論文93-30A-4-2

공진기 섭동방법을 이용한 마이크로파 페라이트의 복소 유전율과 선폭 측정

(Complex Permittivity and Linewidth Measurements of Microwave Ferrites Using the Cavity Perturbation Method)

廉 東 珍*, 吳 浩 碩*, 朴 東 徹*, 尹 相 元**

(Dong Jin Yeom, Ho Seok Oh, Dong Chul Park and Sang Won Yun)

要 約

마이크로파 페라이트의 복소 유전율과 선폭을 잘 알려진 공진기 섭동 방법을 사용하여 측정하였다. 공진기 섭동 방법은 마이크로파 대역에서 저손실 자성 재료와 유전 재료의 복소 유전율과 전도도 등을 측정하는데 널리 사용되어져 왔다. Trans-Tech 사로부터 구입된 TT1-2000, TT73-2200, 그리고 G-113 시편이 X 밴드 영역에서 측정되었다. TE_{103} 와 TE_{106} 구형 도파관 공진기를 가공하였고 원통형과 구형의 페라이트 시편을 준비하였다. 측정값과 공급자 데이타와의 오차는 ε'의 경우 1 퍼센트 이내로, 선폭(ΔH)의 경우 약 10 퍼센트 정도로 나타났다. 최악의 경우에 대해 오차를 분석한 결과는 우리의 측정 결과가 사용된 측정 장비의 정확도 규격으로 부터 계산된 오차 범위안에 있다는 것을 보여주었다.

Abstract

The complex permittivity and the linewidth of microwave ferrites are measured using the well known cavity perturbation method. The cavity perturbation method has been widely used for the measurement of complex permittivity and conductivity of low loss magnetic and dielectric materials at microwave frequencies. TT1-2000, TT73-2200, and G-113 samples ordered from Trans-Tech Inc. are tested. TE_{103} and TE_{106} rectangular waveguide cavities are fabricated and the ferrite sample of cylidrical rod and sphere shapes are prepared. The error between the measurement values and the supplier's data is less than 1 percent in case of ε' and about 10 percent in case of linewidth(ΔH). Worst case error analysis shows that our measured results are well within the error bound calculated from the accuracy specification of the measuring instruments.

*正會員, 忠南大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Chungnam Nat'l Univ.)
**正會員, 西江大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Sogang Univ.)

(※ 본 연구는 국방과학연구소 기술연구본부 3부 2팀의 지원을 받아 수행되었음)
接受日字: 1992年 6月 10日

Ⅰ. 서론

페라이트는 최근 그 응용 범위가 점차 마이크로파 대역으로 넓어져 다양한 마이크로파 장치에 사용되고 있는데 위상 배열 안테나의 핵심 부품인 변위기 뿐만 아니라 아이솔레이터, 써큘레이터, 자이레이터 등 비가역성 소자에 많이 이용된다. 따라서 마이크로파 주파수 대역에서 페라이트의 전기적, 자기적 파라미터들을 정확하게 측정하는 일은 페라이트의 개발자체는 물론 소자로의 응용에 있어서도 매우 중요하다고 할 수 있다.

마이크로파 대역에서 큰 유전상수값을 갖는 재료의 작은 유전손실을 정확하게 측정하는 것은 매우 어렵다. 공진기 섭동 방법은 마이크로파 주파수에서 저손실 자성 및 유전재료의 복소 유전율과 전도도등을 측정하는데 널리 사용되어져 왔다. [1] [2] 국내에서도 공진기 섭동 방법을 이용하여 유전체의 유전율을 측정하였으나 [3] 페라이트의 복소 유전율 뿐만아니라 선폭과 같은 자성체의 특성을 측정하기 위해 rectangular 도파관형 공진기를 사용한 연구는 아직 진행된 바 없었다. 이러한 공진기 섭동 방법은 공진기내에 특정한 모양의 작은 시편을 삽입한 다음 공진주파수와 Q값의 변화량을 측정하여 간접적으로 시편의 특성을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 마이크로파 소자로의 응용분야에서 매우 중요한 자성재료인 페라이트의 복소 유전율과 선폭을 측정하였고 측정에 관련된 오차에 대한 해석을 다루었다.

Ⅱ. 이 론

1. 공진기 섭동 이론과 측정에 관련된 식들

공진기 섭동 방법은 비교적 높은 정확도나 측정 장치가 간단한 장점이 있는 반면에 시편의 체적이 공진기내의 전자계의 형태에 영향을 주지 않을 만큼 작아야 한다는 기본제한 조건을 만족시켜야 하고 전계가 시편내부에서 균일해야 된다는 가정으로부터 성립한다. 공진기내에 시편이 삽입되면 공진주파수가 변화하게 되는데 일반적인 공진기 섭동방법의 기본식은 아래와 같이 복소 공진주파수의 변화량으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta w}{w} = -\frac{(\varepsilon_r - 1)\varepsilon_0 \int_{v_s} E_2 \cdot E_1^* dV + (\mu_r - 1)\mu_0 \int_{v_s} H_2 \cdot H_1^* dV}{\int_{v_c} (D_1 \cdot E_1^* + B_1 \cdot H_1^*) dV} \quad (1)$$

