

마그네슘 페라이트에서 강자성 공명의 시료 크기 의존성 연구

한기태 · 백종규

국방과학연구소 기술연구본부 3부
(1994년 9월 3일 접수)

A Study on Sample Size Dependence of Ferromagnetic Resonance in Polycrystalline Magnesium Ferrites

Kee-Tae Han and Jong-Gyu Paik

Ceramic Matr. Research Team, Advanced Technology Research Centers,
Agency for Defense Development
(Received September 3, 1994)

요 약

구형의 다결정 마그네슘 페라이트의 강자성 공명현상(ferromagnetic resonance : FMR)을 공진기 섭동 방법을 이용하여 시료 크기의 함수로 측정하였다. FMR 신호의 세기(S_1) 및 공명 자기장(H_{res})와 공명 선폭(ΔH)은 모두 시료의 체적에 비례하여 증가하였다. S_1 의 체적 의존성은 시료의 크기가 마이크로파 skin depth 보다 작아서 마이크로파가 시료 내부까지 완전히 침투하였음을 의미하고, H_{res} 의 크기 의존성은 마이크로파 지연효과로 생각된다. 측정된 H_{res} 결과에서 시료크기효과를 배제한 후 공명 조건식을 써서 얻은 g -인자는 단결정에서 이미 보고된 값과 오차범위 내에서 아주 잘 일치였으며, 또 시료의 크기효과를 배제한 FMR 선폭은 Schlomann의 이론으로 설명되었다. 이는 측정된 FMR 파라메타와 Schlomann 이론값 간의 차이가 시료크기에 의한 것임을 의미한다. 한편 우리의 ΔH 의 크기 의존성 결과는 Dionne의 결과($\Delta H \propto 1/r$)와 다른데, 이는 선폭을 읽는 정의의 차이에 의한 것임을 알 수 있다.

ABSTRACT

Sample size effect on ferromagnetic resonance (FMR) in polycrystalline $MgFe_2O_4$ has been investigated. The signal intensity (S_1), resonance field (H_{res}) and line width (ΔH) were found to increase proportionally to r^3 with the increase of sample radius. The r^3 -dependence of S_1 means the complete penetration of rf-field into the sample, and the broadening of ΔH due to the sample size appears to be closely related to the amount of scattering sources like pores. Meanwhile, the values of $H_{res}(0)$ and $\Delta H(0)$ obtained by extrapolating the data of $H_{res}(r)$ and $\Delta H(r)$ measured at several sizes to $r=0$, were in good agreement with those calculated using the Schlomann's equations for internal field and ΔH , respectively. This result indicates that the discrepancy between the measured FMR parameters and those calculated by Schlomann's equation could be ascribed to the effect of sample size. Thus it is suggested that the size effect on FMR should be removed for the analysis of the FMR parameters. Meanwhile, our result for the size dependance of ΔH was found to be contradictory to those reported by Dionne, where $\Delta H \propto 1/r$ at a given surface roughness. This discrepancy appears to arise from the difference in the definition of reading the line width.

Key words: Size effect, FMR, Magnesium ferrite, Polycrystalline ferrite

1. 서 론

페라이트는 밴드패스 필터, 밴드스톱 필터, 공진기(resonator), 써큘레이터, 아이슬레이터, 위상 변위기 등의 마이크로파 조절소자로 널리 사용되고 있다. 일반적으로

페라이트 재료가 이러한 소자의 설계에 적합한지 여부를 판정하기 위해서는, 페라이트의 강자성 공명(ferromagnetic resonance : FMR로 약칭)을 관측함으로써 이 물질이 마이크로파와 상호 작용할 때 야기되는 물리적인 현상을 조사해야 한다¹⁾. 다결정 페라이트의 FMR 파라

메타(공명자기장과 공명 선폭)를 설명하는 잘 알려진 이론으로 Schloemann의 이론이 있는데²³⁾, 이 이론은 실제로 실험결과와 맞지 않는다는 보고가 있다⁴⁻⁷⁾. 공명자기장(resonance field)의 경우에 시료의 크기에 의해 영향받아 이론값과 차이가 나타난다는 사실이 잘 알려져 있으며⁴⁻⁶⁾ 공명 선폭(resonance line width)의 경우에는 이러한 차이가 화학적 결함이나 불순물에 의해 나타나는 것으로 보고되어 있을 뿐이고, 그 원인은 명확하게 규명하지 못하고 있는 실정이다^{7,8)}. 특히 공명 선폭을 읽는 정의 뿐만 아니라 시료의 크기에 따라 측정량 및 그 해석이 편이하게 달라질 수 있기 때문에 이에 대한 정확한 측정기준의 설정 및 해석이 없이는 페라이트의 마이크로파 손실기구를 명확히 규명하기 어려우며, 또 재료 공학적 측면에서도 마이크로파 손실을 줄이는 제어인자를 도출할 수 없다. 따라서 본 연구는 FMR 파라메타에 미치는 시료크기 효과를 조사하였으며, 특히 선폭을 읽는 몇 가지 정의를 따랐을 때 얻어지는 물리량을 서로 비교함으로써, 손실 파라메타의 해석에 적합한 정의를 제시하였다. 이 내용의 일부는 이미 국제 자기 및 전자재료 학술회의에서 발표되었다⁹⁾.

