

◆특집◆ 나노복합재의 제작과 응용

전자파 흡수 나노 복합재

최운용*, 이재욱*, 정우균*, 안성훈**

Nano Composites for Electromagnetic Wave Absorber

Woon-Yong Choi*, Jae-Wook Lee*, Woo-Kyun Jung* and Sung-Hoon Ahn**

Key Words: Nano composite materials (나노복합재료), Electromagnetic Wave Absorber (전자파 흡수체)

1. 서론

최근 급격하게 발전하는 무선 통신과 전자 장비 시장에 비례하여 기기에서 발생하는 유해한 전자파를 제어하기 위해 전자파 흡수체 (electromagnetic wave absorber)에 대한 관심이 증가하고 있다. 전자파 차폐는 입사된 전자파를 반사 또는 흡수하여 재료의 배면층으로 전이시키지 않는 것을 의미하는데, 전자파의 반사특성을 이용하는 경우와 달리 전자파 흡수체는 입사된 전자파를 열에너지로 전환하여 차폐로 인한 신호의 재반사에 수반하는 문제를 해결할 수 있는 장점을 가진다. 전자파 흡수체는 초기에는 적의 레이더에 아군의 군사 장비가 탐지되는 것을 방지하기 위한 군사용 목적으로 개발되었는데¹, 특히 스텔스 항공기는 탐지용 레이더를 회피하기 위한 구조적인 설계와 레이더 흡수 도료, 열감지 회피 기술 등 전자파 흡수체의 대표적인 사례로 주로 인용되고 있다. 또한, TV 허상 방지와 전자파 무향실 (anechoic chamber) 제작을 위한 목적으로도 개발되었다. 하지만, 본격적인 정보통신 산업의 발전과 더불어 전자파 장애 문제가 제기되면서 휴대폰, 통신 장비 등의 통신 주파수 대역의 유해 전자파를 제어하기 위한 전자파 흡수체의 중요성이 커지고 있다.

전자파 흡수체는 전자파 흡수라는 주 목적과 함께 구조재로 용이하게 사용 가능한 복합재료의 형태로 제작되고 있다. 복합재료란 서로 다른 구성이나 형태를 가진 두 가지 이상의 재료가 조합되어 특정한 물성을 나타내는 재료를 말한다.² 구성에 따라 충전재 (filler) 또는 강화재 (reinforcing agent)와 결합재 (matrix binder)로 이루어지며, 구조에 따라 섬유강화 복합재료 (fibrous composites), 적층 복합재료 (laminar composites), 입자강화 복합재료 (particulate composites)로 크게 구분할 수 있다.³ 결합재는 일반적으로 합성 수지 (resin)가 사용되며 열경화성 수지, 열가소성 수지가 모두 사용되고 있는데, 전자파 흡수체는 사용 목적에 따라 실리콘과 같은 고무류나 페인트⁴ 등을 결합재로 사용하고, 전자파 흡수 성능을 가진 입자를 충전재로 이용하는 것이 특징이다.

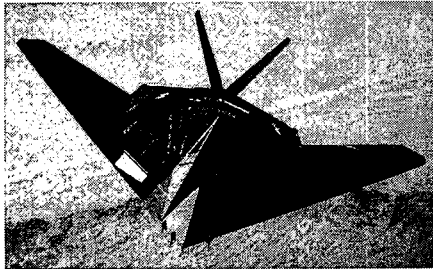
최근에는 나노 크기의 충전재를 물리적 또는 화학적인 방법으로 복합재료에 혼합하여 구조적, 기계적 특성의 향상을 도모하는 등의 연구가 활발히 수행되고 있다.⁵⁻¹⁴ 부가하여, 전자파 흡수체는 충전재 자체의 선택에 따라 흡수 주파수 대역과 전자파 흡수 원리가 달라지므로, 각 재료의 복소 유전율이나 복소 투자율과 같은 재료 정수를 파악하고 제어하는 연구도 함께 진행되었는데¹⁵⁻¹⁷, 전자파 흡수체는 적용하려는 주파수 대역이 정해져 있는 경우가 많고, 정합주파수의 존재 유무를 파악해야 사용이 가능하기 때문이다. 이러한 내용은 레이더 탐지 면적 (RCS: Radar Cross Structures)을

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원, 정밀기계설계공동연구소

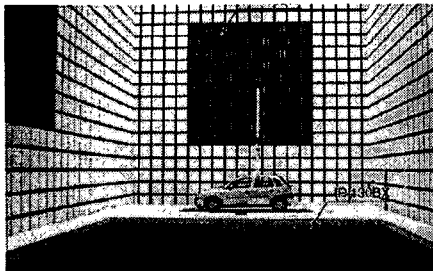
** 서울대학교 기계항공공학부, 정밀기계설계공동연구소

Tel. 02-880-7110, Fax. 02-883-0719

Email ahnsh@snu.ac.kr



(a)



(b)

Fig. 1 Applications for electromagnetic wave absorber: (a) Stealth aircraft²², (b) Anechoic chamber²³

최소화하는 레이더 흡수 구조 (RAS: Radar Absorbing Structure) 연구¹⁸⁻²⁰, 재료의 유전 손실 측정을 통한 주파수 설계^{13, 14, 19} 등의 연구를 통하여 잘 알려져 있다. Fig. 1 은 전자파 흡수체가 사용된 대표적인 사례들이다.

