

# 공진주파수 간격을 확장시키는 Whispering Gallery 모드 유전체 복합공진기에 관한 연구

## A Study on Whispering Gallery Mode Dielectric Coupled Resonator Which Enlarges the Free Spectral Range

황재효 · 민경일 · 구경완

Jae-Hyo Hwang · Kyoung-Il Min · Kyung-Wan Koo

### 요 약

본 논문에서는 Whispering Gallery 모드 (이하 W. G. 모드) 공진기의 공진주파수 간격(Free Spectral Range : FSR)을 확장시키기 위한 새로운 형태의 복합공진기를 제안한다. 제안된 복합공진기는 두 개의 유전체 원판으로 구성되며, 복합공진기의 공진주파수는 두 개의 원판 각각의 공진 조건을 동시에 만족시키는 주파수가 되므로 공진주파수의 간격이 확장된다. 제안된 복합 공진기 이론으로 K-Band 원판공진기 및 유전체 도파로를 제작 · 실험하여 본 논문의 타당성을 밝힌다.

### Abstract

In this paper, a new coupled resonator which expands free spectral ranges (FSR) of the W. G. mode resonators is presented. The proposed coupled resonator consists of two dielectric disks. The resonance frequency of the coupled resonator is equivalent to the frequency which satisfies the individual resonance conditions of each disk at the same time. As the results, the FSR is expanded. The coupled resonator proposed in this paper at K-Band is fabricated by using dielectric disks and the dielectric straight waveguides. The validity of proposed coupled resonator was verified through experiments.

### I. 서 론

W. G. 모드에서 동작하는 유전체 원판 공진기는 방사손실이 적고 금속차폐가 필요 없으며 선택도가 높고 집적화회로에 적합하다는 장점을 가지고 있다<sup>[1]-[4]</sup>. 그러나, 공진주파수 간격이 좁아 실제 회로에서 원주방향의 고차모드가 매우 많은 상태에서 사용하게 된다. 따라서, 공진주파수 간격이 좁으면, 실제 공진기를 필터 등으로 응용할 때 충분한 통과 대역을 얻을 수 없다.

본 논문에서는 W. G. 모드 공진기의 공진주파수

간격을 확장시키기 위한 새로운 형태의 복합공진기를 제안한다. 반경이 서로 다른 두 개의 유전체 원판을 근접 배열하여 두 개의 원판 각각의 공진 조건을 동시에 만족시키는 주파수가 공진계 전체, 즉, 복합공진기의 공진주파수가 되도록 하였다. 또한, 원판과 원판을 근접 배열시킬 때 발생하는 원판의 고유모드간의 결합현상<sup>[5]</sup>으로 인한 공진주파수의 변화를 최소화하기 위하여 원판과 원판간에 유전체 직선도파로를 삽입하는 새로운 방법을 제안한다. 그리고, 실험적으로 복합공진기의 공진주파수 간격이 확장됨을 보이고, 원판과 원판간에 유전체 직선도파

영동대학교 정보·전자공학부(Faculty of Information·Electronics Engineering, Youngdong University)

· 논문 번호 : 20000621-069

· 수정완료일자 : 2000년 9월 8일

로를 삽입하므로 직선도파로를 삽입하지 않는 경우보다 공진주파수의 간격을 확장시키는 데 유효함을 보인다.

## II. 해석

그림 1은 새로운 형태의 복합공진기 구조를 나타낸다. 본 해석에서는 직선도파로의 종단이 임피던스 매칭되어 전파하는 전자계의 반사가 없다고 가정하고 직선도파로#1에 입력된 모드는 전계가 +x방향, 자계가 +y방향, 포인팅벡터가 +z방향이라고 가정한다.

원판과 직선도파로간의 모드결합은 어느 한 점에서 발생하는 것이 아니라 그림과 같이 비교적 원판과 직선도파로간의 간격이 가까운 부분에서 분포적으로 발생하고 이러한 부분을 결합부라고 가정하고 결합이 일어나지 않는 부분을 비결합부라고 가정한다<sup>[6]~[8]</sup>. 원판공진기#1에서는 직선도파로#1의 고유모드와 전자계결합이 결합부#1에서 발생하여 반시계 방향으로 전력이 전달되는 원판공진기의 W. G. 모드를 형성한다. 그 결과, 원판공진기#1내에는 공진 조건<sup>[9]</sup>을 만족시키는 주파수 성분만 남아있고,

그 이외의 주파수 성분은 간섭으로 소멸된다. 원판공진기#1의 공진 모드는 결합부#2에서 직선도파로#2의 고유모드와 전자계결합을 일으켜 직선도파로#2에 -z방향으로 전력을 전달시키는 모드를 형성한다. 같은 원리로 직선도파로#2의 전력은 결합부#3에서 원판 공진기#2를 여기시키고 원판공진기#2에서는 시계방향으로 전력이 전달되는 W. G. 모드를 형성시킨다. 결국 출력부에서는 원판공진기#2의 W. G. 모드와 직선도파로#3의 고유모드간의 결합에 의하여 직선도파로#3에 +z방향으로 전력이 전달되는 모드를 형성한다. 이때 입력과 출력간의 관계를 주파수별로 살펴보면 다음 3가지의 경우를 생각할 수 있다.

