

MIC 구조에서의 링 유전체 공진기의 양호도

정회원 이주섭*, 한영훈**, 윤원상**, 임상호**, 김영식**

Q-factors of a Ring Dielectric Resonator in an MIC environment

Juseop Lee*, Younghoon Han**, Won-Sang Yoon**, Sang-Ho Lim**, and Young-Sik Kim**
Regular Members

요 약

Microwave integrated circuit(MIC) 구조에서의 링 유전체 공진기에 대하여 dielectric waveguide model(DWM) 방법에 의한 전자계 해석으로부터 모드의 도체 양호도, 유전체 양호도 및 무부하 양호도를 얻을 수 있는 식을 유도하였다. 링 유전체 공진기의 평형 도체판 구조에서 모드의 공진 주파수와 대역폭의 측정치로부터 양호도 계산에 필요한 링 유전체 공진기의 유전율, 유전 손실 등을 도출하였다. 무부하 양호도에 대한 이론치와 실험치를 비교한 결과 약 5% 이내의 오차를 보였다.

ABSTRACT

For a ring dielectric resonator(DR) in a microwave integrated circuit(MIC) environment, the conductor Q-factor, dielectric Q-factor, and unloaded Q-factor of the mode are derived from the field analysis of the dielectric waveguide model(DWM) method. To calculate the Q-factors, a dielectric constant and a dielectric loss of a ring DR have been obtained from the resonant frequency and bandwidth in parallel plates with a ring DR for a mode. The calculated values of an unloaded Q have shown good agreements with the experimental ones within about 5% error.

I. 서론

원통형 및 링 모양의 유전체 공진기는 높은 양호도를 가지며 온도에 안정한 세라믹 재료로 만들어지며 부피가 작으므로 MIC에서 높은 집적도를 나타내어 수동 및 능동 초고주파 회로에 많이 응용되고 있다^{1, 2}.

Itoh와 Rudokas³는 MIC 구조에서의 유전체 공진기를 유전체 도파관으로 모델화한 DWM 방법으로 각 영역에서의 전자계를 근사적인 함수로 나타내어 공진 주파수를 계산하였다. 그러나 각 영역에서의 정확한 전자계 분포를 수학적 함수로 나타낼 수 없으므로 이에 따른 오차가 공진 주파수 및 양호도의 계산 결과에 나타나게 된다.

Kajfez⁴는 Perturbational method를 이용하여 전자계 분포를 모르더라도 한 표피 두께(skin depth)만큼 도체 위치가 변할 때 공진 주파수의 변화를 계산하여 간접적으로 도체의 위치 변화에 의한 공진 주파수의 변화를 분석하여 도체 양호도만을 계산하는 방법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 도체 위치 변화에 의한 공진 주파수의 변화를 정확히 계산하여야 하기 때문에 수치 해석적인 방법을 사용할 경우에는 오히려 더 복잡해질 수 있다. 또한 일반적으로 한 표피 두께 만큼의 도체 위치 변화에 의한 공진 주파수의 변화가 작기 때문에 정확히 측정하기 어려우므로 임의의 도체 위치 변화에 의한 공진 주파수의 변화를 계산하여 도체 양호도를 구한다. 그러나 도체 위치 변화에 의한 공진 주파수 변화가 선형적인 관계이면 간단히 구할 수 있으나

* LG정보통신(ifsnow@kucn.korea.ac.kr)

** 고려대학교 전자공학과

논문번호: 98467-1027, 접수일자: 1998년 10월 27일

비선형 관계일 경우는 오차가 발생할 수도 있다. 또한 표면 거칠기(surface roughness)에 의한 표면 저항(surface resistance)의 변화에 따른 도체 손실의 변화를 고려하지 않았다.

Mongia와 Bhartia^[5]는 DWM 방법에서의 오차를 줄이기 위하여 원통형 유전체 공진기에 대하여 감쇄 상수에 유효 유전율을 도입하여 도체 양호도를 계산하고 결과값을 rigorous method에 의한 결과값과 비교하였으나 이 방법에서도 도체의 표면 거칠기를 고려하지 않았다.

