≪해설논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society, Volume 21, Number 6, December 2011 http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2011.21.6.225

나노 연/경자성 분말 재료를 이용한 Exchange-coupling 자석의 제조 기술

김종렬* · 조상근 · 전광원

한양대학교 재료공학과, 경기 안산시 상록구 한양대학로 55, 426-791

(2011년 11월 28일 받음, 2011년 12월 20일 최종수정본 받음, 2011년 12월 20일 게재확정)

자성 재료는 전기적 에너지와 기계적 에너지간 상호 전환 가능한 특성을 가지고 있기 때문에 발전 및 모터 분야 등에 널리 적용되고 있다. 그 중에서도 모터 분야의 효율성 향상을 위해서 외부의 자장 없이도 지속적으로 자성 특성을 나타내는 영구 자석은 그 활용도가 매우 높다. 특히, 영구 자석은 최대 자기적이 높은 희토류 자석이 개발된 후 이를 중심으로 개발 및 응용분야가 지속적으로 확대되었다. 그러나, 최근 모터의 용도가 확대되는 추이에 따라서 희토류 자석의 사용이 증대됨에 따라서 희토류 원자재 수급 문제에 봉착하여 이를 해결하기 위해 희토류 저감 및 대체 자석에 대한 연구 분야가 중요한 이슈가 되고 있다. 본 보고서에서는 현재 사용 되고 있는 영구 자석에 대해 설명하고 이를 대체할 수 있는 기술 중 가능성이 높은 방법으로써 exchange-coupling 현상을 이용한 영구 자석 개발 기술에 대해 기술하고자 한다.

주제어 : exchange-coupling, 영구자석, 희토류, nano-composite

I. 서 론

영구 자석은 자성 재료 중 경자성 재료로 분류 되며, 일반적으로 높은 보자력과 비교적 낮은 포화자화 값을 갖는 특성을 가지고 있다. 높은 보자력을 갖는 특성으로 인해 자화 이후 외부의 자장을 제거하여도 지속적인 자기적 특성을 나타내며, 이름과 같이 영구적인 자성 특성을 나타낸다. 이러한 외부로의 지속적인 자력선 발산으로 인하여 영구 자석은 전기적 에너지를 기계적 에너지로 효율적으로 바꿀 수 있으며, 이를 활용한 액츄에이터, 모터, 센서 등의 부품에 널리 적용되고 있다. 또한, 최근 에너지 절감 내지는 부품의 소형화 및 고성능화 차원에서 종전에 활용되었던 전자석 분야들이 영구자석으로 대체되는 추세를 보이고 있다.

최근 그린에너지, 탄소 배출 저감에 대한 인식 및 여기에 부응하는 부품 수요가 증가하고 있다. 특히, 하이브리드 자동차와 같은 친환경 차량 시장이 급속한 증가 추세에 있고, 화석연료를 통한 발전으로 생기는 환경오염 문제의 개선을 위한 풍력 발전 등의 지속 가능한 에너지 자원을 활용한 발전 분야도 급속히 시장 규모가 확대되고 있다. 이는 에너지 변환재료인 자성재료의 수요가 지속적으로 증가되고 있으며 향후 더욱 더 그 필요성이 증대될 것이라는 사실을 나타내고 있으며, 이 중에서도 전술한 바와 같이 고효율 영구자석의 수요는 매우 높을 것이라는 예측을 가능하게 해준다. Fig. 1, 2는 각각 친환경 자동차의 시장전망, 소형 모터 세계 산업 현황이다. Fig. 1은 내연기관을 이용한 자동차의 수요는 감소하는 추세를 나타내며, 친환경 자동차의 수요는 지속적으로 증가함을 보여주고 있다. Fig. 2의 소형 모터 분야 역시 지속적인 증가추세에 있음을 보여 주고 있다.

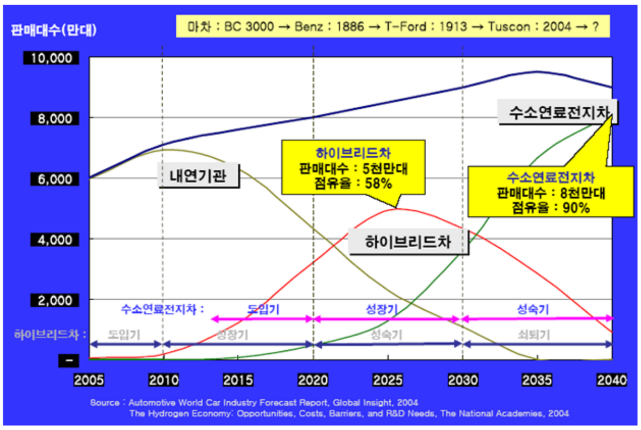

Fig. 1. (Color online) Global market outlook for eco-friendly vehicles.

