

제정 기술표준원고시 제2001 - 32호 (2001. 2. 15)
개정 기술표준원고시 제2002 - 1280호 (2002.10.12)

전기용품안전기준

K 60377-2

[KS C IEC 2002]

주파수 300MHz 이상에서 절연재료의
유전특성 측정방법

제2부 : 공진법

전 기 용 품 안 전 기 준

(K 60377-2)

주파수 300MHz 이상에서 절연재료의 유전특성 측정방법

- 제2부 : 공진법

Recommended methods for the determination of the dielectric properties of insulating materials at frequencies above 300 MHz

- Part 1 : Resonance methods

서 문 본 규격은 1977년 제1판으로 발행된 IEC 60377-2, Methods for the determination of the dielectric properties of insulating materials at frequencies above 300MHz - Part 2: Resonance methods를 번역하여 기술적 내용 및 규격서의 서식을 변경하지 않고 제정한 한국산업규격(KS C IEC 60377-2 : 2002)과 부합화한 전기용품안전기준이다.

1. 목적 및 적용범위

본 규격은 공진법을 통해 고주파 영역에서 고체 및 액체 또는 가용성 유전재료와 관련된 손실지수 즉, 비유전율 및 유전손상수 등의 값을 측정하기 위한 절차에 적용한다. 기술된 방법은 주로 저손실 시료에 적용한다.

2. 개요

본 규격에서 기술된 측정방법에는 공진 측정기를 사용한다. 이러한 장비는 기본적으로 임의 동작과장의 1/2배수 주기에서 양 끝단이 단락된 일정 단면적의 전송선으로 구성되어 있다. 시료를 공진기에 삽입했을 시에 동작 과장이 변화된다. 재차 공진을 형성하는데 필요한 주파수 변위나 길이 변화 및 Q-지수의 관련 변화는 시료의 유전적 특성을 측정하기 위한 것이다.

기타 시험법과 비교하여 공진법의 장점은 매우 높은 무부하 Q-지수를 가진다는 점인데, 이는 적절한 파 모드 및 설계를 통해 얻을 수 있다; 본 방법을 통해 매우 낮은 손실계수를 갖는 시료를 측정할 수 있다. 따라서, 일반적으로 본 시험법의 이점은 특수한 측정상 문제(주파수, 시료의 모양 및 유전특성)를 해결하기 위해 공진기를 구성할 수 있다는 점이다. 모호한 결과가 나오는 것을 막기 위해 최종적인 전계 형성을 주의 깊게 조사할 필요가 있다. 그러므로, 이 공진기기는 필연적으로 공진기 내의 시료의 위치, 유전특성, 양 및 형태에 따라 최종적인 시험주파수를 달리하는 협대역 기기인 것이다.

공진기는 다음과 같은 형태가 보통 사용된다:

캐버티의 종류	주파수 범위	시료의 모양	비고	No.
재투입형 캐버티	100MHz~1GHz	디스크	$\epsilon_r \leq 10$	A.1
원통형 캐버티	1GHz~3GHz	튜브		A.2
캐버티 (폐쇄형)	1GHz~30GHz	디스크, 봉		A.3
개방형 캐버티	3GHz 초과	디스크	$\epsilon_r > 5$	A.4
광학 공진기	30GHz 초과	판상		A.5

비고. 주파수와 유전율에 대한 극한값은 단지 근사값일 뿐이며 손실 지수나 유전율에 대한 감도가 줄어들 경우에는 초과할 수도 있다(KS C IEC 60377-1의 4항을 참조하시오).
공진기의 종류 및 관련된 측정 절차와 평가방법에 대해 부속서 A에서 자세히 기술하고 있다.

3. 측정장비(그림 1 참조)

측정장비는 다음과 같이 구성되어 있다 :

3.1 충분한 양으로 원하는 주파수를 공급하는 공진기. 주파수는 원하는 주파수 범위에서 수동 또는 자동으로 동조 가능한 것이 바람직하다.

비고. 표시 소자와 연결하여 사용하는 스위치 주파수 발생기는 신속한 시험용으로 편리하다. 공진 곡선의 외형이 과도하게 높은 스위치 속도에 영향을 받지 않도록 주의하는 것이 바람직하다.
출력은 동조 가능한 것이 바람직하다. 출력값을 조절할 수 있는 자동제어(ALC) 장치가 있는 것이 바람직하다.

비고 1. 고정 주파수 시험절차에서 수동으로 조정하는 발생기는 충분한 작동안정성을 가져야 한다. 1ppm 미만의 주파수 안정도를 갖는다면 일반적으로 충분한 것으로 본다.

2. 주파수 폴링을 피하기 위해서, 발생기와 회로간에 격리물이나 감쇠 패드를 삽입하는 것이 바람직하다.

필요 없는 잉여 공진을 피하기 위해 고조파 성분은 1% 미만으로 하는 것이 바람직하다.

3.2 시험 주파수에서 충분한 감도를 갖는 검출기. 여러 종류를 수동 또는 자동으로 동조된 발생기와 연결하여 사용한다.

3.2.1 고정된 주파수 측정용 검출기는 충분한 동작안전성을 가져야 한다. a)증폭의 유무에 관계없이 다이오드 전압계 또는 b) 자동 주파수 조정장치의 유무에 관계없이 발생기 출력이 고주파나 저주파로 변조 조정할 수 있는 수신기를 사용할 수 있다.

비고 1. 일반적으로, 광대역 검출기는 발생기에 동조시킬 필요가 없고 공진기가 외부 고주파수 방해로부터 충분히 식별해 낼 수 있기 때문에 편리하다. 하지만 검출기에 입력이 다소 낮고 고주파수에서 효과적인 선별능력(screening)이 저주파수에서는 충분하지 못할 수도 있다는 것을 알아 둘 필요가 있다; 그러므로, 주위에 간섭이 있는 지역에서는 동조 수신기가 반드시 필요하다.

어떠한 경우에 전자장비의 전원접속 및 내부 연결된 도파로의 스크린으로 인해 형성된 접지 귀환이 발생되지 않도록 주의해야 한다.

2. 공진기에서 나온 하나와 발생기 쪽에서 나온 또 다른 하나인 두 개의 입력을 나타내는 수신기는 발생기의 출력변화로 인한 오차를 없앨 수 있다는 장점이 있다.

3.2.2 표시소자는 스위치 주파수 측정과 함께 사용한다. 공진기의 정류된 출력만을 나타낼 경우에는 충

분한 감도를 갖는 일반 오실로스코프를 사용한다.

비고. 쌍방 추적형 장비(동작의 대안모드)는 발생기의 출력 변화로 인한 오차를 제거할 수 있다는 장점이 있다.

3.3 동작 주파수 범위에서 충분한 판별력을 갖춘 주파수 측정기

3.4 3 dB-감쇠 표준형 또는 가변 표준형 감쇠기

3.5 원하는 주파수에서 공진시킬 수 있는 공진기

비고. 임의의 시험 상 문제를 갖는 상태에서 최상의 결과를 얻을 수 있는 상용 가능한 공진기는 없다. 따라서 이러한 공진기의 구조에 대한 일반적인 지침을 제시하는 것이 바람직하다. 특수한 공진기 형태에 대해서 부속서 A에 자세히 나타내었다.

