

## 샌드위치 구조형 섬유강화 복합재료의 전파흡수특성

김 상 영 · 김 성 수<sup>†</sup>

충북대학교 공과대학 재료공학과, 컴퓨터 정보통신 연구소

### Microwave Absorbing Properties of Fiber Reinforced Composites with Sandwich Structure

Sang-Young Kim and Sung-Soo Kim<sup>†</sup>

Department of Material Science and Engineering

Research Institute for Computer and Information Communication

Chungbuk National University, Chungju 361-763

(2002년 3월 8일 받음, 2002년 5월 22일 최종수정본 받음)

**Abstract** Design of microwave absorbers using high frequency properties of fiber reinforced composites are investigated. Two kinds of composite materials (glass and carbon) are used and their complex permittivity and permeability are measured by transmission/reflection technique using network analyzer. Low dielectric constant and nearly zero dielectric loss are determined in glass fiber composite. However, carbon fiber composites show the high dielectric constant and large conduction loss which is increased with anisotropy of fiber arrangement. It is, therefore, proposed that the glass and carbon fiber composites can be used as the impedance transformer (surface layer) and microwave reflector, respectively. By inserting the foam core or honeycomb core (which can be treated as an air layer) between glass and carbon fiber composites, microwave absorption above 10 dB (90% absorbance) in 4-12 GHz can be obtained. The proposed fiber composites laminates with sandwich structure have high potential as lightweight and high strength microwave absorbers.

**Key words** : microwave, absorbers, fiber, composites, sandwich.

### 1. 서 론

최근 민수, 군수분야에서 전자, 통신 산업의 비약적인 발전은 전자장비의 다양화, 소형화, 그리고 이들이 사용하는 전자파 주파수 대역의 확장을 수반하고 있다. 그 결과 기술적인 측면에서 전자소자 및 회로에서의 전자파 상호간의 전자파 간섭이 커다란 문제점으로 대두되고 있으며 환경적인 측면으로는 전자파의 인체에 대한 유해여부 논란이 점차 확산되고 있다. 우리나라를 비롯한 세계 각국에서는 이에 대한 문제의 심각성을 고려하여 법적인 제재수단을 포함하여 그 규제를 더욱 강화하고 있다. 이에 따라, 최근 국내외적으로 전자파 장해에 관한 효과적인 대책수단으로서 보다 성능이 개량된 전파흡수체에 대한 중요성 및 필요성이 인식되고 있다.<sup>1,2)</sup>

전파흡수재료는 본질적으로 마이크로파 에너지를 흡수하여 열로 변환하는 기능을 가진 것으로, 기능면에서 분류하면 저항체, 유전손실재료, 자성손실재료로 분류된다. 저항체에는 주로 탄소계 재료가 이용되고, 탄소의 불완전 도체 특성을 이용하여 그 저항성분 (오姆 손실) 에 의해 에너지를 흡수하는 원리에 근거한다.<sup>3)</sup> 유전성 전파흡수재료는 마

이크로파 대역에서 분극손실을 이용한 것으로 BaTiO<sub>3</sub>, PbO-MnO-Nb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 계<sup>4)</sup> 등이 거론되고 있다.

자성손실재료로는 산화철 계통의 페라이트 자성체가 가장 널리 사용되고 있다. 소결형 페라이트는 VHF, UHF 대역에서 우수한 전파흡수 특성을 보여 주로 저주파 대역의 전파흡수재료로 많이 사용되고 있고, 1 GHz 이상의 마이크로파 영역에서는 페라이트 분말을 고무나 플라스틱과 같은 절연물에 분산시킨 복합재료가 주로 사용된다.<sup>5,6)</sup>

그러나 이들 전통적인 전파흡수체의 경우 기계적 특성이 취약하거나 무게가 증가하는 문제점 때문에, 경량화를 요구하는 전자기기 및 장비 (PCS 단말기, 이동통신장비의 하우징 소재, 기타 군사용 기동장비)에 그 사용이 제한된다. 이러한 문제의 해결 방안으로 무게가 가볍고, 전파흡수기능을 가진 섬유 및 이를 함침시킨 고분자 복합재료의 사용을 검토할 수 있다.