본 논문에서는 DWM 방법에 의한 링 유전체 공진기의 전자계 해석을 통하여 Q_c , Q_a , Q_u 를 계산하기 위한 식을 유도하였고 Q_u 를 측정값과 비교하였다. Q_c 를 계산할 때는 표면 거칠기를 고려하여 오차를 줄였다. 그리고 양호도 계산에 필요한 링 유전체 공진기의 유전율과 유전 손실을 평형 도체판에 대한 TE₀₁₁ 모드의 공진 주파수와 대역폭으로부터 구하는 식을 부록에 제시하였다.

II. MIC 구조에서의 양호도

1. 전자계 해석 및 양호도 계산

그림 1은 MIC 구조에서의 링 유전체 공진기를 나타내고 있다. 양호도를 계산하기 위해서는 먼저 각 경계면에서 경계 조건을 만족하는 각 영역에서의 H_z 를 정의해야 한다. 각 영역에서의 H_z 는 DWM 방법으로 식 (1)과 같이 근사적으로 정의할 수 있다.

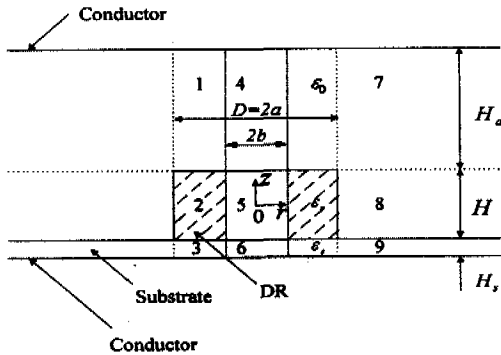


그림 1. MIC 구조에서의 링 유전체 공진기

$$H_{zi} = H_0 A_i B_0(r) C(z) \quad (1)$$

이 때,

$$\begin{aligned} B_{\alpha(r)} &= Z_0(hr) & i=1,2,3 \\ &= I_0(pr) & i=4,5,6 \\ &= K_0(pr) & i=7,8,9 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C(z) &= \cos(\beta z) + B_2 \sin(\beta z) & i=2,5,8 \\ &= \sinh(-\alpha_1(z-s)) & i=1,4,7 \\ &= \sinh(\alpha_3(z+t)) & i=3,6,9 \end{aligned}$$

$$Z_n(hr) = J_n(hr) - \frac{J_0(x)}{N_0(x)} N_n(hr)$$

J_n : 제 1종의 n 차 베셀 함수

N_n : 제 2종의 n 차 베셀 함수

K_n : 제 2종의 n 차 변형 베셀 함수

I_n : 제 1종의 n 차 변형 베셀 함수

이다. 또한 식 (1)에서의 계수는 원통형 유전체 공진기인 경우에 대하여 적용한 방법[6]을 이용하여 링 유전체 공진기에 대한 경계 조건으로부터 아래와 같이 구할 수 있다.

$$B_2 = \frac{\beta \tan(\beta H/2) \tanh\{\alpha_1(s-H/2) - \alpha_1\}}{\alpha_1 \tan(\beta H/2) + \beta \tanh\{\alpha_1(s-H/2)\}}$$

$$A_1 = \frac{\cos(\beta H/2) + B_2 \sin(\beta H/2)}{\sinh\{\alpha_1(s-H/2)\}}$$

$$A_3 = \frac{\cos(\beta H/2) - B_2 \sin(\beta H/2)}{\sinh\{\alpha_3(t-H/2)\}}$$

$$A_5 = \frac{Z_0(hb)}{I_0(pb)}$$

$$A_3 = A_1 A_5$$

$$A_6 = A_3 A_5$$

$$A_8 = \frac{Z_0(ha)}{K_0(pa)}$$

$$A_7 = A_1 A_8$$

$$A_9 = A_3 A_8$$

그리고 파수 및 감쇄 상수는 다음의 관계를 갖는다.

$$k_0^2 \epsilon_r = h^2 + \beta^2$$

$$k_o^2 = \beta^2 - p^2$$

$$k_o^2 = h^2 - \alpha_3^2$$

$$k_o^2 \epsilon_s = h^2 - \alpha_3^2$$

위 식에서 링 유전체 공진기의 유전율은 평행 도체판 사이에 링 유전체 공진기를 삽입하여 공진 주파수의 측정값으로부터 구할 수 있는 관계식을 부록에 수록하였다.

