

# 자유공간 기법을 적용한 마이크로파 대역 전파흡수재의 유전 특성 분석

A Free-Space Method for Measurement and Analysis of  
Dielectric Characteristics of Electromagnetic Absorbing  
Materials at Microwave Frequencies

배근식\*  
Bae, Geun-Sik

## ABSTRACT

For measurements and analysis of dielectric characteristics of planar slabs of microwave absorbing materials, I have applied a free-space method in the frequency range of 8~14 GHz. The measurement system for free-space method consists of transmit and receive antennas, mode transitions, precision coaxial cables, the network analyzer, and a computer. Special Spot-focused horn lens antenna was used to eliminate diffraction effects. Diffraction effects at the edges of the sample are minimized by satisfying the condition for minimum transverse dimension of the plate and the beamwidth of the antennas at the focus. The time-domain gating feature of the network analyzer and the thru, reflect, and line(TRL) calibration technique were used to eliminate the effects of undesirable multiple reflections. The complex coefficients of reflection and transmission,  $S_{11}$  and  $S_{21}$ , of planar samples were measured for standard materials such as Teflon, Rexolite® 2200. The results were compared with existing measurement method. And I applied a free-space method for measurement to measure dielectric constants of some electromagnetic absorbing materials. Dielectric properties for the same samples were also measured with a 7mm coaxial transmission line method for purposes of comparison with the free-space method.

주요기술용어 : Free-space method(자유공간 기법), Diffraction effects(회절 효과), Complex dielectric constant(복소 유전상수), Multiple reflection(다중 반사), TRL(Through, Reflect and Line), 7mm coaxial transmission line method(7mm 동축관 측정기법)

\* 국방과학연구소 연구원

## 1. 서 론

근래에 전자재료와 자성 플라즈마의 전자기적 특성을 파악하기 위하여 자유공간 기법을 적용하여 재료의 전자기 물성을 측정 및 분석하는 분야에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다<sup>[1,2]</sup>. 과거에는 기술적인 한계로 인하여, 자유공간 기법을 적용한 전자기 물성 측정이 주로 30GHz 이상의 주파수 대역에서만 이루어져 왔다<sup>[3]</sup>. 최근에는 안테나 기술과 측정 장비 제작 기술의 발전과 더불어, 수 GHz의 마이크로파 대역에서도 자유공간 기법을 적용한 측정 방안에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

자유공간 기법을 적용한 측정 방법은 기존의 Cavity resonator 방법이나, 도파관 또는 동축관을 이용한 측정 방법과 비교하여 몇 가지 장점을 가진다. 복합재나 세라믹 재료 등은 제조 과정에서 비균질 특성을 가지게 되므로, 이러한 재료에 대한 전자기 특성 분석에 Cavity resonator 방법이나, 도파관 방법을 적용하게 되면 측정 과정상에서 Cavity나 도파관과 재료의 매질 경계면에서 불필요한 고차모드가 발생하게 되어 측정의 정확성이 크게 떨어지게 되지만, 자유공간 기법을 적용한 측정방법을 사용할 경우 이러한 오차 발생을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다<sup>[4]</sup>.

그 외에도 위에서 열거한 기존의 측정기법을 적용하기 위해서는 재료에 대해서 정밀하고 미세한 시편 가공이 선행되어야 하며, 가공상에서 오차가 발생하는 경우 측정 결과에 대한 신뢰성이 떨어지게 되는 단점이 있지만, 자유공간 기법을 적용한 측정기법은 크기가 수 cm인 평판형 재료샘플에 대한 측정이므로 재료에 대한 미세한 가공이 불필요하다. 또한, 비파괴·비접촉식의 측정 방법이므로, 고온 또는 저온 상태에서 전자재료의 복소 유전율 및 투자율을 측정할 수

있다.