- ① 두 원판의 공진 조건을 모두 만족시키지 않는 주파수
- ② 두 원판의 공진조건 중 어느 하나의 공진 조건만을 만족시키는 주파수
- ③ 두 원판의 공진조건을 동시에 만족시키는 주파수

①의 경우 입력파는 출력되지 않으며, ②의 경우도 두 원판의 공진조건 중 어느 하나의 공진 조건은

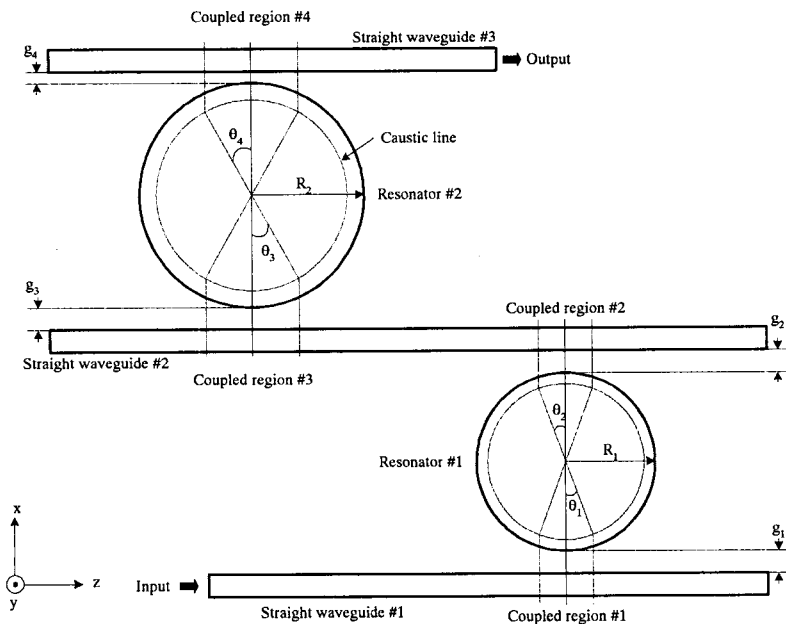


그림 1. 복합공진기 구조

Fig. 1. The structure of coupled resonator.

만족하지 않으므로 공진조건을 만족시키지 않는 원판내에서 간섭에 의해 소멸된다. 따라서, 입력파의 주파수 성분중 출력되는 경우는 ③의 경우에 한정된다. 이러한 특성으로 인해 공진조건을 만족시키는 주파수는 하나의 원판으로 구성된 공진기보다 적어져 결과적으로 공진주파수간격(Free Spectral Range : FSR)이 확장된다. 그림 2에서 그림 1의 등가회로를 제시한다.

결합이 일어나는 결합부의 경우 4단자 방향성 결합기로 가정할 수 있다. 또한 비결합부의 경우, 직선도파로의 경우는 도파로의 고유모드가 전파되는 전송선로로 가정하고 원판내의 비결합부는 W. G. 모드<sup>[10]</sup>가 전파하는 전송선로로 가정한다. 그림 2에서 각각의 단자에 대한 입력파는  $a_{n,m}$ 이라 하고 출력파는  $b_{n,m}$ 이라고 가정한다. 이상의 가정을 통해 4단자 방향성 결합기의 입·출력 특성을 생각하면 식 (1)과 같이 산란행렬로 주어진다<sup>[6]</sup>.

$$\begin{bmatrix} b_{n,1} \\ b_{n,2} \\ b_{n,3} \\ b_{n,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & s_{n,1,2} & s_{n,1,3} & 0 \\ s_{n,2,1} & 0 & 0 & s_{n,2,4} \\ s_{n,3,1} & 0 & 0 & s_{n,3,4} \\ 0 & s_{n,4,2} & s_{n,4,3} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{n,1} \\ a_{n,2} \\ a_{n,3} \\ a_{n,4} \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)의 입·출력파인  $a_{n,i}$  및  $b_{n,i}$ 에서 아래첨자  $n$ 은 4단자 방향성 결합기의 번호를 나타내고 아래첨자  $i$ 는 방향성 결합기의 단자번호를 나타낸다. 산란파라미터  $s_{n,i,j}$ 은  $n$ 번의 방향성 결합기에서  $j$ 단