- a) 필요한 정확도로 용이하게 기계가동을 하기 위해서 원통 단면형 공진기를 선호하고 있다.
- b) 재료 시험용으로 축 대칭형 형태가 특별히 사용된다. 그러므로 TEM-과 TE_{0mn} 모드를 가진 길이/반경의 비가 1에 가까운 공진기가 최적의 성능을 나타낸다. TM_{0mn} -모드의 경우에 이러한 비율은 일반적으로 0에 가깝다.
- c) 공진기의 내부 표면은 동작 주파수에서 적어도 전자계 침투 깊이의 1/4 이상으로 평평해야 한다. 따라서, 연마과정이 일반적으로 필요하다.
- d) 황동을 보통 사용하여 전자계의 약 4배의 침투 깊이의 두께로 은이나 금(고온에서 사용 가능한 것)으로 내부 표면을 전자 플레이팅하여 성능을 향상시킬 수 있다. 보다 높은 주파수에서는 두꺼운 은을 공진기로 사용할 수 있다.
- e) 미끄럼 접촉은 공진기의 질을 떨어뜨리며, 특히 고주파에서 설정값의 재현성이나 정확도에 악 영향을 미친다. 따라서 미끄럼 접촉을 가능한 한 피하는 것이 바람직하다. 특히, 시료를 넣을 때 뚜껑을 열게 되는 착탈부는 접촉면이 전류가 흐를 수 있는 통로가 되지 않도록 설계해야 한다.
- f) 결합 소자는 원하는 진동모드로만 동작되도록 설계하는 것이 바람직하다. 결합 강도의 변화는 측정된 무부하능 Q_u (5.2항 참조)에 영향을 주지 않는 것이 바람직하다. 공진 시, 약 40dB의 공진기 삽입 손실을 정확하게 고려해야 한다.

4. 시료

4.1 시료의 모양은 공진기와 사용하는 발진 모드로 정해진 조건을 만족해야 한다. 일반적으로 원통 단면적을 갖는 원형이나 로드형을 사용한다. 여러 가지 공진기 형태에 대한 특수한 요구사항은 부속서 A에 나타내었다.

비고 1. 전단 효과에 따른 결과를 계산에 충분히 고려해 넣지 않을 경우에는 전력선에 수평인 면과 공진기에 시료를 정확히 맞게 하는 것이 필요하다. 이것은 특히 원통형(TEM) 공진기와 TM-캐버티에서는 중요하다.

2. 공진기의 종단면과 시료의 인근 표면 사이에 잔여 틈새에 기인한 유전율의 오차는 반파 두께의 시료를 사용할 경우에는 무시할 수 있다.

3. 저유전율 및 작은 직경 (캐버티 직경 d_0 에 비교하여) d_s 를 갖는 봉상 시료는 캐버티 공진기에 사용할 수 있다.

4.2 특수한 시험방법(부속서 A 참조) 요건 및 KS C IEC 60377-1의 5항에 따라 시료를 준비해야 한다.

5. 시험 절차

시험 절차는 다음과 같다.

5.1 시료를 공진기에 삽입한 다음 공진이 발생하도록 한다. 조정된 양 (주파수 f_L 또는 길이 l_L)을 기록해야 한다.

5.2 부하가 연결된 공진기의 반 전력 밴드폭 δf_L 은 공진기를 재조정하거나 주파수를 바꾸어서 측정한다. 부하가 연결된 공진기의 Q-지수 Q_L 은 다음과 같이 주어진다.

$$Q_L = \frac{f_L}{\delta f_L} = \frac{l_L}{\delta l_L}$$

5.3 시료를 공진기에서 빼낸 후에 공진기를 5항에 따라 다시 공진시킨다(이는 f_u 또는 l_u 가 된다).

5.4 무부하시 공진기의 Q-지수는 5.2항에 따라 결정해야 한다.

$$Q_L = \frac{f_u}{\delta f_u} = \frac{l_u}{\delta l_u}$$

비고 1. 공진기에 결합은 단일 설정으로 측정한 반-전력 밴드폭에 영향을 미치지 말아야 한다.

2. 공진기의 설정 l_1 과 l_2 를 결정하는데 정확도는 각각 반-전력 점 l_1 과 l_2 또는 f_1 과 f_2 의 값을 평균하면 증가하게 된다.

$$l = \frac{l_1 + l_2}{2} \quad \delta l = l_1 - l_2 \quad (\text{주파수가 일정한 상태에서})$$

$$f = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad \delta f = f_1 - f_2 \quad (\text{주파수가 일정한 상태에서})$$

3. 측정한 두 개의 Q값이 저손실 시료에서 발생하는 약간의 차이만이 있을 경우에는 사각법 검출기의 출력을 이용하여 정확도를 증가시키고 절차도 간단하게 할 수 있다. Q_1 값처럼 단일 Q값을 알고 있는 경우에는,

$$Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{\Theta_2}{\Theta_1}}$$

여기서, Θ_1 과 Θ_2 는 각각 Q_1 과 Q_2 에 해당하는 전압계의 편향정도이다. 대안으로서 검출기에서 공진 전압 U_1 과 U_2 가 정확히 조정 가능한 가변 감쇠기를 이용하여 일정하게 유지한다면,

$$Q_2 = Q_1 \square 10^{\frac{A}{20}}$$

여기서, $A = 20(\log U_2 - \log U_1)$ 는 데시벨로 나타낸 필요한 감쇠값의 증가분이다. 감쇠기는 적어도 0.1dB 정도의 정확도를 가지고 있는 것이 좋다.

5.5 모든 측정이 온도의 영향에 대해 충분한 정확도로 유지 불가능하다면 $\pm 2^\circ\text{C}$ 를 넘지 않는 온도 간격 이내에서 이루어져야 한다.

6. 측정한 값의 평가

측정한 값은 부속서 A에 기술된 특수한 시험 장치에서 기술된 지시사항에 따라 평가해야 한다.

7. 시험 보고서

시험 보고서는 KS C IEC 60377-1의 6항에 기술되어 있다.

부속서 A

공진기

A1. 재투입형 캐버티

A1.1 재투입형 캐버티 공진기는 100MHz에서 1000MHz 주파수 범위에서 사용한다. 이것은 낮은 유전율 ($\epsilon_r \leq 10$)을 갖는 원형 시료에 적합하다.

A2.2 동작 원칙

재투입형 캐버티는 양 끝이 단락 연결되었으며 중앙 도체의 끝에 집중형 가변 커패시터로 연결된 정해진 길이의 동축형 전송선으로 구성되어 있다(그림 2 참조)

비고. 본 커패시터는 IEC 60250(전력, 가칭 및 미터급 파장을 포함한 라디오 주파수에서 절연재료의 유전율 및 유전손실계수의 측정방법) 5항에 마이크로미터 커패시터와 기능상으로 동일하다. 여기서는 포함된 송진선과 함께 공진기 회로를 구성하고 있다.

공진기 주파수는 선로의 길이 및 특성 임피던스, 마이크로미터 커패시터의 유효 커패시턴스로 결정한다.

A1.3 설계

최적은 성능은 대략적으로 3.5 ($Z_0 \approx 75 \Omega$)의 외부 대 내부의 직경비 $\frac{d_o}{d_i}$ 에서 얻어진다.

도파 형태의 여기를 피하기 위해 평균원주 $\pi\left(\frac{d_o + d_i}{2}\right)$ 는 가장 짧은 동작 파장보다 작아야 한다.

$$\lambda_{\min} > \pi \frac{(d_o + d_i)}{2} \quad (1)$$

주어진 총 길이 ($l_1 + l_2 + l$)에서 빈 공진기의 공진 주파수 ω_r 은 다음 식으로 대략 계산할 수 있다.

$$\frac{4h}{\omega_r \epsilon_0 \pi d_i^2} = 60 \ln \frac{d_o}{d_i} \square \left(\tan \frac{\omega_r l_1}{c} + \tan \frac{\omega_r l_2}{c} \right) \quad (2)$$

마이크로미터 커패시터의 실제 커패시턴스는 용융석영, 99.9% 순도의 알루미늄, 폴리테트라플루오르에틸렌 등 기지의 유전율 시료를 이용한 조정 과정을 거쳐 결정되는데 적어도 시료의 두께 h_s 의 두 배 차이로 중심 도체의 직경 d_i 보다 작은 직경 d_s 를 가져야 한다. 스위치-주파수 측정이 이루어지지 않는 경우에는 적어도 저주파수 반-전력 지점까지 조정을 할 수 있는 공진기로 측면 마이크로미터를 공진기의 동작 주파수 영역에 걸쳐 여러 주파수에서 조정해야 한다. 공진기로 일정한 결합을 시키기 위해서는 결합환을 상단 근처에 삽입한다. 움직일 수 있는 중심도체와의 미끄럼 접촉은 금속형 주름통으로 없앨 수 있다.