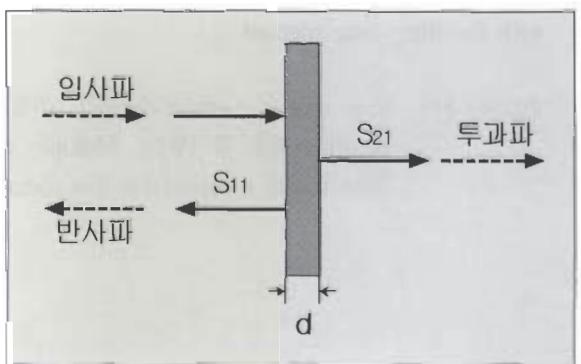
본 논문에서는 자유공간 기법을 적용한 측정 시스템을 구성하고, 평판재료 샘플에 대한 반사계수  $S_{11}$ 과 투과계수  $S_{21}$ 을 측정하고, 이 측정값으로부터 복소 유전율  $\epsilon^*$ 과 복소 투자율  $\mu^*$ 을 계산하였다.

자유공간 기법을 적용한 측정시스템의 정확성 및 신뢰성을 검증하기 위하여, 전자파 특성이 문헌에 알려져 있는 몇 가지 재료 샘플에 대한 측정을 수행하고 그 결과의 정확성을 비교 분석하고, 현재 개발 중인 마이크로파 대역 전파 흡수 재료에 대한 전자기 특성 파라미터를 측정 및 분석한 결과를 제시하였다.

## 2. 측정 기본 이론

[그림 1]은 전자파가 자유공간상에서 두께가  $d$ 인 평판형 구조물에 입사하는 경우, 반사파와 투과파의 흐름을 보여 주고 있다. 여기서,  $S_{11}$ 은 입사전파에 대한 반사파의 비를 나타내는 반사계수이고,  $S_{21}$ 은 입사파에 대한 투과파의 비를 나타내는 투과계수이다.

[그림 1]과 같이 자유공간상에 놓인 매질에 대한 복



[그림 1] 자유공간상에 놓인 유한한 두께를 가지는 반평면 구조

소 유전율과 투자율은 다음과 같이 정의된다. 먼저, 복소 유전율  $\epsilon^*$ 은

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon'(1 - j \tan \delta_\epsilon) \quad (1)$$

로 정의되고, 복소 투자율  $\mu^*$ 은

$$\mu^* = \mu' - j\mu'' = \mu'(1 - j \tan \delta_\mu) \quad (2)$$

로 정의된다. 이 때, 평판 양 끝 모서리에 대한 회절 효과를 무시하기 위하여 평판은 길이가 무한한 반평면(half-plane)으로 가정한다. 이러한 평판 구조에 주파수가  $\omega$ 인 평면파가 입사되었을 때, 반사파와 투파파가 발생하게 되면 반사파 및 투파파는 입사파에 대하여 다음과 같은 관계를 가진다. 여기서는 편의상 전자파의 전계에 관한 관계식만 정의하였다.

먼저, 반사파의 전계는

$$\underline{E}_{ref} = \Gamma \underline{E}_{in} \quad (3)$$

로 정의하고,  $\underline{E}_{in}$ 은 입사파의 전계이며  $\Gamma$ 는 평판 매질에 의한 반사계수이다. 또, 투파파의 전계는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\underline{E}_{tran} = T \underline{E}_{in} \quad (4)$$

여기서,  $T$ 는 평판매질에 의한 투파계수이다.

[그림 1]에 경계조건(Boundary Condition)을 적용하면, S-파라미터를 반사계수  $\Gamma$ 와 투파계수  $T$ 의 방정식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - (\Gamma T)^2} \quad (5)$$

$$S_{21} = \frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - (\Gamma T)^2} \quad (6)$$

또, 반사계수  $\Gamma$ , 투파계수  $T$ 를 평판매질의 특성 임피던스(Characteristic Impedance)  $Z_{sn}$ 과 전파상수 (Propagation Constant)  $\gamma$ 의 항으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Gamma = \frac{(Z_{sn} - 1)}{(Z_{sn} + 1)} \quad (7)$$

$$T = e^{-\gamma d} \quad (8)$$

여기서,

$$\gamma = \gamma_0 \sqrt{\epsilon^* \mu^*} \quad (9)$$

$$Z_{sn} = \sqrt{\frac{\mu^*}{\epsilon^*}} \quad (10)$$

로 정의한다.

