

論文2001-38TC-5-2

## 원통형 공동 공진기의 TE<sub>011</sub> 모드를 이용한 유전체의 전자기적 특성 측정 방법

(A Measurement Method of Dielectric Properties of Dielectric Materials using TE<sub>011</sub> mode of Cylindrical Cavity Resonators)

李元熙\*, 金泰辛\*, 許正\*, 李相永\*\*

(Won-Hui Lee, Tai Shin Kim, Jung Hur, and Sang Young Lee)

### 요약

원통형 공동 공진기를 이용한 유전체의 전자기적 특성들의 측정 방법에 대해 기술한다. 여기에 관련된 유전체의 전자기적 특성들은 비유전율, 손실 탄젠트, Q factor 등이 있다. 동심 유전체 봉이 삽입된 원통형 공동 공진기에서 TE<sub>011</sub> 모드의 사용이 제안되었다. TE<sub>011</sub> 모드는 유전체 봉과 공진기 벽면 틈에 의한 공진주파수 민감도가 가장 덜 민감하게 변화하였다. 동심 유전체 봉이 삽입된 원통형 공동 공진기의 TE<sub>011</sub> 모드를 사용하는 방법과 새롭게 제안된 non-decaying 모드의 정확한 전자계 표현은 유전체의 전자기적 특성들의 정확한 측정을 위해 소개되었다.

### Abstract

This paper describes measurement method of dielectric properties of dielectric materials using cylindrical cavity resonators. Dielectric properties of concern here are relative permittivity, loss-tangent, quality factor and so on. An analysis of TE<sub>011</sub> mode in dielectric properties of concentric dielectric-rod inserted cylindrical cavity resonator is presented. The frequency variation by the air gap at TE<sub>011</sub> mode turns out to be the least sensitive. A technique using a TE<sub>011</sub> mode of concentric dielectric-rod inserted cylindrical cavity resonator and an exact field representation of neo non-decaying mode are introduced for measurement of dielectric properties.

### I. 서론

공진기는 마이크로웨이브 통신 회로 상에서 중요한

\* 正會員, 建國大學校 電子·情報通信工學科

(Dept. of Electronics, Information & Communication Eng., Konkuk University)

\*\* 正會員, 建國大學校 物理學科

(Dept. of Physics, Konkuk University)

※ 이 연구는 과학기술부의 지원에 의해 수행되었습.

接受日字:2001年2月27日, 수정완료일:2001年4月16日

부품들 중 하나이다. 그것은 필터, 오실레이터, 증폭기 등에 사용되어왔다. 특히 온도 안정성을 갖는 유전체 공진기는 높은 Q(quality) factor를 갖는 공진 소자로 사용될 수 있다<sup>[1]</sup>. 유전체가 삽입된 공진기는 속이 빈 공진기에 비해 소형 제작이 가능하고, 높은 Q factor를 갖는다. 유전체 공진기를 이용한 많은 응용들 중 하나는 유전체의 전자기적 특성들을 측정할 수 있다는 것이다. 측정할 수 있는 유전체의 전자기적 특성들은 비유전율과 손실 탄젠트( $\tan \delta$ )로써, 유전체의 실수 성분과 허수 성분의 측정이다. 원통형 공동 공진기에 유전체 봉을 넣어 유전체 봉을 정확히 공진기 중심에 맞춘

후 유전체의 전자기적 특성을 측정한다. 이러한 측정을 하기 위한 공진기를 설계하기 위해서는 공진기 내부의 정확한 전자계 표현이 선행되어야 한다. K. A. Zaki는 유전체가 삽입된 원통형 도파관을 해석하면서 반지름 방향의 전자계 변화가 유전체 바깥쪽에서 소멸모드(decaying mode)와 non-decaying 모드의 두 가지 경우로 존재하는 것이 가능하다고 하였다<sup>[2]</sup>. 소멸모드는 대부분의 전자계가 유전율이 높은 유전체 안에 집중되기 때문에 유전체 바깥쪽에서는 아주 급격한 감쇠를 하면서 거의 소멸하는 것으로 가정한다. 이 때 유전체 바깥쪽의 전자계는 수정된 1종 Bessel 함수와 수정된 2종 Bessel 함수로 표현된다. 이에 반해 non-decaying 모드는 유전체 바깥쪽에서 반지름 방향의 전자계 변화가 진행(travelling)하면서 정재파(standing wave)의 형태를 갖는 것으로 가정하며 전자계 표현은 1종 Bessel 함수와 2종 Bessel 함수가 쓰인다. 그러나, 유전체가 삽입된 원통형 공동 공진기의 전자계를 해석하면서 K. A. Zaki 및 대부분의 논문 저자들은 유전체 외부 영역을 소멸모드로 가정하고 전자계 표현을 구하였다. 이러한 논문들은 유전체의 비유전율이 상당히 큰 경우에만 관심을 가지고 연구되었고, 공진주파수를 계산하는데 있어서도 상당한 오차를 보인다<sup>[2]</sup>. 소멸 모드의 전자계 표현은 유전율이 상당히 큰 경우만을 고려한 근사적인 식인 것을 가정할 수 있다.