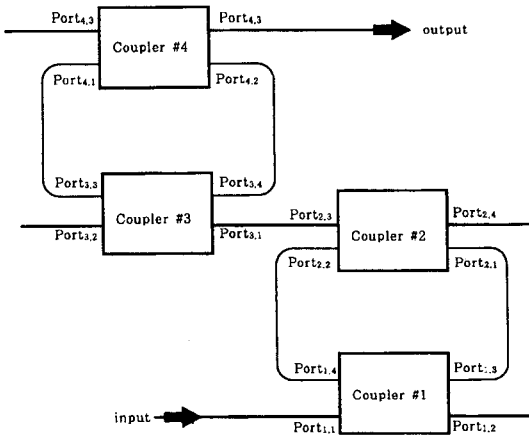


그림 2. 복합공진기의 등가회로  
Fig. 2. The equivalent circuit of the coupled resonator.

자로 출력되는 전자계의 복소진폭(Complex Amplitude : CA)에 대한  $i$  단자로 출력되는 전자계의 복소진폭의 비로 식 (2)로 표시된다<sup>[7]</sup>.

$$s_{n,i,j} = \frac{CA_{n,i}}{CA_{n,j}} \quad (2)$$

여기서,  $i$ 나  $j$ 가 원판상의 단자인 경우  $CA_{n,i(j)}$ 는 다음과 같다.

$$CA_{n,i(j)} = \left| \int \int_{-\infty}^{\infty} [\mathbf{E}_c \times \mathbf{H}_i] \cdot \hat{\theta} \, dx dy \right|^{1/2}$$

$i$ 나  $j$ 가 직선도파로상의 단자인 경우  $CA_{n,i(j)}$ 는 다음과 같다.

$$CA_{n,i(j)} = \left| \int \int_{-\infty}^{\infty} [\mathbf{E}_c \times \mathbf{H}_i] \cdot \hat{z} \, dx dy \right|^{1/2}$$

$E_c$ 는 결합부의 결합전계이고,  $H_i$ 는 각각의 매질의 고유자계를 의미하며 식 (3)으로 주어진다<sup>[8]</sup>.

$$\begin{aligned} E_c(x, y, z) &= m_1(z) \left( \mathbf{E}_{1t} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_c} E_{1z} \hat{z} \right) e^{-\gamma_1(x, y, z)} \\ &+ m_2(z) \left( \mathbf{E}_{2t} + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_c} E_{2z} \hat{z} \right) e^{-\gamma_2(x, y, z)} \\ H_i(x, y, z) &= (\mathbf{H}_{it} + H_{iz} \hat{z}) e^{-\gamma_i(x, y, z)} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서  $\gamma_1(x, y, z)$ 과  $\gamma_2(x, y, z)$ 는 각각 매질 1과 매질 2를 전파하는 모드의 전파상수를 의미한다. 원판중의 비결합부는 W. G. 모드가 진행되는 선로로 가정하였기 때문에 입력파와 출력파의 관계는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} a_{2,1} &= b_{1,3} e^{-v_1(\pi - \theta_1 - \theta_2)} \\ a_{1,4} &= b_{2,2} e^{-v_1(\pi - \theta_1 - \theta_2)} \\ a_{4,1} &= b_{3,3} e^{-v_2(\pi - \theta_3 - \theta_4)} \\ a_{3,4} &= b_{4,2} e^{-v_2(\pi - \theta_3 - \theta_4)} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서  $v_1$ 과  $v_2$ 는 W. G. 모드의 전파상수로서 단위가 없는 값이며  $\theta_1 \sim \theta_4$ 는 결합부의 범위를 각도로 나타낸 것이다. 직선도파로 1, 2 및 3의 제원이 같다면  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 는 같고,  $\theta_3$ 와  $\theta_4$ 도 같다.

