

# 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공동 공진기에서 Contour Graph 방법을 이용한 공진주파수 계산

## A Computation of the Resonant Frequencies using Contour Graph Method in the Dielectric-disc Loaded Cylindrical Cavity Resonators

최홍주\* · 이원희\* · 허 정\* · 최광제\*\* · 이상영\*\*\*

Hong-Ju Choi\* · Won-Hui Lee\* · Jung Hur\* · Gwang-Je Choi\*\* · Sang Young Lee\*\*\*

### 요 약

유전체 디스크가 삽입된 원통형 공동 공진기의 전자계 해와 공진주파수를 구하는 방법을 기술하였다. 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공동 공진기의 공진주파수는 특성방정식의 해석에 의해 계산된다. 특성방정식의 해를 Mathematica의 ContourPlot graph를 이용하여 구하였다. 공진기의 높이를 증가시키면서 계산한 공진주파수와 실험 값의 공진주파수를 비교하였다. 계산 결과가 실험 값과 거의 일치하는 것을 볼 수 있었다. 공진기 윗면과 동심 유전체 디스크 사이가 근접할 경우 0.2%의 공진주파수 오차를 나타내었고, 공진기 윗면과 동심 유전체 디스크 사이가 멀어짐에 따라 최대 1.6%의 공진주파수 오차를 나타내었다.

### Abstract

We described a method to obtain electromagnetic solution and resonant frequencies in dielectric-disc loaded cylindrical cavity resonators. Resonant frequency of dielectric-disc loaded cylindrical cavity resonators is calculated by analyzing the characteristic equation. The characteristic equation is solved by using the ContourPlot graph of Mathematica. As increasing to height of cavity, we compare the calculated resonant frequency with experimental frequency. The calculated results well agree with the experimental ones. The error between them is 0.2% or 1.6% for the case of the top plate is close to or far from concentric dielectric-disc, respectively.

### I. 서 론

유전체 디스크가 삽입된 원통형 공동 공진기의 공진주파수를 구하는 것은 매우 어렵다. 동심 유전체 디스크가 삽입된 공진기에 대해 관심을 갖기 시작하던 초기에는 공진기 내부의 전자계 해석에 S.

B. Cohn의 모델과 T. Itoh와 R. S. Rudokas의 모델을 이용하였다<sup>[1]</sup>. S. B. Cohn의 첫 번째 모델은 비유전율이 매우 높은 유전체의 반지를 방향의 경계면 전체가 PMC(Perfect Magnetic Conductor)로 둘러 쌓여 있다고 가정하여 공진주파수를 계산하였다. S. B. Cohn의 첫 번째 모델 오차는 약 20%를 상회하였

「이 연구는 과학기술부의 지원에 의해 수행되었음」

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

\*\*한라대학교 전기·전자·컴퓨터공학부(School of Electrical, Electronic and Computer Eng., Halla Univ.)

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

· 논문 번호 : 20000810-094

· 수정완료일자 : 2000년 9월 4일

다. S. B. Cohn의 두 번째 모델은 PMC와 더불어 축 방향 경계면에 PEC(Perfect Electric Conductor)를 적용하여 오차를 5%로 줄였다<sup>[1]</sup>. 근래에 들어서 동심 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공동 공진기에 대하여 K. A. Zaki를 비롯한 대부분의 연구자들은 유전체 도파관 모델을 이용하여 공진주파수를 계산하였다<sup>[2],[4]</sup>. 유전체 도파관 모델에서는 동심 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공동 공진기 내부의 전자계 일부 즉, 동심 유전체 디스크 바깥쪽 영역에서 축 방향과 반지름 방향의 전자계 변화를 소멸 모드로 가정하여 표현하였다<sup>[2]-[4]</sup>. 소멸 모드로 가정된 전자계 표현에 의해 계산된 공진주파수는 동심 유전체 디스크의 비유전율이 상당히 큰 경우와 동심 유전체 디스크의 크기가 공동 공진기의 크기와 거의 같을 때에만 측정 값과 일치하는 경향을 보인다<sup>[1],[2],[5]</sup>. 소멸 모드의 전자계 표현은 비유전율이 작은 경우와 동심 유전체 디스크의 크기가 공동 공진기의 크기보다 상대적으로 작을 때에는 공진주파수 계산에 있어서 상당히 큰 오차를 나타내게 된다<sup>[2]-[8]</sup>. 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공진기는 성능이 뛰어난 필터, 높은 온도 안정도와 주파수 안정도를 필요로 하는 발전기, 저잡음 마이크로파 합성기와 고온 초전도체의 박막 특성 측정 등에 이용한다. 따라서, 공진기 내부의 정확한 전자계 표현과 공진주파수의 예측은 실제 공진기 제작에 유용한 자료가 될 것이다.

