

희토류 대체 영구자석의 연구동향: 교환 스프링자석

홍지상*

부경대학교 물리학과, 부산시 남구 대연3동 608-737

(2012년 8월 28일 받음, 2012년 9월 25일 최종수정본 받음, 2012년 9월 26일 게재확정)

영구자석은 산업 전반에 광범위 하게 쓰이고 있는 핵심 부품중의 하나이다. 이러한 영구자석을 만드는데 필수적으로 이용되고 있는 원소가 바로 희토류 계열의 원소들이다. 이미 널리 알려져 있는 것처럼 희토류 생산의 대부분은 중국이 차지하고 있고, 이러한 원인에 의해 전 세계적으로 희토류 원소의 생산 및 공급 불균형에 의해 발생하는 많은 문제점들을 인식하고 있다. 이를 해결하기 위해 희토류 기반 영구자석을 대체하기 위한 다양한 방안들이 논의 되고 있으나 현재까지 명확하게 희토류 대체 영구자석이 가능한 물질 혹은 구조에 대한 제시는 없다. 본 논문에서는 여러 가지 가능성 중에 교환스프링 자석구조에 대해서 논의하고자 한다.

주제어 : 영구자석, 교환스프링, 희토류 대체

I. 서 론

영구자석은 대부분의 전기 전자 제품의 핵심 부품으로 사용되고 있다. 특히, 영상, 음향기기, 가전기기, 자동차 등에 이용되며, 전기 전자제품이 정밀화, 다기능화, 자동화, 소형화, 경량화, 박막형화, 고급화 되어감에 따라 영구자석의 중요성은 커지고 있고, 고부가 가치를 창출할 수 있는 중요한 기능성 부품이라 할 수 있다. 영구자석의 대표적인 응용 부품은 중·소형 모터이다. 중·소형 모터에 사용되는 자성재료는 모터구조가 소형 경량 박막형화 되어감에 따라 가공이 용이하고 복잡한 형상으로 성형이 가능한 방향으로 진행되고 있다. 또한, 모터의 소형화에 가장 중요한 요소는 자성 물질의 높은 에너지 밀도이다. 이를 이용한 여러 응용분야 중에서 대표적으로 하이브리드 자동차 산업을 들 수 있다. 오랜 기간 동안 자동차 산업은 고부가가치 산업으로 인식 되어 왔다. 하이브리드 자동차는 가솔린 기관과 달리 중·소형 모터를 보조 또는 주 동력원으로 사용한다. 이때 중·소형 모터에서 영구자석은 가장 중요한 역할을 한다. 이러한 이유로, 자동차 산업에 선도적 역할을 하고 있는 미국과 일본에서는 오래전 부터 영구자석에 관한 활발한 연구가 진행 중이다. 앞으로도 이러한 자동차 산업은 계속적으로 발전을 할 것이라 예상되며 자동차 산업의 미래를 책임 질 기술은 하이브리드 기술이 될 것이라고 예견 할 수 있다. 또한 점점 심각한 문제로 떠오르고 있는 석유에너지원의 고갈에 대한 대처방안으로 풍력 발전등과 같은 신재생 에너지분야에 대한 연구가 점점 활발해지고 있는데 이 분야 역시 고성능 영구자석 개발이 필수적

인 핵심요소로 자리매김하고 있다.

지금까지 알려져 있는 영구자석의 종류를 구분하면 크게 다음과 같이 3 가지로 분류할 수 있다.

- 알니코자석(철족합금자석): 제1의자석이라고도 불리며 이 합금은 온도특성이 우수하여 고급전자기기와 정밀계측기에 적합하지만, 재질이 단단하고 취약하므로 소성가공이 어렵다. 또한, 이합금은 고가의 Co가 다량 함유되어 가격이 높고 최근 전자부품의 소형경량화 경향에 대해 보자력이 작아서 사용하기 어렵다(자석이 작아지면 내부 반자장이 커져 자화의 안정성이 약화되므로 이를 막기 위해 보자력이 커야한다).

