

# 새로운 주파수 선택 표면: 주파수 선택적인 직물 복합 재료

## A Novel Frequency Selective Surface: Frequency Selective Fabric Composite

이 상 의 · 김 천 곤

Sang-Eui Lee · Chun-Gon Kim

### 요 약

전자파를 선택적으로 투과시킬 수 있는 섬유 강화 복합 재료를 제안하였다. 이 주파수 선택적인 직물 복합 재료는 탄소 섬유와 유전 섬유를 직조하여 주기적인 패턴을 가지도록 제작된다. 먼저 주파수 선택적인 직물형 복합 재료의 전자기적 특성을 조절할 수 있는 설계인자들에 대해 살펴보고, 이후에 정사각형 패턴을 가지는 평직 복합 재료를 제작하고 이것의 전자기적 특성을 탄소 로빙의 전기 전도도, 섬유의 굴곡, 그리고 개구면 대 요소 크기의 비에 대해 고찰하였다. 전기 전도도에 있어서는 섬유 체적비와 주파수 분산성에 대한 의존성을 고려하였다. 구성 재료의 물성 및 섬유 체적비는 제작된 FSFC의 전자기적 특성에 큰 영향을 주지 않았으나, 개구면 대 요소 크기의 비는 많은 영향을 주었다.

### Abstract

Fiber-reinforced composites transmitting microwaves of certain frequencies or bands were proposed. These frequency selective fabric composites(FSFCs) are fabricated by weaving carbon fibers and dielectric fibers that build periodic patterns. Design parameters affecting the electromagnetic characteristics of FSFCs were widely discussed. Then the electromagnetic characteristics of a fabricated plain-weave FSFC were investigated with regard to the electrical conductivities of carbon roving, the fiber undulation, and the aperture-to-cell ratio. For the electrical conductivities, its dependence on frequency as well as on the fiber volume fraction of carbon roving was taken into account. Constituent material properties and the fiber undulation had little effect on the EM properties of the fabricated FSFC, while the aperture-to-cell ratio made a profound effect on them.

Key words : Frequency Selective Surface(FSS), Frequency Selective Fabric Composite(FSFC), Fiber-Reinforced Composite, Carbon Fiber, Dielectric Fiber

### I. 서 론

주파수 선택 표면(FSS: Frequency Selective Surface)은 일종의 여파기(filter)로서, 특정 형태의 기본 단위 요소가 주기적으로 배열된 구조를 가지며, 특정 주파수에서 공진하는 특성을 가지는 표면을 말한다. 일반적으로 FSS의 전자기적 특성은 기본 단위 요소의 형상과 크기, 배열 주기 및 배열 형상에 따라 달

라지며, 개구면(aperture) 타입의 FSS는 특정 주파수 대역을 투과시켜 유도성(inductive) FSS라고 하며, 패치(patch) 타입의 FSS는 특정 대역을 반사시키는 특성을 가지므로 용량성(capacitive) FSS라고 한다<sup>[1]-[2]</sup>. 이런 특성으로 인해 주로 마이크로파 공학이나 광학 분야에 적용하기 위한 연구가 매우 광범위하게 이루어져 왔다. 군사적으로도 항공기 레이돔(radome)과 같은 부분에 대역 통과 필터로서 적용되어 왔으며,

한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공(Division of Aerospace Eng., KAIST)

· 논문 번호 : 20060619-062

· 수정완료일자 : 2006년 8월 2일

레이다파를 흡수할 수 있는 RCS 감소 기술에 대역 저지 필터로서 전자파 흡수체에 적용되어 왔다<sup>[3]</sup>. 최초로 흡수체에 적용하고자 하는 시도는 Salisbury screen을 구성하는 저항층의 임피던스를 설계하여 흡수 성능을 향상시키기 위해 이루어졌다. 이후로 FSS를 포함하고 있는 전자파 흡수 재료(RAM: Radar Absorbing Material)는 전자 회로와의 유사성으로 인해 CA(Circuit Analog)-RAM이라 명명되기도 했다<sup>[4]</sup>.

일반적으로 기존의 금속으로 된 FSS의 경우, Kapton 필름 등에 구리나 알루미늄 등과 같은 금속을 얇은 막으로 코팅한 후 화학적인 에칭(chemical etching) 과정을 거쳐 제작한 후, 유전체 기판에 부착하거나, 금속막과 함께 성형된 유전체 기판에 에칭 과정을 적용하여 제작한다<sup>[2]</sup>. 전자의 경우는 접착 필름을 이용하여 이차 접합을 하는 추가 공정이 필요하며, 후자의 경우는 과잉 모재(matrix)를 성형 부자재로 흡수할 수 없기 때문에 섬유 체적비가 줄어들어 기계적 물성이 저하되는 단점이 있다. 또한 외부 표면에 사용될 경우 금속의 산화를 막기 위해 추가적인 코팅이 필요하며, 지속적인 유지·보수가 요구되었다.

