

고 주 파 유 전 체 재 료 의 특 성 측 정 방 법



I. 서 론

통신 시스템 및 고주파 대역의 집적회로기술 발전에 따라, 높은 유전상수 및 낮은 유전손실 특성을 갖는 세라믹 유전체의 요구가 대두되었다. 특히 유전 상수의 범위가 3~120이고, 유전손실($\tan \delta$)이 5×10^{-4} 이내의 값을 갖는 유전체들은 고주파대역의 회로시스템, 여파기, 공진기, 증폭기 등에 널리 쓰이게 되었다. 이러한 응용재료의 개발과 특성 개선에 따른 정확한 데이터를 위하여 고주파 대역에서의 정확한 특성 측정방법이 요구된다.

저주파 대역에서의 유전체의 특성 측정은 주로 콘덴서의 정전용량값 측정을 통하여 이루어 졌지만, 주파수가 증가하면 따라 기 생성분에 의한 영향이 증가하여 측정된 정전용량값으로부터 재료의 특성을 추출해내는 것이 상당히 어렵기 때문에 1GHz 이상의 주파수 대역에서는 이에 걸맞는

측정 장치를 사용하는 것이 불가피 하게 된다.

II 본 론

고주파 대역에서 재료의 특성을 측정하는 방법으로는 공진기 섭동방법(Cavity perturbation method), 전송선로방법(Transmission line method), 원주형의 유전체 공진기를 이용한 방법 그리고 Fabry-Perot 방법 등이 있다.

이러한 측정방법의 선택은 물질의 유전특성, 공진주파수 대역, 측정하고자 하는 시편의 구조 및 사용하는 측정장비등에 의해 결정된다.(그림1)

공진기 섭동방법은 금속의 도파관 내부에 소형의 디스크나 구형의 시편을 넣어 변화되는 공진주파수와 시편의 체적을 통하여 유전율과 투자율을 계산하는 방법으로 시편 내부에서 형성되는 극소의 전자계의 변화를 무시한 근사적인 측정방법으로서, 주로

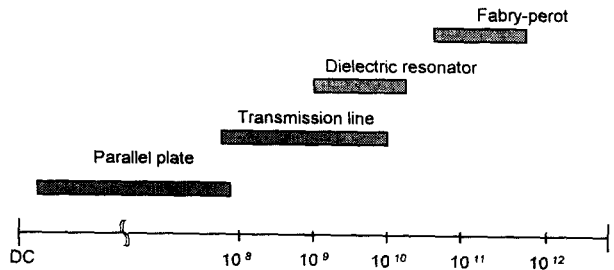


그림 1. 측정방법에 따른 측정주파수 범위



김준철
전자부품종합기술연구소
전임연구원



이형규
전자부품종합기술연구소
전임연구원



방규석
전자부품종합기술연구소
전임연구원

자성체 측정에 이용된다. 전송선로 방법은 장방형의 도파관이나 동축선로의 일부분에 시료를 끼워 넣고 S-파라미터를 통하여 측정하는 것으로 도파관과 시료 사이의 공간이 측정에 영향이 미치지 않도록 시편을 가공하는 것이 중요하다. 이러한 섭동방법이나 전송선로 방법 등은 시편의 가공이 까다로울 뿐 아니라 측정 데이터의 정확도면에서 $\pm 1\%$ 정도의 오차율을 내포하고 있다. Feby-Perot 방법은 비교적 높은 주파수 대역에서의 측정이 가능하기는 하나, 시편을 분말 상태로 만들거나, 아주 얇은 판상체로 만들어야 하는 어려운 점이 있으며, 현재 유전체 재료가 주로 사용되는 주파수대역에서의 측정이 용이하지 않은 관계로 주로 특수한 경우에만 국한된 방법이다.

유전체 공진기 방법은 그 정확도 및 측정의 용이성으로 인하여 마이크로파용 유전체의 측정방법으로서 널리 이용되고 있으므로, 이 측정방법에 대하여 좀더 자세히 알아보기로 한다.