식 (2)로부터 식 (4)까지를 이용하여 식 (1)의 산란행렬에서 입력파  $a_{3,1}$ 에 대한 출력파  $b_{4,3}$ 의 응답특성 및 입력파  $a_{1,1}$ 에 대한 출력파  $b_{2,3}$ 의 응답특성을 구하면 식 (5), (6)과 같다.

$$b_{4,3} = \left[ s_{4,3,1} s_{3,3,1} e^{-\nu_2(\pi - \theta_3 - \theta_1)} + \frac{s_{4,3,1} s_{3,3,4} s_{4,2,1} s_{3,3,1} e^{-3\nu_2(\pi - \theta_3 - \theta_1)}}{1 - s_{4,2,1} s_{3,3,4} e^{-2\nu_2(\pi - \theta_3 - \theta_1)}} \right] a_{3,1} \quad (5)$$

$$b_{2,3} = \left[ \frac{s_{2,3,1} s_{1,3,1} e^{-\nu_1(\pi - \theta_1 - \theta_2)}}{1 - s_{1,3,4} s_{2,2,1} e^{-2\nu_1(\pi - \theta_1 - \theta_2)}} \right] a_{1,1} \quad (6)$$

입력과  $a_{1,1}$ 에 대한 출력과  $b_{2,3}$ 의 응답특성은 원판 공진기 1이 단독으로 존재할 때의 응답특성을 의미하며 입력과  $a_{3,1}$ 에 대한 출력과  $b_{4,3}$ 의 응답특성은 원판공진기 2가 단독으로 존재할 때의 응답특성을 의미한다.  $a_{3,1}$ 과  $b_{2,3}$ 간은 직선도파로의 고유모드가 전파하는 전송선로로 가정하였으므로 입출력파는 식 (7)과 같은 관계를 가지고 있다.

$$a_{3,1} = b_{2,3} e^{-\nu_3 a} \quad (7)$$

식 (7)에서  $\nu_3$ 은 직선도파로 2의 전파상수로 단위는 rad/m 이고,  $a$ 는 결합부 2와 결합부 3간의 거리를 나타낸다.

식 (5), (6)과 식 (7)을 연립하여  $a_{1,1}$ 에 대한  $b_{4,3}$ 의 응답을 각각의 주파수 성분에 대해서 계산함으로써 공진기의 주파수특성을 해석할 수 있다. 표 1은 계산을 위한 복합공진기의 제원이다.

복합공진기의 제원은 실험을 위해 공진기 및 유전체 직선도파로를 제작하는 것을 염두에 두고 테프론의 제원을 선택하였다. 직선도파로의 크기는  $E_{y11}$  모드를 전파할 수 있도록 선택하였고, 공진기의 크기 역시 방사손실을 적게 하면서 WGM<sub>m,1,1</sub> 모드를 전파할 수 있도록 비교적 큰 반경의 공진기를 선

표 1. 복합공진기의 제원

Table 1. The dimension of the coupled resonator.

	원 판		직선도파로		
	1	2	1	2	3
비유전율 $\epsilon_r$	2.06 ~ $j5.8610^{-4}$				
두께 $h$	8 mm				
반경 $R$	110 mm	82.15 mm			
폭 $W$			8 mm		
주위의 매질의 비유전율 $\epsilon_1$	1.0 + $j0.0$				

택하였다. 계산에 있어서 원판공진기의 고유모드로 공진기 1과 2 모두  $y$ 축 방향으로 편파방향을 가지는 WGM<sub>m,1,1</sub> 모드를 고려하고 직선도파로의 전송모드로서는 직선도파로 1, 2, 3 모두  $E_{y11}$  모드를 고려한다. 분포결합특성을 고려한 W. G. 모드 공진기의 공진주파수 특성은 원판과 직선도파로간의 거리에 따라 공진주파수가 미세하게 변동한다<sup>6)</sup>. 본 논문에서는 이러한 공진주파수의 변화를 고려하여 원판과 직선도파로간의 거리를 2 mm로 고정하였다. 이상의 제원을 가진 복합공진기를 식 (5)의  $a_{1,1}$ 에 대한  $b_{4,3}$ 의 출력특성을 26.8 GHz로부터 28.3 GHz의 주파수 범위에서 10 MHz간격으로 계산하면 그림 3과 같은 주파수 특성을 가진다.

