

마이크로파에서 Dielectric rod resonator method 에 의한 저유전 손실 물질의  
유전 특성 측정에 관한 연구

( The Microwave Measurement of the Dielectric Properties of Low-Loss  
Materials by the Dielectric Rod Resonator Method )

심화섭\*, 이한영  
김근영, 김진현

서강대학교 이공대학  
전자공학과

H. S. SHIM, H. Y. LEE  
G. Y. KIM, J. H. KIM

Dep. of electric engineering  
Sogang University

Abstract

Theory and experimental results are presented to show the possibility of using a dielectric rod resonator method for characterizing dielectric materials at microwave frequency.

The measuring structure is a resonator made up of a cylindrical dielectric rod placed between two parallel conducting plates.

In this system, the  $TE_{011}$  mode frequency was adapted to minimize the effect of the air-gap between the rod and the conducting plates.

The dielectric properties are computed from the resonance frequencies, structure dimensions and 3-dB bandwidth.

1. 서론

최근들어 통신 시스템 및 고주파 집적 회로등의 발달과 함께 마이크로파 대역에서의 고유전율 및 저

유전 손실을 갖는 세라믹 유전체가 크게 요구 되고 있다. [1] 특히 유전 상수의 범위가 5.0 - 120 이고, 유전 손실이  $5 \times 10^{-4}$  이내의 값을 갖는 유전체들의 최근 개발과 함께 마이크로파에서 유전 특성의 정확한 측정 기술이 요구되고 있다.

그 중에서 많이 이용되어 온 것으로는 공진기 섭동 방법 (cavity perturbation tech.) [2], 광학적 방법 (optical method) [3], 전송 선로에 의한 방법 (transmission line tech.) [4] 및 공진 방법 (resonance method) [5] 등이 있으며, 이들 방법들은 물질의 유전 특성 ( $\epsilon_r, \tan \delta$ ), 공진 주파수 대역의 크기, 측정하고자 하는 시편의 구조 및 사용하는 측정 장비등에 의해 결정되어 진다.

본 논문에서는 Hakki 와 Coleman 에 의해 제시되었고, Courtney 에 의해 수정 보완된 dielectric rod resonator method 의 소개와 함께 여러 종류의 유전 물질의 유전 상수 및 유전 손실을 측정하고자 한다. [6][7]

이 방법은 두 개의 무한 도체판 사이에 원통형

유전체를 끼워 넣어 구성하며, TE<sub>011</sub> mode 를 사용함으로써 유전체와 도체판 사이의 접촉면에서 E<sub>z</sub> 가 0 이 되게 하여 유전체와 도체판 사이의 공기층 효과 (air gap effect) 를 최소화 시킨다.

## II. 이론적 배경

### A. 유전을 계산

유전을 측정을 위해 먼저 물질의 투자율 (perm-eability) 이 자유 공간의 값과 같다고 가정 하고, 두 개의 무한 도체판 사이에 직경 D, 길이가 L 인 원통형 유전체를 고려한다. 만약 유전체가 등방성 (isotropic) 이라 하면, TE<sub>0n1</sub> mode 에서 동작 하는 공진 구조에 대한 특성 방정식은 다음과 같다.

$$\alpha \frac{J_0(\alpha)}{J_1(\alpha)} + \beta \frac{K_0(\beta)}{K_1(\beta)} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

여기에서 J<sub>0</sub>(α) 와 J<sub>1</sub>(α) 는 각각 차수가 0 과 1인 1st kind Bessel 함수이며, K<sub>0</sub>(β) 와 K<sub>1</sub>(β) 는 modified Bessel 함수이다.

