

교환결합나노복합체영구자석의 유효이방성과 보자력평가모형

박원국, 려혁수, 김금영

교환결합나노복합체영구자석은 경자성희토류합금상과 연자성상이 나노결정립자상태로 서로 복합되어 높은 잔류자화와 최대에너지적을 나타내는 새형의 첨단영구자석재료이다. 그러나 연자성상이 추가되는것으로 하여 교환결합나노복합체영구자석의 보자력은 경자성단일상으로 이루어진 영구자석에 비하여 낮아지게 된다.

선행연구들[1-4]에서는 보자력이 연자성상의 함량뿐만 아니라 그것의 나노결정립자크기와 상대적인 배치에 관계된다는것을 이론적으로뿐만아니라 실험적으로도 밝혔다.

우리는 나노복합체영구자석의 보자력을 그것의 나노급미시결정구조에 따라 결정되는 유효이방성상수를 통하여 평가하는 한가지 방법을 제안하고 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 나노복합체영구자석을 대상으로 보자력을 평가하였다.

1. 유효이방성평가모형

일반적으로 자성립자계의 자기적성질은 국부적인 자기이방성에너지와 강자성교환에너지의 영향을 받는다.

단일자구의 림계크기이상으로 큰 림자들로 이루어진 계에서는 자구들이 림자내에 형성되기때문에 보자력은 그 재료의 재료상수로 되는 결정상태의 자기결정확적이방성상수 K_1 에 의하여 결정된다. 그러나 강자성교환호상작용특성길이와 비교될수 있는 정도의 작은 림자들로 이루어진 나노결정복합계에서는 교환호상작용의 영향으로 인하여 자기모멘트들이 개별적인 림자의 자화용이축방향으로 완벽하게 정렬되지 않으며 결국 평균적인 자기이방성은 체적재료의 고유한 자기이방성상수 K_1 보다 떨어지게 된다. 이러한 효과는 나노미터크기의 자성립자들의 교환결합에 의하여 전체 계의 성질이 규정되는 교환결합나노복합체영구자석의 경우 필수적으로 고려해야 할 문제이다.

교환결합나노복합체영구자석은 연자성상립자와 경자성상립자들로 이루어진 비균질계이므로 국부적인 자기이방성상수값은 위치에 따라 차이되며 이방성의 총체적효과가 계의 전체적인 자기적성질 특히 보자력에 반영된다. 특히 림자간교환결합구역에서는 이방성이 급격히 변하며 위치마다 달라진다. 이런 효과를 반영하기 위하여서는 전체 자성계를 교환결합특성에 따라 여러가지 부분구역으로 갈라서 매 구역의 국부적인 자기이방성을 고찰하고 해당 구역의 체적분률에 따라 무게평균의 방법으로 총체적인 유효이방성을 고찰하는것이 합리적이다.

전체 계안에는 일반적으로 비교환결합경자성구역(f^h), 경자성-경자성교환결합구역(f^{hh}), 연자성과 교환결합한 경자성구역(f^{hs}), 비교환결합연자성구역(f^s), 연자성-연자성교환결합구역(f^{ss}), 경자성과 교환결합한 연자성구역(f^{sh})들이 존재할수 있다. $f^{ij}(i, j=s, h)$ 는 해당하는 특성구역들의 체적분률로서 다음과 같은 관계를 만족시킨다.

$$\left. \begin{aligned} f^h + f^{hh} + f^{hs} &= v^h \\ f^s + f^{sh} + f^{ss} &= v^s \\ v^h + v^s &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

여기서 v^h 와 v^s 는 각각 경자성상과 연자성상의 체적분률이다. 경자성—연자성나노복합체안에서 상들의 상대적배치나 상립자들의 크기에 따라 매 구역의 체적분률값이 규정되며 어떤 형태의 구역은 존재하지 않을수도 있다. 매 구역의 구체적인 체적을 결정하는 인자는 상립자들의 크기와 배치 그리고 교환결합특성길이다. 매 상들간의 교환결합특성길이는 다음과 같이 모형화할수 있다.[5]

$$\left. \begin{aligned} l_e^{hh} &= \pi(A^h / K_1^h)^{1/2} \\ l_e^{ss} &= (A^s / K_1^s)^{1/2} \\ l_e^{hs} &= \pi\left(\sqrt{A^h A^s} / K_1^h\right)^{1/2} \\ l_e^{sh} &= \left(\sqrt{A^h A^s} / K_1^s\right)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

여기서 A^h 와 A^s 는 각각 나노복합체안의 경자성상과 연자성상의 교환결합상수이고 K_1^h , K_1^s 는 각각 경자성상과 연자성상의 체적체상태의 자기이방성상수들이며 $l_e^{ij}(i, j=h, s)$ 는 j 상과 교환결합하고있는 i 상구역내의 교환결합특성길이다.

