ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 24(1), 11-17 (2014) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2014.24.1.011

# 산화철 나노입자의 크기에 따른 강자성 공명 신호의 선폭 특성

**김동영 · 윤석수***
안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 760-749

(2014년 1월 10일 받음, 2014년 2월 5일 최종수정본 받음, 2014년 2월 6일 게재확정)

본 연구에서는 열 분해법으로 크기가 각각 $D$ = 4.67 nm, 5.64 nm 및 6.34 nm인 균일한 산화철 나노입자를 제조하여 강자성 공명 신호를 측정하였다. 측정된 강자성 공명 신호는 입자의 부피가 로그 정규 확률 분포를 갖는 초상자성 나노입자에 대하여 계산한 결과와 비교 분석하였다. 강자성 공명 신호의 선폭은 나노입자의 크기가 증가함에 따라 넓어졌으며, tanh($V^2$)에 비례하는 특성을 보였다. 이러한 나노입자의 크기에 따른 선폭 증가는 나노입자들 표면에 분포하는 표면 스핀과 결정 이방성 특성을 갖는 내부 스핀들에 의한 두 가지 강자성 공명 신호의 중첩에 기인함을 알 수 있었다.

**주제어** : 산화철, 열적 요동, 초상자성 나노입자, 강자성 공명 신호, 선폭

## I. 서 론

자성 나노입자는 특정 약물의 전달 매체 또는 자기 공명 영상 장치의 해상도 향상 매체 등의 생명 기술 분야 및 차세대 고밀도 자기 저장 매체 또는 나노 복합소재 등의 정보 기술 분야에서 핵심 나노 소재로 부각되고 있으며, 이러한 자성 나노입자의 제조 및 물성 분석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 생명 기술 분야에는 초상자성(superparamagnetic) 특성을 갖는 자성 나노입자들을 사용하여 약물 전달의 효율 향상 및 자기 공명 영상 장치의 해상도 향상에 대한 연구를 수행하고 있다[1].

자성 나노입자의 초상자성 특성은 자화 곡선 및 온도에 따른 투자율 측정으로 확인할 수 있다. 자화 곡선 측정에서는 보자력이 0이고 자화 곡선이 랑주뱅(Langevin) 함수를 따르며, 온도에 따른 투자율 측정에서는 자기장을 인가한 경우(field cooled)와 자기장을 인가하지 않은 경우(zero field cooled) 두 곡선이 분리되는 방해(blocking) 온도 이상에서 초상자성 특성을 갖는다[1-4]. 이러한 초상자성 나노입자들은 모양과 결정 구조의 영향을 받지만 형상 이방성 및 결정 이방성 상수는 자화 곡선 및 투자율 측정 결과로부터 얻을 수 없다. 그러나 강자성 공명 신호(ferromagnetic resonance signal; FMR signal)는 자성 나노입자 내부의 스핀들에 의한 영향을 반영하고 있으므로, 자성 나노입자의 자화량, 형상 및 결정 이방성 등의 자성 특성을 모두 포함한다. 따라서 강자성 공명 신호를 해석할 경우 자성 나노입자의 여러 가지 물성을 분석하는 것이 가능하다. Kliava 등은 자성 나노입자의 크기 및 크기의 분포에 따른 강자성 공명 신호를 계산을 통하여 분석하였으며[5], Biasi 등은 초상자성 자성 나노입자의 강자성 공명신호를 해석하여 결정 이방성 상수를 분석하였다[6]. 그러나 강자성 공명 신호를 해석하여 나노입자들의 자성 물성을 분석하기 위하여 동일한 특성을 갖는 균일한 크기의 나노입자들에 대한 특성 분석이 선행 되어야 하며 이러한 연구는 미비한 수준이다.

따라서, 본 연구에서는 초상자성 특성을 갖는 크기가 균일한 산화철 나노입자를 제조하여 강자성 공명 신호를 측정하였으며, 계산을 통하여 초상자성 나노입자의 강자성 공명 신호를 해석하였다. 이들 측정 결과와 계산 결과로부터 나노입자의 크기에 따른 선폭 변화 특성을 분석하였다.