여기서 $\delta w/w$는 복소주파수 천이를 나타내고 V_c와 V_s는 각각 공진기와 시편의 체적을 나타내며, E_2와 H_2는 공진기 내에 시편이 들어있는 경우 시편 내부의 전계 및 자계를, E_1와 H_1는 시편이 없는 경우의 공진기 내의 전계와 자계를 표시한다. rectangular 도파관형 공진기의 내부 전계가 최대인 공진기 중앙에 유전체 시편이 삽입될 경우, 전계가 시편 내부에서 균일하다고 가정하면, 식 (1)은

$$\frac{\delta w}{w} = -\frac{(\varepsilon_r - 1)\varepsilon_0 \int_{v_s} E_2 \cdot E_1^* dV}{2\int_{v_c} D_1 \cdot E_1^* dV} = -\frac{P \cdot E_1^*}{2\int_{v_c} D_1 \cdot E_1^* dV} \quad (2)$$

로 간략화되며, 여기서 P는 유전체 내부에 유도되는 전기쌍극자 모멘트이다.

공동 공진기의 Q가 충분히 큰 경우 복소 주파수 천이는 실수부와 허수부로 나누어 생각할 수 있다. [4] 즉,

$$\frac{\delta w}{w} = \frac{f_{r2} - f_{r1}}{f_{r2}} + \frac{j}{2}\left(\frac{1}{Q_{L2}} - \frac{1}{Q_{L1}}\right) \quad (3)$$

이 되며, 식 (3)을 식 (2)에 대입하면

$$\frac{\delta f}{f} + j\delta\left(\frac{1}{2Q}\right) = -\frac{(\varepsilon_r - 1)\int_{v_s} E_1 \cdot E_2 dV}{2\int_{v_c} |E_1|^2 dV} \quad (4)$$

와 같이 쓸 수 있다.

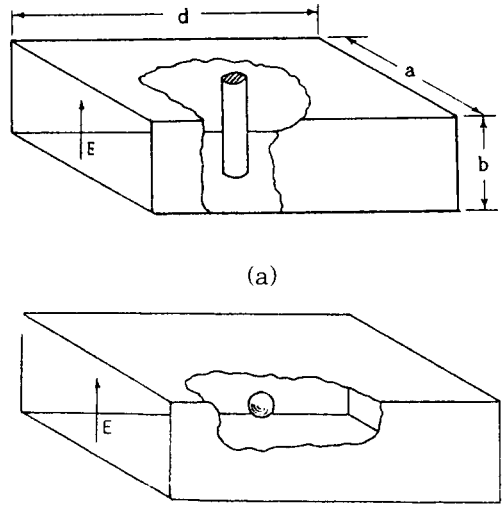


그림 1. 원통형, 구형(球形) 시편이 삽입된 공진기
Fig. 1 Cavity with rod and sphere sample inserted.

복소 유전율의 측정을 위해 TE_{103}모드 공진기를 사용하였는데 TE_{103} 모드에서 전계는

$$E_1 = E_0 \sin(\pi\, x/a)\sin(3\pi\, z/d)$$

와 같다. 여기서 x방향은 그림 1에서 공진기 단면의 가로방향, y방향은 세로방향, 그리고 z방향은 공진기의 길이 방향이다.

시편이 그림 1(a) 와 같이 원통형일 경우, 복소 유전율 ϵ_r은 $\epsilon' - j\epsilon''$으로 쓸 수 있고 경계 조건에 의해 $E_2 = E_1$ 이므로 식 (4) 는

$$\frac{\delta f}{f} = -2(\varepsilon' - 1)\cdot\frac{V_s}{V_c} \tag{5a}$$

$$\delta\left(\frac{1}{Q}\right) = 4\varepsilon''\cdot\frac{V_s}{V_c} \tag{5b}$$

와 같이 간단한 형태로 된다. 그림 1(b) 와 같이 시편이 구형(球形)일 경우, $E_2=(1/(\epsilon_r+2))E_1$ 이므로 식 (4)로부터

$$\varepsilon_r = \frac{1+2C}{1-C}, \tag{6}$$

$$C = \frac{abd}{16\pi_{r3}}\left[2\left(\frac{f_{r1}-f_{r2}}{f_{r2}}\right) - j\left(\frac{1}{Q_{L1}} \quad \frac{1}{Q_{L2}}\right)\right]$$

이 되고 ϵ''^2 항을 무시하면 식 (7)과 같다.

$$\frac{\delta f}{f} = -\frac{6(\varepsilon'-1)}{\varepsilon'+2}\cdot\frac{V_s}{V_c} \tag{7a}$$

$$\varepsilon'' = \delta\left(\frac{1}{Q}\right)\frac{(\varepsilon'+2)^2}{36}\cdot\frac{V_c}{V_s} \tag{7b}$$

측정 과정을 살펴보면, 먼저 빈 공진기에 sample holder만을 삽입하여 공진주파수 f_{r1}과 부하 Q인 Q_{L1}을 측정한다. 그리고 시편을 삽입한 다음 f_{r2}와 Q_{L2}를 측정하여 식 (5)-(7)로부터 복소 유전율을 계산한다.