α 와 β 는 유전체의 기하학적 구조, 공진 파장 및 유전 성질에 의해 결정되는 특성 방정식의 근으로 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = \frac{\pi \cdot D}{\lambda} \left[ \epsilon_r - (1\lambda / 2L)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots(2)$$

$$\beta = \frac{\pi \cdot D}{\lambda} \left[ (1\lambda / 2L)^2 - 1 \right]^{1/2} \dots\dots\dots(3)$$

여기에서 λ 는 자유 공간에서의 파장, l 은 축 방향으로의 field longitudinal variation number 이다. 그러므로 식.2 와 식.3 을 TE<sub>011</sub> mode 에서의 유전 상수로 표현 하면,

$$\epsilon_r = 1.0 + \left[ \frac{c}{\pi D f_1} \right]^2 (\alpha_1^2 + \beta_1^2) \dots\dots\dots(4)$$

이 되며, TE<sub>011</sub> mode 에서의 공진 주파수와 시편의 구조를 알면 유전 상수의 실수부를 구할 수 있다.

### B. 유전 손실 계산

원통형 유전체의 unloaded Q 값은 1 사이클 당 최대 저장에너지와손실 에너지의 2π 배로 정의된다. Hennings 과 Schnabel 에 의한 유전 손실은 다음과 같은 관계식으로 표현된다. [8]

$$\tan \delta = \frac{A}{Q_u} - B - C - D \dots\dots\dots(5)$$

여기에서 C 는 안테나 (probe)와 시편 사이의 공기 중에서 손실되는 에너지 요소로서 습도가 50% 를 넘지않는 건조한 분위기에서는 무시할 수 있으며, D 는 radiation factor 로서 도체의 반경 r 을 시편의 반경 a 보다 충분히 크게하고 L/a [그림.1] 를 조절함으로써 0 에 가깝게 할 수 있다. 그러므로 식.5 는 다음과 같이 요약될 수 있다.

$$\tan \delta = \frac{A}{Q_u} - B \dots\dots\dots(6)$$

여기서 A 는 mode factor 이고, B 는 금속 도체 면에서의 손실부분으로써 다음과 같이 표현된다.

$$A = 1 + \frac{1}{\epsilon_r} F(\alpha_1) \cdot G(\beta_1) \dots\dots\dots(7)$$

$$B = \frac{R_s}{2\pi f_1^2 \mu_0^2 \epsilon_0 L^2 \epsilon_r} [ 1 + F(\alpha_1) \cdot G(\beta_1) ] \dots\dots\dots(8)$$

where

$$F(\alpha_1) = \frac{J_1^2(\alpha_1)}{J_1^2(\alpha_1) - J_0(\alpha_1) J_2(\alpha_1)} \dots\dots\dots(9)$$

$$G(\beta_1) = \frac{K_0(\beta_1) K_2(\beta_1) - K_1^2(\beta_1)}{K_1^2(\beta_1)} \dots\dots\dots(10)$$

로 표현되며 표면 저항 R<sub>s</sub> 는

$$R = \left[ \frac{\pi f_1 \mu}{\sigma} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(11)$$

로 표현되어 결국 B 는 { 1/2 \* (π f<sub>1</sub> / ω<sub>011</sub>) \* (1/σ<sup>2</sup>) } 에

비례하게 된다.  $TE_{011}$  mode 에서는  $l = 1$  이며,  $\sigma$  는 도체의 전기 전도도로 도체의 고유 특성이므로, 주어진 공진 주파수에서 급속 도체면에서의 손실을 줄이기 위해서는 시편의 길이를 길게하는 것이 좋다.

### III. 측정 방법

본 실험에서의 측정 시편으로는 alumina 와 sapphire, ZST, SZN 그리고 BZN 등 비교적 높은 유전 상수와 낮은 유전 손실을 가지는 물질을 이용하였다.

전체적인 측정 장치의 구성은 그림.1 [8]과 같으며 sample holder 는 그림.2 [7] 와 같이 구성하였다.

그림.1 의 중앙과 하층 도체판은 원통형 유전체 전송선 (dielectric rod transmission line) 을 공진기 구조로 만드는 도체판으로써, 두 도체판의 표면 저항  $R_s$  에 의한 유전 손실을 최소화하기 위해 잘 닦여진 구리판을 사용하였다. 또한 중앙의 도체판은 여러 가지 길이의 시편을 측정 하기 위해 상하로 움직일 수 있도록 제작하였다.

