

## Influences of Magnetization Reversal and Magnetic Interaction on Coercivity of Sr-Ferrite Particles with Different Sizes

Hyeon Soo Kim and Soon Young Jeong\*

Department of Physics and Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

Kyung Min Kim and Hae-Woong Kwon\*

Pukyong National University, Busan 48547, Korea

(Received 30 November 2016, Received in final form 16 December 2016, Accepted 20 December 2016)

In this study, the influences of magnetization reversal and magnetic interaction on the coercivity of Sr-ferrite particles with different sizes were investigated through various magnetic measurements. The shape of the initial magnetization curve and the magnetic field dependence of the coercive force indicate that the magnetization reversal changes from domain nucleation to wall pinning as the particle size decreases. On the other hand, the Henkel plot, interaction field factor and  $\Delta M(H)$  obtained from the DCD and IRM curves show that the strength of the dipolar interaction is increased with increasing the particle size. Therefore, it can be concluded that coercivity is closely related to magnetic interaction as well as magnetization reversal mechanism.

**Keywords :** Sr-ferrite particle, coercivity, magnetization reversal, dipolar interaction

## 크기가 다른 Sr-Ferrite 입자의 자화 역전과 자기 상호작용이 보자력에 미치는 영향

김현수 · 정순영\*

경상대학교 물리학과 및 기초과학 연구소, 경남 진주시 진주대로 501, 52828

김경민 · 권해웅\*

부경대학교 재료공학과, 부산시 남구 신선로 365, 48547

(2016년 11월 30일 받음, 2016년 12월 16일 최종수정본 받음, 2016년 12월 20일 게재확정)

시료 크기별 자화 역전과 자기 상호작용이 보자력에 미치는 영향을 조사한 결과, 지구생성보다 자벽고착에 의한 자화 역전 현상이 지배적인 시료일수록 보자력과 각형비가 컸다. 이와 같은 현상은 자벽이 난알 경계면이나 시료 내부에 존재하는 고착점에 강하게 포획되기 때문인 것으로 판단된다. 한편 자기 상호작용을 분석한 결과, 시료의 크기에 무관하게 모든 시료는 쌍극자 상호작용이 지배적인 상호작용 기구이며, 쌍극자 상호작용이 강한 시료일수록 보자력이 작았다. 따라서 보자력은 자화 역전 현상, 자기 상호작용 기구와 세기에도 깊이 관련됨을 알 수 있다.

**주제어 :** Sr-페라이트, 보자력, 자화 역전, 쌍극자 상호작용

### I. 서 론

비교적 열적 안정성이 높고 가격이 저렴하여 산업용으로 많이 이용되고 있는 산화물 경자성 페라이트는 분쇄, 성형 등 공정과정에 따라 자기특성이 바뀐다. 산화물 페라이트 중에서 Ba-페라이트와 Sr-페라이트는 열적, 화학적으로 매우 안정되고 전기적, 자기적, 기계적 그리고 광자기적으로 우수한 성질을 가지고 있어 산업적으로 활용 가능성이 큰 물질로 알려져 있다[1-4].

분말 산화물 페라이트 자성재료의 여러 가지 자기적 성질 중 보자력은 성형이나 소결뿐만 아니라 분쇄공정에 따른 크기, 모양, 다공성 등 미세구조는 물론 자화 상태에 영향을 많이 받지만 자화 역전 현상과 자기 상호작용과도 밀접하게 관련되는 것으로 알려져 있다[5].

이에 따라 본 연구에서는 분쇄 과정별 생성된 크기가 다른 시료의 보자력을 조사하고, 각 보자력 변화를 자화 역전 현상과 자기 상호작용 기구로 설명하고자 시도하였다. 이와 같은 연구는 용도에 맞는 우수한 경자성 재료 개발은 물론 자기적 성질을 이해하는데 도움이 될 것으로 판단한다.

자화 역전은 단자구인 경우 단자구회전(single domain particle rotation)으로, 다자구로 구성된 자성체는 자구생성(domain nucleation) 또는 자벽고착(domain wall pinning)으로 역전을 일으키는 것으로 설명하지만 인가 자기장 범위 내에서 한 가지만의 기구로 역전을 일으키지 않는 것으로 알려져 있다. 역전 기구는 초기 자화곡선과 minor loops의 모양으로부터 결정하는 정성적인 방법, 각각의 minor loop로부터 구한 보자력( $H_c$ )의 최대 인가 자기장( $H_{max}$ )과의 관계 그리고 보자력의 온도 의존성으로부터 구하는 반정량적인 방법 등이 있다[6, 7].