2. 오차해석과 관계식들

도파관 공동공진기 내에서 섭동법(Perturbation Method)으로 유전체의 복소 유전율 ϵ_r과 전도도 σ (또는 손실 탄젠트)를 구하는 데 있어 발생하는 오차의 요인으로는 공진주파수 f_0와 Q의 측정에서 발생하는 오차와 도파관 공동공진기 내에 삽입되는 유전체 시편 내부의 전자계를 손실이 없는 경우의 전자계와 동일하다고 가정하는데서 생기는 이론적인 오차가 있을 수 있다. 본 연구에서는 공진주파수와 Q의 변화량을 측정할 때 발생하는 계측기 오차에 의한 복소 유전율의 실수부(또는 비유전율)과 전도도 값이 갖는 오차에 대해서만 고찰하기로 한다. 식 (2)와 식 (3)으로 부터

$$\frac{\delta w}{w} = \frac{\delta f}{f} + j\delta\left[\frac{1}{Q}\right] = -\frac{P\cdot E_1^*}{2\int_{V_c} D_1\cdot E_1^* dV} \tag{8}$$

이 되며, 식 (8)은 섭동을 적게 주는 임의의 작은 유전체 시편에 적용할 수 있다. 그러나, 우변의 유전체 시편 내에 유도되는 전기 쌍극자 모멘트 P는 유전체의 모양에 따라 다르며 정확하게 크기를 구할 수 없어, 대체로 근사식을 사용한다. 먼저 의사정적인(Quasi-static) 근사식이 유도되어 있는 구형 시편의 경우를 고찰해보면 유전체 시편 내에 유도된 쌍극자 모멘트 P는 시편이 도파관 공진기 내 전계가 최대인 지점에 위치하는 경우, 근사적으로

$$P = \frac{3\varepsilon_0 E_{0\max} V_s}{2}\left[\frac{2\varepsilon_r j_1(N\rho) - \left[N\rho j_1(N\rho)\right]'}{\varepsilon_r j_1(N\rho) + \left[N\rho j_1(N\rho)\right]'}\right] \tag{9}$$

로 표시된다. 여기서, $j_1(N\rho)$는 1차 spherical Bessel 함수이며, $\rho = \left(w\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}\right)a$이며, a는유전체 시편의 반경이고 $N = \left(w\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}\right)$ 이다. 식 (9)를 식 (8)에 대입하여 정리하면 유전체 시편의 비유전율과 전도도, 그리고 시편의 크기로부터 공진주파수와 Q 값의 변화량을 계산할 수 있다

측정의 정밀도를 산출하기 위하여 S. Chao는 1985년에 발표된 그의 논문[5] 에서 공진주파수와 Q 값의 측정오차로부터 비유전율과 전도도의 오차를 계산하는 식을 유도하였는데, 공진주파수 측정오차를 Δf_0, Q의 측정오차를 ΔQ_0라 하고, 시편의 비유전율 및 전도도의 오차를 각각 $\Delta\varepsilon'$, $\Delta\sigma$ 라 할 때, 두 측정오차가 주는 ϵ'과 σ 의 오차를 전미분을 이용하여 표시하면,

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = a_{11}\frac{\Delta f_0}{f_0} + a_{12}\frac{\Delta Q_0}{Q_0} \tag{10}$$

$$\frac{\Delta\varepsilon'}{\varepsilon'} = a_{12}\frac{\Delta f_0}{f_0} + a_{22}\frac{\Delta Q_0}{Q_0} \tag{11}$$

이 되며, 여기서 a_{11}, a_{12}, a_{21}과 a_{22}는 오차를 발생시키는 측정된 공진주파수와 Q에는 무관한 상수로 생각할 수 있다. 따라서, 상수 a_{11}, a_{12}, a_{21}과 a_{22}를 안

다면 시편의 비유전율과 전도도의 측정 오차를 구할 수 있다. 역으로 비유전율과 전도도의 한계를 정한 후에 필요한 공진주파수와 Q의 측정오차를 결정할 수 있다. 따라서, 도파관 공동공진기의 섭동법에 의한 최대 측정 오차 $|\Delta\sigma/\sigma|_{max}$, $\Delta\varepsilon'/\varepsilon'|_{max}$는 아래와 같이 된다.

$$\left|\frac{\Delta\sigma}{\sigma}\right|_{max} = \left|a_{11}\frac{\Delta f_0}{f_0}\right| + \left|a_{12}\frac{\Delta Q_0}{Q_0}\right| \tag{12}$$

$$\left|\frac{\Delta\varepsilon'}{\varepsilon'}\right|_{max} = \left|a_{21}\frac{\Delta f_0}{f_0}\right| + \left|a_{22}\frac{\Delta Q_0}{Q_0}\right| \tag{13}$$

