유리섬유/에폭시 복합재료 적층판의 유전성질 예측을 위한 적층판 법칙

진우석* · 이대길**

Laminating Rule for Predicting the Dielectric Properties of the E-glass/Epoxy Laminate Composite

Woo Seok Chin and Dai Gil Lee

Abstract

Since the electromagnetic properties of fiber reinforced polymeric laminate composite can be tailored effectively by adjusting its composition and regulating the stacking sequence, it is plausible material 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 laminate composite, its electromagnetic characteristics should be available and could be regulated easily in the target frequency bands. In this study, dielectric characteristics of the E-glass/epoxy laminate composites were measured by the free space method in the X-band frequency range (8.2 ~ 12.4 GHz). In order to describe the dielectric behavior of laminate composites of arbitrary stacking sequences, the equivalent circuit model and the laminating equations for estimating dielectric properties were proposed, and experimentally verified. From the comparison of the predicted and measured data, the proposed method predicted well the experimentally measured data.

Key Words: Permittivity (유전율), Polymeric Composite (고분자 복합재료), Free Space Method (자유공간기법), RAS (Radar Absorbing Structure; 전파흡수구조체), Laminating Rule (적층판 법칙).

1. 서 론

최근의 레이더 관련 기술의 현저한 발달은 필연적으로 레이더 탐지를 회피하기 위한 스텔스 기술의 개발로 이어졌다 [1]. 스텔스 성능을 극대화하기 위해서는 대상물의 RCS (Radar Cross Section)를 최소화해야 하며, RCS 감소를 위한 기술은 크게 반사파 감소 형상화 (shaping), 전파흡수재료 (RAM; Radar Absorbing Material), 전파흡수구조체 (Radar Absorbing Structure) 등으로 나뉜다. 이 중 RAS는 기존의 형상화 및 RAM의 단점을 극복하기 위해 도입되었으며 [2], 기본적으로 구조체의 역할과 함께 전파흡수체의 역할을 수행할 수 있기 때문에 최근 섬유강화 복합재료를 이용한 RAS의 개발이 활발히 진행되고 있다 [3]. 섬유강화 복합재료의 경우, 그 조성 (기지와 보강섬유의 종류)과 적층순서를 제어하여 전자기 물성을 조절할 수 있으므로, RAS에 적합한 소재라 할 수 있다 [1]. 유리섬유강화 고분자 복합재료의 경우 저손실, 저유전상수를 가지므로 Salisbury Screen, Jaumann 흡수체 등과 같이 저항막과 저손실 유전체로 구성되는 전자기파 흡수체의 개발에 직접적으로 적용이 가능하다 [4].

섬유강화 복합재료를 이용한 전파흡수구조체를 개발하기 위해선, 대상 주파수 대역에서의 복합재료의 유전성질을 정확히 알아야 하며, 그 값을 손쉽게 조절할 수 있어야 한다. 그러나 이방성 성질을 갖는 섬유강화 복합재료의 정확한 유전물

* 한국과학기술원 기계공학과
** 한국과학기술원 기계공학과

성 측정은 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 저항과 축전기가 병렬로 구성되는 복합재료의 등가회로를 제안하였다. 이로부터 임의의 적층순서를 갖는 유리섬유 고분자 복합재료 적층판의 등가 복소 비유전율을 예측할 수 있는 적층판 법칙을 개발하였으며, 실험을 통해 이를 검증하였다.

2. 자유공간기법을 통한 유전물성 측정

본 연구에서 사용된 자유공간 측정시스템 (HVS Technologies, Pennsylvnia, USA)은 자유공간에서의 평판형 시편 (150 mm × 150 mm)의 산란계수 (S-paremeter or scattering parameter)를 측정하여 Nicolson-Ross의 방법으로 재료의 전자기물성을 역산하며 [5], 그 개략적인 구성도는 Fig. 1과 같다.

