

논문 2012-49SC-3-11

금속섬유 복합재료의 부하저항에 따른 분산특성

(The Effect of the Load Resistance on Dispersion Characteristics of Metal-Fiber Composites)

서 동 욱*

(Dong Wook Seo)

요 약

최근에 소개된 능동 FSS(active frequency selective surface) 또는 ESS(electromagnetic smart screen)는 2차원 금속섬유 복합재료에서 금속섬유의 부하저항을 변화시킴으로써 복합재료의 분산특성을 변경시키는 기술이다. 본 논문에서는 부하저항의 변화에 따른 ESS의 분산특성을 효율적으로 계산하기 위해 GEC(generalized equivalent conductor) 기법을 기반으로 수정하여 적용한다. 부하저항에 따른 ESS의 투과계수와 유효유전율을 1~40 GHz의 범위에서 시뮬레이션 한다. 또한, 부하저항을 변경함으로써 공진 주파수와 대역폭을 변경할 수 있음을 보인다.

Abstract

In this paper, an efficient means to estimate the dispersion characteristics of active FSS (or ESS) is presented. We numerically investigate the effective permittivity and the transmission coefficient of 2D metal-fiber composites using linear-lumped impedance loading. We modify the GEC method which is applied to 2D fiber composite material with arbitrary fiber orientation. We show that by varying the impedance value it is possible to control the resonance frequency of the array as well as the bandwidth.

Keywords : FSS, ESS, metal-fiber composite, radome

I. 서 론

금속섬유에 의한 강화 복합재료(metal fiber reinforced composite)는 항공우주와 군수분야를 비롯한 많은 영역에서 금속을 대체하고 있다. 복합재료는 플라스틱, 폴리머, 레진, 에폭시 등의 배경물질에 섬유, 입자, 조각 등을 포함하고 있으며, 이러한 배경물질과 구성 물질 그리고 구조에 따라 그 특성이 다양하게 달라진다. 일반적으로 복합재료의 주요한 기계적인 장점으로 강도 증가, 무게 감소, 환경 저항 증가, 열 안정성 증가, 제조의 용이성 등이 있다.

복합재료의 기계적 특성에 대한 연구를 시작으로 최

근에는 전기적 특성 역시 많은 관심을 받고 있다. 특히, 복합재료에 사용되는 금속섬유에 의해 뚜렷하고 조절할 수 있는 마이크로웨이브 분산특성(dielectric dispersion)을 가지고 작은 농도의 금속섬유에도 큰 유전율을 가진다. 이러한 전기적 성질은 주파수선택 표면(FSS; frequency selective surface), 임피던스 결합층(impedance matching layer), 스마트 물질, 메타 물질(meta-material) 등의 다양한 분야에 응용되고 있다. 특히 FSS의 설계는 레이돔의 적용을 위해 많은 연구가 이루어지고 있다^[1-2]. FSS의 용도로 사용되는 금속섬유 복합재료를 주파수선택 복합재료(FSC; frequency selective composite)이라 불리기도 한다. FSC는 기존의 주기적인 배열을 가지는 FSS에 비하여 더 넓은 저지대역(stop-band)를 가지는 것으로 알려져 있다^[3].

금속섬유 복합재료의 전기적 특성은 금속섬유의 재

* 정희원, 국방기술품질원 대구센터1팀
(Defense Agency for Technology and Quality)
접수일자: 2011년7월7일, 수정완료일: 2012년5월9일

질과 길이, 금속섬유들의 방향분포, 배경물질의 재질에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다. 이러한 요소를 변경함에 따라 금속섬유 복합재료가 원하는 전기적 특성을 가지도록 만들 수 있다. 최근 소개된 능동 FSS(active FSS) 또는 ESS(electromagnetic smart screen)는 금속섬유의 중앙에 Pin 다이오드를 넣어 다이오드 바이어스 전류로 다이오드를 온/오프 시킴으로써 전체 복합재료의 전기적 특성을 변화시키는 것이다^[4-6]. 이러한 ESS는 기존의 FSS와 복합재료의 중요 제한사항인 한 번 만들어지면 타겟 주파수, 대역폭 등과 같은 전기적인 특성을 동조(tuning)를 할 수 없다는 단점을 극복한 것이다.

