

원통형 공진기를 이용한 유전율 측정방법에서 측정모드 선택에 관한 연구

A Study on the Selection of Measuring Mode in the Permittivity Measurement Using a Circular Cylindrical Cavity

이원희* · 강순국* · 최홍주* · 허 정* · 이상영**

Won-Hui Lee* · Soon-Kuk Kang* · Hong-Ju Choi* · Jung Hur* · Sang Young Lee**

요 약

비유전율 측정을 정확하게 할 수 있는 모드 선택 방법에 대하여 기술한다. 비유전율 측정을 위하여 유전체를 가득 채운 원통형 공진기를 이용하였다. 원통형 공진기에 유전체를 가득 채울 때 유전체의 가공오차로 인하여 틈이 발생한다. 틈에 의한 공진주파수 변화가 덜 민감한 모드를 이용하여 비유전율을 계산하면 정확히 비유전율을 구할 수 있다. 틈에 의한 공진주파수 변화를 확인하여 본 결과 TE₀₁₁모드는 높이 방향과 반지름 방향 틈에서 평균 0.009%의 공진주파수 편차를 보였다. TE₀₁₁모드는 틈에 의한 공진주파수 민감도가 기본 모드 중 가장 덜 민감하였다. TE₀₁₁모드를 이용하여 측정하면 보다 정확히 비유전율을 구할 수 있다.

Abstract

This paper describes resonant mode selection with which the relative permittivity can be measured exactly. To measure the relative permittivity, a circular cylindrical cavity filled with dielectric material is used. When the circular cylindrical cavity is filled with the dielectric material, the air gap occurs on account of machining error. Accurate relative permittivity can be obtained by using less sensitive mode in resonant frequency variation by the air gap. As a result, Average 0.009% resonant frequency variation in the vertical and the radial direction appears at TE₀₁₁ mode. It is interesting that the frequency variation by the air gap at TE₀₁₁ mode turns out to be the least sensitive.

I. 서 론

유전체의 비유전율을 측정하는 방법에는 여러 가지가 있다. 방법들 중 하나는 유전체의 공진주파

수를 측정하여 비유전율을 계산하는 것이다. 지금까지 사용된 방법들은 정확히 공진주파수를 예측하기 어려웠기 때문에 비유전율이 작은 유전체에 대해서는 정확한 측정이 힘들었다. C. Shibata는 여러 비유전율 측정방법과 그 하나의 방법으로 섭

「이 연구는 정보통신연구관리단의 대학기초연구지원 및 과학기술부의 지원에 의해 수행되었음」

*건국대학교 전자·정보통신공학과(Dept. of Electronics, Information & Communication Eng., Konkuk University)

**건국대학교 물리학과(Dept. of Physics, Konkuk University)

· 논문 번호 : 981028-110

· 수정완료일자 : 1999년 2월 1일

동법을 소개하였고, W. E. Courtney는 Courtney holder를 구성하여 비유전율을 측정하였다^{[1],[2]}. 구조는 공진기 중심 축을 일치시켜서 유전체봉을 삽입하였으며, 유전체는 공진기 내부에 가득 채워지지 않은 상태이다^{[3]~[6]}.

이 방법들은 비유전율이 큰 값에 대해서는 비교적 정확한 비유전율 측정이 가능하나, 테플론(teflon: $\epsilon_r = 2.05$)과 같이 비유전율이 작은 값에 대해서는 부정확한 측정값을 갖거나 측정이 불가능하다^[2]. 유전체가 공진기 벽으로부터 떨어져 있기 때문에 그로 인한 측정오차도 발생한다.

본 논문에서는 원통형 공진기 내부에 유전체를 가득 채워서 공진주파수를 측정함으로써 정확한 유전체의 비유전율을 측정하고자 한다. 원통형 공진기 내부를 유전체로 가득 채운 경우에 공진주파수를 예측하는 것과 비유전율을 측정하는 것은 쉬우나, 유전체봉을 공진기의 크기에 정확히 맞추는 것이 힘들기 때문에 유전체와 공진기 벽 사이에 틈이 생기게 된다. 이 틈에 의한 공진주파수의 변화가 민감하다면 비유전율의 계산에도 영향을 끼치게 된다. 틈에 의한 영향을 알아보기 위해 높이 방향과 반지름 방향에 아주 작은 틈이 발생했다고 가정하고, 모드별 공진주파수 값을 확인하였다. 모드별 공진주파수 변화를 확인하여 어느 모드가 비유전율을 측정하기에 가장 안정된 모드인가를 결정하였다.