이와 같은 수요의 증가에 따라 고효율을 갖는 영구 자석의 개발 필요성이 증대되고 있다. Fig. 3은 영구자석의 개발 현황을 보여준다[1]. 그림에서와 같이 영구자석은 고효율을 얻기 위해 지속적인 개발이 진행되어 왔으며 현재는 Sm, Nd 등의 원소를 사용한 희토류계 자석이 고효율 자석의 주류를 이루고 있다.

희토류계 자석의 경우 고효율을 가짐에도 불구하고 사용되는 원소의 희소성 및 자원 편재성으로 인해 기존의 Ferrite, AlNiCo 등의 자석에 비해 고가이며, 수급에 있어서도 원활치 않은 단점을 가지고 있다. 그리하여, 희토류계 자석을 대체하기 위한 새로운 자석 개발의 필요성이 대두되고 있으며, 이에 대한 이론적 개념은 1991년 E. F. Kneller에 의해 제시되었다[2]. 새롭게 제시된 신개념 자석은 Exchange-coupling이

*Tel: (031) 400-5228, E-mail: jina@hanyang.ac.kr

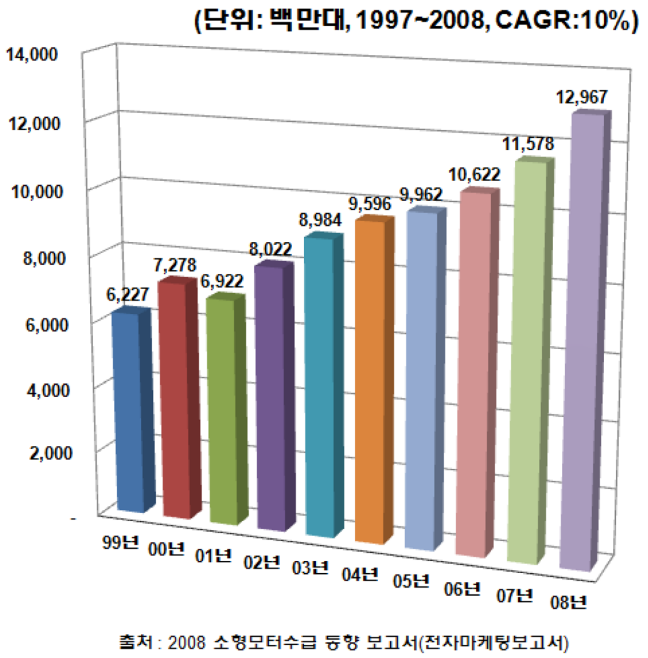

Fig. 2. (Color online) Global market outlook for small electric motors.

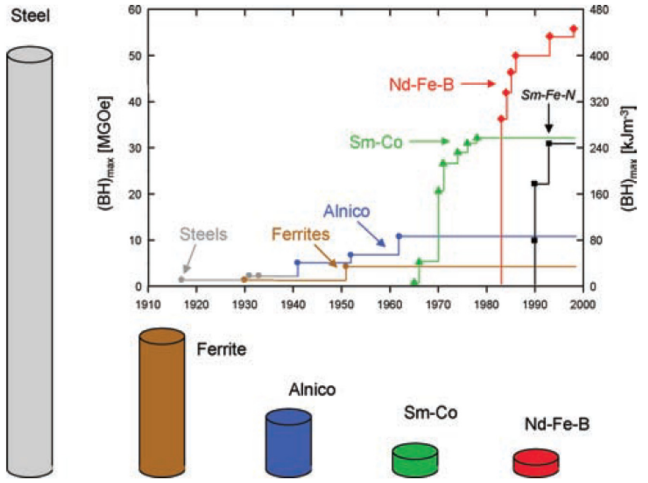

Fig. 3. (Color online) The development of permanent magnet.

라는 현상을 이용한 자석으로써, 나노크기의 연자성체와 경자성체의 복합체 내에서 연/경자성체 사이의 계면에서 일어나는 교환자기력을 이용한 자석이다. 이론적으로는 최대 자기에너지적이 120 MGOe에 달하며 현재 주로 사용되고 있는 희토류 자석에 비해서도 높은 효율을 나타내어 차세대 자석으로 주목받고 있으며, 많은 연구가 진행되고 있다[3-13].

