

論文

전도성 나노 카본 블랙을 함유한 고분자 재료의 유전특성

진우석*, 이대길**

Dielectric Characteristics of the Polymers Containing Nano-size Conductive Carbon Black Powders

Woo-Seok Chin*, Dai-Gil Lee**

ABSTRACT

The electromagnetic (EM) absorption or shielding characteristics of a material is an important issue not only for military purpose but also for commercial purposes such as radar, electric or telecommunication devices. In order to design the effective electromagnetic wave absorber, the electromagnetic characteristics of the constituents of the material should be available in target frequency band. Also, it must be possible to predict the electromagnetic properties of absorbers with respect to the content of lossy ingredients. In this study, the dielectric properties of unsaturated polyester resins containing nano-size conductive carbon black powder were measured with a free space method in the X-band frequency range and analyzed with respect to the content of carbon black. Finally, the method for estimating the dielectric properties of polymeric resin containing conductive carbon black with respect to the EM frequency was developed and verified.

초 록

레이더 혹은 전자-통신장비에서 방출되는 전자파의 흡수/차폐는 군사적인 목적뿐만 아니라 상업적 목적으로도 매우 중요하다. 효과적인 전자기와 흡수체를 설계하기 위해서는 흡수체에 사용되는 재료의 대상 주파수 대역에서의 전자기적 성질을 정확히 알아야 하며, 손실재의 함량에 따른 정확한 전자기물성 예측이 가능해야 한다. 본 연구에서는 전도성 카본 블랙 나노 입자를 함유하는 폴리에스터 복합재료의 유전성질을 자유공간 기법을 이용하여 X-Band 주파수 대역에 걸쳐 측정하고 카본 블랙의 함량에 따라 정량적으로 분석하였으며, 임의의 카본 블랙 함량을 갖는 고분자 수지의 유전물성을 주파수에 따라 예측할 수 있는 방법을 제시하고 검증하였다.

Key Words: 전파회피(stealth), 전파흡수구조체(radar absorbing structures, RAS), 유전율(permittivity), 유전상수(dielectric constant), 손실 정접값(loss tangent), 자유공간 기법(Free space method), 카본 블랙 나노 입자(nano-size carbon black), 반사손실(reflection loss).

1. 서 론

고성능 전자 장비에 기반을 둔 전자전(electronic warfare) 추세의 현대전에서 상대방의 레이더에 탐지되지 않고 임무

를 수행할 수 있는 스텔스 기술(stealth technology)은 전쟁의 승패를 좌우할 수 있는 중요한 전략적 요소로 그 중요성이 더욱 강조되고 있으며, 이를 위한 전자파 흡수 연구가 세계 전역에서 활발히 진행되고 있는 상황이다[1,2]. 이

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과, 교신저자(E-mail:dglee@kaist.ac.kr)

러한 전자파 흡수 관련 기술은 군사분야뿐 아니라 상업적인 목적으로도 활용될 수 있다. 최근, EMC (electromagnetic compatibility), EMI (electro-magnetic interference), EMS (electro-magnetic susceptibility) 등과 같이 전자제품이나 통신기구 등에서 발생하는 전자기파가 인체에 미치는 영향에 대한 관심이 급증하고 있다[3]. 현대의 인간은 전자기파에 둘러싸여 살고 있다 말해도 과언이 아닐 만큼 인간의 몸은 다양한 종류의 전자기파에 노출되어 있으며, 이러한 전자기파는 통신기기의 전파 잡음 간섭을 비롯해 정밀한 전자기기의 오동작 및 인체 등 생체에 미치는 생체장해(biological hazard) 등의 문제를 야기할 수 있다[4]. 상업적 목적으로의 전자기파 흡수 관련 기술은 유해한 전자파를 차폐 및 흡수하여 고성능의 전자기기와 사용자를 보호하는 기술로서 주로 MHz의 저주파 영역에서 이루어지고 있으며, 군사적 목적으로의 전자기파 흡수 관련 기술은 주로 GHz의 고주파 영역에서 활용되고 있다. 그러나 최근에 있어서는 위성방송, 휴대폰 등의 상업용 주파수영역이 극초단파(UHF: 300 MHz ~ 3 GHz)까지 확대되어 군사용 주파수영역과의 경계가 점점 벌어지고 있으므로, 고주파 대역에서의 전자기파 흡수 기술의 상업적 분야에의 응용이 가능하다[2].

전자기와 흡수체는 흡수원리에 따라 유전손실, 자성손실을 이용하는 두 가지 흡수체로 분류된다. 자성손실을 이용한 흡수체는 고무나 고분자 수지에 자성손실을 유도할 수 있는 자성체 분말(ferrite, nickel, zinc, etc.)을 혼합하여 제조되는데, 자성손실을 일으키는 공명주파수(resonance frequency)가 MHz 대역에 존재하며, 그 대역 이후 손실값이 급격히 감소하기 때문에 고주파 대역에서의 사용이 용이하지 않을 뿐 아니라 그 무게가 무겁다는 단점이 있다. 유전손실을 이용한 흡수체는 기지에 카본 블랙(carbon black)이나 은분말(silver particle) 등을 첨가하여 재료의 전도성을 유발시켜 유전손실을 일으키는데, 이 중 카본 블랙은 페라이트의 약 1/14의 무게를 가지며, 고주파 대역에서도 흡수성능이 떨어지지 않는 장점이 있다[2]. 일반적으로 흡수체의 흡수성능은 설계 주파수와 흡수체의 조성 및 복소 유전율(complex permittivity), 복소 투자율(complex permeability)에 의해 결정된다. 따라서 앞에서와 같은 흡수원리를 통해 효과적인 전자기파 흡수체를 설계하기 위해서는 흡수체에 사용되는 재료의 대상 주파수 대역에서의 전자기적 성질을 정확히 알아야 하며, 손실재의 함량에 따른 정확한 전자기물성 예측이 가능해야 한다. 임의의 두 재료가 혼합된 경우, 재료의 함량에 따른 전자기 물성의 정확한 예측이 가능하다면, 이 재료들을 이용하는 전자기파 흡수체의 설계에 있어 시행착오의 상당 부분을 줄일 수 있다. 고분자 매질에 전도성 분말이 첨가된 혼합물의 유전율을 예측하기 위한 다양한 혼합법칙들이 선행 연구를 통해 제시되었으나[5-9], 대부분의 연구들이 특정 주파수에 한정

되어 수행되었으며 제시된 혼합법칙들이 마이크로파와 같은 고주파 대역에선 실험치를 잘 모사하지 못 하고 있다[10]. 또한, 실용적인 측면에서 특정 고주파 대역 전체에 걸쳐 혼합물의 유전율을 모사하는 연구는 아직 미미한 실정이다.

