

교환결합Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe나노복합체영구자석의 보자력물림새

려혁수, 장재식, 박학철

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《우리는 과학기술을 발전시켜도 남들이 걸은 길을 따라만 갈것이 아니라 우리 과학자들의 애국충정과 우리 인민의 슬기와 민족적자존심을 폭발시켜 년대와 년대를 뛰어넘으며 비약해나가야 합니다.》(《조선로동당 제7차대회에서 한 중앙위원회사업총화보고》 단행본 39페이지)

보자력물림새를 해석하는것은 영구자석을 비롯한 강자성재료들의 자기적본성을 리해하고 자기적성질을 개선하는데서 중요한 문제로 된다. 희토류나노결정영구자석의 보자력은 그 미시결정구조 특히 립자경계상에도 관계된다. 특히 Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe를 비롯한 교환결합경자성-연자성상나노복합체영구자석의 자기적성질에 대한 실험적연구들[1]과 미시자기학적연구들[2, 3]에서는 연자성상의 립도와 체적분률이 그 보자력에 본질적인 영향을 미친다고 해석하였다. 또한 교환결합경자성-연자성상나노복합체영구자석의 각이한 보자력물림새[4, 5]들도 제기되였다.

우리는 교환결합Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe나노복합체영구자석에서 자벽에네르기함수를 모형화하고 그것의 1계도함수로부터 보자력과 미시구조의존성을 고찰하였다.

1. 미시자기학적모형화

경자성상과 연자성상의 교환결합효과를 반영하여 자벽에네르기모형함수를 계단함수가 아닌 상경계에서의 거리에 따르는 1계미분가능한 함수로 모형화하였다. 이 자벽에네르기모형함수는 경자성상과 연자성상의 립자경계에서 급격한 변화를 나타낸다.

$$\gamma(x) = \begin{cases} \gamma_w^s + k(\gamma_0 - \gamma_w^s) \left[\exp\left(\frac{x + \delta_w^s}{\delta_w^s}\right)^2 - 1 \right] & (-\delta_w^s \leq x < 0) \\ \gamma_0 & (x = 0) \\ \gamma_w^h + k(\gamma_0 - \gamma_w^h) \left[\exp\left(\frac{-x + \delta_w^h}{\delta_w^h}\right)^2 - 1 \right] & (0 < x \leq \delta_w^h) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 γ_0 은 $x=0$ 일 때 즉 상경계에서의 자벽에네르기모형함수값이며 $k=1/(e-1)$ 은 $x \rightarrow +0$ 과 $x \rightarrow -0$ 의 경우에 $\gamma(x)$ 가 동시에 γ_0 으로 수렴하도록 설정한 결수, γ_w^s 와 γ_w^h , δ_w^s 와 δ_w^h 는 각각 연자성상과 경자성상의 자벽에네르기와 자벽두께로서 교환상수 A 와 이방성상수 K_1 로부터 다음과 같이 평가된다.

$$\gamma_w^i = 4(A^i K_1^i)^{1/2} \quad (i = s, h) \quad (2)$$

$$\delta_w^i = \pi(A^i/K_1^i)^{1/2} \quad (i = s, h) \quad (3)$$

γ_0 은 $x=0$ 에서 1계도함수 $\frac{d\gamma(x)}{dx}$ 가 연속이라는 가정 $\left. \frac{d\gamma(x)}{dx} \right|_{x=-0} = \left. \frac{d\gamma(x)}{dx} \right|_{x=+0}$ 으로부터

평가할수 있다.

모형 함수 $\gamma(x)$ 의 1계도함수는 다음과 같다.

$$\frac{d\gamma(x)}{dx} = \begin{cases} \frac{2k}{\delta_w^s} (\gamma_0 - \gamma_w^s) \left(\frac{x + \delta_w^s}{\delta_w^s} \right) \exp \left(\frac{x + \delta_w^s}{\delta_w^s} \right)^2 & (-\delta_w^s \leq x \leq 0) \\ -\frac{2k}{\delta_w^h} (\gamma_0 - \gamma_w^h) \left(\frac{-x + \delta_w^h}{\delta_w^h} \right) \exp \left(\frac{-x + \delta_w^h}{\delta_w^h} \right)^2 & (0 \leq x \leq \delta_w^h) \end{cases} \quad (4)$$

Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe상경계 근방에서 자벽에네르기모형 함수 $\gamma(x)$ 의 1계도함수를 그림 1에 보여주었다.