복합재료에 의한 산란해석은 복합재료를 유효유전율과 유효투자율을 가지는 물질로 등가화하여 계산하는 것이 일반적이다. 특히, 금속섬유 복합재료는 금속섬유에 수직방향인 전계에 비해 수평방향의 전계에 대해 큰 차이를 가지는 유전상수를 가진다. 복합재료의 유효유전율이나 유효투자율을 계산하기 위해 다양한 계산방법과 시험방법이 발표되었다^[7-10]. 기존의 계산은 대개 모멘트법(MoM; method of moment)과 결합된 Monte-Carlo 시뮬레이션 또는 최적화 기법을 사용하여 이루어졌다. 하지만 이러한 계산 방법은 계산시간이 많이 걸리고, 해석하고자 하는 금속섬유의 개수가 수백 개 이상인 경우에는 컴퓨터 리소스의 제한으로 계산자체가 어려워진다. 하지만 최근 발표된 GEC(generalized effective conductor) 방법은 다수의 전선형 산란체의 유효유전율을 계산하고, 유효유전율을 가지는 유효물질로부터 산란되는 산란파를 계산하는 방법으로, 다수의 전선형 산란체에 의한 산란파를 비교적 정확하고 빠르게 계산할 수 있는 방법이다^[10-11].

본 논문의 목적은 금속섬유 복합재료에서 금속섬유의 부하저항이 변화함에 따라 금속섬유 복합재료의 전기적 특성이 변화되는 것을 계산하고 이로부터 능동 FSS 또는 ESS의 설계 시 유용하게 사용될 수 있도록 함이다.

II. 본 론

1. GEC(generalized effective conductor) 방법과 모델

본 논문에서 2차원의 금속섬유 복합재료의 부하저항에 따라 변화하는 전기적 특성인 유효유전율과 투과계수를 수치해석적으로 계산하기 위해 GEC 방법을 수정

하여 사용한다. 따라서 GEC 방법을 간단히 살펴보고 부하저항의 변화를 해석하기 위해 GEC 방법을 수정한 원리와 과정을 살펴보도록 한다.

가. GEC 방법^[10-11]

그림 1(a)와 같이 N 개의 금속섬유가 폭 w , 길이 d , 두께 h 인 직사각형 판(slab) 위에 랜덤하게 뿌려지고, 이 판에 평면파가 수직으로 입사한다고 가정하자. 단위 평면파가 복합재료 판에 수직으로 입사할 때, 금속섬유 복합재료의 유효유전율은 다음과 같다.

$$\epsilon_{pq} = \epsilon_0 \left[1 - j \frac{\eta_0}{2\pi} \rho \lambda \overline{I_{pq}}(\theta_i, \phi_i) \right] \quad (1)$$

여기서 첫 번째 아래첨자 p 는 산란파의 편파를, 두 번째 아래첨자는 입사파의 편파를 의미한다. η_0 와 λ 는 자유공간의 고유임피던스와 배경물질의 파장이다. ρ 는 금속섬유의 평균밀도로 단위 부피당 금속섬유의 개수이다. 그림 1(b)와 같이 $\hat{l}(\theta, \phi)$ 방향을 가지는 금속섬유에 q -편파의 평면파가 \hat{k}_i 방향으로 입사하는 경우, 금속섬유에 유도된 전류가 $\hat{k}_s = -\hat{k}_i$ 방향으로 p -편파의 산란파를 생성한다. p 방향으로 유도된 전류성분을 실제전류성분 $\tilde{I}_{pq}(\theta, \phi; \theta_i, \phi_i)$ 라 정의한다. 여기서 θ 와 ϕ 는 그림 1(b)에 나타낸 금속섬유의 천정각과 방위각을 의미한다. 유효평균전류 $\overline{I_{pq}}(\theta_i, \phi_i)$ 는 실제전류성분

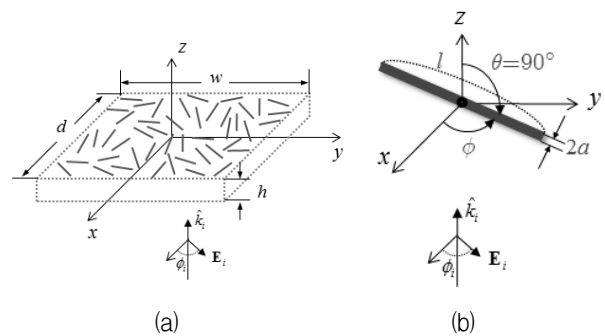


그림 1. $w \times d \times h$ m^3 를 가지는 금속섬유 복합재료 판과 한 개의 금속섬유의 구조 (a) N 개의 금속섬유를 가지는 2차원 금속섬유 복합재료 판, (b) $\theta=90^\circ$, 임의의 ϕ 의 방향과 길이 l 을 가지는 단일 금속섬유

Fig. 1. Geometry of a single fiber and fiber composite slab with $w \times d \times h$ m^3 (a) 2D fiber composite slab with N fibers, (b) orientation and length of a single fiber with $\theta=90^\circ$ for the 2D fiber composite.