II. 비유전율의 측정방법

비유전율을 측정하는데 있어서 그림 1과 그림 2와 같은 구조의 원통형 공진기에 의해, 기본 모드인 TM_{010} 모드, TE_{111} 모드, TE_{011} 모드를 선택하여 비교하여 보았다. 그림 1과 그림 2의 원통형 공진기 내부의 크기는 반지름은 7.92 mm이고, 높이는 15 mm이다. 유전체의 크기도 원통형 공진기 내부의 크기와 마찬가지로 반지름은 7.92 mm, 높이는 15 mm로 내부를 유전체로 가득 채운 상태이다. 그

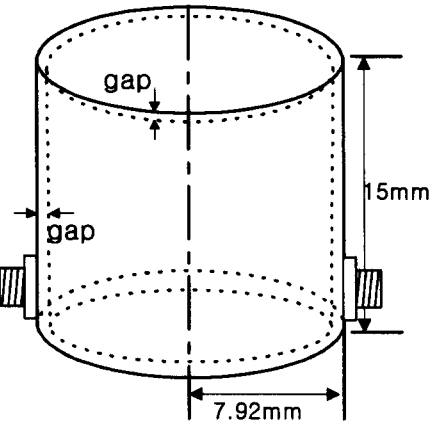


그림 1. 높이, 반지름 방향의 틈을 고려한 유전체가 가득 채워진 원통형 공진기

Fig. 1. Cylindrical resonator filled with dielectric, considered the air gap of the vertical and the radial direction.

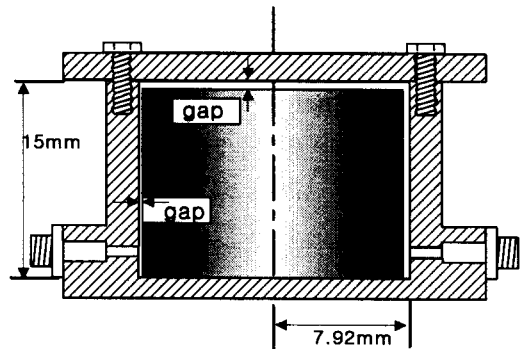


그림 2. 실험에 이용한 원통형 공진기의 단면도

Fig. 2. The cross sectional view of the circular cylindrical cavity used for the measurement.

러나, 제안된 구조는 높이, 반지름 방향의 아주 작은 틈이 존재한다.

그림 1과 같은 구조에서 비유전율을 측정하는 방법은 원통형 공진기를 비운 채로 공진주파수(f_0)를 측정하고, 원통형 공진기를 반지름 7.92 mm인 유전체봉으로 채운 후 공진주파수(f_1)를 측정하여 공진주파수를 정확히 구한 다음 식(1)에 의해 비

유전율을 계산한다^[7~12].

$$\frac{f_a}{\sqrt{\epsilon_r}} = f_d \quad (1)$$

f_a : 공기로 채운 원통형 공진기의 공진주파수

f_d : 반지름 7.92 mm인 유전체로 채운 원통형 공진기의 공진주파수

ϵ_r : 유전체의 비유전율

Ⅲ. 반지름 방향의 틈에 의한 영향

유전체로 가득 채운 원통형 공진기에서 가공오차를 고려하여 반지름 방향의 틈이 생겼다고 가정하였다. 반지름 방향의 틈에 의한 영향에 대해 어느 모드에서 공진주파수의 변화가 덜 민감한가를 알아보았다. 테플론(teflon)봉의 비유전율을 이용하여 기본모드인 TM_{010} 모드, TE_{111} 모드, TE_{011} 모드에 대해서 공진주파수 그래프를 그린 후 모드별 공진주파수 변화를 확인해 보았다. 반지름 방향의 틈에 의한 공진주파수 변화의 정도를 고려해서 반지름이 7.8 mm인 경우에서부터 7.92 mm인 공진주파수 변화구간을 확대해 보면, 그림 4, 그림 5, 그림 6과