본 보고서에서는 현재 진행되고 있는 영구 자석 분야의 연구 동향과 exchange-coupling 현상을 이용하여 실제 모터 분야에 사용할 수 있는 자석 개발의 가능성 및 방법론에 대한 고찰과 이를 활용한 현재까지의 연구 결과를 요약, 보고하고자 한다.

II. Exchange-coupling Effect

1. Exchange-coupling의 정의

Exchange-coupling 효과란 나노 구조를 갖는 연자성상과 경자성상 사이의 계면에서 교환자기력이 발생하여, 연자성상의 높은 포화 자화값과 경자성상의 큰 자기 이방성을 통한 고보자력을 얻어 높은 값의 최대 자기 에너지적을 얻게 되는 효과를 말한다. 이론적인 제안은 서술한 바와 같이 1991년 E. F. Kneller에 의해 제시되었다[2].

Fig. 4는 E.F. Kneller에 의해 제안된 exchange-coupling의 1차원 모델 모식도이다. 그림에서 k 상은 이방성이 큰 값을 갖는 재료인 경자성상 재료이며, m 상은 큰 자화값을 갖는 연자성상 재료를 나타낸다. Fig. 4(a)와 같이 외부 자장이 0인 경우 연자성상 및 경자성 상은 일방향으로 스핀의 정렬이 되어 있다. Fig. 4(b)에서와 같이 외부에서 스핀의 방향과 반대방향으로 자장이 인가하게 될 경우를 살펴보게 되면, 약자장이 걸린 경우 경자성상의 스핀정렬은 큰 영향을 받지 않으나 연자성상의 스핀들은 자장방향에 따라 정렬하려는 경향을 보인다. 그러나 경자성상과 인접해 있는 계면부분의 스핀은 경자성상의 영향으로 초기 정렬 상태를 유지한다. 이후 외부자장이 강해지게 되면 연자성상과 경자성상의 계면 부분을 제외한 연자성상 내의 스핀정렬은 모두 외부자장과 같은 방향

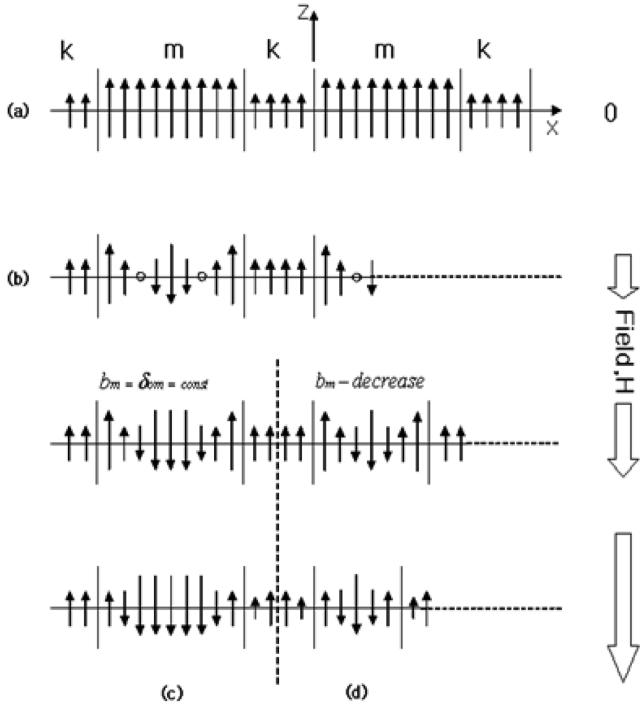

Fig. 4. 1-D schematic diagram of exchange-coupling effect.

으로 정렬이 일어난다. 이처럼 연자성상과 경자성상의 계면에서 경자성상의 영향으로 외부자장이 인가된 상황에서도 연자성상의 스핀정렬을 지속시키는 효과를 나타내는 것을 exchange-coupling 효과라 하며, 이로부터 연자성상과 경자성상이 혼합되어 있어도 큰 보자력이 유지될 수 있음을 알 수 있다. 또한, 자화값은 재료 고유의 특성으로 복합체내 연자성상의 비율에 의존하게 되기 때문에 외부자장과 독립적인 형태이다. 이를 통해 exchange-coupling 효과를 얻게 되면 큰 포화 자화값과 보자력을 동시에 얻을 수 있어 최대 자기 에너지적을 극대화 할 수 있는 것이다. 그러나 exchange-coupling 효과는 연자성 및 경자성상의 형상 및 종류에 매우 의존적인 것으로 알려져 있으며 이를 달성하기 위한 구조 제어가 선행되어야 한다.