그림 3에서  $R=110$  mm,  $R=82.15$  mm는 반경 110 mm 및 82.15 mm의 원판공진기 단독으로 직

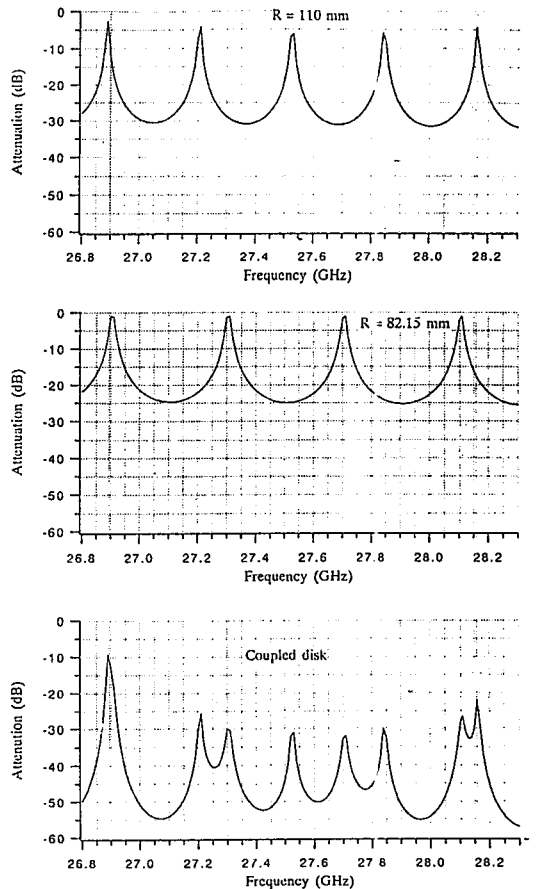


그림 3. 단독공진기 및 복합공진기의 주파수 특성  
Fig. 3. The frequency characteristics of the individual resonators and the coupled resonator.

표 2. 단독원판공진기의 공진주파수

Table 2. Resonance frequencies of the individual resonators.

R=110 mm공진기		R=82.15 mm공진기	
모드차수	공진주파수 (GHz)	모드차수	공진주파수 (GHz)
75	26.89	55	26.90
76	27.21	56	27.31
77	27.53	57	27.71
78	27.84	58	28.11
79	28.16		

선도파로에 의해 입출력 될 때의 주파수 특성을 나타낸다.

Coupled disk는 그림 1의 복합공진기의 주파수 특성을 나타낸다. 각각의 단독원판공진기의 공진주파수는 표 2에 나타낸다.

그림 3에서 반경이 110 mm인 단독원판공진기의 경우 공진주파수 간격은 약 320 MHz이며, R=82.15 mm의 경우 공진주파수 간격은 약 400 MHz 인 것을 알 수 있으며 26.90 GHz부근에서 원판공진기 1과 2의 공진주파수가 비교적 일치하는 것을 알 수 있다. 이 경우 원판공진기 1의 모드 차수는 75이고 원판공진기 2의 모드차수는 55이다. 28.11 GHz부근에서 원판 공진기 1과 2의 공진주파수가 10 MHz정도 떨어져 있으며, 이 부근의 주파수에서도 26.90 GHz 보다는 약하지만 비교적 강한 공진 피크가 발생함을 알 수 있다. 따라서, 공진주파수 간격은 1.2 GHz보다 커지는 것을 알 수 있다.

### III. 실험과 검토

본 실험을 위해 비유전율 2.06인 테프론으로 원판공진기 및 유전체 도파로를 제작하였다. 복합공진기는 제작된 2개의 테프론 원판공진기와 3개의 직선도파로로 구성한다. 측정에 있어서는 HP8510 회로망 분석기를 사용하였다. 복합공진기의 공진주파수 측정에 앞서, 복합공진기를 구성하고 있는 각각의 원판공진기의 공진특성을 측정한다. 그림 4는 실험의 개략도를 나타낸다.

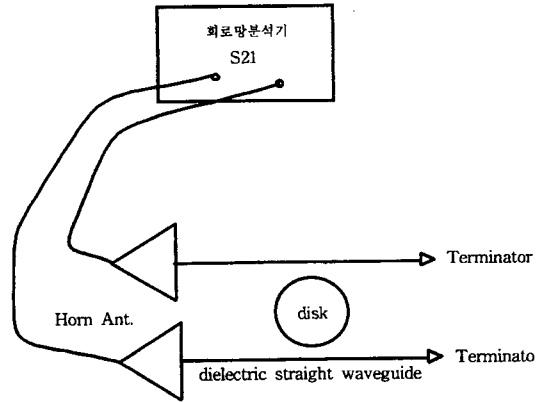


그림 4. 단독 원판공진기의 공진주파수 측정장치  
Fig. 4. The experiment setup of the individual resonator.

그림 4에서 혼안테나를 사용하여 입력부인 직선도파로의  $E_{1y}^{11}$  모드를 여기 시키면 여기된 전력은 모드결합을 통해 공진기의  $WGM_{m,1,1}$  모드를 형성한다. 또한 형성된  $WGM_{m,1,1}$  모드는 다시 출력부의 직선도파로와 모드결합하여 출력부의 직선도파로의  $E_{2y}^{11}$  모드를 형성한다. 이렇게 형성된 모드의 전력은 혼안테나를 통해 회로망 분석기로 입력된다. 이런 방법으로 반지름 110 mm 및 82.15 mm의 공진기의 공진주파수특성을 측정한 결과를 그림 5 및 그림 6에 나타낸다.