A1.4 시료

시료는 직경이 d_s 인 평평한 원형이다.

$$d_s \leq d_i - 2h_s$$

여기서 d_i 는 중심 도체의 직경이며 h_s 는 시료의 두께이다. 시료의 표면은 평평하고, 0.05° 범위 내에서 서로 평행해야 한다.

비고. 시료를 시험하는데는 두 가지 방법이 있다.

- 마이크로미터 커패시터에서 공극 ($h_L - h_s$)를 이용하면서 시료에 전극을 사용하는 않는 것. 이러한 방법은 시료의 두께 결정의 불확실성 때문에 상대적인 유전율의 측정에서 발생하는 오차가 감소된다. (1차적 근사로의) 이러한 효과는 $(\epsilon - 1)$ 에 비례하기 때문에, 주로 저유전율에 사용될 경우에 정확성을 얻을 수 있다. 이러한 방법은 제어가 불가능한 접촉형 저항이 없기 때문

에 저손실 재료에서 효과적이다.

- b) 적절히 표준화된 기술로 평탄한 표면을 금속화하는 방법이 $\varepsilon_r > 5$ 인 시료의 유전율 시험 시에 사용된다. 시료를 마이크로미터의 커패시터 전극 사이에 물린다. 저손실 시료의 손실계수를 시험할 때는 위의 (a) 방법을 사용해야 한다.

A1.5 측정된 결과의 평가

A1.5.1 측정된 값

- 시료의 직경 d_s .
- 시료의 두께 h_s .
- 부하가 연결된 공진기의 공진 주파수 f_L .
- 부하가 연결된 공진기가 만드는 Q_L 의 반-전력 밴드폭 δf_L 또는 측면 마이크로미터 수치 r_L
- 부하가 연결된 공진기의 마이크로미터 커패시터 h_L 의 전극간 거리
- 시료를 제거한 상태로 주파수 f_L 에서 공진을 회복시킬 수 있는 마이크로미터 커패시터간의 거리 h_u .
- 시료가 제거된 상태로 Q_u 를 야기하는 반-전력 밴드폭 δf_u 또는 측면 마이크로미터 수치 r_u .

A1.5.2 조정 차트에서 읽는 데이터

- 간격 h_u 에서 커패시턴스 C_u
- 간격 h_L 에서 커패시턴스 C_{L0}

필요할 경우:

- 측면 마이크로미터 수치 r_L (스윙-주파수 과정만으로도)에 해당하는 주파수 f_L 에서 반전력 밴드폭 δf_L
- 측면 마이크로미터 수치 r_u (스윙-주파수 과정만으로도)에 해당하는 $f_u = f_L$ 인 주파수에서 반전력 밴드폭 δf_u

A1.5.3 계산 및 결과

$$C_{so} = \frac{\pi \varepsilon_0 d_s^2}{4h_s} \quad (3)$$

$$C_s = \varepsilon_r C_{so} \quad (3a)$$

- a) 전극이 시료와 접촉하지 않는 경우 (공극 $h_L - h_s$)

$$C_{so}' = C_{so} \frac{h_s}{h_L} \quad (4)$$

$$\varepsilon_r = \frac{h_s}{h_L \left(\frac{C_{so}'}{C_u - C_{Lo} + C_{so}'} - 1 \right) + h_s} = \frac{h_s}{h_L \left(\frac{C_{Lo} - C_u}{C_u - C_{Lo} + C_{so}'} \right) + h_s} \quad (5)$$

$$\tan \delta = \left(1 + \varepsilon_r \frac{h_L - h_s}{h_s} \right) \square \frac{C_T}{C_s} \square \frac{\delta f_L - \delta f_u}{f_L} = \left(1 + \varepsilon_r \frac{h_L - h_s}{h_s} \right) \square \frac{C_T}{C_s} \square \frac{1}{Q_u} \square \left(\frac{Q_u}{Q_L} - 1 \right) \quad (6)$$

- b) 전극이 시료와 접촉되어 있는 경우,

$$\varepsilon_r = \frac{C_u - C_{Lo} + C_{so}}{C_{so}} \quad (7)$$

비고. 시료에 사용한 전극의 두께 a 가 시료의 두께 h_s 와 비교하여 무시할 수 없을 정도로 클 경

우에 식 (7)의 용량 C_{so} 는 (4) 식의 C_{so}' 로 교체해야 한다. 여기서, $h_L = h_s + 2a$

$$\tan \delta = \frac{C_T}{C_s} \square \left(\frac{\delta f_L - \delta f_u}{f_l} \right) = \frac{C_T}{C_s} \square \frac{1}{Q_u} \square \left(\frac{Q_u}{Q_L} - 1 \right) \quad (8)$$

여기서, C_T 는 시스템의 총용량으로 다음 식을 사용해서 실험적으로 유도할 수 있다.

$$\frac{f}{2} \square \frac{\Delta C_T}{\Delta f} = C_T \quad (9)$$

여기서, f 는 공진기의 조정 차트에서 읽어드리는 두 용량 C_{u1} 과 C_{u2} 에 해당하는 두 공진 설정값 f 과 f 의 중심 주파수 값이다.

A2.1 동축상 공진기는 1GHz에서 약 7GHz범위의 주파수에서 사용된다. 이는 선로 단면적에 정확하게 맞는 임의의 유전율을 갖는 튜브형 시료에 적합하다. 액체는 시험셀을 0.05°범위 내에서 수직으로 설치하여 시험할 수 있다.

A2.2 동작원리

동축상 공진기는 시료 홀더로 동축 전송선의 한쪽 끝과 고정된 단락회로나 이동 가능한 접촉형 격침으로 다른 쪽끝이 서로 단락 연결된 동축 전송선으로 구성되어 있다(그림 3 참조). 처음에는 주파수를 공진시키기 위해 동조시켜야 한다; 분명히, 시험 주파수는 공진기, 시료 및 유전율의 크기에 따라서 달라진다. 반면에, 두 번째 단계에서는 원하는 시험 주파수로 공진기를 동조시키게 된다. 측정된 데이터의 평가는 전송선로 방법과 유사하다(IEC 60377-3 참조 [현재 검토 중]).

A2.3 설계

표준화된 특성임피던스와 표준화된 외부 도체직경을 갖는 동축형 공진기는 상용화되어 있다(보통 “unslotted 선로면”이라 부른다). 이들은 저주파수 한계치가 중심 도체의 유효 하강값과 겹치게 되는 반면, 고주파수 한계치는 주로 TE_{11} 모드의 차단 주파수로 결정된다.

$$\lambda_{min} = \pi \frac{d_0 + d_i}{2} \sqrt{\epsilon_r}$$

따라서 시료의 주어진 비유전율 ϵ_r 에서 사용 가능한 외부 도체 직경값 d_0 를 제한하게 되는 것이다. 측정의 정확도에 영향을 미치는 기타 한계치는 시료가 공진기에 맞고 동조형 공진기에서 미끄럼 플러져 설정의 재현성 등의 기계적인 오차에 따라 달라진다.

