

일방향 유리섬유/에폭시 복합재료의 유전성질 예측을 위한 혼합법칙

진우석* · 이대길**

Binary Mixture Rule for Predicting the Dielectric Properties of Unidirectional E-glass/Epoxy Composite Materials

Woo Seok Chin and Dai Gil Lee

Abstract

Since the electromagnetic properties of fiber reinforced polymeric composites can be tailored effectively by adding small amount of electromagnetic powders to the matrix of composites, they are plausible materials for fabricating the radar absorbing structures (RAS) of desired performance. In order to design the effective electromagnetic wave (EM) absorber with the fiber reinforced polymeric composites, the electromagnetic characteristics with respect to the constituents of the composite should be available in the target frequency band. In order to describe the dielectric behavior of low loss unidirectional fiber reinforced composite, theoretical models and mixture equations for estimating its dielectric constant were proposed with respect to the fiber, matrix volume fractions and fiber orientations, and verified by the experiments. From the investigation, it was found that the suggested binary mixture rules agreed well with the experimental results.

Key Words: Permittivity (유전율), Dielectric Constant (유전 상수), Free Space Method (자유공간기법), RAS (Radar Absorbing Structure; 전파흡수구조체).

1. 서론

레이다 (Radio Detection and Raging)는 3 MHz ~ 300 GHz의 주파수를 갖는 전자기파를 이용하여 원거리의 물체를 감지하는 장비를 일컫는다 [1]. 레이다의 전자기파는 빛의 속도로 진행하여 대상물을 감지하므로, 동시대의 어떠한 항공기 속도도 이에 미치지 못하며, 최근의 레이다 관련 기술의 현저한 발달은 필연적으로 레이다 탐지를 회피하기 위한 스텔스 기술의 개발로 이어졌다 [2]. 스텔스 성능을 극대화하기 위해서는 대상물의 RCS (Radar Cross Section)를 최소화해야 하며, RCS 감소를 위한 기술은 크게 반사파 감소 형상

화 (shaping), 전파흡수재료 (RAM; Radar Absorbing Material), 전파흡수구조체 (Radar Absorbing Structure) 등으로 나뉜다.

형상화의 경우 제한된 영역에서만 RCS 감소가 일어나며 항공기 설계 시의 공기역학적 요구조건과 상반되는 경우가 많고, RAM의 경우 그 무게가 무겁고 기계적 물성이 좋지 않아 빈번한 수리를 요한다는 등의 단점이 있다 [2]. 이러한 단점들을 극복하기 위해 RAS의 개념이 도입되었다. 기본적으로 RAS는 구조체의 역할과 함께 전파흡수체의 역할을 수행할 수 있으며, 최근 섬유강화 복합재료를 이용한 RAS의 개발이 활발히 진행되고 있다 [3]. 섬유강화 복합재료의 경우, 그 기지인 고분자 수지에 카본 블랙, 페라이트, 은 분말 등의 다양한 전자기 입자를 첨가하여 전자기 물성을 조절할 수 있으므로, RAS에 적합한 소재라 할 수 있다. 또한, 유리섬유강화 고분자 복합재료의 경우 저손실, 저유전상수를 가지므로 Salisbury Screen, Jaumann 흡수체 등과 같이 저항막과 저손

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

실 유전체로 구성되는 흡수체의 개발에 직접적으로 적용이 가능하다 [4].

섬유강화 복합재료를 이용한 전자파 흡수체를 개발하기 위해선, 대상 주파수 대역에서의 복합재료의 유전성질을 정확히 알아야 하며, 그 값을 손쉽게 조절할 수 있어야 한다. 또한, 복합재를 구성하고 있는 재료의 함유량에 따른 전자기 물성의 예측이 가능해야 한다. 그러나, 이방성 성질을 갖는 섬유강화 복합재료의 정확한 유전물성 측정에는 매우 어려우며, 그에 관련된 연구결과는 해당 국가가 군사기밀로 유지하기 때문에 획득이 사실상 불가능한 실정이다.