본 논문에서는 유전체 디스크 바깥 영역의 전자계 표현에 진행 모드 표현을 적용하여 유전율이 작은 경우와 유전체 디스크가 공동 공진기 크기보다 작더라도 오차가 작게 발생하도록 하였다. 또한, 동심 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공동 공진기의 정확한 공진주파수를 계산하기 위해서 contour graph 방법을 제안한다. Contour graph 방법은 그래프를 이용하는 방법으로서, 공진기 내부의 유전체 바깥쪽 영역을 근사적으로 표현해서 해를 얻는 방법이 아니라, 정확하게 표현하여 공진주파수를 계산하는 방법이다. 특성방정식을 해석하는 과정이 쉽고, 전체적인 공진주파수 그래프를 간단히 구할 수 있게 되므로, 공진주파수를 정확히 계산할 수 있다.

## II. 전자계 및 경계조건

유전체 디스크가 삽입된 원통형 공진기를 해석하기 위하여 그 구조를 3가지의 영역으로 분리하였다. 그림 1은 해석하고자 하는 구조이다. 영역 1은 비유전율을  $\epsilon_r=9.4$ 인 유전체 사파이어로 이루어져 있다. 영역 2와 영역 3은 공기로 채워져 있다. 유전체 사파이어 디스크의 크기는 반경  $a=2.5$  mm, 높이  $l=5$  mm이다. 유전체 디스크를 포함하는 공진기의 크기는 반경  $d=7.5$  mm, 높이  $L+l=15$  mm이다.

$TM_{n\rho q}$  모드와  $TE_{n\rho q}$  모드의 파동함수에 관한 전자계 해는 다음과 같이 정의할 수 있다.  $TM_{n\rho q}$  모드의 각 영역의 파동 함수는 다음과 같다.

$$\psi^{m1} = A \cdot J_n(k_{\rho 1} \rho) \cdot \cos n\phi \cdot \cos k_{z1} z \quad (1a)$$

$$\psi^{m2} = B \cdot (J_n(k_{\rho 2} \rho)N_n(k_{\rho 2} d) - N_n(k_{\rho 2} \rho)J_n(k_{\rho 2} d)) \cdot \cos n\phi \cdot \cos k_{z2} z \quad (1b)$$

$$\psi^{m3} = C \cdot J_n(k_{\rho 3} \rho) \cdot \cos n\phi \cdot \cos k_{z3} z \quad (1c)$$

$TE_{n\rho q}$  모드에 대한 파동함수는 다음과 같다.

$$\psi^{e1} = A \cdot J_n(k_{\rho 1} \rho) \cdot \cos n\phi \cdot \sin k_{z1} z \quad (2a)$$

$$\psi^{e2} = B \cdot (J_n(k_{\rho 2} \rho)N_n(k_{\rho 2} d) - N_n(k_{\rho 2} \rho)J_n(k_{\rho 2} d)) \cdot \cos n\phi \cdot \sin k_{z2} z \quad (2b)$$

$$\psi^{e3} = C \cdot J_n(k_{\rho 3} \rho) \cdot \cos n\phi \cdot \sin k_{z3} z \quad (2c)$$

각 영역에서의 파동함수를 원통형 좌표계의 파동

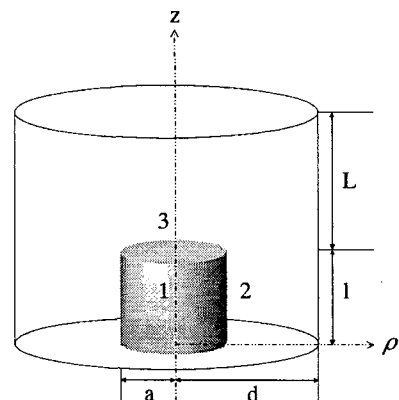


그림 1. 동심 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공진기.  
Fig. 1. The cylindrical cavity resonator with concentric dielectric-disc.