본 특집에서는 전자파 흡수 성능을 가진 나노 층전체와 이러한 재료들을 복합재료로 적용한 사례를 살펴보는 한편, 주파수 특성과 전자파 흡수체의 성능 평가 방법을 고찰하였다.

2. 전자파 흡수 재료

전자파 흡수체는 전자파 에너지를 열에너지로 변환하는 원리로 전자파를 흡수한다. 전자파 에너지를 열에너지로 변환하는 방식은 재료에 따라 구분되며 전자파 흡수 재료는 크게 자성 재료, 전도성 재료, 유전성 재료로 나눌 수 있다.¹ 자성 재료는 저주파 대역의 전자파 흡수체에 사용되다가, 재료 합성을 통해 광대역 전자파 흡수체로 사용되고 있다. 전도성 재료의 경우 높은 주파수 대역(X-band)의 전자파 흡수체에 주로 사용되며, 유전성 재료는 저주파 대역(4 GHz)에서 주로 사용된다.

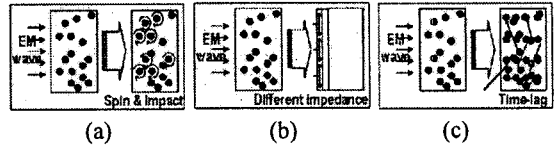


Fig. 2 Conceptual theory of electromagnetic wave absorption:¹⁷ (a) Magnetic material: Spin of molecule on resonance frequency, (b) Conductive material: Gap of impedance between air and material, (c) Dielectric material: Time-lag of molecular rearranging

다.

Fig. 2 와 같이, 자성재료의 경우 입사된 전자파가 분자의 회전을 유도하여 분자 운동에너지가 열에너지로 전환되어 전자파를 흡수하고, 또한 이것을 분자쌍극자 운동이라 한다. 한편, 전도성 재료는 재료와 자유공간의 임피던스 차이에 의해 입사된 전자파가 흡수재료의 표면에서 열에너지로 전환되어 전자파가 흡수되게 된다. 유전재료의 경우, 전자파가 입사되면, 산재되어 무질서하게 분산되어 있던 분자들이 재정렬을 하게 되는데, 이러한 과정에서 분자정렬의 시간차 (Time-lag)에 소요되는 에너지가 열로 전환되게 된다.¹⁹

2.1 자성 재료의 연구 동향

전자파 흡수 재료로 사용되는 대표적인 자성 손실 재료는 페라이트 (ferrite)이다. 페라이트는 수백 MHz 영역에서 뛰어난 전자파 흡수 성능을 보인다. 하지만 최근에 요구되고 있는 주파수 영역은 MHz 단위를 넘어선 GHz 영역이다. 따라서 성격이 다른 페라이트로 만든 다수의 층을 적층하여 주파수 영역을 높이려는 시도가 있었다.²⁴ 또한 고무류의 결합재와 혼합하여 제작한 복합 페라이트에 대한 연구가 진행되면서 시트 (sheet) 형의 전자파 흡수체가 상용화 되었는데, 이는 유전율을 가진 결합재와 자성 손실 재료인 페라이트가 혼합되면 GHz 주파수 영역에서 전자파를 흡수하는 효과를 이용한 것이다.²⁵

페라이트의 투자율을 높여 고주파 대역에 적용하는 것 보다 다른 산화물과 페라이트를 결합하여 제작한 재료가 더 뛰어난 흡수 성능을 보이고, 고주파에 사용 가능하게 되면서 전자파 흡수체는 NiO, ZnO, MnO, CuO 등의 산화물과의 복합 스피넬



Fig. 3 Morphology of Ni-Zn-ferrite by SEM

페라이트에 연구가 집중되었다.²⁵⁻²⁹ 가장 대표적인 스피넬 페라이트는 Mn-Zn 페라이트와 Ni-Zn 페라이트이다.²⁷ Fig. 3 은 Ni-Zn 페라이트를 보여준다. 결합된 재료는 최근에 이슈가 되고 있는 1 ~ 3 GHz 영역의 전자파 흡수체로 연구되고 있고, 입자의 크기와 소결 온도 조건, 함량비 등의 설계 조건으로 전자파 흡수 성능과의 비교를 통해 다양한 연구가 진행되어 왔다.^{26, 29}

2.2 전도성 재료의 연구 동향

전도성 재료는 대부분 탄소 계열이 쓰인다. 특히 Fig. 4 에서 보여주는 CB (Carbon Black), MWNT (Multi-Walled carbon Nano Tube) 등은 낮은 비중에 비해 높은 전도성을 나타내어 전자파 흡수체 제작에 많이 사용하고 있다. 전도성 재료는 주파수 정합이 X-band (8 ~ 12 GHz)에서 일어나 대부분 군사 레이더 회피용 장비의 제작에 사용되며 스텔스 전투기도 탄소 계열의 재료를 사용하였다.^{30, 31}