## II. 실험방법

본 연구에서 강자성 공명 신호 분석에 사용한 균일한 산화철 나노입자들은 Trioctylamine 용매(solvent)에 Fe-oleate complex, ($Fe(OL)_3$) 전구체를 고르게 섞은 반응 원액을 사용하여 고온 열분해방법으로 제조하였다[7, 8]. 입자의 크기가 다른 산화철 나노 입자를 제조하기 위하여 나노 입자가 성장하는 과정에서 주사기를 이용하여 약 2.0 ml의 반응 원액을 시간에 따라서 순차적으로 추출하였다. 추출한 반응 원액의 1.0 ml는 에탄올에 희석시켜 잔류 유기 용매를 세척한 후 원심분리기를 이용하여 산화철 나노입자를 추출하였다. 추출한 산화철 나노입자를 초음파 세척기를 이용하여 핵산 용액에 균일하게 분산시킨 후 Cu-grid 위에 한 방울 떨어뜨려 TEM (transmission electron microscope) 시편을 제작하였다. 이들

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author:
Tel: +82-54-820-5450, e-mail: yoon@andong.ac.kr

시편은 나노 입자들의 크기 분포 특성을 분석하기 위하여 고분해능 TEM 장비를 이용하여(JEM-2010, JEOL사) TEM 사진을 촬영하였다. 추출한 반응 원액의 나머지 1.0 ml는 유리 튜브에 담은 후 9.89 GHz의 주파수에서 작동하는 강자성 공명 측정 장치를 사용하여 자기장의 세기에 따른 강자성 공명 신호를 측정하였다.

## III. 실험결과 및 고찰

자기 에너지는 부피에 비례하므로 크기가 작은 자성 나노입자는 크기가 작아질수록 자기 에너지가 줄어들게 된다. 예를 들어, 포화자화량이 $M_s$이고 부피가 $V$인 자성 나노입자가 자기장 $H$에 놓인 경우 자기 에너지는 간단하게 $M_sHV$가 된다. 한편 온도가 $T$인 경우 나노입자의 열에너지는 $kT$가 되며 이에 해당하는 운동에너지를 갖게 된다. 여기서 $k$는 볼쯔만 상수 이다. 이때 $M_sVH < kT$인 경우 운동 에너지에 의한 열적 요동(thermal fluctuation)이 자기 에너지 보다 크게 되어 나노입자의 자화 방향이 자기장 방향으로 정열 되지 못하게 되며, 자성 나노입자 각각의 자화 방향은 임의의 방향으로 향하게 되어 강자성 특성이 현저히 약화되어 초상자성(superparamagnetic) 특성을 보이게 된다. 그러나 자기장의 세기를 증가 시켜 자성 나노입자의 자기 에너지가 열에너지 보다 크게 되면 나노입자 각각은 자기장 방향으로 정열 하게 되어 자화 곡선은 강자성 재료의 포화자화량으로 접근하게 된다. 이러한 특성을 가지고 있는 자성 나노입자를 초상자성 나노입자라고 한다. 초상자성 나노입자들에 대하여 열적 요동 특성을 고려하여 구한 평균 자화량 $\langle M\rangle$과 평균 일축 이방성 상수$\langle K_u\rangle$는 다음과 같이 표현된다[5].

$$\langle M\rangle = M_s L(x) \tag{1}$$

$$\langle K_u\rangle = K_u\left(1 - 3\frac{L(x)}{x}\right) \tag{2}$$

여기서 $K_u$는 자성 나노입자 재료의 일축 이방성 상수 이다. 그리고 $L(x)$는 열적 요동 특성을 반영한 랑주뱅 함수이며 초상자성 나노입자의 강자성 공명 신호를 분석하기 위하여 사용된다.

$$L(x) = \coth x - \frac{1}{x} \tag{3}$$

여기서 $x = M_sVH/kT$이다. 초상자성 나노입자의 자화량 및 이방성 상수는 열적 요동 특성을 나타내는 $x$의 크기에 의존하며 나노입자의 부피 및 온도의 함수로 표현된다. 이러한 초상자성 나노입자의 자기 이방성 자기장 $\langle H_A\rangle$는 다음과 같이 표현된다.

$$\langle H_A\rangle = \frac{2\langle K_u\rangle}{\langle M\rangle} = \frac{2K_u}{M_s}\left(1 - 3\frac{L(x)}{x}\right)/L(x) \tag{4}$$

초상자성 나노입자의 강자성 공명 신호는 상자성 특성을 갖는 재료들에서 나타나는 전자 스핀 공명(electron spin resonance; ESR)조건에 의하여 나타나는 전자 스핀 공명 자기장 $H_r$에 초상자성 특성에 의한 자기 이방성 자기장 $\langle H_A\rangle$가 추가되는 나타난다.

$$\frac{\omega}{\gamma} = H_r + \langle H_A\rangle \tag{5}$$

여기서 $\gamma = g\mu_B/\hbar$는 전자의 자이로 계수(gyromagnetic factor)이며, $g$, $\mu_B$, 및 $\hbar$는 각각 g-factor, 보아 마그네톤 상수 및 플랑크 상수이다. 또한 ω는 인가한 마이크로파의 각주파수($\omega = 2\pi f$)이다. 전자의 g-factor는 $g = 2.0$의 값을 가므로 전자의 자이로 계수 $\gamma/2\pi = 28.02$ GHz/T가 된다. 따라서 9.89 GHz의 주파수에서 측정한 상자성 재료의 전자 스핀 공명은 $g = 2.0$의 값에 해당하는 자기장인 $H_r = 3.529$ kOe에서 일어난다. 한편 초상자성 나노입자의 강자성 공명 자기장은 전자 스핀 공명 자기장인 $H_r$과 식(4)의 열적 요동에 의한 이방성 자기장의 영향을 받는다. 이러한 열적 요동의 영향으로 초상자성 나노입자들의 강자성 공명 신호는 선폭과 모양이 변화하게 된다[9].