자기 상호작용은 작용거리가 비교적 큰 쌍극자 상호작용(dipolar interaction)과 작용거리가 짧은 바꿈 상호작용(exchange interaction)으로 나뉜다. 쌍극자 상호작용은 낱알(grain) 내부 또는 경계면에 자기선속의 불연속을 나타나게 하고, 낱알의 형상이 복잡하고 크기가 클 경우, 쌍극자 상호작용은 보자력을 감소시키는 것으로 설명하고 있다[8]. 한편 바꿈 상호작용은 직접 접촉하고 있는 이웃 낱알의 자기모멘트 간의 상호작용으로 작용범위가 매우 짧으며 대개 자벽 두께에 해당하는데, 이 상호작용은 자화 용이축으로부터 경계면의 자기모멘트를 벗어나게 함으로써 유효 이방성과 보자력을 감소시키고 잔류 자화를 증가시킨다.

자기 상호작용을 이해하기 위해서는 주로 잔류 자화곡선과 minor loops를 측정하여 분석하는데, 잔류 자화곡선은 자성 입자로 제작된 수평 자기 기록매체의 자화 역전 현상과 자기 상호작용 현상을 이해하기 위해 처음 시도된 방법으로 알려져 있다[9, 10]. 잔류 자화곡선은 두 가지 종류, 즉 직류 자기

소거 잔류 자화(DC Demagnetization Remanence: DCD)곡선과 등온 잔류 자화(Isothermal Remanence: IRM)곡선이 있으며, 본 연구에서는 상온에서 DCD와 IRM 자화곡선 모두를 측정하고 분석하여 자기 상호작용 현상을 규명하도록 한다.

### II. 실험 방법

#### 1. 시료제작

본 연구에 사용된 시료는 육방정 구조의 magnetoplumbite형(M-type) strontium ferrite( $SrFe_{12}O_{19}$ )이며, 이 화합물은 출발원료로 공업용 순도의  $SrCO_3$ 와  $Fe_2O_3$ 를 사용하여 합성하였다. 원료의 성분비는 1:6 mole 비가 되도록 선정하여 습식 볼밀링 방법으로 충분히 혼합한 후 150 °C에서 건조시켰다. 건조된 혼합원료를 공기 중 1300 °C에서 1시간 동안 가소하여  $SrFe_{12}O_{19}$ 를 합성하였다. 합성 직후 시료(clinker: C1)의 상은 X-선 회절분석기(Cu-K $\alpha$ )로 측정하여 분석하였으며, 포화자화 값은 SQUID를 이용하여 측정하였다. 합성 시료의 입도를 조절하기 위하여 일차적으로 습식 분쇄기(pulverizer)로 30분 파쇄하여 조대분말(coarse: C2)을 제조하고, 더욱 더 입도를 줄인 미세분말(fine: C3)은 조대분말을 습식 ball milling으로 24시간 분쇄하여 얻었다. 가소체 및 분쇄 분말의 조직은 SEM을 이용하여 관찰하였다.

#### 2. 자성측정

자화 역전 현상과 자기 상호작용이 시료별 보자력에 미치는 영향을 규명하기 위해 입자를 액상 파라핀왁스와 충분히 혼합한 후 10 kOe의 자기장으로 배향시키고 고화시켜 입자들을 고정시킨 후 자기이력곡선, 초기 자화곡선, minor loop 그리고 DCD와 IRM 곡선을 측정하였다. 초기 자화곡선, minor loop 그리고 IRM 곡선은 시료를 자기소거 시킨 후 측정하였다.

DCD 곡선은 시료를 양(+)의 방향으로 완전히 포화시킨 다음 음(-)의 방향으로 일정 자기장을 인가한 후, 자기장을 0으로 둔 상태에서 측정하였다. 이와 같은 순서로 시료가 음의 방향으로 완전히 포화될 때까지 일정 크기의 자기장을 단계적으로 인가하면서 반복적으로 측정하였다. 한편 IRM 곡선은 자기소거한 시료에 양의 방향으로 자기장을 인가한 다음 자기장을 제거한 상태에서 자기모멘트를 측정하였다. 이와 같은 순서로 자기장을 일정하게 증가시킨 상태에서 계속 측정하되 시료가 포화될 때까지 반복적으로 측정하였다.