경자성Nd₂Fe₁₄B상과 연자성 α -Fe상의 자기적특성상수를 표에 보여주었다.

표. 경자성Nd₂Fe₁₄B상과 연자성 α -Fe상의 자기적특성상수[5]

재료	$\mu_0 M/T$	$K_1/(kJ \cdot m^{-3})$	$A/(pJ \cdot m^{-1})$
Nd ₂ Fe ₁₄ B	1.61	4 500	7.7
α -Fe	2.15	46	25

앞에서 분류한 매 교환결합특성구역들 $f^{ij}(i, j=s, h)$ 에서 유효자기이방성을 따로 평가할수 있다.

경자성상과 연자성상의 비교환결합구역에서는 그 립자의 크기에 따라 이방성의 나노 크기효과를 반영하여 유효이방성상수를 다음과 같이 평가할수 있다.

$$K_{\text{유효}}^h = \begin{cases} K_1^h \left(\frac{\pi d^h}{10l_e^{hh}} \right)^{3/2}, & d^h \leq \frac{10l_e^{hh}}{\pi} \\ K_1^h, & d^h > \frac{10l_e^{hh}}{\pi} \end{cases} \quad (3)$$

$$K_{\text{유효}}^s = \begin{cases} K_1^s \left(\frac{d^s}{l_e^{ss}} \right)^{3/2}, & d^s \leq l_e^{ss} \\ K_1^s, & d^s > l_e^{ss} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 d^h 와 d^s 는 각각 경자성상과 연자성상결정립자의 크기이다. 전체 제안에서 d^h 와 d^s 가 일정하다고 가정하면 위의 두 값 $K_{\text{유효}}^h$ 와 $K_{\text{유효}}^s$ 도 일정하며 다른 구역들 즉 립자 경계의 교환결합구역들의 국부자기이방성상수는 이 값들로부터 결정된다.

립자경계의 교환결합층들에서는 립자경계로부터의 거리에 따라 국부자기이방성이 달라진다. 매 교환결합구역에서의 국부이방성상수를 립자경계로부터의 거리 r 의 함수로서 다음과 같이 표시할수 있다.

$$K^{ij}(r) = K_{\text{유효}}^i - (K_{\text{유효}}^i - K^{ij}(0))(1 - 2r/l_e^{ij})^{3/2} \quad (i, j = s, h) \quad (5)$$

여기서 $K^{ij}(0)$ 은 각이한 립자경계에서의 국부이방성상수로서 다음과 같이 설정된다.

$$K^{ss}(0) < K^{sh}(0) = K^{hs}(0) < K^{hh}(0) \quad (6)$$

교환결합Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe나노복합체에서는 경자성Nd₂Fe₁₄B상결정립자의 크기가 $a^h > 10l_e^{hh}/\pi \approx 18\text{nm}$ 의 조건을 만족하는 경우 즉 식 (3)으로부터 $K_{\text{유효}}^h = K^h$ 로 볼수 있는 경우에는 $0.5K^h \leq K^{sh}(0) = K^{hs}(0) \leq 0.7K^h$ 되게 설정한다.

매 교환결합특성구역 f^{ij} 들에서의 유효자기이방성상수는

$$K_{\text{유효}}^{ij} = \langle K^{ij} \rangle = \frac{1}{f^{ij}} \int K^{ij}(r) dv \quad (7)$$

형식의 체적평균으로 구해진다. 이렇게 얻어진 매 구역에서의 유효자기이방성상수로부터 체적분률에 따르는 무게평균을 통하여 계전체의 유효자기이방성상수를 구할수 있다. 즉

$$K_{\text{유효}} = \sum_i f^i K_{\text{유효}}^i + \sum_{i,j} f^{ij} K_{\text{유효}}^{ij} \quad (8)$$

결국 교환결합나노복합체의 유효이방성상수는 각이한 교환결합구역들의 체적분률과 그안에서의 국부이방성상수의 체적평균에 의하여 결정된다.