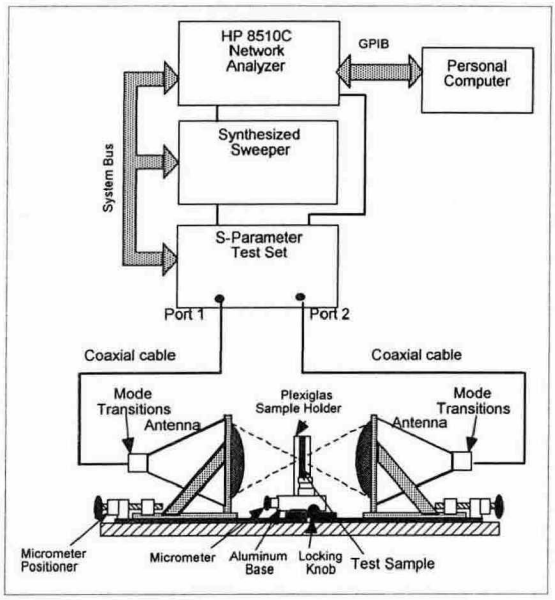
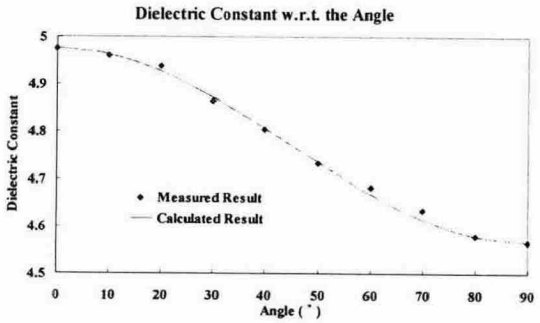
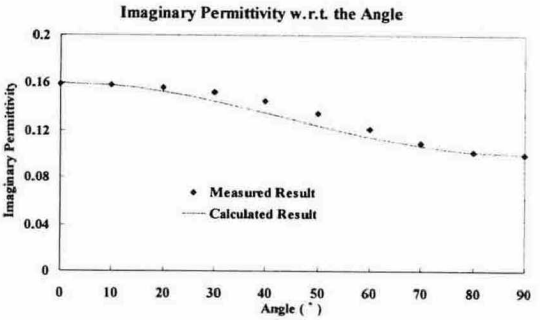


Fig. 1 Schematic diagram of the free space measurement system used in this study.

유전물성 측정을 위한 평판시편은 일방향 유리섬유/에폭시 프리프렉 (UGN150, SK Chemical, Korea) 30장을 적층하여 오토클레이브 진공백 성형공정을 통해 제작하였으며, 사용된 프리프렉의 물성은 Table 1과 같다. 제작된 복합재료 평판시편은 약 53.5%의 섬유 부피분율을 가지며, 입사 전자파의 전기장 방향과 섬유방향 사이의 각도 (θ)에 따른 X-Band 대역에서의 일방향 유리섬유/에폭시 복합재료 (UGN150)의 복소 비유전율의 거동은 Fig. 2와 같다.



(a) Dielectric constant w.r.t. θ



(b) Imaginary relative permittivity w.r.t. θ

Fig. 2 Comparison of the measured complex relative permittivity of the unidirectional E-glass/epoxy composite (UGN150) with that obtained from Equation (1) at 10 GHz frequency.

이러한 일방향 복합재료의 유전 이방성 (dielectric anisotropy) 거동은 다음의 식 (1)로 기술할 수 있다 [1].

$$[\epsilon_{r,ij}]^{\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{r,11} & 0 \\ 0 & \epsilon_{r,22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$[\epsilon_{r,ij}]^{\theta}$는 임의의 각 θ에서의 일방향 적층판의 복소 비유전율 (complex relative permittivity)이며, $\epsilon_{r,11} = \epsilon_{r,11}' - j\epsilon_{r,11}''$과 $\epsilon_{r,22} = \epsilon_{r,22}' - j\epsilon_{r,22}''$는 각각 일방향 적층판의 섬유방향과 섬유 수직방향으

로의 복소 비유전율이다.

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

3. 유전물성 예측을 위한 적층판 법칙

3.1 유전체의 등가회로 모델

본 연구에서 사용된 일방향 유리섬유/에폭시 복합재료는 유전체 (dielectric material)로 일반적으로 Fig. 3과 같이 저항 (resistance) R과 축전기 (capacitance) C로 이루어지는 등가회로로 모델링 할 수 있으며, 축전기와 저항은 각각 유전체의 유전상수와 복수 비유전율의 허수부에 관련된다.

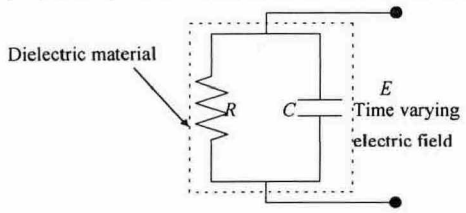
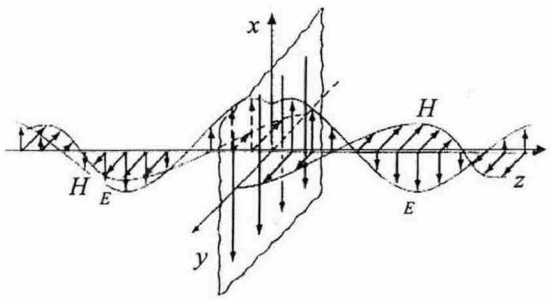
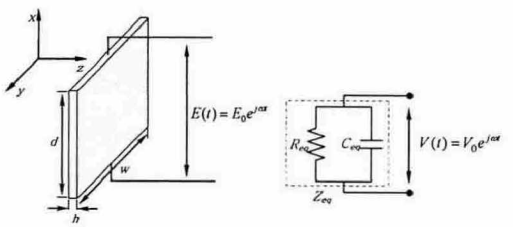