### III. 결과 및 논의

#### 1. 시료구조

연구에 사용한 합성 시료에 대한 X-선 회절시험기를 이용

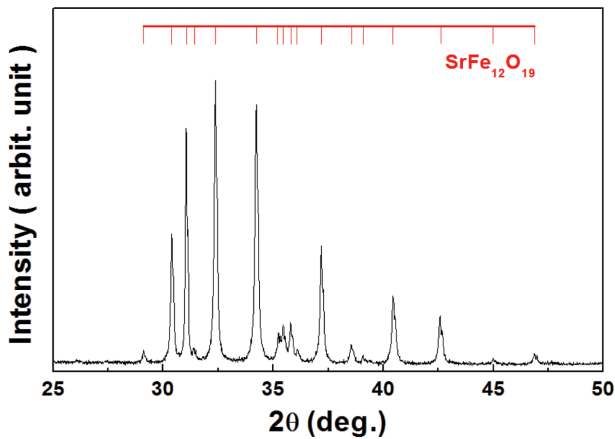


Fig. 1. (Color online) X-ray diffraction pattern of the synthesized SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>.

한 상분석 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 합성 시료는 육방정 구조의 M-type strontium ferrite 단일상임을 확인할 수 있다. 이 시료의 X-선 회절시험 결과로부터 측정된 합성 SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>의 격자상수는  $a = 0.5884$  nm,  $c = 2.3050$  nm,  $c/a = 3.917$ 이었다.

한편 합성 시료의 포화자화 값을 SQUID를 이용하여 상온

에서 측정된 결과 약 72.16 emu/g이었으며, 이 값은 이미 보고되어 있는 SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>의 상온 포화자화 값[11]과 거의 일치하므로 본 연구에서 합성한 시료가 단일상의 SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>임을 재확인시켜 주고 있다.

Fig. 2(a) 및 (b)는 합성 직후 하소체의 단면 및 합성된 SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>의 결정립 모양을 보여주는 SEM 사진으로서, 0.5~2.0 μm 범위의 크기는 갖는 미세한 결정립으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 시료 C1은 하소체를 가볍게 파쇄하여 평균 1 mm 직경의 입자로 가공한 것으로, 각 입자는 수많은 미세 결정립들로 구성되어 있다. 시료 C2는 시료 C1을 추가 파쇄하여 조대분말로 가공하여 제조하였으며, 이 조대분말 입자의 형상 및 결정립 구조는 Fig. 2(c) 및 (d)와 같다. 시료 C2는 아주 미세한 크기에서부터 약 100 μm 크기의 넓은 입도 분포를 하고 있지만, 수십 μm에서 약 100 μm 크기의 입도를 갖는 입자들이 전체 체적의 대부분을 차지하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 2(d)에서 보는 것처럼, 이 C2 입자 대부분은 합성 상태의 미세한 결정립 크기를 감안하면 한 입자 내에 많은 수의 결정립을 포함하는 다결정립으로 취급할 수 있다. 입도를 더욱 줄인 미세분말 시료 C3의 입자 형상은 Fig. 2(e)에 나타나 있으며, 대부분의 입자는 그 크기가 약 2 μm 이하의 미세 입자로 되어 있다. 합성 상태의 결정립들이 약 2 μm 이하의 크기로 구성되어 있었던 것을 감안하면 파쇄과정에서 각 결정립들이 분리되고 또한 그 일부는 더욱더 파쇄가 진행되어 합성 상태에서의 결정립 크기보다 훨씬 작은 미세입자로 가공되어 있다. 따라서 이 시료 C3의 입자들은 대부분이 단결정 입자인 것으로 판단할 수 있다.

### 2. 자기적 성질

상온에서 측정된 자기이력곡선에서 구한 시료별 보자력과 각형비( $M_r/M_s$ )를 Fig. 3에 나타내었다. 보자력과 각형비는 입자의 크기가 클수록 급격히 감소함을 알 수 있다. 입자의

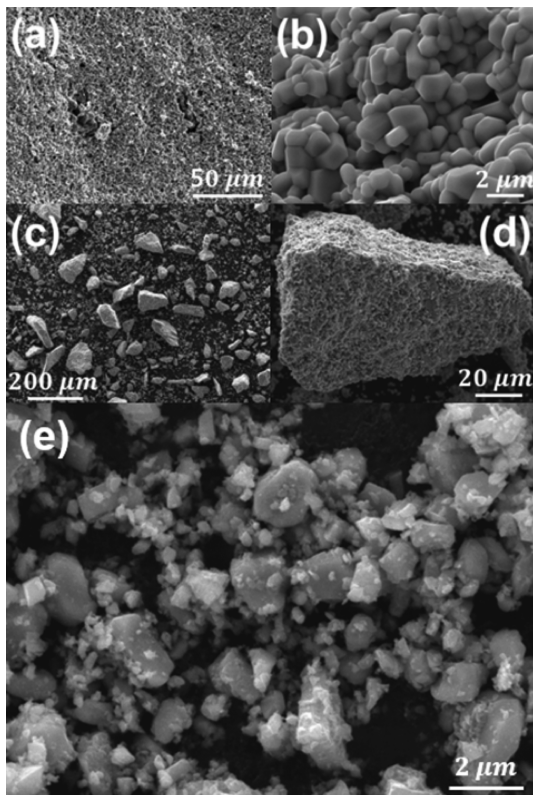


Fig. 2. SEM photos showing the morphology of (a) as-synthesized (C1), (b) close-look of as-synthesized (C1), (c) coarse (C2), (d) close-look of coarse (C2), (e) fine (C3) powder after milling.