$\tilde{I}_{pq}(\theta, \phi; \theta_i, \phi_i)$ 의 가중평균값으로 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\overline{I}_{pq}(\theta_i, \phi_i) = \frac{\int_{\Omega} \tilde{I}_{pq}(\theta, \phi; \theta_i, \phi_i) W(\theta, \phi) d\theta d\phi}{\int_{\Omega} W(\theta, \phi) d\theta d\phi} \quad (2)$$

여기서 Ω 는 입체각(solid angle)이고, $W(\theta, \phi)$ 는 확률 밀도함수(pdf; probability density function) 형태의 가중함수로 금속섬유의 방향분포를 의미한다. 본 논문에서는 금속섬유가 xy 평면과 평행한 면에 분포되어 있기 때문에 그림 1(b)와 같이 금속섬유의 천정각 θ 는 90° 로 고정되어 있다. 금속섬유의 방향이 균등분포로 x, y 방향으로 동일한 확률로 분포되어 있는 경우와 정렬된 경우 $W(\theta, \phi)$ 는 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W(\theta, \phi) = W(\theta) W(\phi) = \delta\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \frac{1}{2\pi} \quad (3)$$

$$W(\theta, \phi) = W(\theta) W(\phi) = \delta\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \delta(\phi - \pi) \quad (4)$$

여기서 δ 는 디랙델타함수(Dirac delta function)이다.

입사파와 산란파 정보를 포함하는 실제전류성분 $\tilde{I}_{pq}(\theta, \phi; \theta_i, \phi_i)$ 를 계산하기 위해서 MoM을 사용하여 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{I}_{pq}(\theta, \phi; \theta_i, \phi_i) = \mathbf{R}_p^T \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{V}_q \quad (5)$$

여기서 \mathbf{Z} 는 하나의 전선에 대한 임피던스 행렬이고, 앞첨자 T 는 전치연산자(transpose operator)이다. \mathbf{R} 과 \mathbf{V} 는 각각 측정벡터와 여기벡터이다^[11].

나. GEC 방법의 수정 및 적용

기존의 GEC방법은 부하저항이 없는 전선형 산란체에 적용할 수 있는 방법이다. 본 논문에서 적용하고자 하는 전선형 산란체인 금속섬유는 부하저항이 있는 경우이므로 GEC 방법을 그대로 적용하는 것은 불가능하다. 부하저항이 있는 단일 또는 다수의 전선형 산란체를 해석하기 위한 몇 가지 기법이 있다[12~15]. GEC 방법의 경우 실제전류성분을 계산하기 위해 식 (5)와 같이 MoM을 사용한다. 따라서 부하저항이 있는 전선형 산란체를 계산하기 위한 방법 중 MoM 기반의 방법을 사용하여 식 (5)를 변경하도록 한다.

산란체에 저항성분이 있는 경우 다음과 같은 조건을

만족한다.

$$\vec{E}_{\tan} = R_s \vec{J}_{\tan} \quad (6)$$

이 식을 입사파와 산란파로 표현하면 다음과 같다.

$$\vec{E}_{i\tan} = R_s \vec{J}_{\tan} - \vec{E}_{s\tan} \quad (7)$$

방사적분을 사용하여 산란파를 전류성분에 대한 표현으로 변경하고 관측점을 전선형 산란체의 표면으로 옮기면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{E}_{i\tan} = R_s(\vec{r}) \vec{J}_{\tan}(\vec{r}) + \left[jk\eta_0 \iint_S J_s G ds' + \frac{jk}{\eta_0} \nabla \nabla \cdot \iint_S J_s G ds' \right]_{\tan} \quad (8)$$

식 (8)은 완전도체(PEC; perfect electric conductor)에 대한 EFIE(electric field integral equation)에 간단히 $R_s \vec{J}_{\tan}$ 항을 더한 형태이다. 여기에 Galerkin 방법을 사용하여 해를 풀기위해 테스트함수를 양면에 곱하고 적분하면 다음과 같이 적을 수 있다.

$$\begin{aligned} \iint_{s_m} \vec{W}_m \vec{E}_i ds &= \iint_{s_m} \vec{W}_m \cdot \left\{ \sum_{n=1}^N I_n R_s \vec{J}_n \right. \\ &+ \sum_{n=1}^N I_n \times \iint_S \left[jk\eta_0 \vec{J}_n G - \frac{j}{\omega\epsilon} \nabla \cdot \vec{J}_n \nabla' G \right] ds' \left. \right\} ds \\ &= \sum_{n=1}^N I_n \iint_{s_m} \vec{W}_m R_s \vec{J}_n ds + \sum_{n=1}^N I_n \cdot Z_{mn} \end{aligned} \quad (9)$$

위 수식은 다음과 같은 선형 방정식의 시스템으로 정리된다^[12, 16].