유전체 시편이 원통 막대형이고, 공진기 내의 전계가 최대인 지점에 위치하는 경우, 유전체 내의 전기 쌍극자 모멘트의 정적인 근사식은

$$P = (\varepsilon_r - 1)\varepsilon_0 E_{0max} V_s \tag{14}$$

이다. 구형 유전체 시편의 경우와 같은 방법으로 식 (12), (13)과 같이 표시하는 경우 최대 측정 오차는

$$\left|\frac{\Delta\sigma}{\sigma}\right|_{max} = \left|a_{12}\frac{\Delta Q_0}{Q_0}\right| \tag{15}$$

$$\left|\frac{\Delta\varepsilon'}{\varepsilon'}\right|_{max} = \left|a_{21}\frac{\Delta f_0}{f_0}\right| \tag{16}$$

로 표시된다

앞에서도 언급한 바와같이 시편의 반경, 비유전율과 전도도를 알고 있는 경우, 유도된 오차식들을 이용하여 이 유전체 시편이 공동 공진기 내부 전계가 가장 큰 지점에 위치함으로써 발생하는 주파수와 Q값의 변화량을 알 수 있다. 임의의 유전율을 가지는 유전체에 있어서 유전체 시편의 크기와 전도도에 따른 주파수와 Q값의 변화량을 계산해 보면 손실이 작은 경우에는 주파수 변화량은 반경이 일정한 시편에 대해 거의 변화가 없음을 알 수 있으며, 손실이 작기 때문에 Q값의 변화량은 민감하게 변함을 알 수 있다. 원통형 유전체 시편의 경우에는 구형 시편의 반경과 동일한 반경을 가지고 공동내 전계가 최대인 곳에 위치할 때, 시편의 체적이 크기 때문에 주파수 변화량과 Q의 변화량이 훨씬 크게 나타난다. 그림 2(a)는 여러가지 비유전율을 갖을 때 전도도에 대한 공진주파수의 변화량을 나타내고 그림 2(b)는 전도도에 대한 Q값의 변화량을 나타낸다.

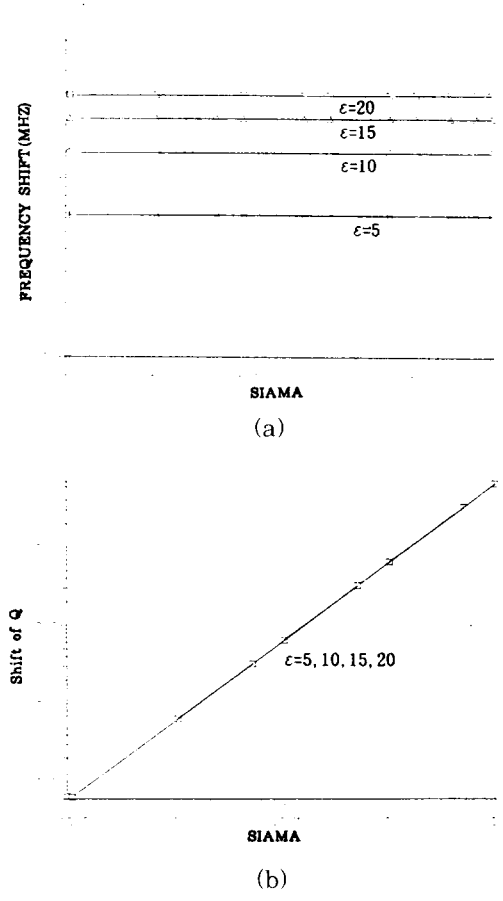
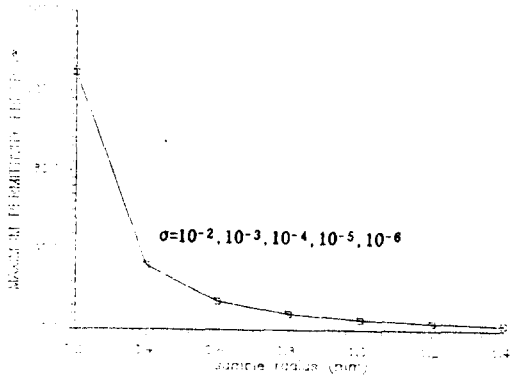


그림 2. 원통형 시편인 경우 공진주파수와 Q의 변화량
(a) 전도도에 대한 공진주파수의 변화량
(b) 전도도에 대한 Q값의 변화량

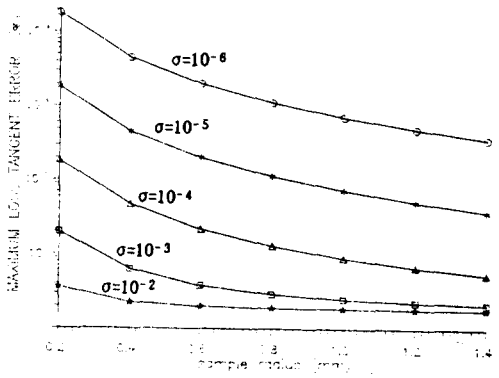
Fig. 2. Shift of resonant frequency and Q-factor in case of rod sample.
(a) Resonant frequency shift vs. conductivity.
(b) Q-factor shift vs. conductivity.