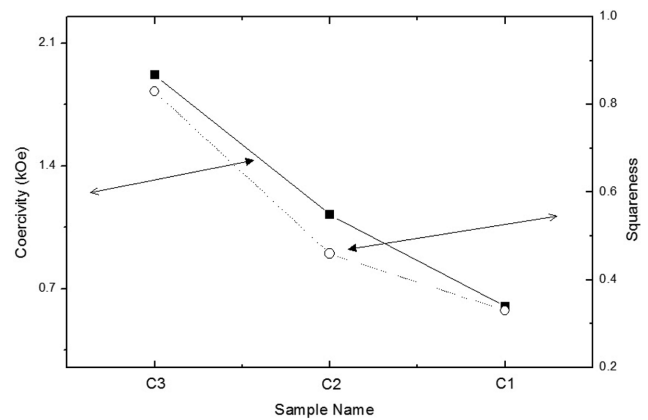


Fig. 3. Particle size dependence of the coercivity and the squareness.

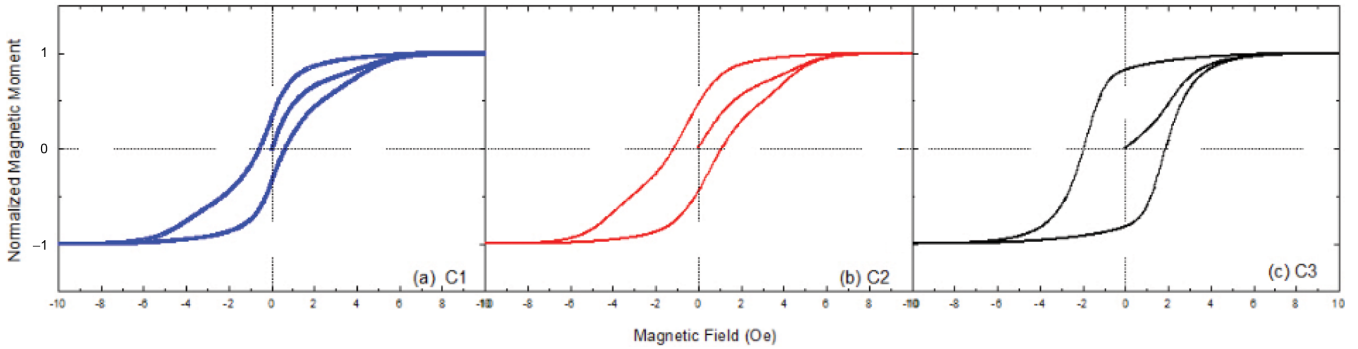


Fig. 4. (Color online) Normalized initial magnetization curves for the samples.

크기가 큰 시료 C1, C2의 경우, 한 입자 내에 많은 수의 결정립들이 속해 있고, 각 결정립들은 결정립계를 경계로 직접 접촉하고 있어 한 결정립이 탈자 되면 인접 결정립도 영향을 받아 쉽게 탈자 된다. 이 때문에 입자의 크기가 클수록 보자력은 감소하게 된다. 한편 입자의 크기가 작아져서 단결정 크기로 분리된 시료 C3 경우, 인접 결정립들은 자기적으로 분리(magnetic decoupling)되고 또한 각 결정립의 크기가 SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>의 임계 단자구 크기(약 0.9 μm) 가까이 근접하거나 혹은 그 이하가 되어 보자력이 증가하는 것으로 볼 수 있다. 각형비가 입자의 크기에 의존하는 원인은 큰 입자의 경우에는 이를 구성하고 있는 많은 수의 결정립들이 무질서하게 배향하고 있어 자기장 중에서 배향이 어려워지기 때문이며, 입자의 크기가 작아져 단결정으로 분리된 경우에는 각 단결정 입자들이 자기장 중에서 잘 배향되기 때문인 것으로 판단한다.