Fig. 3 Equivalent circuit model of dielectric materials.

Fig. 4(a)와 같이 복합재료 평판에 z 방향으로 전파하는 시변 전기장이 가해지는 경우, 평판을 단면적 $A = Wh$를 가지며 길이 d 만큼 떨어져 있는 평행판 축전기 (C_{eq}) 및 저항 (R_{eq})으로 모델링 할 수 있으며, Fig. 4(b)의 등가회로의 임피던스 (Z_{eq})는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.



(a) Electric field incident on a composite plate



(b) Equivalent circuit model of a composite plate

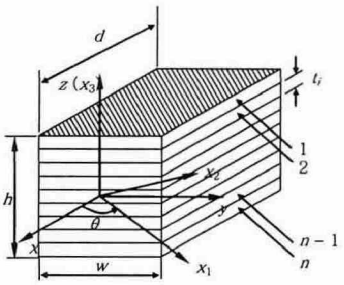
Fig. 4 E-glass/epoxy composite plate exposed to the time varying electric field.

$$Z_{eq} = \frac{R_{eq}}{1 + jwC_{eq}R_{eq}} \tag{2}$$

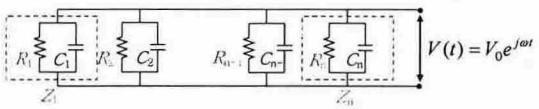
3.2 복합재료 적층판의 등가회로 모델

Fig. 5(a)의 임의의 적층순서를 갖는 n개의 플라이로 구성되는 복합재료 적층판에 시변 전기장이 가해질 때, 복합재료 적층판의 등가 임피던스 Z_{eq}는 Fig. 5(b)의 등가회로로부터 각각의 플라이의 임피던스 (Z_1, Z_2, ..., Z_n)와 다음의 식 (3)과 같은 관계를 갖는다.

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \ldots + \frac{1}{Z_n} \tag{3}$$



(a) Schematic diagram of laminate composite



(b) Equivalent circuit model

Fig. 5 E-glass/epoxy composite laminate exposed to the time varying electric field.

Fig. 5(b)와 같이 적층판의 각각의 플라이는 평행판 축전기와 저항으로 구성되는 등가회로로 모델링 할 수 있으므로, 이로부터 플라이의 등가 임피던스 Z_i를 각각의 플라이의 복소 유전율 $\epsilon_i = \epsilon_i' - j\epsilon_i''$과 치수의 함수로 표현할 수 있다 ($i$

= 1, 2, ..., n).

$$\frac{1}{Z_i} = \frac{wt_i W(\epsilon_i'' + j\epsilon_i')}{d} \tag{4}$$

마찬가지로, 식 (2)의 적층판의 등가 임피던스를 다음의 식과 같이 정리할 수 있으며,

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{whW(\epsilon_{eq}'' + j\epsilon_{eq}')}{d} \tag{5}$$

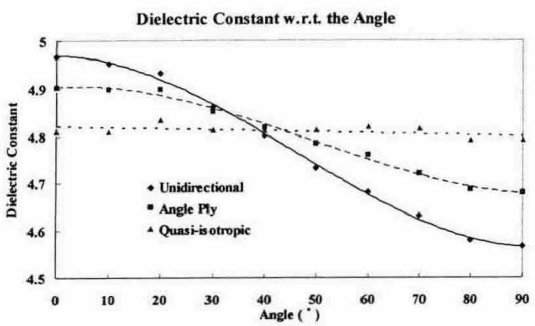
식 (3), (4), (5)로부터 적층판의 복소 비유전율 $\epsilon_{r,eq}$의 예측을 위한 적층판 법칙을 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$\epsilon_{r,eq} = \frac{1}{h}\sum_{i=1}^{n} t_i \epsilon_{r,i} \tag{6}$$

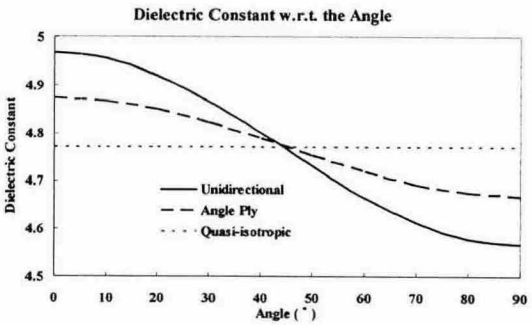
이때, $\epsilon_{r,i}$는 임의의 적층각을 갖는 플라이의 복소 비유전율로 식 (1)을 이용해 구할 수 있다.