여기서는 잘 알려진 물질로 $MgFe_2O_4$ 다결정을 선택하였으며, 구형의 $MgFe_2O_4$ 다결정의 FMR을 공진기 섭동방법(cavity perturbation method)을 이용하여 시료 크기의 함수로 측정하였다. 측정된 FMR 결과로부터 시료의 크기 효과를 배제한 후 공명 조건식을 써서 얻은 g -인자를 단결정에서 이미 보고된 값¹⁰⁾과 서로 비교하였고, 또 시료의 크기효과를 배제한 FMR 선폭을 Schloemann의 이론으로 설명함으로써, 실험값과 이론값 간의 차이가 시료크기 효과 때문에 나타난 것임을 보였다.

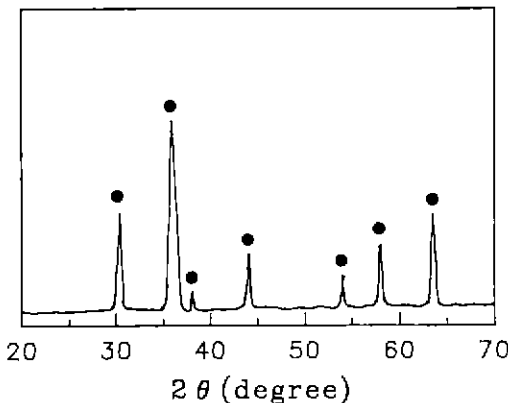


Fig. 1. XRD pattern of the polycrystalline $MgFe_2O_4$ (●; spinel phase).

또한 공명 선폭에 대한 몇 가지 정의식대로 읽은 선폭의 시료크기 의존성을 서로 비교하고, 이들 간의 차이를 논의하였다.

2. 실험 및 결과

본 실험에서 사용한 $MgFe_2O_4$ 다결정시료는 Aldrich사의 Fe_2O_3 분말(99%)와 MgO 분말(99.99%) 원료를 적절한 몰비로 섞어 고상법으로 만들었으며, 스피넬 단상의 형성상태를 X-선 회절실험으로 확인하였다(Fig. 1). 이를 만드는 방법은 이미 다른 문헌에 보고되어 있다¹¹⁾. 시료의 포화자화($4\pi M_s$)는 정밀도가 0.1%인 시료 진동형 자력계(VSM, LDJ 9600) 장치를 사용하여 상온에서 측정하였다. 시료의 실험밀도는 아르키메데스법을 이용하여 측정하였고, 기공도는 X-선 회절법으로 이론밀도(D_{the})를 구한 다음 이 것과 실험밀도(D_{exp}) 간의 차를 이론밀도로 나누어 기공도를 구하였다. 이들 시료에서 측정된 포화자화, 실험밀도, 이론밀도 및 기공도를 Table 1에 나타내었다.

$MgFe_2O_4$ 의 FMR 흡수선을 공진기섭동 방법을 이용하여 시료반경의 함수로 관측하였는데, 이때 사용된 마이크로파의 출력은 1 mW이고, 진동수는 9.3 GHz이었다. 구형시료는 Bond 방법¹²⁾으로 시료반경이 각각 0.27, 0.40, 0.46, 0.51, 0.56, 0.65, 0.68 mm인 여러 개의 시료를 준비하였다. 이때 Bond 장치 내의 사포를 똑 같이 사용하여 여러 개의 구형시료가 모두 같은 표면 거칠기(surface roughness)를 갖도록 하였다. 이들 시료들 중에서 $r=0.51$ mm인 시료의 구형상에 대한 주사전자현미경(scanning electron microscopy: SEM) 사진을 Fig. 2에 대표적으로 보였다.

구형의 시료가 공진기의 중앙에 있을 때 공진 섭동 이론에 의하면¹³⁾, 마이크로파 투자율의 실수부 μ' 와 허수부 μ'' 는 각각

$$\mu' = \frac{4\pi A}{8r^3} \frac{\Delta f}{f_s} + 1, \quad (1-a)$$

Table 1. The Saturation Magnetization, Theoretical Density, Experimental Density, Porosity and μ''_{max} Measured from the Polycrystalline $MgFe_2O_4$.

sample	$4\pi M_s$ (G)	D_{the} (g/cm ³)	D_{exp} (g/cm ³)	porosity (%)	μ''_{max}
$MgFe_2O_4$	1454	4.52	4.23	6.4	41.1

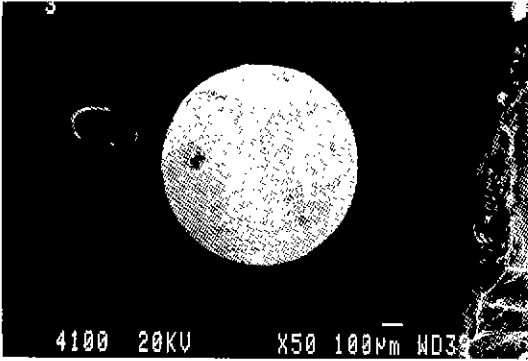


Fig. 2. SEM photograph of the spherical sample with $r=0.51$ mm.