자화 역전 기구를 알아보기 위해 측정된 3종류 시료의 초기 자화곡선은 Fig. 4와 같다. 이들 곡선으로부터 시료의 크기가 큰 시료일수록 낮은 자기장 영역에서 초기 자화가 가파르게 증가하는데 비해 입자의 크기가 가장 작은 시료 C3의 자화 증가 속도는 비교적 느렸다. 한편 인가 자기장에 따른 초기 자화곡선 모양으로 자화 역전 현상을 설명한 X. Liu 등[12]에 따르면, 낮은 자기장 영역에서 자화가 급격히 증가하여 포화되면 자구생성, 자화가 낮은 인가 자기장 범위에서 완만하게 증가하다가 어느 임계 자기장 이상에서 빠르게 증가하다가 포화되는 경우를 자벽고착에 의한 자벽운동으로 취급한다. 또한 상대적으로 큰 자기장 영역까지도 거의 증가하지 않고 일정하게 유지되다가 높은 자기장에서 급격히 증가하여 곧 포화되는 경우를 단자구회전에 의해 역전을 일으키는 것으로 설명하고 있다.

이에 따라 초기 자화곡선을 나타낸 Fig. 4(a), (b)로부터 크기가 비교적 큰 C1과 C2의 지배적인 역전 기구는 자벽고착보다는 오히려 자구생성에 의한 것으로 간주할 수 있는데, 이 경우 낮은 자기장에서 자구가 쉽게 생성되고 생성된 자구

가 빠르게 확산되므로 자화가 급격하게 증가되는 특성을 갖는다. 그러나 Fig. 4(c)로부터 알 수 있는 것처럼 크기가 가장 작은 C3는 낮은 자기장 영역에서 초기 자화의 증가 속도가 Fig. 4(a), (b)에 비해 느린 경향을 보이므로 시료 C3는 자벽고착이나 단자구회전에 의해 역전을 일으키는 거동을 보이지만 주된 역전 기구는 자벽고착인 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 입자의 크기가 서로 다른 Ba-페라이트의 자화 역전 기구와 보자력과의 관계에 대한 G. C. Hadjipanayis 등의 연구결과[1]와 거의 같은 경향을 보였으며, 초기 자화곡선의 형상으로부터 자화 역전 기구를 자구생성 또는 자벽고착에 의한 자벽이동으로, 크기가 작은 시료의 보자력이 크게 증가하는 원인은 강한 자벽고착에 의한 것으로 설명하고 있다.

일반적으로 각형비가 거의 1인 경우는 자구생성 자기장( $H_n$ )이나 자벽고착 자기장( $H_p$ )이 보자력( $H_c$ )이 되지만, 각형비가 1보다 작은 대부분의 자성체는 자벽고착 자기장이 자구생성 자기장 보다 크며 보자력 또한 이들 임계 자기장보다 큰 것으로 Buschow는 설명하고 있다[13]. 따라서 연구에 사용된 시료가 다자구로 형성된 것으로 간주하면, Fig. 3과 Fig. 4에서 볼 수 있는 것처럼, 모든 시료의 각형비가 1보다 훨씬 작으므로, 시료 C3의 보자력은 자벽고착, C1과 C2는 자구생성과 깊이 관련된 것으로 판단된다. 이에 따라 자화 역전 기구가 보자력 증감의 여러 원인 가운데 중요한 요인이 되는 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 5는 각각의 minor loop으로부터 얻은 최대 인가 자기장별 보자력을 나타낸 것으로 모든 시료의 보자력은 최대 인가 자기장에 비해 작았다. 따라서 모든 시료의 자화 역전 기구는 자벽고착에 의한 것으로 설명 가능하다. 그러나 시료 크기가 작을수록 각 시료를 포화시키는 인가 자기장에 반응하는 보자력이 더 빠르게 증가하는 경향을 보이므로 지배적인 자화 역전 기구가 시료의 크기에 따라 다름을 의미한다. 이상의 측정 결과로부터 자벽고착이 주된 역전 기구인 C3에 비해 C2와 C1의 지배적인 역전 기구는 자구생성에 의한 자