1) 유전체 공진기

공진기는 저주파에서는 L, C로 구성되지만 고주파에서는 L, C와 같은 집중 소자(lumped element)는 사용할 수 없기 때문에 보통 도체로 둘러싸인 공동(cavity)으로 만들어진다. 이러한 공동은 여러 모양의 도파관(wave guide)과 같은 전송선로의 양단을 막아 그 내부에 정현파(standing wave)를 형성시키는 역할을 하는데, 이러한 공동의 내부가 공기로 채워져 있는 것을 감안하면, 유전체 공진기는 공동의 내

부가 유전체 세라믹으로 이루어진 구조임을 알 수 있다. 이러한 유전체 공진기는 주로 동축형이나 원주형의 구조로 이루어진 것을 많이 사용하나 유전체 특성의 측정은 주로 원주형의 것을 많이 사용한다. 이러한 원주형 유전체 공진기를 이용하여 유전체의 특성을 측정하기 위해서는 원주형 유전체의 전자기선 분포를 알아야 계산이 가능하다.

원주형 유전체공진기의 전자기선 분포나 공식은 원주형 유전체 도파관을 최소단위인 반파장 간격으로 나누어 생각할 수 있다. 이 도파관 내부에 존재하는 전자기선의 분포방식에 따라 여러 가지 모드(mode)로 분류할 수 있다. 대표적으로 TM모드와 TE모드가 있다. 파(wave)의 진행방향으로 전기성분(Electric field)이 존재하지 않는 경우를 TE 모드라 하고 진행방향의 자기성분이 존재하지 않는 경우를 TM모드라 한다. 이들 TE, TM 모드는 다음과 같이 표현이 가능하다.

TE_{mn} 모드

$$E_r = E r_{mn} J_m(y) e^{-i\beta_{mn} z} \sin m\phi$$

$$E_\phi = E \phi_{mn} J_m(y) e^{-i\beta_{mn} z} \cos m\phi$$

$$H_r = -H r_{mn} J_m(y) e^{-i\beta_{mn} z} \cos m\phi$$

$$E_\phi = H \phi_{mn} J_m(y) e^{-i\beta_{mn} z} \sin m\phi$$

TM_{mn} 모드

$$E_r = -E r_{mn} J_m(y) e^{-i\beta_{mn} z} \cos m\phi$$

$$E_\phi = E \phi_{mn} J_m(y) e^{-i\beta_{mn} z} \sin m\phi$$

$$H_r = -H r_{mn} J_m(y) e^{-i\beta_{mn} z} \sin m\phi$$

$$H_\phi = -H \phi_{mn} J_m(y) e^{-i\beta_{mn} z} \cos m\phi$$

여기서, J_m 은 베셀함수를 말하

는 것이고, 첨자 m 은 0을 포함하는 정수로 원주 좌표계에서 ϕ 방향의 전자계성분의 변화를 표시하는 것이며, 첨자 n 은 베셀함수의 몇 번째 해(解)인가를 표시하는 지수이다. 예를 들어 실제로 가장 많이 사용되는 TE₀₁모드는 ϕ 방향으로 전자기선의 변화가 없고 r 방향으로는 한번 방향이 변한 것을 말한다. 그러면 TE₀₁₁모드는 공진 모드를 표시한 것으로 세 번째 첨자 1은 공진의 반파장 단위를 표시한 것이다. 그러므로 같은 크기의 유전체 공진기에서 TE₀₁₁모드의 주파수와 TE₀₁₂모드의 주파수는 배차이가 남을 알 수 있다.

2) 측정방법의 공진구조

복소유전율의 측정에서 가장 역점을 두어야 하는 점은 도체의 표면과 유전체 표면의 접촉에 대한 측정결과와 민감도이다. 전계가 도체와 유전체면의 접촉면에 수직인 측정모드에서는 공기층에 저장되는 전기장 에너지가 유전체 내부에 저장되는 에너지량 보다 많아지므로 유전체의 표면에 열린 기공이나 거친 표면은 대부분의 측정방법에서 측정된 유전상수의 값을 저하시킬 수 있기 때문이다. 그러므로 측정에는 이 접촉면에 수직인 전계의 성분이 존재하지 않는 모드를 이용해야 한다. 접촉면에 수직인 전지장의 성분이 존재하지 않고 오로지 수평한 전계만이 있을 경우 수직성분이 있대 계산된 유전상수가 공기층에 의한 영향이 적다. 그림 2의 (a),(c)가 이러한 접촉면에 수평한 전계 성분만 존재하는 모드를 사용하는 측정방법