본 연구에서는 전도성 카본 블랙 파우더의 함유량에 따른 불포화 폴리에스터 수지의 유전성질을 자유공간 기법(free-space method)을 이용하여 X-Band 주파수 대역(8.2~12.4 GHz)에 걸쳐 측정하였다. 실험에 사용된 폴리에스터/카본 블랙 복합재료는 비자성체 물질이므로 복소 투자율은 주파수의 변화에 무관하며 일정한 값을 가지므로 재료의 유전적 성질(복소 유전율)의 변화를 중점적으로 관찰하였다. 실험을 통해 얻은 X-Band 대역에서의 폴리에스터/카본 블랙의 유전물성을 카본 블랙의 함량에 따라 정량적으로 분석하였으며, 임의의 카본 블랙 함량을 갖는 고분자 수지의 유전물성을 주파수에 따라 예측할 수 있는 실험식을 제시하였다. 이를 검증하기 위해 예측시 수치를 기저로 하는 복합재료에 대하여 제안된 방법을 적용해 보았으며, 임의의 카본 블랙 함량을 갖는 시편의 유전물성 및 반사손실을 예측하였다. 실험결과, 제안된 방법을 통해 예측된 결과가 실험치를 매우 잘 모사함을 확인 하였다.

2. 카본블랙을 함유한 폴리에스터 시편 제작

카본 블랙은 고무나 고분자를 기저로 하는 재료의 전자기적 응용분야에 첨가제로 많이 쓰이고 있는 재료로, 그 제작 방법과 구조에 따라서 다양한 종류가 존재한다. 전도성을 위하여 제작된 카본 블랙은 크게 침상의 아세틸렌 블랙(acetylene black)과 다공성 전도성 블랙으로 나뉜다. 아세틸렌 블랙은 침상의 형태로 전도성을 유발하며, 다공성 전도성 블랙은 중공의 웬 형태로서 표면적을 증가 시켜 전도성을 유발한다. 그 중 아세틸렌 블랙에 비하여 다공성 전도성 블랙이 적은 배합량으로 더 효과적으로 전도성을 유발하는 것으로 알려져 있다[11]. 본 연구에서는 다공성 전도성 카본 블랙인 Ketjen Black EC300J (Mitsubishi Chemical, Co., Japan)와 액상의 불포화 폴리에스터 수지(PC670, 애경화학)를 사용하여 유기/무기 복합재료(organic/inorganic composite) 시편을 제조하였다. 사용된 카본 블랙과 폴리에스터 수지의 특성 및 물성은 Table 1, 2와 같으며, 카본 블랙 파우더의 TEM (transmission electron microscopy) 사진은 Fig. 1과 같다.

불포화 폴리에스터와 카본 블랙으로 이루어지는 복합재료의 유전특성을 혼합법칙을 이용하여 모사하기 위해서는 복합재료를 구성하는 재료들의 주파수에 따른 복소 유전율을 알아야 하나, 미세한 분말 형태인 카본 블랙 자체의 복소 유전율은 실험으로 구하기가 매우 어려워 일반적으로는

Table 1 General properties of the carbon black (Ketjen Black EC300J)

Properties	Values
Surface area (^a BET) (m ² /g)	950
Particle size (nm)	37 nm
^b DBP absorption (ml/100g)	360
pH	9
Volatile content (%)	0.5
Ash content (%)	0.05

a: Method for analyzing the specific surface area of powder, which was developed by Brunauer, Emmett, and Teller

b: Dibutyl phthalate

Table 2 Material properties of the cured unsaturated polyester resin (P670)

Property	Value
Flexural strength (MPa)	104
Flexural stiffness (GPa)	3.9
Tensile strength (MPa)	54
Tensile modulus (GPa)	4.1
Tensile strain (%)	1.5

* Curing conditions: MEKPO (of 55% peroxide) 1 % + Co-Naph (6 %) 0.1 %, Room temp. for 24 hours, then 60°C for 5 hours

그 값이 주어지지 않는다. 또한, 카본 블랙은 나노 크기의 입자들이 포도송이처럼 뭉쳐서 다공성 응집물(porous aggregation) 형태로 존재하므로, 정확한 밀도를 알기 어려울 뿐 만 아니라 부피 비율에 따른 시편 제작이 용이하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 폴리에스터/카본 블랙 복합재료 전체 무게에 대한 카본 블랙의 무게 비율을 0 ~ 2.5 % 까지 0.5 % 단위로 조절하여 시편을 제작하였다. 카본 블랙의 함량이 2.5 %를 초과하면, 카본 블랙과 폴리에스터 수지의 계면의 면적증가로 인한 액상 혼합물의 급격한 점도 증가가 발생하여 교반이 불가능하였다. 카본 블랙의 넓은 표면적은 적은 양의 첨가량으로 큰 유전율을 유발하는 원리가 되기도 하지만 수지의 점도를 급격하게 증가시키는 원인이 되기도 한다. 열풍로(blast furnace)를 이용하여 80 °C 에서 24 시간 동안 카본 블랙 파우더 내의 수분을 제거하고 정해진 무게 비율에 맞춰 액상의 폴리에스터 수지와 1시간 동안 기계적으로 교반한 뒤, 경화 촉진제인 MEKPO (methyl-ethyl-ketone-peroxide)를 수지와의 무게 비율이 100 : 2 가 되도록 첨가하여 폴리에스터 수지와 카본 블랙의 혼합물을 제조하였다. 이렇게 제조된 액상 혼합물을 Fig. 2와 같이 상부 금형과 하부 금형으로 구성되는 닫힌 금형 내부에 주입하고, 80 °C 에서 2 시간 동안 경화하였다. 금형면은 연삭처리를 하여 제작된 시편의 표면조도가 고르게 나올 수 있도록 하였으며, 경화된 시편의 크기는 폭 150 mm, 길이 150 mm, 두께 4 mm 이다.