식 (9)에서 자유공간에서 전파의 전파상수  $\gamma_0 = j 2\pi/\lambda_0$ 이며,  $\lambda_0$ 는 자유공간상의 전파의 파장 을 나타낸다. 식 (5), (6)으로부터 반사계수  $\Gamma$ 와 투파계수  $T$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (11)$$

(단,  $|\Gamma| < 1$ ,  $K = (S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1)/2S_{11}$ )

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (12)$$

식 (8)을 복소 전파상수  $\gamma$ 에 대한 식으로 변환하면 다음과 같다.

$$\gamma = [\ln(1/T)]/d \quad (13)$$

식 (7)과 식 (10)으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\sqrt{\frac{\mu^*}{\varepsilon^*}} = \left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}\right) \quad (14)$$

식 (9)와 식 (14)로부터 복소 유전율과 복소 투자율에 대한 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\varepsilon^* = \frac{\gamma}{\gamma_o} \left(\frac{1-\Gamma}{1+\Gamma}\right) \quad (15)$$

$$\mu^* = \frac{\gamma}{\gamma_o} \left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}\right) \quad (16)$$

식 (8)에서 복소 투과계수  $T$ 는 크기 항과 위상 항을 가지는 일반적인 표현 형태인

$$T = |T| e^{j\phi} \quad (17)$$

로 나타낼 수 있다.

식 (13)에 식 (17)을 대입하여, 다음과 같이 전파상수  $\gamma$ 를 실수부와 허수부를 가지는 복소수 형태로 표현할 수 있다.

$$\gamma = [\ln(1/|T|)]/d + j\left(\frac{2\pi n - \phi}{d}\right) \quad (18)$$

(단,  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ )

식 (18)로부터, 전파상수  $\gamma$ 의 실수부는 유일한 값이지만, 허수부는  $n$ 에 따라 복수 개의 값을 가진다. 따라서 식 (15)와 식 (16)에서 복소유전율  $\varepsilon^*$ 와

복소 투자율  $\mu^*$ 은 여러 개의 값을 가지게 된다. 복소 전파상수  $\gamma$ 의 실수부는 감쇄정수(Attenuation Constant)라 정의하고, 허수부는 위상정수(Phase Constant)라 정의한다<sup>[5]</sup>. 이를 일반적인 표현형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (19)$$

이 때,  $\alpha$ 는 감쇄정수이고  $\beta$ 는 위상정수이며, 매질내를 통과하는 전파의 파장  $\lambda_m$ 과 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_m} \quad (20)$$

식 (18)과 (20)으로부터,

$$\frac{d}{\lambda_m} = n - \frac{\phi}{2\pi} \quad (21)$$

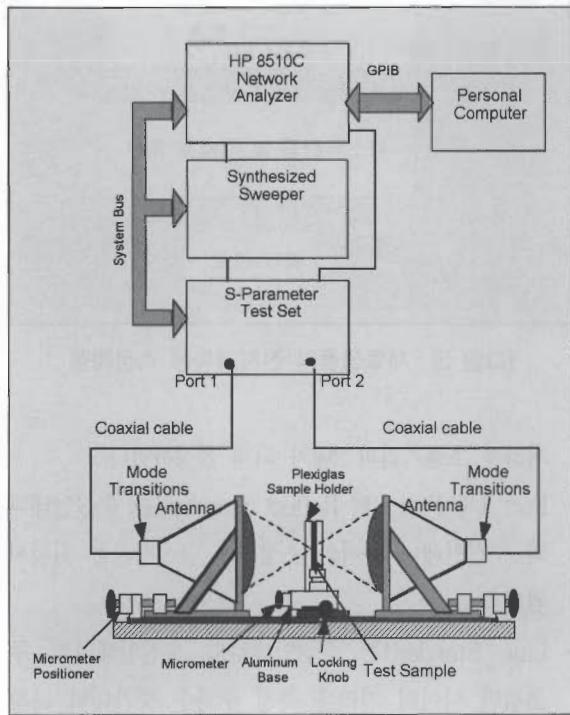
를 얻을 수 있다.