자기장의 세기에 따른 강자성 공명 신호는 직류 자기장($H$)을 인가하고 미소 교류 자기장($dH$)을 추가로 인가하여 마이크로파의 미소 흡수 전력($dP$)을 측정한다. 따라서 강자성 공명 신호는 흡수되는 마이크로파 전력의 미분($dP/dH$) 값을 의미한다. 강자성 공명 자기장을 중심으로 흡수되는 마이크로파 전력은 자기장의 세기에 따라 로렌쯔 함수(Lorentzian function)를 따르므로 강자성 공명 신호는 로렌쯔 함수를 미분한 형태로 표현된다[10]. 이러한 강자성 공명 신호는 균일한 크기를 갖는 초상자성 나노입자들에 대해서도 로렌쯔 함수를 미분한 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{dP}{dH} = \frac{2u}{\pi(1 + u^2)^2} \tag{6}$$

초상자성 나노입자에 대하여 열적 요동 특성에 의한 자기 이방성 상수를 반영하면 $u$는 다음과 같이 표현된다.

$$u = \frac{H_r + \langle H_A\rangle - \omega/\gamma}{\Delta H_{pp}} \tag{7}$$

여기서 $\Delta H_{pp}$는 초상자성 나노입자의 강자성 공명 신호의 선폭(linewidth)이다. 초상자성 나노입자들이 열적 요동으로 인하여 자화 방향이 임의의 방향으로 정열된 경우 자화 방향이

다른 모든 나노입자들의 강자성 공명 신호를 적분하여 나타낼 수 있다.

$$\frac{dP}{dH} = \int_{\phi} \frac{2u}{\pi(1+u^2)^2} \sin\phi d\phi \tag{8}$$

여기서 $\phi$는 자성 나노입자의 자화 방향과 자기장 방향 사이의 각이다.

초상자성 나노입자의 강자성 공명 신호는 식(4)와 (5)에 표현된 것과 같이 이방성 상수에 따라서 신호의 모양이 달라진다[6]. 이러한 특성을 확인하기 위하여 크기 $D = 6$ nm이고 포화자화량과 선폭이 각각 $M_s = 310$ emu/cc및 $\Delta H_{pp} = 400$ Oe인 나노입자들의 이방성 상수 값이 각각 $4 \times 10^5$ erg/cc, 0, $-4 \times 10^5$ erg/cc로 서로 다른 경우에 대하여 식(8)을 이용하여 강자성 공명 신호를 계산한 결과는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1(b)에서 보인 것과 같이 이방성 상수가 없는($K_u = 0$) 초상자성 나노입자의 경우 강자성 공명 신호는 식(6)에서 보인 로렌쯔 함수를 미분한 형태로 나타나며 $g = 2.0$에 대응되는 전자 스핀 공명 자기장을 중심으로 대칭적인 모양을 보인다. 그러나 Fig. 1(a)와 같이 이방성 상수가 양의 값을 갖는 경우 이방성 자기장에 의한 강자성 공명 신호의 중첩에 의하

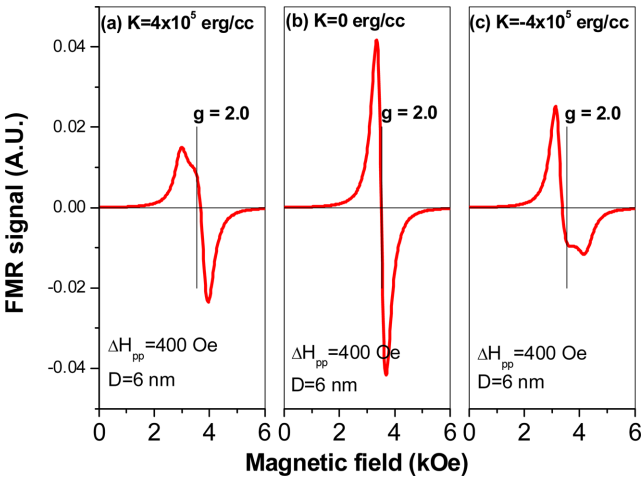


**Fig. 1.** (Color online) Calculated ferromagnetic resonance signals of superparamagnetic nanoparticles with (a) $K_u = 4.0 \times 10^5$ erg/cc, (b) $K_u = 0$ erg/cc and (c) $K_u = -4.0 \times 10^5$ erg/cc.