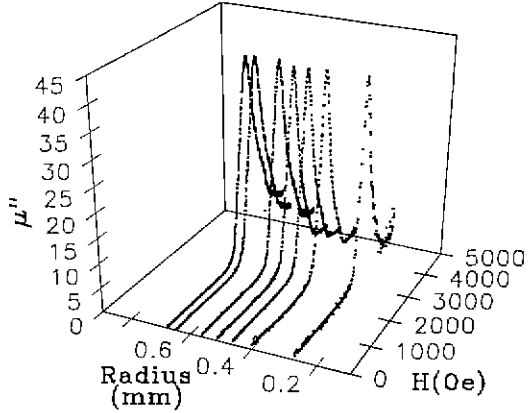


Fig. 4. The sample size dependence of μ'' obtained from FMR signals.

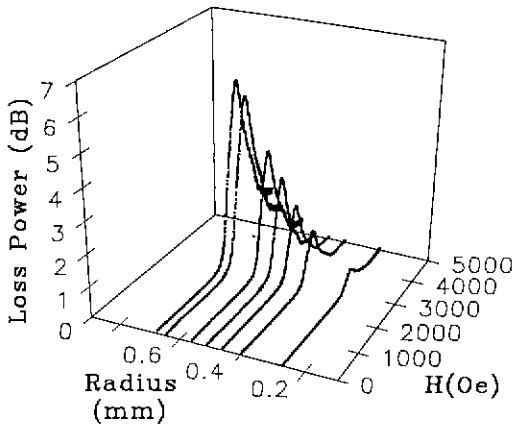


Fig. 3. FMR absorption signals of polycrystalline $MgFe_2O_4$ measured as a function of sample radius.

$$\mu'' = \frac{4\pi A}{16r^3} \frac{10^{\Delta L/20} - 1}{Q_L} \quad (1-b)$$

으로 표현된다. 여기서 $A=3abl[1+(\lambda_g/2a)^2]/\pi$ 이며, a , b 및 l 은 육면체 공진기의 각 모서리 길이이다. 또 λ_g 는 공진기 파장(guide wave length), $\Delta f=f_0-f_s$ (f_0 와 f_s 는 각각 시료가 있을 때와 없을 때의 공명진동수이다.), r 은 시료의 반경이고, Q_L 은 빈 공진기의 부하품질인자(loaded quality factor)이다. (1)식에서 ΔL 은 시료에 의한 공진기의 삽입손실의 변화이며, 이것을 자기장의 함수로 측정할 것이 FMR 흡수신호의 모습이다.

Fig. 3은 $MgFe_2O_4$ 시료에서 반경(r)의 함수로 측정된 공명흡수신호를 보인 것이며, Fig. 4는 (1-b)식을 이용하여 구한 투자율의 허수부 μ'' 를 자기장과 시료반경의 함수로 보였는데, 최대값 μ''_{max} 는 Fig. 3의 ΔL 의 최대값의 시료크기 의존성과는 달리, 시료의 크기에 관계없이 거의

일정함을 알 수 있다. Fig. 4에서 구한 μ''_{max} 값을 Table 1에 함께 나타내었다.

Fig. 5(a)는 Fig. 3의 공명흡수선의 세기(S_1)를 시료체적의 함수로 나타낸 것인데, S_1 는 체적에 비례하는 꼴로 관측되었다. 이때 S_r 는 흡수곡선으로 둘러싸인 면적을 적분한 것이며, 그림에서 직선은 실험결과에 최소 자승법을 적용하여 구한 것이다. Fig. 5 (b)와 (c)은 μ'' 의 시료 크기 의존성(Fig. 3)으로부터 읽은 H_{res} 와 ΔH 을 시료반경의 함수로 나타낸 그래프이다. 여기서 공명자기장은 $\mu''=\mu''_{max}$ 인 자기장 값을 읽었으며, 공명선폭은 μ'' 의 곡선에서 $\mu''_{max}/2$ 에 대응하는 H_{res} 전후의 자기장 값의 간격(full width at half maximum : FWHM)을 선폭으로 취하였다(Fig. 5(c)에서 ● 표시)¹⁴⁾. Fig. 5 (b)와 (c)로부터 알 수 있는 바와 같이 H_{res} 와 ΔH 는 r^3 에 비례하여 증가하였다(그림에서 실선은 실험결과에 r^3 으로 최소 자승법을 적용하여 구한 것이다).

한편 FMR 측정동안 페라이트 시료에 의해 공진 주파수(f_0)가 변할 수 있다. 즉 ΔH 를 읽을 때, (1-a)식의 μ'' 에 의한 f_0 의 이동 때문에 오차가 수반될 수 있다. 그러나 이것은 다음과 같은 이유로 거의 영향을 미치지 않는다. V_s (시료의 체적)/ V_c (공진기의 체적) $\sim 10^{-8}$ 이고 $MgFe_2O_4$ 의 경우 $(\mu-1) \sim 10^4$ 이므로, (1-a)식으로부터 $\Delta f/f_0 \sim 10^{-4}$ 임을 알 수 있다. 이것은 $H_0=3000$ Oe일 때 ΔH 의 오차가 1 Oe 정도 발생됨을 의미한다. 실제로 측정시 f_0 의 변화가 $\sim 10^{-4}$ GHz 정도로서 거의 영향을 미치지 않았다. 그러나 YIG와 같은 선폭이 아주 좁은 시료를 측정할 경우에는 이러한 효과를 무시할 수 없으므로 f_0 를 안정화시킬 필요가 있다.