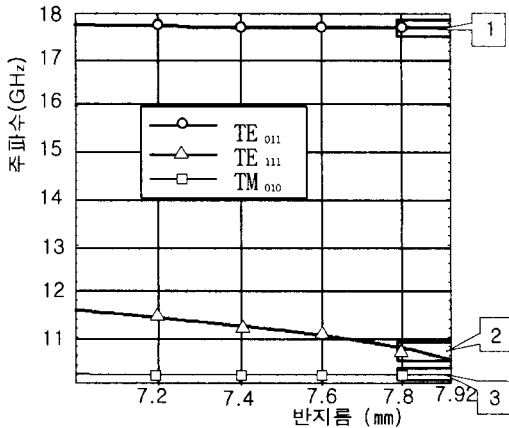


그림 3. 반지름 방향 틈에 의한 공진주파수의 변화
Fig. 3. The resonant frequency variation for the air gap in the radial direction.

같다. 확대해 본 결과 TE_{111} 모드보다는 TM_{010} 모드, TE_{011} 모드에서 반지름의 변화에 따른 공진주파수의 변화가 작게 나타남을 볼 수 있었다.

공진주파수 그래프로부터 이들의 실제 값을 구해보면, 표 1과 같다. 아래 결과에서 보면 TM_{010} 모드의 경우 완벽하게 유전체봉이 채워진 반지름

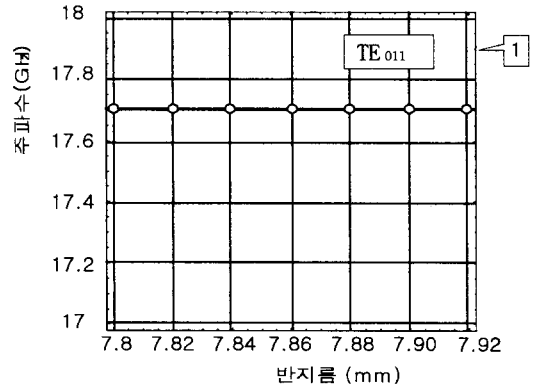


그림 4. 반지름 방향 틈에 의한 영향을 알아보기 위한 TE_{011} 모드의 구간 확대
Fig. 4. Magnification of TE_{011} mode to see the effect of the air gap in the radial direction.

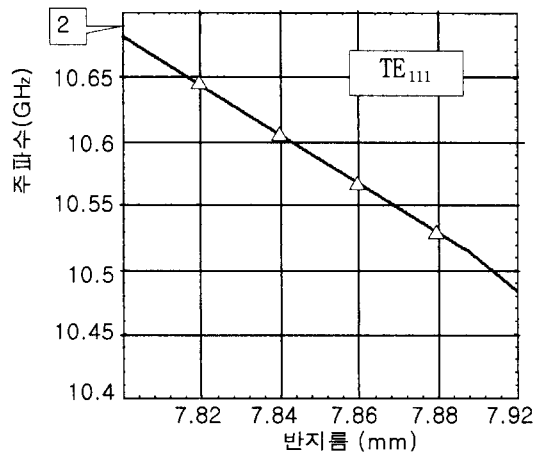


그림 5. 반지름 방향 틈에 의한 영향을 알아보기 위한 TE_{111} 모드의 구간 확대
Fig. 5. Magnification of TE_{111} mode to see the effect of the air gap in the radial direction.

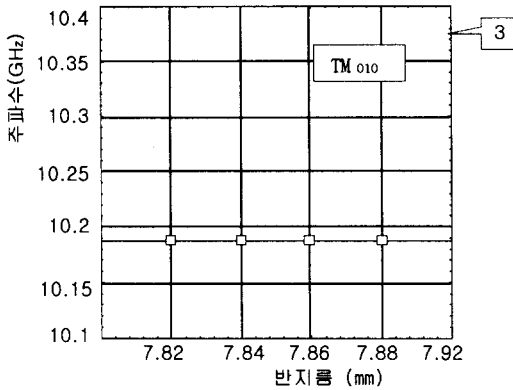


그림 6. 반지름 방향 틈에 의한 영향을 알아보기 위한 TM_{010} 모드의 구간 확대
 Fig. 6. Magnification of TM_{010} mode to see the effect of the air gap in the radial direction.