식 (21)에서  $n=0$ 이고,  $-2\pi < \phi < 0$  일 때,  $0 < (d/\lambda_m) < 1$ 이 된다. 만약, 평판 샘플의 두께  $d$ 가  $\lambda_m$  보다 작은 경우, 식 (11)~식 (14)로부터, 복소 유전율과 복소 투자율은  $n=0$  일 경우에 해당되어, 유일한 값을 얻을 수 있다. 반면, 두께  $d$ 가  $\lambda_m$  보다 큰 경우에는 단일 재료에 대한 복수 개의 결과값이 발생하게 된다. 따라서, 자유공간 기법을 적용하여 재료에 대한 복소 유전율과 복소 투자율을 구하는 경우, 평판재료의 두께는 매질 내의 전파의 파장보다 작게 설정하여야 한다<sup>[6]</sup>.

### 3. 자유공간 기법을 적용한 측정시스템

자유공간 기법을 적용한 측정시스템의 블럭도는 [그림 2]와 같다. 측정시스템에 대하여 간략히 설명하면, 한 쌍의 Spot-focusing horn lens 안테나를 크기가  $1.83m \times 1.83m$ 인 알루미늄 선반 위에 장착시킨다. 평판형 재료 샘플을 거치시키는 Holder는 그림과 같이 두 안테나 사이에 그 중심이 안테나 중심축선상에 놓이도록 설치한다. 이 샘플 Holder는  $30cm \times 30cm$ ,  $15.2cm \times 15.2cm$ ,  $10.2cm \times 10.2cm$ 의 세 가지 크기를 가지는 평판형 재료 샘플을 각각 거치할 수 있도록 설계되었다.

송신안테나와 수신안테나는 동일한 규격의 Spot-focusing lens 안테나를 사용하는데, 주파수가  $10\text{ GHz}$ 일 때 자계면과 전계면에서 각각  $4.37\text{cm}$ ,  $3.2\text{cm}$



[그림 2] 자유공간 기법을 적용한 측정시스템

의  $3\text{dB}$  빔폭을 가지며,  $7.85\text{cm}$ 와  $5.49\text{cm}$ 의  $10\text{dB}$  빔폭을 가진다. 송수신안테나로 사용된 Spot-focusing lens 안테나의 개략적인 제원 및 성능은 [표 1]과 같으며, 본 실험에서는 A type 주파수범위를 가진 안테나가 적용되었다.

본 측정시스템은 평판 재료 샘플의 가장자리에서 발생하는 회절 영향을 제거하기 위하여, [표 1]과 같은 Spot-focusing lens 안테나 및 샘플홀더를 사용하여 평판 샘플의 크기를 E-plane(전계면)에서의  $3\text{dB}$  빔폭보다 3배 이상이 되도록 설정하였다. 즉, [표 1]의 안테나 및 샘플홀더를 이용하여 평판형 샘플 가장자리의 회절 영향을 무시할 수 있는 실험적 조건<sup>[4]</sup>인  $D \geq 3d$ 를 만족시킬 수 있다(단,  $D$ 는 평판 형태 샘플의 크기이며,  $d$ 는 E-plane에서의  $3\text{dB}$  빔폭이다.).

해당 안테나는 이종 도파관간 어댑터와 도파관-동축케이블간 연결 어댑터 및 동축케이블을 사용하여 S 파라미터 test set의 양 단자인 Port 1과 Port 2에 연결된다.

[표 1] 송수신 안테나 성능 및 제원

항목	성능 및 제원
안테나 형태	Spot-focusing horn lens 안테나 $F/D = 1$ , $d = 30.5\text{cm}$
주파수범위	A type: $8.2 \sim 12.4\text{GHz}$ B type: $14.0 \sim 40.0\text{GHz}$
$3\text{dB}$ 빔폭 ( $10\text{GHz}$ 일 때)	$4.37\text{cm}$ : H-plane(자계면) $3.2\text{cm}$ : E-plane(전계면)
$10\text{dB}$ 빔폭 ( $10\text{GHz}$ 일 때)	$7.85\text{cm}$ : H-plane(자계면) $5.49\text{cm}$ : E-plane(전계면)

재료샘플의 전자기적 특성 파라미터인 복소 유전율과 투자율은 [그림 2]와 같은 시스템을 이용하여 재료의 S 파라미터를 측정한 후, 그 결과값을 이용하여 계산하였다.