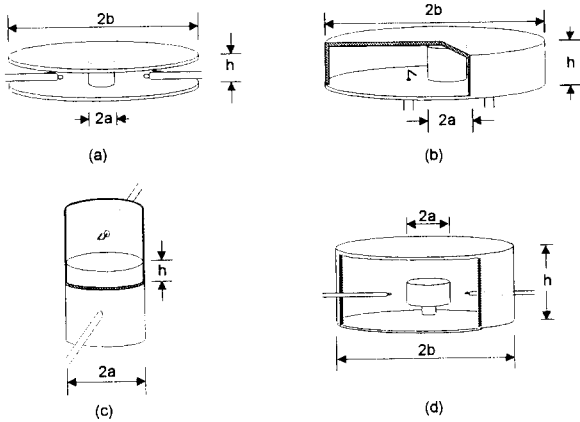


그림 2. (a) 원통형 유전체 공진기 방법
 (b) TM_{0n0} 모드 공동방법
 (c) Cohn 방법
 (d) 공동 방법

리성 때문에 고주파 영역에서 널리 애용되는 측정 방법이다. 측정에 사용되는 TE_{011} 모드의 경우 다른 모드의 피크와 달리 예리하고, 윗면의 도체를 위, 아래로 이동시킴에 따라 주파수가 낮은 쪽, 높은 쪽으로 이동하는 속도도 느리기 때문에 다른 모드에 비해 상대적으로 확인이 용이하다. 또한 위·아래의 평행판이 $b/a \geq 3$ 의 치수에서는 수학(mathematics)적으로 유전체 크기에 비하여 무한 평행 도체로 인식이 되기 때문에 유전체 공진기를 평행 도체판 내부의 정중앙에 위치시키려는 노력이 필요하지 않다.

이 Dielectric rod resonator 방법의 어려운 점은 Q값의 측정에서 유전체의 loss tangent를 구하는데 있다. 이는 도체표면에 형성되는 전류의 분포를 정확히 알아내는 것이 힘들기 때문인데, 사실 유전체 공진기의 정수배 크기 ($n \times h$, $n=1,2,3 \dots$)의 공진기를 이용하여 전류분포에 의한 도체에서 형성되는 손실을 알 수 있기 때문에 불가능한 것은 아니다. 또한 유전체의 원주 면에서 지름방향으로 형성되는 TEM 모드의 복사(radiation)를 고려할 수 없는 문제점이 있지만, 이 역시 동축선을 이용한 small right angle E-field loop probe를 이용하여 복사 영향을 최소화 할 수 있다.

도파관을 이용한 측정방법이 그림 2의 (c)이다. 측정의 정확도는 거의 Dielectric rod resonator method 와 비슷하며, 시편의 높이가 작을 경우 피크의 주파수가 증가함에 따라 TE_{111} , TE_{211} 그리고 TE_{011} 로 측정에 사용되는 모

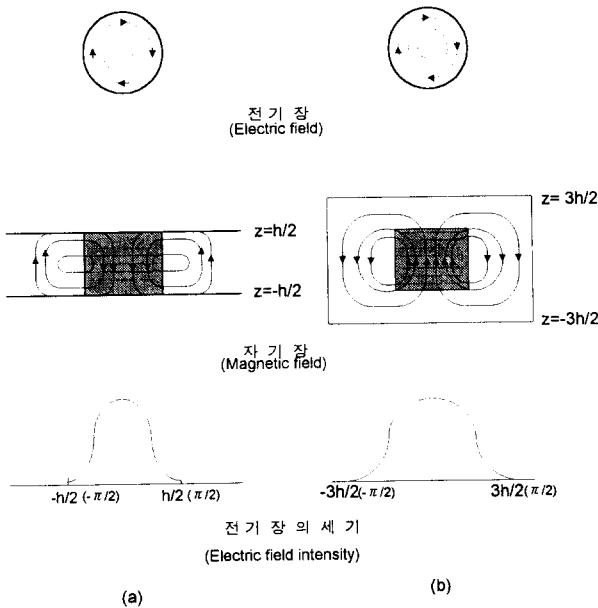


그림 3. TE_{011} 모드와 $TE_{01\delta}$ 모드의 전자기 분포
 (a) TE_{011} 모드 (b) $TE_{01\delta}$ 모드

이고 그림 2의 (b)가 접촉면에 수직인 전계 성분이 있는 모드를 이용한 방법이다. 그림 2의 (a)는 TE_{011} 모드를 이용하는, Hakki와

Coleman에 의해 제시되고 Courtney에 의해 수정 보완된 Dielectric rod resonator method 이다. 이는 측정의 정확도와 편

드의 확인도 비교적 손쉬운 편이다. 그러나 시편크기가 도파관의 크기와 거의 같아야 하는 시편의 가공에 자유도가 부족하다는 단점이 있다.