A2.4 시료

시료는 근접한 오차범위 내($\pm 0.005\text{mm}$)에서 공진기의 단면적에 맞도록 해야 한다. 시료의 앞면과 뒷면은 축에서 0.05°범위 내로 평평하게 잘라야 한다. 최적의 결과는 길이가 반 파장의 정수배가 되는 시료를 사용할 때 얻을 수 있다.

적절히 표준화된 기술로 시료와 접촉하는 표면을 금속화하는 방법이 가장 좋다.

A2.5 측정된 데이터의 평가

A2.5.1 측정할 양

시료의 길이 l_s .

a) 동조형 공진기:

- 공진 주파수 f 또는 각각의 도파파장 λ_{gr}
- 부하가 연결된 공진기의 공진 설정 f_L .
- 부하가 연결된 공진기의 반-전력 밴드폭 δf_L .
- 빈 공진기의 공진 설정치 f_0 .
- 빈 공진기의 반-전력 밴드폭 δf_0 .

b) 고정형 공진기:

- 공진기의 길이 l :
- 부하가 연결된 공진기의 공진 주파수 f .
- 부하가 연결된 공진기의 반-전력 밴드폭 δf .
- 빈 공진기의 공진 설정 주파수 f_0 .
- 빈 공진기의 반-전력 밴드폭 δf_0 .

A2.5.2 계산 및 결과

$$m_{L,u} = \frac{\sin \pi/Q_{L,u}}{\sqrt{1 + \sin^2 \pi/Q_{L,u}}} \quad (10)$$

여기서 첨자 L과 u 는 부하가 연결된 것과 연결되지 않은 공진기를 나타낸다. 만약 $\pi/Q_{L,u} \leq 0.1$ 인 경우에

$$m_{L,u} = \pi/Q_{L,u} \quad (10a)$$

일차근사와 손실계수 $\tan \delta \geq 10^{-3}$ 로 다음의 방정식에 사용되는 유효 결합상수는 다음과 같이 주어진다.

$$m = m_L - m_u \quad (11)$$

따라서:

$$\frac{1}{\beta I_s} \square \frac{(1 - m^2) \tan \beta \Delta l - jm(1 + \tan^2 \beta \Delta l)}{1 + m^2 \tan^2 \beta \Delta l} = \frac{\tanh \gamma_s l_s}{\gamma_s l_s} = \frac{\tanh z}{z} \quad (12)$$

여기서, $\gamma_s = \alpha_s + j\beta_s$ 이며,

a) Δl 은 고정된 시험 주파수 f_r 에서 시료를 제거한 후에 공진을 회복하는데 필요한 길이변화이다.

b) $\Delta l = l_s - l_r = l_s \frac{n\lambda_u}{2}$ 이며 $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_L}$, n은 정수이며, λ_u 와 λ_L 은 각각 비어 있는 공진기와 부하가 연결된 공진기를 공진시키는 파장이다.

$m \leq 0.1$ 이면, 식(12)는 실수부와 허수부로 나눌 수 있다.

$$\frac{1}{\beta I_s} \tan \beta \Delta l = \frac{\tan \beta_s l_s}{\beta_s I_s} = \frac{\tan x}{x} \quad (13)$$

과

$$\alpha_s = \frac{1}{l_s} \square = \frac{m(1 + \tan^2 \beta \Delta l)}{1 + x \left(\frac{\tan x}{x} \right)^2 - \frac{\tan x}{x}} \quad (14)$$

따라서,

$$\epsilon_r' = \left(\frac{\lambda_L x}{2\pi I_s} \right)^2 = \left(\frac{\lambda_L \beta_s}{2\pi} \right)^2 \quad (15)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{2\alpha_s x}{I_s} \left(\frac{\lambda_L}{2\pi} \right)^2 = 2\alpha_s \beta_s \left(\frac{\lambda_L}{2\pi} \right)^2 \quad (16)$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \frac{2\alpha_s}{\beta_s} = \frac{2m[1 + (\beta I_s)^2 \left(\tan \frac{x}{x} \right)^2]}{x[1 + x \left(\tan \frac{x}{x} \right)^2 - \tan \frac{x}{x}]} \quad (17)$$

기타 경우에 정해진 함수 $\frac{\tan hz}{z}$ 와 $\frac{\tan hx}{x}$ 의 특정한 값에 대해서는 오른쪽에 있는 것으로 선택한 각각 z 와 x 의 무한한 값이다. 비유전율의 근사값을 알고 있다면 이러한 선택이 쉬워진다.

A 3. 공진 캐버티

A3.1 공진 캐버티는 1GHz에서 30GHz의 주파수 범위에서 사용한다. 이들은 맥스웰 방정식으로 정확하게 계산할 수 있는 적절한 모드를 사용하고 이 같은 모드가 시료를 제거한 다음에도 지속된다면 액체 시료뿐만 아니라 원형이나 로드형 고체시료를 시험하는데도 적합하다. 오차는 모드 변환이나 성능저하로 인해 발생하므로 캐버티 공진기의 설계 시에 전계구성과 결합요소의 구조를 세밀하게 조사하는 것이 무엇보다 중요하다. 모드 차트(그림4 참조)에 대한 사항을 참조.

비고 1. 모드 트랩은 원하지 않는 모드를 차단하거나 재조정하는데 사용한다.

2. TM_{010} 공진기는 1GHz에서 10GHz주파수 범위의 측정에 적합하며, 10GHz이상에서는 TM_{01} 공진기가 바람직하다.

A3.2 동작원리

두가지 모드의 동작이 가능하다.

- a) 공진기의 길이 일부단면을 채운 원형 시료에서 파장은 유전율의 변화로 시료의 부분에서만 변화한다. 원칙적으로 이러한 동작모드는 **A2.2**, **A2.4**와 **A2.5.1**에 동축형 공진기에서 다루었던 내용과 다르지 않으며 기준은 이들 항에 나타내는 것이 바람직하다.

비고. TE_{0n} 모드를 사용할 경우에는 맞추는 문제점은 크게 줄어든다.

- b) 캐버티 d_0 의 직경보다 작지만 공진기의 전체길이를 차지하고 있는 직경 d_s 를 가진 로드형 시료(그림 5b 참조)에 대해서, 도파 파장 λ_g 은 현재 전계 구성, 시료의 채움(filling) 계수 및 유전율에 따라 달라진다. 시료의 유전율은 비균일성 공간에서 맥스웰 방정식의 계산을 통해 얻는다. 일반적으로, 이들 캐버티는 고정된 길이를 가지고 있다.

비고 1. 시료의 직경이 1/2 방사 파장의 상당부분을 차지한다면, TE_{0n} 모드를 사용하는 것이 시료를 공진기의 길이에 맞추는 정확도에 비해 상대적으로 덜 민감하기 때문에 바람직하다.

2. 1/2 방사 파장에 비해 작은 직경을 가지는 시료는 캐버티의 앞면 중앙에 작은 구멍을 통하여 캐버티를 통과하여 시료 길이의 트리밍을 제거한다. 이 경우에 TM_{0n} 모드를 사용해야 한다.

A 3.3 설계

재료 시험을 위해서는 축 대칭을 가지는 모드(그림 6 참조)만이 고려 대상이다. 즉 TE_{0n1} 과 TM_{0n1} 모드가 바로 그것이다. 이러한 특정 모드와 캐버티의 크기는 최적 성능에 따라 우선적으로 선택하고(그림 6과 그림 7 참조) 시료의 모양, 양 및 성질에 따라 결정한다.

기타 고려할 사항은 다음과 같다;

- a) TE-모드는 접촉형 격침이 필요치 않아 필요한 품질계수와 설정의 재현성을 높일 수 있기 때문에 동조 캐버티와 함께 선호되고 있다. 더구나, 이들은 원형 뚜껑을 사용해서 시료를 삽입하고, 공진기 축상과 중심을 같이하여 전류가 흐르는 선상이 주변을 둘러싸고 있기 때문에 전기적 성능을 저하시키지 않는다.