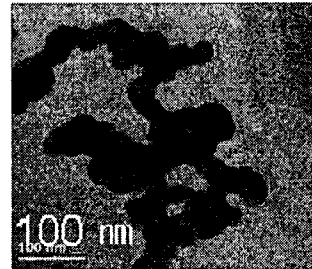
전도성 재료는 대체로 높은 유전율을 가지며 MWNT 와 같은 나노 입자는 유리 섬유강화 복합체에 적용되어 일정한 두께의 프리프렉 (prepreg)으로 제작되어 전자파 흡수 나노 복합체로 사용된다. 낮은 주파수 대역에서는 높은 전도도로 인해 흡수 성능이 저하되는 단점이 있으나, X-band 영역에서 전자파 흡수체로 중요한 역할을 하고 있다.³²

2.3 유전성 재료의 연구 동향

유전 손실로 전자파를 흡수하는 대표적인 재료는 Fig. 5 의 티탄산바륨 ($BaTiO_3$)이다. 유전 손실 재료는 자성 손실 재료와 비슷한 주파수 영역에서 전자파를 흡수하지만 자성 손실 재료보다 전자파 흡수 성능이 낮아 실제 응용은 많지 않은 편이다.¹

하지만 수 GHz 주파수 대역에서 100 이상의

높은 유전율을 가지고, 유전 손실 과정에서 매질 내의 파장을 줄일 수 있기 때문에, 정합 두께를 이용한 박형의 전자파 흡수체를 제작할 수 있다고 알려져 있다.³⁴



(a)



(b)

Fig. 4 Conductive materials: (a) Carbon-Black, (b) Multi-walled carbon Nano Tube

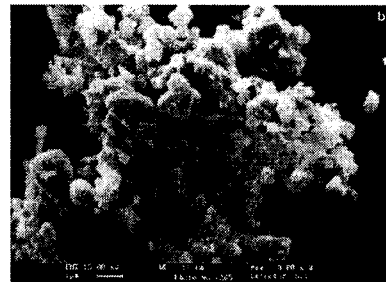
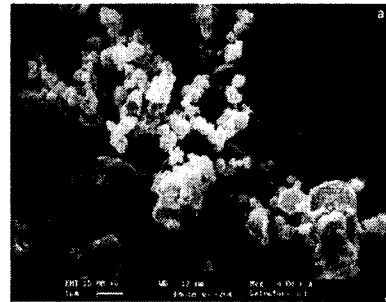


Fig. 5 Morphology of $BaTiO_3$ by SEM³³

3. 전자파 흡수 나노 복합재

3.1 전자파 흡수체의 구조적 특성

전자파 흡수체는 결합재의 종류와 특성에 따라 다양하게 구분되고 있다. 높은 기계적인 물성이 요구되는 분야에는 유리 섬유강화 복합재가 강화재로 사용되며, 통신 기기의 내부에 부착되는 용도에는 고무 등의 재료가 많이 사용된다. 이러한 구분은 다시 단일 구조와 복합 구조의 사용 여부에 따라 분류하기도 하는데 이것은 전자파 흡수 성능을 높이거나 정합 주파수의 이동, 전자파 흡수 범위의 광대역화 등의 요구에 따른 결과이다. 특히, 유리 섬유강화 복합재는 제작 특성상 다층 구조가 일반적이기 때문에 적층판과 충전재의 종류와 비율에 따른 흡수 성능 디자인에 대한 연구가 많이 진행되었다.^{1, 9, 11, 18-20, 24-27, 29, 32-40}

전자파 흡수체의 구조적인 특성은 흡수 재료와 더불어 주파수 특성에 밀접한 영향을 주고 있다. 페라이트가 함유된 유리 섬유와 탄소 섬유의 이중 복합 재료가 높은 전자파 흡수 성능을 얻거나,³² 폴리우레탄 폼과 유리 섬유의 복합 재료를 통해 구조적인 안정성을 유지하면서 높은 전자파 흡수 성능을 얻을 수도 있다.⁴⁰ 그리고, 도전 손실이 큰 탄소 섬유를 내부에 배열함으로써 높은 기계적 물성을 유지하면서도 광대역 전자파 흡수 특성을 만들 수 있다.³⁶ 전자파 무반사실에서 사용하는 전자파 흡수체를 복합 구조로 제작함으로써 광대역 전자파 흡수 특성을 얻을 수 있다.⁴¹

3.2 유리 섬유강화 복합재

전자파 흡수체로서의 유리 섬유강화 복합재는 샌드위치형^{36, 40}, 하이브리드형¹⁷ 과 같은 다층 전자파 흡수체로 제작된다. 특히, 외부에 설치되거나 우수한 기계적 물성과 경량이 요구되는 곳에는 유리 섬유강화 복합재로 제작된 전자파 흡수체를 많이 사용한다.