이런 FSS는 비강성 및 비강도가 우수한 탄소계 섬유(fiber)와 유전(dielectric) 섬유를 이용하여 직물 형태의 섬유 강화 복합 재료로도 제작될 수 있다. 탄소 섬유는 높은 전기 전도도를 가지고 있어 금속과 같은 역할을 하여 대부분의 전자파를 반사시키며, 유리, 케블라(Kevlar) 혹은 석영(quartz)으로 이루어진 섬유들은 저유전율을 가지므로 투과성을 띈다. 이런 이종의 섬유들을 함께 사용하여 특정 패턴을 직조한다면 주파수 선택적인 직물 복합 재료(FSFC: Frequency Selective Fabric Composite)를 제작할 수 있다. 이런 FSFC는 개구면을 가지게 되어 유도성 FSS의 역할을 하게 된다. 그림 1은 개구면의 형상이 정사각형이나 정삼각형을 이루는 직조 가능한 FSFC의 예를 보여준다.

이렇게 제작된 FSFC는 직조되어 있어 개구면의 형상을 유지 및 지지할 수 있는 추가적인 유전체가 필요하지 않으며, 유전체 기판을 이루는 재료와 동일하거나 유사한 물성을 가지는 재료로 제작될 수 있다는 장점이 있다. 또한 기존에 사용되고 있는 직물 직조기(weaving machine)를 이용하여 대량 생산이

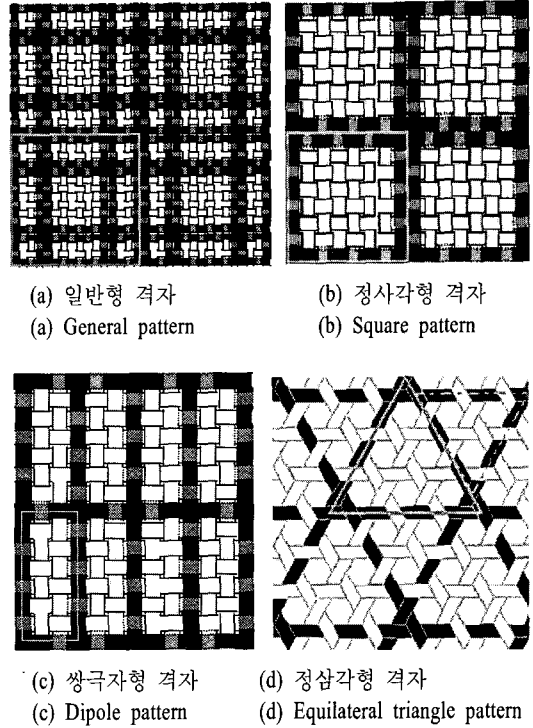


그림 1. 직조 가능한 주파수 선택적 직물 복합 재료  
Fig. 1. FSFCs with realizable weaving patterns.

가능하다. 따라서 항공기, 전함 등 군사 목적으로는 물론, 전자파 차폐나 흡수가 요구되는 대형 건물에도 적용 가능하며, 기존 금속 FSS에 대해 높은 가격 경쟁력을 가진다.

본 연구에서는 이런 FSFC의 전자기적 특성을 이해하는 것을 목적으로, 제작 시에 고려해야 할 인자를 광범위하게 분석하여 FSFC의 적용성을 살펴보고, 주요 인자들에 따른 전자기적 특성의 변화를 고찰하였다. 그리고 정사각형 격자를 가지는 FSFC를 제작하여 투과 계수를 측정 후 해석 결과와 비교·고찰하였다.

## II. FSFC의 설계 인자

복합 재료는 사용되는 섬유와 모재의 종류, 섬유의 배열 방향이나 직조 방법 등에 따라 물성의 조절이 가능하며, 요구되어지는 설계 조건에 부합하도록 제작이 가능하다. 본 연구에서는 먼저 제안한 FSFC의 전자기적 특성에 영향을 주는 인자들에 대해 고찰해 보았다.

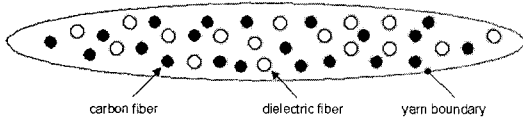


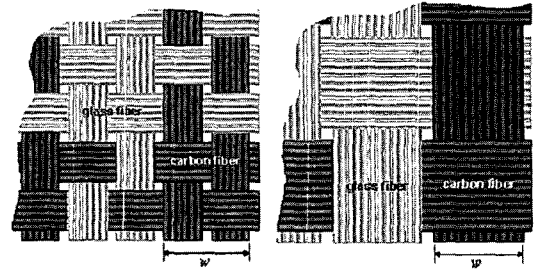
그림 2. 탄소 섬유와 유전 섬유로 된 하이브리드 안  
Fig. 2. Hybrid yarn with carbon and dielectric fibers.

### 2-1 탄소 섬유의 전기 전도도

탄소 섬유는 전구체(precursor)의 종류에 따라 다양한 물성을 가진다. 일반적으로 전구체는 PAN(pol-yacrylonitrile) 계와 pitch 계로 나뉘며, PAN 계 탄소 섬유는 중간 정도(intermdiate)의 강성과 상대적으로 높은 강도를 가지며, pitch 계 탄소 섬유는 높은 강성과 전기 전도도 및 열 전도도를 가진다고 알려져 있다<sup>[5]</sup>. 전기 전도도가 표피 두께(skin depth)와 연관되어 있어, FSFC의 설계시 전기 전도도가 우선적으로 고려되어야 한다. 또한 열처리 온도를 바꾸어줌으로써,  $10^4 \sim 10^5$  S/m 범위의 전기 전도도를 가지는 섬유를 제작할 수 있다<sup>[6]</sup>. 그림 2와 같이 전자파를 반사시키는 부분에 탄소 섬유와 유전 섬유가 혼합된 하이브리드(hybrid) 섬유를 사용할 경우, 두 섬유의 혼합 비율을 조절함으로써 섬유 체적비를 변화시킬 수 있어  $10^4$  S/m 이하의 전기 전도도를 가지도록 제작할 수도 있다. 직조된 상태에서 섬유 다발의 각 부분은 이방성을 가지므로 이를 해석에 고려해 주어야 한다.