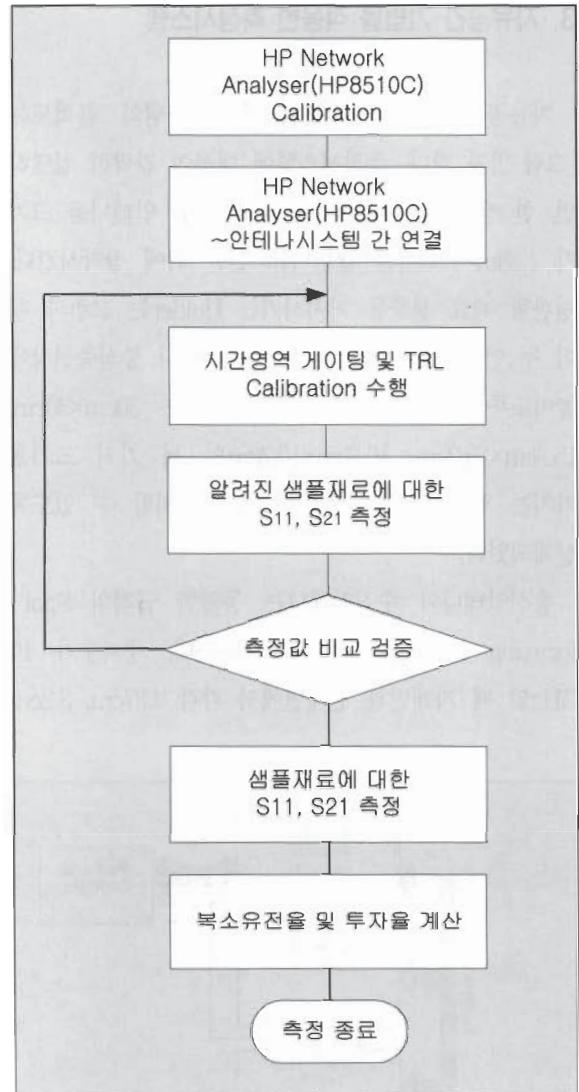
#### 4. 측정시스템을 이용한 S 파라미터 측정

[그림 2]의 자유공간 측정시스템을 이용하여, 8.4~12.4GHz 대역에서 평판샘플에 평면파가 입사되는 경우에 S 파라미터 측정을 수행하였다. [그림 3]은 본 측정시스템을 이용한 측정과정을 나타낸 것이다.

측정과정 중에서 보다 정확한 측정결과를 보장하기 위하여 측정시스템에 시간영역 게이팅 및 TRL (Through, Reflection and Line Method) 보정 과정을 수행하였다.

평판형 샘플에 평면파가 입사되면, 평판 샘플 표면을 통해 송신안테나와 수신안테나 사이에 다중 반사가 발생하고, 이로 인하여 정확한 S 파라미터 측정이 어렵게 되므로, 이러한 문제를 해결하기 위하여 시간영역 게이팅을 통한 2-Port TRL 보정 기법 (Through, Reflection and Line Method)을 적용하였다. 여기에 사용된 2-Port TRL 보정 기법은 마이크로파 대역에서 사용되는 보정 기법 중, 신뢰성이 매우 높은 방법이다<sup>[1]</sup>. 자유공간상에 위치한 샘플측정에 TRL 보정기법을 적용하기 위해서는 적절한 TRL Standard를 설정하여야 한다. 본 측정시스템에 적용된 TRL Standard는 다음과 같다.

- Port 1과 Port 2의 기준면은 각각 송신안테나와 수신안테나의 초점면에 위치시킨다.
- Through Standard는 송신안테나와 수신안테나 간



[그림 3] 재료샘플의 전자기특성 측정과정

거리를 초점거리의 2배가 되게 설정하였다.