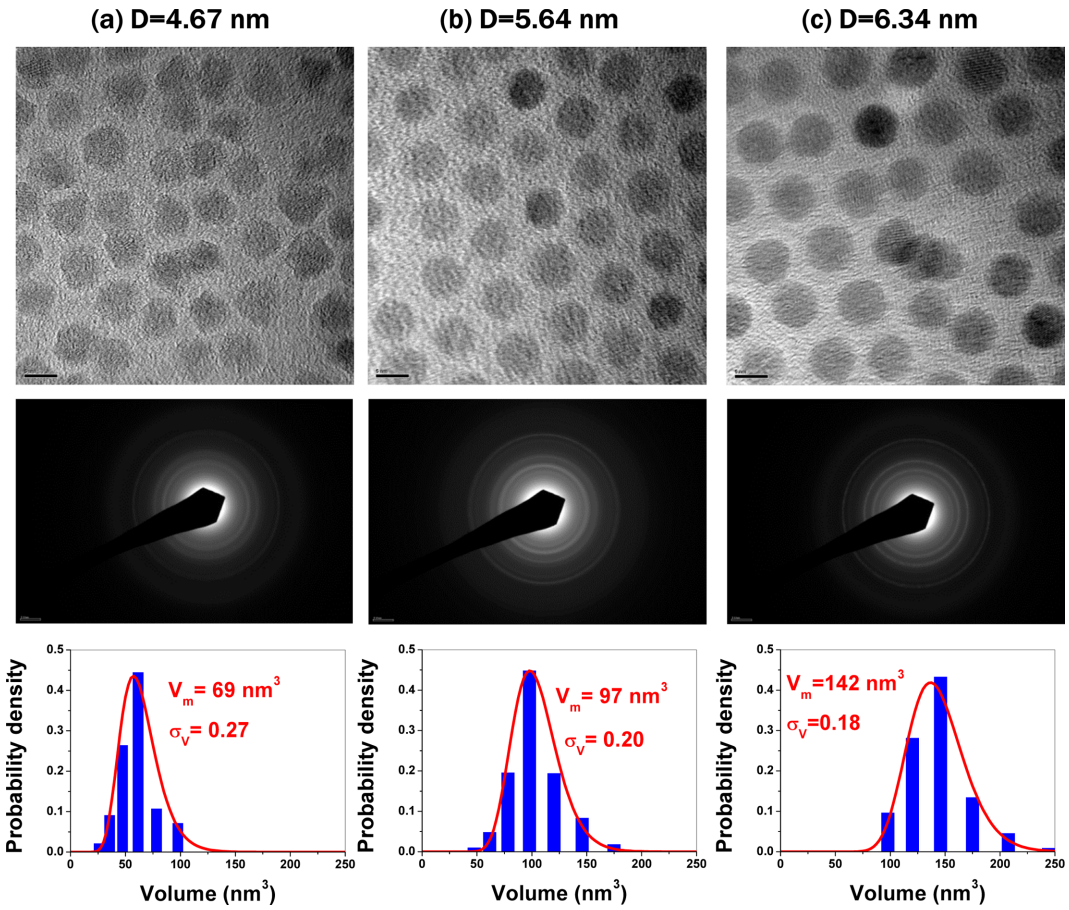


**Fig. 2.** (Color online) TEM photography, electron diffraction pattern and size distribution of iron oxide nanoparticles with (a) $D = 4.67$ nm, (b) $D = 5.64$ nm and (c) $D = 6.34$ nm synthesized by thermal decomposition method.

여 강자성 공명 신호는 대칭성이 무너지며 선폭이 증가하는 특성을 보인다. 한편, Fig. 1(c)와 같이 이방성 상수가 음의 값을 갖는 경우 역시 이방성 자기장에 의한 강자성 공명 신호의 중첩에 의하여 강자성 공명 신호는 대칭성이 무너지며 선폭이 증가하는 특성을 보인다. 강자성 공명 신호의 모양은 초상자성 나노입자의 결정 이방성 상수에 의한 영향을 반영하고 있으므로 강자성 공명 신호에 포함된 고유한 특성들을 해석함으로써 초상자성 나노입자들의 결정 이방성 상수를 추출해 낼 수 있다. 즉, 강자성 공명 신호 분석법은 다른 측정 방법으로 얻을 수 없는 초상자성 나노입자의 이방성 상수를 구하기 위하여 활용되고 있는 유용한 방법이다. 본 연구에서는 균일한 산화철 나노입자를 크기 별로 세가지 종류를 제조하여 강자성 공명 신호를 측정하였으며 산화철 나노입자의 크기에 따른 선폭 변화 특성을 분석하였다.