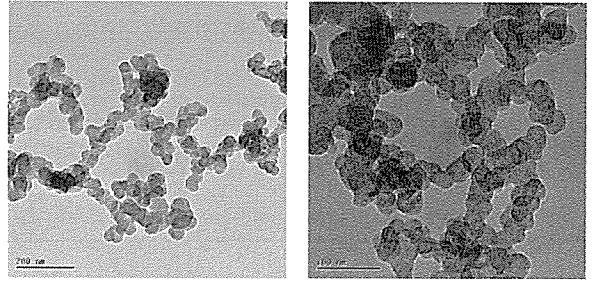
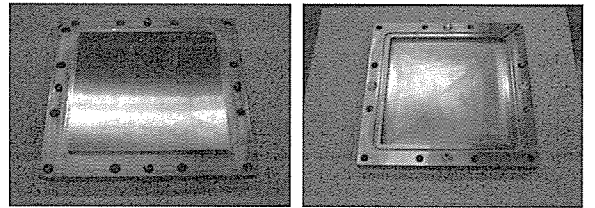


Fig. 1 TEM photographs of the carbon black powder used in this study.



(a) upper mold

(b) lower mold

Fig. 2 Mold for fabricating the polymer/carbon black composite specimens for free space measurement.

3. 자유공간 기법을 이용한 전자기물성 측정

재료의 전자기 물성의 측정을 위한 자유공간기법은 과거 기술적인 문제로 30 GHz 이상의 주파수 대역에서만 사용되어왔으나[12, 13], 정밀한 혼 렌즈 안테나(horn lens antenna)의 제작 기술과 측정 신호의 분석을 위한 망분석기(network analyzer)의 성능이 발전함에 따라 마이크로파 전체 대역(300 MHz ~ 300 GHz)에서 자유공간 기법을 이용한 재료의 전자기물성의 정확한 측정이 가능해졌다[14]. 전자기물성의 측정을 위한 자유공간 기법은 기존의 공동 공진기(空洞 共振器, cavity resonator), 도파관(導波管, waveguide), 동축관(同軸管, coaxial cable)을 이용하는 방법들에 비해 다음의 장점을 가진다. 복합재료나 세라믹 등과 같은 비균질/이방성 재료의 전자기물성 측정에 공동 공진기나 도파관 방법을 사용하게 되면, 측정과정에서 공동(cavity) 또는 도파관과 시편의 경계면에서 불필요한 고차 모드(higher order modes)가 발생하게 되어 측정의 정확성이 크게 떨어지게 되지만, 자유공간 기법을 이용할 경우 이러한 오차발생을 크게 줄일 수 있다. 또한, 자유공간 기법은 비파괴/비접촉 식으로 측정이 이루어지므로, 플라즈마 혹은 고온 및 저온 환경에서의 재료의 전자기물성 측정이 가능하다. 기존의 동축관과 도파관을 이용한 측정방법은 시편을 측정치구에 장착하기 위해 시편을 정밀하게 가공하여야 하므로, 전자기물성의 측정 정확도가 가공정밀도에 영향을

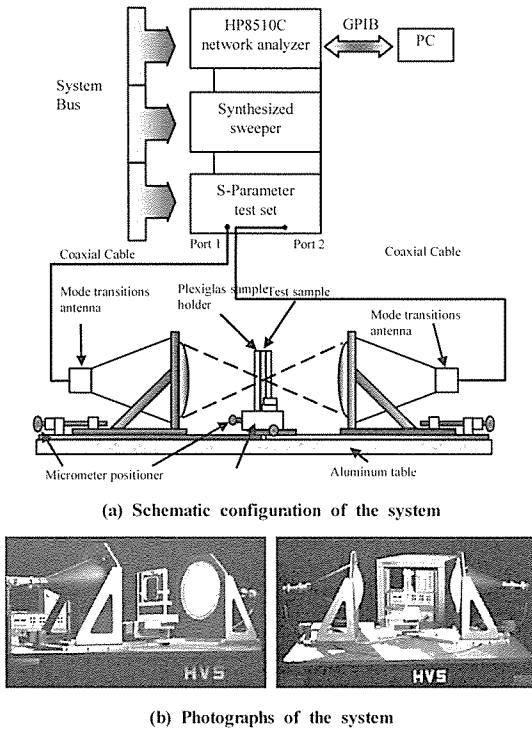


Fig. 3 Free space measurement system for characterization of electromagnetic properties of materials.

받는 단점이 있으나, 자유공간 기법의 경우 시편의 가공이 불필요하다[14].

본 연구에서 사용된 자유공간 측정시스템(HVS Technologies, Pennsylvania, USA)은 한 쌍의 정밀한 혼 렌즈 안테나(송신안테나, 수신안테나)와 시편 홀더(holder), Hewlett-Packard 8510C 망분석기, 데이터 획득을 위한 컴퓨터로 구성되며, 그 개략적인 구성도는 Fig. 3과 같다. 망분석기는 자유공간에서의 시편의 산란계수(S-parameter or scattering parameter)를 측정하는 데 사용되며, 측정된 산란계수로부터 재료의 전자기물성을 역산할 수 있다. 재료의 전자기물성 측정을 위한 자유공간기법은 시편의 가장자리에서 발생하는 회절 영향(diffraction effect)과 두 개의 혼 안테나 사이에서 발생하는 다중 반사(multiple reflection)로 인해 측정오차가 커지는 문제점을 갖고 있다[15]. 본 측정 시스템은 회절에 의한 측정오차를 없애기 위해, Table 3과 같은 제원의 Spot-focusing 혼 렌즈 안테나를 사용한다.