측정 결과 발생할 수 있는 비유전율의 최대 오차와 전도도의 최대 오차를 유전체 시편의 반경을 파라미터로 하여 그려보면 탄젠트 손실 또는 전도도가 아주 작은 경우 전도도의 최대 상대오차가 대단히 크며, 손실이 증가할수록 오차가 줄어드는 추세임을 알 수 있다. 또한 시편의 크기가 커질수록 주파수 및 Q값의 변화량이 증가하므로 오차가 줄어듬을 알 수 있다. 그러나, 시편의 크기가 커지게 되면 유전체 시편의 내부 전계가 균일하다는 가정이 틀리게 되므로 오차를 증가시킬 수 있다. 원통형 유전체 시편의 경우 비유전율의 최대 오차는 구에 비해 줄어든다. 그림 3은 원통형 시편인 경우 비유전율의 최대오차와 전도도의

최대오차를 시편의 반경에 대해 그린 그림으로 그림 3(a)에서 비유전율의 최대 오차는 전도도에 무관한 것과 시편의 크기가 클수록 오차가 줄어드는 것을 알 수 있고 그림 3(b)에서는 손실이 큰 경우일수록 전도도의 최대오차가 줄어드는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 3. 원통형 시편인 경우 비유전율과 전도도의 최대오차
(a) 시편 반경에 대한 비유전율의 최대오차
(b) 시편 반경에 대한 전도도의 최대오차

Fig. 3 Maximum permittivity and loss tangent error (%) in case of rod sample.
(a) Maximum permittivity error vs. sample radius.
(b) Maximum loss tangent error vs. sample radius.

Ⅲ. 복소 유전율 측정과 측정결과 고찰

본 연구에서 사용된 X-band 도파관형 공진기는 그림 4와 같은 치수를 갖는 TE_{103}모드 공진기로 원통형 시편을 상하로 삽입하도록 구멍을 뚫어 놓았다.

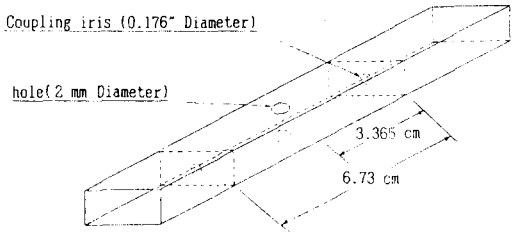


그림 4. TE_{103} 모드 공진기의 치수
Fig. 4. Dimension of TE_{103} mode cavity.

이 때 공진기와의 결합(coupling)을 위해 두께 0.0023" 의 구리 박판을 이용하여 결합구멍 크기가 0.176" 인 아이리스(iris)를 만들었다. 시편을 공진기에 삽입하기 위한 sample holder는 ε'이 1에 가까운 스티로폼으로 가공하였고 또 구형 시편인 경우 시편을 포함하고 있는 sample holder를 공진기의 중앙에 밀어넣기 위한 지그(jig)도 테프론으로 가공하였다. Wiltron 562 스칼라 회로망 분석기를 이용하여 먼저 빈공진기의 공진주파수와 Q값을 측정한 후 시편이 삽입된 공진기의 공진주파수와 Q값을 측정하여 측정된 값으로부터 식 (5)- 식 (7)을 이용하여 복소 유전율값을 계산하였다. 마그네슘-망간 페라이트(TT1-2000), 리튬-티타늄 페라이트(TT73-2200) 그리고 가넷(G-113)의 측정결과는 구형시편인 경우 표 1에, 원통형 시편인 경우 표 2에 실었으며 공급자의 데이타 쉬트값과도 비교하였다. 원통형 시편을 공진기에 삽입하기 위해 직경 2mm 정도의 구멍을 뚫었고 이 삽입 구멍의 크기에 따라 측정, 계산된 비유전율 값이 크게 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다.

표 1. 구형 시편의 비유전율과 손실 탄젠트의 측정결과

Table 1. Permittivity and loss tangent of sphere samples.
(TE_{103} mode cavity : 2.286×1.016×6.858cm, a=0.635mm, sample holder : Styrofoam)

	1	2	3	data sheet
TT1-2000 # 1	12.61 0.0006	12.61 0.0005	12.60 0.0005	12.35 0.0002
TT1-2000 # 3	12.26 0.0006	12.26 0.0006	12.30 0.0006	12.34 0.0002
TT73-2200 # 1	15.03 0.0006	15.01 0.14	15.01 0.0007	15.34 0.0015
TT73-2200 # 2	15.72 0.0016	13.30 0.0006	14.41 0.083	15.10 0.00145

표 2. 원통형 시편의 비유전율과 손실탄젠트의 측정결과

Table 2. Permittivity and loss tangent of rod samples.