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}\mathbf{I} = (\mathbf{Z}_0 + \mathbf{Z}_L)\mathbf{I} \quad (10)$$

여기서 \mathbf{Z} 는 부하저항이 있는 전선형 산란체의 일반적인 $N \times N$ 임피던스 행렬이고, N 은 미지수의 개수이다. \mathbf{I} 는 전류의 미지수 확장 계수로 표현되는 N -벡터이다. \mathbf{V} 는 식 (5)와 동일한 여기벡터이다. \mathbf{Z}_0 는 부하가 없는 전선형 산란체의 임피던스 행렬이고, \mathbf{Z}_L 은 부하를 의미하는 대각행렬로 다음과 같다.

$$(\mathbf{Z}_L)_{mn} = \int_{s_m} \vec{W}_m \cdot [R_s(\vec{r}) \vec{J}_n(\vec{r})] ds \quad (11)$$

여기서 \vec{J}_n 와 \vec{W}_m 은 각각 기저함수와 테스트 함수이고 n 번 째 세그먼트와 m 번 째 세그먼트에서만 의미있는 값을 가지기 때문에 m 과 n 이 다른 경우에는 $(\mathbf{Z}_L)_{mn}$

이 0의 값을 가진다. 따라서 식 (11)은 대각행렬의 형태를 가진다.

지금까지 살펴본 것과 같이 부하저항을 의미하는 임피던스행렬인 식 (11)을 계산하고, 이 결과를 식 (10)에서 기존의 임피던스 행렬과 더함으로써 새로운 임피던스 행렬을 정의하였다. 새롭게 구한 임피던스 행렬을 식 (5)를 통해 GEC방법에 적용함으로써 부하저항을 가지는 전선형 산란체에 유도되는 실제전류성분을 계산할 수 있다. 따라서 부하저항을 가지는 다수의 전선형 산란체들의 집합인 금속섬유 복합재료의 부하에 따른 전기적 특성을 얻을 수 있다.

다. 해석모델

앞에서 그림 1(b)와 같이 부하저항이 없는 단일 금속섬유의 구조에 대해 살펴보았다. 부하저항은 전선형 산란체에 어느 곳에도 위치할 수 있다. 하지만 반파장 다이폴과 같은 전선형태의 안테나의 경우에는 부하저항을 의미하는 feed가 중앙에 위치하며, 앞에서 언급한 ESS 또는 능동 FSS를 구현한 연구들[4~6, 12~14]이 산란체의 중앙에 부하저항을 위치시킨다. 이러한 이유는 해석과 제작상의 용이함 때문이다. 본 논문에서도 부하저항을 그림 2(a)와 같이 산란체의 중앙에 위치시키는 것으로 가정한다.

부하저항이 있는 전선형 산란체 집합의 유효유전율과 투과계수를 구하기 위해서 수정된 GEC 방법을 적용할 때 우선 식 (5)의 실제전류성분이 MoM에 적용하는 경우를 사용하여 얻을 수 있어야 한다. MoM을 전선형

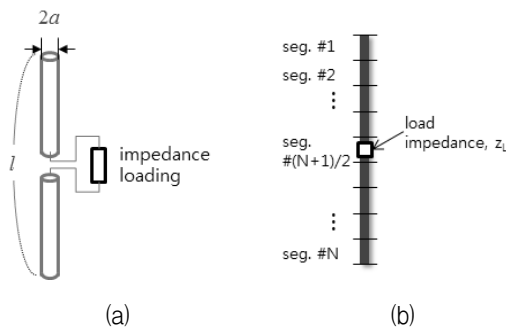


그림 2. 부하를 가지는 금속섬유의 개략도 (a) 산란체 중심에 부하저항을 가지는 전선형 산란체, (b) MoM 적용을 위해 세그먼트로 나뉜 전선형 산란체의 구조

Fig. 2. Geometry of a metal-fiber with load impedance (a) load impedance in the center of wire scatterer, (b) wire scatterers separated by segments.

산란체에 적용하는 경우 그림 2(b)와 같이 전선을 세그먼트들로 나눈다. 이 때 전선형 산란체의 중심에 위치한 세그먼트 한 곳에만 부하저항 Z_L 이 직렬로 연결되어 있다고 가정하자. 부하저항이 전선형 산란체의 중심에 위치시키기 위해 해석 시 세그먼트 개수 N 은 항상 홀수가 되도록 한다. 따라서 식 (10)의 부하 임피던스 행렬 Z_L 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & & \dots & & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & & & & & 0 \\ \vdots & \dots & \int_{S_{(N+1)/2}} \vec{W}_{(N+1)/2} \cdot [z_L \vec{J}_{(N+1)/2}(\vec{r})] ds & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & & & \dots & & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & & & & & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