- 제2자석은 페라이트자석이고 이 경우 값이 싸고 사용 환경에 대한 자기적 화학적 안정성이 우수하므로 전 세계에서 최대생산품목이지만 낮은 온도에서의 자력의 감소 및 사용조건에 따라 자속밀도가 감소하는 현상이 일어날 수 있다. 따라서 사용온도 하한을 정해야하고, 또한 세라믹물질이므로 그 특성상 기계적강도가 약하여 가공성이 뛰어나지 않아 정밀기능재료로서 부적합하다. 그리고 잔류자속밀도가 5 kG을 넘지 못하는 한계성 때문에 소형화에 필요한 자성재료로서는 부족한 면이 있다.

- 제3의 자석은 바로 희토류 자석이다. 희토류 자석은 희토류금속과 전이금속 과의 금속간 화합물을 이용한 영구자석이다. 희토류 영구자석은 앞의 두 영구자석에 비해 최대 자기에너지적(magnetic energy product; $(BH)_{max}$)이 가장 크며 가정용 산업용에 관계없이 전기적 에너지와 기계적 에너지의 상화변환장치 이온빔과 전자빔의 편향장치 자석의 흡인반발력을 이용한 기계 등 전자기기의 경량화 소형화 고성능화를 위해 큰 역할을 하고있고 현대문명에 없어서는 안 될 필수요소이다. 희토류 기반 영구자석의 대표적인 예로 Sm-Co, Nd-

*Tel: (051) 629-5573, E-mail: hongj@pknu.ac.kr

Fe-B 계열의 자석을 들 수 있다.

II. 에너지적과 보자력

자성물질을 이용하여 영구자석 소자로서 이용하기 위해서 포화자기화, 자기이방성, 큐리온도등 자성물질이 가지는 본질적 성질과 에너지적, 보자력, 열적 안정성등 비본질적 요소들을 전부 고려해야 된다. 이들 중에서 가장 중요하게 다루어지는 물리량이 바로 에너지적과 보자력이다. 자화가 되지 않은 물질에 외부자기장(H)이 가해지면 일반적인 처음에 자화가 되지않은 물질은 Fig. 1에 나타난 것처럼 자기장이 가해짐에 따라서 자화(M)가 변하게 되는데 이러한 곡선을 자기이력곡선이라고 한다. 좋은 영구자석을 개발하기 위해서는 물질이 가지는 자기이력곡선의 특징을 파악하고 에너지적과 보자력이 실제 소자응용을 위한 조건들이 만족되어지는가를 조사해야 한다. 영구자석개발에 있어 가장 중요한 2 가지 요소인 에너지적과 보자력값에 대한 정보는 위 Fig. 1에서와 같은 자기이력곡선을 통해 얻어질 수 있는데, 자성물질에서 나타나는 이러한 자기이력곡선은 물질의 종류, 온도 등에 의해서 다양

한 형태로 나타나게 된다. 자기이력곡선을 통해 자성물질이 가지는 보자력(H_c)과 에너지적에 대한 논의를 간단히 하면 다음과 같다. 우선, 자화가 되지 않은 물질에 외부 자기장을 가하면 Fig. 1에 보이는것처럼 물질이 가지는 자화가 증가하게 되고 일정시점에 포화자기화값을 가지게 된다. 이때 자기장을 점점 약하게 하여 외부자기장이 0이 되더라도 잔류자화가 남게 되는데 이러한 잔류 자화를 없애는데 필요한 물리량을 보자력이라고 한다. 보자력은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있는데