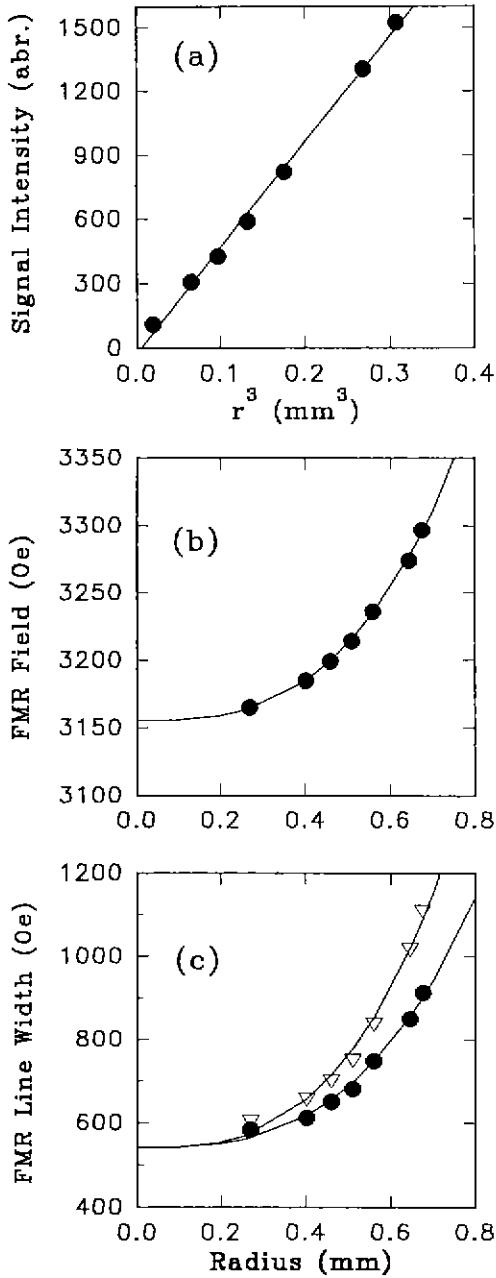


Fig. 5. The size dependence of (a) S_r , (b) H_{res} and (c) ΔH measured from the polycrystalline $MgFe_2O_4$ (the solid lines denote the best fitted results with r^3 , and the symbol (∇) means the half power line width).

3. 분석 및 논의

페라이트 내에서 자기쌍극자는 외부 자기장 이외에도

여러가지 내부자기장의 영향을 받아서 다결정의 경우에도 공명선의 이동(resonance line shift)과 공명선의 넓어지기(resonance line broadening) 효과가 함께 나타난다²⁻⁷. 구형의 다결정 페라이트 시료인 경우 유효자기장 H_{eff} 과 마이크로파 진동수 ω 를 조건으로 하는 강자성 물질에 대한 일반적인 공명조건은

$$\omega = \gamma H_{eff} = \gamma(H_0 + H) \tag{2}$$

이다. 여기서 $\gamma(=ge/2mc)$ 는 자기회전비(gyromagnetic ratio)이며, H_0 는 외부자기장이고, H 는 미지의 내부자기장(unspecified internal field)이다.

일반적으로 H 는 결정자기 이방성(magnetocrystalline anisotropy) 효과(H_A)와 시료 내의 기공(pore)에 의한 효과(H_p) 뿐만 아니라 시료의 크기효과, $H(r)$, 로 구성된다^{4,5}. 즉,

$$H = H_A + H_p + H(r) \tag{3}$$

이다. $H(r)$ 은 시료가 공진기의 중앙에 있을 때 시료에 의한 전자기파의 산란(scattering of the electromagnetic wave) 효과(H_s)로 나타난다(Artmann은 이를 전자기파의 지연효과라고 표현하였다⁴). 더우기 시료가 공진기 금속벽 근처에 있을 경우에는 공진기 벽효과(cavity wall effect)와 와전류(eddy current) 효과 등이 무시할 수 없을 정도로 크게 나타난다^{5,15}.

본 실험에서 시료는 공진기의 중앙에 위치하므로, 벽효과와 와전류 효과는 무시되어 고려하지 않는다^{4,5,15}. (3)식에서 개개의 미소 단결정이 주는 공명선 이동량의 2차 모멘트와 시료내의 기공들의 영향을 고려하면, H_A 와 H_p 는

$$H_A + H_p = -\frac{K_1}{2M_s} + \frac{4\pi M_s P}{3} \tag{4}$$

으로 알려져 있다. 여기서 K_1 은 제 1차 이방성상수이고, P 는 시료의 기공율(porosity)이다. 한편, 시료에 의한 마이크로파의 산란효과는 아래의 식으로 표현된다^{4,5,8,9}.

$$H(r) = \frac{8\pi}{9} \left\{ 1 + \frac{\epsilon}{5} \right\} \frac{4\pi M_s r^2}{\lambda^2} \tag{5}$$

여기서 ϵ 는 시료의 유전상수이고, r 은 시료의 반경이다. 한편, 공명현상 ($H_0 = H_{res}$)이 일어날 때 (2)와 (3)식으로부터

$$H_{res} = \omega/\gamma - \{H_A + H_p + H(r)\} \tag{6}$$

$$H_{res}(0) = \omega/\gamma - (H_A + H_p)$$

Table 2. FMR Parameters Measured from the Polycrystalline MgFe₂O₄.