비고 1. TE_{01} 모드는 감쇠가 주파수에 따라서 감쇠되어 높은 주파수에서 특히 유용한 우수한 특성을 가지고 있다.

2. TE_{01} 모드를 저하시키고 무부하 Q_u 를 낮추는 원하지 않는 TM_{11} 모드를 줄이기 위해서 캐

버티의 상판을 직류적으로 분리할 수 있다.

- b) TM_{0n} 모드는 극한 성능을 나타내는 평판형 공진기에서만 설정할 수 있다. 그리하여 시료가 비교적 적은 양이 필요하다. 하지만, 이러한 모드의 중요한 단점은 시료와 공진기 사이에 접촉에 따라서 상당히 달라진다는 것이다. 그러므로 이러한 모드를 사용하는 것은 TM_{0n0}-형에 국한된다.

비고 1. TM-캐버티의 성능이 저하되는 것을 막기 위해서, 뚜껑의 주변이 전류 노드선이나 전자계선과 일치하도록 한다.

2. TM 캐버티는 시료의 직경이 충분히 작다면 외부의 바이어스 전계를 인가하지 않고 자성 재료의 유전특성을 측정하기 위해서 사용할 수 있다.

A3.4 시료

시료는 사용하는 방법에 맞아야 한다(A3.2항 참조). 표면을 금속화하는 것은 TM-모드에서 처럼 전자력선이 통과하는 표면과 접하는 곳만 필요하다. 액체는 공진기의 수직 축에 0.05°범위 내에서 방법a에 따라 시험할 수 있으며, 또는 시험셀용 저손실계수를 갖는 얇은 판 튜브를 사용하면 방법b에 따라 시험할 수 있다. 시험용 셀은 같은 직경의 튜브이지만 두께가 다른 판을 사용하거나 0점 두께를 외삽할 경우에는 반복적 시험을 고려할 필요가 있다.

A3.5 측정된 데이터의 평가

A3.5.1 측정할 양

방법 a 공진기의 단면을 원형 시료로 채운다. A2.5.1항에서 계산한 값에 캐버티의 직경 d₀가 필요하다.

방법 b 로드형 시료, A2.5.1 b)에서 측정된 값에 캐버티의 직경 d₀와 시료의 d_s가 필요하다.

A3.5.2 계산 및 결과

비고. 이 후 이어지는 계산은 저손실 시료에서만 유효하다.

a) 디스크형 시료, TE-모드

A2.5.2항의 식 (10)부터 (14)까지는 기기 도파파장 λ_g가 삽입되면 사용할 수 있다. 파장 λ가 측정되면 비어 있는 공진기의 도파 파장은 다음과 같다.

$$\lambda_g = \frac{c}{f} \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (18)$$

여기서, λ는 사용한 모드의 차단 주파수이다. λ_c는 캐버티 직경 d₀의 함수이며 다음 식에 따라서 차단 파장 λ_c와 관련이 되어 있다.

$$f_c = \frac{c}{\lambda_c}$$

식 (15)와 (16)은 다음으로 대체할 수 있다.

$$\epsilon'_r = \left(\frac{\lambda_{0L} X}{2\pi l_s}\right)^2 = \left(\frac{\lambda_{0L}}{\lambda_c}\right)^2 \quad (19)$$

$$\epsilon''_r = \frac{2a_X}{l_s} \left(\frac{\lambda_{0L}}{2\pi}\right)^2 \quad (20)$$

여기서, λ_{0L}은 공진 주파수 λ에서 자유 공간 파장이다. 손실계수 tanδ는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}$$

매우 낮은 손실값을 갖는 시료($\tan \delta \leq 10^{-3}$)에서는 손실 계수에 대한 대안적 방법을 사용하게 된다. 이것은 캐버티의 분포 손실을 고려하고 시료의 손실 후에 변화된 전계구성을 고려하는 것이다.

TE_{01n}- 모드:

$$\tan \delta = \frac{1}{\varepsilon_r} \square \frac{l_u}{l_s} \square \frac{1}{Q_u} \square \frac{\left(\frac{x}{\beta l_s}\right)^2 + \tan^2 x}{1 + \tan^2 x - \frac{\tan x}{x}} \square \left(\frac{Q_u}{Q_L} - n\right) \quad (17a)$$

$$\text{여기서, } n = \frac{\frac{\left(\frac{x}{\beta l_s}\right)^2 (1 + \tan^2 x)}{1 + \left(\frac{x}{\beta l_s}\right)^2 + \tan^2 x} + \frac{2l_L}{d_0} \square \left(\frac{\lambda_L}{\lambda_c}\right)^2}{2 + \frac{2l_u}{d_0} \square \left(\frac{\lambda_L}{\lambda_c}\right)^2}$$

b) 로드형 시료, TM₀₁₀-모드

비고 1. 다음의 방정식은 비유전율에서 상대적인 오차가 $\frac{\Delta \varepsilon_r}{\varepsilon_r} \leq 1\%$ 이며, $\frac{\Delta \tan \delta}{\tan \delta} \approx 10\%$ 인 손

실계수를 갖고 시료직경 $d_s < 0.255 \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}}$ 의 시료에서 유효하다.

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{\frac{d_0}{d_s} \frac{J_0(\beta_0 \frac{d_0}{2})}{J_1(\beta_0 \frac{d_s}{2})}}{F \left[1 + \frac{(\beta_0 \frac{d_s}{2})^2}{8} \right] + \frac{d_0}{d_s} \square \frac{(\beta_0 \frac{d_s}{2})^2}{8} \square \frac{J_0(\beta_0 \frac{d_0}{2})}{J_1(\beta_0 \frac{d_s}{2})}} \quad (21)$$

$$\tan \delta = \frac{\left(\frac{d_0}{d_s}\right)^2 + F^2(\varepsilon_r - 1)}{\varepsilon_r F^2 \left[1 + \frac{J_1^2(\beta \frac{d_s}{2})}{J_0^2(\beta \frac{d_s}{2})} \right]} \square \left(\frac{1}{Q_L} - \frac{1}{Q'}\right) \quad (22)$$

$$\text{여기서, } F = \frac{\pi}{2} \beta_0 \frac{d_0}{2} \left[Y_0(\beta \frac{d_s}{2}) \square J_0(\beta \frac{d_s}{2}) - Y_0(\beta_0 \frac{d_s}{2}) \square (\beta_0 \frac{d_0}{2}) \right] \quad (23)$$

$$\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (24)$$

$$\beta = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}}{\lambda_0} \quad (24a)$$

$$\frac{1}{Q'} = \frac{1}{Q_u} \sqrt{\frac{f_u}{f_L}} \cdot \frac{d_o}{d_o + 2l_o} \left[1 + \frac{\frac{2d_o l_o}{d_s^2}}{\left(\frac{d_o}{d_s}\right)^2 + F^2(\epsilon_r - 1)} \right] \quad (22)$$

J_0, J_1 과 Y_0 는 0과 일차의 Bessel 및 Neumann 함수이다.

2. 캐버티의 손실과 전계 구성의 변화를 식 (25)로 고려해야 한다.

A 4. "개방형 캐버티" 공진기

A4.1 개방형 캐버티 공진기는 3GHz이상의 주파수에서 사용한다. 이들은 저손실 계수의 고체시료에 적합하다.

A4.2 동작 원리

로드 및 원형 시료는 평판 금속판으로 양쪽을 단락시킨 (유전체) 도파관의 단면으로 작용한다. 유전율은 단락회로의 거리와 결보기 공진 주파수에 따라 계산해야 한다.