$$\mu_0 H_c = \frac{2K_1}{M_s} \alpha - N_{eff} \mu_0 M_s \quad (1)$$

여기서 K_1 은 제일자기이방성 상수이고, M_s 는 포화자기화 (saturation magnetization), α 와 N_{eff} 는 미세구조 인자 (microstructure parameters) 라고 불리운다. 미세구조 인자는 자성물질의 기하학적 상태 혹은 도메인의 형성등에 의해 달라지게 된다. 다음으로, 에너지적에 대한 간단한 논의를 하면 다음과 같다. 에너지적은 위에서 보이는 M-H 자기이력고선이 주어졌을때 제2 사분면의 M-H 곡선내에서 나타나는 가장 넓은 면적의 직사각형을 그리게 되면 이를 최대 자기에너지적(BH)_{max}이라고 한다. 보자력과 에너지적이 영구자석을 이용한 소자응용관점에서 중요한 이유는 에너지적이 클수록 작은 크기의 영구자석으로도 높은 효율을 낼 수가 있고, 보자력이 클수록 높은 온도에서도 영구자석의 성질을 유지시켜줄 수 있다. 따라서, 영구자석에 대한 연구는 이 두 가지 값이 큰 물질을 찾아내는 것에 관한 내용이라고 할 수 있다. 논의를 간단히하기 위해 자기이력곡선이 이상적인 경우로 가정을 한다면, 즉 포화자기화와 남은자화(remanent magnetization: M_r)가 동일하게 된다. 이러한 조건하에 최대 에너지적의 표현을 보면 다음과 같이 두 가지 경우로 구분을 할 수 있다[1]. 탄소강(carbon steel) 또는 알니코(Alnico)와 같이 보자력이 작은 물질은 일반적으로 $H_c < (1/2)M_s$ 의 관계를 가지게 되고 이 때 에너지적은

$$(BH)_{max} = \frac{1}{2} \mu_0 M_s H_c \quad (2)$$

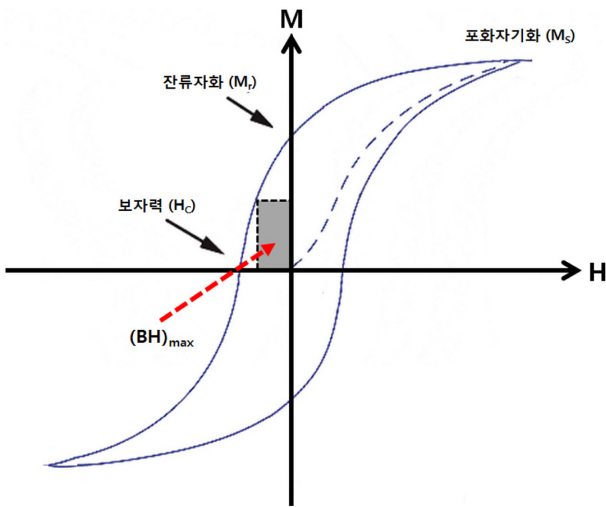


Fig. 1. (Color online) Schematic illustration of hysteresis curve and energy product.

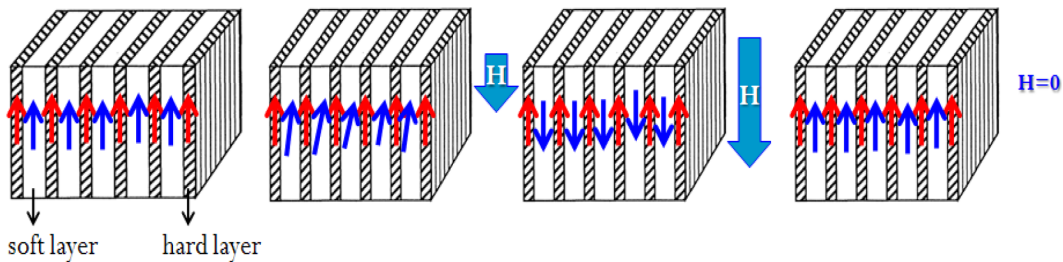


Fig. 2. (Color online) Schematic illustration of exchange spring magnet.