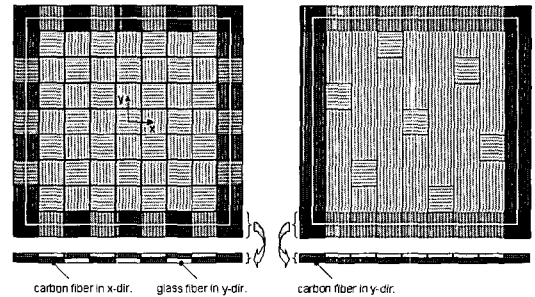
### 2-2 섬유의 구조와 직조 패턴

상용의 섬유는 주로 3 K, 6 K, 12 K 가닥의 단일 섬유(monofilament)가 한 방향으로 배열되고 집속된 후, 꼬아진 안(yarn)이나 그렇지 않은 로빙(roving)의 형태를 취한다. 여기서 K는 1000을 의미한다. 구매자의 요구에 따라 1 K 혹은 48 K로 제작되기도 한다. 3 K 로빙의 경우 2.0 mm, 12 K 로빙의 경우 3.5 ~ 4.5 mm의 폭을 가진다. 이 섬유의 수율(yield)이 증가할수록 섬유 폭은 넓어지고 두께가 두꺼워지므로, 섬유 구조의 선택에 따라 전자파를 반사하는 부분의 폭이나 두께도 바뀌게 된다. 또한 성형 후에 로빙이 안보다 상대적으로 두께가 일정한 단면을 가지게 된다. FSFC의 직조 패턴은 격자 형상과 구성 재료의 전자기적 특성을 고려하여 결정되어야 한다. 그림 3에



(a) 수율이 낮은 경우 (b) 수율이 높은 경우  
(a) Low yield case (b) High yield case

그림 3. 전자파 반사부분에 슬릿을 갖고 갖지 않는 직조 패턴  
Fig. 3. Two weave patterns with and without a slit in incident-wave-reflecting part.



(a) 평직 (b) 8 주자직  
(a) Plain-weave (b) 8-harness satin

그림 4. 동일한 요소 형상을 갖지만 직조 패턴이 다른 두 FSFC의 비교  
Fig. 4. Schematic of two FSFCs with the same array elements and the different weave patterns.

서와 같이 전자파 반사 부분에 어떤 수율의 섬유를 사용하느냐에 따라 슬릿의 영향을 고려한 설계가 필요하다.

그리고 수율이 높은 섬유를 사용하거나 섬유에 굴곡(undulation)을 가하여 이 굴곡으로 인한 전자파 투과/반사 특성을 적극적으로 활용할 수도 있다.

또한 FSFC가 유전체에 삽입될 경우, 구조적 물성이나 열적 물성을 고려하여 결정되어야 한다. 한 예로 그림 4와 같이 일반적으로 직물 복합 재료가 평직으로 제작되나, 이 경우 섬유의 굴곡이 증가하여 기계적인 물성이 상대적으로 저하되는 단점이 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해, 8-harness satin 등과 같은 직조 형태로 FSFC를 제작할 수 있다.

### 2.3 유전 섬유류의 종류

유전 섬유류는 2.0~6.0 정도의 유전 상수를 가지며 유리(glass) 섬유, 석영(quartz) 섬유, Kevlar 섬유 등이 있다. 석영 섬유나 spectra 섬유가 유전율이 꽤 낮아 저손실 특성이 요구되는 곳에 적합하다. 그러나 spectra 섬유는 130. °C 이상에서 열적으로 불안정하다고 알려져 있어 그 이상의 온도 범위에서는 다른 섬유를 선택하는 것이 바람직하다. 온도 구배가 문제가 되는 구조에는 치수 안정성이 제일 뛰어난 Kevlar 섬유를 선택하는 것이 바람직하다. 이렇게 요구 환경에 맞도록 유전 섬유를 선택하여 FSFC를 제작할 수 있다<sup>[2]</sup>.

### 2.4 소재의 종류

가장 널리 사용되는 에폭시(epoxy) 외에 cyanoate-ester, polyimide, bismaleimide 등의 다양한 폴리머들이 소재로 사용 가능하며 이들은 3.0~4.0 범위의 유전상수 값을 가진다. 수지의 조성에 따라 복합 재료의 횡방향(transverse) 방향의 전기 전도도가 크게 달라질 수 있고<sup>[7]</sup>, 유리 천이 온도(glass transition temperature)나 outgassing 현상 등을 고려하며, 사용 환경에 따라 적절하게 선정할 수도 있다<sup>[2]</sup>.