MgFe ₂ O ₄	polycrystalline	single crystal
H _{res} (0)	3155 ± 30 Oe	—
H _A	173 Oe	—
H _P	31 Oe	—
H _i	204 Oe	—
$\gamma/2\pi = \frac{f}{H_{res}(0)+H_A}$	2.8 × 10 ⁻³ GHz/Oe	—
g	2.00 ± 0.02	2.01
Method	Cavity Perturbation present work	ESR Ref. 10

이다. (3), (4)와 (5)식으로부터 알 수 있듯이, H_A와 H_P는 시료의 반경(r)에 무관하며, H(r)은 r의 2차에 비례한다. Artmann은 H_{res}의 크기의존성 실험결과가 r²으로 잘 설명됨을 보였고⁴⁾, Patni와 Srivastava 등은 H_{res}의 실험결과들이 r에 선형으로 비례하는 꼴로 관측되었음을 보고하였다⁵⁾. 그런데 Fig. 5(b)의 H_{res}의 시료크기 의존성은 r 또는 (5)식의 r² 보다는 r³에 더 잘 비례하므로 여기서는 r³으로 실험결과에 최소 자승법을 적용하여 H_{res}(0)와 비례상수 α를 구하였다. 즉 H_{res}(0)=3155 ± 30 Oe와 α=4.53 × 10² Oe/mm³이다. 한편 MgFe₂O₄의 K₁=-4.0 × 10⁴ J/m³¹⁷⁾, 또 Table 1의 4πM_s과 P를 (4)식의 H_A와 H_P 표현식에 대입하여 H_A와 H_P를 구하면, H_A=173 Oe와 H_P=31 Oe이다(Table 2). (6)식에서 γ/2π를 계산하려면, H_P는 페라이트의 고유특성이 아니기 때문에 이를 제외한 식 γ/2π=f/(H_{res}(0)+H_A)을 써야 한다. 이 식에 H_{res}(0)와 H_A를 대입하여 계산한 g는 2.00 ± 0.02로서 이미 단결정에서 보고된 값(g=2.01)¹⁰⁾과 오차범위 내에서 서로 잘 일치하였다(Table 2).

한편, 다결정 페라이트에서 선폭은 자기이방성(ΔH_A), 기공 등의 다결정성과 관련된 효과 (ΔH_P)와 페라이트의 고유선폭(ΔH_{int}), 그외에도 미지의 효과(ΔH_{int})^{2,3,6,7)} 등에 의하여 결정되는 것으로 알려져 있는데, 본 실험결과를 고려하여 ΔH_{int}는 크기와 관련된 항(ΔH(r))으로 표시하였다. 즉

$$\Delta H = H_A + H_P + H_{int} + \Delta H(r) \quad (7)$$

이다. ΔH(r)은 시료의 크기에 의존하는 항을 총칭한 것이다. (7)식에서 처음 세 항은 Schlomann의 이론식이

Table 3. The Numerical Values of Each Line Width Component Contributing to ΔH(0).

components	line width (Oe)	contribution to ΔH(0)(%)
ΔH _A	361	67
ΔH _P	139	25
ΔH _{int}	36	7
ΔH _A +H _P +ΔH _{int}	536	99
ΔH(0)	541 ± 12	100

자기이방성에 의해 넓어진 선폭 ΔH_A는

$$H_A = 2.07 \frac{H_A^2}{4\pi M_s} G(\eta) \quad (8)$$

으로 표현된다^{2,7)}. 여기서 G(η)는 이방성 자기장에 의한 선폭 넓어지기의 분포함수이며, η=ω/γ4πM_s인데, f=9.3 GHz에서 G(η)=1.2 정도이다^{2,3,7)}. 또 K₁<0인 경우, H_A=4|K₁|3M_s이다. K₁<0일 때 공명흡수선 모습은 저자기장 쪽에서 급격하게 증가하여 공명자기장을 지나 완만하게 감소한다. 반면에 K₁>0인 경우에는 저자기장 쪽에서 완만하게 증가하여 공명자기장을 지나 급격하게 감소하는 모습을 보인다¹⁶⁾. 따라서 흡수선의 모습만으로도 페라이트 시료에서 K₁의 부호를 쉽게 알 수 있다. Fig. 3의 MgFe₂O₄의 공명흡수선을 보면 K₁<0임을 알 수 있다.

또 기공만에 의한 선폭은

$$\Delta H_P = 1.5(4\pi M_s) P \quad (9)$$

으로서, P와 4πM_s에 비례하여 증가한다. 또한 ΔH_{int}는 투자율의 허수부의 최대값 μ_{max} 및 포화자화와 아래와 같은 관계가 있다.

$$\mu_{max} \Delta H_{int} = 4\pi M_s \quad (10)$$

Fig. 5(c)로부터 알 수 있는 바와 같이 ΔH는 r³에 비례하여 증가하였다. 그림의 실험데이터에 최소 자승법을 적용하여 비례상수를 구하고 이상수로 결정되는 곡선 (ΔH(r)=ΔH(0)+βr³)을 r=0까지 외삽시켜 크기효과가 배제된 ΔH(0)를 구하면 ΔH(0)=541 ± 12 Oe와 β=1.17 × 10³ Oe/mm³이다. Table 1과 2의 실험값을 (8), (9)와 (10)식에 대입하여 ΔH_A와 ΔH_P 및 ΔH_{int}의 크기를 구하면, ΔH_A=361 Oe, ΔH_P=139 Oe이고, ΔH_{int}=36 Oe이다. 더우기 ΔH_{int}=36 Oe는 단결정에서 이미 보고된 값 (40 Oe)¹¹⁾과 거의 일치한다. (7)식에서 시료크기에 무관한 항인 ΔH_A와 ΔH_P 및 ΔH_{int}의 합은 ΔH(0)와 오차범위