본 논문은 공진기의 정확한 전자계 표현을 구하기 위해 유전체 바깥쪽에 반지름 방향의 전자계 변화가 진행하면서 정재파의 형태를 갖는 것을 가정하는 non-decaying 모드를 이용한다. 새롭게 제안된 non-decaying 모드의 정확한 전자계 식을 바탕으로 정확한 유전체의 전자기적 특성을 측정한다. 또한 유전체의 전자기적 특성을 측정하기 위해 공동 공진기에 유전체 재료를 가공하여 넣게 되는데, 이 때 가공오차에 의해 발생할 수 있는 틈에 대해 안정된 모드인 TE<sub>011</sub> 모드를 이용<sup>[3]</sup>하여 측정 오차를 줄였다.

## II. 유전체의 비유전율 측정

### 1. 유전체로 가득 채워진 경우의 비유전율

그림 1과 같은 원통형 공동 공진기 내부에 유전체를 가득 채워서 공진주파수를 측정함으로써 정확한 유전체의 비유전율을 측정할 수 있다. 원통형 공동 공진기

속에 유전체를 가득 채워서 비유전율을 측정하는 방법은 원통형 공동 공진기를 비운 채로 공진주파수( $f_a$ )를 측정하고, 원통형 공동 공진기에 유전체 봉을 가득 채워서 공진주파수( $f_d$ )를 측정하여, 비유전율에 대한 측정치를 다음 식에 의해 구한다.

$$\epsilon_r = \left(\frac{f_a}{f_d}\right)^2$$

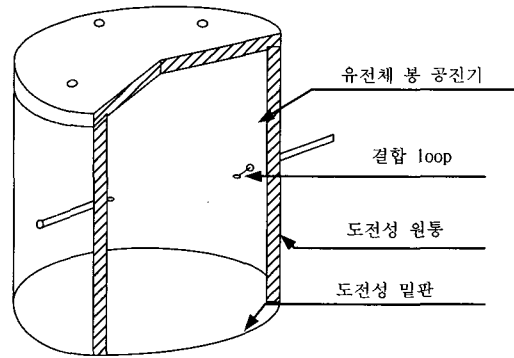


그림 1. 유전체가 삽입된 공진기의 구조

Fig. 1. Structure of dielectric resonator placed in a cylindrical conductor cavity.

### 2. 유전체 봉을 삽입한 경우의 비유전율

유전체를 원통형 공진기 내부에 가득 채워서 비유전율을 구하는 방법은 틈에 의한 손실 부분이 없기 때문에 정확한 측정이 가능하지만, 측정할 때마다 유전체를 가공해야 하는 단점이 있다. 따라서, 본 절은 원통형 공진기 윗면이 자유롭게 조정 가능하도록 제작한 공진기를 이용하여, 유전체를 가득 채우는 방법이 측정할 때마다 유전체를 가공해야 하는 단점을 보완하였다. 그림 2는 윗면 조절이 가능한 원통형 공동 공진기의 단면을 나타내었다. 유전체 봉을 삽입한 경우의 비유전율 측정은 Mathematica의 ContourPlot 기능을 이용하여 초월함수의 근을 구함으로써 구한다. 유전체 봉이 삽입된 원통형 공동 공진기의 경우, non-decaying 모드의 정확한 전자계 식에 반지름 방향 경계 면과 축 방향 경계 면에 대하여 경계 조건을 적용하면 TE<sub>011</sub> 모드에서 다음과 같은 초월 방정식을 얻을 수 있다.