유전체의 유전손실을 측정하는 경우 좀더 정확한 측정값을 얻기 위하여 사용하는 방법이 그림 2의 (d)에 나타난 cavity resonance 방법이다. TE₀₁₁모드와 비슷한 TE_{01,δ}모드를 사용하며 금속공동(Cavity)내부에 유전체 샘플을 넣고 측정하기 때문에 유전체에서 지름 방향으로의 복사(radiation)를 방지할 수 있기 때문에 측정된 Q값에 오차율이 적다.

TE_{01,δ}모드에서 δ는 0보다 크고 1보다 작은 값을 표시하는 기호로 금속 공동의 위면과 아랫면에서 전자기성분이 0이므로 공진의 최소 조건인 전자기파의 반파장의 모두가 유전체 내부에 존재하지 않는 것을 말한다.(그림3) 금속 공동(cavity)의 지름이 시편의 3배 이상이면 대부분의 전자기 에너지는 유전체 내부에 존재하게 되어 금속 공동은 유전체의 공진주파수에 영향을 미치지 못하게 된다. 이런 이유 때문에 온도에 따른 공동의 팽창이나 감소

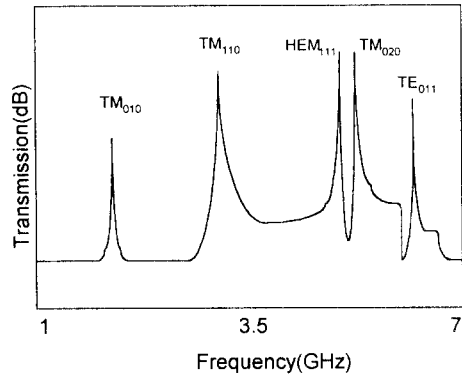


그림 4. Dielectric rod resonator 방법의 주파수 응답특성

는 역시 유전체의 공진주파수에 아무런 영향을 미치지 않기 때문에 유전체의 온도특성 측정에도 많이 이용되는 방법이다.

그러나 사용되는 측정모드의 표기에서 알 수 있듯이 전자기 에너지의 100%가 유전체 내부에 존재하지 않으므로 유전체의 전자기선의 방정식 근이 되는 경계조건을 설정하기가 어렵기 때문에 이 방법을 통하여 유전상수를 계산하는 방식이 상당히 힘들게 된다. 이와 같은 이유 때문에 주로 유전상수값은 dielectric rod resonator 방법으로 측정 계산한 후에 cavity resonance 방법으로 유전손실값을 계산하는 복합적인 측정방법이 이용된다.

3) 측정방법

고주파대역에서 유전체의 특성 측정 및 계산에 대한 설명은 가장 널리 애용되는 dielectric rod resonator 방법을 기준으로 알아보기로 한다.

Network analyzer와 그림2의 측정장치들을 사용하여 그림4와 같은 주파수 응답특성을 얻을 수 있다. 여기서 만약 dielectric rod resonator 방법을 이용한다면, 윗면의 도체판을 유전체에 접촉시킨 상태에서 위로 들어올리면 피크의 주파수가 감소하고, 반대로 도체판을 아래로 내릴 때 피크가 높은 주파수 대역으로 이동하는 것 중 제일 첫 번째 것이 바로 TE₀₁₁모드의 피크이다. 도파관을

표 1. 측정방법에 따른 특성방정식

| 측정방법 | 측정 데이터 | 파라미터 | 특성방정식 | 유전상수 |
|---------------------------------|--------|--|---|--|
| Dielectric rod resonator method | a,h,f | $u = (\pi a / h)$ $\beta = [u^2 - (2\pi fa/c)^2]^{1/2}$ | $-\frac{\alpha J_0(\alpha)}{J_1(\alpha)} = \frac{\beta K_0(\beta)}{K_1(\beta)}$ | $\epsilon_r = \frac{\alpha^2 + \beta^2}{\alpha^2 - \beta^2}$ |
| TM ₀₁₀ cavity method | a,h,f | $\rho = b/a$ $\beta = 2\pi fa/c$ | $-\frac{\alpha J_1(\alpha)}{J_0(\alpha)} = \beta \cot(\beta, \rho\beta)$ | $\epsilon_r = (\beta/a)^2$ |
| Cohn method | a,h,f | $u = (3.83 h/2a)$ $\alpha = [u^2 - (2\pi fh/2c)^2]^{1/2}$ | $\beta = \tan^{-1}(\frac{\alpha}{\beta})$ | $\epsilon_r = \frac{\alpha^2 + \beta^2}{\alpha^2 - \beta^2}$ |

