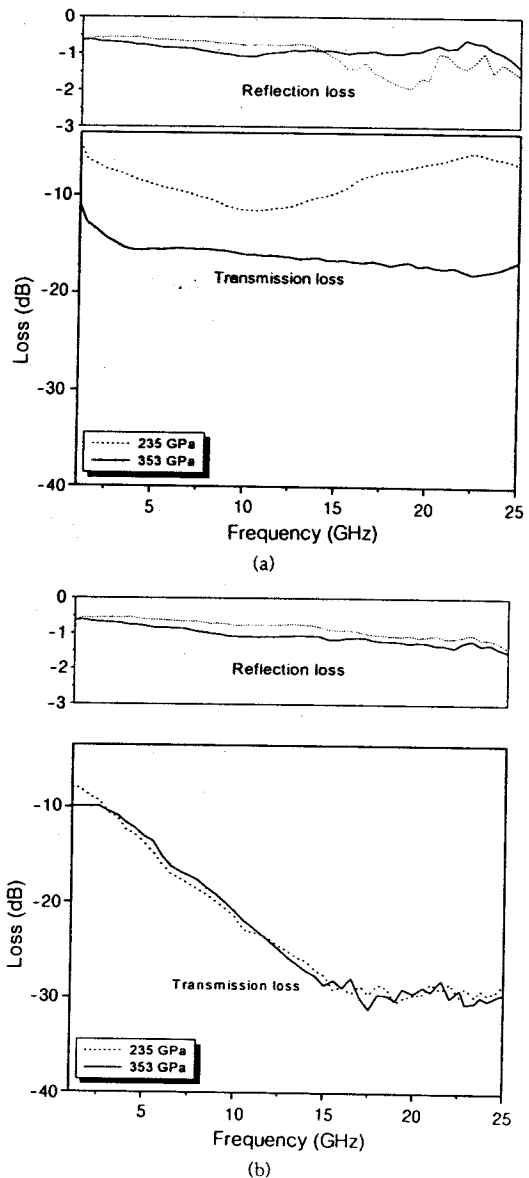


Figure 4. Reflection and transmission loss as to carbon fiber grades. (a) fiber orientation angle : 0° and (b) fiber orientation angle : 90°.

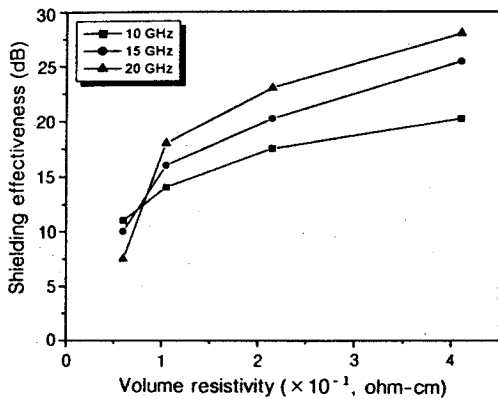
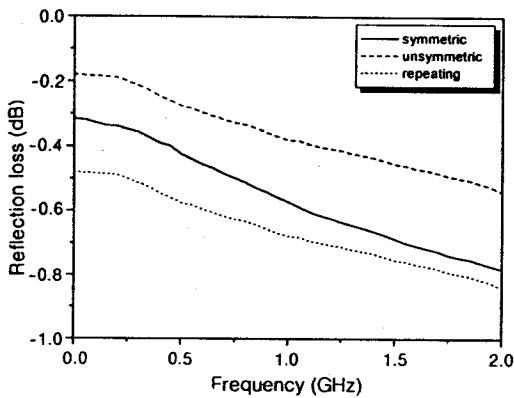


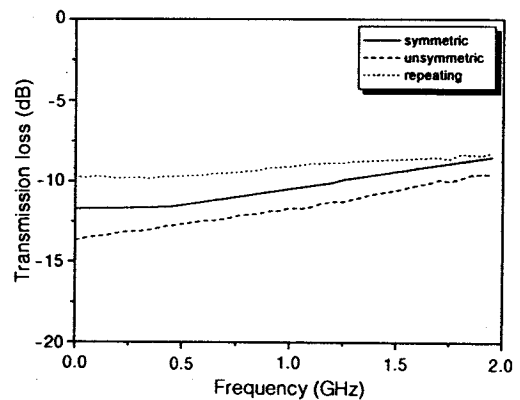
Figure 5. Shielding effectiveness (SE) as to volume resistivity of CFRC consisted in the same constituents.

라 여러 가지 기계적 특성을 조절하여 이용할 수 있다는 데 있다. 따라서 본 실험에서는 복합재료의 적층방법 중 대표적인 ① 대칭 적층, ② 비대칭 적층, ③ 반복 적층 등의 형태에 따른 전자기파 차폐특성 시험을 행하여 적층방법, 적층 각도가 이에 미치는 영향에 대하여 알아보았다.