식 (1)과 맥스웰 방정식으로부터 각 영역에서의 전계와 자계를 구하고 각 경계면에서 경계 조건을 적용하면 파수, 감쇄 상수 및 공진 주파수를 구할 수 있는 다음의 연립 방정식을 얻을 수 있다^[7].

$$\frac{I_1(pb)}{nl(nh)} - \frac{Z_1(hb)}{h7(hh)} = 0 \tag{2a}$$

$$\frac{Z_1(ha)}{hZ_0(ha)} + \frac{K_1(pa)}{pK_0(pa)} = 0 \tag{2b}$$

$$BH = \tan^{-1} \left[\frac{\alpha_1}{\beta} \coth(\alpha_1 H_a) \right] + \tan^{-1} \left[\frac{\alpha_3}{\beta} \coth(\alpha_3 H_s) \right] \tag{2c}$$

각 영역에서 저장된 전기적 에너지는

$$W_{ei} = \frac{1}{4} \epsilon_i \int |E_{\theta i}|^2 dv,$$

이므로 각 영역에서의 전자계를 이용하여 유도하면 다음과 같다.

$$W_{e1} = H_0^2 \frac{\omega^2 \mu_0^2 \epsilon_0 \pi}{2h^2} A_1^2 \left(\frac{a^2}{2} Z_a - \frac{b^2}{2} Z_b \right) \times \frac{1}{4\alpha_1} [\sinh 2\alpha_1 H_a - 2\alpha_1 H_a]$$

$$W_{e2} = H_0^2 \frac{\omega^2 \mu_0^2 \epsilon_0 \epsilon_r \pi}{2h^2} \left(\frac{a^2}{2} Z_a - \frac{b^2}{2} Z_b \right) \times \frac{H}{2} \left[1 + \frac{\sin \beta H}{\beta H} + B_2^2 \left(1 - \frac{\sin \beta H}{\beta H} \right) \right]$$

$$W_{e3} = H_0^2 \frac{\omega^2 \mu_0^2 \epsilon_0 \epsilon_s \pi}{2h^2} A_3^2 \left(\frac{a^2}{2} Z_a - \frac{b^2}{2} Z_b \right) \times \frac{1}{4\alpha_3} [\sinh 2\alpha_3 H_s - 2\alpha_3 H_s]$$

$$W_{e4} = H_0^2 \frac{\omega^2 \mu_0^2 \epsilon_0 \pi}{2p^2} A_5^2 \frac{b^2}{2} I \times \frac{H}{2} \left[1 + \frac{\sin \beta H}{\beta H} + B_2^2 \left(1 - \frac{\sin \beta H}{\beta H} \right) \right]$$

$$W_{e8} = H_0^2 \frac{\omega^2 \mu_0^2 \epsilon_0 \pi}{2p^2} A_8^2 \frac{a^2}{2} K \times \frac{H}{2} \left[1 + \frac{\sin \beta H}{\beta H} + B_2^2 \left(1 - \frac{\sin \beta H}{\beta H} \right) \right]$$

이 때, 영역 4, 6, 7, 9에 저장되는 에너지는 거의 존재하지 않으므로 무시할 수 있고, 위 식에서 사용한 상수는 다음과 같다.

$$Z_a = Z_0^2(ha) + Z_1^2(ha) - \frac{2Z_0(ha)Z_1(ha)}{ha}$$

$$Z_b = Z_0^2(hb) + Z_1^2(hb) - \frac{2Z_0(hb)Z_1(hb)}{hb}$$

$$K = K_0^2(pa) - K_1^2(pa) + \frac{2K_0(pa)K_1(pa)}{pa}$$

$$I = I_1^2(pb) - I_0^2(pb) + \frac{2I_0(pb)I_1(pb)}{pb}$$

위에서 유도한 각 영역에서의 저장된 에너지로부터 저장된 총에너지는 $W_e = \sum W_{ei}$ 이므로 참고 문헌 [8]에서 제시한 관계식으로부터 Q_d 에 대하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_d = \frac{\sum W_{ei}}{W_e \tan \delta_a + W_{e8} \tan \delta_s} \tag{3}$$

식 (3)에서 사용한 $\tan \delta_a$ 는 유전체 기판(dielectric substrate)의 유전체 손실이고 유전체 공진기의 유전 손실을 나타내는 $\tan \delta_a$ 에 관한 사항은 부록에 보였다.