유리 섬유강화 나노 복합재는 보강섬유(reinforcing fiber), 기지재료(resin matrix), 충전재(filler)로 구성된다. 전자파 흡수 성능을 갖는 섬유강화 나노 복합재는 충전재인 나노 수준의 전자파 흡수물질을 기지재료에 원하는 성분비로 분산시킨 후 보강 섬유에 도포시키는 방법으로 제작된다. 도포시키는 방법은 형상과 제품의 용도에 따라 달라지며 크게 핸드 레이업(hand lay-up), 스프레이

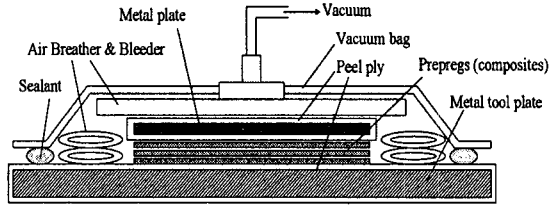


Fig. 6 Vacuum bag molding method

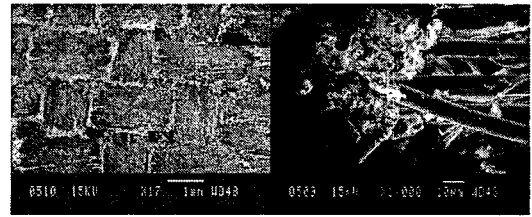


Fig. 7 Morphology of Carbon Nano Fiber composites by SEM

업(spray-up), 백 몰딩(bag molding), 압축성형(thermoset matched die molding), 필라멘트 와인딩(filament winding), 펄투루전(pultrusion) 방법으로 나눌 수 있다. 또한 사용하는 기지재료에 따라 열경화성수지 복합재료, 열가소성수지 복합재료 제작 방법으로 나뉜다.^{2, 3, 42}

Fig. 6 은 프리프렉으로 평판을 제작하는 과정이며 서로 다른 성질의 프리프렉들을 적층하여 다층 전자파 흡수체를 제작할 수 있다. Fig. 7 은 CNF(carbon nano fiber)로 제작된 유리 섬유강화 복합재의 사진이다.

4. 전자파 흡수 측정 방법

전자파 흡수체의 전자파 흡수 성능 측정은 크게 재료 정수를 통한 간접 측정법과 직접 측정법으로 구분할 수 있다.¹ 자유 공간에서 입사된 전자파와 반사된 전자파를 직접 비교하거나, 변화된 임피던스와 주파수 속도를 통해 전자파 흡수율을 얻을 수 있으며, 임피던스 변화를 복소 유전율과 복소 투자율의 재료 정수로 전환하거나 공진주파수를 찾아낼 수도 있다.

4.1 간접측정법 : 재료 정수 측정법

재료 정수 측정법은 크게 전송선법, 공진법, 자유 공간법 등으로 구분된다. 전송선법은 시료를

정해진 규격에 맞게 가공하여 넓은 주파수 대역에 대한 데이터 수집이 가능하다는 장점이 있으나, 측정 시료의 형상이나 크기에 의한 오차가 단점으로 지적된다.⁴³ 공진법은 특정한 주파수에 대한 정확한 결과를 얻을 수 있으나, 주파수 대역이 한정되는 단점이 있다. 회로망 분석기 (Network Analyzer)의 등장은 주파수 도메인 (Frequency-domain) 측정을 가능하게 하였고, 측정 가능한 주파수 대역이 넓어지고 최적화된 재료 정수의 빠른 결정을 가능하게 하였다.^{13, 44} 하지만, 앞서 지적한 측정 시료의 문제점 외, 회로망 분석기의 사용시 커넥터의 부정합이나 교정 (Calibration)의 오차가 발생하므로 이를 줄이도록 해야 한다.¹⁵

4.1.1 전송선법

전송선법은 도파관 (Waveguide)이나 Fig. 8 에 나타낸 동축선 (Coaxial line)을 이용하여 발생하는 특성 임피던스의 차이를 계산하여 재료 정수를 구하는 방법이다. 여기서 발생하는 신호는 회로망 분석기로 수집되어 반사 및 투과 계수가 얻어진다. 이러한 산란 계수 (S-parameter)의 측정과 계산을 통해 복소 유전율과 복소 투자율을 결정하고 정합 주파수를 얻어낼 수 있다. 동축선에 시료가 고정된 후, 하나의 포트 (One-port)를 사용할 경우 주로 반사 특성 (S11, S22)을 이용하게 되며, 끝단의 단락 유무에 따라 구분되기도 한다. 양쪽 두 개의 포트 (Two-port)를 사용할 경우, 반사와 투과 특성 (S11, S21)을 이용하여 Nicolson-Ross-Weir (NRW) 알고리즘으로 복소 유전율과 복소 투자율을 얻어낸다.^{13, 44, 45}

$$S_{11} = \frac{(1 - \Gamma^2)\Gamma}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (1)$$

$$S_{21} = \frac{(1 - \Gamma^2)\Gamma}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (2)$$