2. 유효이방성에 기초한 보자력평가

식 (8)에 따라 평가되는 유효자기이방성상수로부터

$$H_c = p_c \frac{K_{\text{유효}}}{\mu_0 M} \quad (9)$$

의 관계를 리용하여 보자력을 구할수 있다.[5] 여기서 p_c 는 재료에 관계되는 비례결수이다. 결국 교환결합나노복합체영구자석의 보자력은 그것의 유효이방성상수에 비례한다.

경자성Nd₂Fe₁₄B상결정립자들로 이루어진 나노박막층과 연자성 α -Fe상결정립자들로 이루어진 나노박막층이 엇바꾸어 쌓여 이루어진 교환결합Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe나노다층박막계(그림 1)에 대하여 유효이방성모형으로 보자력을 평가하자.

교환결합Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe나노다층박막계모형에서 경자성Nd₂Fe₁₄B상과 연자성 α -Fe상의 체적분률 v^h , v^s 는 매 상의 결정립자층의 두께 t^h , t^s 에 의하여 다음과 같이 표시된다.

$$v^h = \frac{t^h}{t^h + t^s}, \quad v^s = \frac{t^s}{t^h + t^s} \quad (10)$$

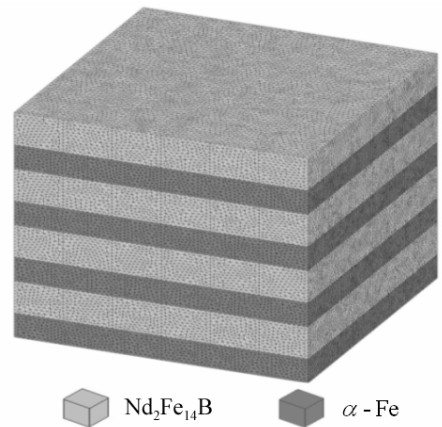


그림 1. Nd₂Fe₁₄B층과 α -Fe층으로 이루어진 나노복합다층박막계모형

이로부터 교환결합계의 유효포화자화세기는 경자성상과 연자성상의 포화자화세기의 체적분률에 따르는 평균값

$$M = \frac{M^h t^h + M^s t^s}{t^h + t^s} \quad (11)$$

로 평가할수 있다. 여기서 M^h 와 M^s 는 각각 경자성 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 상과 연자성 $\alpha\text{-Fe}$ 상의 포화자화세기이다.

전체 모형계를 상결정립자간교환호상작용특성에 따라 각이한 교환결합특성구역들로 나누어 고찰할수 있는데 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 나노다층박막계의 경우 체적분률은 각각 다음과 같이 표시된다.

$$f^h = \begin{cases} 0, & t^h \leq l_e^{hs} \\ v^h \left(1 - \frac{l_e^{hs}}{t^h}\right), & t^h > l_e^{hs} \end{cases}, \quad f^{hs} = v^h - f^h, \quad f^s = \begin{cases} 0, & t^s \leq l_e^{sh} \\ v^s \left(1 - \frac{l_e^{sh}}{t^s}\right), & t^s > l_e^{sh} \end{cases}, \quad f^{sh} = v^s - f^s$$

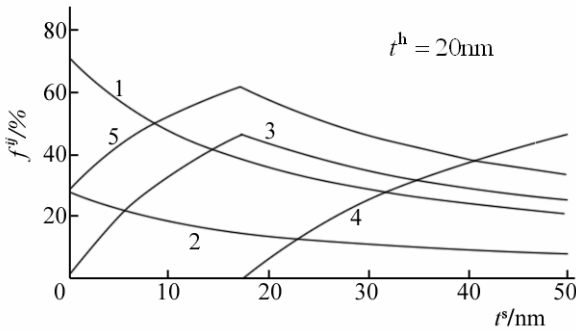


그림 2. 연자성상립자층의 두께에 따르는 때 교환결합특성구역의 체적분률변화
1-5는 교환결합구역이 f^h , f^{hs} , f^s , f^{sh} , $f^{sh} + f^{hs}$ 인 경우

웃식에서 f^h 와 f^s 는 각각 경자성상 구역과 연자성상구역의 체적분률로서 상립자내의 비교환결합구역 $f^i (i=s, h)$ 와 같은 층안의 상립자들사이의 교환결합구역 $f^{ii} (i=s, h)$ 를 포괄한다.