으로 나타낼 수 있다. 한편 FePt 등과 같이 보자력이 큰 경자석 물질의 경우는 $H_c < (1/2)M_s$ 을 만족하며 이 경우 에너지적은

$$(BH)_{max} = \frac{1}{2}\mu_0 M_s^2 \quad (3)$$

같이 나타낼 수 있다. 근본적으로 에너지적이 큰 영구자석 물질을 만들기 위해서는 영구자석에 이용되는 원소들이 가지는 자기모멘트가 큰 물질이 필요한데 3d 전이금속원소가 이에 해당한다고 할 수 있으며, 높은 보자력값을 유지시켜주기 위해서는 미세구조인자의 영향을 줄이고 자기이방성 에너지가 큰 물질을 개발하는 것이다. 하지만 위의 관계식(1)에서 보듯이 미세구조 인자에 변화가 없다면 포화자기화가 커질수록 보자력은 점점 작아지고 있다. 이렇듯이 소자응용을 위한 영구자석은 서로 반대의 경향을 주는 물리적 성질을 조절하여 어떻게 최적화 시키는가가 매우 중요한 문제라고 할 수 있다. 에너지적과 보자력에 대한 현재까지 연구결과를 보면 많은 분야에서 쓰이는 영구자석의 종류는 다양하나 한 가지 공통적인 현상은 바로 높은 포화자기화를 가지는 3d 전이금속 물질에 큰 자기이방성 에너지를 보이는 Nd 혹은 Sm, Dy 등 희토류 원소를 함께 사용하고 있다는 점이다. 하지만 희토류원소의 자원분포 불균형에 의해서 여러 가지 문제가 발생하고 있고 전 세계적으로 이에 대한 대처방안을 다각적으로 모색하고 있다. 하지만 현재까지 비슷한 성능을 지니면서 기존의 희토류기반 영구자석을 대체할 수 있는 물질을 개발하지는 못한 실정이다.

III. 교환스프링 자석

영구자석의 기본구조는 높은 자기이방성을 가지는 희토류와 높은 포화자기화를 가지는 3d 원소가 함께있는 물질들에 대한 연구라고 할 수 있다. 하지만 앞에서 언급한 것처럼 희토류원소가 가지는 여러 가지 문제들로 인해 희토류 저감 또는 대체영구자석이 가능한가에 관한 문제는 앞으로 굉장히 중요한 주제로 떠오를것이 자명하다. 희토류 저감이나 대체 영구자석을 합성하기 위한 구조로서 가장 많은 관심을 끌고 있는 것 중의 하나가 바로 교환스프링자석이다. 이러한 구조는 E.F. Kneller와 Hawing에 의해 이미 오래전에 제시되었는데 [2], 기본적인 개념은 경자성 물질과 연자성 물질이 서로 결합을 하여 나노구조를 형성하게 되면 높은 보자력이 유지가 됨과 동시에 포화자화(M_s)의 값의 증가가 일어날 것이라고 제안하였고 이러한 구조를 교환스프링자석(exchange spring magne)이라고 처음으로 정의했다.

교환 스프링자석의 도식적 구조가 Fig. 2에 나타나 있다.

교환스프링자석은 입자간의 상호작용이 있을 때에만 그 성질이 나타나며, 이러한 상호작용이 존재하면, 경자성 물질의 자화에(빨간색으로 표시) 의해 연자성 물질의 자화가(파란색으로 표시) 고정되어진다. 그 결과 연자성 물질의 자화는 작은 외부자기장에서는 반전하지 않는다. 반면 강한 자기장(H)를 인가하면, 연자성물질의 자화는 반전하지만, 계속 경자성 물질의 자화는 방향이 바뀌지 않는다. 이제 외부자기장을 0으로 돌리면 자경자성물질의 자화에 의해 연자성물질의 자장은 원래의 방향을 회복하게 된다. 이처럼 자화가 스프링처럼 움직여서 교환 스프링자석이라고 한다.

이와 같이 교환 스프링자석의 특징은 자석 내 다량의 연자성 물질이 존재하지만 경자성물질이 연자성의 자화가 반전하는 것을 방해하여, 마치 연자성 물질이 존재하지 않는 것처럼 행동하게 된다. 이렇게 되면, 미량의 경자성 물질을 사용하고도 영구자석의 특성을 가질 수 있고, 또한 더 나은 영구자석을 만들 수 있는 가능성을 가지고 있다. 이로 인해, 많은 연구가 진행되어져 왔고, 연구자들의 주요한 쟁점은 어떻게 경자성과 연자성의 형태나 구조 등을 변화시켜서 잔류자화 값, 보자력, 자기에너지적값 을 증대시켜 보다 나은 영구자석을 개발에 초점을 두고 있다.