영역 i 에 존재하는 법선 성분의 자계에 의한 도체 손실은

$$P_{ci} = \frac{1}{2} \int R_s |J_s|^2 ds = \frac{R_s}{2} \int |H_{\theta i}|^2 ds \quad (i=1, 3, 4, 6, 7, 9)$$

이므로 이를 계산하기 위해서 각 영역에서의 법선 성분 자계에 의한 위, 아래 도체면에서의 도체 손실 (conductor loss)을 계산하면 다음과 같다.

$$P_{c1} + P_{c3} = \frac{\pi H_o^2 (R_{s1} a_1^2 A_1^{2+R_s} a_3^2 A_3^2)}{2h^2} \times (a^2 Z_a - b^2 Z_b) \quad (4a)$$

$$P_{c4} + P_{c6} = \frac{\pi H_o^2 (R_{s4} a_4^2 A_4^{2+R_s} a_6^2 A_6^2)}{2p^2} \times b^2 l \quad (4b)$$

$$P_{c7} + P_{c9} = \frac{\pi H_o^2 (R_{s7} a_7^2 A_7^{2+R_s} a_9^2 A_9^2)}{2p^2} \times a^2 K \quad (4c)$$

이 때, R_{s1} 와 R_{s3} 은 각각 위, 아래 도체의 표면 저항이다. 표면 저항은 도체의 표면이 완전히 평평한 경우 $\sqrt{\pi\mu/\sigma}$ 으로 표현되지만 완전히 평평한 경우가 아니면 표면 거칠기에 의한 도체에서의 손실 변화 즉, 표면 저항의 변화를 고려하여야 한다^[9]. 표면 거칠기에 의한 표면 저항의 변화는 다음 절에서 알아보기로 한다.

앞에서 구한 저장된 에너지와 도체 손실을 이용하여 다음과 같이 도체 양호도를 구할 수 있다.

$$Q_c = \frac{2w \sum W_{ei}}{\sum P_{ci}} \quad (5)$$

따라서 무부하 양호도 Q_u 는 도체 양호도 Q_c 및 유전체 양호도 Q_d 로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q_u = \left(\frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_c} \right)^{-1} \quad (6)$$

2. 표면 거칠기

참고 문헌 [9]에서 초고주파 대역에서 표면 거칠기에 의한 와전류 손실(eddy current loss)을 계산하였다. 즉, 그림 2와 같이 도체의 표면이 완벽하게 평평하지 않고 홈이 존재함으로써 인하여 도체가 완전히 평평한 경우보다 손실이 더 많이 발생하게 된다. 자계에 의해서 유도된 와전류의 방향과 홈의 방향이 평행한 경우는 직교하는 경우보다 훨씬 작으므로 본 논문에서는 와전류의 방향과 홈의 방향이

직교하는 경우에 대해서 와전류 손실을 고려해 주기로 한다. 그림 3은 그림 2와 같이 홈이 존재하는 도체 내에서의 와전류에 의한 손실 P_o 와 홈이 존재하지 않는 평평한 도체에서의 손실 P_s 의 전력 손실비 P_o/P_s 의 실효 표면 거칠기와 표피 두께의 비 (Δ/δ) 에 대한 그래프^[10]를 나타내고 있다. 그림 3은 가 0, 0.5, 1.0, 1.67인 경우에 대하여 P_o/P_s 를 계산한 후 내삽법(interpolation)을 이용하여 나타낸 것이다.