$$F(f, \epsilon_r) = \frac{1}{k_{\rho 1}} \frac{J_0(k_{\rho 1} a)}{J_0(k_{\rho 1} a)} - \frac{1}{k_{\rho 2}} \left( \frac{J_0(k_{\rho 2} a) N_0(k_{\rho 2} d) - N_0(k_{\rho 2} a) J_0(k_{\rho 2} d)}{J_0(k_{\rho 2} a) N_0(k_{\rho 2} d) - N_0(k_{\rho 2} a) J_0(k_{\rho 2} d)} \right)$$

2개의 변수를 갖는 초월방정식은 해석적 방법으로는

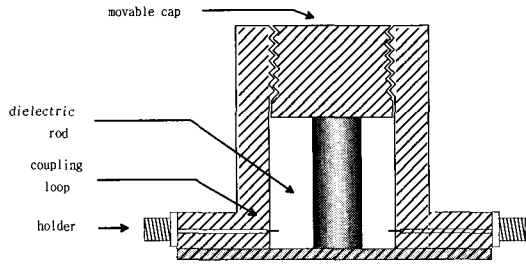


그림 2. 윗면 조정이 가능한 원통형 공진기의 단면도  
Fig. 2. The cross section of the cylindrical cavity with movable cap.

풀기가 불가능하므로, 많은 사람들이 수치 해석적인 방법을 사용하였다<sup>[4-6]</sup>. 수치 해석적인 방법은 근을 찾는 것이 어려울 뿐만 아니라 많은 시간과 노력을 요구한다. 그러므로, 이러한 초월방정식을 풀기 위하여 Mathematica의 contour 그래프를 이용하였다. Contour 그래프를 이용하기 위하여 초월방정식을 초월함수의 형태로 변환하였다. 정리된 초월함수는 공진주파수  $f$  와 유전체의 비유전율을 변수로 가지므로, 영역 1과 영역 2의 경계면에서 나오는 특성방정식을  $F(f, \epsilon_r)$ 로 정리하고, 이러한 함수들의 값이 0이 되는 점을 contour 그래프로 그릴 수 있다. 여기에서 공진주파수와 공진기의 크기는 측정된 값을 대입하면, 정확한 비유전율 값은 contour 그래프 상에서 찾을 수 있다.

### III. 도체 손실만을 고려한 quality factor, $Q_c$

도체 손실만을 고려한 Q factor를 계산하기 위해  $TE_{011}$  모드를 이용하였다. 측정을 위해 원통형 공동 공진기 내부에 유전체를 가공하여 채우게 되는데, 가공오차로 인해 미소 틈이 생기게 된다. 미소 틈에 대한 공진주파수 민감도가  $TE_{011}$  모드가 가장 작았기 때문<sup>[3]</sup>에, 측정의 정확성을 위해 이 모드를 선택하였다. Non-decaying 모드를 이용한  $TE_{011}$  모드에서의 전자계 표현을 나타내 보면 다음과 같다.

영역 1(유전체 영역)

$$H_{\phi 1} = \frac{1}{j\omega\mu_0} Ak_{\rho 1} k_{z1} J_0(k_{\rho 1} \rho) \cos k_{z1} z$$

$$E_{\phi 1} = Ak_{\rho 1} J_0(k_{\rho 1} \rho) \sin k_{z1} z$$

$$H_{z1} = \frac{1}{j\omega\mu_0} Ak_{\rho 1}^2 J_0(k_{\rho 1} \rho) \sin k_{z1} z$$

영역 2(유전체 외부, 공기 영역)

$$H_{\phi 2} = \frac{1}{j\omega\mu_0} Bk_{\rho 2} k_{z1} (J_0(k_{\rho 2} \rho) N_0'(k_{\rho 2} d) - N_0'(k_{\rho 2} \rho) J_0(k_{\rho 2} d)) \cos k_{z1} z$$

$$E_{\phi 2} = -Bk_{\rho 2} (J_0'(k_{\rho 2} \rho) N_0(k_{\rho 2} d) - N_0(k_{\rho 2} \rho) J_0'(k_{\rho 2} d)) \sin k_{z1} z$$

$$H_{z2} = \frac{1}{j\omega\mu_0} Bk_{\rho 2}^2 (J_0(k_{\rho 2} \rho) N_0'(k_{\rho 2} d) - N_0'(k_{\rho 2} \rho) J_0(k_{\rho 2} d)) \sin k_{z1} z$$