IV. 교환스프링 자석의 연구동향

교환스프링자석은 이미 연구에 한계에 닿은 희토류 영구자석의 특성을 증대시킬 수 있는 중요한 구조로서 인식되고 있고, 이러한 교환스프링구조에서 희토류물질을 적게 사용해도 희토류 영구자석의 특성을 가질 수 있으며, 더 큰 값의 자기에너지적을 가지는 물질을 개발할 수 있는 방법 중 하나가 될 것이라 예상을 하고 있다. Coey 등도 이러한 교환스프링자석이 일반적으로 사용되는 희토류의 에너지적보다 약 3배 이상 큰 값을 가질 수 있다는 계산결과를 제시하였고[1], Coehoorn에 의하면 이러한 교환스프링자석은 약 4%도 되지 않는 희토류의 사용만으로도 영구자석의 효율을 가져올 수 있음을 실험적으로 확인했다[3]. 이처럼 Nd₂Fe₁₄B 또는 Sm₂Fe₁₇N₃와 Fe로 이루어진 두겹층(bilayer) 으로 합성된 나노물질에서 잔류자화의 향상이나 에너지적의 향상을 가지고 온다는 연구결과가 상당히 많이 보고되었다. 또한 SmCo₅ 위에 Co 또는 Fe bilayer의 형성이 있을 때에도 영구자석의 특성을 보이고, 또한 NiCo/NiFe, SmCo/NiFe, SmCo/CoZr 등의 다양한 연구결과를 교환 스프링자석이 영구자석으로서의 가능성을 보여주었었고[4] 결국 희토류 저감 영구자석의 가능성을 교환스프링 자석 구조에서 찾고자 하는 방향이라고 볼 수 있다.

한편, 경자석-연자석-경자석 형태의 세겹층(trilayer) 구조의

연구 또한 진행되어져 있다. 예를 들어 $Nd_2Fe_{14}B/Fe/Nd_2Fe_{14}B$ 교환스프링자석의 경우, $Nd_2Fe_{14}B/Fe$ 두겹층 교환스프링자석일 때 Fe가 10 nm의 일 때 가장 큰 자기에너지적 85 MGOe(이는 희토류 영구자석의 $Nd_2Fe_{14}B$ 보다 큰 값이다) 확인되어져 있고[5], 이를 세겹층으로 형성하여도 역시 유사한 에너지적의 값을 나타내게 된다것이 보고되었다[6]. 이처럼 교환스프링 자석구조에서 기존의 영구자석에 사용되는 희토류 원소의 양보다 상대적으로 적은 희토류 금속만으로도 우수한 영구자석을 가질 수 있는 가능성이 충분히 보여지고 있다. 하지만 위의 예에서 제시된 구조들을 쳐다보면 아직도 희토류금속을 사용해야만 하는 한계점을 가진다. 또한 이미 희토류 자석의 경우 에너지적과 보자력값이 이론적 최대치에 거의 도달을 한 상태이다. 이처럼 교환스프링 자석구조를 이용하여 희토류 저감 영구자석에 관한 연구방향은 단기적인 관점에서 희토류 문제를 해결하는데 도움을 줄 수는 있으나, 이미 언급한 것처럼 희토류 원소가 역시 필요한 상황이다. 결국 희토류 저감 대체 물질은 근본적인 해결책이 되기에는 미흡하다고 여겨진다. 이런 문제점을 최종적으로 해결하는 방안은 희토류가 전혀 없는 물질을 개발하고 이 물질이 영구자석으로 사용가능한 에너지적 혹은 보자력을 가질 수 있는 새로운 물질을 합성하는 방향으로 연구가 진행이 되어야 할 것이다.

V. 희토류가 없는 교환스프링 자석

이러한 문제점을 인식하고 새롭게 접근하기 위해, 희토류가 없는 전이금속으로 이뤄진 구조로서 대표적인 경자석 물질인 FePt를 사용해서 FePt/Fe의 교환영구자석의 가능성에 관한 연구 또한 이뤄지고 있다. FePt의 경우 자기이방성 에너지값이 $K_u \approx 7 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ 로 매우 큰 값을 가지고 있고[7], 보자력, 자기에너지적의 값이 크다. 따라서 대표적인 경자석 물질로 인식되고 있고 이러한 특성으로 고밀도 자기정보 저장매체에 적용되어 사용되어지고 있다. 또한 교환스프링자석의 재료로

서 가능성을 지니고 있어, FePt를 경자석으로 사용하고 Fe를 연자석으로 사용하여 나노합성물질을 만드는 연구가 이뤄져 있다. 그 결과 Fig. 3에 보이는 것처럼 이론적 연구에서 Fe/FePt의 경우 에너지적값이 90 MGOe로 큰 값을 가지고 있고 [8], 실험적으로는 약 20 MGOe의 값이 확인되었다[9]. 이 차이는 Fe와 FePt의 두께 차이로 이뤄지는 값이라고 예상된다.