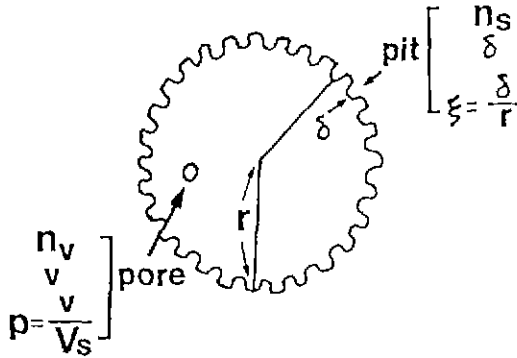


Fig. 6. Model illustration showing the surface roughness and porosity of spherical sample.

내에서 아주 잘 일치한다. 이를 Table 3에 보였는데, ΔH (0)에 대한 이들의 기여도는 이방성 효과(67%), 기공 효과(25%), 고유선폭(7%) 등의 순이다. 이러한 사실은 다른 문헌에서 도입한 ΔH_{in} 이 시료내 기공이외의 입계(grain boundary) 또는 입자(grain) 내의 화학적인 결합 등의 직접적인 원인보다는 시료크기에 의한 나타난 선폭넓어지기 효과임을 의미한다.

한편 여기서 측정된 ΔH 의 r^3 의존성은 다음과 같이 정성적으로 이해할 수 있다. 공명선폭을 설명하는 산란 기구는 $k=0$ 인 균일세차운동 모우드와 $k \neq 0$ 인 모우드 간의 상호작용(2-마그논 상호작용)의 결과이며, 이것은 산란요인이 많을수록 비례한다. Fig. 6은 시료표면의 거칠기(surface roughness)와 기공도(porosity)를 나타낸 모델이다. 그림에서 δ 와 P 는 각각 표면 홈의 깊이와 기공도이며, n_s 는 단위면적당 홈의 수이고, n_v 는 단위체적당 기공의 수이다. 표면 거칠기 $\xi(=\delta/r)$ 에 의해 선폭 넓어지기 효과(ΔH_s)가 나타나는데, 이것은 표면거칠기가 심할수록 큰 비율로 나타난다. 그러나 이것은 선폭이 넓은 페라이트시료의 경우에는 매우 적다고 알려져 있다⁶⁾. 하나의 표면 홈에 대하여 ΔH_s 는 ξ 에 비례하고¹⁸⁾, 한개의 기공에 대하여 ΔH_p 는 P 에 비례한다. 실제로 구의 표면과 내부에는 표면 홈과 기공이 무수히 많이 존재 하므로 $\Delta H_s \propto n_s(4\pi r^2)\xi$ 이며, $\Delta H_p \propto n_v(4\pi r^3/3)P$ 이다. 일반적으로 ξ 이 매우 작으므로 기공의 효과가 지배적이어서 실험적으로 $\Delta H \propto r^3$ 로 관측된 것으로 생각된다. 이러한 분석은 ΔH 가 기공(이상 포함)과 같은 산란요인(scattering source)의 함량에 비례하여 증가함을 의미한다. 즉 선폭 넓어지기 효과는 이방성 자기장과 기공도 등 그 자체의 영향이라기 보다는 페라이트 grain들과 이상 및 기공간의 경계인 제면의 양에 관계있음을 알 수 있다.

ΔH 의 r^3 의존성은 시료크기가 skin depth보다 작을 때 나타나는데, 이것은 Fig. 5(a)로 증명된다. 실제로 $MgFe_2O_4$ 의 경우 전기전도도 $\sigma \sim 10^7(\Omega cm)^{-1}$ 이므로 skin depth가 수십 cm에 이른다.

또한 EPR(electron paramagnetic resonance)이나 NMR(nuclear magnetic resonance)의 경우와 같이 흡수 곡선에서 직접 반치폭을 측정하여 Fig. 5(c)에 함께 보였는데, 이 값(∇ 표)도 시료의 체적에 따라 증가하였다(실제로 NMR과 EPR의 경우 흡수곡선의 1차 미분형을 얻고¹⁹⁾, NQR(nuclear quadrupole resonance)에서는 2차 미분형 신호를 얻는다²⁰⁾. 원래의 흡수곡선의 반치폭과 이를 미분한 공명선의 peak to peak 선폭간의 관계는 흡수선이 대칭일 때 서로 상수배만큼 차이가 난다²¹⁾. 경우에 따라서는 비대칭 신호가 얻어지는 경우가 있는데, 이는 예외적인 것으로서 내부의 격자변형과 관련된 결과이다¹⁹⁾. 그림에서 두 실선은 서로 다른 비례상수(∇ 표 : $\Delta H'(0)=541$ Oe와 $\beta'=1.17 \times 10^4$ Oe/mm³)를 가지지만 시료의 크기가 매우 작아지면 $r=0$ 에서 두 값(\bullet 표, ∇ 표)은 서로 일치한다. 이들 값이 서로 일치하는 이유는 다음과 같이 설명된다. r 이 0으로 접근함에 따라 ΔL 이 매우 작아지므로($\Delta L \ll 1$), (1-b) 식을 Maclaurin 급수전개하면

$$\begin{aligned} \mu'' &= \frac{4\pi A}{16r^3 Q_L} (10^{\Delta L/20} - 1) & (11) \\ &= \frac{4\pi A}{16r^3 Q_L} \left\{ 1 + \frac{\Delta L}{20} \log_{10} \right. \\ &\quad \left. + \frac{[(\Delta L/20)\log_{10}]^2}{2!} + \dots - 1 \right\} \end{aligned}$$