그림 5에서 공진 피크는 26.933 GHz, 27.231 GHz, 27.531 GHz, 27.829 GHz 및 28.127 GHz에

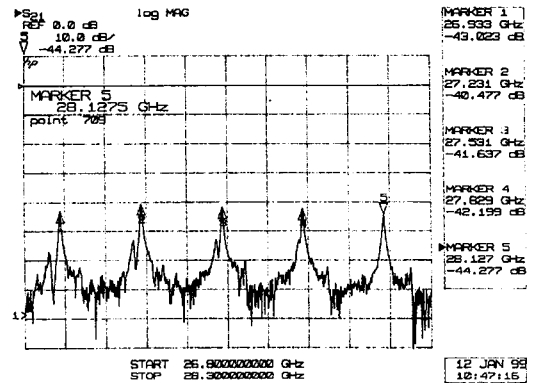


그림 5. 반지름 110 mm의 단독원판공진기의 공진주파수 특성  
Fig. 5. The resonance characteristics of the individual resonators with radius 110 mm.

서 나타남을 알 수 있다. 그 결과 공진주파수 간격은 298 MHz, 300 MHz, 298 MHz, 298 MHz임을 알 수 있다. 또한 그림에서 첫 번째부터 네 번째 모드까지 Split이 발생하고, 첫 번째부터 세 번째 모드까지 각 모드사이에 Transmission Zero 점이 생김을 알 수 있다. 그 이유는 본 논문에서 사용하는 유전체 직선도파로의 끝부분의 테이프로 가공하여 반사가 일어나지 않도록 하고 있으나 미세하나마 반사가 생겨 직선도파로에서 공진이 발생하기 때문으로 여겨진다.

그림 6에서 공진 피크는 27.017 GHz, 27.420 GHz, 27.825 GHz, 및 28.228 GHz에서 나타남을 알 수 있다. 그 결과 공진주파수간격은 403 MHz, 405 MHz 및 403 MHz임을 알 수 있다. 그림 5와 6을 비교해서 보면, 반지름 110 mm 및 82.15 mm의 원판 공진기를 결합시켜 복합공진기를 구성할 경우, 각각의 공진주파수가 비교적 일치하는 27.82 GHz 부근에서 복합공진기의 공진 피크가 나타날 것으로 예상할 수 있다. 그림 7은 복합공진기의 공진주파수 측정을 위한 장치의 구성도를 나타낸다.

그림 7의 복합공진기는 원판과 원판 사이에 직선도파로를 삽입한 구조로, 원판과 원판간의 W. G. 모드간의 모드결합을 방지하도록 설계되었다. 회로망 분석기로 s21을 측정한 결과를 그림 8에 나타낸다.

그림 8에서 공진 피크는 26.929 GHz 및 27.823 GHz부근에서 나타남을 알 수 있다. 그러나 26.929

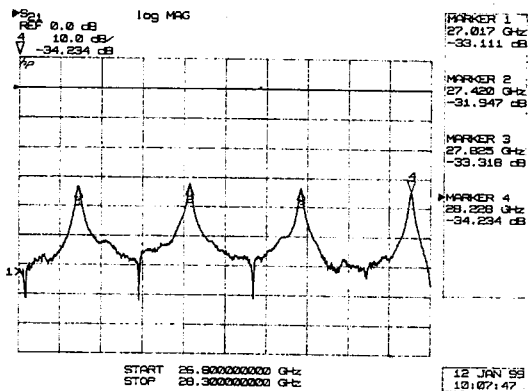


그림 6. 반지름 82.15 mm의 단독 원판공진기의 공진주파수 특성

Fig. 6. The resonance characteristics of the individual resonators with radius 82.15 mm.

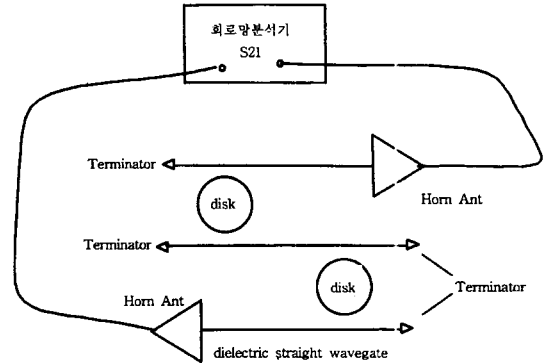


그림 7. 복합공진기의 공진주파수 측정장치의 구성도  
Fig. 7. The experiment setup of resonance frequencies for the coupled resonator.