함수에 대한 식 (3a)와 (3b)에 대입한 후 경계 조건을 적용한다.

TM 모드

$$\begin{aligned} E_\rho &= \frac{1}{j\omega\epsilon} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \rho \partial z} \\ H_\rho &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial \phi} \\ E_\phi &= \frac{1}{j\omega\epsilon} \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi \partial z} \\ H_\phi &= -\frac{\partial \psi}{\partial \rho} \\ E_z &= \frac{1}{j\omega\epsilon} \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) \psi \\ H_z &= 0 \end{aligned} \quad (3a)$$

TE 모드

$$\begin{aligned} E_\rho &= \frac{-1}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial \phi} \\ H_\rho &= \frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \rho \partial z} \\ E_\phi &= \frac{\partial \psi}{\partial \rho} \\ H_\phi &= \frac{1}{j\omega\mu} \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi \partial z} \\ E_z &= 0 \\ H_z &= \frac{1}{j\omega\mu} \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) \psi \end{aligned} \quad (3b)$$

영역 1과 영역 2의 경계 조건인  $\frac{H_{\phi 1}}{E_{z 1}} = \frac{H_{\phi 2}}{E_{z 2}}$ 을 이용하여 TM 모드의 경계 조건을 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{n1} \frac{1}{k_{\rho 1}} \frac{J'_n(k_{\rho 1} a)}{J_n(k_{\rho 1} a)} &= \\ \frac{1}{k_{\rho 2}} \left( \frac{J'_n(k_{\rho 2} a) N_n(k_{\rho 2} d) - N'_n(k_{\rho 2} a) J_n(k_{\rho 2} d)}{J_n(k_{\rho 2} a) N_n(k_{\rho 2} d) - N_n(k_{\rho 2} a) J_n(k_{\rho 2} d)} \right) \end{aligned} \quad (4a)$$

동일하게, 영역 1과 영역 2의 경계 조건인  $\frac{E_{\phi 1}}{H_{z 1}} = \frac{E_{\phi 2}}{H_{z 2}}$ 을 이용하여 TE 모드의 경계 조건을 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{k_{\rho 1}} \frac{J'_n(k_{\rho 1} a)}{J_n(k_{\rho 1} a)} &= \\ \frac{1}{k_{\rho 2}} \left( \frac{J'_n(k_{\rho 2} a) N'_n(k_{\rho 2} d) - N'_n(k_{\rho 2} a) J'_n(k_{\rho 2} d)}{J_n(k_{\rho 2} a) N_n(k_{\rho 2} d) - N_n(k_{\rho 2} a) J_n(k_{\rho 2} d)} \right) \end{aligned} \quad (4b)$$

$z=l$  일 때 전계와 자계의 접선성분인  $E_{\phi 1}, E_{\rho 1}, H_{\phi 1}, H_{\rho 1}$ 와  $E_{\phi 2}, E_{\rho 2}, H_{\phi 2}, H_{\rho 2}$ 가 연속이라는 경계 조건을 적용하면, 영역 1과 영역 3의 경계 조건에서 다음과 같은 특성방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{k_{z 3}}{\epsilon_3} \tan k_{z 3} L = -\frac{k_{z 1}}{\epsilon_1} \tan k_{z 1} l \quad (\text{TM 모드}) \quad (5a)$$

$$k_{z 3} \cot k_{z 3} L = -k_{z 1} \cot k_{z 1} l \quad (\text{TE 모드}) \quad (5b)$$

영역 1과 영역 3의 경계 조건을 적용하는 것은 공진기 내부에 유전체가 있으면, 유전체에 거의 대부분의 전자계가 존재하고, 영역 2에는 거의 전자계가 존재하지 않기 때문이다.