(TE_{103} mode cavity : 2.286×1.016×6.73cm, a=0.635 mm)

	1	2	3	data sheet
TT1-2000 # 1	12.28 0.0009	12.30 0.0009	12.29 0.0004	12.35 0.0002
# 2	12.30 0.0004	12.34 0.0006	12.32 0.0006	12.34 0.0002
# 3	12.33 0.0004	12.33 0.0009	12.32 0.0006	12.34 0.0002
TT73-2200 # 1	15.18 0.0017	15.18 0.0015	15.20 0.0007	15.34 0.0015
# 2	15.10 0.0006	15.10 0.0012	15.10 0.00149	15.10 0.00145
G-113 # 1	14.95 0.0003	15.03 0.0001	15.02 0.0001	14.97 0.0001
# 2	15.0 0.0006	15.0 0.0008	14.95 0.0003	15.0 0.0001

또한 주파수 스윕률을 다르게 하면서, 즉 스윕시간을 0.05 초에서 30 초까지 변화시키면서 측정한 결과를 비교해 보면 표 3과 같이 주파수 스윕률이 비유전율과 손실 탄젠트에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

표 3. 스윕 시간에 따른 비유전율과 손실 탄젠트의 측정결과

Table 3. Measured results with two different sweep times.

	2 sec	0.05 sec	data sheet
TT1-2000 # 1	12.28 0.0001	12.29 0.0004	12.35 0.0002
# 2	12.32 0.0001	12.34 0.0006	12.34 0.0002
TT73-2200 # 1	15.18 0.0012	15.18 0.0015	15.34 0.0015
# 2	15.11 0.00126	15.10 0.00149	15.10 0.00145
G-113 # 1	15.05 0.0001	15.02 0.0001	14.97 0.0001
# 2	15.01 0.0001	15.0 0.0006	15.0 0.0001

앞에서 언급한 실험 방법과 측정결과를 앞에서 유도한 오차 해석 결과와 비교하였다. 오차해석을 위하여 측정에 사용된 공동 공진기는 구형 시편의 경우 그 크기가 2.286 × 1.016 × 6.858 cm(원통형 : 6.73cm)로 표준 X-Band 도파관으로 제작되었으며 sample holder를 장착하고 측정된 공진주파수는 9.2 ~ 9.3GHz 대역이며, 무부하 Q는 구형시편을 측정하는 공진기의 경우 4900 ~ 5200, 원통형의 경우에는 공진기에 뚫린 시편 삽입구멍으로 인해 Q가 줄어 3000 ~ 3200으로 TE_{103} 모드로 공진하는 경우이다. 측정에 사용된 스칼라 회로망 분석기의 특성은 주파수 정확도가 X-Band에서 ±15MHz이고 진폭 분해능은 대략 0.12dB이다. 표 4에는 앞에서 페라이트와 가넷 시편들의 측정된 복소 유전율과 이를 바탕으로 계산된 각 시편의 비유전율과 탄젠트 손실의 측정값이 가질 수 있는 최대 오차 범위가 제시되어 있다. 구형 시편에 대해서는 오차의 범위가 앞에서 예측된 것처럼 원통형에 비해 대단히 큼을 알 수 있다. 주파수 정확도와 진폭 분해능이 더욱 높은 계측기를 사용하면 최대 오차 범위는 더욱 줄어들 것이다.

표 4. 측정된 시편의 비유전율의 최대 오차

Table 4. Maximum permittivity error of measured samples.

Sphere Sample Radius = 0.635 (mm) Volume = 1.073×10^{-9} (mm^3)	Rod Sample Radius = 0.635 (mm) Volume = 1.287×10^{-8} (mm^3)
TT73-2200 #1 ε_r = 14.97 tanδ = 7.135×10^{-4} f_{0e} = 9249.80 (MHz) Q_{0e} = 4901.78 f_{0s} = 9246.20 (MHz) Q_{0s} = 4888.94 $\lvert\Delta\varepsilon/\varepsilon\rvert_{max}$ = 4.285×10^{3} (%) $\lvert\Delta\sigma/\sigma\rvert_{max}$ = 4.548×10^{4} (%) Δf (이론치) = 3.595 (MHz)	TT73-2200 #1 ε_r = 15.18354 tanδ = 1.27×10^{-3} f_{0e} = 9324.40 (MHz) Q_{0e} = 3173.63 f_{0s} = 9109.40 (MHz) Q_{0s} = 2575.72 $\lvert\Delta\varepsilon/\varepsilon\rvert_{max}$ = 1.3045×10^{1} (%) $\lvert\Delta\sigma/\sigma\rvert_{max}$ = 1.9793×10^{1} (%) Δf (이론치) = 219.08 (MHz)
TT1-2000 #1 ε_r = 12.58734 tanδ = 6.05×10^{-4} f_{0e} = 9244.60 (MHz) Q_{0e} = 5140.00 f_{0s} = 9241.10 (MHz) Q_{0s} = 4899.00 $\lvert\Delta\varepsilon/\varepsilon\rvert_{max}$ = 3.7283×10^{3} (%) $\lvert\Delta\sigma/\sigma\rvert_{max}$ = 6.0965×10^{5} (%) Δf (이론치) = 3.491 (MHz)	TT1-2000 #1 ε_r = 12.26773 tanδ = 4.43×10^{-4} f_{0e} = 9324.40 (MHz) Q_{0e} = 3175.28 f_{0s} = 9151.90 (MHz) Q_{0s} = 3022.96 $\lvert\Delta\varepsilon/\varepsilon\rvert_{max}$ = 1.5968×10^{1} (%) $\lvert\Delta\sigma/\sigma\rvert_{max}$ = 6.3786×10^{1} (%) Δf (이론치) = 175.81 (MHz)