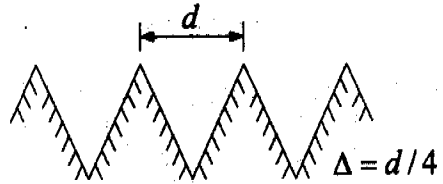


그림 2. 삼각형 홈이 존재하는 도체 표현

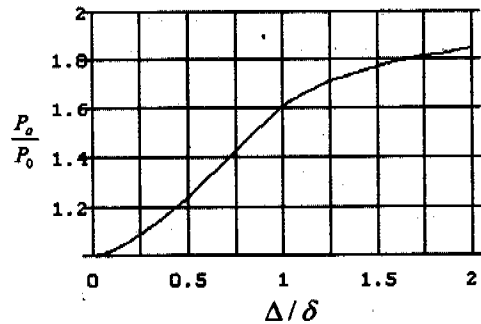


그림 3. 표면 거칠기와 도체 손실과의 관계

그림 3과 같이 표면 거칠기에 인한 도체 손실의 증가는 표면 거칠기에 인한 표면 저항의 증가로 등가적으로 고려해줄 수 있다^[10]. 예를 들어 실효 표면 거칠기와 표피 두께가 같을 때 ($\Delta/\delta=1$)는 도체가 완전히 평평한 경우보다 표면 저항이 약 61% 증가하는 것으로 해석할 수 있다. 그러므로 식 (4)에서의 표면 저항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{s\omega, \omega} = R_{s\omega, \omega 0} (1 + \alpha) \quad (7)$$

이 때, $R_{s\omega, \omega 0}$ 는 홈이 존재하지 않는 경우의 위, 아래 도체면의 표면 저항으로서 $R_{s\omega, \omega 0} = \sqrt{\pi\mu/\sigma}$ 이고 σ 는 전도율(conductivity)이다. 그리고 α 는 표면 거칠기에 의한 표면 저항 증가율이다. 앞서서도 언급하였듯이 그림 3은 내삽법을 이용하여 구한 그래프이므로 α 를 쉽게 계산하기 위해 근사

식을 구하면 다음과 같다.

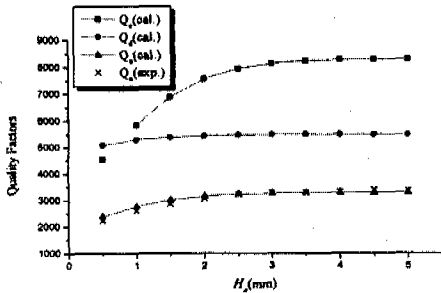
$$\alpha = \{ [(0.280652(\zeta - 1.67) - 0.389282)(\zeta - 1) + 2.06][\zeta - 0.5] + 0.48 \} \zeta \quad (8)$$

$$\zeta = \Delta / \delta, 0 \leq \zeta \leq 2$$

그러므로 식 (7)을 식 (4)에 대입하여 도체에서 발생하는 손실을 계산함으로써 보다 정확한 양호도를 얻을 수 있다.

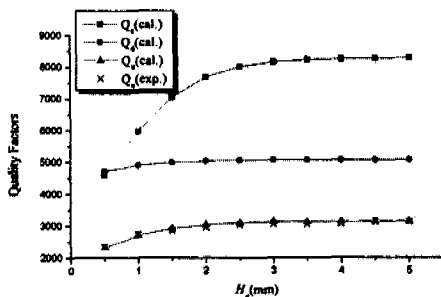
III. 실험 및 결과

그림 4에서 그림1과 같은 구조에서의 유전체 공진기 위의 도체 높이 H_c 의 변화에 따른 도체 양호도 Q_c , 유전체 양호도 Q_d , 무부하 양호도 Q_u 의 변화에 대한 계산치와 무부하 양호도 Q_u 의 실험치를 보였다. Q_u 측정시 위, 아래 도체의 실효 표면 거칠기는 각각 $0.3 \mu\text{m}$, $1.4 \mu\text{m}$ 인 구리판활 사용하였고 참고 문헌 [11]에서 제시한 바와 같이 마이크로스트립라인(microstripline)을 이용하여 측정하였다.