$\rho = a$  (유전체가 가득 찬 경우)에서 자계의 접선성분이 연속이라는 경계조건과  $A=1$ 이라는 가정을 대입하면  $B$ 는 다음과 같다.

$$B = \left( \frac{k_{\rho 1}}{k_{\rho 2}} \right)^2 \frac{J_0(k_{\rho 1} a)}{J_0(k_{\rho 2} a) N_0'(k_{\rho 2} d) - N_0(k_{\rho 2} a) J_0'(k_{\rho 2} d)}$$

위의 전자계 식을 이용하여  $Q_c$ 를 계산하면, 축적되는 총에너지

$$W = \frac{\epsilon}{2} \int_{z=0}^l \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\rho=0}^a (|E_{\phi 1}|^2) \rho d\rho d\phi dz + \frac{\epsilon}{2} \int_{z=0}^l \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\rho=a}^d (|E_{\phi 2}|^2) \rho d\rho d\phi dz$$

이고, 도체벽에서의 전력 손실  $P_c = \frac{R_s}{2} \int_s |H_{tan}|^2 ds$  이다.

$Q_c$ 의 계산은 위  $W$ 와  $P_c$ 의 계산으로부터 구할 수 있다. 즉, 다음과 같은 식에 의해  $Q_c$ 를 구할 수 있다<sup>[7,8]</sup>.

$$Q_c = \frac{\omega_0 W}{P_c}$$

여기서,  $\omega_0$ 는 공진 각주파수이고,  $P_c$ 는 주변에 있는 금속의 소모 전력이며,  $W$ 는 저장된 에너지이다.

### IV. 손실 탄젠트( $\tan \delta$ )

손실 탄젠트를 계산하기 위해서는 Q factor에 대한 고찰이 필수적이다. Loaded quality factor인  $Q_L$ 은 3 dB 방법으로 측정할 수 있다. 즉,  $Q_L = f_0/\Delta f$ 로 측정하고, 무부하시의 quality factor인  $Q_U = Q_L(1 + \beta_1 + \beta_2)$ 의 관계를 통해서 측정할 수 있다.  $\beta_1$ 과  $\beta_2$ 는 입출력 결합상수(input/output coupling coefficients)이다. 입출

력 결합상수  $\beta_1$ 과  $\beta_2$ 는 다음 식으로부터 구한다.

$$\beta_1 = \frac{1 - S_{11}(f_0)}{S_{11}(f_0) + S_{22}(f_0)} \quad \beta_2 = \frac{1 - S_{22}(f_0)}{S_{11}(f_0) + S_{22}(f_0)}$$

위에서 구한 Qu와 III장의 Qc의 정보로부터 손실 탄젠트를 구할 수 있다.

손실 탄젠트는 식  $(1/Qu) = (1/Qc) + k \cdot \tan \delta$  와  $k = W_1/W_2$ 라는 관계에서 구해 질 수 있다. 여기에서 W는 축적되는 총에너지로, W의 값은 W<sub>1</sub>(유전체 영역에 축적되는 에너지)과 W<sub>2</sub>(공기 영역에 축적되는 에너지)의 합이다.

### V. 측정 장치 및 측정 방법

실험에 사용된 주요 장치로는 측정장비인 HP8510C 네트워크 분석기와 유전체가 삽입된 원통형 공동 공진기 등이 있다. 그림 3은 실험 장치의 구성을 나타내었다.

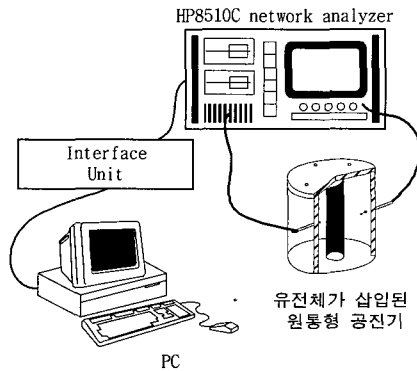


그림 3. 실험 장치의 구성  
Fig. 3. Configuration of experimental construction.