식 (5a)와 (5b)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G(f, k_{z 1}) = \frac{k_{z 3}}{\epsilon_0} \tan(k_{z 3} L) + \frac{k_{z 1}}{\epsilon_1} \tan(k_{z 1} l) \quad (6a)$$

$$G(f, k_{z 1}) = k_{z 3} \cot(k_{z 3} L) + k_{z 1} \cot(k_{z 1} l) \quad (6b)$$

1, 2, 3 영역의 파수는 TM, TE모드 모두 동일하게 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_1^2 = k_{\rho 1}^2 + k_{z 1}^2$$

$$k_2^2 = k_{\rho 2}^2 + k_{z 2}^2$$

$$k_3^2 = k_{\rho 3}^2 + k_{z 3}^2$$

### III. 공진주파수 그래프

공진주파수를 찾기 위해서는 함수  $G(f, k_{z 1})=0$ 을 만족하는 공진주파수와  $k_{z 1}$  값을 반복적으로 대입하여 구해 주어야 한다. 그러나,  $G(f, k_{z 1})$ 를 3차원으로 그릴 수 있고, 0값을 가지는 점들만을 그래프로 그려줄 수 있다면 보다 쉽게 공진주파수를 찾을 수 있다. Mathematica의 ContourPlot을 이용하면 이와 같은 그래프를 그릴 수가 있다. ContourPlot은 두 개의 변수를 가지는 함수에 의해 나타나는 값을 3차원 그래프로 표현하여 x, y의 변수에 의한 z값 중에서 특정한 값을 가지는 Contour(궤적)를 그려주는 기능을 가지고 있다. 식 (6a)와 (6b)가 0값을 만족하는 궤적을 ContourPlot으로 그려보면 그림 2와 그림 3과 같은 그래프를 얻을 수 있다. 또한 영역 1과 영역 2의 경계 조건 식인 식(4a)과 식(4b) 또한 (6a), (6b)와 마찬가지로

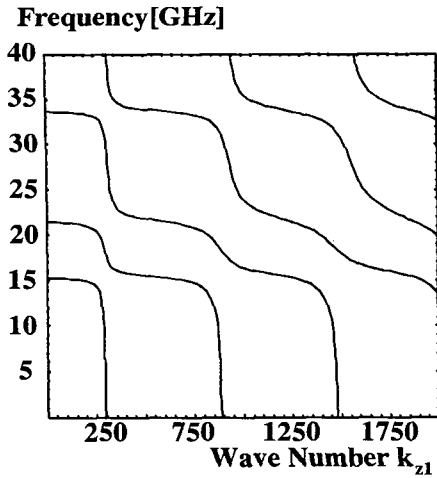


그림 2. 영역 1과 영역 3의 경계조건을 적용한 TM 모드의 contour 그래프

Fig. 2. The contour graph of the TM mode based on the boundary condition between region 1 and 3.

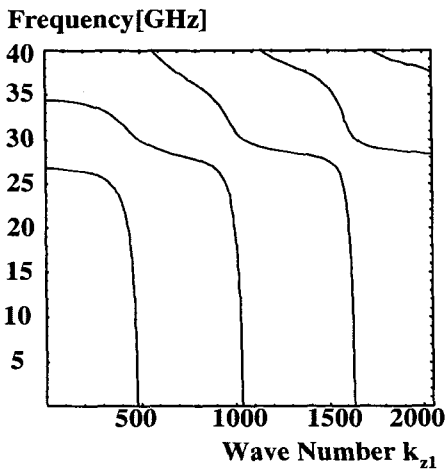


그림 3. 영역 1과 영역 3의 경계조건을 적용한 TE 모드의 contour 그래프

Fig. 3. The contour graph of the TE mode based on the boundary condition between region 1 and 3.