Ⅳ. 선 폭 측 정

페라이트의 선폭은 페라이트를 이용하는 마이크로파 소자의 손실요소(loss factors)와 직접 관련이 되며 마이크로파 자성재료 선택시 중요한 기준이 되고 있다.[7]

그림 5와 같이 페라이트의 선폭은 rf 자계와 직각으로 DC 자계를 변화 시키며 인가했을 때 일정한 주파수에서 자화율(susceptibility) 텐서의 허수부분이 최대값의 1/2인 값이 되는 두 DC자계값의 차이로서 정의된다.[7]

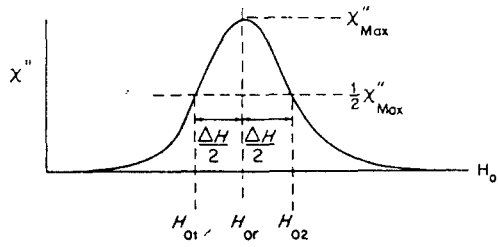


그림 5. 페라이트의 선폭
Fig. 5. Ferrite resonance linewidth.

따라서 페라이트는 마이크로파 주파수에서 인가된 DC자계의 값에 따라 전력손실(power loss) 또는 에너지 흡수(absorption)의 양이 달라지는 현상을 나타내게 된다. 그래서 본 연구에서는 페라이트에 RF 에너지가 흡수될때 공진기의 전송손실(transmission loss)이 증가하므로 최대 전송손실로 부터 3 dB 떨어지는 손실값을 주는 DC자계값의 차이로서 선폭을 정의하였다.

최대 흡수를 얻기 위해 필요한 H의 크기, 즉 페라이트의 공진조건은 시편의 magnetization, 시편의 형태, effective gyromagnetic ratio γ , 그리고 측정 주파수로써 계산될 수 있다.[6] 그러나 작은 구형 시편의 경우 magnetization에 대한 영향을 배제하여 다음과 같은 식으로부터 계산할 수 있다

$$f = \gamma_{eff} H_r \qquad (17)$$

여기서 f는 주파수(MHz)를 γ_{eff} 는 effective gyromagnetic ratio 로 2.8 MHz/Oe 이고, H_r은 공진자계값으로 단위는 Oe 이다.

스칼라 회로망 분석기 시스템의 스윕 오실레이터로부터 rf자계가 공진기에 입력되고 여기에 직각방향으로 DC자계를 인가하였는데 전자석을 이용해 DC자계를 인가시키는 방법을 살펴보면 전자석극의 간격이 4.5 cm 이었고 전류를 20분 동안에 20 A 까지 올려서 최대 자장이 5000 Oe까지 되도록 하였다. 10 Oe 단위로 스칼라 회로망 분석기를 통해 전송손실을 관찰했다. 전송손실은 DC자계가 증가하면서 점점 증가하여 공진 자계값에서 최대의 값을 나타내고 다시 감소하는 현상을 나타내었다. 이러한 DC자계와 전송손실의 관계로 부터 최대 전송손실값의 1/2 되는 지점, 즉 3dB 점에 대응하는 두개의 DC자계값의 차이가 바로 측정하고자 하는 선폭이 된다. 측정에 사용된 공진기는 rectangular 도파관형 TE_{106}모드 공진기이고, 유전체 막대 끝에 페라이트 구를 붙여 도파관 좁은 면 중앙에 뚫어놓은 구멍을 이용하여 공진기 중앙에 시편을 삽입하였다. 이 때 측정에 사용된 구형 시편의 직경은 0.05"이었다. 그림 6는 선폭을 측정한 결과를 DC자계값과 전송손실과의 관계로 보여주고 표 5는 측정값을 데이타 쉬트의 값과 비교한 것이다. G-113의 경우 선폭이 매우 작아서 전자석의 상승시간을 40분으로 늘려 측정하였는데 이때 전자석의 상승시간을 20분으로 하였을때보다 오차를 크게 줄일 수 있었다.