비유전율 및 손실 탄젠트를 측정하기 위해 원통형 공동 공진기를 제작하고, 유전체 봉을 가공하여 삽입한다. 이 때 유전체는 비유전율이 다른 여러 재료를 측정할 수 있다.

본 실험에서는 기존 방법들<sup>[9,10]</sup>이 유전율이 작은 경우에는 측정이 부정확하거나, 불가능했기 때문에 비유전율이 작은 경우만을 확인해 보았다. 따라서, 비유전율이 비교적 작고 가공하기 쉬운 테플론을 가공하여 실험하였다. 공진기의 형태는 윗면이 고정된 원통형 공동 공진기와 윗면이 조절 가능한 공진기의 두 종류를 이용하였다.

비유전율의 측정은 원통형 공진기 안에 유전체 봉을 삽입한 후 HP8510C 네트워크 분석기로 공진주파수를 측정하고, 그것을 non-decaying 모드의 특성방정식에 의해 구해진 contour graph에 비교해 봄으로써 측정할 수 있다.

손실 탄젠트의 측정도 공진주파수 측정에 의해 Q factor를 측정하고, IV장의 손실 탄젠트 유도 식에 의해 측정한다.

### VI. 측정 결과 및 논의

원통형 공동 공진기를 이용하여 유전체의 비유전율을 측정하기 위해서 7개의 유전체 봉 sample을 가공하고 제작하여 원통형 공동 공진기에 삽입한 후 HP8510C 네트워크 분석기에 의해 공진주파수를 측정하였다. 중심 유전체 봉이 삽입된 원통형 공진기의 구조는 7.92 mm(반지름)×15 mm(높이) 크기에 재료는 무산소동을 이용하였다. 틸에 대해 가장 안정된 모드인 TE<sub>011</sub> 모드에 한정하여 공진주파수를 측정하면 표 1과 같다.

표 1. TE<sub>011</sub> 모드의 측정에 의한 공진주파수  
Table 1. The measured resonant frequencies of TE<sub>011</sub> mode.

유전체 반지름[mm]	공진주파수 측정값(GHz)
0	25.150
2	24.475
3	22.675
4	20.625
5	19.025
6	18.000
7	17.550
7.92	17.488

유전체를 원통형 공진기에 가득 채워서 비유전율을 측정하면, 빈 원통형 공진기에서는 25.150 GHz의 공진주파수를 측정하였고, 유전체 봉으로 가득 채웠을 경우에는 17.488 GHz의 공진주파수를 측정하였다. 테플론의 비유전율을 공진주파수 측정값에 의해 계산하면, 2.068의 비유전율 값을 갖는다.

윗면이 조절 가능한 원통형 공동 공진기에 유전체 봉을 삽입하여 비유전율을 측정하기 위하여 contour

graph를 이용한다. 그림 4는 반지름 6 mm, 높이 15 mm의 테플론 봉의 비유전율을 측정한 것이다. 측정 결과 비유전율이 2.0692가 측정된 것을 볼 수 있다.

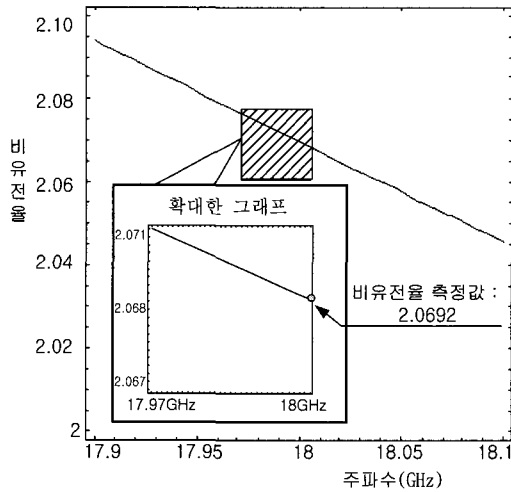


그림 4. contour graph를 이용한 비유전율 측정  
Fig. 4. The measurement of relative permittivity using contour graph.