한편, Fig. 3(c)처럼 Fe/FePt의 hard-soft heterostructure에서 Fe의 두께에 따라 어떠한 spin structure가 보이는지에 관한 연구를 진행하였고 spin-structure가 변화함을 nuclear-resonant scattering of synchrotron radiation(NRS)을 통해 확인했다[10]. FePt에 관한 연구는 Fe_3Pt 가 hard magnet 재료로 사용되어 Fig. 4(a)처럼 FePt- Fe_3Pt 나노합성구조가 된 경우 그 에너지적이 20 MGOe으로 나타났다고 보고되었다 [11]. Fig. 4(b)에서는 FePt/ Fe_3Pt 가 nanocomposit이 형성되었을 때의 계산이고, 그 또한, 그림 실험과 유사한 에너지적이 확인 되었을 뿐 아니라 남은자화(M_r)의 값이 크고, 보자력 또한 큰 값을 보여주고 있다. 이는 FePt/ Fe_3Pt 가 영구자석재료로서 충분한 연구가치가 있음을 보여주고 있다고 할 수 있겠다.

교환스프링 자석구조는 20여 년 전에 이미 제시되었고 많은 실험연구가 진행이 되었고 어느정도 성과를 얻었다. 하지만 최종적인 목표는 희토류가 없는 영구자석의 개발이 될 것이다. 이와 관련하여 현재까지 많은 실험연구들이 수행되었으나 만족할 만한 목표에 도달하지는 못하고 있는 실정이다. 특히 교환스프링 구조는 기존의 연구성과에서 그 가능성을 어느 정도 제시하고 있으나 놀라운 것은 희토류 원소가 없는 구조에 대한 체계적인 연구는 현재까지도 실질적으로 매우 미미한 상황이다. 이러한 이유는 지난 20여 년간의 많은 실험 연구에도 불구하고 아직까지 확실하게 희토류 대체 가능성이 있는 새로운 물질 혹은 구조를 발견하지 못하고 있는데 기인한다고 할 수 있다. 따라서 희토류 대체 영구자석분야는 실험연구를 먼저 수행하는 것 보다는 이론적인 연구성과를 바탕으로 그 방향성이 먼저 제시가 된 후 이를 토대로 실험을

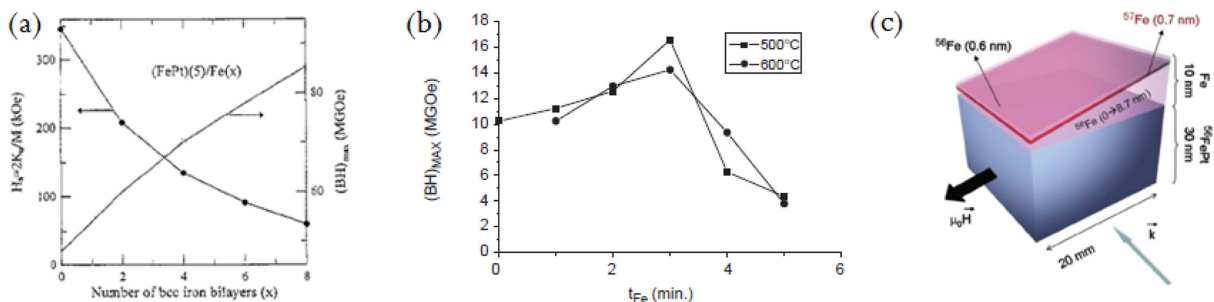


Fig. 3. (Color online) (a) energy product of Fe/FePt (theory) (b) energy product of Fe/FePt (experiment) (c) Experimental setup for thickness dependent study of Fe/FePt.