$$F(f, k_{z1}) = \epsilon_n \frac{1}{k_{\rho 1}} \frac{J_n(k_{\rho 1} a)}{J_n(k_{\rho 1} a)} - \frac{1}{k_{\rho 2}} \left( \frac{J_n(k_{\rho 2} a) N_n(k_{\rho 2} d) - N_n(k_{\rho 2} a) J_n(k_{\rho 2} d)}{J_n(k_{\rho 2} a) N_n(k_{\rho 2} d) - N_n(k_{\rho 2} a) J_n(k_{\rho 2} d)} \right) \quad (7a)$$

$$F(f, k_{z1}) = \frac{1}{k_{\rho 1}} \frac{J_n(k_{\rho 1} a)}{J_n(k_{\rho 1} a)} - \frac{1}{k_{\rho 2}} \left( \frac{J_n(k_{\rho 2} a) N_n(k_{\rho 2} d) - N_n(k_{\rho 2} a) J_n(k_{\rho 2} d)}{J_n(k_{\rho 2} a) N_n(k_{\rho 2} d) - N_n(k_{\rho 2} a) J_n(k_{\rho 2} d)} \right) \quad (7b)$$

로 나타낼 수 있고, 위에서 정의한 식 (7a)와 식 (7b)의 값이 0이 되는 점 즉,  $F(f, k_{z1})=0$ 가 될 때의 값 즉, 식 (7a)와 (7b)가 0값을 만족하는 궤적을 ContourPlot으로 그려보면 그림 4, 그림 5와 같은 그래프를 얻을 수 있다. 동심 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공진기의 사양은 다음과 같다.  $\epsilon_r=9.4$ , 동심 유전체 디스크의 크기는 반지름  $a=2.5$  mm, 높이  $h=5$  mm이고, 동심 유전체 디스크를 포함하는 원통형 공동 공진기의 크기는 반지름  $d=7.92$  mm, 높이  $H=L=15$  mm이다.

두 개의 특성 방정식은 모두 주파수  $f$ 와 영역 1의 파수  $k_{z1}$ 에 의하여 변화하게 되므로,  $F(f, k_{z1})=0$ ,  $G(f, k_{z1})=0$ 을 동시에 만족하면 공진주파수가 된다는 것을 알 수 있다. 즉, 그림 2와 그림 4를 겹친 그림과, 그림 3과 그림 5를 겹친 그림의 교차점이 공진주파수가 되는 것이다. 이를 그래프로 나타내면 다음과 같다.

TM모드의 경우, 조금 찌그러진 선이 그려지는데

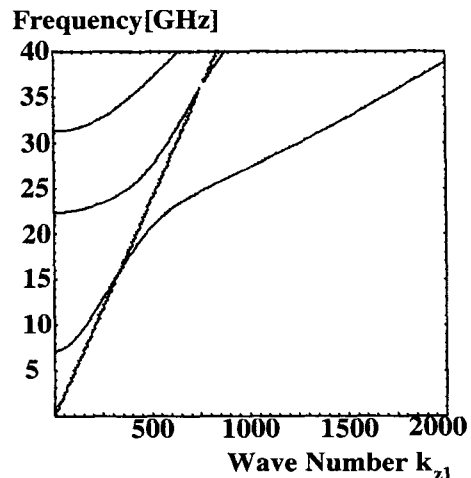


그림 4. 영역 1과 영역 2의 경계조건을 적용한 TM 모드의 contour 그래프

Fig. 4. The contour graph of the TM mode based on the boundary condition between region 1 and 2.

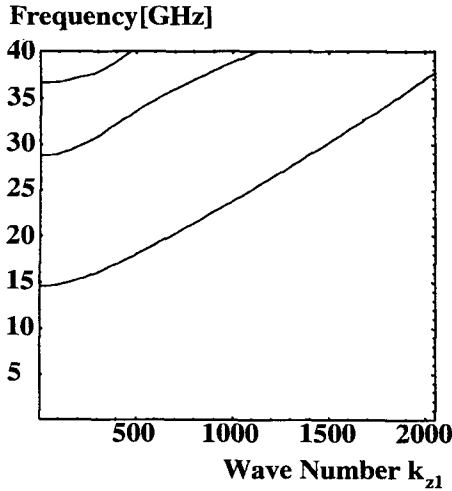


그림 5. 영역 1과 영역 2의 경계조건을 적용한 TE 모드의 contour 그래프.

Fig. 5. The contour graph of the TE mode based on the boundary condition between region 1 and 2.