복합재료의 전파흡수기능은 일반적 흡수체를 구성하는 재료와 마찬가지로 재질 내에 전파 에너지를 흡수하는 손실 메카니즘이 있을 때 가능하다. 일반적인 섬유강화 복합재료의 경우 자기적 특성이 없기 때문에 이들 재료에서 기대할 수 있는 손실 메카니즘은 유전손실 (dielectric loss) 이다.

<sup>†</sup> E-mail: sskim@trut.chungbuk.ac.kr

그러나 Stonier<sup>7)</sup>에 의하면 유리 섬유와 석영 및 케블라 섬유의 경우 10 GHz에서 유전상수는 4~6의 값을 갖고, 유전손실계수는 0.01 이하의 매우 낮은 값을 갖는다. 매트릭스 수지의 경우에도 10 GHz에서 유전상수는 3 근처의 값을 유전손실계수는 무시할 수 있을 정도로 작다. 따라서 이들 소재로 구성된 복합재료에서는 우수한 전파흡수특성을 기대하기 힘들다.

탄소 섬유의 경우 어느 정도의 전기전도성을 갖고 있어 이 재료의 도전손실특성을 이용하여 전파흡수체로의 응용 가능성을 타진해 볼 수 있다. 유사한 탄소 분말의 경우 도전손실 특성을 이용하여 현재 전파흡수 filler 재료로 많이 이용되고 있다. 그러나 탄소섬유 복합재료는 오히려 전파의 반사특성이 월등히 높은 것으로 보고되고 있다. Abt와 Riger<sup>8)</sup>에 의하면 carbon fiber-epoxy 복합재료의 경우 12 GHz에서 반사감쇠량은 0.05 dB 이하이다. 즉 금속과 거의 같은 전파의 반사체로 볼 수 있다. 따라서 탄소섬유 복합재료 단독으로는 전파흡수체를 구성하기 힘들다.

이상에서 고찰한 바와 같이 단순 복합재료의 전파흡수특성은 그리 우수하지 않기 때문에 다층구조의 복합재료에 전파흡수층을 삽입함으로써 이 문제를 해결하고 있는 것으로 파악된다. 반사특성이 좋은 carbon-epoxy 복합재료를 배면구조재로 깔고, 그 위에 자성손실재가 함침된 복합재료층(정합형 전파흡수체)을 구성하여 전파흡수특성과 기계적 특성을 동시에 얻는 방법들이 간혹 제시되고 있다.<sup>9)</sup> 그러나 그 구성재질 및 배열방법, 흡수체의 치수에 관한 자료는 전혀 공개되고 있지 않다. 따라서 전자파 흡수기능을 가진 섬유강화 복합재료의 개발이 이루어지기 위해서는 전파전송 이론에 근거한 전자기학적 측면의 재료 및 구조설계, 이를 충족하는 섬유 및 복합재료의 선정, 그리고 이들 재료의 전파흡수특성의 시험평가에 관한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 전자파 흡수기능을 가진 경량 섬유강화 복합재료의 개발을 목표로 전자기학적 측면의 재료 및 구조설계, 이를 충족하는 섬유 및 복합재료의 선정, 그리고 이들 재료의 전파흡수특성에 관한 연구 결과를 제시하였다.

2. 실험 방법

2-1. 복합재료의 종류

본 연구에서 선정한 복합재료는 크게 유리섬유 복합재료와 탄소섬유 복합재료로 구분된다. 유리섬유 복합재료는 유전율이 그다지 크지 않아 임피던스 변성층으로 적합하다. 탄소섬유계 복합재료는 전기전도성이 높아 전자파 감쇠 및 반사특성이 우수하고, 따라서 배면반사층 재료로 적합하다. 고분자 매트릭스 재료로는 모두 에폭시 수지를 사용하였다.

Table 1은 본 연구에 사용된 유리섬유 복합재료와 탄소섬유 복합재료의 종류를 나타낸 것이다. 유리섬유로는 E-glass (woven fabric)을 사용하였다. 탄소섬유는 Toray T-300 이었고, 섬유의 배열방법은 woven fabric, 0°/45°, 0°/90° 이었다. 매트릭스 재료로는 에폭시 수지를 사용하였다.