회로망 분석기에서 얻어진 산란 계수는 반사 계수 Γ 와 투과계수 T 로 나타낼 수 있고, 전송선의 특성 임피던스 관계식을 정리하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\mu_r}{\epsilon_r} = \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right)^2 = a \quad (3)$$

$$\mu_r \epsilon_r = - \left(\frac{c}{\omega \cdot d} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right)^2 = b \quad (4)$$

(ω : angular frequency, c : 광속도, d : 시편두께)

$$\mu_r = \sqrt{ab} \quad (\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'') \quad (5)$$

$$\epsilon_r = \sqrt{\frac{b}{a}} \quad (\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'') \quad (6)$$

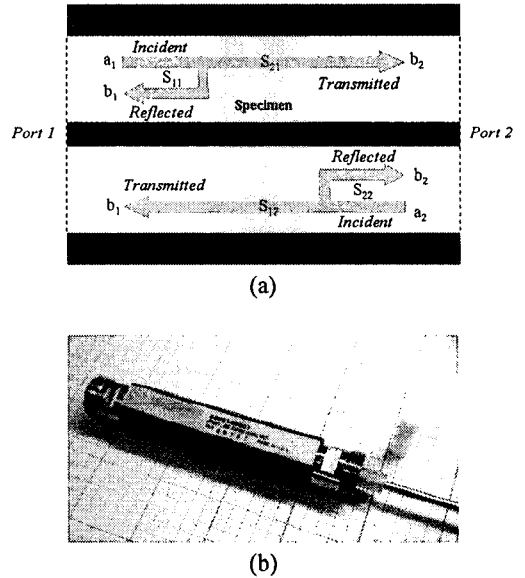


Fig. 8 Transmission/reflection methods: (a)2-port coaxial line⁴⁶, (b)coaxial 7mm air line with samples⁴⁷

4.1.2 공진법

공진법은 재료 정수와 크기가 미리 정해진 공진기 (Resonator)를 통해 변화하는 공진주파수와 정전용량 등을 측정하여 재료의 물성을 확인하는 방법이다.⁴⁹ 공진 구조의 조건 변화를 계산해서 물성을 확인하는 섭동법을 포함하며, 공진기의 구조와 측정 방법에 따라 일반형, 동축형, 평판형, 오픈형 등 다양한 분류가 있다. Kobayahi⁵⁰ 등이 제시한 방법은 일반적인 공진법의 하나인 커티니 공진법 (Courtney method)의 한 예로 잘 알려져 있다.⁵¹

4.1.3 자유 공간법

자유 공간법은 Fig. 9 와 같이 혼 렌즈 안테나 (Horn lens antenna)로 원역장 (Far-field)을 반사 및 투과시킴으로써, 복소 유전율과 복소 투자율을 측

정하는 방법이다.⁵² 형상이나 불균일성 등의 시료 제작의 한계를 줄일 수 있고, 비접촉 및 비파괴 측정이 가능하며, 높은 온도와 같은 특정한 조건에서 측정이 가능하다는 장점이 있다.⁵³

4.2 직접 측정법 : 자유공간 반사법 등

전자파 흡수체의 전자파 흡수 성능을 직접 측정할 경우, 자유 공간 (Free-space)이나 도파관에서 측정하는 방법 등이 있다. 앞서 제시한 전송선법과 마찬가지로, 도파관을 이용하는 방법은 시료 자체의 형상 오차가 측정에 영향을 미친다. 자유공간에서 신호의 반사를 이용하는 방법은 자유공간법과 유사하지만 재료의 정수를 알지 못한다는 차이가 있다. Fig. 10은 자유공간 반사법의 예로서 입사 및 반사된 전력비로 반사 감쇄 (reflection loss)를 측정할 수 있다.

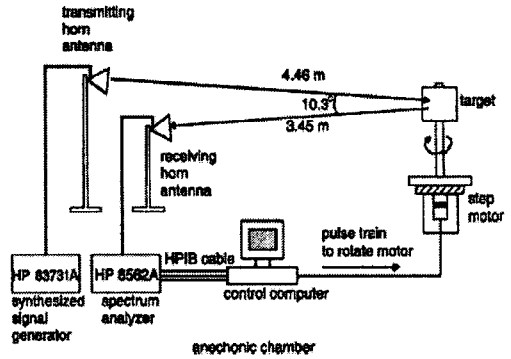


Fig. 10 Free space reflection method¹⁶

자유 공간에서의 반사 측정은 원역장에서 이루어져야 하며, 시료의 크기는 주파수의 파장보다 커야 하고, 외부 간섭을 방지하기 위해 전자파 무반사실에서 측정되어야 한다. 대부분 하나의 안테나로 송신하고 수신하지만, 간섭을 방지하기 위해 두 개의 안테나 (Bistatic reflection method)를 사용하기도 한다.⁵¹

부가하여 레이더 탐지 면적의 측정법으로 사용되던 펄스법을 전자파 무반사실에서 사용하도록 응용한 쇼트 펄스법과 함께 전계 벡터 회전법, 공간 정재파법, 위상합성법 등이 전자파 흡수 성능의 직접 측정에 사용되고 있다.