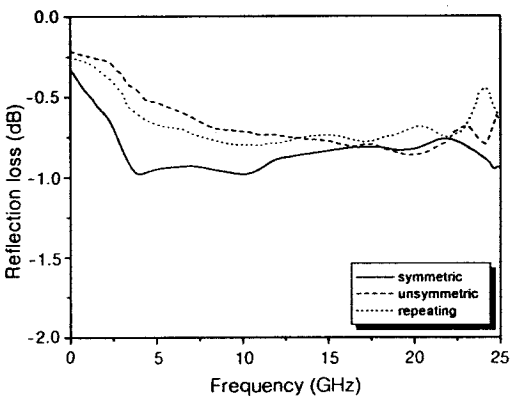
Figure 6(a), (b)는 적층방법 (적층각도 30°)에 따른 주파수 영역 10 MHz~2 GHz에서의 분산 특성을 실험한 결과이다. 전체적으로 -1 dB 이상의 반사 손실을 일으키며, 가장 큰 반사를 보이는 재료의 구성은 비대칭 적층구조로 실험범위의 최저 주파수 (10 MHz)에서 최고 -0.2 dB로 95.5%의 전력반사를 보인 것으로부터 주파수가 증가함에 따라 선형적으로



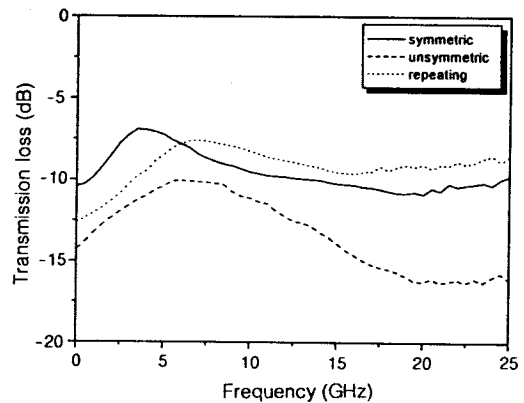
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 6. Transmission and reflection loss of CFRC as to lamination methods by the angle of 30 degree. (a), (b) : 10 MHz~2 GHz and (c), (d) : 1 GHz~25 GHz.

Table 4. Shielding Properties and Average Shielding Effectiveness (SE) of CFRC as to the Laminating Methods (HCU075)

frequency ranges	laminating structures	laminating angles
10 MHz ~2 GHz	30° unsym>sym>repeat	sym ^a 90°>60°>30°
	60° repeat>sym>unsym	unsym ^b 30°>90°>60°
	90° sym>repeat>unsym	repeat ^c 60°>90°>30°
laminating		average SE [dB]
methods	angles (°)	(power shielding, %)
sym	30°	89
	60°	95.4
	90°	87.2
2 GHz ~25 GHz	30°	83.6
	60°	89.1
	90°	90
repeat	30°	86.2
	60°	87.3
	90°	96

^a Sym : Symmetric. ^b Unsym : Unsymmetric. ^c Repeat : Repeating.

감소하는 것으로 나타났으며, 10 MHz에서 2 GHz까지의 범위에서는 특성 피크가 나타나지 않았다. 순수 반사에 의한 차폐효과는 Figure 6(a)에 나타난 것처럼 비대칭>대칭>반복구조의 순서를 나타내었다. 한편 Figure 6(c)에 나타난 2 GHz~25 GHz의 주파수 측정범위에서도 순수 반사에 의한 차폐효과는 비대칭 적층구조가 가장 큰 효과를 나타내었다. 특히 3~6 GHz 범위에서는 차폐효과가 감소하다가 그 이상의 범위에서는 증가하였으며, Figure 6(d)에서처럼 대략 22.5 GHz에서 최고 -17 dB, 1.995%의 전력만을 투과하고 나머지는 반사 혹은 흡수하는 것으로 나타났다. 이는 투과손실 결과와 함께 고려하여 볼 때 89%는 반사에 의한 차폐이고 나머지 약 9%는 흡수되는 것으로 사료된다.

Table 4에 위와 동일한 주파수 영역에서 실험한 30°, 60° 그리고 90° 적층 복합재료의 차폐효과를 나타내었다. 주파수 영역 10 MHz~2 GHz에서 30° 복합재료의 경우 비대칭>대칭>반복구조의 순서로, 60° 복합재료의 경우 반복>대칭>비대칭 구조의 순서로, 90° 복합재료의 경우에는 대칭>반복>비대칭 구조 순서로 차폐효과를 나타내었다. 고주파(2 GHz~25 GHz)로 갈수록 차폐효과는 적층각도

Table 5. Transmission and Reflection Loss of CFRC According to the Laminating Methods at 15 and 20 GHz Frequencies

laminate		transmission loss (dB)		reflection loss (dB)	
methods	angles	15 GHz	20 GHz	15 GHz	20 GHz
symmetric	30°	-10.00	-10.87	-0.85	-0.80
	60°	-8.53	-9.29	-0.87	-0.84
	90°	-7.53	-8.44	-1.06	-0.80
unsymmetric	30°	-13.99	-15.38	-0.84	-0.87
	60°	-10.17	-11.59	-0.76	-0.88
	90°	-10.12	-10.98	-0.85	-0.81
repeating	30°	-9.55	-9.18	-0.75	-0.81
	60°	-10.76	-11.01	-0.70	-0.61
	90°	-12.16	-11.76	-0.89	-0.97

* 353 GPa carbon fiber prepregs of 24 plies were laminated and the sample thickness was about 1.3 mm.