2-2. 재료정수 및 전파흡수능 측정

Table 1에 제시한 복합재료 평판을 cutter drill에 장착

Table 1. Fiber-reinforced composite specimens used for study.

Sample	Materials (Fiber/Matrix)	Fiber Arrangements
GCF	E-glass/Epoxy	Fabric(Woven)
CCF	T-300/Epoxy	Fabric(Woven)
CCU	T-300/Epoxy	0°/90°
CCU-45	T-300/Epoxy	0°/45°

한 후 절삭하여 내경과 외경이 각각 3 mm, 7 mm인 시편을 얻고, 이를 다시 연삭하여 재료정수 (복소투자율 및 복소유전율) 측정용 시편으로 제조하였다. 복합재료의 복소유전율 및 복소투자율은 HP 8722D Network Analyzer를 사용하여 투과/반사법으로 측정하였다. APC-7 beadless air line에 내경 3 mm, 외경 7 mm인 시편을 삽입한 다음 반사산란계수 (S<sub>11</sub>) 및 투과산란계수 (S<sub>21</sub>)를 측정하고, 이들 값으로부터 복소유전율 및 복소투자율을 계산하였다. 측정 주파수 대역은 4~12 GHz이었다. 다층구조 복합재료의 전파흡수능은 각 층 재질의 복소투자율 및 복소유전율과 두께의 합수로 반사손실을 계산함으로써 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 복합재료의 고주파 특성

Table 1에 제시한 복합재료의 고주파 특성 (복소유전율 ( $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ ) 및 복소투자율 ( $\mu = \mu' - j\mu''$ ))을 회로망 분석기를 이용한 투과/반사법에 의해 측정하였다. Fig. 1은 유리섬유 복합재료 (GCF 시편)의 복소유전율 및 복소투자율이다.  $\mu' = 1.1$ ,  $\epsilon_r' = 4.0$ 으로 주파수에 따라 일정한 값을 갖고,  $\epsilon_r''$  및  $\mu''$ 은 무시할 정도로 작다. 마이크로파 대역에서 유리섬유의 유전상수는 6 정도로 작고 에폭시 수지의 유전상수 또한 3정도에 불과하기 때문에, 유리섬유-에폭시 복합재료는 저유전율과 저손실 특성을 나타내었다.<sup>7)</sup>

Fig. 2은 T-300 탄소섬유를 보강재로 하여 적층 방향을 달리하여 제조한 복합재료의 복소유전율 및 복소투자율의 주파수 분산특성이다. 탄소섬유 복합재료에서 나타난 전자기적 특성은 유전상수 및 손실계수가 매우 크다는 점이다. 모든 시편의 경우  $\mu'$ 은 1.2 정도의 값을 갖고  $\mu''$ 은 무시할 정도로 작다. 탄소섬유 복합재료는 비자성체이기 때문에 이와 같은 전기적 특성을 나타낸 것으로 보인다. 반면 복소

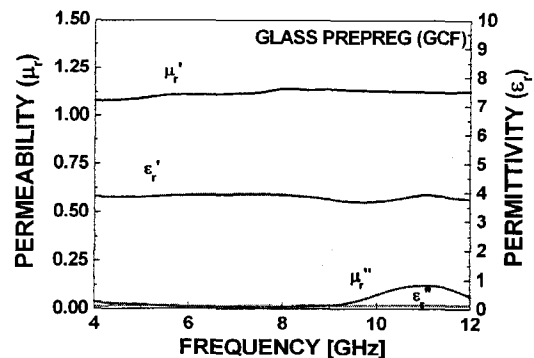


Fig. 1. Complex permittivity and permeability of glass fiber composites.