Fig. 4와 같이 렌즈로부터 초점거리($F = 305$ mm)만큼 떨어져 있는 면에선 완벽한 평면파(plane wave)가 만들어지므로, 시편의 크기가 초점에서의 3 dB 빔폭(10 GHz에서 약 30 mm)보다 3배 이상 크면 시편 가장자리에서 발생하는 회절의 영향을 제거할 수 있으며[14, 16], 본 연구

Table 3 Specifications of transmit-receive spot-focusing horn lens antennas

Item	Specifications
Type of antennas	Spot-focusing horn lens
Type of lens	Plano-convex dielectric lens
Diameter of lens	305 mm
Frequency range	X-Band (8.2 ~ 12.4 GHz)
Bistatic angle	37 ~ 65° (off-normal angle)
Spot width at the 3 dB points	1 wavelength (30 mm at 10 GHz)
Focal distance	305 mm
Depth of focus	10 wavelengths (300 mm at 10 GHz)

에서 사용된 평판 시편은 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 의 크기를 가지므로 이 조건을 만족한다. 두 개의 안테나 사이의 다중 반사로 인한 측정의 부정확성을 제거하기 위해, 측정 시스템에 대해 TRL(through-reflect-line) 보정을 수행하였으며, 망분석기의 Time-Domain Gating 기능을 사용하였다[14].

재료의 전자기물성은 대상 주파수영역에 걸쳐 측정된, 반사산란계수(S_{11})와 투과산란계수(S_{21})로부터 Nicolson-Ross의 방법을 이용해 구할 수 있다 [17]. 본 연구에서 사용된 시편은 유전재료이므로, 시편의 후면에 도체 금속평판을 삽입함으로써 반사산란계수 S_{11} 만을 측정하여 복소 유전율을 계산할 수 있다. 이 때 시편의 앞면은 송신 안테나의 초점면 (focal plane)에 위치시켜야 한다.

시편에 TEM (transverse electromagnetic) 파가 수직입사(normal incidence)하는 경우, 복소 반사산란계수 S_{11} 은 전송선로 이론(transmission line theory)로부터 복소 비유전율(complex relative permittivity; $\epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_r'(1 - j\tan\delta)$)과 다음의 식 (1)과 같은 관계가 있다.

$$S_{11} = \frac{jZ_S \tan(\gamma_S d) - 1}{jZ_S \tan(\gamma_S d) + 1} \quad (1)$$

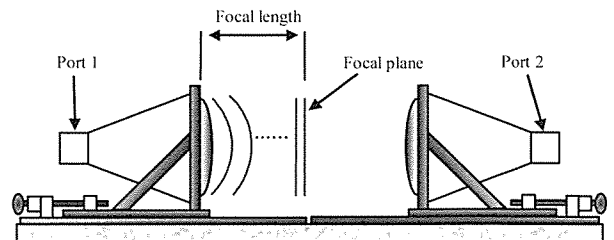


Fig. 4 Plane wave nature of electromagnetic fields in the spot-focusing horn lens antennas.

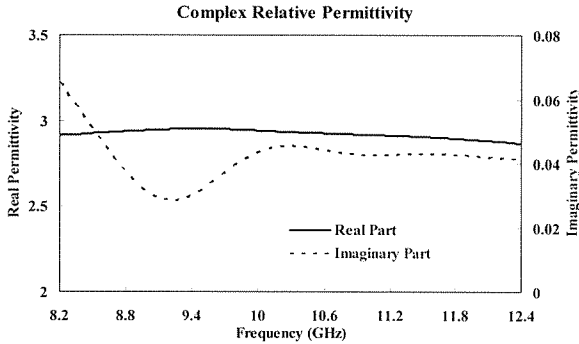


Fig. 5 Variation of the relative complex permittivity of unsaturated polyester resin with respect to the EM frequency.

여기서 d 는 시편의 두께, Z_0 는 비자성체 시편의 정규화 고유 임피던스(normalized intrinsic impedance)로 식 (2)와 같이 표현되며, γ 는 시편의 전파상수(propagation constant)로 자유공간에서의 파장 λ 와 복소 비유전율 ϵ_r 의 함수로 식 (3)과 같이 주어진다. 식 (1)의 첫 번째 첨자 1은 전자기파가 송신안테나(Port 1)로부터 방출됨을 의미하며, 두 번째 첨자 1은 이 전자기파가 다시 송신안테나(Port 1)로 되돌아감을 의미한다.

$$Z_S = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

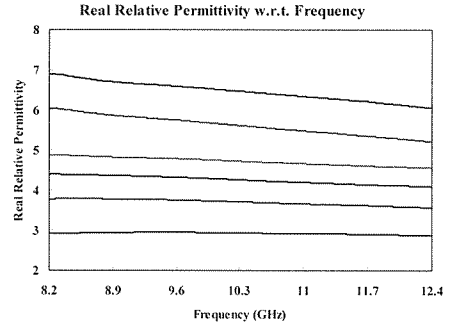
$$\gamma_S = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r} \quad (3)$$

복소 비유전율 ϵ_r 은 S_{11} 과 d 로 명시적(explicit)으로 표현되지 않으므로, 위의 식 (1), (2), (3)과 식 (4)와 같이 정의되는 오차함수(err)를 이용하여 수치해석적인 방법 (Muller method)을 통해 구한다[14].

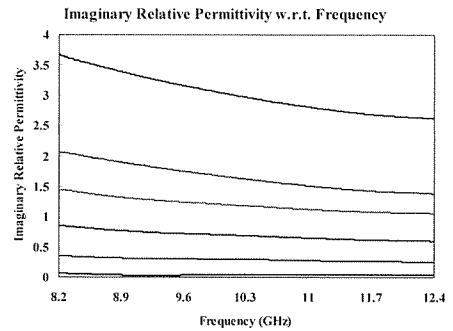
$$err = |S_{11}^m - S_{11}^c| \quad (4)$$

S_{11}^m 과 S_{11}^c 는 각각 복소 반사산란계수의 측정값과 계산값이며, 오차함수가 0이 되게 하는 해로부터 주파수에 따른 재료의 복소 비유전율을 얻을 수 있다.

카본 블랙을 함유하지 않은 불포화 폴리에스터의 X-Band (8.2~12.4 GHz) 주파수 대역에서의 복소 비유전율은 Fig. 5와 같으며, 카본 블랙의 함량에 따른 X-Band에서의 폴리에스터/카본 블랙 복합재료의 복소 비유전율의 실수항 및 허수항의 변화는 Fig. 6과 같다.