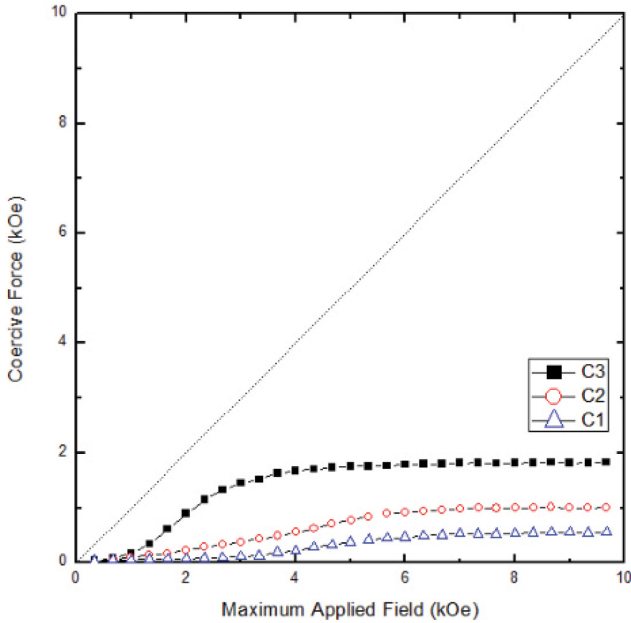


Fig. 5. (Color online) Coercive force of minor loops versus maximum applied field.

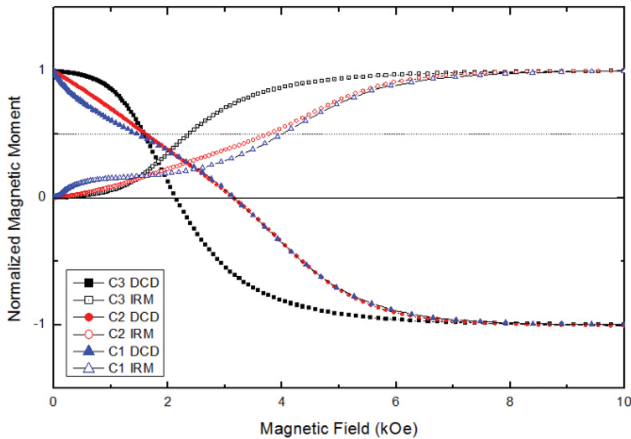


Fig. 6. (Color online) DCD and IRM remanence curves for the samples.

벽운동인 것으로 판단된다.

Fig. 6은 상온에서 측정된 시료별 DCD와 IRM 곡선을 나타낸 것으로, 이들 곡선으로부터 자화 역전 기구는 물론 자기 상호작용 기구와 세기에 관한 정보를 얻을 수 있다.

상호작용 종류와 세기를 분석하기 위해 Corradi와 Wohlfarth[14]이 정의한 상호작용장 인자(interaction field factor:  $IFF$ )  $IFF = (H_{cd} - H_{ci})/H_c$ 를 나타낸 결과는 Fig. 7과 같다. 여기서,  $H_{cd}$ 는 DCD 곡선에서 잔류 자기모멘트가 0일 때의 자기장이고,  $H_{ci}$ 는 IRM 곡선에서 최대 잔류 자기모멘트의 1/2에 해당하는 자기장이며,  $H_c$ 는 자기이력곡선에서 구한 보자력이다. 이 그림으로부터 모든 시료가  $IFF < 0$ 이고, 시료

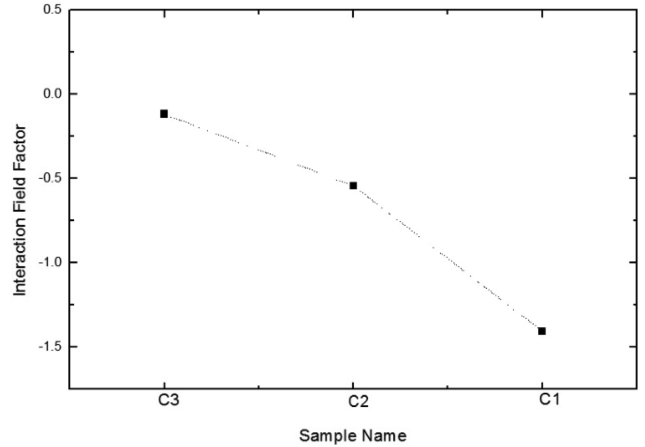


Fig. 7. Interaction field factor obtained from the DCD and IRM curves.

