

X-대역에서의 Foam 재료의 복소 유전율

방재훈, 안병철
충북대학교 전자공학과

Tel. 0431-261-3194 / Fax. 0431-271-4647

Complex Permittivity of Foam Materials at X-Band

Jai-Hoon Bang · Bierng-Chearl Ahn

Dept. of Radio Engineering Chungbuk National University

bjh2230@trut.chungbuk.ac.kr · bician@chungbuk.ac.kr

ABSTRACT

This paper investigates the complex permittivity of foam materials using the rectangular waveguide. The transmission coefficients of materials inserted in the waveguide are measured with a network analyzer and calculated from the equivalent transmission line model. We use the trial and error method in the acquisition of the complex permittivity.

본 론

본 논문에서는 foam 재료의 유전율을 측정하기 위하여 구형도파관을 이용하였다. 이 방법에서는 구형도파관 내부에 시료를 삽입한 후 산란계수를 측정하여 이로부터 시료의 유전율을 구한다.

그림 1은 foam 재료가 도파관 내부에 길이 d_2 만큼 삽입된 구조를 보인 것이다. 도파관 내부를 공기인 영역과 foam 재료로 채워진 영역을 등가 회로로 표현하면 그림 2와 같다.

서 론

발포 플라스틱의 일종인 foam 재료는 폴리에틸렌이나 폴리스티렌을 주 원료로 제조된다. Foam 재료는 손실이 작고 저렴하므로 저가형 마이크로스트립 안테나 구현에 이용된다[1]-[2]. 마이크로스트립 안테나를 CAD 프로그램을 이용하여 정확하게 설계할 수 있으므로 foam 재료의 유전율 확보는 매우 중요하다.

초고주파 대역에서 유전율을 측정하는 방법으로는 동축선법, 자유공간법, 구형도파관법 등이 있다. Knott는 두 개의 표준 이득 혼 안테나 사이에 foam 재료를 위치 시키고 측정된 산란 계수로부터 foam 재료의 유전율을 구하는 방법을 제시하였다[3]. 본 논문에서는 foam 재료의 유전율을 측정하기 위하여 샘플 제작이 비교적 용이한 구형 도파관법을 이용하였다. foam 재료의 두께를 충분히 하여 도파관 내부에 삽입하고 측정된 투과 계수로부터 비유전율과 손실탄젠트를 산출하였다. 도파관법을 사용하여 국내에서 쉽게 구할 수 있는 4종의 foam 재료의 복소 유전율을 구하였다.

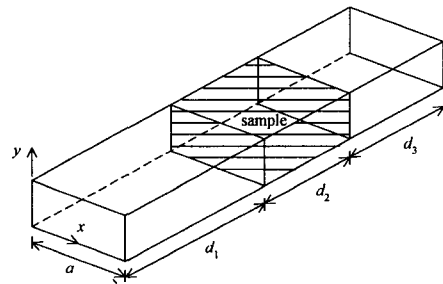


그림 1. 구형 도파관 삽입법에 의한 유전율 측정 구조

이로부터 포트 1과 포트 2에서의 반사 계수와 전달 계수는 다음 식처럼 구할 수 있다.

$$S_{11} = e^{-2\alpha_e d_1} \left[\frac{\Gamma(1 - e^{-2\alpha_e d_2})}{1 + \Gamma^2 e^{-2\gamma d_2}} \right] \quad (1)$$

$$S_{21} = S_{12} = e^{-\epsilon_0(d_1+d_2)} \left[\frac{e^{-g d_2} (1 - \Gamma^2)}{1 - G^2 e^{-2g d_2}} \right] \quad (2)$$

여기서

$$G = \frac{g_0 - g}{g_0 + g} \quad (3)$$

$$g_0 = \sqrt{(p/a)^2 - k_0^2} \quad , \quad k_0^2 = \omega \mu_0 \epsilon_0 \quad (4)$$

$$g = \sqrt{(p/a)^2 - k^2} \quad , \quad k^2 = \omega \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \quad (5)$$

로 주어진다.