시편의 커플링 (coupling) 은 semi - rigid 동축선인 right - angle E - field probe 를 사용하였으며, 시편은 두 개의 probe 가 균형을 이룰 수 있도록 가능한 중앙에 놓도록 한다.

한편 측정에 사용되는  $TE_{011}$  mode 를 찾기 위해 중앙 도체판을 상하로 이동시켜 가며 network analyzer 화면에서의 주파수 이동을 조사한다. 중앙 도체판을 올리면 TM mode 는 급속히 고주파로 이동을 하고 TE mode 는 정지해 있거나 저주파로 이동을 한다. 그러나 중앙 도체판을 서서히 내리면서 시편에 접근 시키면 TM mode 들은 저주파 대역으로 이동하게 되지만 TE mode 들은 고주파 대역으로 움직인다. 고주파 대역으로 움직이는 TE mode 들 중에서 가장 낮은 파수에서 나타나는 최저차 모드가  $TE_{011}$  mode 로서 이 mode 의 공진 주파수와 대역폭을 구한다.

이 결과와 미리 구한 시편의 크기를 컴퓨터 프로그램에 입력하여 유전 상수 및 유전 손실을 구한다.

### IV. 결과 및 고찰

각 유전체 물질들의 측정 결과는 표.1 에 나타내었다. alumina 시편의 측정은 측정의 재현성을 확인하기 위한 실험으로서 7.5 - 8.3 GHz 범위에서 유전 상수 및 유전 손실이 각각 9.85 와  $7.14 \times 10^{-4}$  을 보였으며, 각각의 오차 범위는  $\pm 0.3\%$  와  $\pm 10\%$  을 보임으로써 매우 정확한 측정 결과를 보였다.

sapphire 시편은 공진 주파수의 변화에 대한 유전 상수 및 유전 손실의 변화를 보기 위한 측정으로서 약 7.75 GHz 에서의 유전 상수 및 유전 손실은 각각 9.42 와  $0.35 \times 10^{-4}$  을 보였다. 또한 공진 주파수의 증가에 따라 그림.3 과 같이 유전 손실은 크게 증가하지만 유전 상수는 거의 변화하지 않음을 확인할 수 있었다.

ZST, SZN, BZN 및 SZN - BZN 고용체의 측정은 고유전율 및 저유전 손실을 갖는 물질들의 측정에 적용하기 위한 가능성을 제시한 것으로 ZST 는 8.71 GHz 에서 유전 상수 및 유전 손실이 각각 38 과  $1.0 \times 10^{-4}$  를 보였다. BZN, SZN 및 BZN - SZN 고용체 시편의 측정은 마이크로파에서 온도 변화에 대한 유전 상수 및 유전 손실의 변화를 알아본 측정이다.

그림.4 는 9.8 - 10.2 GHz 범위에서 유전 상수의 온도 변화 특성을 본 것으로 BZN 은  $-53.3 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  을 보였고, SZN 은  $+79.6 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  를 보였다. 온도에 가장 안정된 특성을 보인 고용체는 0.3 BZN-0.7 SZN 고용체로  $+6.8 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  를 보였다. 그림.5 는 9.8 - 10.2 GHz 범위에서 유전 손실의 온도변화 특성을 보인 것이다. 그림.5 는 온도 변화에 대한 공진 주파수의 변화를 보인 것으로 0.3 BZN-0.7 SZN 고용체가 가장 온도에 안정한 특성을 보임을 알 수 있었다.

이상의 결과는 비록 기존의 보고 내용[9][10] 과

측정 방법에 있어 차이 ( 기존의 측정 방법은 cavity resonance method ) 가 있으나 그 결과가 거의 일치함을 알 수 있었다.