7.92 mm인 원통형 공진기의 공진주파수에 대해, 반지름 7.8 mm인 유전체봉을 공진기 중심 축에 일치시켜 채운 원통형 공진기의 공진주파수는 편차가 0.0029 % 차이로 변화가 거의 없다. 반면, TE_{111} 모드의 경우는 반지름 7.92 mm인 유전체봉으로 가득 채운 공진주파수에 대해 반지름 7.8 mm인 유전체봉으로 채운 경우는 공진주파수 편차가 1.918 %

로 차이가 많이 난다. TE_{011} 모드의 경우도 0.0113 %의 공진주파수 편차를 가져 TM_{010} 모드와 마찬가지로 공진주파수의 변화가 거의 없음을 볼 수 있다.

TE_{111} 모드는 반지름 틈에 대해 공진주파수의 변화가 심하다. 따라서, 반지름 방향 틈에 대해서는 TM_{010} 모드, TE_{011} 모드에서처럼 공진주파수의 변화가 작은 경우를 이용하여야 틈에 의한 비유전을 측정 오차를 줄일 수 있다.

식(1)을 보면, 비유전율값은 공진주파수와 직접적인 관련이 있음을 알 수 있다. 공진기 틈에 대한 공진주파수 편차가 큰 모드를 이용하면, 표 1에서처럼 공진기 끝부분에서 비유전율을 측정했을 때 변동이 심한 측정값을 갖는다. 공진기 끝부분에서 공진주파수의 변화가 심하다는 것은 틈에 대한 영향을 많이 받고, 그에 따른 비유전율 오차도 크게 발생한다는 의미이다. 따라서 반지름 방향 틈에서는 공진주파수 편차가 작은 TM_{010} 모드, TE_{011} 모드를 이용하여야 정확한 비유전율을 측정할 수 있다. 실제로 공진주파수 편차에 따른 비유전율을 측정해 보니, 공진주파수의 편차가 작은 모드가 비유전율 편차도 작았다.

표 1. 모드별 반지름에 따른 공진주파수

Table 1. Calculated resonant frequencies by the air gap of the radial direction in each mode.

모드 \ 내용	반지름(mm)	공진주파수(GHz)	공진주파수 편차 (%)	비유전율 측정값	비유전율 편차 (%)
TM_{010}	7.8	10.1874	0.0029	2.0540	0
	7.85	10.1872	0.0010	2.0540	0
	7.92	10.1871	0	2.0540	0
TE_{111}	7.8	10.6830	1.918	1.9979	3.725
	7.85	10.5940	1.068	2.0316	2.101
	7.92	10.4820	0	2.0752	0
TE_{011}	7.8	17.6990	0.0113	2.0514	0.024
	7.85	17.6970	0	2.0519	0
	7.92	17.6970	0	2.0519	0

IV. 높이 방향 틈에 의한 영향

높이 방향의 틈에 의한 영향에 대해서도 앞에 기술한 테플론의 비유전율값을 이용하여 기본 모드인 TM_{010} 모드와 TE_{111} 모드, TE_{011} 모드에 대해서 공진주파수 그래프를 그렸다. 높이 방향의 틈에 의

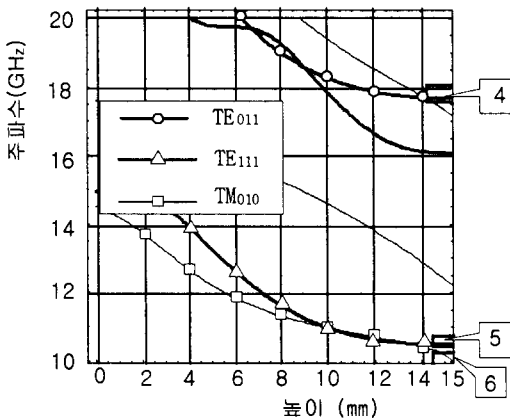


그림 7. 높이 방향 틈에 의한 공진주파수 변화
Fig. 7. The resonant frequency variation for the air gap in the vertical direction.

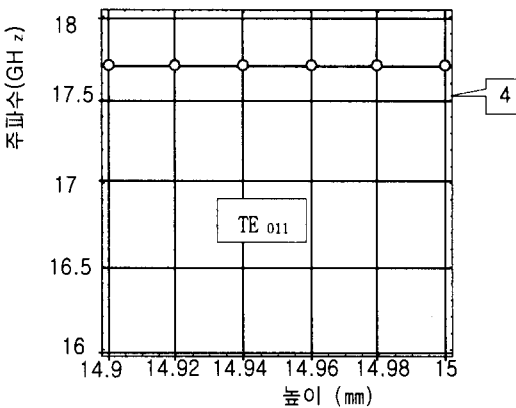


그림 8. 높이 방향 틈에 의한 영향을 알아보기 위한 TE_{011} 모드의 구간 확대
Fig. 8. Magnification of TE_{011} mode to see the effect of the air gap in the vertical direction.