where : c=광속, f=공진주파수, J_n=n차 베셀함수, K_n=n차 2종 베셀함수

이용한 그림 2의 (c) 경우 차례대로 TE₁₁₁, TE₂₁₁ 그리고 TE₀₁₁의 모드 순서인 사실을 이용하여 측정모드를 찾을 수 있다. 그림 2의 Cavity resonance 방법일 경우 dielectric rod resonator 방법과 같이 cavity 의 윗덮개를 이용하여 측정 모드를 찾을 수 있다.

일단 측정모드의 공진주파수를 확인하면 공진주파수와 유전체 공진기의 크기(a,h)를 데이터로 하여 특성 방정식을 계산 함으로써 유전체의 유전상수값을 알 수 있다. 각각의 특성방정식을 표 1에 나타 내었다. 이와 같은 특성 방정식은 해(解)와 변수가 서로 맞물려 있기 때문에 수치해석을 이용하여야만 해(解)를 구할 수 있다. 유전체의 유전손실은 공진 피크 Q값을 측정하여 구할 수 있다.

$$Q_L = \frac{f_o}{\Delta f} \quad : \quad \text{loaded } Q$$

$$Q_o = \frac{Q_L}{1 - |S_{12}|} \quad : \quad \text{unloaded } Q$$

여기서 loaded Q는 계측기의 영향이 포함된 값을 표시하는 것이며 unloaded Q는 이러한 영향을 배제 한 값이다. 여기서 다시 측정장치의 손실을 다음과 같이 고려해야 한다.

$$\frac{1}{Q} = \frac{A}{Q_o} + B + C$$

A : mode factor
B : 도체판 손실
C : 복사손실

이와 같이 측정장치의 손실을 고려하면 순수한 유전체손실 특성만을 얻을 수 있다.

dielectric rod resonator 방법에서는 C항의 크기가 작아서 무시하지만 Cavity resonance 방법에서는 복사손실이 없기 때문에 좀더 정확한 유전손실값을 얻을 수 있다.

이러한 측정의 정확도는 회로망 분석기(Network analyzer)를 통하여 얻어지는 공진주파수와 Q값이 외에 측정시편의 구조에도 영향을 받는다. 이는 유전상수와 유전손실의 계산식이 완전한 원주형 구조를 갖는다는 가정하에 유도되었기 때문이다.

III. 결 론

이상 고주파 대역에서 유전체 재료의 특성을 측정하는 방법에 대하여 고찰하였다. 고주파 대역에서 공진기는 도파관의 반파장 단위로 생각할 수 있으므로, 원형 도파관의 모드를 기본으로 하여 유전체 공진기내부의 전자기장 분포를 이용하여 유전상수와 유전손실을 계산하는 방법을 간단하게 소개 하였다. 고주파대역에서의 측정방법은 저주파 대역에서의 측정방법과는 여러 면에

서 상이하며, 그 기술적 난이도도 비교적 높은 편이다. 알아본 바와 같이, 고주파대역에서의 측정방법은 여러 가지가 있었으며, 사실상 측정주파수 대역과 시편의 특성에 따라 각각의 측정방법들이 갖는 장단점 때문에 일반적인 표준이 될 수 있는 측정방법은 없고, 용도에 따라 적합한 방법을 선택하는 것이 최선이라 할 수 있다.

참고문헌

- [1] B. W. Hakki and P.D. Coleman, IRE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-8, pp.402-410, July 1960.
- [2] S. B. Chone and K. C. Kelly, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-14, pp.406-410, Sept. 1966
- [3] Y. Konishi, N. Hoshino, and Y. Utsumi, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-24, pp.112-114, Feb. 1976
- [4] D. Kajfez and P. Guillon, Dielectric Resonators, chap.4, 1986
- [5] W. E. Courtney, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-18, pp.476-485, Aug. 1970

< 천 체일 위원 >