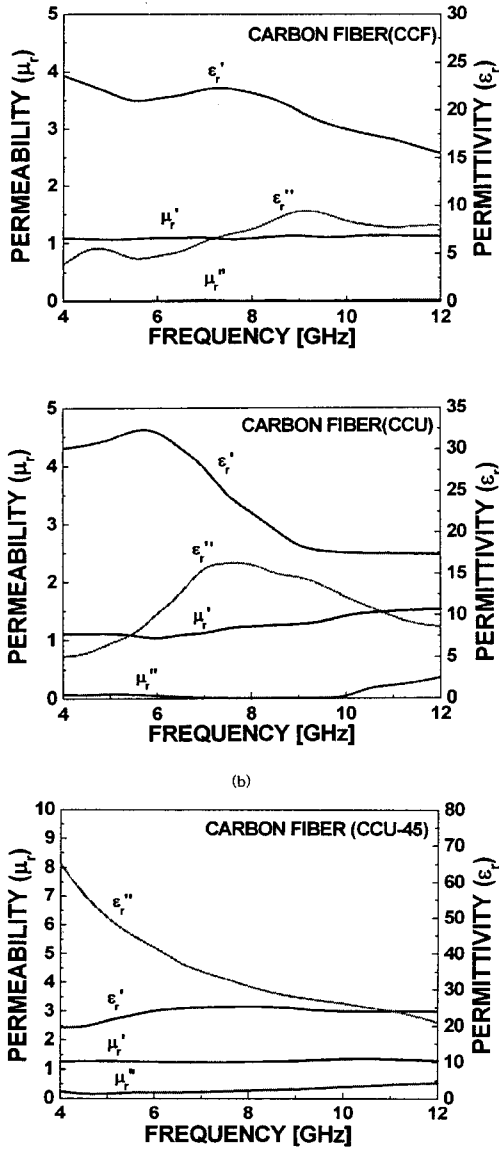


Fig. 2. Complex permittivity and permeability of carbon fiber (T-300) composites with fiber arrangements of (a) fabric, (b) 0°/90° and (c) 0°/45°

유전율은 상당히 큰 값을 나타내었고 주파수 분산특성은 섬유 배열방법에 따라 현격한 차이를 보였다.

CCF 시편 (fabric)의 경우 (Fig. 2(a)),  $\epsilon_r'$ 은 4 GHz에서 23 정도의 값으로부터 서서히 감소하여 12 GHz에서는 15의 값을 보였다.  $\epsilon_r''$ 은 주파수 증가에 따라 약간 증가하는 경향을 보이나 대략 7 정도의 값을 갖는다. CCU 시편 (0°/90° 배열)의 경우 (Fig. 2(b))에도 거의 비슷한 경향을 보였다. 한편 CCU-45 (Fig. 2(c))의 경우에는 유전손실이 매우 큰 주파수 분산특성을 보이고 있다.  $\epsilon_r''$ 은 4 GHz에서 65 정도의 값을 갖고 서서히 감소하여 12 GHz에서 20 정도의 값을 갖는다. 반면  $\epsilon_r'$ 은 20 정도의 거의 일정한 값을 나타내었다.

탄소섬유 복합재료의 경우 유전상수 및 손실계수가 크게 나타나는 결과는 탄소섬유의 높은 전기전도도에 기인하는 것으로 보인다. 전기전도도가 클수록 인접한 섬유간의 공간

전하 분극 (space charge polarization)에 의해 유전상수는 커지고, 섬유 장축을 통한 도전손실에 의해 손실계수가 커질 가능성이 높다.<sup>10)</sup> 섬유의 배열에 따른 복소유전율의 차이는 공간전하 분극과 도전손실의 이방성으로 설명되어질 수 있다. 전계 벡터가 섬유와 직교하는 경우에는 섬유간의 공간전하 분극이 커져  $\epsilon_r'$ 이 최대가 되고, 반대로 평행인 경우에는 섬유길이 방향으로 유기전류가 커져  $\epsilon_r''$ 이 최대가 된다. 따라서 섬유배열이 등축인 경우 (CCF 시편)에는  $\epsilon_r' > \epsilon_r''$ 이 되고, 섬유배열이 이방성이 심해질수록 (CCU-45 시편) 도전손실 효과가 커져  $\epsilon_r'' > \epsilon_r'$ 인 주파수 분산특성을 나타내는 것으로 해석된다.<sup>11)</sup>