Fig. 2는 열 분해법으로 제조한 크기가 다른 산화철 나노입자들의 TEM 사진, 전자 회절 무늬(electron diffraction pattern) 및 크기의 분포 특성을 보인다. TEM 사진으로부터 산화철 나노입자의 평균 직경 $D$는 각각 4.67 nm, 5.46 nm, 6.34 nm였으며, 생성된 나노입자들은 크기가 균일하게 제조되었음을 알 수 있었다. 또한 전자 회절 무늬로부터 이들 산화철 나노 입자들의 결정구조는 입방구조를 갖고 있으며, 크기가 커 질수록 입방구조의 회절무늬가 선명하게 나타났다. TEM사진으로부터 나노입자들 각각의 크기를 측정하였으며, 부피의 분포 특성 $D(V)$를 분석하기 위하여 로그 정규(log-normal) 확률 분포 특성을 적용하였다.

$$D(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_V V}\exp\left(-\frac{1}{2\sigma_V^2}\ln^2\frac{V}{V_0}\right) \tag{9}$$

여기서 $V_0$는 $D(V)$가 최댓값이 되는 부피이며, $\sigma_V$는 $\ln(V/V_0)$의 표준 편차이다. 식(9)를 이용하여 직경이 $D = 4.67$ nm, 5.46 nm 및 6.34 nm인 산화철 나노입자의 $\sigma_V$는 각각 0.27, 0.20, 0.18이었으며, 이들 결과로부터 제조된 산화철 나노입자는 균일한 특성을 보인다는 것을 확인할 수 있었다. 이들 균일한 산화철 나노입자 각각에 대하여 강자성 공명 신호를 측정하였다.

Fig. 3은 평균 직경이 각각 $D = 4.67$ nm, 5.46 nm 및 6.34 nm인 산화철 나노입자들의 자기장의 세기에 따른 강자성 공명 신호 특성을 보인다. 강자성 공명 신호의 선폭은 나노입자의 평균 직경이 증가할수록 증가하는 특성을 보인다. 이러한 변화로부터 식(7)에 표현된 선폭 $\Delta H_{pp}$는 나노 입자의 크기에 따라서 달라진다는 것을 알 수 있다. 산화철 나노입자의 크기에 따른 선폭 $\Delta H_{pp}$의 변화 특성을 분석하기 위하여 본 연구에서는 다음의 수식을 사용하였다[11].

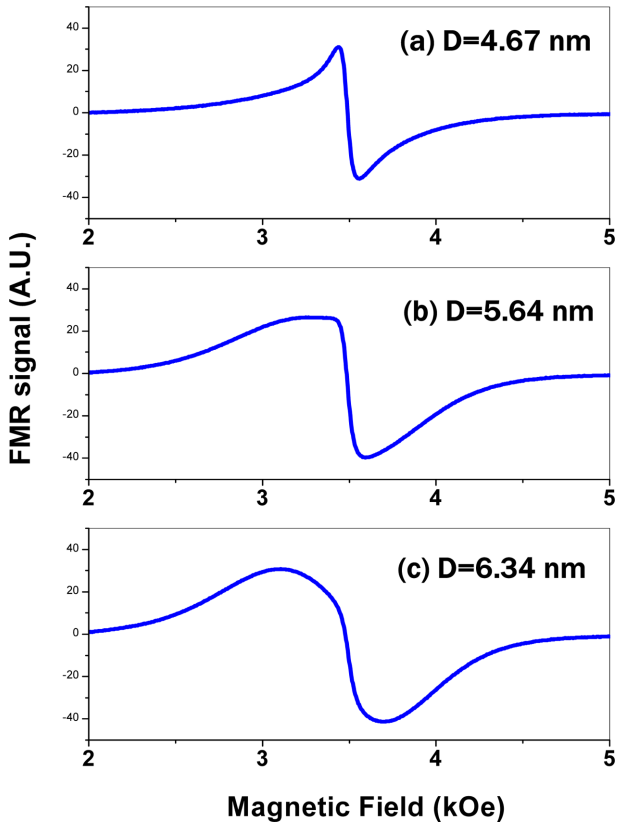


**Fig. 3.** (Color online) Measured ferromagnetic resonance signals of iron oxide nanoparticles with (a) $D = 4.67$ nm, (b) $D = 5.64$ nm and (c) $D = 6.34$ nm.

$$\Delta H_{PP} = \Delta H_{PP}^{0}\tanh\left(\frac{V}{V_c}\right)^2 + \Delta H_{PP}^{Para} \tag{10}$$

여기서 $\Delta H_{PP}^{0}$는 산화철 나노입자의 크기에 따른 선폭 변화량이며, $V_c$는 선폭의 변화가 급격히 일어나는 임계 부피이다.