이다. 여기서 시료의 크기가 작아서 흡수전력이 작으면 ΔL^2 항을 무시할 수 있다. 따라서

$$\mu'' \sim \frac{\pi A \log_{10}}{80r^3 Q_L} \Delta L \quad (12)$$

으로서, μ'' 는 ΔL 에 선형적으로 비례한다. 이러한 이유로 $r=0$ 에서 두 선폭 값은 서로 일치함을 알 수 있다. EPR이나 NMR에서 시료에 의한 손실전력은 FMR의 경우에 비하여 매우 작으므로 위의 근사식이 적용되어 흡수곡선(ΔL)에서 반치폭을 선폭으로 잡아도 무방하다. 그러나 페라이트처럼 교환상호작용으로 강하게 묶인 스핀계의 경우에는 삽입손실의 변화가 매우 커서 흡수곡선으로부터 직접 읽은 반치폭과 Fig. 4의 μ'' 곡선에서 얻은 값이 서로 다르므로, 손실기구를 해석할 때는 정의식을 따라 선폭을 읽음으로써 오차를 줄이는 것이 바람직하다.

이 이외에도 3 dB 공명선폭 개념이 있는데, 이는 공명

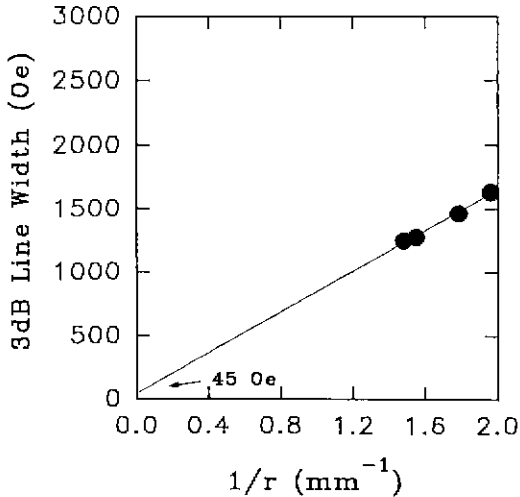


Fig. 7. The size dependence of 3 dB line width obtained from the FMR signals.

흡수선의 최대치에서 3 dB를 내려 읽은 손실전력에 대응하는 두개의 자기장 값 간의 간격이다. 3 dB 선폭개념으로 읽은 공명선폭의 시료크기 의존성을 Fig. 7에 나타내었다. 이 정의에 의하면, 신호의 세기(S_1)는 시료가 작을수록 작아지기 때문에(Fig. 3) 특정한 크기 이하의 시료에서는 세기가 3 dB 보다 작아 선폭을 측정할 수 없다. 본 실험 결과의 경우 시료의 반경이 0.50 mm 보다 작은 시료에서는 3 dB 공명선폭을 읽을 수 없다. 이러한 3 dB 공명선폭을 택할 때, 물리적으로 몇 가지 모순점이 따른다. 첫째, 특정한 크기 이하일 경우 FMR 현상이 나타남에도 불구하고, ΔH 의 측정이 불가능하다. 둘째, Fig. 7의 외삽값 (45 Oe)이 H_A 의 이론값 (361 Oe) 보다 더 작는데, 이는 물리적으로 이방성자기장 효과를 충분히 설명할 수 없음을 의미한다. 셋째, 공진기 섭동방법은 수식 전개 배경이 섭동효과가 적을 때를 가정한 것이므로 시료 크기가 작을 수록 좋은데, 이는 특정한 크기 이상이어야 한다는 첫째 사항과 위배된다 또 시료크기에 따라 선폭이 달라지므로 시료들 마다 절대비교를 위해서는 시료크기를 규정하는 규칙이 필요하다. 따라서 3 dB 선폭으로 읽는 것은 제조생산과정에서 시편의 크기를 정하여 확립적으로 평가할 때는 편리하게 쓰일 수 있으나, 시료크기가 정해져 있지 않은 경우는 말할 것도 없거니와 이를 가지고 물리적인 해석을 하거나 손실인인을 줄이는 제어변수를 결정짓는 것은 무리가 있다.

한편 본 실험에서 주장하는 선폭실험 결과 ($\Delta H \propto r^3$)는 Dionne의 결과 ($\Delta H \propto 1/r$)와 다르다²¹⁾. 그의 결과는 오

히려 Fig. 7의 경향성과 같다. 이로부터 본 결과와 Dionne의 결과간의 차이는 선폭을 읽는 정의의 차이 때문인 것으로 이해할 수 있다. 즉 그는 공명선폭의 크기 의존성을 전적으로 표면거칠기 효과로 분석하였고 다른 효과는 고려하지 않았다.