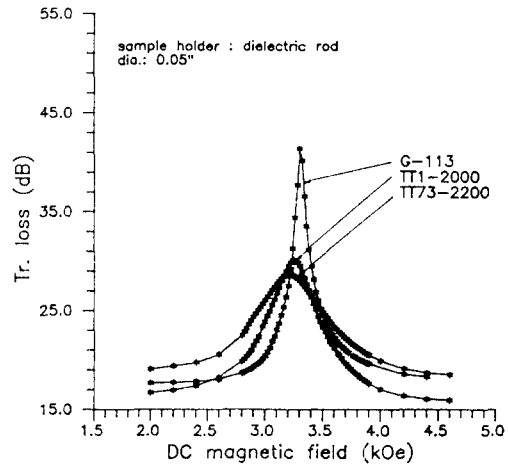


그림 6. DC자계값과 전송손실과의 관계
Fig. 6. The relationship between dc magnetic field and transmission loss.

표 5. 페라이트 선폭의 측정값
Table 5. Measured ΔH and g_{eff} using dielectric rod sample holder.

	ΔH	geff	data sheet	
			ΔH	geff
TT1-2000	264	2.03	240	2.01
TT73-2200	472	2.05	417	2.04
G-113	45 (tr=40min.)	2.00	39	2.00

표 5에서 살펴보면 페라이트 선폭의 측정값이 공급자의 데이타 쉬트보다 조금 크게 측정되었는데 여러가지 자성재료를 만들어 공급하는 미국의 Trans-Tech 사도 선폭의 경우 약 20 %정도의 오차를 허용하고 있다. 따라서 본 논문에서의 결과는 양호하나 더 높은 분해능을 가진 계측기를 이용한다면 더욱 정밀한 측정이 가능할 것이다.

Ⅴ. 결 론

마이크로파 페라이트의 복소 유전율과 선폭을 잘 알려진 공진기 섭동 방법을 사용하여 측정해 보았다. 측정은 X 밴드 영역에서 rectangular 도파관형 공진기를 사용하여 행해졌고 Trans-Tech 사로부터 구입된 TT1-2000, TT73-2200, 그리고 G-113 시편이 측정되었고 측정 결과를 공급자의 데이타와 비교해 보았다.

측정값과 공급자의 데이타와의 오차는 ϵ'의 경우 1 퍼센트 이내로, ΔH의 경우 약 10 퍼센트 정도로 나타났다. 최악의 경우에 대해 오차를 분석한 결과는 우리의 측정 결과가 사용된 측정 장비의 정확도 규격으로 부터 계산된 오차 범위안에 있다는 것을 보여준다.

측정의 결과에 대한 오차를 줄이기 위해서는 더욱 정밀한 계측기를 사용해야 하겠으며 온도에 따른 재료 정수의 변화를 관찰해 보는 것도 앞으로의 과제라고 할 수 있다.

參 考 文 獻

[1] Anand Parkash, J. K. Vaid, and Abhai Mansingh, "Measurement of diel-ectric parameters at microwave frequencies by cavity perturbation technique," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-27, pp.791 795, Sept. 1979.

[2] Shihe Li, Cevdet Akyel, and Renate G Bosisio, "Precise calculation and measurements on the complex dielectric constant of lossy materials using TM010 cavity perturbation techniques." *IEEE Trans Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-29, pp.1041-1048, Oct. 1981.

[3] 강태원, 박위상, "공동공진기의 섭동방법에 의한 저손실 유전체의 복소 유전율 측정", 마이크로파 및 전파전파연구회 추계학술발표회 논문집, 제 12권, 제 2호, pp.237-240, 1989.

[4] M.Sucher and J.Fox, HANDBOOK OF MICROWAVE MEASUREMENTS volume Ⅱ.

[5] S. Chao, "Measurements of Microwave Conductivity and Dielectric Constant by the Cavity Perturbation Method and Their Errors," *IEEE Trans. Microwave Theory Technique*, vol. MTT-33, no.6, PP. 519-526, June 1985.

[6] American Society for Testing Materials (ASTM), Standard Test Method for Resonance Linewidth and Gyromagnetic Ratio of Nonmetallic Magnetic Materials," F130-86

[7] J. Helszajn, Microwave Ferrite Engineering, New York, John Wiley and Sons Ltd., 1969.

著 者 紹 介

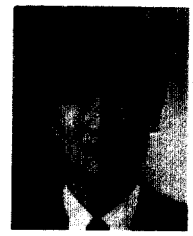
朴 東 徽 (正會員)

1952年 2月 5日生. 1974年 서울대학교 전자공학과(공학사). 1976年 한국과학원 전기 및 전자공학과(공학석사). 1984年 University of California, Santa Barbara(공학박사). 1977年 ~ 1978年 독일 Ruhr-University Bochum에서 집적광학연구. 1976年 3月 ~ 1993年 2月 충남대학교 전자공학과 교수. 1993年 3月 현재 충남대학교 전파공학과 교수.

•

尹 相 元 (正會員) 第26卷 第8號 參照

현재 서강대학교 전자공학과 교수.



廉 東 珍 (正會員)

1968年 11月 6日生. 1991年 2月 충남대학교 전자공학과(공학사). 1993年 2月 충남대학교 대학교 대학원 전자공학과(공학석사).

•

吳 浩 碩 (正會員)

1967年 8月 30日生. 1991年 2月 충남대학교 전자공학과(공학사). 1993年 2月 충남대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1993年 4月 현재 한국통신 재직중.