3.3 유전율 예측을 위한 적층판 법칙의 검증

이상에서 제안된 유전율 예측을 위한 적층판 법칙을 검증하기 위해, $[\pm30]_{8S}$와 $[60/0/\text{-}60]_{5S}$의 적층순서를 갖는 복합재료 평판의 X-Band 대역에서의 복소 비유전율을 입사 전자기파의 전기장 방향과 적층판의 주축 사이의 각 θ를 0 ~ 90° 까지 10° 간격으로 변화시켜가며 측정하고, 이를 적층판 법칙을 통해 예측한 결과와 비교하였다. Fig. 6과 7은 10 GHz에서의 일방향 적층판, $[\pm30]_{8S}$ 적층판, $[60/0/\text{-}60]_{5S}$ 적층판의 복소 비유전율의 예측치와 측정치를 보여준다.

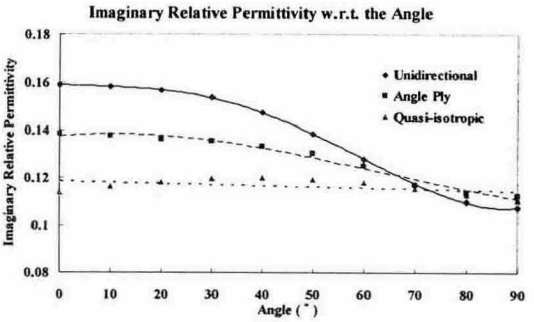


(a) Measured result

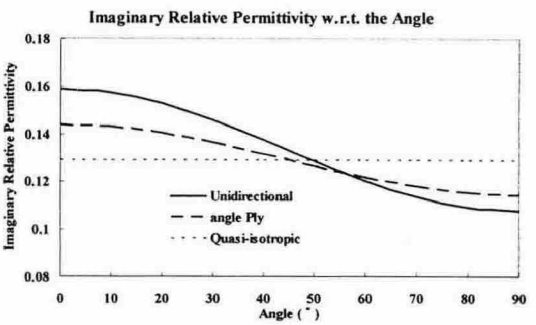


(b) Calculated result by Equation (6)

Fig. 6 Variation of the dielectric constant of three different E-glass/epoxy laminate composite (UGN150) with respect to the angle θ at 10 GHz frequency.



(a) Measured result



(b) Calculated result by Equation (6)

Fig. 7 Variation of the imaginary part of the complex relative permittivity of three different E-glass/epoxy laminate composite (UGN150) with respect to the angle θ at 10 GHz frequency.

세 경우 모두, 본 연구에서 제안된 적층판 법칙이 실제 측정치를 잘 모사함을 알 수 있다. 유정상수의 경우, 적층판 법칙을 통한 예측치가 측

정치보다 다소 작았으며 (최대 1.3%), 복소 비유전율의 허수부의 경우 반대의 경향 (최대 15%)을 보임을 알 수 있었다. 이는 각각의 플라이에서의 다중 산란을 무시한 결과로 사료된다. $[60/0/-60]_{5S}$의 준등방성 적층판의 경우, 기계적 물성과 마찬가지로 전기적으로도 등방성 거동을 보임을 알 수 있다.

본 연구에서 제안된 섬유강화 고분자 복합재료 적층판의 복소 비유전율 예측을 위한 적층판 법칙은 전파흡수구조체, 레이돔 (radome), PCB 회로기판 등과 같은 섬유강화 복합재료의 전자기적 응용에 있어 그 효용가치가 높을 것으로 사료된다.

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, 임의의 적층순서를 갖는 적층판의 유전거동을 모사하기 위해 저항과 축전기가 병렬로 구성되는 복합재료의 등가회로를 제안하였다. 제안된 등가회로와 복합재료의 등가임피던스로부터 임의의 적층순서를 갖는 유리섬유 고분자 복합재료 적층판의 복소 비유전율을 예측할 수 있는 적층판 법칙을 개발하였으며, 실험을 통해 이를 검증하였다.

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.