## III. FSFC의 제작

앞서 살펴보았듯이 다양한 종류의 FSFC의 제작이 가능하나, 본 연구에서는 탄소 섬유로 Toray사의

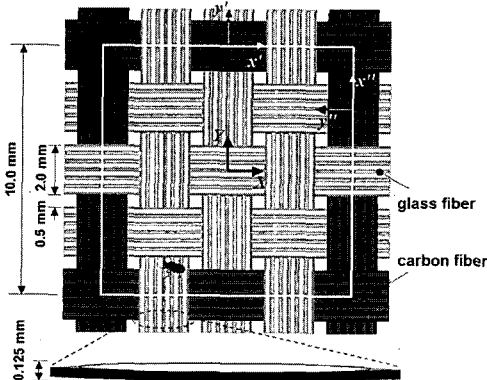


그림 5. 제작된 FSFC의 기본 단위 요소의 개요도  
Fig. 5. Schematic of a unit element of a FSFC.

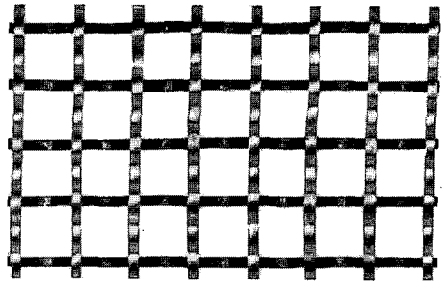


그림 6. 제작된 FSFC  
Fig. 6. A fabricated FSFC.

T300, 유리 섬유로는 E-glass를 사용하였으며, 모재로는 epoxy를 사용하였다. 사용한 T300의 전기 전도도는  $5.9 \times 10^4$  S/m이다<sup>[8]</sup>. 각 로빙의 폭이 2.0 mm, 각 로빙 사이의 거리를 0.5 mm로 하여, 한 번의 길이가 10.0 mm인 정사각형 격자를 갖는 평직 타입으로 제작하였다. 제작된 FSFC의 두께는 0.125 mm이었다. 그 FSFC의 단위 격자의 개요도와 시편의 형상을 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 성형은 1.2 기압 하에 80 °C에서 30분, 3 기압 하에 130 °C에서 2시간 동안 이루어졌다.

## IV. 투과 계수의 측정

대역에 따라 두 가지 시스템을 이용하여 제작된 FSFC의 투과 계수를 측정하였다. X-band(8.2~12.4 GHz) 대역에서는 한 쌍의 spot-focusing horn lens 안테나와 회로 분석기, HP 8510C를 이용하여 투과 계수를 측정하였다<sup>[13]</sup>. 이때 사용된 시편의 크기는 150×150 mm<sup>2</sup>이었다. 18~30 GHz 대역에서는 개구면의 크기가 59×43 mm<sup>2</sup>인 Schwarzbeck사의 BBHA9170 광대역 혼 안테나를 이용하였으며, HP(Hewlett-Packard)사의 수신기 8530A를 이용하여 제작된 FSFC의 투과 계수를 측정하였다.

30 GHz에서의 far field 조건인  $2d^2/\lambda (\approx 0.7 \text{ m})$ 을 만족하도록 송수신 안테나 사이의 거리를 1.8 m로 두었으며, 안테나 사이의 중앙에 시편에 있을 때와 없을 때의  $S_{21}$ 을 측정하여 FSFC의 투과 계수를 구하였다. 이 때 시편의 크기는 800×800 mm<sup>2</sup>이었다.

## V. Simulation

본 연구에서는 FSFC를 이루는 재료가 이방성과

그림 5와 6에서 보듯 비선형적 형상을 가지므로 이에 맞는 해석 프로그램은 구현하는 것은 어렵다. 따라서 본 연구에서는 상용 프로그램인 CST Microwave Studio 5.1을 이용하여 해석을 수행하고 실험 결과와 비교를 통해, 제안한 FSFC의 전자기적 특성을 고찰하였다.

단위 격자에 대해  $x$  방향과  $y$  방향의 경계면에는 주기 경계 조건(periodic boundary condition)을 부과하였으며,  $z$  방향의 경계면에는 PML(Perfectly Matched Layer)을 이용하여 열린(open) 공간을 모사하였다.

### 5-1 로빙의 전기적 이방성의 영향

FSFC가 제작된 후 탄소 로빙이나 유리 로빙은 국부적으로 일방향(unidirectional) 섬유 강화 복합 재료로 생각할 수 있다. 따라서 FSFC의 특성 해석시, 로빙의 이방성을 고려해 주어야 한다.

일방향 섬유 강화 복합 재료의 길이 방향(longitudinal)과 횡 방향(transverse)의 전기 전도도는 탄소 섬유 및 모재의 전기 전도도( $\sigma_f$ ,  $\sigma_m$ )의 관계식인 rule of mixture를 이용하여 탄소 섬유 및 모재의 전기 전도도도 예측할 수 있다. 그림 5에서 로빙의 길이 방향은 국부 좌표계  $x'$ 축 및  $x''$ 축 방향이고, 횡방향은  $y'$ 축 및  $y''$ 축 방향이다.