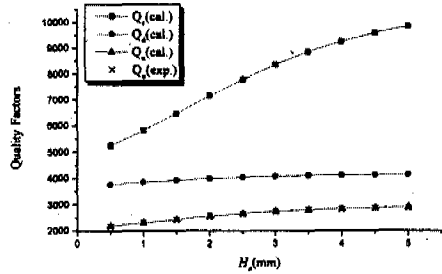
(a) $\epsilon_r = 37.28$, $\epsilon_s = 2.2$, $2a = 7.68\text{mm}$, $2d = 2.0\text{mm}$,
 $H = 3.39\text{mm}$, $H_s = 0.508\text{mm}$,

$$\tan \delta_d^{-1} = 4418 \text{ at } 9.66443\text{GHz}, \tan \delta_s = 0.0009$$



(b) $\epsilon_r = 37.28$, $\epsilon_s = 2.2$, $2a = 7.06\text{mm}$, $2d = 2.0\text{mm}$,
 $H = 3.13\text{mm}$, $H_s = 0.508\text{mm}$,

$$\tan \delta_d^{-1} = 4418 \text{ at } 9.66443\text{GHz}, \tan \delta_s = 0.0009$$



(c) $\epsilon_r = 79.06$, $\epsilon_s = 2.2$, $2a = 19.10\text{mm}$, $2d = 6.0\text{mm}$,

$$H = 9.33\text{mm}, H_s = 0.508\text{mm},$$

$$\tan \delta_d^{-1} = 3553 \text{ at } 2.53839\text{GHz}, \tan \delta_s = 0.0009$$

그림 4. 링 유전체 공진기의 양호도

대부분의 에너지가 유전체 공진기 영역인 영역 2에 존재하므로, 즉 W_2 가 W_0 보다 훨씬 크므로 식 (3)을 이용하여 Q_d 를 계산하면 해당 주파수에서의 유전체 공진기 자체의 양호도($1/\tan \delta_d$)와 거의 같다. 그러나 Q_c 는 도체 높이가 커짐에 따라 도체 경계면에서 자계의 법선 성분이 작아짐으로 해서 증가한다는 것을 보여주고 있다.

식 (2)를 연립하여 플랜 MIC 구조에서의 H_c 의 변화에 따른 근사적인 공진 주파수의 범위를 알 수 있지만 수동 및 능동 초고주파 회로에 응용하기 위해서는 Q_u 가 큰 값을 가지면서 tuning plate의 높이 변화(H_c)에 별로 영향을 받지 않는 범위에서 공진 주파수의 tuning 범위를 선택해서 사용하는 것이 바람직하므로 그림4와 같이 tuning plate의 높이 변화(H_c)를 고려함으로써 적절한 공진 주파수의 사용 범위를 정할 수 있다.

IV. 결론

링 유전체 공진기의 MIC구조에 대하여 전자계 분석으로부터 Q_c , Q_d , Q_u 를 계산하기 위한 식을 도출하였으며, 무부하 양호도 Q_u 의 이론치와 측정치와의 오차는 약 5% 이내였다. 그리고 링 유전체 공진기의 평형 도체판 구조에서 TE_{011} 모드의 공진 주파수와 대역폭의 측정치로부터 양호도 계산에 필요한 링 유전체 공진기의 유전율, 유전 손실 등을 유도하였다.

본 연구에서 보인 전자계 분석 방법은 링 유전체 공진기를 초고주파 여파기, 발진기 등에 이용하기 위해서 유전체 공진기와 마이크로스트립라인과의 결

합 계수 및 링 유전체 공진기 상호간의 결합 계수를 구하는데 응용될 수 있을 것이다.

부 록 : 유전율 및 유전 손실 계산

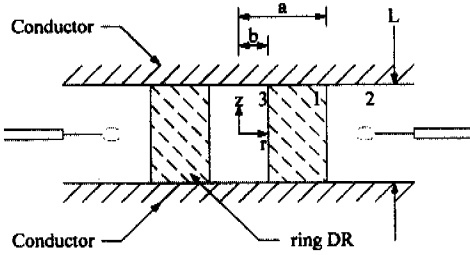


그림 5. 평행 도체판 구조에서의 링 유전체 공진기

그림 5에서와 같이 평행 도체판을 이용하여 링 유전체 공진기의 유전율과 유전 손실을 구하는 식을 유도하기로 한다. 그림 5에서 보인 각 영역에서의 longitudinal magnetic field를 나타내면 다음과 같다.

$$H_{z1} = H_0 Z_0 (hr) \cos(\beta z) \tag{9a}$$

$$H_{z2} = H_0 C_2 K_0 (pr) \cos(\beta z) \tag{9b}$$

$$H_{z3} = H_0 C_3 I_0 (pr) \cos(\beta z) \tag{9c}$$

식 (9)에서 사용한 함수는 II-1절에서 사용한 함수와 같고 파수는 다음과 같이 정의된다.