- Port 1과 Port 2의 Reflect Standard는 송신안테나와 수신안테나 사이의 초점면에 금속평판을 위치시켰다.
- Line Standard는 송신안테나와 수신안테나의 두 초점면 사이의 거리를 측정 주파수 중간대역 파장의 1/4 만큼 띄우는 방법을 적용하였다.

이상과 같은 방법으로 측정시스템을 보정한 후, 시간영역 게이팅 기법을 이용하여 나머지 부정합의 영향을 제거하였다. 시간영역게이팅 기법을 적용하기 위하여 주파수 영역 데이터를 역프리에 변환한 후, 시간영역의 S 파라미터 응답을 얻었다. 시간영역 게이팅을 적용한 결과, 금속 평판을 부착시킨 샘플의 반사계수의 크기 및 위상에 대한 오차범위를 각각  $\pm 0.035\text{dB}$ ,  $\pm 2^\circ$  이내로 향상시킬 수 있었다.

## 5. 측정결과 및 고찰

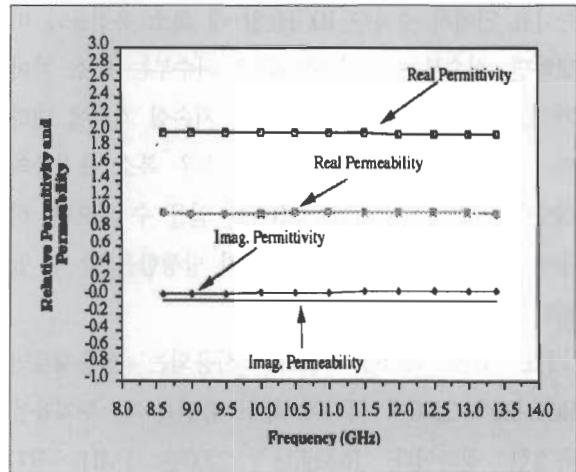
본 논문에서 제시한 자유공간 기법을 적용한 측정 시스템의 정확성을 검증하기 위해서, 저손실 특성을 가지는 몇 가지 재료 샘플 및 고손실 특성을 가지는 전파 흡수재에 대해서 기존의 측정방법을 적용한 결과와 비교 및 분석하였다.

### 5.1 저손실 샘플 재료에 대한 측정 결과

저손실 특성을 가진 재료인 Teflon 샘플과 Rexolite<sup>®</sup> 2200 샘플에 대하여 S 파라미터를 측정하고, 이로부터 전파 특성 파라미터인 복소 유전율(Complex Permittivity)과 복소 투자율(Complex Permeability)을 계산하였다.

먼저 [그림 4]는 자유공간 측정기법을 이용하여 저손실 유전재료인 Teflon에 대하여 측정결과로부터 구한 복소 유전율 및 복소 투자율을 그래프로 나타낸 것이고, [표 2]는 그 결과값을 실수부와 허수부로 나누어 정리한 것이다.

동일한 두께의 Teflon에 대하여 종래에 많이 사용



[그림 4] Teflon(두께 3.3mm)의 유전율과 투자율

[표 2] Teflon(두께 3.3mm)의 복소 유전율 및 복소 투자율

주파수 (GHz)	복소유전율( $\epsilon^*$ )		복소투자율( $\mu^*$ )	
	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\mu'$	$\mu''$
8.4	1.98	0.06	1.02	-0.01
9.0	2.00	0.06	1.00	-0.02
9.6	2.01	0.06	1.00	-0.03
10.0	2.00	0.07	1.00	-0.03
10.6	2.00	0.07	1.00	-0.03
11.0	1.98	0.08	1.00	-0.04
11.6	1.99	0.08	1.00	-0.04
12.0	1.99	0.08	1.01	-0.04
12.4	1.99	0.08	1.01	-0.04

되고 있으며, 비교적 정확한 전자기 물성 측정기법으로 알려진 Short circuit line method와 Resonant cavity method를 적용한 결과를 보면, 주파수가 10 GHz일 때, 복소 유전율은  $2.08-j0.00076$  이다<sup>[7]</sup>. 이

\* Rexolite<sup>®</sup> : 제조회사명

는 [표 2]에서 주파수 10GHz일 때 복소 유전율과 비교하면, 실수부는 거의 유사하고 허수부는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이로부터 저손실 재료에 대하여 자유공간 측정기법을 적용할 경우 복소 유전율의 실수부  $\epsilon'$ 은 매우 정확한 결과를 얻을 수 있으며, 허수부  $\epsilon''$ 에 대해서는 부분 오차가 발생함을 알 수 있었다.