이것은  $F(f, k_{z1})=0$ 을 나타내는 선이 아니라  $-\infty$ 에서  $\infty$ 로 변화할 때 선을 갖게 되는 ContourPlot의 기능 때문이다. 그러므로, 이 선은 어떠한 값을 갖지 않고 그래프로 표현할 때에만 나타나는 것이

표 1.  $TM_{0pq+\delta}$ ,  $TE_{0pq+\delta}$  모드의 공진주파수

Table 1. The resonant frequencies of the  $TM_{0pq+\delta}$ , the  $TE_{0pq+\delta}$  modes.

TM 모드의 공진주파수	TE 모드의 공진주파수
13.692 GHz	17.517 GHz
16.247 GHz	23.573 GHz
21.714 GHz	28.353 GHz
24.341 GHz	31.615 GHz
26.816 GHz	32.123 GHz
32.207 GHz	36.655 GHz
32.976 GHz	37.620 GHz
33.545 GHz	
34.581 GHz	
35.171 GHz	

므로, 무시해야 한다.

$TE_{0pq+\delta}$  모드와  $TM_{0pq+\delta}$  모드의 첨자는 다음에 설명하는 의미를 갖는다. 원통형 공진기의 공진 모드는  $TE_{npq}$  혹은  $TM_{npq}$ 의 형태인데, 첨자  $n$ 은  $\phi$  방향의 변화를 의미한다. 여기서  $n$ 은 0의 값을 가지므로,  $\phi$  방향의 변화는 축 대칭성을 가진다는 것을 의미한다.  $p$ 는  $\rho$  방향의 변화를,  $q$ 는  $z$  방향의 변화를 의미한다.  $\delta$ 는 축 방향으로 감쇠하는 형태를 가질 때 사용하는 첨자이다. 표 1은 그림 6, 그림 7에서 구한 공진주파수를 정리한 것이다.

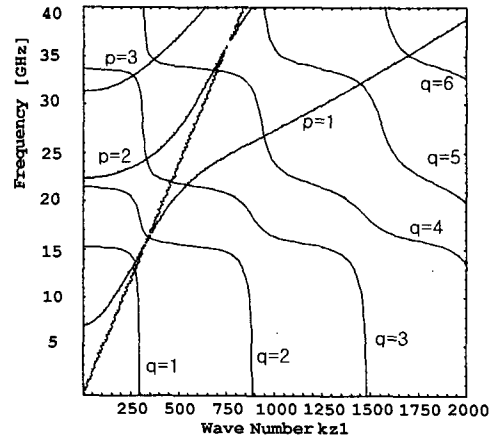


그림 6.  $TM_{0pq+\delta}$  모드의 공진주파수 그래프

Fig. 6. The resonant frequencies graph of the  $TM_{0pq+\delta}$  mode.

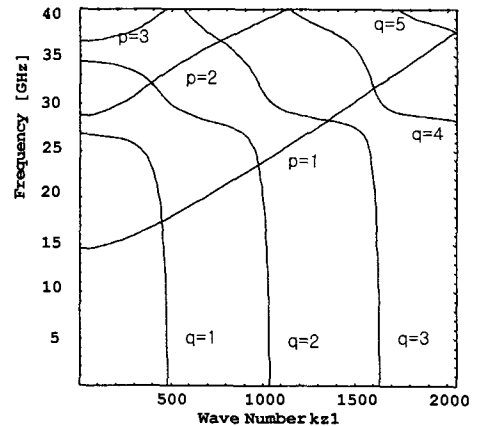


그림 7.  $TE_{0pq+\delta}$  모드의 공진주파수 그래프

Fig. 7. The resonant frequencies graph of the  $TE_{0pq+\delta}$  mode.