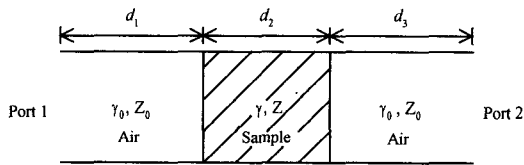


그림 2. 그림 1의 등가 회로

Foam 재료는 자성을 띠지 않으므로 $\mu_r = 1 + j 0$ 으로 가정할 수 있으며 복소 유전율은 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_c = \epsilon_0 (1 - j \tan \delta) \quad (6)$$

구형도파관법을 이용한 일반적인 유전율 측정시 측정된 반사계수(S_{11}) 또는 전달계수(S_{21})으로부터 복소유전율을 구할 수 있다. 그러나 foam 재료의 경우 유전상수값이 1보다 약간 크므로 전달계수를 사용하는 것이 유전율 측정에 유리하다.

도파관 삽입법에 의한 foam 재료의 유전율 측정시 샘플 제작은 중요한 일이다. Foam 재료는 강도가 약하므로 샘플 제작시 날카로운 면도칼을 이용하여 정밀하게 절단하였다. 또한 도파관 내부에 제작된 샘플을 삽입하는 과정에서 밀리거나 구부러지면 foam 고유의 밀도를 변화시키므로 주의를 기울여서 작업하였다. 본 연구에서는 도파관 내부에 샘플을 삽입하기 전에 총 길이를 재고 삽입한 후의 그 길이가 같은 지를 확인한 후 측정하였다. 또한 foam 재료의 손실 탄젠트 ($\tan \delta$)

값을 정확하게 구할 수 있도록 시료의 길이를 충분히 길게 하였다. 그림 3은 본 연구에서 사용된 구형도파관 fixture와 foam 재료의 모습이다.

적절한 길이의 Foam 재료를 구형도파관 fixture에 삽입한 후 회로망 분석기(HP 8720C)를 이용하여 산란계수를 측정하였다. 이 때 도파관 교정 세트(Maury M7006A, WR-75)를 이용하여 calibration을 하였다.

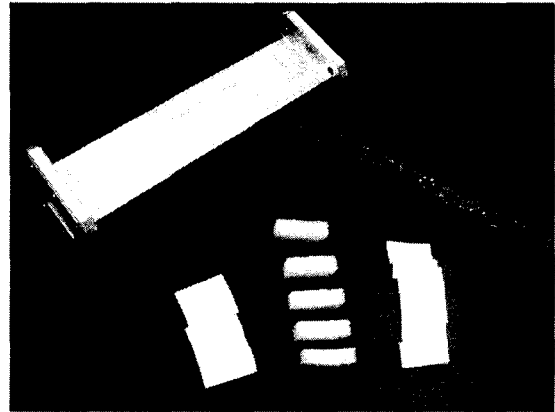


그림 3. 구형도파관 fixture와 foam 재료 샘플

측정된 산란계수들로부터 시료의 복소유전율을 구하기 위해 보통 ϵ_c' 과 $\tan \delta$ 를 산란계수로 표현한 식을 이용한다[4]. 이 방법은 산란파로부터 산란체의 매질 특성을 구하는 전형적인 역산란 방법의 하나로 역산란 과정은 측정 값의 오차가 있을 경우 추출된 값에 큰 오차를 유발하는 부적절하게 정의된(ill-posed) 문제로 잘 알려져 있다. 본 논문에서는 foam 재료의 유전율을 산출하기 위하여 ϵ_c' 과 $\tan \delta$ 를 바꿔가면서 전달계수의 계산치와 측정치가 일치하는 값을 찾는 방법을 사용하였다.

Foam의 손실 탄젠트를 정확하게 측정하기 위해서 120mm 길이의 긴 구형도파관 fixture를 사용하였다. 이 경우 도파관 벽에 의한 손실을 고려하여야 한다. 도파관벽의 도전율 값을 3.5×10^7 S/m(알루미늄)로 하여 도파관 내 손실을 계산하였다. 유전 상수 ϵ_c' 이 1보다 훨씬 큰 경우에는 ϵ_c' 값의 변화에 따라 전달계수의 크기와 위상이 모두 변한다. 그러나 foam 재료의 경우에서처럼 유전상수가 1에 가까운 경우에는 ϵ_c' 의 변화는 전달계수의 위상에만 영향을 준다. 우선 $\tan \delta$ 를 0으로 가정하고 ϵ_c' 을 변화시키면서 S_{21} 의 위상이 계산치와 측정치가 일치하는 값을 찾는다. ϵ_c' 의 값을 찾은 후 $\tan \delta$ 값을 조정하여 S_{21} 크기의 계산치와 측정치가 일치하

는 값을 찾는다.