해석하고자 하는 개별 금속섬유의 길이 l 은 1 cm, 금속섬유의 단면의 폭 $2a$ 는 1/100 cm로 설정하였다. 지금까지 살펴본 해석 구조는 단일 전선형 산란체인 단일 금속섬유이며, 배경물질과 다수의 전선형 산란체 집합인 복합재료의 해석 구조는 그림 3과 같이 균등랜덤 모델과 정렬된 모델 2가지이다. 그림 3(a)의 랜덤모델의 경우 금속섬유의 방위각 ϕ 가 이 $0 \sim 360^\circ$ 범위에서 균등랜덤 발생기로부터 얻어진 방향을 가진다. 이 때의 금속섬유의 방향분포를 의미하는 가중함수는 식 (3)과 같다. 그림 3(b)의 정렬된 모델은 모든 금속섬유가 x 축과 평행한 방향을 가지는 경우이다. 따라서 정렬된 모델의 가중함수는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

해석하기 위해 필요한 추가 파라미터로 배경물질의 두께 h 는 0.1 mm이고, 금속섬유의 밀도는 1.27 fibers/cm²으로 약 1 %의 값을 가지도록 하였다.

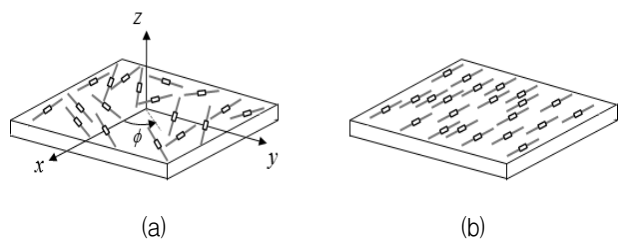


그림 3. 해석 금속섬유 복합재료 모델 (a) 균등랜덤 모델, (b) 정렬된 모델
Fig. 3. Analysis models (a) uniform random model (b) aligned model.

2. 결과 및 논의

앞에서 살펴본 해석 모델에 대해 수정된 GEC 방법을 적용하여 1 GHz에서 40 GHz까지 1 GHz 단위로 동

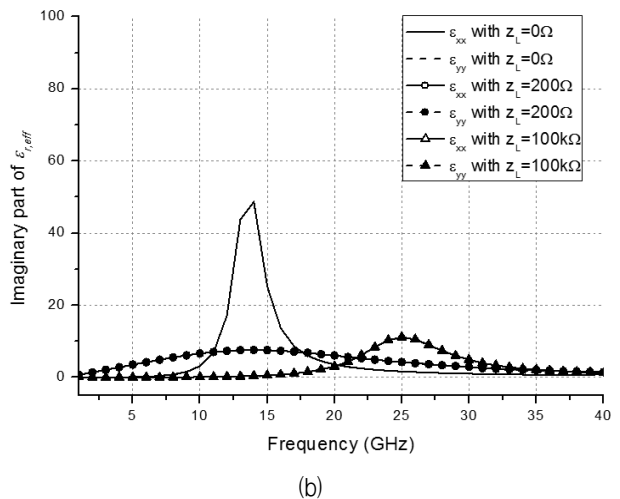
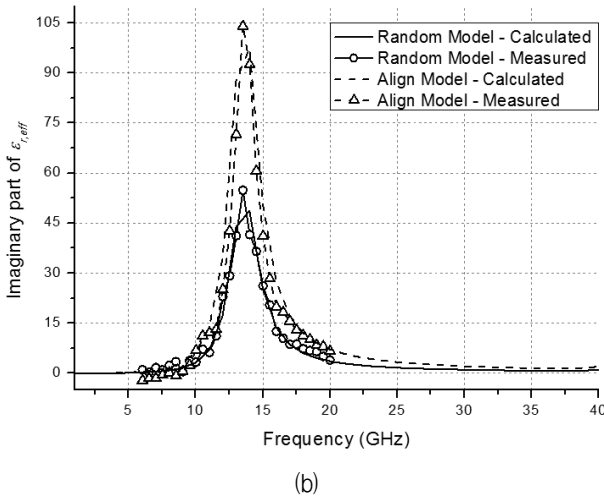
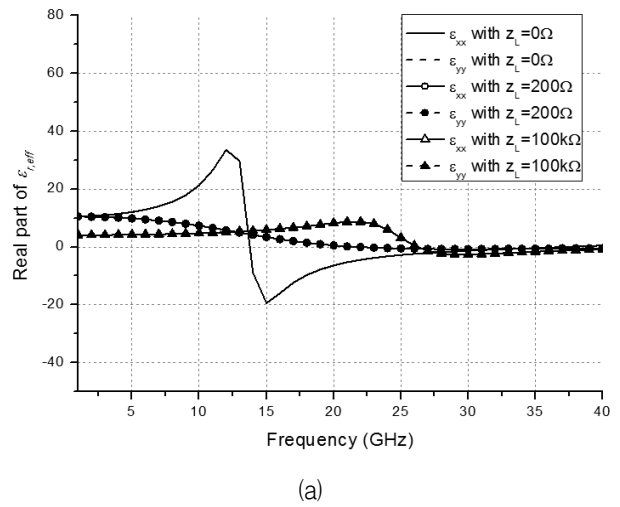
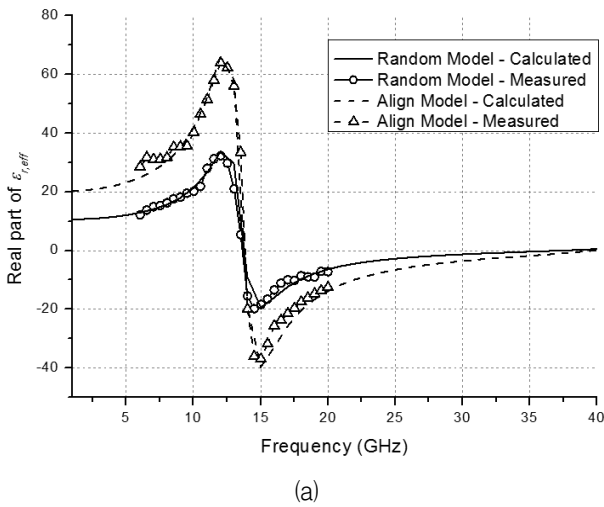