본 연구에서는 일방향 유리섬유/에폭시 복합재료의 유전성질을 자유공간기법 (free space method)을 이용해 X-Band (8.2 ~ 12.4 GHz) 대역에 걸쳐 측정하였으며, 그 거동을 모사하기 위해 축전기의 병렬, 직렬 연결로 구성되는 복합재료의 등가회로를 제안하였다. 제안된 등가회로로부터 섬유부피분율에 따른 복합재료의 유전상수를 예측할 수 있는 혼합법칙을 개발하였으며, 실험을 통해 이를 검증하였다.

2. 자유공간기법을 통한 유전물성 측정

본 연구에서 사용된 자유공간 측정시스템 (HVS Technologies, Pennsylvania, USA)은 자유공간에서의 평판형 시편 (150 mm × 150 mm)의 산란계수 (S-parameter or scattering parameter)를 측정하여 Nicolson-Ross의 방법으로 재료의 전자기물성을 역산하며 [5], 그 개략적인 구성도는 Fig. 1과 같다. 유전물성 측정을 위한 평판시편은 일방향 유리섬유/에폭시 프리프랙 (UGN150, SK Chemical, Korea)을 적층하여 오토클레이브 진공백 성형공정을 통해 제작하였으며, 사용된 프리프랙의 물성은 Table 1과 같다. 제작된 복합재료 평판시편은 약 53.5%의 섬유 부피분율을 가지며, X-Band 대역에서의 일방향 유리섬유/에폭시 복합재료 (UGN150)의 유전율은 Fig. 2와 같다. 일방향 유리섬유/에폭시 복합재료의 경우 전기장의 방향이 섬유방향과 일치할 경우의 유전물성과 수직할 경우의 유전물성이 서로 다른 유전 이방성 (dielectric anisotropy) 거동을 보임을 알 수 있다.

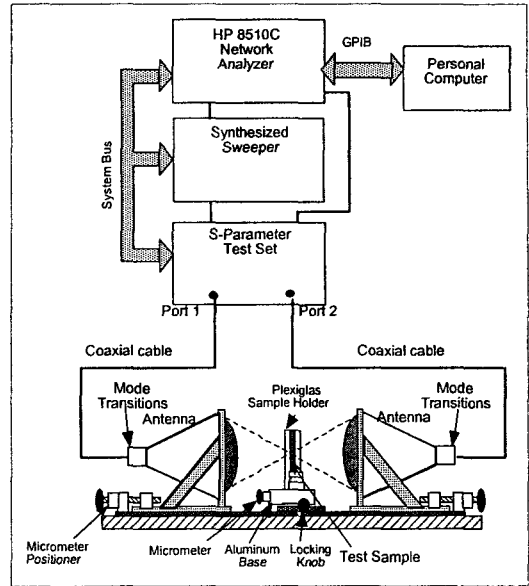


Fig. 1 Schematic diagram of the free space measurement system used in this study.

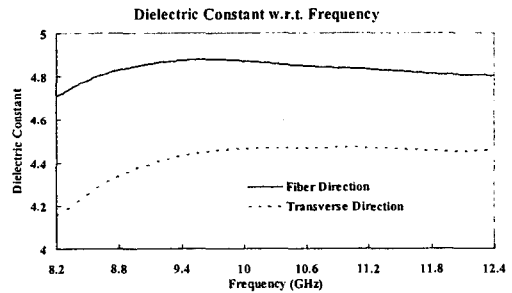


Fig. 2 Dielectric constants of the unidirectional E-glass/epoxy composite with respect to the frequency and fiber orientations.

3. 일방향 복합재의 등가회로와 모델링

본 연구에서 사용된 일방향 유리섬유/에폭시 복합재료는 유전체 (dielectric material)로 일반적으로 Fig. 3과 같이 저항 (resistance) R 과 축전기 (capacitance) C 로 이루어지는 등가회로로 모델링할 수 있다. 유전체 재료의 유전성질은 유전율 (permittivity)이라는 물리량으로 나타내며 다음과 같이 정의된다 [6].