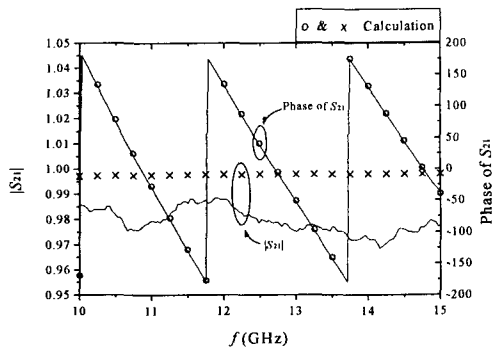


그림 4. 빈 도파관 전달 계수의 계산치와 측정치
(시료 길이 = 120mm, $\epsilon'_r = 1.00$, $\tan \delta = 0.00$).

그림 4는 시료가 삽입되지 않은 빈 도파관의 전달 계수의 계산치와 측정치를 보이고 있다. S_{21} 의 위상은 계산치와 측정치가 잘 일치하는 반면에 S_{21} 의 크기는 이론치보다 최대 0.03 정도 작은 값을 가진다. 이것은 주로 도파관 플레인저 접촉면에서의 손실과 calibration의 정확도 한계에 의한 것으로 foam 재료의 $\tan \delta$ 를 산출할 경우 빈 도파관의 측정 결과를 이용하여 측정 데이터를 보상하였다.

표 1은 측정에 사용된 foam 재료의 원료, 밀도와 함께 그림 1의 구조에서 각 영역의 길이를 제시한 것이다.

표 1. 측정에 사용된 foam 재료

종류	주요구성 물 질	밀도 (kg/ m ³)	도파관에 채워진 샘플 길이		
			d_1 (mm)	d_2 (mm)	D_3 (mm)
샘플①	폴리에스터	12	0.00	120.00	0.00
샘플②	폴리에스터	83	0.00	114.30	5.70
샘플③	폴리에스터	57	0.00	101.00	19.00
샘플④	폴리에스터	73	0.00	61.60	58.40

그림 5에서부터 그림 8은 이들 foam 재료의 전달 계수의 계산결과와 측정결과를 보인 것이다. 10-15 GHz의 주파수 범위에서 foam 재료의 매질특성 변화가 거의 없다는 가정하에 전달계수의 측정치가 계산치와 잘 일치하도록 ϵ'_r 과 $\tan \delta$ 값을 시행착오법으로 결정하였다.

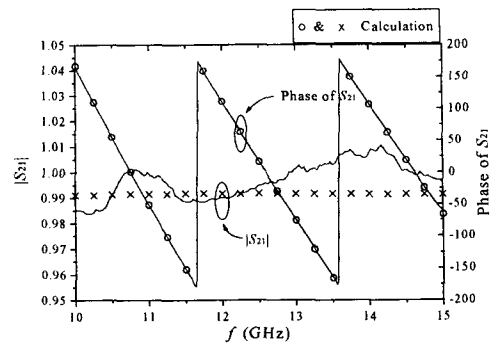


그림 5. 샘플 ①의 전달계수 (측정치 및 계산치).

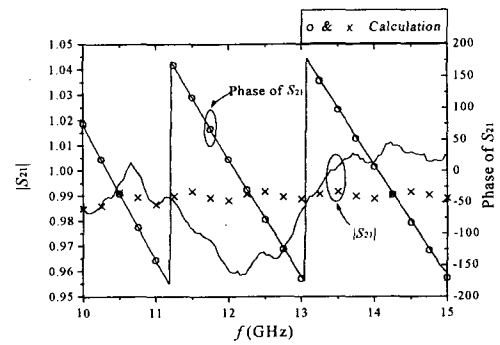


그림 6. 샘플 ②의 전달계수 (측정치 및 계산치).