[표 3]은 레이돔 재료로 사용되는 상용재료인 Rexolite<sup>®</sup> 2200에 대하여 복소 유전율 및 투자율을 측정한 결과이다. Rexolite<sup>®</sup> 2200은 1MHz~500 GHz까지 복소 유전율의 실수부인  $\epsilon'$ 가 2.62인 상용재료이다. [표 3]에 있는 측정 결과를 보면, 8.4~12.4 GHz 대역에서 복소 유전율의 실수부  $\epsilon'$ 가 2.62~2.69로 그 상용 재료 규격과 거의 일치함을 볼 수 있고, 유전손실이 매우 작은 레이돔용 재료의 특징을 확인할 수 있다.

[표 3] Rexolite<sup>®</sup> 2200(두께 6.377mm)의 복소 유전율 및 복소 투자율

주파수 (GHz)	복소유전율( $\epsilon^*$ )		복소투자율( $\mu^*$ )	
	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\mu'$	$\mu''$
8.4	2.69	0.08	1.02	0.06
9.0	2.68	0.06	1.02	0.06
9.6	2.69	0.01	0.99	0.05
10.0	2.68	0.01	0.98	0.03
10.6	2.65	0.007	0.97	0.04
11.0	2.67	0.0098	0.97	0.03
11.6	2.62	0.0014	0.97	0.02
12.0	2.62	0.00258	0.96	0.03
12.4	2.62	0.0014	1.01	0.04

## 5.2 전파흡수 재료에 대한 측정 결과

다음으로 자유공간 측정시스템을 이용하여 고손실 재료인 X 대역 및 Ku 대역 전파흡수재에 대하여 S 파라미터를 측정하고 이를 이용하여, 복소 유전율 및 복소 투자율을 계산하였다. 이 결과를 재료시편에 대한 정확한 측정방법 중의 하나인 7mm 동축관 기법을 이용한 측정결과와 비교하였다.

먼저 두께가 1.489mm인 X 대역 전파흡수재를 15.2cm × 15.2cm 크기의 샘플홀더에 거치하고, 자유공간 측정시스템을 이용하여 측정한 후, 그 결과로부터 계산되어진 복소 유전율 및 복소 투자율을 [표 4]에 나타내었다.

동일한 재료에 대하여, 7mm 동축관 기법을 적용하여 전자기 물성 측정을 수행하였고, 그 결과로부터 도출한 복소 유전율과 복소 투자율에 대한 결과값을 [표 5]에 나타내었다.

또, 두께가 1.515mm인 Ku 대역 전파흡수재에 대한 복소 유전율 및 복소 투자율에 대한 결과값은 [표 6]과 같고, 7mm 동축관 기법을 적용한 경우에는 [표 7]과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

[표 4] 자유공간 측정기법을 적용한 X 대역 전파흡수재의 복소 유전율 및 투자율

주파수 (GHz)	복소유전율( $\epsilon^*$ )		복소투자율( $\mu^*$ )	
	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\mu'$	$\mu''$
8.4	17.23	1.06	2.18	1.55
9.2	16.57	1.21	1.94	1.44
10.4	16.51	0.99	1.88	1.44
11.6	16.31	1.09	1.32	1.76
12.4	16.19	1.52	1.61	1.67

[표 5] 7mm 동축관 측정기법을 적용한 X 대역 전파흡수재의 복소유전율 및 투자율

주파수 (GHz)	복소유전율( $\epsilon^*$ )		복소투자율( $\mu^*$ )	
	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\mu'$	$\mu''$
8.4	14.09	0.99	1.98	1.49
9.2	13.98	1.04	1.78	1.46
10.4	14.02	0.98	1.77	1.45
11.6	14.06	1.08	1.52	1.38
12.4	13.76	0.99	1.41	1.38