역자화과정에 연자성구역의 중심부에서 쉽게 핵형성되는 역자구의 자벽은 전과과정에 $\frac{d\gamma(x)}{dx}$ 에 비례하는 저항힘을 극복하여야 한다.

역자구의 자벽이 경자성상과 연자성상의 경계에 이를 때 저항힘은 최대가 되며 그 최대저항힘이 바로 자벽고정힘으로서 직접적으로 보자력으로 변환될수 있다.

식 (1)과 (4)는 모두 연자성상과 경자성상의 가능한 전체 자벽구역 $-\delta_w^s \leq x \leq \delta_w^h$ 에서 정의되었다. 그러나 어떤 상결정립도가 그 자벽크기보다 작을 때에는 식 (1)과 (4)의 정의구역이 변화되어야 한다.

연자성상과 경자성상의 결정립도를 각각 d^s , d^h 라고 하면 변수 $w^i = \min(d^i, \delta_w^i)$ ($i = s, h$) 를 δ_w^i 에 대입하여 식 (1)과 (4)를 각각 다음과 같이 일반화할수 있다.

$$\gamma(x) = \begin{cases} \gamma_w^s + k(\gamma_0 - \gamma_w^s) \left[\exp \left(\frac{x + w^s}{w^s} \right)^2 - 1 \right] & (-w^s \leq x < 0) \\ \gamma_0 & (x = 0) \\ \gamma_w^h + k(\gamma_0 - \gamma_w^h) \left[\exp \left(\frac{-x + w^h}{w^h} \right)^2 - 1 \right] & (0 < x \leq w^h) \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{d\gamma(x)}{dx} = \begin{cases} \frac{2k}{w^s} (\gamma_0 - \gamma_w^s) \left(\frac{x + w^s}{w^s} \right) \exp \left(\frac{x + w^s}{w^s} \right)^2 & (-w^s \leq x \leq 0) \\ -\frac{2k}{w^h} (\gamma_0 - \gamma_w^h) \left(\frac{-x + w^h}{w^h} \right) \exp \left(\frac{-x + w^h}{w^h} \right)^2 & (0 \leq x \leq w^h) \end{cases} \quad (6)$$

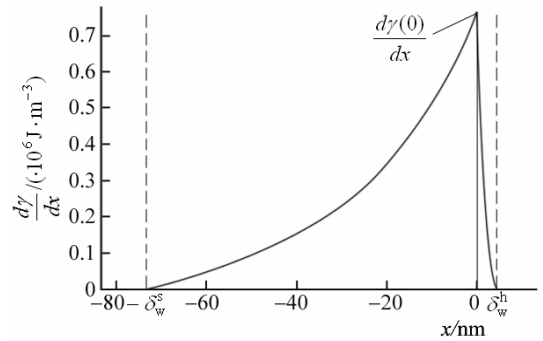


그림 1. Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe상경계 근방에서 자벽에네르기모형 함수 $\gamma(x)$ 의 1계도함수

보자력은 역자구의 자벽고정힘을 극복하기 위한 외부역자기마당에 해당하며 따라서 다음과 같이 표시된다.

$$H_c = \frac{1}{2M_s} \frac{d\gamma(0)}{dx} \quad (7)$$

여기서 M_s 는 교환결합나노복합체의 유효포화자화세기로서 매 상의 체적분률에 따르는 무게평균으로 표시된다.

$$M_s = M_s^s f^s + M_s^h f^h \quad (8)$$

여기서 M_s^s 와 M_s^h 는 각각 연자성상과 경자성상의 포화자화세기, f^s 와 f^h 는 각각 나노복합체속에서 연자성상과 경자성상의 체적분률이다.

이와 같이 보자력은 경자성상과 연자성상의 국부적인 크기와 체적분률 등 미시구조에 관계된다.

2. Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe다층박막계의 보자력계산

경자성상과 연자성상층의 두께를 각각 d^h 와 d^s 라고 하면 나노복합체에서 경자성상과 연자성상의 체적분률은 각각 다음과 같이 표시된다.

$$f^h = \frac{d^h}{d^h + d^s}, f^s = \frac{d^s}{d^h + d^s} \quad (9)$$

이로부터 보자력은 다음과 같다.

$$H_c = \frac{e}{e-1} \frac{d^h + d^s}{(M_s^h d^h + M_s^s d^s) w^s} (\gamma_0 - \gamma_w^s) \quad (10)$$

이와 같이 교환결합경자성-연자성상나노복합다층박막계의 보자력은 경자성상과 연자성상층의 두께에 의존한다.

경자성Nd₂Fe₁₄B상의 두께가 $d^h = 20\text{nm}$ 인 경우 연자성 α -Fe상두께에 따르는 교환결합Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe나노복합다층박막계의 보자력을 평가하였다.(그림 2)

그림 2에서 보는바와 같이 Nd₂Fe₁₄B상의 두께가 고정된 속박조건에서 α -Fe상의 두께가 증가할 때 보자력은 감소한다.

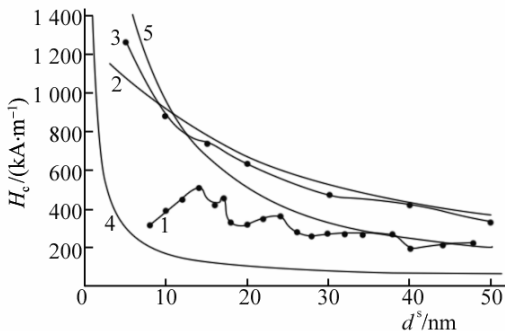


그림 2. Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe나노복합다층박막계의 연자성 α -Fe상두께에 따르는 보자력

1-실험결과[1], 2-유효자기이방성모의[3], 3-유효요소모의[3], 4-자체고정모의[5], 5-모형합수

이러한 보자력의 연자성층두께의존성은 교환결합Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe나노복합다층박막계에 대한 자체고정모의결과, 유효자기이방성모의결과 및 미시자기학적유효요소모의결과와 부합된다.

일반적으로 Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe자석을 포함한 교환결합경자성-연자성나노복합체영구자석의 보자력물림새는 역자구의 핵형성과 자벽고정힘의 협동효과로 볼수 있다. 역자화과정에 약한 역자기마당속에서는 자기이방성이 약한 연자성상구역에서 먼저 역자구의 핵이 형성된다.

역자기마당의 세기가 강화됨에 따라 핵형성된 역자구의 자벽이 경자성상으로부터의 저항힘을 극복하면서 상경계쪽으로 이동한다. 즉 역자구의 확장이 일어난다. 역자구자벽 이동에 대한 저항힘은 상경계로 다가갈수록 증가하며 상경계에서 최대값에 이른다. 따라서 이 최대저항힘이 자벽이동에 대한 고정힘으로 되고 그것이 직접적으로 보자력을 결정짓는다.

맺는 말

교환결합경자성-연자성나노복합체영구자석에서 자벽에에너지모형함수의 1계도함수에 토대하여 보자력을 평가하는 새로운 한가지 보자력물림새를 제시하고 그 모형을 리용하여 Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe나노복합다층박막계의 보자력과 미시구조의존성을 평가하고 해석하였다.

참고 문헌

- [1] S. M. Parhofer et al.; IEEE Trans. Magn., 32, 4437, 1996.
- [2] J. Fidler et al.; J. Magn. Magn. Mater., 203, 28, 1999.
- [3] H. S. Ryo et al.; J. Magn. Magn. Mater., 426, 328, 2017.
- [4] C. Ji et al.; Sol. Stat. Commun., 111, 113, 1999.
- [5] G. P. Zha et al.; J. Appl. Phys., 101, 09K102, 2007.

주체107(2018)년 12월 5일 원고접수

On Coercivity Mechanism of Exchange Coupled Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe Nanocomposite Permanent Magnets

Ryo Hyok Su, Jang Jae Sik and Pak Hak Chol

We suggested a coercivity mechanism for exchange coupled soft/hard nanocomposite permanent magnets to estimate the coercivity from maximum domain wall energy gradient at the soft/hard phase grain boundary. We estimated the relation between the coercivity and α -Fe layer thickness in exchange coupled Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe nanocomposite multilayer systems.

Key words: coercivity mechanism, exchange coupled permanent magnets, Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe magnets, domain wall energy