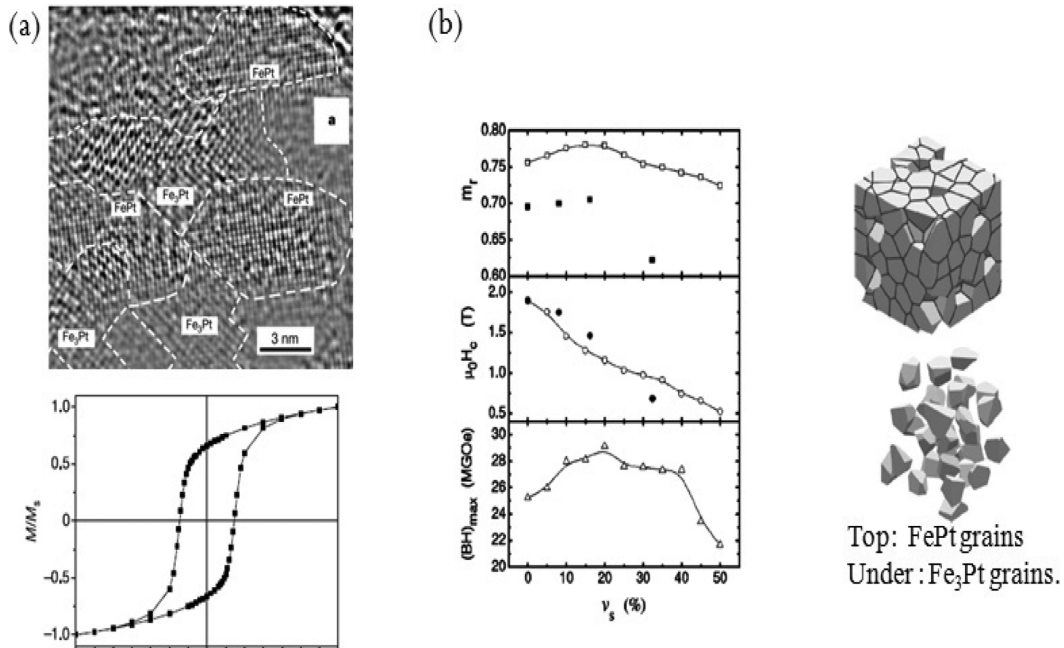


Fig. 4. (a) HRTEM image of FePt/Fe₃Pt (top) and hysteresis loop (bottom) (b) coercivity, energy product, and remanent magnetization of FePt/Fe₃Pt.

통해 물질 합성 및 측정을 하고 최종적으로 이론결과와 비교를 하는 연구체계가 합리적이라고 보여진다. 특히 새로운 물질구조의 제안 및 여기서 구현되는 물성에 대한 연구는 매개 변수를 도입한 모델계산에 의한 방법보다는 필수적으로 양자역학 기반인 제일원리 계산을 요구한다.

희토류가 없는 교환스프링구조에 대한 몇몇 연구가 진행이 되었으나 제일원리계산 방법을 이용한 체계적인 연구는 현재까지도 초기단계에 있다고 할 것이다. 이에 대한 연구방향의 한 예로서, 우선 잘 알려진 경자석 물질인 FePt 혹은 CoPt를 기반으로 FeCo와 혼합된 구조를 고려할 수 있을 것이다 [13, 14]. 이러한 물질들을 이용한 예로서 Fig. 5에서 나타낸 것과 같이 FeCo/FePt 두겹층, FeCo/FePt/FeCo 세겹층, 혹은 다층박막에 대해서 각각 연자석 및 경자석의 두께(t_s , 및 t_H)

변화에 대한 연구를 통해 어떠한 경우에 보자력과 에너지적 이 최대가 되는가를 예측할 수 있을 것이고 이를 통해 최적화 구조를 얻을 수 있을 것이다. 이러한 연구가 성공적으로 진행이 된다면 FePt 또는 CoPt 기반 물질을 이용하여 희토류를 대체 할 수 있다는 점에서는 긍정적이다. 하지만 Pt 원소의 가격요소를 고려하면 최종적으로는 Pt 등과 같은 값이 비싼 희유원소들도 없는 물질 및 구조에 대한 연구가 반드시 필요하다.