#### V. 결론

위의 실험 결과 dielectric rod resonator method 는 유전 상수의 경우  $\pm 0.3\%$ 의 오차 범위를 가지며, 유전 손실의 경우 약  $\pm 10\%$ 의 오차 범위를 갖는다. 또한  $TE_{011}$  mode 를 사용함으로써 유전체와 금속 도체면 사이의 공기층 효과를 거의 무시 할 수 있었다. 이 방법은 저유전율에서 고유진동 유전체에 이르기까지 그 적용 범위가 매우 넓고, 온도 특성 및 주파수특성을 쉽게 측정 할 수 있는 장점이 있어 유전체의 유전 특성 측정에 매우 유리한 방법임을 확인하였다.

#### 참고 문헌

- 1) J.K. Plourde and C.L. Ren : IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. MTT-29, No. 8, Aug. 1981.
- 2) 김진현 : 대한 전자 공학회 논문지, 제 25 권 제 12 호, 1988 년 12 월.
- 3) T.E. Talpey : IRE Trans. Microwave Tech. vol. MTT-2, Sep. 1954.
- 4) C. Montgomery : M.I.T. Rad. Lab. Ser., McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N.Y., vol. 11, 1947.
- 5) O.V. Karpova : Soviet Phys., vol. 1 Feb. 1959.
- 6) B.W. Hakki and P.D. Coleman : IRE Trans. Microwave Tech., vol. MTT-8, July 1960.
- 7) W.E. Courtney : IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-18, Aug. 1970.
- 8) D. Hennings and P. Schnabel : Philips J. Res. vol. 38, No. 6, 1983.
- 9) M.O. Onoda et al. : Jap. Jour. Applied Phys. vol. 21, No. 12, Dec. 1982.

10) セラミックス工学ハンドブック: 日本セラミックス協会, 技報堂出版.

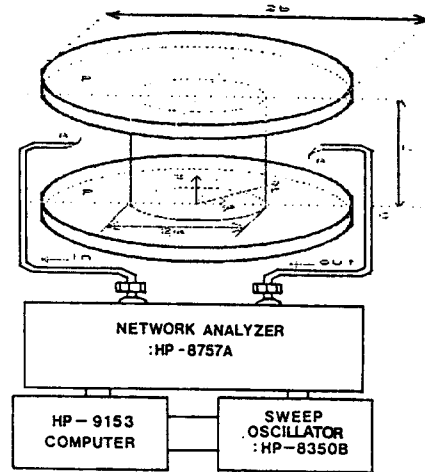


그림.1 마이크로파에서 유전 상수 및 유전 손실을 측정 하기 위한 dielectric rod resonator method.  
: A = coupling antennas, R = rod specimen  
C = semi-rigid cables, P = copper plates.

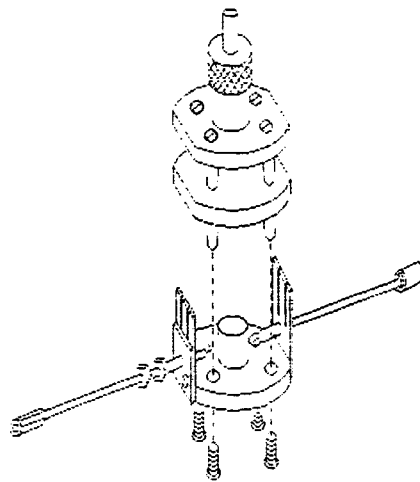


그림.2 The modified Courtney sample holder.

표.1 유전 특성 측정 결과.

Material	Dielect. Const. ( $\epsilon_r$ )	Loss Tangent ( $\times 10^{-4}$ )	Diameter (cm)	Length (cm)	Frequency (GHz)
Alumina	9.859	7.052	1.250	1.252	7.5929
	9.829	7.130	1.257	1.255	7.6325
	9.814	7.358	1.252	1.249	7.1652
Sapphire	9.421	6.350	1.975	0.814	7.7441
	9.415	6.442	1.910	0.814	12.0971
	9.414	6.522	1.100	0.315	10.1467
ZST <sup>o</sup>	38.01	1.007	1.008	0.340	8.7022
BZN <sup>*</sup>	40.5	1.6957	0.748	0.3081	10.0231
SZN <sup>†</sup>	37.2	3.704	0.744	0.307	10.2011
0.3 BZN - 0.7 SZN	41.5	1.448	0.748	0.308	9.8100