(a) dielectric constant



(b) imaginary part of the complex relative permittivity

Fig. 6 Variation of the complex relative permittivity of the polyester/carbon black composite with respect to the weight fraction of carbon black and the EM frequency.

이때, Fig. 6에서의 wt x 는 카본 블랙을 x 의 무게 분율(wt: weight fraction)로 함유한 불포화 폴리에스터 시편을 나타낸다. 카본 블랙의 함량이 증가함에 따라 폴리에스터/카본 블랙 복합재료의 복소 비유전율의 실수부, 허수부 모두 그 값이 증가하며, 실수부에 비해 허수부의 증가폭이 더 큼을 확인할 수 있다. 본 연구에서와 같이 시편의 후면에 금속 도체평판이 삽입된 경우 반사손실(reflection loss) RS는 다음의 식과 같이 정의되며, 이 식과 실험 데이터를 이용해 각각의 시편의 반사손실을 계산하였다.

$$RS \text{ (dB)} = 20 \log |S_{11}| \quad (5)$$

카본 블랙을 함유하지 않은 시편과 wt = 0.02의 카본 블랙을 갖는 시편의 반사손실은 Fig. 7과 같으며, 이 경우 반사손실이 가장 큰 것을 알 수 있었다. 순수한 폴리에스터의 경우 반사손실이 거의 일어나지 않으며, wt = 0.02의 카본 블랙을 갖는 시편의 경우 90 % 이상의 입사파를 흡수하는 -10 dB의 반사손실이 약 1.2 GHz의 대역폭에서 일어남을 확인할 수 있었다. 카본 블랙의 wt > 0.02의 경우

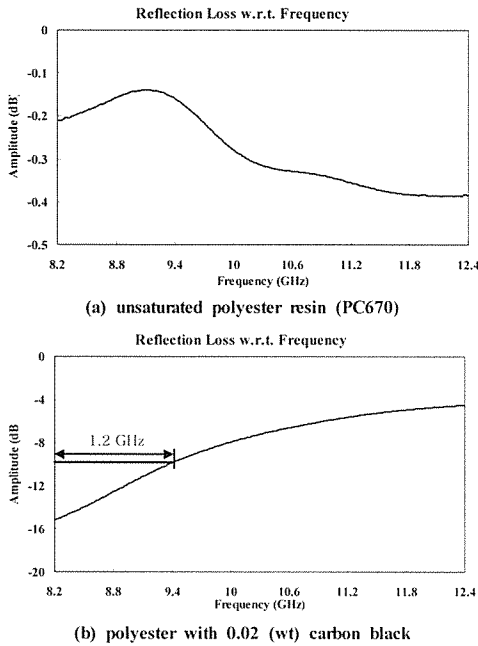


Fig. 7 Reflection loss of the polyester/carbon black composite with respect to the EM frequency.

손실이 일어나는 정합두께의 불일치로 인해 오히려 반사손실이 줄어들게 된다.

4. 함량에 따른 복소 비유전율의 예측

저유전율의 등방성 매질에 전도성 분말이 첨가된 혼합물의 유전율에 대한 연구는 최근 100 여 년 동안 여러 연구자에 의해 수행되었고, 다양한 이론과 경험에 근거하여 혼합물의 유전율을 모사하기 위한 혼합법칙들이 개발되었다[5-9]. 이러한 혼합물의 저주파에서의 전자기적 특성은 퍼콜레이션 이론(percolation theory)으로 기술될 수 있으며, 광학구간이나 적외선 구간 등의 고주파 영역에서는 유효매체 이론(effective medium theory)에 근거한 혼합 법칙으로 표현이 가능하다[10]. 그러나 전도성 분말의 함유율이 수 퍼센트 이상이 되면 대부분의 혼합법칙들이 실험치를 잘 모사하지 못 하는데, 이는 분말의 크기와 분산(dispersion), 응집(agglomeration) 등을 고려하지 않은 데 기인한다[10]. 카본 블랙을 포함하는 고분자 재료의 유전특성을 혼합법칙을 이용해 모사하기 위해서는 사용된 카본 블랙 자체의 복소 유전율을 정확히 알아야 하는데, 카본 블랙의 복소 유전율은 실험으로 구하기가 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 카본 블랙의 함량에 따라 폴리에스터/카본 블랙 복합재료의

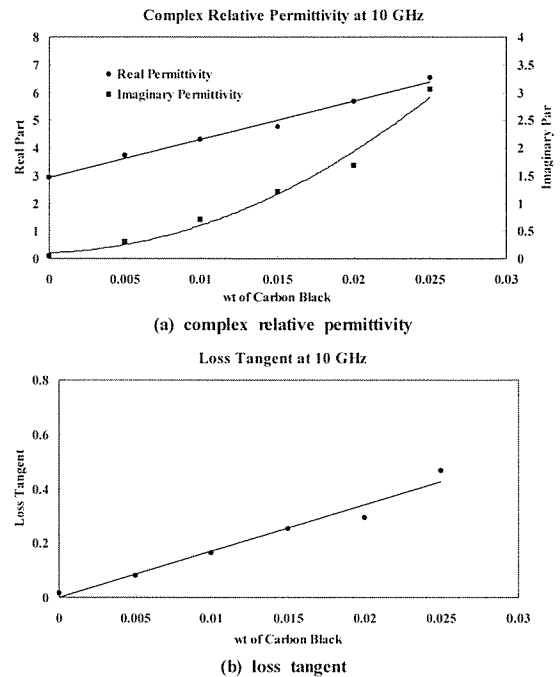


Fig. 8 Variation of the dielectric properties of the polyester/carbon black composite with respect to the weight fraction of carbon black at 10 GHz frequency.

유전거동을 정량적으로 분석하였다.