이상에서와 같이 유리섬유 복합재료는 저유전율과 저손실 특성을 보인 반면 탄소섬유 복합재료는 탄소섬유의 높은 전기전도도에 의해 높은 유전율과 도전 손실을 나타낸다. 따라서 전파흡수기능을 갖는 다층형 복합재료의 설계 시 손실이 큰 탄소섬유 복합재료의 사용이 필수적이다. 그러나 탄소섬유 복합재료는 높은 유전율에 의해 표면에서의 전파 반사율이 커지는 문제점을 갖는다. 이러한 문제의 해결 방안으로 저유전율 특성을 갖는 유리섬유 복합재료와 공기층 (실제로는 foam core 또는 honeycomb core)을 탄소섬유 복합재료 전면에서 임피던스 변성층으로 사용함으로써 전파의 반사율을 줄일 수 있다. 이러한 원리에 근거하여 유리섬유 복합재료/공기층/탄소섬유 복합재료로 구성되는 다층형 섬유강화 복합재료를 제안하고, 이들 구조의 전파흡수특성에 관해 조사한다.

3-2. 다층형 전파흡수체의 반사손실 계산

Fig. 3은 2개 이상의 흡수재료를 적층한 다층형 흡수체의 모식도와 다층 등가전송선로를 나타낸 것이다. 각 층의 특성임피던스 ( $Z_n$ )와 전송상수 ( $\nu$ )는 식 (1)과 식 (2)에 의해 구해지고, 각층에서의 입력임피던스 ( $Z_{in}$ )는 다음과 같은 순환공식에 의해 표현될 수 있다.<sup>12)</sup> 순차적 계산식에 의해 구한 흡수체 표면에서의 입력임피던스를 파동임피던스에 정합시켜 무반사 흡수체를 구성하는 방식이다. 각 층의 복소유전율 및 복소투자율로부터  $Z_n$ 와  $\nu$ 를 구할 수 있고, 각 층 표면에서의 입력 임피던스를 두께 ( $d$ )의 함수로

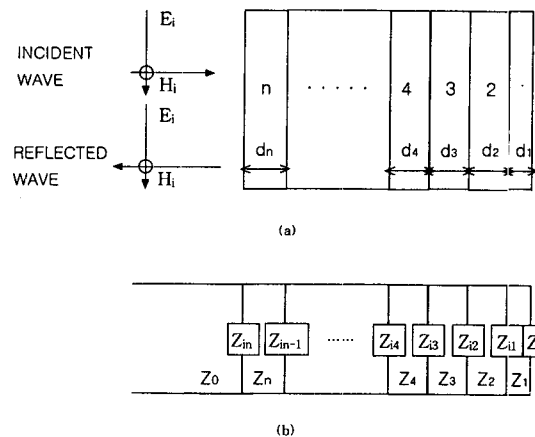


Fig. 3. (a) Plane wave incident normally on the multi-layer microwave absorber, and (b) analogous transmission line.

계산한다. n층 표면에서의 입력 임피던스 ( $Z_{in}$ )와 자유공간의 파동 임피던스 ( $Z_0 = 376.7\Omega$ )로 표시되는 반사손실 (식 (5))로부터 전파흡수능을 계산한다.

$$Z_c = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (1)$$

$$\nu = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (2)$$

$$Z_{i1} = Z_{c1} \frac{Z_0 + Z_{c1} \tanh \gamma_1 d_1}{Z_{c1} + Z_0 \tanh \gamma_1 d_1} \quad (3)$$

$$Z_{in} = Z_{cn} \frac{Z_{in-1} + Z_{cn} \tanh \gamma_n d_n}{Z_{cn} + Z_{in-1} \tanh \gamma_n d_n} \quad (4)$$

$$\text{Reflection loss (dB)} = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (5)$$

3-3. 다층형 섬유강화 복합재료의 전파흡수특성

배면 반사층으로 탄소섬유 복합재료 (CCU-45)를 사용하고, 이 반사층 위에 유리섬유 복합재료 (GCF)를 부착시켰을 때 식 (1) - (5)을 이용하여 전파흡수특성을 계산하였다. Fig. 4는 CCU-45 반사층의 두께 ( $d_1$ )를 5 mm로 고정하고 GCF 층의 두께 ( $d_2$ )를 4-6 mm로 변화시켰을 때 계산된 반사손실이다. 전반적으로 -5 dB 이하의 반사손실을 보이나 전파흡수능은 -15 dB를 넘지 못하고 있다. 이러한 구조의 복합재료에서는 어느 정도의 전파흡수 (약 50%)가 일어나나 최대 흡수능이 그다지 크지 않은 것이 단점이다.