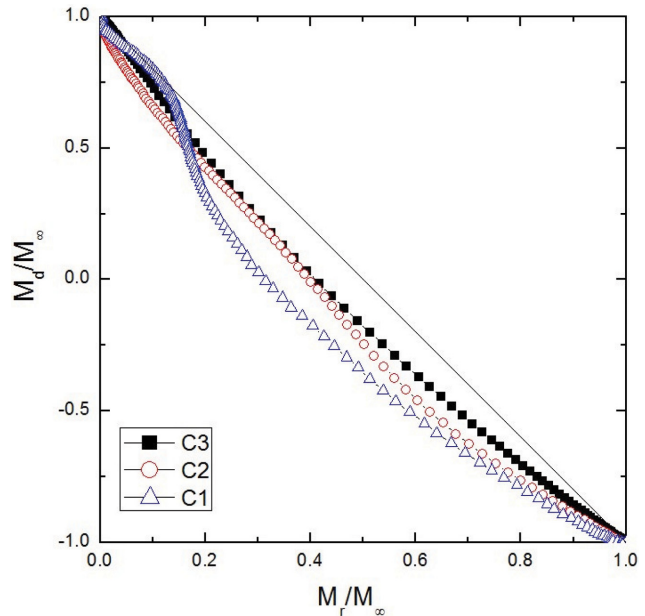


Fig. 8. (Color online) Henkel plot obtained from the DCD and IRM curves for the samples.

크기가 클수록  $IFF$ 가 급격히 감소함이 알 수 있다. 따라서 모든 시료는 쌍극자 상호작용을 일으키며 시료의 크기가 클수록 쌍극자 상호작용 세기가 증가하므로 상호작용 세기는 입자의 크기에 영향을 받는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 DCD와 IRM 곡선을 이용하여 얻은 시료별 Henkel plot이다. 시료의 난알 사이에 상호작용이 작용하지 않을 경우는 Wohlfarth 방정식  $M_d(H)/M_r(\infty) = 1 - 2M_r(H)/M_r(\infty)$ 을 따르지만, 연구에 사용된 모든 시료가  $M_d(H)/M_r(\infty) < 1 - 2M_r(H)/M_r(\infty)$ 을 만족하고 크기가 큰 시료일수록 대각선으로부터 많이 벗어남을 Fig. 8에서 확인할 수 있다. 따라서 모든 시료의 상호작용 기구는 쌍극자 상호작용이며,

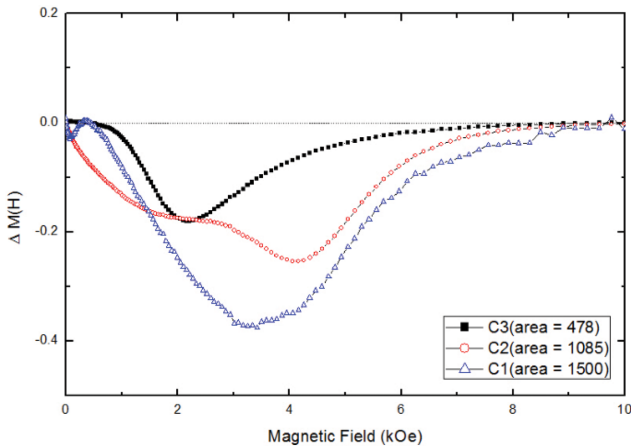


Fig. 9. (Color online) Variations of the  $\Delta M(H)$  curves for all the samples.

이 결과는 Fig. 7에 나타낸 상호작용인자  $IFF$ 의 경향과 같았다. 여기서,  $M_d(H)$ ,  $M_r(H)$  각각은 DCD, IRM 곡선의 잔류 자화 값이다.

앞에서 언급한 Wolfarth 식에서 낱알 사이에 상호작용이 있을 경우에는 상호작용 기구와 세기를 설명하기 위해 Wolfarth 관계식을 Kelly 등이 수정한 관계식  $\Delta M(H) = M_d(H)/M_r(\infty) - [1 - 2M_r(H)/M_r(\infty)]$ 을 주로 사용한다. 이 관계식에서  $\Delta M(H) < 0$ 이면 쌍극자 상호작용,  $\Delta M(H) > 0$ 이면 바꿈 상호작용으로 설명하며[15], 상호작용 세기는 곡선의 극값과 면적  $|darea| = \int_0^{H_n} \Delta M(H)dH$ 의 크기로 표현한다[16].

3종류 시료의 DCD와 IRM 곡선을 Kelly 등이 수정한 관계식에 적용시킨 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 이 그림으로부터 알 수 있는 것처럼 모든 시료가  $\Delta M(H) < 0$ 을 보이므로 지배적인 상호작용 기구는 쌍극자 상호작용이며, 크기가 큰 시료일수록 곡선의 극값이 크고 면적이 넓으므로 쌍극자 상호작용이 강함을 알 수 있다. 거의 단결정 입자의 크기에 해당하는 시료 C3 또한 쌍극자 상호작용이 지배적이지만 크기가 큰 시료인 C1, C2에 비해 극값과 면적이 상당히 작으므로 쌍극자 상호작용 세기가 크게 약함을 의미한다. 시료별 상호작용 기구와 세기를 나타내는 Fig. 9와 Fig. 3을 비교한 결과 쌍극자 상호작용이 강한 큰 시료일수록 보자력과 각형비가 낮음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 입자의 크기는 같으나 농도가 낮은 Ba-페라이트 분말에서 쌍극자 상호작용이 강할수록 보자력과 잔류 자기화가 감소한다는 M. El-Hilo 등의 연구결과[17, 18]와 같은 경향을 보였다. 또한 각 시료별 보자력과 쌍극자 상호작용 극값이 위치한 자기장 차이를 비교한 결과, C3는 약 300 Oe, C2와 C1은 각각 3,000 Oe와 2,800 Oe 정도로 보자력과 각형비가 낮은 시료일수록 보자력에 비해 상호작용 극값이 훨씬 더 큰 자기장 영역에 존재함을 알 수 있었다.