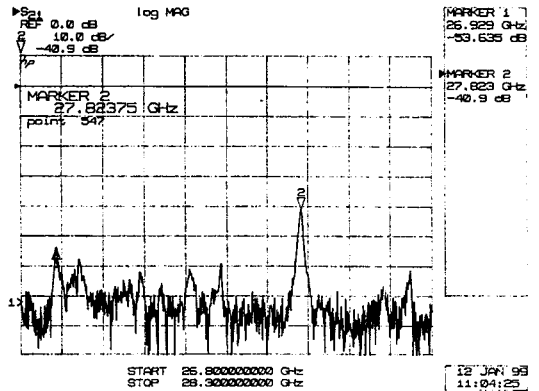


그림 8. 복합공진기의 공진주파수 특성

Fig. 8. The resonance frequency characteristics of the coupled resonator.

GHz부근에서 나타나는 공진 피크는 각각의 원판의 공진주파수가 비교적 떨어져 있어 감쇠가 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 27.823 GHz부근에 나타나는 공진 피크는 각각의 원판공진기의 공진 피크가 동시에 나타나는 주파수로 비교적 좋은 공진주파수 특성을 보이고 있다. 그 외의 주파수 영역에서는 공진 피크는 나타나지 않는다. 이러한 결과를 볼 때, 복합공진기의 공진주파수 간격이 확장된 것을 알 수 있다.

그림 9는 원판과 원판 사이에 직선도파로를 삽입하지 않은 구조로 원판과 원판간의 W. G. 모드간의 모드결합이 존재하도록 설계한 복합공진기를 나타낸다. 그때의 공진 주파수 특성을 그림 10에 나타내

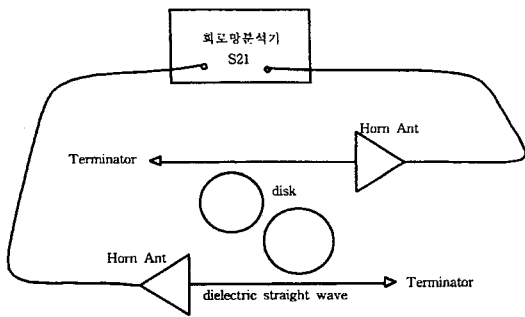


그림 9. W. G. 모드간의 모드결합이 존재하는 복합 공진기의 구조 및 측정장치

Fig. 9. The structure and experiment setup for the coupled resonator having the mode coupling between the W. G. modes.

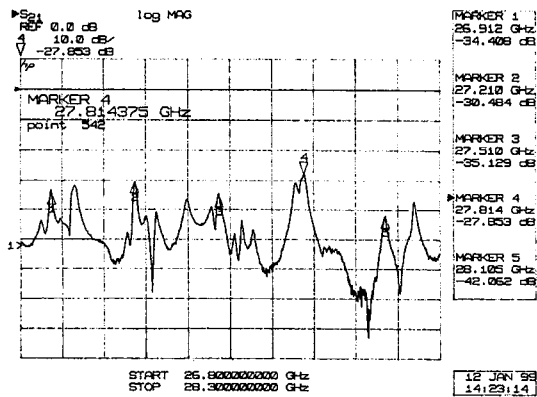


그림 10. W. G. 모드간의 모드결합이 존재하는 복합 공진기의 공진주파수 특성

Fig. 10. The resonance frequency characteristics of the coupled resonator having the mode coupling between the W. G. modes.

었다.

그림 10에서 보면 27.814 GHz부근에서 두 개의 피크가 합쳐진 형태로 공진 피크가 나타난다. 이러한 이유는 원판과 원판간의 W. G. 모드의 결합으로 인해 공진주파수가 변동된 결과이다. 따라서 복합공진기를 설계할 때는 원판과 원판 사이의 모드결합이 일어나지 않는 구조로 설계되어야 복합공진기의 특성을 얻을 수 있는 것을 알 수 있다.

이상의 결과를 통해, 본 논문에서 제안한 복합공진기가 공진주파수의 간격을 확장시키는 것을 확인

할 수 있다. 그러나 복합공진기의 공진주파수의 이론 값과 측정값간에는 오차가 존재하는데 그러한 오차는 본 논문에서 채택한 W. G. 모드의 고유치가 가지는 오차<sup>9)</sup>에서 기인하며, W. G. 모드의 고유치가 더욱 정확해지면, 본 논문에서 제안한 복합공진기의 이론 값과 실험 값의 오차도 감소할 것으로 여겨진다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 W. G. 모드 공진기의 공진주파수 간격을 확장시키기 위해 두 개의 원판공진기를 결합시킨 새로운 형태의 복합공진기를 제안하였다. 또한, 공진기와 외부선로간의 모드결합을 고려한 해석 방법으로 공진주파수를 계산하였다. 그 결과, 복합공진기의 공진주파수는 각각의 원판공진기의 공진주파수가 일치하는 곳에서 공진이 일어나는 것을 알 수 있었다. 실험을 통하여 각각의 단독 원판공진기의 공진주파수를 측정하였고, 복합공진기를 구성하여 공진주파수를 측정하였다. 그 결과, 각각의 단독공진기의 공진 피크가 동시에 나타나는 주파수에서 복합공진기의 공진 피크가 나타남을 알 수 있었고, 본 논문에서 제안한 이론의 타당성을 확인할 수 있었다. 또한, 복합공진기를 설계할 때 원판과 원판간의 W. G. 모드의 결합이 발생하지 않는 구조로 설계해야함을 실험적으로 알 수 있었다.