한 공진주파수의 변화를 살펴보기 위해서 유전체 높이가 14.9mm인 경우에서부터 15mm인 공진주파수 변화구간을 확대해 보면, 그림 8, 그림 9, 그림 10과 같다. 그림들을 분석해 보면 TM_{010} 모드보다는 TE_{111} 모드, TE_{011} 모드에서 높이의 변화에 따른 공진주파수의 변화가 작게 나타남을 볼 수 있

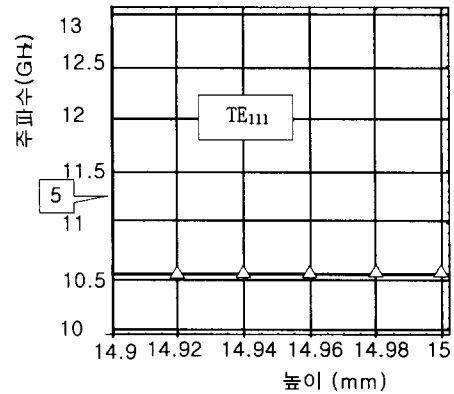


그림 9. 높이 방향 틈에 의한 영향을 알아보기 위한 TE_{111} 모드의 구간 확대

Fig. 9. Magnification of TE_{111} mode to see the effect of the air gap in the vertical direction.

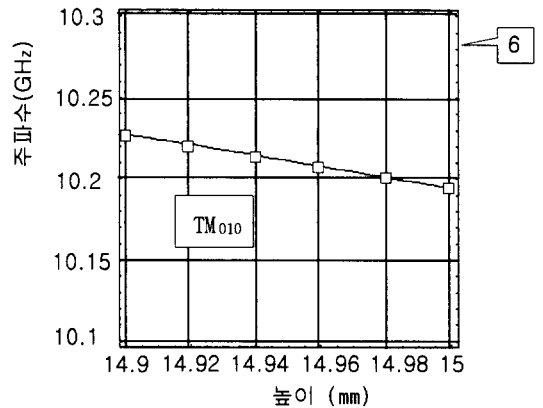


그림 10. 높이 방향 틈에 의한 영향을 알아보기 위한 TM_{010} 모드의 구간 확대
Fig. 10. Magnification of TM_{010} mode to see the effect of the air gap in the vertical direction.

표 2. 모드별 높이에 따른 공진주파수

Table 2. Calculated resonant frequencies by the air gap of the vertical direction in each mode.

모드 \ 내용	높이(mm)	공진주파수(GHz)	공진주파수 편차 (%)	비유전율 측정값	비유전율 편차 (%)
TM ₀₁₀	14.9	10.2270	0.313	2.0380	0.624
	14.95	10.2110	0.157	2.0444	0.312
	15	10.1950	0	2.0508	0
TE ₁₁₁	14.9	10.5100	0.0095	2.0642	0.019
	14.95	10.5100	0.0095	2.0642	0.019
	15	10.5090	0	2.0646	0
TE ₀₁₁	14.9	17.7000	0.0057	2.0512	0.0097
	14.95	17.6990	0	2.0514	0
	15	17.6990	0	2.0514	0

다. 이들의 실제 값을 구해보면, 표 2와 같다.

위 결과에서 TM₀₁₀모드는 유전체봉으로 완벽하게 가득 채워진 높이 15 mm인 공진기의 공진주파수에 대해 높이 14.9 mm 유전체봉으로 채워진 경우 공진주파수 편차는 0.313 %로 차이가 많이 났다. 반면, TE₁₁₁모드의 경우는 높이 15 mm인 유전체봉으로 채워진 공진주파수에 대해 높이 14.9 mm로 채워진 경우는 공진주파수 편차가 0.0095 %로 차이가 거의 없다. TE₀₁₁모드의 경우도 0.0057 % 공진주파수 편차를 가져 TE₁₁₁모드의 경우와 같이 높이 방향 틈에 대해서 공진주파수가 덜 민감하게 변화하였다.