4. 결 론

구형의 $MgFe_2O_4$ 다결정 페라이트의 FMR을 공진기 섭동방법을 이용하여 시료크기의 함수로 측정하였다. FMR 신호의 세기(S_1) 및 H_{res} 와 ΔH 은 시료의 체적에 비례하여 증가하였다. 측정된 H_{res} 에서 크기효과를 배제한 $H_{res}(0)$ 을 Schlomann의 이론식에 대입하여 얻은 g 값은 이미 단결정에서 보고된 값과 오차범위 내에서 잘 일치하였으며, $\Delta H(r)$ 에서 크기효과를 배제한 $\Delta H(0)$ 은 Schlomann 이론값과 잘 일치하였다. 이는 측정된 FMR 파라메타와 Schlomann 이론값 간의 차이가 시료크기에 의한 효과임을 의미한다. 한편 μ'' 곡선과 공명흡수선에서 얻은 반치폭 및 3 dB 선폭을 서로 비교하여 논의함으로써, 페라이트의 마이크로과 손실인인을 분석할 경우 μ'' 의 곡선에서 $\mu_{max}/2$ 에 대응하는 두 자기장값 간의 간격을 선폭으로 읽는 것이 바람직함을 알 수 있다.

REFERENCES

1. 유병두, 한기태, 이만중, "페라이트를 이용한 마이크로 웨이브 소자," *요업재료의 과학과 기술* **8**, 328-339 (1993).
2. E. Schloemann, *Conf. Magnetism Magnetic Materials* **600**, 1956 (1957).
3. E. Schloemann and J.R. Zeender, "FMR in Nickel Ferrite," *J. Appl. Phys.* **29**, 341 (1958).
4. J.O. Artman, "Effect of Size on Microwave Properties of Ferrite Rods, Disks and Spheres," *J. Appl. Phys.* **28**, 93 (1957).
5. M.J. Patni and C.M. Srivastava, "Inhomogeneous Demagnetization and Eddy Current Effect in FMR," *Proc. ICF-1*, 551 (1970).
6. R.A. Hurd. *Can. J. Appl. Phys.* **36**, 1072 (1958); J.E. Mercereau, *J. Appl. Phys.* **30**, 184 (1960)
7. Z. Han, "Grain size, Chemical inhomogeneity and Resonance Linewidth in Bi-Ca-V substituted YIG," *Proc. of ICF-5*, 995 (1989); P. Roschmann, "Separation of Anisotropy and Porosity Contributions to Inhomogeneous Broadened FMR Linewidth in Polycrystalline YIG," *IEEE Trans. Mag.* **11**, 1247 (1975).
8. D.S. Kang, H.S. Kim, B.D. You, J.G. Paik and S.J. Kim, "Variation of Microstructural and Substantial Proper-

- ties with the Calcination Temperature in Microwave Ferrite," *Proc. of ICF-6*, 1302 (1992).
9. K.T. Han, B.D. You and D.S. Kang, "Effects of Size and Surface Roughness on FMR in Polycrystalline $MgFe_2O_4$ Ferrites," *Proc. of Magel'94* Int. Conference (in press)
 10. H.S. Belson and C.J. Kriessman, "Ionic Distribution and FMR in Magnesium Ferrite," *J Appl. Phys.* **30**, 170S (1959).
 11. 백종규, 유병두, 김한식, "마이크로웨이브 마그네슘 페라이트," 국과연 학술대회 연구논문집 **4**, 1 (1990).
 12. 조성호, "자기공명 방법," (민음사, 서울, 1992) 제 7장.
 13. M.A. Tsankov, S.I. Ganchev and B.I. Vichev, "A Simplified Technique for Measuring the Effective Resonance Linewidth and the Permittivity of Microwave Ferrite," *J. Phys. E: Sci. Instrum* **18**, 708 (1985).
 14. P.J.B. Clarricoats, "Ferrites," (Chapman and Hall, 1967) p. 49.
 15. C.M. Srivastava, "The domain wall effect in FMR experiments," *Brit. J. Appl. Phys.* **17**, 1173 (1966).
 16. G.A. Morrison, and N. Karayinis, "FMR in Uniaxial Polycrystalline Materials," *J. Appl. Phys.* **29**, 339 (1958).
 17. R.S. de Biasi, "Cation Distribution and Crystal Anisotropy in $MgFe_2O_4$," *J. Material Sci. Letter* **2**, 363 (1983).
 18. M. Spark, "FMR Porosity Line width Theory in Polycrystalline Insulators," *J Appl. Phys.* **36**, 1570 (1965); M. Spark, R. Loudon and C. Kittle, "Ferromagnetic Relaxation. I," *Phys. Rev.* **122**, 791 (1961).
 19. S.H. Choh and K.T. Han, "Magnetic Resonances of ^{23}Na and ^{14}N in Ferroelectric Single Crystals of $NaNO_2$," *Bull. Mag. Res.* **14**, 246 (1992).
 20. J.K. Jung, K.T. Han, S.H. Choh and C.S. Kim, "Nuclear Quadrupole Resonance Gaussometry of Low Magnetic Field," *Rev Sci. Instrum.* **65**, 1663 (1994).
 21. 조성호, "자기공명 방법," (민음사, 서울, 1992) 제 3장.
 22. G.F. Dionne, "Effect of Surface roughness on FMR Line width Measurements," *J. Appl. Phys.* **43**, 1221 (1972).