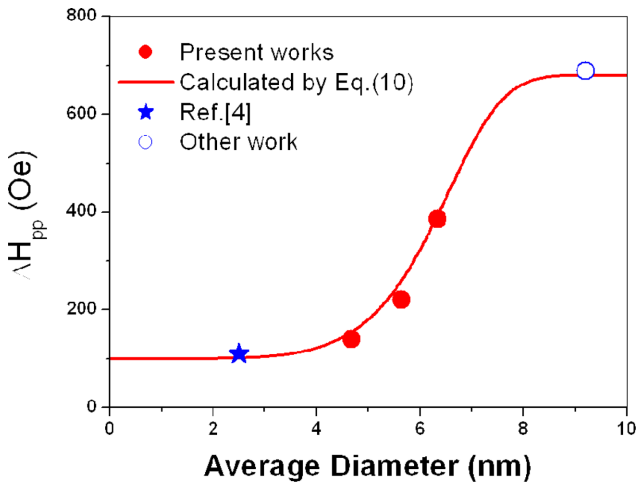


**Fig. 4.** (Color online) Size dependence of linewidth in iron oxide nanoparticles.

또한 $\Delta H_{PP}^{para}$ 는 크기가 임계 부피보다 매우 작은 나노입자들에서 나타나는 최소 선폭을 나타낸다. Fig. 3의 강자성 공명 신호 측정 결과로부터 구한 산화철 나노입자의 크기에 따른 선폭과 식(10)을 사용하여 계산한 결과를 Fig. 4에 함께 나타내었다. 식(10)을 이용하여 계산한 결과로부터 산화철 나노입자의 $\Delta H_{PP}^{0}$ = 580 Oe, $V_c$ = 180 nm$^3$, $\Delta H_{PP}^{para}$ = 100 Oe를 각각 얻었다. 따라서 산화철 나노입자들의 선폭 변화가 급격히 일어나는 임계 크기 $D_c$ = 7.0 nm임을 임계 부피로부터 구할 수 있었다.

산화철 나노입자의 선폭은 크기에 따라서 증가하므로 나노입자는 크기 분포는 강자성 공명 신호에 영향을 미친다. 한편 열 분해법으로 제조된 산화철 나노입자들은 Fig. 2에서 보인 것과 로그 정규 확률 분포를 따른다. 이러한 부피의 분포 특성을 강자성 공명 신호의 분석에 적용하였다.

$$\frac{dP}{dH} = \iint \frac{2u}{\pi(1+u^2)^2} \sin\phi d\phi V D(V) dV \qquad (11)$$

Fig. 5는 산화철 나노입자의 크기에 따른 강자성 공명 신호의 측정결과와 식(11)을 사용하여 계산 결과를 보인다. 산화철 나노입자의 직경 $D$ = 4.67 nm인 경우 선폭이 좁으며, 나노입자의 직경이 증가할수록 선폭이 증가하는 경향을 보인다. 이러한 선폭 변화 특성을 해석하기 위하여 장자성 공명 신호의 계산 과정에 식(11)을 적용하였다. 또한 강자성 공명 신호의 모양 변화는 산화철 나노입자의 이방성 상수에 기인하며, 각각 0, 1.4 × 10$^5$ erg/cc 및 2.4 × 10$^5$ erg/cc를 대입하여 구하였다. 이들 결과로부터 산화철 나노입자의 결정 이방성 상수는 산화철 나노 입자의 크기에 따라서 향상되고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 제조한 산화철 나노입자의 결정 이방성 상수는 양의 값을 보유하고 있음을 알 수 있다. $D$ = 5.64 nm인 나노입자들에 대한 측정 결과와 계산 결과가 서로 상이한 모양을 보였다. 이러한 특성은 입자의 크기가 작을 때 나타나는 강자성 공명신호와 입자의 크기가 클 때 나타나는 강자성 공명 신호가 중첩된 형태로 보인다.

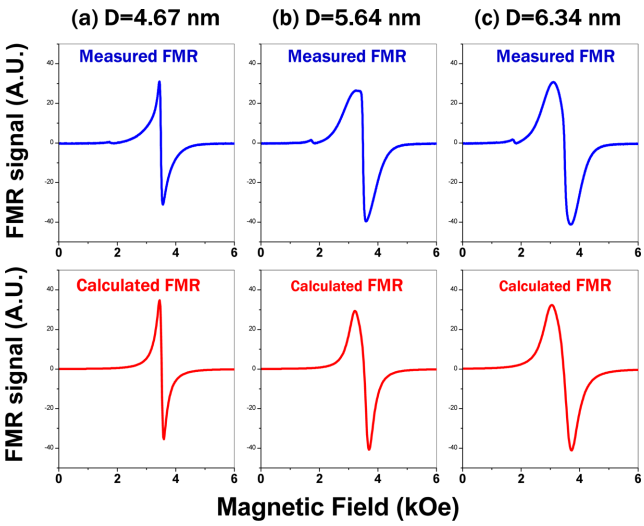


**Fig. 5.** (Color online) Comparison with measured and calculated ferromagnetic resonance signals of iron oxide nanoparticles with (a) $D$ = 4.67 nm, (b) $D$ = 5.64 nm and (c) $D$ = 6.34 nm.