표 2는 그림 4와 같은 방법으로 반지름이 2 mm~7 mm, 높이가 모두 15 mm인 유전체 봉에 대해 비유전율을 측정된 결과이다. 측정 결과를 보면 비유전율이 2.063~2.109까지 측정됨을 볼 수 있다. 완벽히 채워서 구한 2.068과 비교해 볼 때 유전체 봉의 반지름이 작을 수록 오차가 많이 발생함을 볼 수 있다. 그렇지만, 유전체 봉이 공진기 반지름의 1/2 정도에 차였을 때는 비교적 정확한 비유전율 측정이 가능함을 볼 수 있고, 유전체 봉이 아주 작은 경우에도 약 1.95%의 오차가 발생하여 근접한 비유전율 측정이 가능하다. D. K. Cheng은 테플론의 비유전율 값을 2.1이라고 소개하였고, D. M. Pozar는 테플론의 비유전율 값을 2.08이라고 소개<sup>[7]</sup>하였다. 테플론과 같이 작은 비유전율 값을 갖는 물질은 부정확한 측정값을 갖거나, 측정이 불가능하다. 정확도를 측정하는 것은 정확한 테플론의 비유전율 값을 알지 못하기 때문에 불가능하다. 미소 틸에서 공진주파수 민감도가 가장 덜 민감한 모드를 선택하였다. 틸에서 발생할 수 있는 가공오차를 줄여, 측정의 정확도를 향상시키고자 하였다. 실험에서 측정된 비유전율 값은 정확한 테플론의 비유전율 측정값이라 사료된다.

유전체의 손실 탄젠트의 측정은 도체 손실만을 고려한 quality factor인  $Q_c$ 의 정확한 계산과 unloaded

quality factor인  $Q_u$ 의 측정에 의해 가능하다. Loaded quality factor인  $Q_L$ 은 유도 식에 의해 4197.45가 측정되었다. 그리고, 무부하시 quality factor는 4701.75가 측정되었다. 도체 손실만을 고려한 quality factor,  $Q_c$ 는 III장의 식을 이용하여 계산하였다.

표 2. 비유전율 측정 결과  
Table 2. A result of measured relative permittivity.

유전체 봉의 반지름[mm]	비유전율 측정 결과	완벽히 채운 경우와의 오차
2	2.1092	1.953%
3	2.0980	1.429%
4	2.0719	0.188%
5	2.0630	0.242%
6	2.0692	0.058%
7	2.0723	0.207%

$\tan \delta$ 는 식  $(1/Q_u) = (1/Q_c) + k \cdot \tan \delta$ 와  $k = W_1 / (W_1 + W_2)$ 라는 관계에서 0.00018이 측정되었다. D. M. Pozar는 테플론의  $\tan \delta$ 를 0.0004라고 소개<sup>[7]</sup>하였는데, 테플론과 같은 작은 비유전율 값을 갖는 물질은 비유전율과 마찬가지로  $\tan \delta$  또한 부정확한 측정값을 갖거나, 측정이 불가능하다. 0.00018의 테플론의  $\tan \delta$  값은 정확한 측정값이라 생각된다.

### VII. 결 론

본 논문에서는 원통형 공동 공진기를 이용하여 유전체의 전자기적 특성을 측정하였다. 측정된 유전체의 전자기적 특성들은 비유전율과 손실 탄젠트로써, 유전체의 실수 성분과 허수 성분이다.

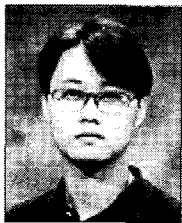
유전체의 전자기적 특성을 정확히 측정하기 위해 non-decaying 모드로 가정한 전자계 식과 틸에 대한 공진주파수 민감도가 가장 작은  $TE_{011}$  모드를 이용하였다. 비유전율이 작은 유전체에 대해서는 전자기적 특성을 정확히 측정하지 못했던 기존 방법들에 대해 본 논문은 비유전율이 작은 유전체까지 정확히 전자기적 특성들을 측정하였다. 윗면 조정이 가능한 원통형 공동 공진기를 이용하여 어떠한 크기의 유전체 봉도 측정을 용이하게 하였다. 실제로 contour graph를 이용하여 반지름이 2 mm~7 mm, 높이가 모두 15 mm인 유전체