30°, 60°의 경우에는 대칭구조가 가장 큰 값을 나타내었으나, 적층각도가 90°가 되면 차폐효과는 가장 작은 값을 나타내었다. 이는 다른 적층구조 경우와는 상이한 결과를 나타내었다. 평균적으로 적층각도가 커질수록 반사에 의한 차폐는 효과적이었다.

Table 5는 15, 20 GHz에서 적층방법에 따른 투과 및 반사손실을 나타낸 것이다. 대칭 및 비대칭 구조에서는 적층각도가 커질수록 15, 20 GHz에서 투과손실 값이 증가하였으나, 반복구조에서는 적층각이 커짐에 따라 투과손실이 감소(차폐효과 커짐)하는 경향을 나타내었으며, 반사손실 값은 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 따라서 적층방법과 적층각에 따라 복합재료의 전자파 차폐효과는 달라지며, 반사손실에 의한 영향보다는 투과 및 흡수손실에 의한 영향이 크다는 것을 알 수가 있었다.

결 론

본 연구에서는 섬유강화 복합재료의 여러 가지 제조변수, 즉 섬유의 배향각, 적층방법 등이 전자파 차단 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

1. 섬유강화 복합재료의 전자파 차폐효과는 전기장과 수평·수직 및 일정방위로 놓인 섬유배열, 즉 섬유의 배향각도에 따라 크게 좌우되며, 동일 구성 재료에서 탄소섬유의 배열방향에 따른 전기적 성질의 변

화인 전기적 이방성이 클수록 차폐효과는 크게 나타났다.

2. 0°의 배향각에서는 재료의 두께에 따른 주파수 특성은 나타나지 않았으나, 섬유 등급에 따른 영향이 관찰되었다. 이는 전자기파의 고주파 특성이 표면에서 지배적으로 나타난다는 표피효과에 기인한다고 사료된다.

3. 대칭구조와 비대칭 구조에서는 적층각도가 커짐에 따라 차폐효과가 소폭 감소하였으나, 반복구조에서는 반대의 경향을 나타내었다. 특히 90°의 반복구조의 경우 측정 주파수 전 영역에 걸쳐 90% 이상의 차폐효과를 나타내었다.

4. 복합재료의 전자파 차폐효과는 적층방법과 적층각에 따라 달라지며, 반사손실에 의한 영향보다는 투과 및 흡수손실에 의한 영향이 크다는 것을 알 수가 있었다.

참 고 문 헌

1. Y. Naito and K. Suetake, *IEEE Trans. Micro. Theo. & Tech.*, **MTT-19**, 65 (1971).
2. H. M. Musal and H. T. Hahn, *IEEE Trans. on Magn.*, **25**, 3851 (1989).
3. A. Sternfield, *Modern Plastics Int.*, July, 48 (1982).
4. S. J. Park and M. S. Cho, *Carbon*, **38**, 1053 (2000).
5. D. A. Olivero and D. W. Radford, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **17**, 674 (1998).
6. K. Ishino, *Electronic Ceramic*, **19**, 22 (1988).
7. F. Matsui, T. Okada, and T. Kawakubo, *Plating and Surface Finishing*, February, 48 (1991).
8. J. L. Adcock, *ibid.*, July, 40 (1983).
9. J. Yacubowicz, M. Narkis, and L. Benguigui, *Polym. Eng. Sci.*, **30**, 459 (1990).
10. K. T. Chung, A. Sabo, and A. P. Pica, *J. Appl. Phys.*, **53**, 6867 (1992).
11. A. Smoluk, *Modern Plastics Int.*, September, 48 (1982).
12. H. M. Musal, Jr., and D. C. Smith, *IEEE Trans. on Magn.*, **26**, 1462 (1990).
13. R. B. Schulz, V. C. Plantz, and D. R. Brush, *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, **30**, 362 (1988).
14. C. Y. Huang and J. F. Pai, *Eur. Polym. J.*, **34**, 261 (1998).
15. R. B. Schulz, V. C. Plantz, and D. R. Brush, *IEEE Trans. on Magn.*, **30**, 187 (1988).
16. X. Luo and D. D. L. Chung, *Composites*, **30**, 227 (1999).
17. R. M. Simon, "Industrial Research & Development", June, 104 (1982).
18. R. E. Haufler, *J. Phys. Chem.*, **94**, 8634 (1990).
19. S. Apollo, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32**, 991, (1999).
20. L. Minlian, K. Tao, and L. Tianhong, *J. Funct. Mater.*, **28**, 383, (1997).