다층 복합재료 구조물에서 전파흡수능 개선을 위한 Fig. 5와 같은 샌드위치 구조를 갖는 유리섬유 복합재료/공기층

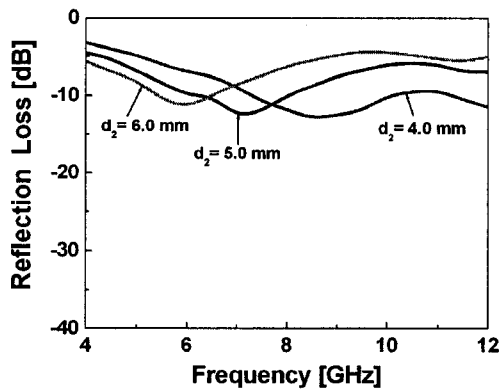


Fig. 4. Reflection loss of GCF/CCU45 laminate.

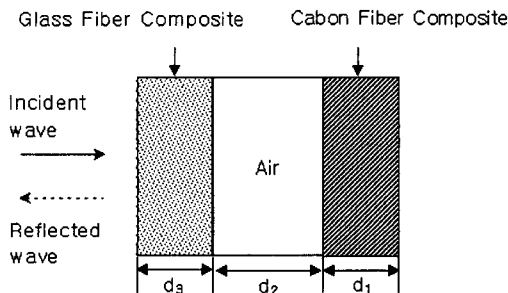


Fig. 5. Sandwich structure of glass/air/carbon fiber composites.

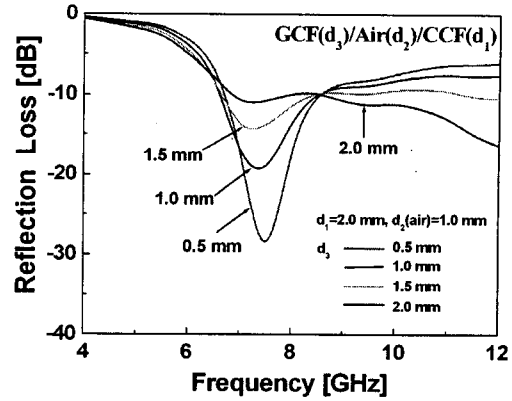


Fig. 6. Reflection loss of the composite laminate of GCF/Air/CCF.

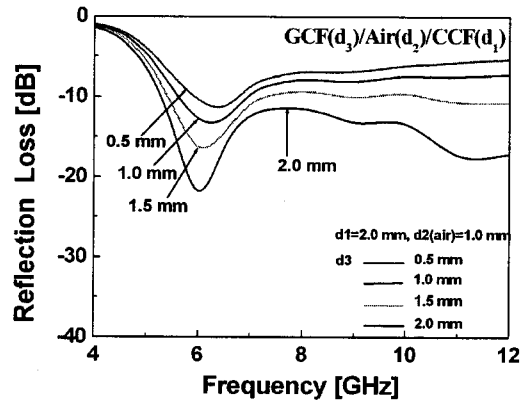


Fig. 7. Reflection loss of the composite laminate of GCF/Air/CCU.

/탄소섬유 복합재료의 전파흡수특성에 관해 조사하였다. 중간 공기층은 foam core나 honeycomb core로 대체시킬 수 있다. 실제로 이러한 방식의 구조물은 비강성과 강도가 높은 특징이 있어 항공기에서 급히 하중을 많이 받는 부위에 많이 이용되고 있다.

Fig. 6은 식 (5)를 이용하여 계산한 GCF/공기층/CCF 복합층의 반사손실이다. CCF의 두께 ( $d_1$ )는 2 mm, 공기층의 두께 ( $d_2$ )는 1 mm로 고정하고 GCF의 두께 ( $d_3$ )를 0.5 - 2.0 mm로 변화시켰다. 7.5 GHz에서 -20 dB 이하의 반사손실을 보이고 있다.  $d_3$ 가 증가함에 따라 최대 흡수능은 감소하나 6.5 GHz 이상의 주파수 대역에서 -10 dB 이하의 광대역 흡수특성을 보인다.