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (1)$$

ϵ_r 을 복소 비유전율 (complex relative permittivity)이라 하며, 재료의 유전율을 공기의 유전율로 나눈 값이다.

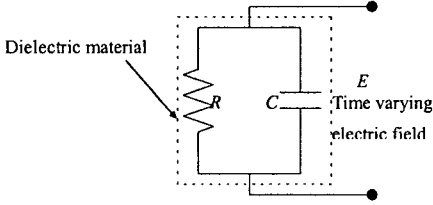
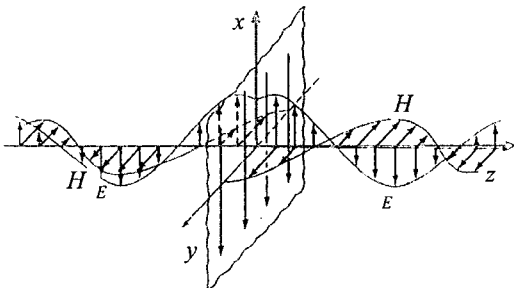


Fig. 3 Equivalent circuit model of dielectric materials.

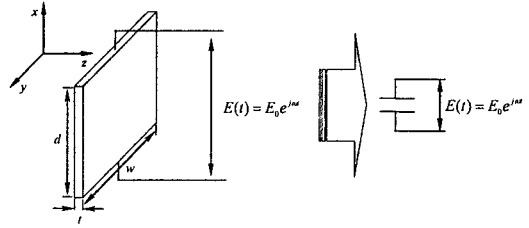
Table 1 Material properties of UGN150

Properties	Value
Ply thickness (mm)	0.122
Surface density (kg/m ²)	0.224
Fiber surface density (kg/m ²)	0.150
Resin content (%)	33
Fiber density (g/cm ³)	2.54
Resin density (g/cm ³)	1.2

본 연구에서 사용된 UGN150의 경우 손실 정접 값 ($\tan\delta = \epsilon_r''/\epsilon_r'$)이 약 0.01 ~ 0.03으로 매우 저 손실 (extremely low-loss) 재료이며, 구조용으로 사용되는 복합재료의 두께가 상대적으로 얇은 것을 감안하면 UGN150을 무손실 재료로 가정할 수 있다. 이 경우 Fig. 3의 등가회로에서 손실항인 저항을 생략할 수 있다. Fig. 4(a)와 같이 복합재료 평판에 z 방향으로 전파하는 시변 전기장이 가해지는 경우, 평판을 단면적 $A = wt$ 를 가지며 길이 d 만큼 떨어져 있는 평행판 축전기로 모델링이 가능하다.



(a) Electric field incident on a composite plate



(b) Equivalent circuit model of a composite plate
Fig. 4 E-glass/epoxy composite plate exposed to the time varying electric field.

유전체 재료의 전자기적 특성은 유전율과 전기장 벡터의 관계로 규정되며, 유전체 재료를 축전기로 모델링 함으로써 식 (2)와 같이 유전체의 정전용량 (C)과 유전체에 저장되는 전하량 (Q)의 문제로 등가화 할 수 있다 [6].

$$Q = CV \quad (2)$$

이때 V 는 유전체에 가해지는 전기장의 전위 (electric potential, volt)이다.

3.1 섬유방향으로의 유전상수 예측

전기장 벡터의 방향이 일방향 복합재료 평판의 섬유배향 방향과 일치할 경우, Fig. 5와 같이 정방형 단면을 갖는 RVE (representative volume element)를 잡으면, 이는 유리섬유 한 가닥과 이를 둘러싼 수지로 구성된다.