일반적으로 TE_{0n1} 모드를 사용한다. 캐버티 공진기를 능가하는 개방형 캐버티 공진기의 장점은 A3항에 기술되어 있는데, 조사 손실을 낮추기 위해 사용한 충분히 큰 단락용 판이 있는 경우에는 전류 손실로서 높은 Q값이 단락용 판상에서 나타난다.

비고. 단락 판상의 최소 직경 d_0 는 시료의 높이 h_s 와 사용한 모드의 지수 I에 의해서 달라진다. 일반적으로 $d_0 \approx 7h_s$ 이면 충분한 것으로 알려져 있다.

방법 3b 및 4와 비교하여 높은 채움(filling) 계수가 감도가 향상되는 결과로 얻어진다.

실제 무부하 Q_u 를 결정할 시에 문제가 있는데, 이것은 계산과 원하는 모드의 적정 여기로 가능하다.

A4.3 설계

개방형 캐버티 배치는 다음과 같이 구성되어 있다.

- 시료를 맞대고 있는 평평한 가공표면을 가진 두 개의 단락판 및 시료의 높이 h_s 보다 7배에 해당하는 d_0 인 직경
- 시료
- 원하는 동작모드 및 시료 결합에서 조정이 가능한 두 개의 결합요소
- 조립용 지지대와 부품 집게

A4.4 시료

시료는 단면이 원통형으로 높이가 공기중에서 의도한 공진 파장의 1/2 보다 작은 것. 표면은 편평해야 하고 각도는 0.05 °범위 내로 평행해야 한다.

A4.5 측정된 데이터의 평가

A4.5.1 측정할 값

- 시료의 직경 d_s 와 높이 h_s
- 공진 주파수 f 또는 자유 공간의 공진 파장 λ_{0L}
- 부하가 연결된 Q_L - 값

비고. 공진기의 연결은 탐침을 나중에 빼냈을 때 공진 주파수에 영향을 미치지 않도록 조정해야 한다. d_s 정도의 탐침-시료 간격은 만족할 만한 결과를 나타내는 것으로 확인되고 있다.

A4.5.2 평가 및 결과

비유전율 ϵ_r' 은 다음 식에 따라야 한다.

$$\alpha \frac{J_0(\alpha)}{J_1}(\alpha) = -\beta \frac{K_0(\beta)}{K_1(\beta)} \quad (26)$$

$$\text{여기에서, } \alpha = \frac{\pi d_s}{\lambda_{0L}} \left[\epsilon_r - \left(\frac{L \lambda_{0L}}{2h_s} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

$$\beta = \frac{\pi d_s}{\lambda_{0L}} \left[\left(\frac{L \lambda_{0L}}{2h_s} \right) - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (27a)$$

$L = 1, 2, 3 \dots$ (공진기의 축을 따라서 반 파장의 정수배이며) J_0, J_1, K_0, K_1 은 각각 일차 및 이차형태의 0차와 1차 Bessel 함수이다.

식 (26)은 그림에서 풀 수 있다. 측정한 값 d_s, h_s, λ_{0L} 에서 결정한 β_1 의 계산된 값에서 그래프는 여러 가지 α_n 의 값을 나타낸다. ϵ_r 의 정확한 값을 나타내는 값은 다음과 같이 선정해야 한다.

$$\epsilon_r = \left(\frac{\alpha \lambda_{0L}}{\pi d_s} \right)^2 + \left(\frac{L \lambda_{0L}}{2h_s} \right)^2 \quad (28)$$

손실 계수는 다음 식으로 계산한다.

$$\tan \delta = \frac{A}{Q_L} - B \quad (29)$$

$$\text{여기서, } A = 1 + \frac{J_1^2(\alpha_n)}{\epsilon_r K_1^2(\beta_1)} \left[\frac{K_0(\beta_1) K_2(\beta_1) - K_1^2(\beta_1)}{J_1^2(\alpha_n) - J_0(\alpha_n) J_2(\alpha_n)} \right] \quad (30) \text{이며,}$$

$$B = \frac{I^2 R_s}{2\pi f_L^2 \mu_0^2 \epsilon_r \epsilon_0 h_s^3} \left\{ + \frac{J_1^2(\alpha_n)}{K_1^2(\beta_1)} \left[\frac{K_0(\beta_1) K_2(\beta_1) - K_1^2(\beta_1)}{J_1^2(\alpha_n) - J_0(\alpha_n) J_2(\alpha_n)} \right] \right\} \quad (31)$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f_L \mu_0}{\sigma}}$$

σ = 단락용 판상의 전도도

A5. 광학적 공진기

A5.1 광학 공진기는 30GHz이상의 주파수에서 사용한다. 이는 고체 및 액체의 유전재료의 유전특성을 결정하는데 적합하다.

A5.2 동작원리

광학 공진기는 동축 및 캐버티 공진기와 유사하게 작동하며 주된 차이점은 공진기의 길이가 파장의 큰 수를 나타내고, 시료는 전체 길이의 적은 부분만을 차지한다는 것이다. 주파수 또는 길이는 조정해야 한다. 광학 공진기는 굴절과 방사에서 발생하는 오차를 작게 유지한다면 감소된 전류 손실로 인한 일반적인 초고주파 공진기보다 우수하다. 이 때문에 동작모드를 알아내는데 문제가 발생되는데, 왜냐하면 많은 횡방향의 모드에는 여러 가지 파장과 Q_u 의 값을 가지고 여기될 수 있기 때문이다.

특별한 배치로 인하여 파장은 반사경을 분리에 따라서 변화할 수도 있다.

그러므로 파장은 탐침이나 공진기 출력 전압을 감지하는 동안 공진기 내에서 축방향 또는 방사 방향으로 프로브나 시료를 조금만 움직여도 실험적으로 결정할 수 있다.

A5.3 설계

원칙상 3종류의 공진기가 존재한다.

a) 잘 알려진 Fabry-Perot 간섭계는 이론적으로 높은 Q_u 값($\approx 10^5$)을 나타낸다. 물리적인 구조 때문

에 판상시료가 적합하다. 하지만, 공진기의 충분한 반사를 나타내면서 반사기의 적절한 배치에서 충분히 큰 단면적의 판상 파형을 여기시키는데는 어려움이 있다. 반사경의 반사율에 따라서 원치 않는 높은 차수의 모드를 충분한 억제할 수 있는 기본 TEM_{00} 모드용 최적의 Q_u 값이

$$\frac{d_0^2}{(4s\lambda)} \approx 1 \text{에서 얻어진다. 여기서 } d_0 \text{는 반사경의 직경, } s \text{가 시료의 간격, } \lambda \text{가 동작 파장이다.}$$

비고. 주어진 모드에서 동작 파장은 반사경의 간격이 변함에 따라서 변하지 않는다.