[표 6] 자유공간 측정기법을 적용한 Ku 대역 전파흡수재의 복소 유전율 및 투자율

주파수 (GHz)	복소유전율( $\epsilon^*$ )		복소투자율( $\mu^*$ )	
	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\mu'$	$\mu''$
8.4	7.77	0.22	1.76	1.07
9.2	7.59	0.24	1.61	1.00
10.4	7.44	0.20	1.43	0.92
11.6	7.28	0.24	1.39	0.91
12.4	7.36	0.21	1.30	0.87

[표 7] 7mm 동축관 측정기법을 적용한 Ku 대역 전파흡수재의 복소유전율 및 투자율

주파수 (GHz)	복소유전율( $\epsilon^*$ )		복소투자율( $\mu^*$ )	
	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\mu'$	$\mu''$
8.4	7.89	0.40	1.79	0.81
9.2	7.70	0.39	1.68	0.83
10.4	7.81	0.33	1.61	0.84
11.6	7.75	0.31	1.52	0.86
12.4	7.69	0.33	1.40	0.88

두 가지 고손실 전파흡수재에 대한 측정결과로부터, 자유공간 기법을 적용한 측정결과와 기존의 7mm 동축관 기법을 이용한 결과가 상당히 유사함을 알 수 있다. 이는 고손실 재료에 대한 복소 유전율 및 투자율에 대한 측정에 자유공간 기법을 적용하는 경우, 상당히 정확한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 새로운 측정 기법인 자유공간 기법을 적용하여 샘플 재료의 전자기 특성을 측정 및 분석하기 위하여, Spot-focusing lens 안테나와 HP8510C Network Analyser 등을 이용하여 자유공간 측정시스템을 구성하였다.

구성한 측정시스템의 정확성을 검증하기 위하여 Teflon 샘플 및 상용 레이돔 재료인 Rexolite® 2200 재료 샘플에 대하여 자유공간 측정시스템을 적용하여 복소 유전율 및 투자율 값을 구한 후, 기존의 측정 기법에 의한 결과 및 상용 재료 규격과 비교하여, 상당히 유사함을 확인하였다. 또한, 고손실 재료인 X 대역 및 Ku 대역 전파흡수재에 자유공간 기법과 7mm 동축관 기법을 각각 측정에 적용하여 그 결과를 서로 비교하여 매우 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있었다.

이상과 같은 결과로부터 마이크로파 대역에서 고성능 전파흡수재를 개발하는 과정에서 재료에 대한 전자기 물성 측정 및 특성 분석에 본 자유공간 측정기법을 적용할 수 있으며, 또한 전자기재료에 대하여 정밀시편을 별도 제작하지 않고, 비접촉/비파괴적인 방법으로 전자파 물성 측정이 가능한 장점으로 인하여 고온 및 저온 환경에서의 전자기 특성 분석이 요구되는 레이돔 등의 개발에 활용할 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] J. Musil and F. Zacek, *Microwave Measurements of Complex Permittivity by Free-Space Methods and Their Applications*. New York: Elsevier. 1986. pp.44~60, 92~166.
- [2] E. Collett, "Digital spectrometry measurement of dielectric constant at millimeter frequencies", *Microwave J.*, vol.29, pp.307~312, 1986.
- [3] A. C. Lynch, "Precise measurements on dielectric and magnetic materials", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-23, pp.425~430, 1974.
- [4] D. K. Ghodgaonkar and et. al, "Free-Space Method for Measurement of Dielectric Constants and Loss Tangents at Microwave frequencies", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.37, pp.789~793, June 1989.
- [5] D. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*. Addison Wiley, 1989, pp.367~374, 439~442.
- [6] D. K. Ghodgaonkar and et. al, "Free-Space Measurement of Complex Permittivity and Complex Permeability of Magnetic Materials at Microwave Frequencies", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.39, pp.387~394, Apr. 1990.
- [7] A. R. Von Hippel, *Dielectric Materials and Applications*. New York: Wiley, 1954, pp.134~135, 310~332.