5. 결론

나노 복합재료는 기존의 재료가 가지지 못한 특성을 가지며, 미래 산업에 있어 새로운 특성을 가진 재료 개발에 적합한 재료이다. 특히 통신 산업과 전자 산업의 발달로 큰 관심의 대상이 되는 전자파 장애의 해결책으로 전자파 흡수체에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

본 특집에서는 여러 가지 전자파 흡수체 중에서도 유리 섬유강화 나노 복합재를 사용하여 제작한 전자파 흡수체의 원리와 재료 특성 및 측정 방법에 대하여 기술하였다.

스텔스 기술을 위시한 고주파 영역에서의 전자파 흡수체에 대한 연구는 현재도 많이 진행되고 있으며 광대역 주파수에서 뛰어난 흡수 성능을 가진 전자파 흡수체도 연구되고 있다. 이 광대역 전자파 흡수체는 자성 손실과 유전 손실을 동시에 가져야 하고 구조적으로는 다층형 전자파

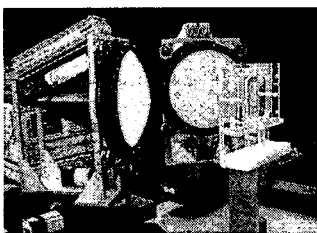
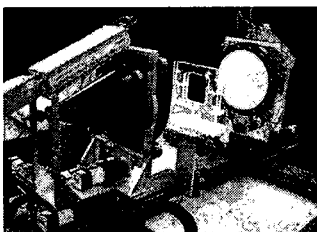
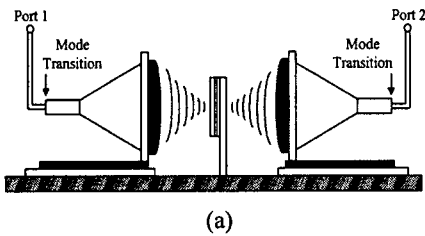


Fig. 9 Free space method with horn lens antenna: (a) Free space measurement, modified from Ghodgaonkar, D. K. et al.⁵², (b) HVS Automated Free Space Measurement System⁴⁸

흡수체 형태로 제작되는 것이 좋다. 따라서 다층형 흡수체 제작에 용이한 섬유강화 복합재에 대한 공학적인 이해가 필요하며, 높은 전자파 흡수 성능과 경량 특성을 가진 재료의 연구가 필요하다. 또한, 점점 넓어지는 레이더의 주파수 영역에 사용할 수 있으면서 통신 주파수 대역에도 사용할 수 있는 광대역 전자파 흡수체를 개발하기 위하여 섬유강화 복합재료와 전자파 흡수재료, 전자파 흡수 측정법에 대한 보다 폭 넓은 이해와 연구가 필요하다.

후 기

이 연구는 2 단계 BK 21 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- Kim, D. I., "Electromagnetic Wave Absorber," Daeyoungsa, pp.12-25, 45-58, 59-75, 176-225, 2006.
- Schwartz, M. M., "Composite Materials Handbook," McGraw-Hill, pp.1.1-1.14, 4.1-4.94, 1992.
- Lubin, G., "Handbook of Composites," Van Nostrand Reinhold Co., pp.1-6, 32-513, 1982.
- Che, S. H., Kim, D. I. and Choi, J. H., "A Study on the Improvement of EM Wave Absorption Characteristics in Paint-type EM Wave Absorbers," Korea Electromagnetic Engineering Society, Vol. 17, No. 4, pp. 330-334, 2006.
- Kornmann, X., Rees, M., Thomann, Y., Necola, A., Barbezat, M. and Thomann, R., "Epoxy-layered silicate nanocomposites as matrix in glass fibre-reinforced," Composite Science and Technology, Vol. 65, No. 14, pp. 2259-2268, 2005.
- McNally, T., Potschke, P., Halley, P., Murphy, M., Martin, D., Bell, S. E. J., Brennan, G. P., Bein, D., Lemoine, P. and Quinn, J. P., "Polyethylene multiwalled carbon nanotube composites," POLYMER, Vol. 46, No. 19, pp. 8222-8232, 2005.
- Hussain, F., Hojjati, M., Okamoto, M. and Gorga, R. E., "Review article: Polymer-matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and application: An overview," Journal of Composite Materials, Vol. 40, No. 17, pp. 1511-1575, 2006.
- Coleman, J. N., Khan, U. and Gun'ko, Y. K., "Mechanical reinforcement of polymers using carbon nanotubes," Advanced materials, Vol. 18, No. 6, pp. 689-706, 2006.
- Kodjie, S. L., Li, L. Y., Li, B., Cai, W. W., Li, C. Y. and Keating, M., "Morphology and crystallization behavior of HDPE/CNT nanocomposite," Journal of Macromolecular Science PART B-PHYSICS, Vol. 45, No. 2, pp. 231-245, 2006.
- Park, K. Y., Lee, S. E., Kim, C. G., Lee, I., Kim, C. G. and Han, J. H., "The Application of Fiber-Reinforced Composites to Electromagnetic Wave Shielding Enclosures," The Korean Society for Composite Materials, Vol. 19, No. 3, pp. 1-6, 2006.
- Tjong, S. C., "Structural and mechanical properties of polymer nanocomposites," MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING R-REPORTS, Vol. 53, No. 3-4, pp. 73-197, 2006.
- Chung, D. D. L., "Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials," Carbon, Vol. 39, Issue 2, pp. 279-285, 2001.
- Kim, W. W., "High Performance Nano Composite Materials," The Korean Institute of Metals and Materials, Vol. 19, No. 3, pp. 4-7, 2006.
- Lee, Y. C., Kim, M. J., Yang, Y. S. and Park, M. Y., "High-Performance Clay/Thermoset Nanocomposites," The Korean Institute of Metals and Materials, Vol. 19, No. 3, pp. 13-17, 2006.
- Weir, W. B., "Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies," Proceedings of the IEEE, Vol. 62, No. 1, pp. 33-36, 1974.
- Afsar, M. N., Birch, J. R. and Clarke, R. N., "The Measurement of the properties of materials," Proceedings of the IEEE, Vol. 74, No. 1, pp.183-199, 1986.
- Baker-Jarvis, J. R., Geyer, R. G., Grosvenor, C. A., Holloway, C. L., Janezic, M. D., Johnk, R. T. and Riddle, B. F., "Measuring the Permittivity and Permeability of Lossy Materials: Solids, Liquids, Metals, and negative-Index Materials," NIST Technical Note (nist tn 1536), pp. 4-13, 27-78, 2005.
- Oh, J. H., Oh, K. S., Kim, C. G. and Hong, C. S., "Design of radar absorbing structures using