#### IV. 결 론

자화 역전 기구와 자기 상호작용이 보자력에 미치는 영향을 조사한 결과, 자벽고착에 의한 자화 역전 현상이 지배적인 시료일수록 보자력과 각형비가 컸다. 특히 자벽고착에 의한 자벽운동으로 역전을 일으키는 크기가 작은 시료 C3의 경우 자벽이 낱알 경계면이나 시료 내부에 존재하는 고착점 (pinning site)에 강하게 포획되기 때문에 자구생성에 의한 자벽운동으로 역전을 일으키는 시료 C2, C1에 비해 보자력이 증가하는 것으로 판단된다.

한편 시료의 크기에 무관하게 모든 시료는 쌍극자 상호작용이 지배적인 상호작용 기구이었으며, 쌍극자 상호작용이 강한 시료일수록 보자력과 각형비가 낮음을 알 수 있었다. 따라서 보자력은 시료의 형상뿐만 아니라 자화 역전 기구, 자기 상호작용 기구와 세기에도 깊이 관련됨을 알 수 있다.

#### 감사의 글

이 연구는 2015년도 경상대학교 발전기금재단 재원으로 수행되었습니다. 본 연구에서 사용한 시료 제조에 도움을 주신 (주)태평양금속 연구소에 감사를 드립니다.

#### References

- [1] G. C. Hadjipanayis, E. W. Singleton, and Z. X. Tang, J. Magn. Magn. Mater. **81**, 318 (1989).
- [2] H. Yamamoto, H. Kumehara, R. Takeuchi, and H. Nishio, J. PHYS IV FRANCE **7**, C1-535 (1997).
- [3] Y. K. Hong, F. J. Jeffers, and M. H. Park, IEEE Trans. Magn. **36**, 3863 (2000).
- [4] A. Verma, O. P. Pandey, and P. Sharma, Indian J. Eng. Mater. Sci. **7**, 364 (2000).
- [5] R. Gao, W. Chen, J. Zhang, W. Fong, W. Li, and X. Li, J. Mater. Sci. Technol. **17**, s93 (2001).
- [6] D. Wang: Ph.D. Dissertation, Univ. of Nebraska (1993).
- [7] H. Kronmuller, Proc. Magneto-Optic Recording Int. Symp., J. Magn. Soc. Jpn. **17**, 260 (1993).
- [8] T. Schrefl, H. F. Schmidts, J. Fidler, and H. Kronmuller, IEEE Trans. Magn. **29**, 2878 (1993).
- [9] P. I. Mayo, K. O'Grady, R. W. Chantrell, J. A. Cambridge, I. L. Sanders, T. Yogi, and J. K. Howard, J. Magn. Magn. Mater. **95**, 109 (1991).
- [10] E. O. Samwel, P. R. Bissel, and J. C. Lodder, J. Appl. Phys. **73**, 1353 (1993).
- [11] B. T. Shirk and W. R. Buessem, J. Appl. Phys. **40**, 1294 (1969).
- [12] X. Liu, Y. Shiozaki, and A. Morisako, J. Appl. Phys. **103**, 07E104 (2008).
- [13] K. H. Buschow, J. Rep. Pro. Phys. **54**, 1196 (1991).
- [14] A. R. Corradi and E. P. Wohlfarth, IEEE Trans. Magn. **14**, 861

- (1978).
- [15] P. E. Kelly, K.O'Grady, P. I. Mayo, and R. W. Chantrell, IEEE Trans. Magn. **25**, 3881 (1989).
- [16] G. Bottoni, J. Magn. Mater. **110**, 355 (1992).
- [17] M. El-Hilo, I. Bsoul, A. Rousan, and A. Hudeish, J. Magn. Mater. **272**, 327 (2004).
- [18] M. El-Hilo and I. Bsoul, Physica B. **389**, 311 (2007).