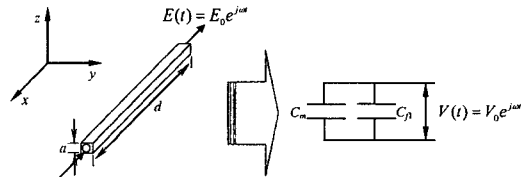


Fig. 5 RVE of UGN150 laminate and its equivalent circuit model with the fiber direction parallel to the electric field vector.

RVE의 등가 유전상수와 유리섬유의 섬유배향의 유전상수, 수지의 유전상수를 각각 ϵ_{RVE}' , ϵ_{fj}' , ϵ_m' 이라 하면, 식 (2)와 Fig. 5의 등가회로로부터 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$\epsilon_{RVE}' = \epsilon_{fj}' v_j + \epsilon_m' v_m \quad (3)$$

여기서 v_f 와 v_m 은 각각 섬유와 기지의 부피분율 (volume fraction)을 나타낸다. 이 때, 복합재료 적층판을 RVE가 직렬 및 병렬 연결된 등가회로로 모델링 함으로써, 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$\epsilon_j' = \epsilon_{RVE}' = \epsilon_{f1}'v_f + \epsilon_m'v_m \quad (4)$$

여기서 ϵ_j' 은 복합재료 적층판의 섬유방향으로의 등가 유전상수이다.

3.2 섬유 수직방향으로의 유전상수 예측

전기장 방향이 일방향 복합재료 평판의 섬유배향 방향과 수직일 경우, Fig. 6과 같이 전기장 방향의 수직방향으로 정사각형 단면 ($A = a^2$)을 갖는 RVE를 잡고, 이를 몇 부분으로 분리하였다. 유리섬유의 직경은 매우 작으므로 (10 ~ 12 μ m), 섬유의 단면을 정사각형으로 가정하였으며 ϵ_{f2}' 는 유리섬유의 수직방향의 유전상수이다.

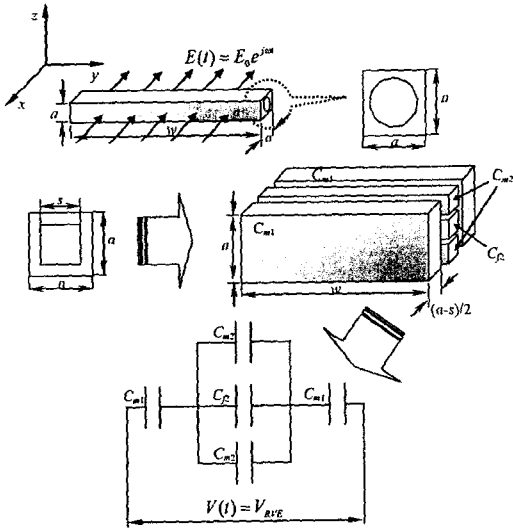


Fig. 6 RVE of UGN150 laminate and whose equivalent circuit model when the fiber direction is perpendicular to the electric field vector.

앞에서와 마찬가지로 식 (2)와 Fig. 6의 등가회로로부터 RVE의 유전상수를 구하면 다음과 같다.

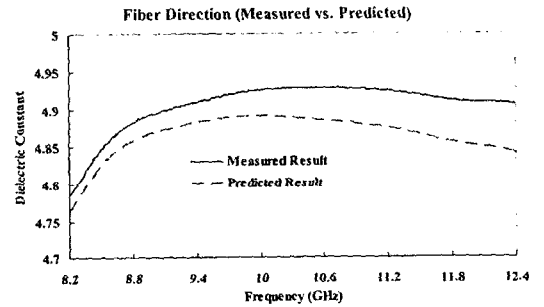
$$\epsilon_{RVE}' = \frac{\epsilon_m'^2 + \epsilon_m' \sqrt{v_f} (\epsilon_{f2}' - \epsilon_m')}{\epsilon' (1 + v_f - \sqrt{v_f}) + \epsilon_{f2}' (\sqrt{v_f} - v_f)} \quad (5)$$