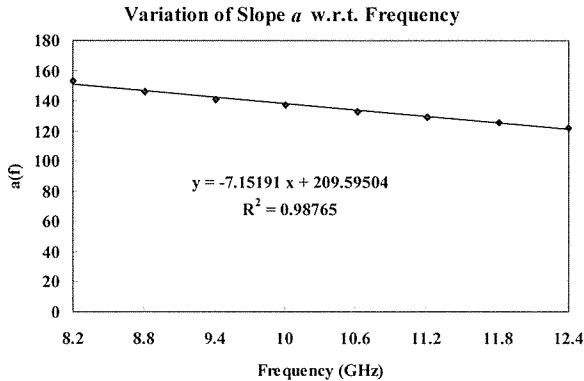
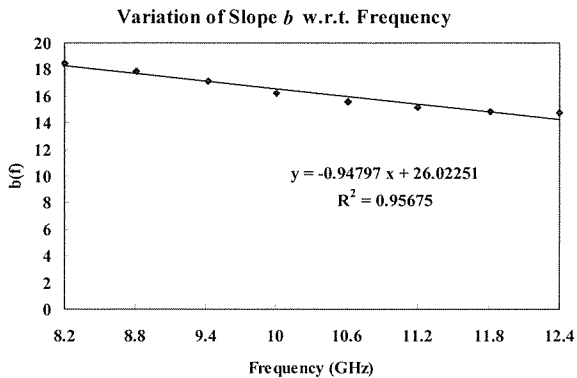
실험을 통해 얻은 카본 블랙 함량에 따른 10 GHz 주파수에서의 복소 비유전율과 손실 정접값(loss tangent)의 변화는 Fig. 8과 같으며, 유전상수가 카본 블랙 함량에 따라 선형적인 증가를 보이는 것에 반해 복소 비유전율의 허수부는 비선형적으로 증가한다. 복소 비유전율의 허수부와 실수부의 비율로 정의되는 손실 정접값의 경우 실수부의 값이 허수부에 비해 상대적으로 크기 때문에 전체적인 거동이 유전상수의 선형 증가와 유사함을 알 수 있다.

폴리에스터/카본 블랙 복합재료의 유전상수와 손실 정접값의 카본 블랙의 함량에 따른 선형 증가는 카본 블랙 함량의 1차 식으로 설명될 수 있으며, 이 관계식은 Fig. 8과 같은 그래프로부터 선형 최소제곱법(linear least-square regression)을 통해 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\epsilon_{r,x'}(f) = a \times x + \epsilon_{r,0'}(f) \quad (6)$$

$$\tan \delta_x(f) = b \times x + \tan \delta_0(f) \quad (7)$$

여기서 $\epsilon_{r,x'}$ 와 $\tan \delta_x$ 는 임의의 카본 블랙 함량에서의 폴리에스터/카본 블랙의 유전상수와 손실 정접값이고,

(a) slope a for the linear increment of the dielectric constant(b) slope b for the linear increment of the loss tangentFig. 9 Variation of the slopes a and b of polyester/carbon black composites with respect to the EM frequency.

$\epsilon_{r,0}'$ 와 $\tan \delta_0$ 는 카본 블랙을 포함하지 않는 폴리에스터의 유전상수와 손실 정접값으로 각각 주파수에 따라 변하는 값이다. x 는 카본 블랙의 무게 분율(wt)이며, a 와 b 는 유전상수와 손실 정접값의 선형 증가를 나타내는 각각의 기울기이다.

전체 X-Band 주파수 대역에서 폴리에스터/카본 블랙 복합재료의 유전거동을 모사하기 위해, X-Band 대역을 7 등분하는 지점의 주파수들(8.2, 8.8, 9.4, 10, 10.6, 11.2, 11.8, 12.4 GHz)에서 유전상수와 손실 정접값의 카본 블랙 함량에 따른 거동을 확인하였다. 유전상수와 손실 정접값이 카본 블랙 함량의 증가에 따라 선형 증가하는 거동은 주파수의 변화에 무관하였으나, 식 (6), (7)에서의 기울기는 Fig. 9와 같이 주파수에 따라 변화하며 그 값은 Table 4와 같다.

따라서, 위 식에서의 기울기를 주파수 f (GHz)의 함수로 표현할 수 있으며, 위의 식 (6), (7)을 다음과 같이 정리할 수 있다.

Table 4 Values of the slopes, dielectric constants and loss tangents of polyester resin obtained for various frequencies

Frequency (GHz)	Slope a	Slope b	$\epsilon_{r,0}'$	$\tan \delta_0$
8.2	153.3	18.4	2.916	0.0224
8.8	145.7	17.9	2.940	0.0126
9.4	141.0	17.1	2.953	0.0103
10.0	137.2	16.2	2.944	0.0148
10.6	133.2	15.6	2.927	0.0151
11.2	129.3	15.1	2.915	0.0147
11.8	125.4	14.8	2.897	0.0148
12.4	121.9	14.6	2.868	0.0144

$$\epsilon_{r,x}'(f, x) = a(f) \times x + \epsilon_{r,0}'(f) \quad (8)$$

$$\tan \delta_x(f, x) = b(f) \times x + \tan \delta_0(f) \quad (9)$$

그리고 폴리에스터/카본 블랙 복합재료의 복소 비유전율의 허수부 $\epsilon_{r,UP/CB}''$ 는 다음의 식을 통해 계산할 수 있다.

$$\epsilon_{r,x}'' = \tan \delta_x \times \epsilon_{r,x}' \quad (10)$$

식 (8), (10)과 같이 임의의 카본 블랙 함량을 갖는 폴리에스터/카본 블랙 복합재료의 유전물성은 주파수와 카본 블랙의 함량, 복합재료의 매질인 폴리에스터 수지의 유전물성(유전상수, 손실 정접값)의 함수로 표현이 가능하다. 따라서, 복합재료의 기지가 되는 수지와 이 수지에 임의의 함량의 카본 블랙이 함유된 복합재료 두 경우의 주파수에 따른 유전성질을 측정하면 앞에서와 같은 과정을 통해 교환 가능한 범위 내에서의 고분자 수지/카본 블랙 복합재료의 주파수에 따른 유전물성의 예측이 가능하다.