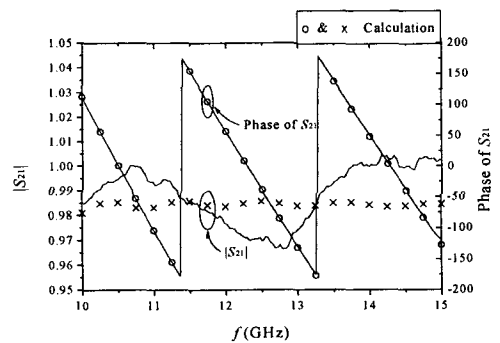


그림 7. 샘플 ③의 유전율 측정 결과와 계산 결과

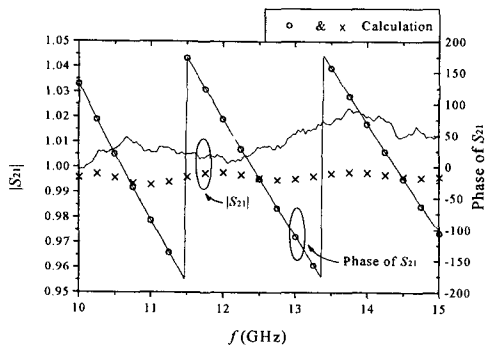


그림 8. 샘플 ②의 유전율 측정 결과와 계산 결과

여기서 S_{21} 의 위상은 계산된 ϵ_r' 의 값에 대하여 잘 일치한다. 그러나 S_{21} 크기 측정치는 최대 ± 0.03 의 오차가 발생된다. 이는 주로 calibration의 유한한 정확도에 기인된 것이며 S_{21} 크기의 주파수 특성 측정치의 중간 값을 $\tan \delta$ 를 산출하였다.

표 2는 foam 재료의 복소 유전율 산출 결과이다. 샘플 ④의 경우 $\tan \delta$ 값을 추출하기 곤란하였는데 이는 샘플의 두께가 충분하지 않아서 foam 재료상의 손실에 의한 전달계수 크기 감소가 전달계수의 오차에 과분히 버린 결과로 판단된다.

표 2. 측정된 샘플들의 유전율 계산 결과

종 류	밀도 (kg/m ³)	ϵ_r'	$\tan \delta$
샘플 ①	12	1.021	0.0003
샘플 ②	83	1.112	0.0003
샘플 ③	57	1.084	0.0007
샘플 ④	73	1.105	-

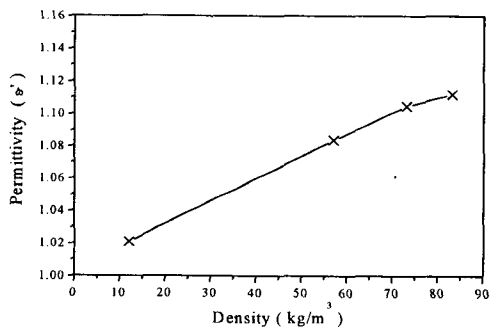


그림 9. 밀도에 따른 foam 재료의 유전상수.

그림 9는 표 2의 결과로부터 foam 재료의 밀도에

따른 ϵ_r' 의 변화를 보인 것이다. 이로부터 유전상수는 foam의 밀도가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

결 론

본 논문에서는 저가형 마이크로스트립 안테나 재료로 적합한 4종의 폴리에스터 foam의 10 - 15 GHz 대역에서의 복소 유전율의 측정값을 제시하였다. 구형도파관법을 이용하여 유전상수가 1에 가깝고 손실계수가 매우 작은 foam 재료의 특성을 비교적 정확하게 측정할 수 있음을 보였다. 폴리에스터 foam의 밀도가 12 - 83 kg/m³ 일 경우 유전상수와 손실탄젠트값은 각각 1.02 - 1.11와 0.0003 - 0.0007 범위의 값을 가짐을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] F. E. Gardiol and J. Zurcher, "Broadband patch antenna", *Antenna and Propagation Society International Symposium, 1996*, vol. 1, 1996, 2-5
- [2] 유명완, 이범선, "개구 결합 급전 방식의 Ku 밴드 U 슬롯 마이크로스트립 안테나 설계 및 제작", *한국전자과학기술논문집*, 제 10권, 제 4호, pp. 639-644, 1999
- [3] E. F. Knott, "Dielectric constant of plastic foams", *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. 41, No. 8, pp 1167-1171, August, 1993
- [4] 홍성용, *구형도파관을 이용한 유전율 및 투자율 측정*, 한국과학기술원, 석사학위논문, 1988.