일반적으로 복합 재료의 길이 방향 전기 전도도( $\sigma_{c,1}$ )는 섬유 체적비(fiber volume fraction)  $V_f$ 가 0.6 이상인 경우에 실험치와 예측치가 잘 일치하여 식 (1)이 등식 관계에 있으나, 횡방향 전기 전도도( $\sigma_{c,2}$ )의 경우는 예측하기 어려운 것으로 알려져 있다<sup>[7]</sup>.

$$\sigma_{c,1} \leq V_f \sigma_f + (1 - V_f) \sigma_m \quad (1)$$

$$\frac{1}{\sigma_{c,2}} \leq \frac{V_f}{\sigma_f} + \frac{1 - V_f}{\sigma_m} \quad (2)$$

일반적으로 탄소 섬유의 전기 전도도,  $\sigma_f$ 는  $10^4 \sim 10^5$  S/m,  $\sigma_m$ 은  $10^{-10} \sim 10^{-15}$  S/m인 값을 가진다. 따라서  $\sigma_f \gg \sigma_m$ 이므로, 식 (2)는  $\sigma_{c,2} \approx \sigma_m$ 이 된다. 그러나 실제적으로 하나의 탄소 로빙 내에서의 탄소 섬유 체적비( $V_{fc}$ )가 0.6 이상인 경우,  $\sigma_{c,2}$ 는  $\sigma_m$ 보다 훨씬 큰 값을 가지며, 이방성 계수(coefficient of anisotropy)가  $\alpha (\approx \sigma_{c,1} / \sigma_{c,2}) \leq 10^3$ 인 범위의 값을 가진다. 이는 식 (2)가 섬유들 간의 접촉이 전혀 없다는

가정 하에 만들어진 식이기 때문이다.  $V_{fc}$ 가 증가할수록 섬유간의 접촉은 더욱 많아지므로  $\alpha$ 는 감소하며,  $V_{fc}$ 가 0.7 이상인 경우는 수십 정도로 감소하게 된다<sup>[7]</sup>.

탄소 로빙과 유리 로빙이 직조된 상태로 성형이 이루어지므로,  $V_{fc}$ 가 0.6~0.7 사이의 값을 가질 것으로 보이나 정확한 값을 측정하기가 어렵다.

또한 탄소 섬유 복합 재료의 AC(Alternating Current) 전기 전도도,  $\sigma_{AC}$ 는 주파수에 의존하는 특성을 가진다. 고주파 대역인 9 GHz에서 16 GHz 사이에서는 열처리 온도(heat treatment temperature)가 증가함에 따라  $0.75 \leq \beta (\sigma_{AC} / \sigma_{DC}) \leq 1.75$  범위에서 주파수 의존성을 가지는 것으로 나타났다. 그러나 정해진 열처리 온도에 대해서는  $\beta$  값이 일정하였다<sup>[6]</sup>.

따라서 본 연구에서 탄소 로빙의  $V_{fc}$ 와 주파수 의존성을 고려하였다.  $V_{fc}$ 는 0.6과 0.7 사이의 값을 가진다고 가정하였고,  $V_{fc}$ 가 0.6일 때와 0.7일 때의  $\alpha$  값을 400과 50으로 가정하였다<sup>[6]</sup>. 또한 본 연구에서는 T300의 열처리 온도가 완전 비공개되어 있고, 0~30 GHz 대역에서 해석을 수행하였으므로, 참고 문헌 [6]에 나타난  $\beta$ 의 범위보다 더 넓은 범위인  $0.5 \leq \beta \leq 2.0$ 로 잡았다. 섬유 체적비와 주파수 의존성을 함께 고려하였을 때, 각 경우에 대한 탄소 로빙의 전기 전도도를 Table 1에 나타내었다.

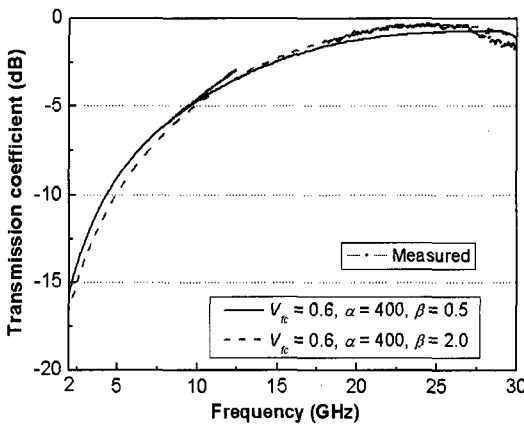
유리 로빙 또한 탄소 로빙과 마찬가지로 유전율에서 이방성을 가진다. 식 (1)과 (2)에서 전기 전도도를 유전율로 대체하여, 각 방향으로의 유전율을 예측할 수 있다. E-glass와 에폭시는 10 GHz에서 각각  $6.1 - j0.03$ 과  $3.0 - j0.03$ 의 유전율을 가지므로<sup>[2]</sup>, 하나의 유리 로빙 내에서 유리 섬유 체적비,  $V_{fg}$ 가 0.6과 0.7인 경우 각각  $4.9 - j0.03$ 과  $5.2 - j0.03$ 의 유전율을 가진다. 다른 주파수에서는 10 GHz에서와 tangent loss 값이 동일하다는 가정 하에 1st Debye 이론을 적용한 값들을 사용하였다.

해석 결과를 실험 결과와 비교하여 그림 7에 나타내었다. 저주파 대역에서는 반사가 많이 이루어지나 공진 주파수에 가까워질수록 투과가 많이 일어나는 전형적인 고역 통과 필터(high pass filter)의 역할을 수행함을 확인할 수 있었다.