Fig. 7은 GCF( $d_3$ )/공기층( $d_2$ )/CCU( $d_1$ ) 복합층의 계산된 반사손실이다.  $d_1=2$  mm,  $d_2=1$  mm,  $d_3=1 \sim 2$  mm에서 비교적 광대역 흡수특성을 보인다 (-10 dB 기준 5-12 GHz). 반면 탄소섬유 복합재료로 CCU-45를 사용하였을 경우에는 Fig. 8에서 처럼 전파흡수특성이 좋지 않았다. 샌드위치 구조형 전파흡수체의 경우 배면 반사층으로 사용되는 탄소섬유 복합재료의 선정이 매우 중요함을 제시해 주는 결과이다.

4. 결 론

본 연구의 중요한 연구결과는 각종 복합재료 (유리섬유,

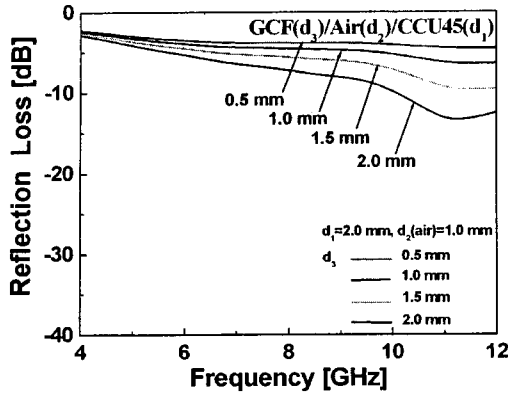


Fig. 8. Reflection loss of the composite laminate of GCF/Air/CCU45.

탄소섬유 및 그 배향)의 고주파 전자기 특성을 측정하고, 이들 데이터를 유리섬유-공기층-탄소섬유 복합재료로 구성되는 샌드위치 구조에 적용하여 경량·고강도 전파흡수체의 설계방법을 제시한 것이다. 유리섬유 복합재료의 경우 저유전율 특성을 보인 반면, 탄소섬유 복합재료는 섬유의 도전성에 의해 높은 유전상수 및 도전손실 특성을 보였다. 특히 탄소섬유 배열의 이방성이 심해질수록 유전상수와 도전손실 특성은 증가하였다. 따라서 유리섬유 복합재료는 표면의 임피던스 변성층으로 사용하였으며, 탄소섬유 복합재료는 배면의 전파 반사층으로 적합함을 제안하였다. 이들 두 복합재료 사이에 foam core 나 honeycomb core로 구성되는 공기층을 삽입함으로써 4-12 GHz 대역에서 10 dB (90% 흡수율) 이상의 전파흡수능을 얻을 수 있었다. 이와 같은 전파흡수체의 구성방식은 기존의 페라이트 또는 탄소 분말계 피막형 흡수체에 비해 무게가 가볍고 기계적 강도가 우수하기 때문에 경량 구조물용 전파흡수체로서 그 활용도가 크게 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(200-1-30100-003-2) 지원으로 수행되었고 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 清水康敬, “電磁波の 吸収と遮蔽” 日經技術圖書株式會社 (1989).
2. 전자파 장애 (EMI/EMC), 산업기술정보원 기술보고서, 56 (1991).
3. TDK Radiowave Absorbers and Anechoic Chambers 기술자료.
4. M. Chino, T. Yamamoto, and A. Oshimoto, *Ferroelectrics*, **93**, 67 (1989).
5. Y. Natio. K. Suetake, *IEEE Trans. MTT*, **19**, 65 (1986).
6. S.S. Kim et al, *IEEE Trans. on Mag.* **26**(6), 5462 (1991).
7. R.A. Stonier, *SAMPE Journal*, **27**(4), 9 (1991).
8. B. A bt and H. Rieger, *SAMPE National Symposium*, vol **26**, 848 (1981).
9. Catalogue on Microwave Absorbers/GEC-Marcni Materials.
10. H.C. Kim and S.K. Lee, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **23**, 916 (1990).
11. W.I. Lee and G.S. Springer, *J. Compo. Mater.*, **19**, 65 (1986).
12. E.F. Knott, J.F. Shaefer and M.T. Tuley, *Radar Cross Section, Its Prediction, Measurement and Reduction*, 1st Ed., Dedham, Artech House Inc., (1985).