복합재료 적층판은 이러한 RVE가 모여서 구성되므로, 적층판의 섬유 수직방향으로의 등가 유전상수를 ϵ_2' 라 하면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

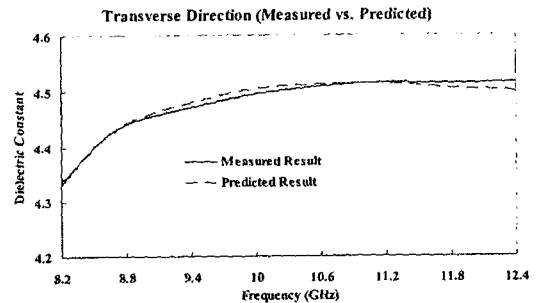
$$\epsilon_2' = \epsilon_{RVE}' \quad (6)$$

4. 혼합법칙의 검증

이상에서 제안된 유전상수 혼합법칙을 검증하기 위해 같은 재료로 섬유 부피분율을 달리하여 두 개의 평판형 시편 ($v_f = 51.9, 55.5\%$)을 제작하고, X-Band 대역에서 유전상수를 측정하고 혼합법칙을 통해 예측된 값과 측정값을 비교하였다. 이 중 55.5%의 섬유 부피분율을 갖는 UGN150 평판 시편의 섬유방향과 그 수직방향의 유전상수의 측정결과와 예측결과는 Fig. 7과 같다.



(a) Fiber direction



(b) Transverse direction

Fig. 7 Comparison of the measured dielectric constant of UGN150 plate in X-band frequency with that obtained from the mixture rules.

51.9%의 복합재료 평판의 경우 섬유방향으로

최대 1.1%, 수직방향으로 최대 1.7%의 오차 내에서 혼합법칙을 통해 예측된 결과가 실험치를 잘 모사하였으며, 55.5%의 복합재료 평판의 경우 섬유방향으로 최대 1.3%, 수직방향으로 최대 0.4%의 오차 내에서 실험치를 잘 모사하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 일방향 유리섬유/에폭시 복합재료의 유전성질을 자유공간기법 (free space method)을 이용해 X-Band (8.2 ~ 12.4 GHz) 대역에 걸쳐 측정하였으며, 그 거동을 모사하기 위해 축전기의 병렬, 직렬 연결로 구성되는 복합재료의 등가회로를 섬유 배향방향에 따라 제안하였다. 제안된 등가회로로부터 섬유부피분율에 따른 복합재료의 섬유방향 및 섬유 수직방향의 유전상수를 예측할 수 있는 혼합법칙을 개발하고, 섬유부피분율을 달리하는 시편을 이용해 제안된 혼합법칙을 검증하였다. 실험 결과, 혼합법칙을 통해 예측된 유리섬유/에폭시 복합재료의 유전상수가 실험치를 잘 모사함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업과 국방과학연구소에서 지원하는 위탁연구과제의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Seo, Il Sung, Chin, Woo Seok and Lee, Dai Gil, "Characterization of Electromagnetic Properties of Polymeric Composite Materials with Free Space Method," *12th International Conference on Composite Structures*, Melbourne, Australia, 2003.
- (2) Vinoy, K. J., *Radar Absorbing Materials from Theory to Design and Characterization*, Kluwer Academic Publisher, Boston, 1996.
- (3) Bradshaw, P. S., "Signature Management and Structural Materials," *Material and Processing-Move to the 90's, Proc. of SAMPE*,

Amsterdam, 1989, pp. 187-196.

- (4) Chambers, B. and Tennant, A., "Optimised Design of Jaumann Radar Absorbing Materials using a Genetic Algorithm", *IEE Proceedings: Radar, Sonar, and Navigation*, Vol. 143, No.1, February, 1996.
- (5) 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.
- (6) Cheng, David K., *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*, Addison-Wesley Publishing Co., Massachusetts, 1993.