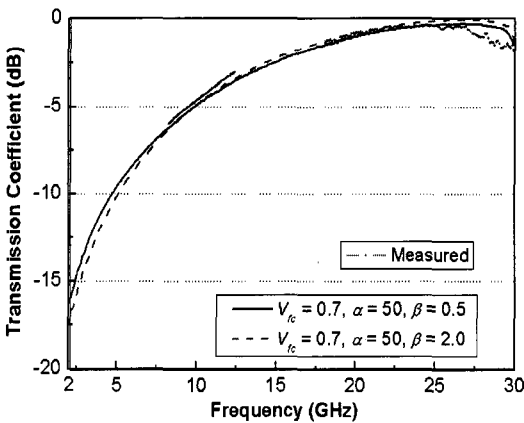
또한 섬유 체적비의 불확실성과 전기 전도도의 주파수 의존도를 고려하더라도, 해석 결과와 실험 결

표 1. 섬유체적비에 따른 탄소 로빙의 전기 전도도  
Table 1. The electrical conductivities of carbon rovings with fiber volume fraction.

$V_{fc}$		0.6	0.7
$\alpha$		400	50
$\beta$	0.5	$\sigma_{fc1}$ , $1.8 \times 10^4$	$\sigma_{fc1}$ , $2.1 \times 10^4$
		$\sigma_{fc2}$ , $4.4 \times 10^1$	$\sigma_{fc2}$ , $4.1 \times 10^2$
	1.0	$\sigma_{fc1}$ , $3.5 \times 10^4$	$\sigma_{fc1}$ , $4.1 \times 10^4$
		$\sigma_{fc2}$ , $8.9 \times 10^1$	$\sigma_{fc2}$ , $8.3 \times 10^2$
	2.0	$\sigma_{fc1}$ , $7.1 \times 10^4$	$\sigma_{fc1}$ , $8.3 \times 10^4$
		$\sigma_{fc2}$ , $1.8 \times 10^2$	$\sigma_{fc2}$ , $1.7 \times 10^3$



(a)  $V_{fc}$ 가 0.6 경우  
(a) For  $V_{fc}=0.6$



(b)  $V_{fc}$ 가 0.7 경우  
(b) For  $V_{fc}=0.7$

그림 7. 제작된 FSFC의 투과 계수의 측정치와 예측치  
Fig. 7. Simulated and measured results of transmission coefficient of a fabricated FSFC.

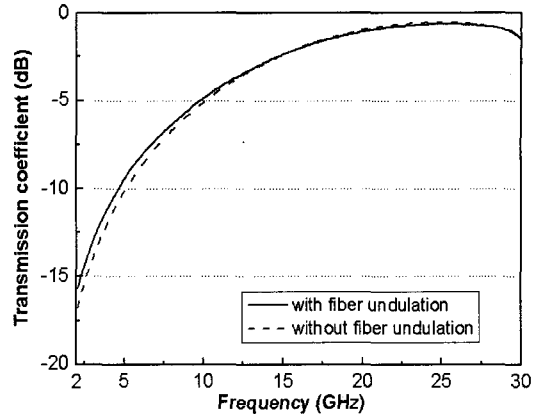


그림 8. 섬유 굴곡이 고려된 경우와 그렇지 않은 FSFC의 투과 계수  
Fig. 8. Transmission coefficient of a FSFC with and without considering the fiber undulation.

과가 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 이는 측정하기 까다로운  $V_{fc}$ 를 측정하지 않고, 예상되는 범위 내의 특정한  $V_{fc}$ 를 사용하여 FSFC의 전자기적 특성을 예측할 수 있음을 의미한다.

실험치와 예측치가 차이를 보이는 것은 예측치의 경우 시편이 무한 평면이며, 입사파가 평면파라고 가정하였으나, 실제 측정시 시편의 크기가 유한하고, 실제 입사파는 far field 조건을 만족한다 하더라도 완전한 평면파는 아니기 때문이다. 또한 제작된 시편이 송수신 안테나와 미소하게나마 정렬되지 않고, FSFC의 제작 상에서 수반되는 오차 등이 복합적으로 작용한 결과라 볼 수 있다.

### 5-2 로빙 굴곡의 영향

로빙의 직경이 클수록 로빙에 굴곡이 심하게 발생하므로 주파수 대역에 따라 이를 고려해야 할 수도 있다. 본 연구에서의 관심 주파수에 비해 제작된 FSFC의 두께가 매우 얇고 굴곡이 심하지는 않았으나, 이에 대한 영향을 살펴보았다. 비교를 위해서  $V_{fc}$ 가 0.6이고,  $\beta$ 가 1.0인 FSFC의 물성을 사용하였다. 그림 8과 같이 섬유 굴곡이 고려된 경우와 굴곡은 고려되지 않고 두께가 0.625 mm로 일정한 평면 형상이 되, 물성만 동일한 경우에 대해 투과 계수를 비교하여 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 보는 바와 같이 굴곡이 전체적인 전자파 투과 특성에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

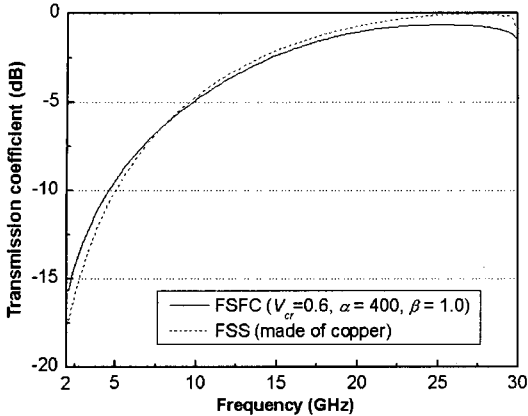


그림 9. 금속 FSS와 FSFC의 투과 계수 비교  
Fig. 9. A Comparison of transmission coefficients of a FSFC and metallic FSS.