VI. 결 론

본 논문에서는 산업의 핵심 부품으로 작용하고 있는 영구자석의 기본 종류 및 특징에 대한 논의를 하였다. 한편 점점 심각한 문제로 떠오르고 있는 희토류와 관련된 문제를 해결하기 위해 한 방법으로 제시된 교환스프링 구조에 대한 소개를 하였다. 교환스프링구조는 20년 전에 제시가 되었고 희토류 저감효과가 있다는 결과들이 발표되었다. 하지만 희토류 원소가 전혀 없는 교환스프링자석에 대한 연구는 아직까지도 체계적이고 연속적인 연구가 미미한 실정이다. 현재까지 진행되어온 연구동향 및 경험으로 판단하여 보건데 희토류 대체 영구자석개발에 대한 문제는 그 특성상 이론적인 연구가 필수적으로 선행이 되어야 할 것이다. 특히 제일원리계산을 바탕으로 새로운 구조 및 물성에 대한 제시를 하고 이를 이용하여 최종적으로 실험연구를 수행하는 체계로 가야 할 것이다.

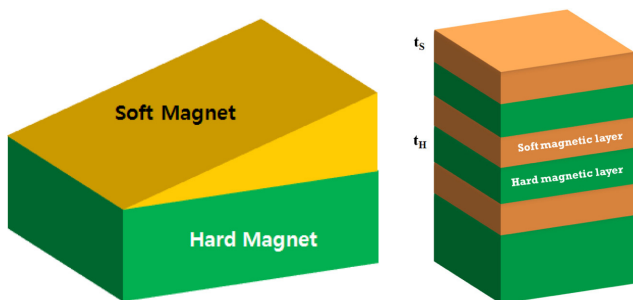


Fig. 5. (Color online) Schematic illustration of bilayer and multilayer exchange spring magnet.

감사의 글

이 논문은 2012년도 교육과학기술부의 재원으로 신기술융합형성장동력사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 No. 2012K001312).

참고문헌

- [1] R. Skomski and J. M. D. Coey, Phys. Rev. B **48**, 15812 (1993).
- [2] E. F. Kneller and R. Hawig, IEEE Trans. Magn. **27**, 3588 (1991).
- [3] R. Coehoorn, D. B. de Mooij, and C. De Waard, J. Magn. Magn. Mater. **80**, 101 (1989).
- [4] Eric E. Fullerton, J. S. Jiang, and S. D. Bader J. Magn. Magn. Mater. **200**, 392 (1999).
- [5] G. P. Zhao and X. L. Wang, Phys. Rev. B **74**, 012409 (2006).
- [6] Y. Deng, G. P. Zhao, L. Chen, H. W. Zhang, and X. L. Zhou, J. Magn. Magn. Mater. **323**, 535 (2011).
- [7] S. W. Yung, Y. H. Chang, T. J. Lin, and M. P. Hung, J. Magn. Mang. Mater. **116**, 411 (1992).
- [8] R. F. Sabiryanov and S. S. Jaswal, J. Magn. Magn. Mater. **177-181**, 989 (1998).
- [9] Yousong Gu, Dayong Zhang, Xiaoyuan Zhan, Zhen Ji, and Yue Zhang, J. Magn. Magn. Mater. **297**, 7 (2006).
- [10] B. Laenens, N. Planckaert, J. Demeter, M. Trekels C. L'abbe, C. Strohm, R. Ruffer, and K. Temst, Phys. Rev. B **82**, 104421 (2010).
- [11] H. Zeng, J. Li, J. P. Liu, Z. L. Wang, and S. Sun, Nature **420**, 395 (2002).
- [13] D. Kim and J. Hong, J. Magn. Magn. Mater. **321**, 1821 (2009).
- [14] D. Kim and J. Hong, Surf. Sci. **14**, 1960 (2012).

A Study for Replacement of Rare-earth Perment Magnets: Exchange Spring Magnets

Jisang Hong*

Department of Physics, Pukyong National University, Busan 608-737 Korea

(Received 28 August 2012, Received in final form 25 September 2012, Accepted 26 September 2012)

Permanent magnet is one of the most important parts in modern industry and the rare earth elements play an essential role for operation of permanent magnet. As is well known, the rare earth elements are mostly produced in China and the world is now facing serious problems owing to supply and demand imbalances. Many attempts have been performed to replace these rare-earth based permanent magnets by rare-earth free magnets, but they have not been successful so far. Regarding this issue, we discuss about an exchange spring magnet as a potential rare earth free permanent magnet structure.

Keywords : permanent magnet. exchange spring, rare-earth free