#### IV. 실험 및 검토

Contour graph 방법을 적용하여 구한 공진주파수가 정확한지를 살펴보기 위하여, 동심 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공동 공진기를 제작하였다. 실험에서 동심 유전체 디스크의 크기는 고정시키고, 공진기의 높이를 동심 유전체 디스크의 높이에서 1[mm] 간격으로 증가시켜,  $TE_{011}$  mode의 공진주파수를 측정하였다. 동심 유전체가 삽입된 원통형 공진기를 여기하기 위하여 사용된 방법은 프로브 삽입법이다. 루프 모양의 프로브를 삽입하여, 루프 면을 공진기의 바닥 면과 수평이 되게 장치하였고, TE 모드가 여기되도록 하였다. 그림 8과 표 2는 측정된 공진주파수와 계산된 공진주파수를 비교한 결과를 보인 것이다.

그림 8과 표 2에서 볼 수 있는 것처럼 공진기의 윗면과 유전체의 윗면이 가까울 때에는 1% 이내의 오차, 특히 아주 가까울 때는 매우 정확하게 일치함을 볼 수 있고, 공진기의 윗면과 유전체의 윗면이 멀어질 경우에도 1.6% 정도의 오차를 보임을 알 수 있다. 공진기의 높이가 14[mm]이상이 되면 거의 오차가 1.6% 정도로 일정해진다. 이와 같은 현상이 나타나는 이유는 전자계 대부분이 유전체에 집중되고, 집중되는 양은 공진기 높이에 대하여 거의 변화하지 않으므로, 공진기의 높이가 높아질수록 공진기의 윗면에 대한 반사파가 거의 줄어들어 진행

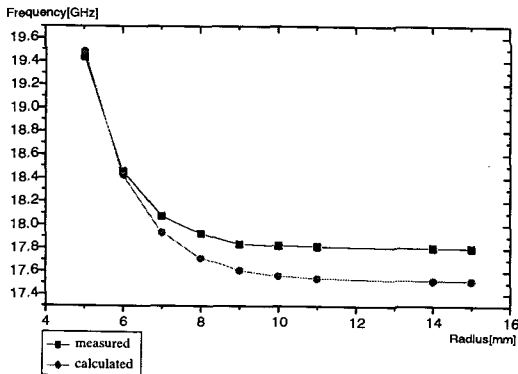


그림 8.  $TE_{011}$  모드의 실험과 계산치

Fig. 8. The measured and calculated resonant frequencies of  $TE_{011}$  mode.

표 2.  $TE_{011}$  mode의 실험과 계산에 의한 공진주파수

Table 2. The measured and calculated resonant frequencies of the  $TE_{011}$  modes.

공진기의 높이	측정치	계산치	오차
5 mm	19.437 GHz	19.484 GHz	0.241%
6 mm	18.455 GHz	18.426 GHz	0.157%
7 mm	18.076 GHz	17.936 GHz	0.774%
8 mm	17.926 GHz	17.714 GHz	1.182%
9 mm	17.833 GHz	17.611 GHz	1.244%
10 mm	17.821 GHz	17.562 GHz	1.453%
11 mm	17.816 GHz	17.538 GHz	1.560%
14 mm	17.802 GHz	17.518 GHz	1.595%
15 mm	17.800 GHz	17.517 GHz	1.589%

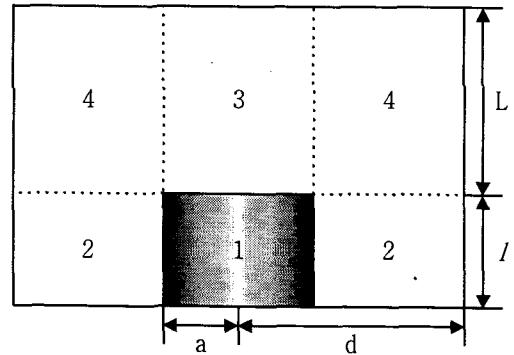


그림 9. 동심 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공진기의 단면도

Fig. 9. The cross section of the cylindrical cavity resonator with dielectric-disc.

파만 존재하게 되기 때문이다. 그러므로, 유전율이 사파이어보다 높은 유전체를 사용한다면, 오차가 일정해지는 공진기의 높이는 좀 더 낮아질 것이다. 또한 동심 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공진기의 해석에 있어서 영역을 세분하지 못한데서 기인하는 오차를 무시할 수 없다. 실제 동심 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공동 공진기의 영역은 그림 9와 같이 4개의 영역으로 분할해서 해석해야 한다.