<sup>o</sup> ZST :  $(Zn_{0.9}Sb_{0.1})TiO_3$

<sup>\*</sup> BZN :  $Sr(Zn_{0.5}Ba_{0.5})_2O_7$

<sup>†</sup> SZN :  $Sr(Zn_{0.5}Sn_{0.5})_2O_7$

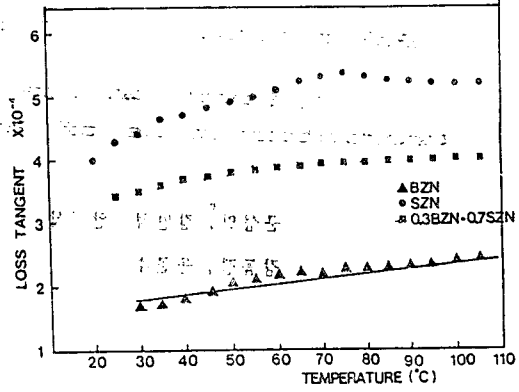


그림.5 9.8 - 10.2 GHz 범위에서 온도 변화에 대한 유전 손실의 변화.

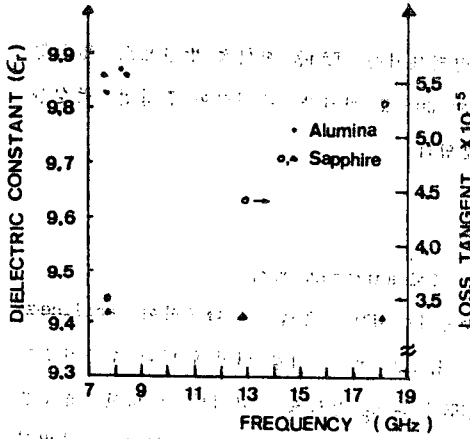


그림.3 공진 주파수 변화에 대한 유전 상수 및 유전 손실의 변화.

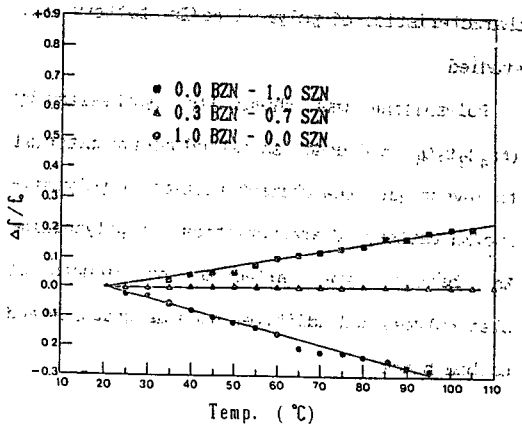


그림.6 9.8 - 10.2 GHz 범위에서 온도 변화에 대한 공진 주파수의 변화.

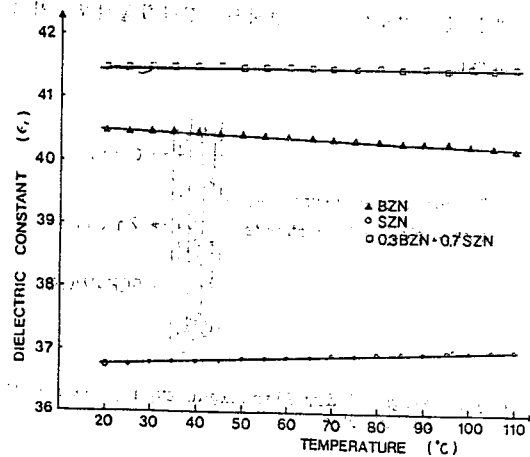


그림.4 9.8 - 10.2 GHz 범위에서 온도 변화에 대한 유전 상수의 변화.