그림 4. 부하저항이 없는 경우 랜덤모델과 정렬된 모델의 계산결과와 측정결과와의 비교 (a) 금속섬유 복합재료의 유효유전율의 실수부, (b) 허수부
 Fig. 4. Effective permittivity of the uniform random and aligned model (a) real part (b) imaginary part.

그림 5. 부하저항에 따른 랜덤모델 유효유전율 계산결과 (a) 유효유전율의 실수부, (b) 허수부
 Fig. 5. Effective permittivity of the uniform random model with respect to loading impedance (a) real part (b) imaginary part.

일 부하에 따른 금속섬유 복합재료의 유효유전율과 투과계수를 계산하였다.

그림 4는 부하저항이 없는 금속섬유 복합재료의 유효유전율의 계산결과와 기존 논문^[10]의 측정결과를 실수부와 허수부로 나누어 나타낸 것이다. 우선, 그림에서 알 수 있듯이 수정된 GEC 계산결과가 유효유전율의 실수부와 허수부 모두에 대해 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 랜덤모델의 유효유전율이 정렬된 모델의 유효유전율 보다 크기가 더 작은 것을 알 수 있다. 즉, 랜덤모델의 유효유전율이 정렬된 모델의 경우보다 공기 중의 유효유전율인 1.0+j0.0의 값에 더 가깝다. 이것은 입사파의 편파와 동일한 방향의 성분이 정렬된 경우가 많기 때문이다. 유효유전율의 실수부와 허수부는 약 13

GHz에서 0의 값과 최대값을 각각 가지는 것을 알 수 있다. 이 주파수가 배경물질에서의 금속섬유의 공진주파수이다.

그림 5는 랜덤모델의 금속섬유의 부하저항을 0 Ω, 200 Ω, 100 kΩ인 경우 x 방향과 y 방향의 유효유전율을 계산한 결과이다. 그림 5(a)에서 부하저항이 증가할수록 유효유전율 실수부가 양의 값에서 음의 값으로 급격히 변화하는 주파수 지점이 약 13 GHz에서 약 25 GHz로 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 부하저항이 증가할수록 유전율의 변화폭은 줄어드는 것을 알 수 있다. 그림 5(b)에서도 유효유전율의 허수부가 최대치를 가지는 주파수가 부하저항이 증가할수록 높아지고, 반면에 최대치는 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 부하저항이 증