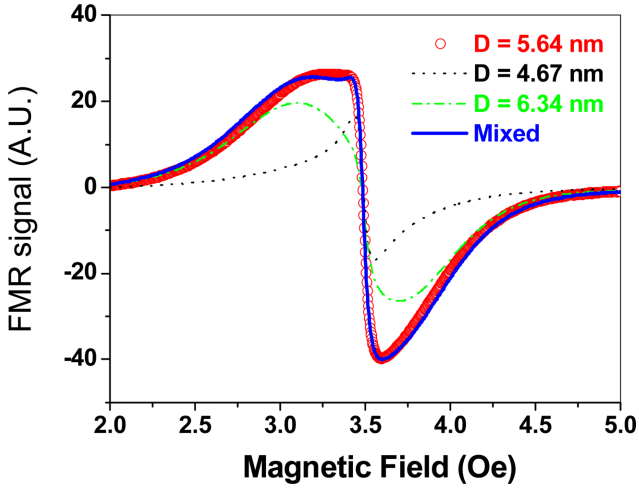


**Fig. 6.** (Color online) Analysis of ferromagnetic resonance (FMR) signals of iron oxide nanoparticles with $D$ = 5.64 nm, The FMR signal of $D$ = 5.64 nm nanoparticles was well fitted with mix of FMR signals for $D$ = 4.67 nm and $D$ = 6.34 nm.

Fig. 6은 $D$ = 5.64 nm인 나노입자들에 대한 강자성 공명 신호를 $D$ = 4.67 nm와 $D$ = 6.34 nm인 나노입자들에 대한 강자성 공명신호를 중첩하여 나타낸 결과를 보인다. 중첩된 결과는 실험 결과와 일치하는 것을 알 수 있다. 즉, 입자의 크기가 작을 때에는 선폭이 좁은 강자성 공명 신호가 나타나며, 입자의 크기가 증가하면 선폭이 넓은 강자성 공명 신호로 변화한다. 그 중간 과정에서는 선폭이 좁은 강자성 공명 신호와 선폭이 넓은 강자성 공명 신호가 함께 중첩되어 나타난다. Fig. 2에서 보인 전자 회절 무늬는 모든 나노입자들이 결정화되어 있음을 알 수 있었다. 즉, 결정화된 나노 입자들의 강자성 공명 신호가 두 가지 효과로 구분되어 있음을 알 수 있다. 이들 결과로부터 결정화된 나노 입자에서 나타나는 강자성 공명 신호를 표면 효과와 나노입자 내부의 부피효과로 구분할 수 있다. 입자가 작은 경우에는 표면 효과가 두드러지게 나타나며, 표면 효과에 의한 강자성 공명신호는 선폭이 좁다. 한편 나노입자 내부의 결정 구조에 의한 부피 효과는 나노입자의 크기자 증가할수록 두드러지게 나타나며 선폭이 넓다. 따라서 Fig. 4에서 보인 나노입자의 크기에 따른 선폭 변화는 나노입자가 작을 때 표면효과를 의미하며, 나노입자가 증가하면 부피효과로 근접하게 됨을 알 수 있다. 선폭이 급격히 증가하는 $V_c$ 근처에서는 Fig. 6과 같이 표면 효과와 부피

효과가 중첩되어 나타나게 된다. 따라서 식(10)에서 $\Delta H_{PP}^{0}$ 는 결정 구조를 갖는 부피 효과($\Delta H_{PP}^{bulk}$)를 의미하며 $\Delta H_{PP}^{para}$ 는 표면 효과($\Delta H_{PP}^{surface}$)를 의미하므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta H_{PP} = \Delta H_{PP}^{bulk} \tanh\left(\frac{V}{V_c}\right)^2 + \Delta H_{PP}^{surface} \quad (12)$$

Fig. 5에서 식(11)을 이용하여 계산한 강자성 공명 신호는 나노입자 내부의 결정성에 의한 부피 효과를 반영하고 있으므로 실험 결과와 계산 결과가 상이하게 나타난 것으로 볼 수 있다. 따라서 초상자성 나노입자의 강자성 공명 신호를 해석을 위하여 표면 효과와 부피 효과 모두를 계산에 도입하여야 하며, 나노 입자의 표면과 내부에 존재하는 스핀들의 영향을 고려한 전산모사 결과를 활용한 추가 연구가 요구된다.

## IV. 결　　론

본 연구에서는 Ar 버블을 이용하여 크기가 각각 $D = 4.67$ nm, 5.64 nm 및 6.34 nm인 균일한 산화철 나노입자를 열 분해법으로 제조하였으며, 이들 나노입자들의 강자성 공명 신호를 측정하였다. 측정된 강자성 공명 신호는 입자의 부피가 로그 정규 분포를 갖는 초상자성 나노입자에 대하여 계산한 결과와 비교 분석하였다.