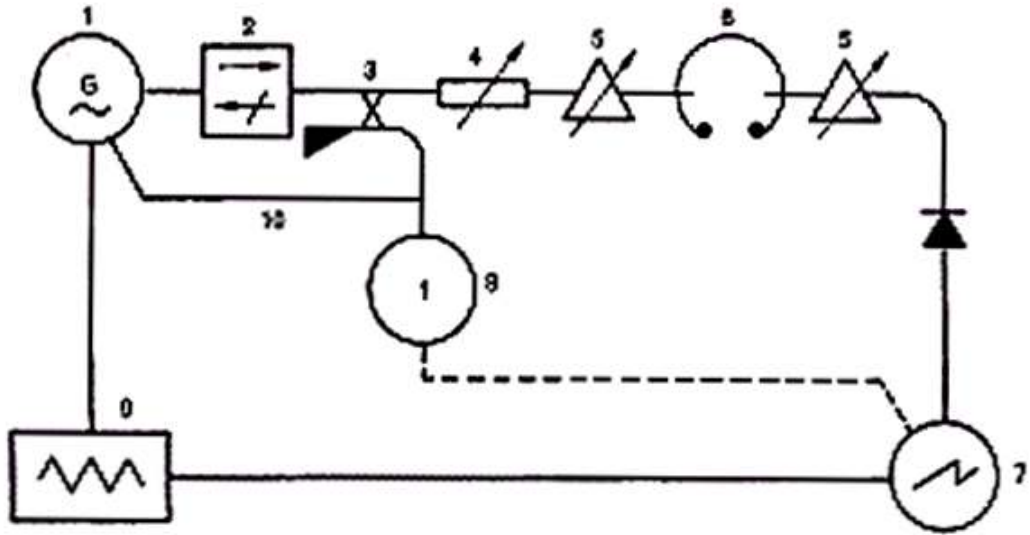
- b) 공초점의 공진기에서, Fabry-Perot 간섭기보다 더 큰 Q_u 값을 얻을 수 있는데, 이는 전계가 공진기의 축상에 한정되어 있어서 굴절 손실이 줄어들기 때문이다. 이는 상대적인 Q_u 의 값이 줄어드는 횡축 크기를 사용해서 얻을 수 있다. 게다가, 공진기의 최적 배치가 상당히 단순화 된다. 하지만, 유전 측정에 사용될 때 공진기의 축상에 따른 시료의 위치로 인해 상당히 변화하므로 값을 측정하는 것이 어렵다. 더구나, 동작 파장은 반사기의 거리에 따라서 달라진다.
- c) 반 공초점 공진기 (그림 9 참조)는 평판 반사기에 대향해서 놓여진 판상 시료에서 수행하는 유전 특성 측정용의 간략화된 시험절차와 약 1/2의 Q_u 값에서 공초점 공진기의 장점을 결합한 것이다. 하지만, 반사기 간격에 대한 빔 파장의 감도는 유지된다.

A5.4 시료

시료는 빔 단면적보다 충분히 큰 면적을 가진 평행판 판상이어야 한다. 이의 두께는 1/2에서 수 파장에 이르는 범위에 있다.

A5.5 측정된 데이터 평가

반 공초점형 공진기에서 측정에 대한 평가는 A2.5항에서 주어진 절차를 적용한다.



1. 마이크로파 발생기
2. 격리기
3. 방향성 결합기
4. 완화기
5. 매칭장치
6. 공진 캐버티
7. 감지기(오실로스코프)
8. 주파수 측정기
9. 주파수 스위퍼
10. 출력 안정화 루우프