앞으로의 과제는 W. G. 모드 고유치가 가지는 오차를 해결하는 연구가 요구되고, 고유전율의 유전체에 대해 본 연구방법을 적용함으로써 실제 회로에 응용할 수 있도록 하는 연구가 요구된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] D. Cros and P. Guillon, "Whispering Gallery dielectric resonator modes for W-band devices," *IEEE MTTs*, vol. 38, no. 11, pp.1667-1674, Nov., 1990.
- [2] C. Vedrenne and J. Aranud, "Whispering-gallery modes of dielectric resonator," *IEE Proc.* vol. 129, Pt. H, no. 4, pp.183-187, Aug., 1982.
- [3] X. H. Jiao, P. Guillon, L. A. Bermudez and P.

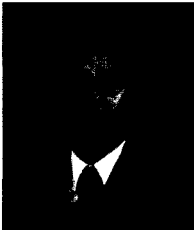
Auxemery, "Whispering-Gallery modes of dielectric structure: Applications to millimeter-wave bandstop filters," *IEEE MTTs*, vol., 35, no. 12, pp. 1169-1175, Dec., 1987.

- [4] H. Peng, "Study of Whispering Gallery modes in double disk sapphire resonators," *IEEE MTTs*, vol. 44. no. 6, pp.848-853, Jun., 1996.
- [5] 苫米地義郎, 松村和仁, "非平行誘電體圓導波路의結合特性," 日本電子情報通信學會論文誌 C-I, vol. J77-C-I, no. 2, pp. 57 - 63, Feb. 1994.
- [6] 黃宰孝, 上野智弘, 苫米地義郎, 松村和仁, "勵振用外部回路と結合した誘電體圓板共振器의共振周波數攝動," 日本電子情報通信學會論文誌 C-I, vol. J79-C-I, no. 11, pp.420-427, Nov. 1996.
- [7] 황재효, 민경일, 구경완, "여기부와의 전자파 결합 현상을 고려한 위스퍼링 갤러리 모드 유

전체 공진기의 공진주파수에 관한 연구," 한국전자과학회논문지, 제9권, 제5호, pp.603-613, 1998년 10월.

- [8] 황재효, 권현국, 민경일, 구경완. "W. G. 모드 유전체 복합공진기에 관한 연구," 한국통신학회 하계종합학술발표회논문집, 하권, pp. 1293-1296, 1996.
- [9] 苫米地義郎, 松村和仁, "誘電體圓板共振器의 위스퍼링갠러리모드의共振特性について," 日本電子情報通信學會論文誌 C-I, vol. J75-C-I, no. 11, pp. 687 - 693, Nov., 1992.
- [10] E. A. J. Marcatili, "Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics," *The Bell System Technical Journal*, pp. 2071-2102, Sep., 1969.

황 재 효



1990년 2월: 아주대학교 전자공학과(공학사)  
 1992년 8월: 광운대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 1996년 9월: 일본 우츠노미야대학 대학원 생산정보공학전공(공학박사)

1996년 3월 ~ 현재: 영동대학교 정보·전자공학부 조교수

[주 관심분야] 전파전파 및 초고주파 회로

구 경 완



1983년 2월: 충남대학교 전자공학과(공학사)  
 1985년 2월: 충남대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 1992년 2월: 충남대학교 대학원 전자공학과(공학박사)  
 1989년 3월~1994년 2월: 충청전

문대학 전자과 조교수  
 1994년 3월~현재: 영동대학교 정보·전자공학부 부교수  
 1998년 3월~1998년 12월: 일본 우츠노미야대학 연구(광파회로소자 연구)

[주 관심분야] 광파회로소자 및 반도체소자

민 경 일



1977년 2월: 울산대학교 전자공학과(공학사)  
 1984년 8월: 충남대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 1995년 2월: 충남대학교 대학원 전자공학과(공학박사)  
 1996년 3월~현재: 영동대학교 정

보·전자공학부 부교수

[주 관심분야] 안테나 및 초고주파 회로