5. 유전율 모사법칙의 검증

이상을 통해 제시된 등방성 고분자 수지 매질에 전도성 분말이 함유된 혼합물의 유전물성을 모사하는 방법을 검증하기 위하여 매질을 달리하는 복합재료 시편을 제조하여 전자기 물성을 측정하였다. 다공성 전도성 카본 블랙인 Ketjen Black EC300J와 2액형 에폭시 수지 (E-Z Poxy, Aircraft Spruce Co., USA)를 이용하여 앞에서와 같은 방법으로 카본 블랙을 함유하지 않은 에폭시 시편과 wt = 0.025의 카본 블랙 무게 분율을 갖는 에폭시/카본 블랙 복합재료 시편을 제조하여 유전물성을 측정하였으며, 사용된 에폭시 수지의 상세한 사양은 Table 5와 같다.

카본 블랙을 함유하지 않은 에폭시 수지 자체의 복소 비유전율의 주파수에 따른 변화는 Fig. 10과 같으며, 폴리에스터에 비해 다소 높은 유전상수 값을 가짐을 알 수 있다.

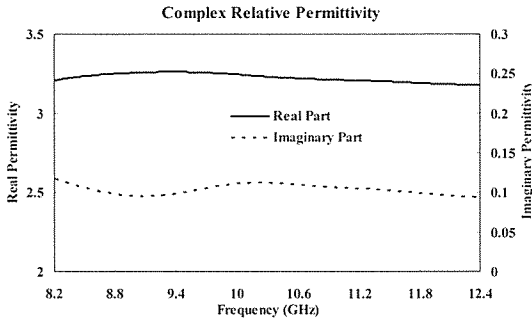
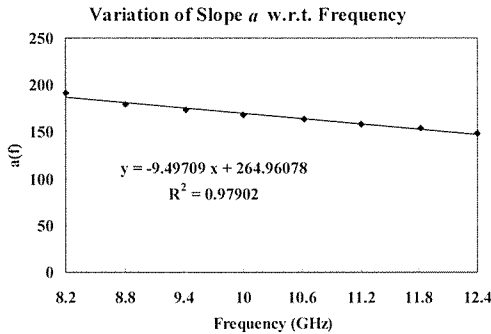
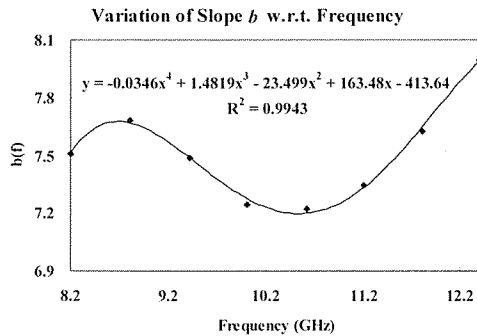


Fig. 10 Variation of the complex relative permittivity of epoxy resin (E-Z Poxy) with respect to the EM frequency.



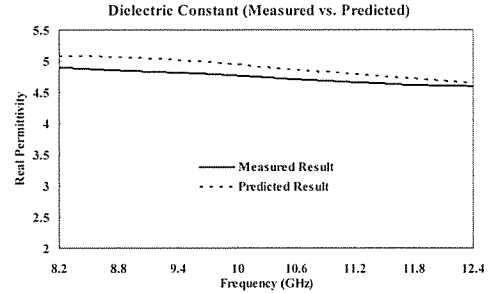
(a) slope a for the linear increment of the dielectric constant



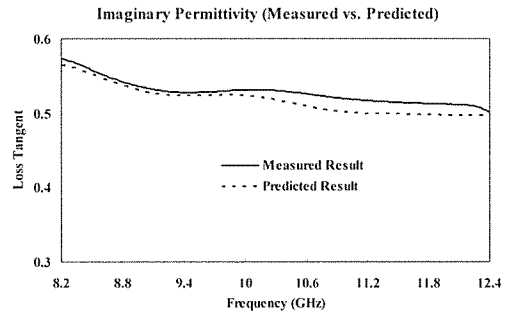
(b) slope b for the linear increment of the loss tangent

Fig. 11 Variation of the slopes a and b of epoxy/carbon black composites with respect to the EM frequency.

유전상수와 손실 정접값이 카본 블랙의 함량에 따라 선형으로 증가한다는 가정하에서, 두 개의 실험 데이터로부터 기울기 a 와 b 를 선형 최소 제곱법을 통해 얻었으며 주파수에 따른 기울기의 변화는 Fig. 11과 같다. 유전상수의 증가율 a 는 폴리에스터/카본 블랙 복합재료와 마찬가지로 주파수에 대한 1차 함수로 표현이 되었으나, 손실 정접값의 증가율 b 는 보다 복잡한 거동을 보였다. 이렇게 얻어진 주파수의 함수 $a(f)$, $b(f)$



(a) dielectric constant



(b) imaginary part of the complex relative permittivity

Fig. 12 Comparison of the measured complex relative permittivity of the epoxy/carbon black composite with 0.01 wt of carbon black with that obtained from the prediction formula.

Table 5 Material properties of the epoxy resin (E-Z Poxy)

Property	Value
Type	2-part epoxy system
Base resin	E-Z 10 epoxy resin
Hardener	E-Z 83
Mixing ration (weight)	100 : 44
Mixed viscosity (cPs)	1300 at 25°C
Pot life	about 2 hours
Specific gravity	1.14
Tensile strength (MPa)	69
Tensile modulus (GPa)	3.3
Glass transition temperature (°C)	91

*Curing conditions: Room temp. for 24 hours, then 66°C for 2 hours

와 Fig. 10의 에폭시 수지 자체의 유전물성을 이용해 임의의 카본 블랙 함량을 갖는 에폭시/카본 블랙 복합재료의 유전물성을 모사할 수 있다. 이를 검증하기 위해 추가적으로 wt = 0.01의 카본 블랙 무게 분율을 갖는 에폭시/카본 블랙 복합재료 시편의 전자기물성과 반사손실을 측정하고, 제안된 예측식을 통해 계산된 결과와 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 12와 같다. 유전상수의 경우 예측식을 통해 계산된 결과가 약 1~4 %의 오차범위 내에서 실험치를 잘 모사하였으며, 복소 비유전율의 허수부의 경우 약 0.8~3.5 %의 오차범위를 가지며 실험치를 모사함을 알 수 있었다. 예측식을 통해 얻은 wt = 0.01

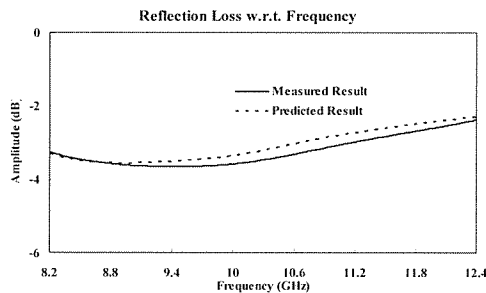


Fig. 13 Comparison of the measured reflection loss of the epoxy/carbon black composite with 0.01 wt of carbon black with that obtained from the prediction formula.