따라서, TM₀₁₀모드에서처럼 높이 방향 틈에 대한 공진주파수의 변화가 심한 경우보다는 TE₁₁₁모드, TE₀₁₁모드에서처럼 높이 방향 틈에 대해 공진주파수의 변화가 작은 경우를 이용하여야 틈에 의한 비유전율 측정 오차를 줄일 수 있다.

높이 방향 틈에 의한 영향에 대해서는 원통형 공진기의 실질적인 구조가 윗면을 나사로 조이는 형태로 되어 있으므로, 공진주파수의 변화뿐만 아니라 전류 흐름에 의한 모드별 손실까지 고려할

필요성이 있다. TM₀₁₀모드에서는 전류의 흐름이 축 방향으로 흐르게 되고, TE₀₁₁모드에서는 원주 방향으로 흐르게 된다. 실제적인 공진기는 구조상 윗면과 옆 벽면 사이에 존재할 수 있는 틈에서의 접촉저항이 존재한다. 특히, TM₀₁₀모드는 전류의 흐름이 축 방향으로 흐르기 때문에 공진기 윗면에 의한 손실이 TE₀₁₁모드보다 많이 발생한다.

높이 방향 틈에 대해서는 공진주파수 변화와 전류흐름에 의한 손실을 고려했을 때 TE₀₁₁모드를 이용하여야 정확하게 비유전율을 구할 수 있다. 표 2의 결과에서도 TE₀₁₁모드가 가장 안정된 모드임을 확인할 수 있었다.

V. 실험 및 고찰

그림 2와 같은 원통형 공진기를 제작하고, 공진기 내부를 가득 채울 수 있는 반지름 7.92 mm, 높이 15 mm인 유전체봉 sample을 제작하였다. 재료는 테플론을 이용하였다. 원통형 공진기의 구조는 그림 2와 같이 공진기 중심 축을 일치시켜서 유전체봉을 삽입하였으며, 윗면을 나사로 조이는 형태

로 되어있다. 유전체봉의 가공 오차로 인해 높이 방향과 반지름 방향에 미소한 틈이 존재한다.

본 실험에서는 틈에 의한 공진주파수 변화가 가장 덜 민감한 모드인 TE_{011} 모드의 공진주파수를 대표적으로 측정하여 보았다. 비유전율을 측정하기 위해 원통형 공진기를 빈 상태와 유전체로 가득 채운 상태로 반지름에 대한 공진주파수를 측정하고 식(1)에 의해 비유전율을 측정하였다. 그 결과 빈 원통형 공진기에서는 25.050 GHz의 공진주파수를 측정하였고, 유전체봉으로 가득 채웠을 경우에는 17.488 GHz의 공진주파수를 측정하였다. 식(1)에 이 값을 대입하여 테플론의 비유전율을 측정하면, 2.05의 비유전율값을 갖는다. D. K. Cheng은 테플론의 비유전율값을 2.1이라고 소개하였고^[10], D. M. Pozar는 테플론의 비유전율값을 2.08이라고 소개하였다^[11]. 테플론과 같이 작은 비유전율값은 부정확한 측정값을 갖거나, 측정이 불가능하다. 정확도를 측정하는 것은 정확한 테플론의 비유전율값을 알지 못하기 때문에 불가능하다.

본 실험에서는 미소 틈에서 공진주파수나 비유전율값이 덜 민감한 모드를 선택하였다. 틈에서 발생할 수 있는 가공오차를 줄여 측정의 정확도를 향상시키고자 하였다. 실험에서 측정한 2.05는 정확한 테플론의 비유전율 측정값이라 사료된다.

VI. 결 론

물질의 비유전율을 정확히 측정하기 위해서, 원통형 공진기 내부에 유전체를 가득 채워서 공진주파수를 측정하는 방법을 이용하였다. 공진기에 유전체를 가득 채울 때 유전체를 가공하여 채우게 되는데, 가공오차에 의한 틈이 발생하게 된다. 유전체와 공진기 사이의 틈에 의한 공진주파수 민감도는 비유전율의 정확한 측정과 밀접한 관계가 있다. 틈에 의한 공진주파수 변화가 덜 민감한 모드를 찾아 비유전율을 측정해야 정확히 비유전율을 구할 수 있다. 모드별 공진주파수 민감도를 확인하

기 위해 높이 방향과 반지름 방향의 틈에 의한 변화를 확인하였다.