그림 9에서 영역 3과 영역 4로 세분했을 때, 영역

4에는 맥스웰 방정식을 만족할 수가 없고, 영역 2와 영역 4의 경계면, 영역 3과 영역 4의 경계면에서 경계조건을 적용할 수 없다. 따라서, 영역 4로 인한 필연적인 오차가 발생한다.

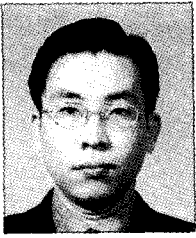
### V. 결 론

원통형 공동 공진기에서 유전체 디스크가 삽입될 경우의 공진주파수를 구하는 방법을 제시하였다. 공진주파수를 계산하는 것은 매우 어려운 과정이다. 좀 더 쉽게 공진주파수를 알아내기 위하여 Mathematica의 contour graph 기능을 이용하였다. 경계조건을 적용하여 구해진 특성 방정식을 해석해서 구해진 contour의 교차점이 구하고자 하는 공진기의 공진주파수가 된다. Contour graph에 의한 해는 소수점 4자리 이상까지 정확히 구할 수 있는데, 파수의 범위를 줄여서 확인해 보면 정확한 값을 알 수 있다. 이렇게 구한  $TE_{011+\delta}$  모드에 대한 공진주파수는 공동과 유전체 디스크와의 거리가 가까운 경우에는 0.2% 정도의 오차를 보였으며, 거리가 먼 경우에는 1.6% 정도의 오차를 보였다. 동심 유전체 디스크가 삽입된 원통형 공진기의 공진주파수 오차를 줄이기 위해서는 공진기 내부를 더욱 세분하여 해석하여야 한다. 영역을 세분한다는 것은 그만큼 특성방정식의 수가 많아지고, 변수의 수가 많아진다는 것을 의미한다. 더 많은 변수를 포함하는 특성방정식을 해석하는 문제에 대해서는 많은 연구가 필요할 것이라고 사료된다.

### 참 고 문 헌

- [1] D. Kajfez and P. Guillon, *Dielectric Resonators*, Artech.House, 1986.
- [2] C. Wang, H. W Yao, K. A. Zaki, and R. R. Mandour, "Mixed modes cylindrical planar dielectric resonator filter with rectangular enclosure", *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. 43, pp. 2817-2823, 1995.
- [3] S. Y. Lee et al., "Use of a Dielectric-loaded Cylindrical Cavity in Measurements of the Microwave Surface Resistances of High-Tc Superconducting Thin Films", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, 1997.
- [4] R. F. Harrington, *Time Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw-Hill, 1961.
- [5] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison-Wesley, 1990.
- [6] P. Guillon and Y. Garault, "Accurate resonant frequencies of dielectric resonators", *IEEE Trans. on Microwave and Tech.*, vol. MTT-25, no. 11, pp. 916-922, November, 1977.
- [7] M. W. Pospieszalski, "Cylindrical dielectric resonators and their applications in TEM line microwave circuits", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech*, vol. MTT-27, pp. 233-238, Mar., 1979.
- [8] Z. Y. Shen, *High-temperature superconducting microwave circuits*, Artech House, 1994.

최 홍 주



1993년 2월: 건국대학교 전자공학과(공학사)  
 1995년 2월: 건국대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 2000년 2월: 건국대학교 대학원 전자공학과(공학박사)  
 [주 관심분야] 안테나 및 전파전

파, 이동통신, 마이크로파 회로 설계 등

최 광 제

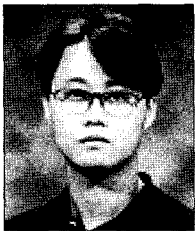


1979년: 광운대학교 무선통신공학과(공학사)  
 1989년: 건국대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 1997년: 건국대학교 대학원 전자공학과(공학박사)  
 현재: 한라대학교 전기·전자·컴

퓨터공학부 조교수

[주 관심분야] 안테나, 무선기기 등

이 원 희



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

마이크로파 회로 설계, 마이크로파 소자 등

이 상 영



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

허 정



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

공학과 교수

[주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 마이크로파 회로설계, 마이크로파 소자 등