의 카본 블랙 무게 분율을 갖는 에폭시/복합재료 시편의 전자기물성과 식 (1)과 (4)를 이용해 반사손실을 계산하고 이를 실험을 통해 얻은 반사손실과 비교한 결과는 Fig. 13과 같으며, 실험치와 계산치가 매우 잘 일치함을 확인하였다.

이상에서 임의의 수지에 전도성 분말이 함유된 혼합물의 주파수에 따른 유전물성을 본 연구에서 제안된 방법을 이용해 예측하는 것이 가능함을 검증하였다. 임의의 카본 블랙 함량을 갖는 혼합물의 유전물성을 본 연구에서의 방법을 통해 획득한 후, 두께를 변화시켜가며 반사손실을 계산하면 최적의 반사손실을 얻을 수 있는 정합두께를 계산을 통해 손쉽게 예측할 수 있다. 이는 경험적 자료에 의존하던 기존의 전자기파 흡수체 설계의 효율성을 증대시키고 시행착오의 상당부분을 해소할 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 전도성 카본 블랙 분말의 함유량에 따른 불포화 폴리에스터 수지의 유전성질을 자유공간 기법(free space method)을 이용하여 X-Band 주파수 대역(8.2 ~ 12.4 GHz)에 걸쳐 측정하였다. 실험을 통해 얻은 X-Band 대역에서의 폴리에스터/카본 블랙의 유전물성을 카본 블랙의 함량에 따라 정량적으로 분석하였으며, 임의의 카본 블랙 함량을 갖는 고분자 수지의 유전물성을 주파수에 따라 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한, 제안된 방법을 실험을 통해 검증하였으며 제안된 방법을 통해 예측된 결과가 실험치를 매우 잘 모사함을 확인 하였다. 본 연구의 결과를 바탕으로 최적의 반사손실을 얻을 수 있는 전자기파 흡수체의 정합두께를 손쉽게 계산할 수 있으며, 이는 경험적 자료에 의존하던 기존의 전자기파 흡수체 설계의 효율성을 증대시키고 시행착오의 상당부분을 해소할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업과 두뇌한국21사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) Stonier, R. A., "Stealth Aircraft & Technology from World War II to the Gulf (Part I: History and Background)," *SAMPE Journal*, Vol. 27, No. 4, 1991, pp. 9-17.
- 2) 오정훈, 오경섭, 김천근, 홍창선, 이동민, "적층 복합재판을 이용한 전자기파 흡수 구조체의 설계," 한국복합재료학회지, 제15권, 제2호, 2002, pp. 18-23.
- 3) Hombach, V., Meier, K., Burkhardt, M., Kohn, E. and Kuster, N. "The Dependence of EM Energy Absorption upon Human Head Modeling at 900 MHz," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 44, Issue. 10, 1996, pp. 1865-1873.
- 4) Choi, H. D., Shim, H. W., Cho, K. Y., Lee, H. J., Park, C. S. and Yoon, H. G., "Electromagnetic and Electromagnetic Wave-Absorbing Properties of the SrTiO₃-Epoxy Composite," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 72, 1999, pp. 75-93.
- 5) Nelson, S., Kraszewski, A. and You, T., "Solid and Particulate Material Permittivity Relationships," *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 26, No. 1, 1991, pp. 45-51.
- 6) Lichteneker, K. and Rother, K., "Die Herleitung des logarithmischen Mischungsgesetz es aus Allgemeinen Prinzipien der Stationären Störung," *Physikalische Zeitschrift*, Vol. 32, 1931, pp. 255-260.
- 7) Maxwell-Garnett, J. C., "Colours in Metal Glasses and in Metallic Films," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 203, 1904, pp. 385-420.
- 8) Bruggeman, D. A. G., "Berechnung Verschiedener Physikalischer Konstanten von Heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus Isotropen Substanzen," *Annalen der Physik (Leipzig)*, Vol. 24, 1935, pp. 636-679.
- 9) Looyenga, H., "Dielectric Constants of Heterogeneous Mixtures," *Physica*, Vol. 31, 1965, pp. 401-406.
- 10) Achour, M. E., Malhi, M. El, Miane, J. L., Carmona, F. and Lahjomri, F., "Microwave Properties of Carbon Black-Epoxy Resin Composites and Their Simulation by Means of Mixture Laws," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 73, 1999, pp. 969-973.

- 11) 김진봉, 김태욱, “카본 블랙을 함유한 복합재 적층파의 유전율,” 한국복합재료학회지, 제16권, 제2호, 2003, pp. 48-53.
- 12) Lynch, A. C., “Precise Measurements on Dielectric and Magnetic Materials,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. IM-23, 1974, pp. 425-430.
- 13) Kadaba, P. K., “Simultaneous Measurement of Complex Permittivity and Permeability in the Millimeter Region by a Frequency-domain Technique,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. IM-33, 1984, pp. 336-340.
- 14) 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 Instrumentation and Measurement*, Vol. 37, No. 3, 1989, pp. 789-793.
- 15) Cullen, A. L., “A New Free-Wave Method for Ferrite Measurement at Millimeter Wavelengths,” *Radio Science*, Vol. 22, No. 7, 1987, pp. 1168-1170.
- 16) Musil, J. and Zacek, F., *Microwave Measurements of Complex Permittivity by Free Space Methods and Their Applications*, Elsevier, New York, 1986, pp. 44-60.
- 17) Baker-Jarvis, J., Vanzura, E. J. and Kissick, W. A., “Improved Technique for Determining Complex Permittivity with the Transmission/Reflection Method,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 38, No. 8, 1990, pp. 1096-1103.