초상자성 특성을 갖는 산화철 나노 입자의 강자성 공명 자기장은 $g = 2.0$에 대응되는 자기장 근처에서 발생되었으며, 강자성 공명 신호의 선폭 변화는 나노입자의 크기 및 결정 이방성 상수에 의존하였으며 이러한 결과는 계산결과와 일치하였다. 특히, 나노입자의 크기가 증가함에 따라 강자성 공명 신호의 선폭이 증가하였으며, 나노입자의 부피의 제곱에 의존하는 선폭 증가 특성을 실험 결과로부터 도출하였다. 나노입자의 크기에 따른 선폭 증가는 나노입자의 표면에 분포하는 표면 스핀들과 결정 이방성 특성을 갖는 내부 스핀들에 의한 서로 다른 두 가지 강자성 공명 신호의 중첩에 기인함을 알 수 있었다.

따라서 산화철 나노입자의 강자성 공명 신호는 나노입자의 크기에 따른 선폭 변화 특성뿐만 아니라 나노입자의 자기이방성 특성을 반영하고 있었으며, 이러한 강자성 공명 신호를 계산을 통하여 해석함으로써 초상자성 산화철 나노입자의 자성 물성을 분석해 낼 수 있음을 알 수 있었다.

## 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2010-0008282).

## 참고문헌

[1] S. Laurent, D. Forge, M. Port, A. Roch, C. Robic, L. V. Elst, and R. N. Muller, Chem. Rev. **108**, 2064 (2008).
[2] L. F. Gamarra, W. M. Pontuschka, J. B. Mamani, D. R. Cornejo, T. R. Oliveira, E. D. Vieira, A. J. Costa-Filho, and E. Amaro Jr., J. Phys: Condens. Mater. **21**, 115104 (2009).
[3] H. T. Hai, H. Kura, M. Takahashi, and T. Ogawa, J. Phys: Condens. Mater. **266**, 012127 (2011).
[4] J. M. Vargas, E. Lima Jr., R. D. Zysler, J. G. S. Duque, E. Be. Biasi, and M. Knobel, Eur. Phys. J. B **64**, 211 (2008).
[5] J. Kliava and R. Berger, J. Magn. Magn. Mater. **205**, 328 (1999).
[6] E. De Baiasi, C. A. Ramos, and R. D. Zysler, J. Magn. Magn. Mater. **262**, 235 (2003).
[7] J. Park, K. An, Y. Hwang, J. G. Park, H. J. Noh, J. Y. Kim, J. H. Park, N. M. Hwang, and T. Hyeon, Nature Materials **3**, 891 (2004).
[8] D. Y. Kim, New Physics: Sae Mulli **63**, 189 (2013).
[9] Y. A. Koksharov. D. A. Pankratov, S. P. Gubin, I. D. Kosobudsky, M. Beltran, Y. Khodorkovsky, and A. M. Tishin, J. Appl. Phys. **89**, 2293 (2001).
[10] R. D. Sanchez, M. A. L. Quintela, J. Rivas, A. G. Penedo, A. J. G. Bastida, C. A. Romos, R. D. Zysler, and S. R. Guevara, J. Phys: Condens. Mater. **11**, 5643 (1999).
[11] P. C. Morais, F. A. Tourinho, G. R. R. Goncalves, and A. L. Tronconi, J. Magn. Magn. Mater. **149**, 19 (1995).

# Size Dependence of FMR Linewidth in Iron Oxide Nanoparticles

**Dong Young Kim and Seok Soo Yoon***

*Department of Physics, Andong National University, Andong 760-749, Korea*

(Received 10 January 2014, Received in final form 5 February 2014, Accepted 6 February 2014)

We measured the ferromagnetic resonance (FMR) signal using the monodisperse iron oxide nanoparticles with size $D = 4.67$ nm, 5.64 nm and 6.34 nm synthesized by using the thermal decomposition method, respectively. The measured ferromagnetic resonance signals were compared with the calculated ones for superparamagnetic nanoparticles with lognormal volume distribution. The FMR linewidth broadening was propositional to $\tanh(V^2)$, where $V$ was volume of nanoparticles. The narrow linewidth of small size nanoparticles was due to the surface spins, while the broad linewidth of large size nanoparticles was due to the bulk spins affected by the crystalline structure of iron oxide nanoparticles. The superposition of surface and bulk effect was confirmed at $D = 5.64$ nm nanoparticles, which was near the critical size for linewidth transition from surface effect to bulk effect.

**Keywords :** iron oxide, superparamagnetic nanoparticles, thermal fluctuation, FMR signal, linewidth