그림 2에 경자성상립자층의 두께 t^h 가 20nm인 경우 연자성상립자층의 두께에 따르는 때 교환결합특성구역의 체적분률변화를 보여주었다. 그림 2에서 특히 주목할것은 경자성상과 연자성상간의 교환결합특성구역의 체적분률 $f^{sh} + f^{hs}$ 의 변화인데 이 값에 따라 계전체의 교환결합효과를 평가할수 있다.

얻어진 교환결합특성구역체적분률로부터 계전체의 유효이방성모형과 보자력을 평가하였다.(그림 3)

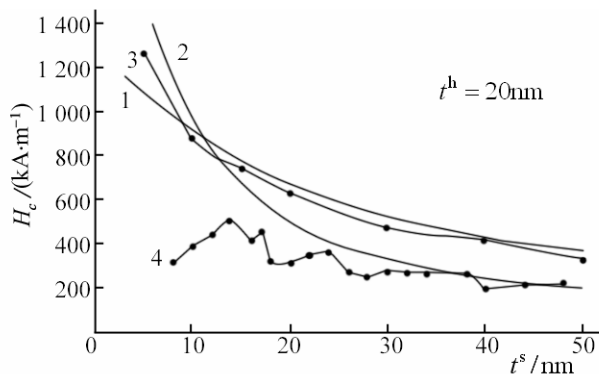


그림 3. $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 다층박막계에서 연자성상립자층의 두께에 따르는 보자력평가

1-유효이방성모형, 2-자벽에너지모형함수[1], 3-유한요소모의[2], 4-실험결과[4]

그림 3에서 보는바와 같이 유효이방성모형을 통하여 평가한 보자력은 자벽에너지 모형함수에 따르는 보자력의 해석적평가[1], 유한요소모의결과[2]와 마찬가지로 연자성상 층두께의 증가에 따라 감소한다. 유효이방성모형으로 평가한 보자력의 값은 유한요소모의결과와 거의 일치하였다. 실험결과[4]와의 차이는 실험적으로 얻어진 다층박막계가 경자성상 및 연자성상층의 리론모형이나 유한요소모의에서와 같이 완전히 균일하지 못하기 때문에 생기는것으로 해석할수 있다.

일반적으로 교환결합나노복합체영구자석에서는 연자성상의 체적분률이 클수록 유효자기이방성상수가 작아지며 경자성상의 립자크기가 작을수록 그리고 연자성상의 립자크기가 클수록 유효자기이방성상수가 작아져 보자력이 작아진다. 그러나 중요한것은 연자성상과 경자성상의 립자크기와 상대적배치를 반영한 미시구조를 적합하게 설계하여 각이한 구역들의 체적분률과 매 구역들에서의 유효자기이방성상수의 적을 크게 하여 낮은 경자성상함량으로도 전체 계의 보자력을 높일수 있다는것이다.

맺 는 말

나노복합체영구자석의 보자력을 그 나노급미시결정구조에 따라 결정되는 유효이방성상수를 통하여 평가하는 한가지 방법을 제안하고 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 나노복합체다층박막계를 대상으로 보자력의 연자성립자층두께의존성을 평가하고 해석하였다.

참 고 문 헌

- [1] H. S. Ryo et al.; J. Magn. Magn. Mater., 469, 531, 2019.
- [2] H. S. Ryo et al.; J. Magn. Magn. Mater., 426, 328, 2017.
- [3] L. Lou et al.; J. Magn. Magn. Mater., 352, 45, 2014.
- [4] S. M. Parhofer et al.; IEEE Trans. Magn., 32, 4437, 1996.
- [5] W. C. Feng et al.; J. Appl. Phys., 98, 044305, 2005.

주체108(2019)년 9월 5일 원고접수

An Analytical Model to Estimate the Effective Anisotropy and the Coercive Force in Exchange Coupled Nanocomposite Magnets

Pak Won Guk, Ryo Hyok Su and Kim Kum Yong

An analytic model has been suggested to estimate the coercive force with the effective anisotropy which is determined by nanoscaled microstructures in exchange coupled nanocomposite magnets. Using the model, the dependance of coercive force on the soft layer thickness has been analyzed in $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ nanocomposite multilayer system.

Keywords: nanocomposite magnets, effective anisotropy, coercive force