### 5-3 금속 FSS와 FSFC의 특성

금속 FSS와 FSFC의 특성의 차이를 그림 5의 형상에 대해 비교하여 보았다. 금속 FSS는 두께가 0.625 mm인 구리( $\sigma_{cu} = 5.8 \times 10^7$  S/m)로 이루어져 있고 굴곡이 없는 평면 형상을 가지며, 개구면 부분에는 유리 로빙의 물성을 가지는 재료로 채워져 있다고 가정하였다. 그리고 이 FSS의 투과 계수를  $V_{fc}$ 이 0.6이고,  $\beta$ 가 1.0인 FSFC의 투과 계수와 비교하여 보았다. 그림 9와 같이 공진 주파수 근처에서 약간의 차이를 보일 뿐, 그 이외의 영역에서는 거의 유사한 특성을 보임을 확인하였다. FSFC의 경우, 금속 FSS와 달리 공진 주파수 근처에서 전자파가 완전히 투과되지 않는 것은 탄소 로빙의 전기 전도도가 금속의 전기 전도도에 비해 상대적으로 낮기 때문에 발생하는 전기적 손실(electric loss) 때문이다. 그림 7에서도 전기 전도도가 높은 경우가 공진 주파수 근처에서 전자파가 더 투과됨을 확인할 수 있다.

### 5-4 개구면 대 격자 크기의 비의 영향

개구면과 격자 크기의 비에 따른 FSFC의 전자파 반사/투과 특성 또한 평가되어야 한다. 앞서 제작된  $10 \times 10$  mm<sup>2</sup>의 격자 크기를 갖는 FSFC의 경우는 섬유 로빙의 폭이 2 mm이고 각 로빙 사이의 간격이 0.5 mm이므로, 단지 3 mm과 8 mm 두 가지의 개구면 크기만을 가질 수 있다. 따라서 그림 10과 같이 좀 더

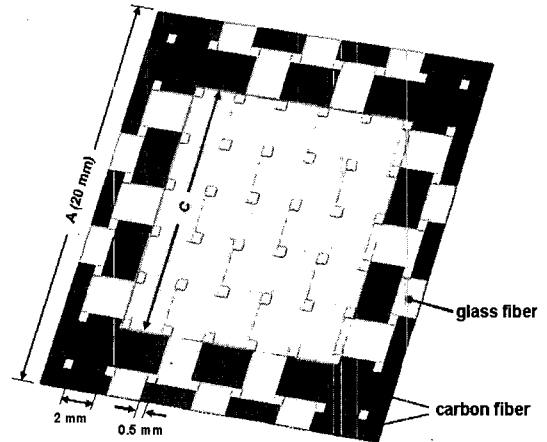


그림 10. 로빙폭이 2.0 mm이고 로빙 사이의 간격이 0.5 mm인 FSFC  
Fig. 10. A FSFC with a width of 2.0 mm and a distance between the rovings of 0.5 mm.

다양한 개구면의 크기가  $20 \times 20$  mm<sup>2</sup>인 FSFC에 대해 개구면/격자 크기 비의 영향을 고찰하였다.

그림 11은 개구면/격자 크기 비의 영향에 대한 투과 계수의 차이를 보여주며, 탄소 로빙이 금속으로 대체되었을 때의 투과 계수와 비교하여 나타내었다. 금속 FSS의 투과 계수는 격자 크기/파장 길이 비( $A/\lambda$ )의 함수이다<sup>[1]</sup>. 따라서 그림 11의 FSS에 대해서는 가로축을 무차원 인자  $A/\lambda$ 로 나타낼 수 있다. 하지만 FSFC의 투과 계수는  $A/\lambda$  뿐만 아니라, 슬릿의 수나 크기에도 영향을 받는다. 따라서 그림 11의 가로축을 단순히 주파수로 취하였다. 높은 개구면/격자 크기 비에 대해서는 앞서 그림 9의 결과처럼, FSFC와 금속 FSS의 반사계수가 거의 비슷한 경향을 나타내었다. 하지만 그 이외에 개구면/격자 크기 비에 대해서는 다른 경향을 보였다. 특히 공진 주파수 근처의 영역에서는 상당히 다른 투과 특성을 보였으며, 고역 필터의 역할을 할 수가 없었다. 이는 금속의 전기 전도도에 비해 낮은 탄소 로빙의 전기 전도도와 슬릿의 존재로 인한 것으로 사료된다. 슬릿이 탄소 로빙과 같은 동일한 재료로 채워져 있을 때를 해석하였을 때, 개구면/격자 크기 비가 8/20인 경우와 달리 공진 주파수 근처에 하나의 peak만을 가짐을 확인함으로써 슬릿의 존재가 공진 주파수 근처에 영향을 줌을 확인할 수 있었다.