$$\beta^2 + h^2 = \epsilon_r k_0^2$$

$$\beta^2 - h^2 = k_0^2$$

$$\beta = \frac{\pi}{L}$$

$r=a$ 와 $r=b$ 에서 경계 조건을 만족하여야 하므로 식 (9)의 계수는 다음과 같다.

$$C_2 = \frac{Z_0(ha)}{K_0(pa)}$$

$$C_3 = \frac{Z_0(ha)}{I_0(pa)}$$

식 (9)의 자계에 대한 표현식으로부터 맥스웰 방

정식을 이용하여 각 영역에서의 자계(H_z 성분)와 전계(E_r 성분)를 구한 후 전계 및 자계에 대하여 각 경계면에서 경계 조건을 적용하면 다음의 연립 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{Z_1(ha)}{hZ_0(ha)} + \frac{K_1(pa)}{pK_0(pa)} = 0 \tag{10a}$$

$$\frac{I_1(pb)}{pI_0(pb)} - \frac{Z_1(hb)}{hZ_0(hb)} = 0 \tag{10b}$$

그림 5와 같은 방법으로 링 유전체 공진기의 공진 주파수를 측정하고 식 (10)을 만족하는 전파 상수 h 및 p 를 구하여 다음의 식으로부터 유전체 공진기의 유전율 ϵ_r 을 계산할 수 있다.

$$\epsilon_r = \left(\frac{\lambda_0}{2\pi}\right)^2 (h_2^2 + p_2^2) + 1$$

링 유전체 공진기의 유전 손실을 구하기 위해서는 먼저 각 영역에 저장된 에너지와 도체 손실을 계산하여야 한다. 각 영역에 저장된 전기적 에너지와 도체 손실은 다음과 같다.

$$W_{e1} = H_0^2 \frac{\omega^2 \mu^2 \epsilon_0 \epsilon_r \pi}{2h^2} \times \frac{L}{2} \times \left(\frac{a^2}{2} Z_a - \frac{b^2}{2} Z_b\right)$$

$$W_{e2} = H_0^2 \frac{\omega^2 \mu^2 \epsilon_0 \pi}{2p^2} C_2^2 \times \frac{L}{2} \times \frac{a^2}{2} K$$

$$W_{e3} = H_0^2 \frac{\omega^2 \mu^2 \epsilon_0 \pi}{2p^2} C_3^2 \times \frac{L}{2} \times \frac{b^2}{2} I$$

$$P_{c1} = H_0^2 2\pi R_s \frac{\beta^2}{h^2} \times \left(\frac{a^2}{2} Z_a - \frac{b^2}{2} Z_b\right)$$

$$P_{c2} = H_0^2 2\pi R_s \frac{\beta^2}{p^2} C_2^2 \times \frac{a^2}{2} K$$

$$P_{c3} = H_0^2 2\pi R_s \frac{\beta^2}{p^2} C_3^2 \times \frac{b^2}{2} I$$

W_{e1} , W_{e2} , W_{e3} 는 영역 1, 2, 3에 저장된 전기적 에너지이고, P_{c1} , P_{c2} , P_{c3} 은 영역 1, 2, 3에 존재하는 자계에 의한 도체 손실이다. 위 식에서도 II 장에서와 같이 도체의 표면 거칠기를 고려한 표면 저항 값을 대입하여야 한다.

식 (5)를 이용하여 Q_e 를 계산하고 측정된 공진 주파수, 대역폭, 삽입 손실을 이용하여 Q_s 를 구하

김 영 식 (Young-Sik Kim) 정회원
1973년 2월 : 고려대학교 전자공학과(공학사)
1986년 5월 : 메사츄세츠대학교 대학원 전기 및 컴
 퓨터공학과(공학석사)
1988년 5월 : 메사츄세츠대학교 대학원 전기 및 컴
 퓨터공학과(공학박사)
1989년 2월~1993년 2월 : 한국전자통신연구소 이동
 통신연구단
1993년 3월~현재 : 고려대학교 전기공학과 교수
e-mail : yskim@kucn.korea.ac.kr