- glass/epoxy composite containing carbon black in X-band frequency ranges,” *Composite Part B*, Vol. 35, No. 1, pp. 49-56, 2004.
19. Jung, W. K., Kim, B. K., Won, M. S. and Ahn, S. H., “Fabrication of Radar Absorbing Structure (RAS) Using GFR-Nano Composite and Spring-back Compensation of Hybrid-Composite RAS Shells,” *Journal of Composite Structures*, Vol. 75, No. 1-4, pp. 571-576, 2006.
 20. Chin, W. S. and Lee, D. G., “Development of the composite RAS (radar absorbing structure) for the X-band frequency range,” *Composite Structures*, Vol. 77, No. 4, pp. 457-465, 2007.
 21. Thostenson, E. T. and Chou, T. W., “Microwave processing: fundamentals and applications,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 30, No. 9, pp. 1055-1071, 1999.
 22. Air Force Link, <http://www.af.mil/photos/index.asp?galleryID=27>
 23. TDK corporation, http://www.tdk.co.jp/tefe02/e9e_bdj_003.pdf
 24. Kim, K. Y., Kim, W. S. and Lee, J. K., “Behavior of Laminates of Ferrites on Electromagnetic Wave Absorber,” *The Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 28, No. 8, pp. 594-599, 1991.
 25. Song, J. M., Kim, D. I., Kim, S. J., Ok, S. M., Kim, B. Y., Park, W. K., Lee, Y. G., Yoon, H. J., Kim, K. M. and Yea, B. D., “Absorption Properties according to Particle Size of Ferrite in EM Wave Absorber for Mobile Phone,” *Korea Electromagnetic Engineering Society*, Vol. 14, No. 3, pp. 290-295, 2003.
 26. Choi, K. K., Oh, J. H., Kim, S. S. and Kim, J. M., “Preparation and Microwave Absorbing Characteristics of Ni-Zn Ferrite Composite,” *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 29, No. 7, pp. 505-510 1992.
 27. Martha, P. H., “Microwave applications of soft ferrites,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 215-216, pp. 171-183, 2000.
 28. Kagotani, T., Kobayashi, R., Sugimoto, S., Inomata, K., Okayama, K. and Akedo, J., “Magnetic properties and microwave characteristics of Ni-Zn-Cu ferrite film fabricated by aerosol deposition method,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 290-291, pp. 1442-1445, 2005.
 29. Cho, S. B., Kwon, K. I., Choi, K. K., Kim, S. S. and Kim, J. M., “Influence of Heat-treatment Temperature on Microwave Absorbing Properties of Ni-Zn Ferrite,” *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 29, No. 3, pp. 177-182, 1992.
 30. Stonier, R. A., “Stealth aircraft & technology from World War II to the Gulf. Part II. Applications and design,” *SAMPE Journal*, Vol. 27, No. 5, pp. 9-18, 1991.
 31. Stonier, R. A., “Stealth aircraft & technology from World War II to the Gulf. Part I. History and background,” *SAMPE Journal*, Vol. 27, No. 4, pp. 9-17, 1991.
 32. Lee, S. E., Park, K. Y., Lee, W. J., Kim, C. G. and Han, J. H., “Microstructure and Electromagnetic Characteristics of MWNT-filled Plain-Weave Glass/Epoxy Composites,” *The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 19, No. 1, pp. 36-42, 2006.
 33. Abbas, S. M., Chandra, M., Verma, A., Chatterjee, R. and Goel, T. C., “Complex permittivity and microwave absorption properties of a composite dielectric absorber,” *Composites: Part A*, Vol. 37, pp. 2148-2154, 2006.
 34. Lee, Y. J., Yoon, Y. C. and Kim, S. S., “Fabrication and Properties of Thin Microwave Absorbers of Ferroelectric Materials Used in Mobile Telecommunication Frequency Bands,” *Korean Journal of Materials Research*, Vol. 12, No. 2, pp. 160-165, 2002.
 35. Kim, J. B. and Kim, T. W., “Optimization of Microwave Absorbing Performance in Polymer Matrix Composite Laminate,” *The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 14, No. 6, pp. 38-46, 2001.
 36. Kim, S. Y. and Kim, S. S., “Design and Properties of Microwave Absorbing Structures Composed of Fiber Composites,” Vol. 12, No. 6, pp. 1002-1008, 2001.
 37. Kim, D. H., Son, J. Y. and Kim, D. I., “A Study on Design of attached and dielectric pyramidal type EM Wave Absorber with a Super Wide - broadband Characteristics,” *Journal of the Research Institute of Maritime Industry*, Vol. 15, pp.75-79, 2004.
 38. Park, K. Y., Lee, S. E., Kim, C. G., Lee, I. and Han, J.