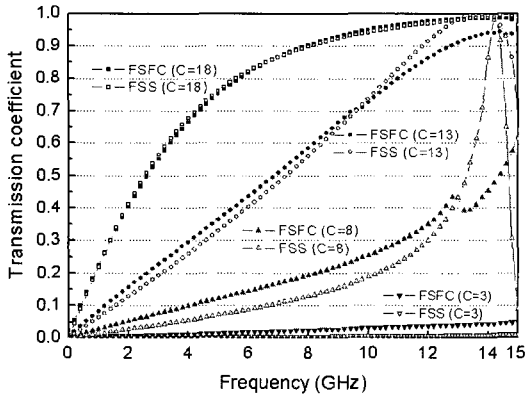


그림 11. 격자 크기가  $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 인 FSFC와 금속 FSS의 개구면 크기에 따른 투과 계수

Fig. 11. Transmission coefficients of a square FSFC and a metallic FSS with a cell size of  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  with respect to the aperture size.

## VI. 결 론

특정 주파수를 투과시키는 FSS의 한 종류로서 탄소계 섬유와 자유전율을 가지는 비탄소계 섬유를 이용한 주파수 선택적인 직물형 섬유 강화 복합 재료를 제안하였다. 직물 형태를 취하므로 반복되는 단위 격자를 지지해 주기 위한 추가적인 필름이나 유전체가 필요하지 않으며, 유전체 기판을 이루는 재료와 동일한 재료로 이루어져 일체 성형이 가능하다는 점에서, 섬유 체적비가 좀 더 높은 기계적 물성이 우수한 재료나 구조를 제작할 수 있다는 장점이 있다. 또한 기존의 직물 직조기를 이용해 대량 생산이 가능해 기존의 금속 FSS에 대해 높은 가격 경쟁력을 가진다.

본 연구에서는 먼저 FSFC의 적용 가능성을 다양한 인자에 대해 살펴보았다. 그리고 제작 가능한 FSFC 중 정사각형 형태의 개구면을 가지는 FSFC의 전자기적 특성을 고찰하였다. 다양한 설계 인자들 중 탄소 로빙의 섬유 체적비, 주파수 의존성, 굴곡의 영향, 그리고 개구면/격자 크기 비 등을 고려하였다. 실험치와 예측치의 비교를 통해 제작상 측정이 용이하지 않은 탄소 로빙에서의 섬유 체적비를 적절한 값으로 취하더라도 FSFC의 성능을 예측할 수 있었다. 그리고 개구면/격자 크기 비가 높은 경우 금속 FSS과 유사하게 고역 필터의 역할을 수행함을 알 수

있었고, 그 비가 중간 정도(intermediate)나 낮은 경우는 고역 필터의 특성을 잃음을 확인하였다. 이는 탄소 섬유에서의 전기적 손실과 슬릿의 존재 때문인 것으로 보인다.

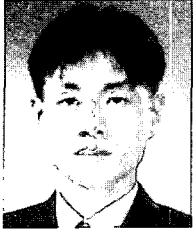
따라서 FSFC를 여파기의 일종으로 사용할 수 있으며, 기존의 금속 FSS와 비교했을 때, 공진 주파수 근처에서 일부 혹은 다량의 반사가 발생한다. 따라서 이 FSFC를 다층형의 복합 재료로 이루어진 전자파 흡수체에 적용하거나, 금속 FSS를 대체할 경우, 기존의 평판형 흡수체와 비교했을 때 전자파 흡수 성능뿐만 아니라 기계적인 물성 또한 우수한 전자파 흡수 구조를 제작할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. W. Lee, G. Zarrillo, and C. L. Law, "Simple formulas for transmission through metal periodic grids or plates", *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 30, no. 5, pp. 904-909, Sep. 1982.
- [2] T. K. Wu, *Frequency Selective Surface and Grid Array*, A Wiley-Interscience Publication, 1995.
- [3] F. Terracher, G. Bergine, "Thin electromagnetic absorber using frequency selective surfaces", *Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE*, vol. 2, pp. 846-849, 2000.
- [4] K. J. Vinoy, R. M. Jha, *Radar Absorbing Materials From Theory to Design and Characterization*, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [5] S. T. Peters, *Handbook of Composites*, 2nd Ed. Chapman & Hall, 1998.
- [6] S. B. Bilikov, M. M. Gejev, and T. S. Zhuravleva, "AC and microwave conductivity of PAN-based carbon fibers", *Synthetic Metals*, vol. 86, pp. 2361-2362, 1997.
- [7] A. T. Ponomarenko, V. G. Shevchenko, and S. V. Letyagin, "Anisotropy of conductivity in carbon fiber-reinforced plastics with continuous fibers", *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, vol. 2443, pp. 831-840, 1997.
- [8] *Torayca Data Sheets*, Toray Carbon Fibers America, 2000.



이 상 의



1999년 2월: 부산대학교 항공우주  
공학과 (공학사)  
2001년 2월: 한국과학기술원 항공  
우주공학과 (공학석사)  
2006년 8월: 한국과학기술원 기계  
공학과 (공학박사)  
2006년 9월~현재: UCLA 박사후

과정

[주 관심분야] 전자파 흡수체의 개발, FSS, 전자기장 해석,  
스마트 복합 재료의 전자기 분야 적용

김 천 곤



1980년 2월: 서울대학교 항공공학  
과 (공학사)  
1982년 2월: 한국과학기술원 항공  
공학과 (공학석사)  
1987년 8월: 한국과학기술원 항공  
공학과 (공학박사)  
1987년~1991년: 한국기계기술연구

원(KIMM) 선임연구원

1991년 9월~현재: 한국과학기술원 교수

[주 관심분야] 스텔스 기술, 전자파 흡수체, FSS, 전자기장  
해석, 스마트 복합 재료의 전자기 분야 적용