반지름 방향으로 틈이 있을 때 TE_{111} 모드는 완벽히 유전체봉으로 채워진 경우에 대해 평균 1.493%의 공진주파수 편차를 가졌고, TM_{010} 모드, TE_{011} 모드는 평균 0.005%의 공진주파수 편차를 보였다. 반지름 틈에 의한 영향만을 보았을 때는 TM_{010} 모드, TE_{011} 모드가 공진주파수 변화가 덜 민감하여, 정확한 비유전율 측정을 위해 필요한 모드라는 것을 알았다. 높이 방향으로 틈이 있을 때도 같은 방법으로 알아본 결과 TE_{011} 모드는 평균 0.006%의 공진주파수의 편차를 가졌고, 전류의 흐름도 원주 방향으로 흘러 실제적인 공진기 구조상 윗면과 옆벽면 사이에 존재할 수 있는 틈에서의 접촉저항에 의한 손실이 작다. 높이 방향의 틈만을 고려한 결과로는 TE_{011} 모드가 비유전율을 정확히 측정할 수 있는 모드임을 알았다.

가공오차로 인한 틈에 의한 영향을 가장 덜 받는 모드를 찾기 위해, 반지름 틈과 높이 틈에 대한 영향을 모두 고려하여 모드를 선택하였다. 그 결과 TE_{011} 모드가 가장 틈에 의한 공진주파수 민감도가 덜 민감하였고, TE_{011} 모드를 이용하여 비유전율을 측정하여야 정확한 비유전율 측정 결과를 얻을 수 있다는 것을 알았다.

참 고 문 헌

- [1] C. Shibata, 工業用マイクロ波応用技術, 電氣書院, 1986.
- [2] D. Kajfez and P. Guillon, *Dielectric Resonators*, Artech House, 1986.
- [3] S. B. Cohn, 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.
- [4] M. M. Taheri, 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.
- [5] Y. Kobayashi, 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.
- [6] B. W. Hakki, 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.
- [7] K. A. Zaki, A. E. Atia, “Modes in Dielectric-Loaded Waveguide and Resonators”, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-31, no. 12, December, 1983.
- [8] S. Y. Lee, B. J. Soh, J. W. Ahn, J. Y. Cho, B. H. Park, C. S. Jung, V. B. Fedorov, A. G. Denisov, Y. H. Kim, T. S. Hahn, S. S. Choi, B. Oh and S. H. Moon, “Use of a Dielectric-loaded Cylindrical Cavity in Measurements of the Microwave Surface Resistances of High-Tc Superconducting Thin Films”, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 1997.
- [9] R. F. Harrington, *Time Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw-Hill, 1961.
- [10] D. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*, Addison Wesley, 1989.
- [11] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison Wesley, 1990.
- [12] P. Guillon, 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.

이 원 희



1998년 2월: 영동대학교 전자공학과 (공학사)
 1998년~현재: 건국대학교 대학원 전자·정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 마이크로파 회로 설계 등

최 홍 주



1993년: 건국대학교 전자공학과(공학사)
 1995년: 건국대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1995년~현재: 건국대학교 대학원 전자·정보통신공학과 박사과정
 [주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 이동통신, 마이크로파 회로 설계 등

강 순 국



1997년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)
 1999년 2월: 건국대학교 대학원 전자·정보통신공학과(공학석사)
 1999년~현재: C&C 엔터프라이즈 재직중
 [주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 마이크로파 회로 설계 등

마이크로파 회로 설계 등

허 정



1981년: 서울대학교 전자공학과(공학사)
1983년: 서울대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
1991년: 서울대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
1991년~현재: 건국대학교 전자·정보통신공학과 부교수

[주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 마이크로파 회로 설계, 마이크로파 소자 등

이 상 영



1979년: 서울대학교 물리학과(이학사)
1985년: 미국 오하이오 주립대학교 물리학과(M.S.)
1987년: 미국 오하이오 주립대학교 물리학과(Ph.D.)
1987년~1992년: 한국과학기술연구원 초전도연구실 선임연구원

1992년~현재: 건국대학교 물리학과 부교수
[주 관심분야] 고온초전도 박막 및 소자의 마이크로파 특성평가, 고온초전도 마이크로파 소자 제작