- H., "A Study on Electromagnetic Wave Absorbing Sandwich Structures," The Korean society for Aeronautical & space sciences, Vol. 32, No. 6, pp. 34-71, 2004.
39. Kim, J. B., Lee, S. W. and Kim, C. G., "A Study on Carbon Nano Materials as Conductive Fillers for Microwave Absorbers," Journal of the Korean Society for Composite Materials, Vol. 19, No. 5, pp. 28-33, 2006.
 40. Park, K. Y., Lee, S. E., Kim, C. G. and Han, J. H., "Fabrication and electromagnetic characteristics of electromagnetic wave absorbing sandwich structures," Composites Science and Technology, Vol. 66, No. 3-4, pp. 576-584, 2006.
 41. Kim, D. I., Kim, D. H. and Choi, D. H., "Design of a super wide-band EM wave absorber for a general purpose anechoic chamber," Current Applied Physics, Vol. 7, Issue 5, pp. 457-462, 2007.
 42. Eom, M. K. and Lee, W. I., "Composite Materials and Their Manufacturing Processes," The Korean society of Mechanical Engineers, Vol. 34, No. 5, pp. 310-325, 1994.
 43. Kim, K. Y., Kim, W. S., Ju, Y. D. and Kim, B. H., "A Study on the Measurement Error Induced by Air Gap of Electromagnetic Wave Absorber in the Coaxial Line Method," The Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 28, No. 11, pp. 874-879, 1991.
 44. Bennett, C. L. and Ross, G. F., "Time-Domain Electromagnetics and Its Applications," Proceedings of the IEEE, Vol. 66, No. 3, pp. 299-318, 1978.
 45. Nicolson, A.M. and Ross, G. F., "The measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques," IEEE Transactions on Instrument and Measurement, Vol. IM-9, No.4, pp. 377-382, 1970.
 46. Agilent, "Understanding the Fundamental Principles of Vector Network Analysis," Agilent Technologies, pp.12-13, 1997.
 47. Agilent, "Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials," Agilent Technologies, pp. 20-22, 2006.
 48. HVS Technologies, inc., Internet site, <http://www.hvstech.com/index.html>
 49. Courtney, W. E., "Analysis and evaluation of a method of measuring the complex permittivity and permeability of microwave insulators," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. MIT-18, No. 8, pp. 476-485, 1970.
 50. Kobayashi, Y. and Tanaka, S., "Resonant Modes of a Dielectric Rod Resonator Short-Circuited at Both Ends by Parallel Conducting Plates," IEEE Transactions on Microwave and Techniques, Vol. MTT-28, No. 10, pp. 1077-1085, 1980.
 51. Chen, L. F., Ong, C. K., Neo, C. P., Varadan, V. V. and Varadan, V., "Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization," Wiley, pp. 161-164, 209, 2004.
 52. Ghodgaonkar, D. K., Varadan, V. V. and Varadan, V. K., "Free-Space Measurement of Complex Permittivity and Complex Permeability of Magnetic Materials at Microwave Frequencies," IEEE Transactions on Microwave and Techniques, Vol. 39, No. 20, pp. 387-394, 1990.
 53. Ghodgaonkar, D. K., Varadan, V. V. and Varadan, V. K., "A Free-Space Method for Measurement of Dielectric Constants and Loss Tangents at Microwave Frequencies," IEEE Transactions on Microwave and Techniques, Vol. 37, No. 3, pp. 789-793, 1989.