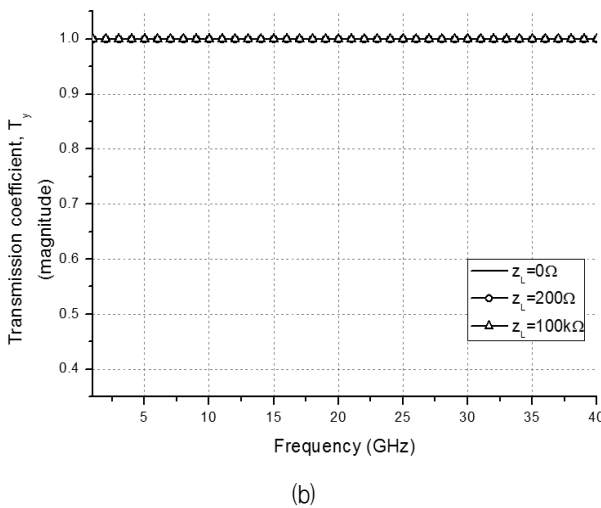
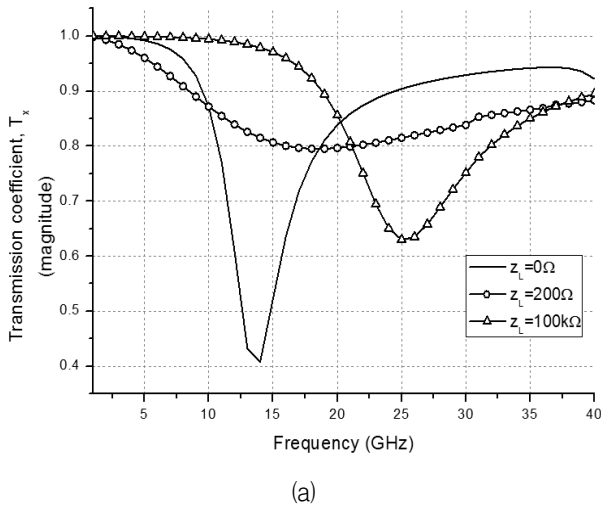


그림 6. 부하저항에 따른 정렬된 모델의 투과계수 계산 결과 (a) x 방향 편파에 의한 투과계수, (b) y 방향 편파에 의한 투과계수

Fig. 6. Transmission coefficient of the aligned model with respect to loading impedance for (a) x -direction polarization (b) y -direction polarization.

가할수록 유효유전율의 실수부 변화폭이 줄어들고, 허수부의 최대값이 줄어드는 이유는 입사파가 금속섬유에 입사 후 재방사되는 것보다 저항에 의해 산란체에 필드가 집중되고 소모되기 때문이다.

수정된 GEC 방법의 계산결과는 식 (1)과 같은 복합재료의 유효유전율이다. 이를 실제 레이돔과 같은 응용 사례에 사용하기 위해서 투과계수(transmission coefficient)를 통해 특성을 살펴보는 것이 필요하다. 유효유전율과 복합재료의 두께를 알고 있다면 다음과 같은 식으로 투과계수를 계산할 수 있다^[17].

$$T = \frac{4\sqrt{\epsilon_e}}{(\sqrt{\epsilon_e}+1)^2} \frac{e^{jk_0 h}}{e^{jk_0 \sqrt{\epsilon_e} h} - \left(\frac{\sqrt{\epsilon_e}-1}{\sqrt{\epsilon_e}+1}\right)^2 e^{-jk_0 \sqrt{\epsilon_e} h}} \quad (13)$$

그림 6은 정렬된 모델을 부하저항에 따라 유효유전율을 계산 후 식 (13)을 사용하여 투과계수를 얻은 결과이다. 그림 6(a)에서 보는 것과 같이 부하저항이 0 Ω 인 경우 공진주파수가 약 13 GHz이고, 부하저항이 200 Ω 인 경우 공진주파수가 증가하여 약 20 GHz, 그리고 부하저항이 가장 큰 100 k Ω 인 경우에는 부하저항이 0 Ω 인 경우에 보다 약 2배 높은 26 GHz에 공진주파수가 존재하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 공진주파수가 약 2배 증가하는 이유는 100 k Ω 의 부하저항은 전기적으로 매우 큰 값으로 1 cm의 금속섬유보다는 0.5 cm의 금속섬유 2개인 것처럼 전기적으로 보이기 때문이다. 특히, 흥미로운 결과는 부하저항이 증가할수록 넓은 주파수 범위를 통과시키지만 공진주파수에서의 투과량은 크게 줄어든다는 점이다. 그림 6(b)는 y 방향으로의 투과계수로 입사파의 크기가 1이고 y -편파를 가지고 복합재료에 입사한 경우 y -편파를 가지는 투과파의 크기를 의미한다. 그림 6의 해석모델은 x 방향으로 정렬된 모델으로 금속섬유가 y 방향을 가지는 성분이 전혀 없기 때문에 모두 통과시켜 투과계수가 1.0의 값을 가지는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 GEC 방법을 기반으로 수정하여 2D 금속섬유 복합재료의 부하저항에 따른 유효유전율과 투과계수의 변화 특성을 계산하고 이를 분석하였다. 메타물질의 좁은 대역폭 특성에 비해 부하저항을 사용하면, 투과특성은 작지만 광대역의 주파수 특성을 구현할 수 있음을 계산결과를 통해 살펴보았다. 이러한 계산 결과는 레이돔 설계와 같은 국방 분야에 응용이 가능할 것으로 예상된다. 특히, 부하 임피던스가 저항성분만 있는 경우뿐만 아니라 정전용량(capacitance)나 유도용량(inductance)이 있는 경우에 대한 영향 분석을 통해 부하저항의 활용도가 더욱 높아질 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 심형원, 이지홍, 서일성, 김근홍, “임의의 패턴을