봉에 대해 비유전율을 측정하였다. 측정 결과 비유전율이 2.063~2.109 까지 측정됨을 볼 수 있었다. 완벽히 채워서 구한 2.068과 비교해 볼 때 유전체 봉의 반지름이 작을수록 오차가 많이 발생함을 볼 수 있다. 그렇지만, 유전체 봉의 반지름이 공진기 반지름의 1/2 정도에 차였을 때는 비교적 정확한 비유전율 측정이 가능함을 볼 수 있고, 유전체 봉의 반지름이 아주 작은 경우에도 약 1.95%의 오차가 발생하여 근접한 비유전율 측정이 가능하다. 또한, 테플론의  $\tan \delta$ 는 0.00018이 측정되었다.

### 참 고 문 헌

- [1] D. Kajfez and P. Guillon, *Dielectric Resonators*, Artech House, 1986.
- [2] K. A. Zaki and A. E. Atia, "Modes in Dielectric Loaded Waveguide and Resonators", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-31, No. 12, December 1983.
- [3] 이원희, 강순국, 최홍주, 허 정, 이상영, "원통형 공진기를 이용한 유전율 측정방법에서 측정모드 선택에 관한 연구", 한국전자과학기술논문집, 제10권, 제2호, 1999년 4월
- [4] S. B. Cohn and K. C. Kelly, "Microwave Measurement of High-Dielectric-Constant Materials", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-14, No. 9, pp. 406~410, September, 1966.
- [5] P. Guillon and Y. Garault, "Accurate Resonant Frequencies of Dielectric Resonators", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-25, No. 11, pp. 916~922, November, 1977.
- [6] Z. Y. Shen, C. Wilker, P. Pang, etc., "High Tc Superconductor-Sapphire Microwave Resonator with Extremely High Q-Values up to 90K" *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Vol. 40, No. 12, December 1991.
- [7] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison Wesley, 1990.
- [8] M. M. Taheri and D. M. Syahkal, "Computation of Q-factors of dielectric-loaded cylindrical cavity resonators", *IEE Proceedings*, Vol. 137, Pt. H, No. 6, pp. 372~376, December, 1990.
- [9] Y. Kobayashi and M. Katoh, "Microwave Measurement of Dielectric Properties of Low-Loss Materials by the Dielectric Rod Resonator Method", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-33, No. 7, pp. 586~592, July, 1985.
- [10] B. W. Hakki and P. D. Coleman, "A Dielectric Resonator Method of Measuring Inductive Capacities in the Millimeter Range", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-8, pp. 402~410, July, 1960.

### 저 자 소 개



李元熙(正會員)

1998년 2월 영동대학교 전자공학과(공학사), 2000년 2월 건국대학교 대학원 전자·정보통신공학과(공학석사), 2000년~현재 : 건국대학교 대학원 전자·정보통신공학과 박사과정, <주 관심분야 : 안테나 및 전

파전파, 마이크로파 회로 설계, 마이크로파 소자 등>



金泰辛(正會員)

2000년 8월 건국대학교 전자·정보통신공학과(공학사), 2000년 8월~현재 : 건국대학교 전자·정보통신공학과 석사과정, <주 관심분야 : 안테나, 마이크로파 회로 설계, 마이크로파 소자 등>



許 正(正會員)

1981년 서울대학교 전자공학과(공학사), 1983년 서울대학교 대학원 전자공학과(공학석사), 1991년 서울대학교 대학원 전자공학과(공학박사), 현재 : 건국대학교 전자·정보통신공학과 교수, <주 관심분야: 안테나 및

전파전파, 마이크로파 회로설계, 마이크로파 소자 등>



李 相 永(正會員)

1979년 2월 서울대학교 물리학과(이학사), 1984년 12월 미국 오하이오 주립대학교 물리학과 M.S., 1987년 12월 미국 오하이오 주립대학교 Ph.D(실험고체물리학 전공), 1992년 5월 한국과학기술연구원 물리전자부

선임연구원, 현재 : 건국대학교 물리학과 부교수 및 한국초전도학회 편집이사, <주 관심분야 : 고온초전도체의 마이크로파소자응용 및 특성평가, 고온초전도체-유전체 접합을 이용한 고주파소자 응용, 고온 초전도체 박막 및 고주파소자의 제작>