그림 1 공진 시험 장치 - 주요 회로도

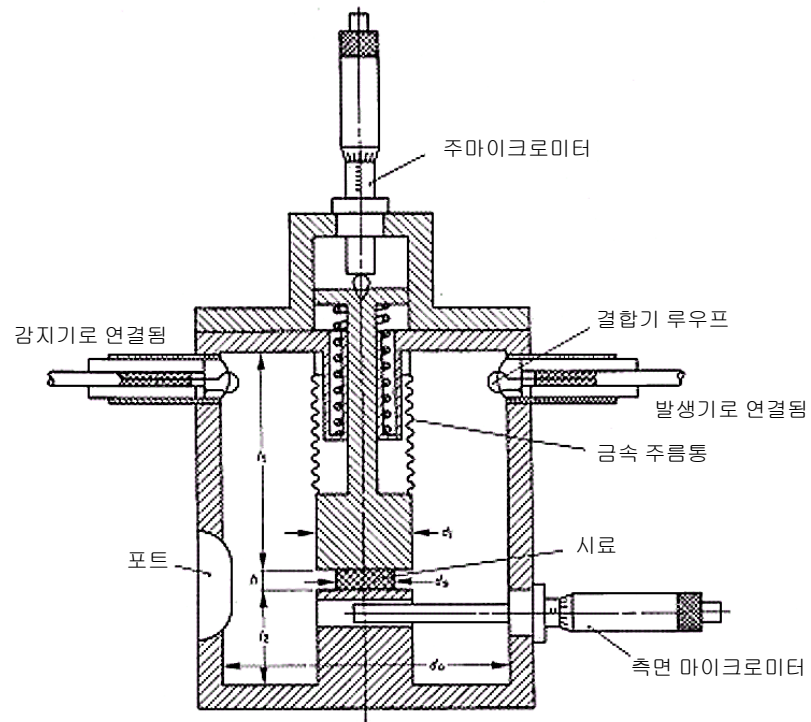


그림 2 재투입형 캐버티 공진기

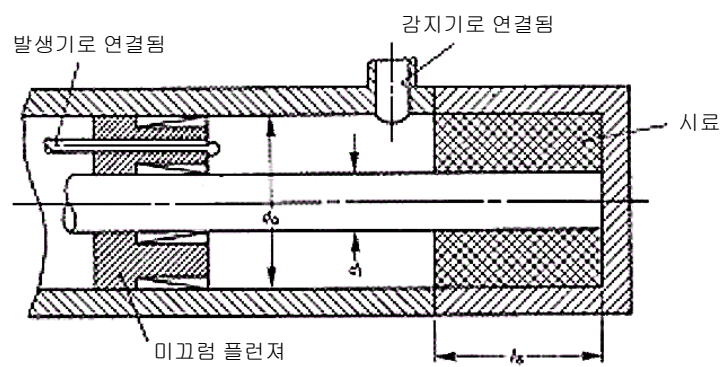


그림 3 동축 캐버티 공진기

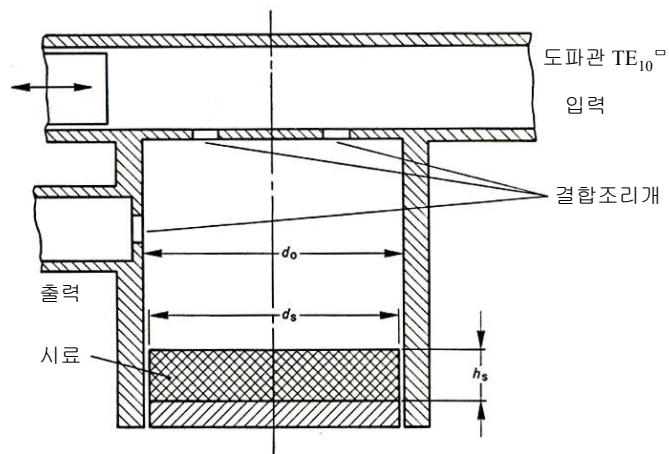


그림 5a TE_{10} 캐버티 공진기

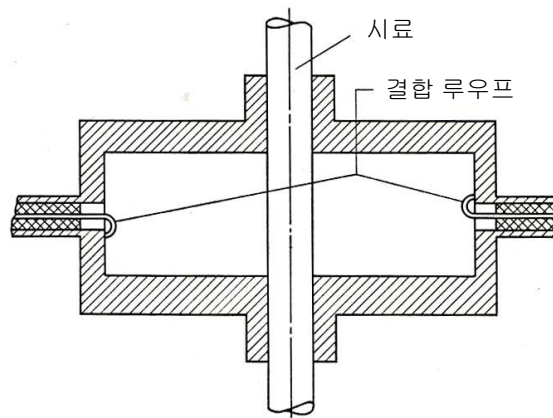


그림 5b TE_{010} 캐버티 공진기

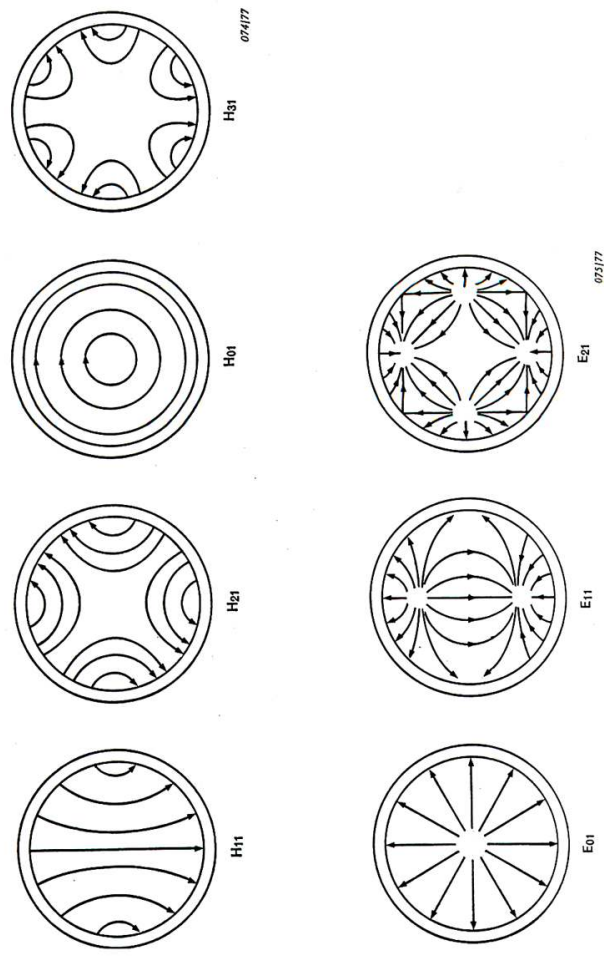


그림 6 원형 캐버티의 일부 저단위 모드의 차단파장 및 순간전계구성

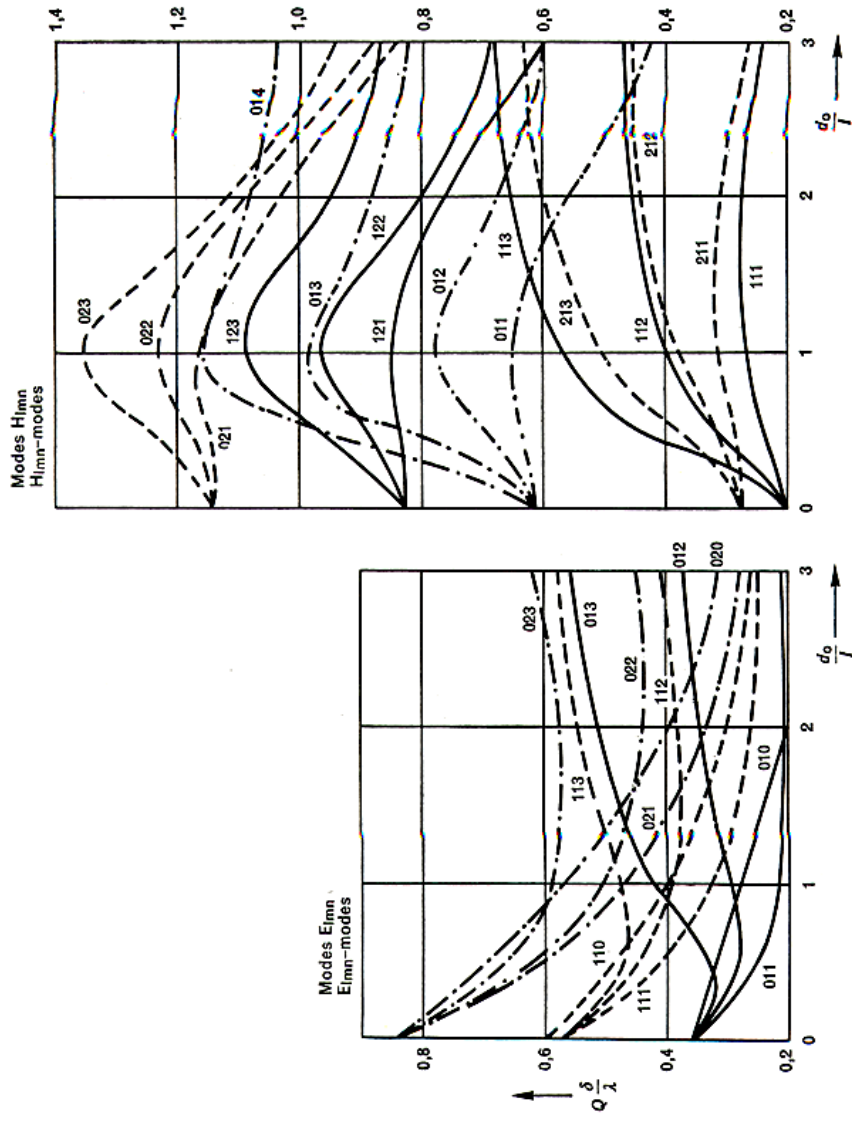


그림 7 표피효과에 기인한 침투깊이에 대한 원형 캐버티 공진기의 E_{lmn} - 및 H_{lmn} -모드의 모드형태요소

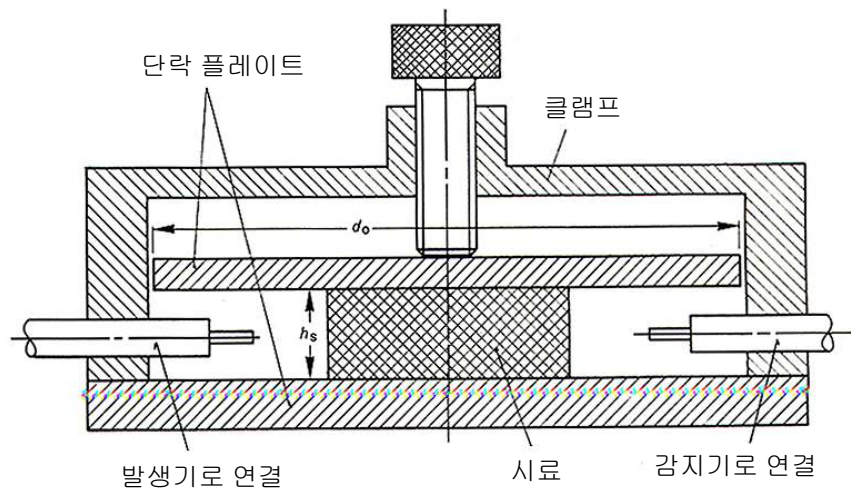


그림 8 개방형 캐버티 공진기

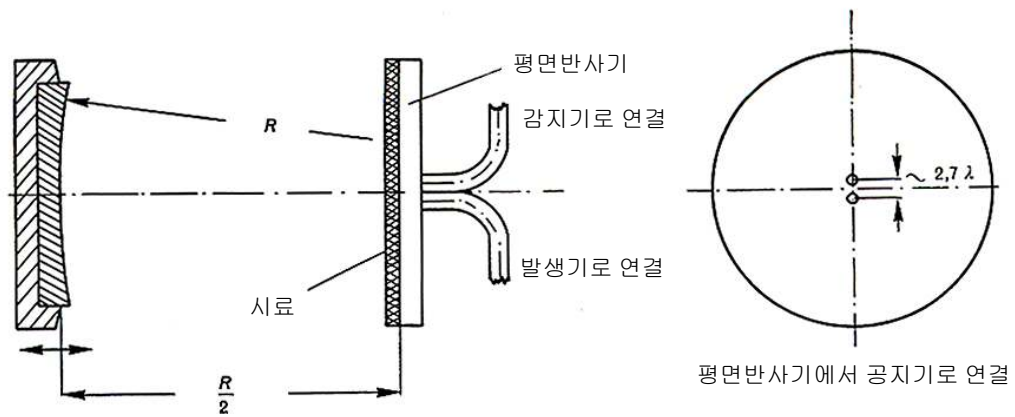


그림 9 반공초점 공진기