- 찾는 FSS의 자동 설계,” *전자공학회논문지-TC*, 제45권, 제2호, 127-136쪽, 2008년 2월
- [2] 이지홍, 이필엽, 서일성, 김근홍, “유전알고리즘과 특성 DB를 이용한 FSS 설계 시스템,” *전자공학회논문지-TC*, 제43권, 제4호, 58-66쪽, 2006년 4월
- [3] L. Liu, S. Matitsine, Y. B. Gan, and K. N. Rozanov, “Effective Permittivity of Planar Composites with Randomly or Periodically Distributed Conducting Fibers,” *J. Appl. Phys.*, 2005.
- [4] L. Liu, S. Matitsine, and P. K. Tan, “Electromagnetic Smart Screen for Tunable Transmission Applications,” *Microwave Opt. Tech. Lett.*, Vol. 50, no. 6, June 2008.
- [5] L. Liu, S. Matitsine, and P. K. Tan, “Electromagnetic Smart Screen for Tunable Transmission and Reflection Applications,” *PIERS Online*, Vol. 4, no. 2, 2008.
- [6] V. Kisel, “Frequency Selective or Controllable Metafilm as a Part of On-Board Antenna Screen,” *Proc. of Symp. P: Electromagnetic Materials, ICMAT2007*, World Scientific Publishing, pp. 201-208, 2007.
- [7] Nguyen, T.-T. and G. Maze-Merceur, “Microwave Characterization of 2-D Random Materials: Numerical Simulations and Experiments,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 46, no. 10, Part 1, pp. 1478-1483, 1998.
- [8] Liu, L., S. Matitsine, Y. B. Gan, and K. N. Rozanov, “Cluster Effect in Frequency Selective Composites with Randomly Distributed Long Conductive Fibres,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 40, pp. 7534-7539, 2007.
- [9] Xu, X., A. Qing, Y. B. Gan, and Y. P. Feng, “Effective Properties of Fiber Composite Materials,” *J. of Electromagn. Waves and Appl.*, Vol. 18, no. 5, pp. 649-662, 2004.
- [10] D. W. Seo, H. J. Kim, K. U. Bae, and N. H. Myung, “The Effect of Fiber Orientation Distribution on the Effective Permittivity of Fiber Composite Materials,” *J. of Electromagn. Waves and Appl.*, Vol. 24, pp. 2419-2430, 2010.
- [11] D. W. Seo, J. H. Yoo, K. I. Kwon, and N. H. Myung, “Generalized Equivalent Conductor Method for a Chaff Cloud with an Arbitrary Orientation Distribution,” *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 105, pp. 336-346, 2010.
- [12] A. Boag, A. Boag, E. Michielssen, and R. Mittra, “Design of Electrically Loaded Wire Antennas Using Genetic Algorithms,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 44, no. 5, May 1996.
- [13] S. R. Ostadzadeh, M. Tayarani, and M. Soleimani, “A Fuzzy Model for Computing Back-Scattering Response from Linearly Loaded Dipole Antenna in the Frequency Domain,” *Progress in Electromagnetics Research*, PIER 86, pp. 229-242, 2008.
- [14] S. A. Tretyakov, S. Maslovski, and P. A. Belov, “An Analytical Model of Metamaterials Based on Loaded Wire Dipoles,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 51, no. 10, Oct. 2003.
- [15] O. Malyuskin, V. F. Fusco, and A. Schuchinsky, “Modelling of Impedance-loaded Wire Frequency-Selective Surfaces with Tunable Reflection and Transmission Characteristics,” *Int. J. Numer. Model.*, Vol. 21, pp. 439-453, 2008.
- [16] David C. Jenn, *Radar and Laser Cross Section Engineering*, second edition, pp. 126, 2005.
- [17] Xu, X., A. Qing, and Y. B. Gan, “Effective Properties of Fiber Composite Materials,” *J. of Electromagn. Waves and Appl.*, Vol. 18, no. 5, pp. 649-662, 2004.

 저 자 소 개



서 동 욱(정회원)

2003년 경북대학교 전자전기 공학부 학사 졸업.

2005년 KAIST 전기및전자 공학과 석사 졸업.

2011년 KAIST 전기및전자 공학과 박사 졸업.

<주관심분야 : 통신, 마이크로웨이브, 초고주파>