2. Exchange-coupling 효과를 위한 임계크기

Exchange-coupling을 일으키기 위한 연자성 및 경자성상의 임계크기에 대한 연구는 이론적 계산 및 실제 시편 제작 공정을 통해 보고되고 있다[2-7]. 초기 연구는 잔류 자화값을 높이는 연구에 대한 것들이 주류를 이루며 대표적인 결과로써, 1988년 Philips 연구소의 R. Coehoorn에 의해 melt-spinning 방법을 통해 제조된 NdFeB조성을 기본으로 하여 Fe_3B, α-Fe가 혼합되어 있는 상에서 Fe_3B의 크기는 약 30 nm, $Nd_2Fe_{14}B$상의 크기는 약 10 nm 일때 최대 자기 에너지적을 약 11.7 MGOe까지 높인 것이 보고되었다[4]. 1993년 영국 Sheffield대의 A. Manaf와 공동연구자들은 역시 NdFeB 합금계를 사용하여 잔류 자화값을 높이는 연구를 진행하였고, $Nd_2Fe_{14}B$ 합금이 기지상, α-Fe가 2상으로 존재할 때, 기지상은 30 nm의 결정립 크기를 갖고 2상인 α-Fe는 10 nm 이하의 결정립 크기를 가질 때 약 19 MGOe의 최대 자기 에너지적을 가질 수 있음을 보고하였다[5]. 1993년 J. Ding은 Journal of Magnetism and Magnetic Materials에 발표한 논문에서 전체에서 약 70 %를 차지하는 $Sm_2Fe_{17}N_x$ 상과 30 %를 차지하는 α-Fe상으로 구성된 영구 자석을 제조하였고, 잔류 자화값을 포화 자화값의 약 80 %까지 확보하여 최대 자기 에너지적을 약 25.8 MGOe까지 높인 결과를 보고하였다. 이 때 α-Fe상의 결정립 크기는 약 20 nm이다[6]. 이런 결과들로부터 exchange-coupling을 일으키기 위해서는 연자성상의 결정립 크기는 nm 크기이어야 하며, 최대 수십 nm 이상을 넘어서는 되지 않음을 알 수 있다.

또한, E. E. Fullerton에 의해 1999년 보고된 바에 의하면, 연/경자성 복합 구조를 박막형태로 제조한 시편에서 연자성상의 두께에 따라 최대 자기 에너지적의 변화가 있고 최대 자기 에너지적을 극대화 하기 위한 임계크기가 존재함을 알 수 있다. 시편은 경자성 재료로써 SmCo를 사용하였고, 45 nm의 두께를 갖도록 박막으로 증착한다. SmCo 박막 위에 연자성 재료로 Co를 사용하여 10~40 nm 두께로 증착한 뒤 최대 자기 에너지적의 변화를 확인하였는데 Co의 두께가 10 nm 일때 최대 자기에너지적은 약 14 MGOe를 가짐을 보여주었다. 이 결과는 Co를 증착하지 않은 SmCo만의 약 11 MGOe에 비해 약 30 % 정도 증가된 결과이며, Co의 두께가 10 nm 이상이 되면 최대 자기 에너지적은 선형적으로 감소함을 보여주었다. Fig. 5를 통해 SmCo/Co 다층구조에서 Co의 두께에 따른 최대 자기 에너지적의 변화를 볼 수 있다[7].

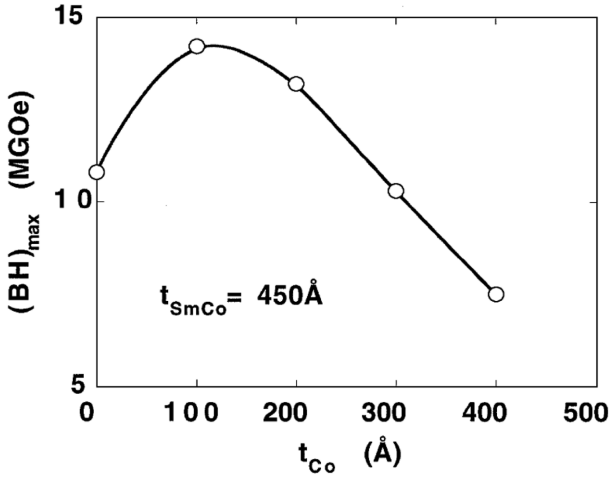

Fig. 5. Energy product variations for Co thickness changes in SmCo/Co multilayer.

전술한 바와 같이 exchange-coupling 효과를 통해 최대 자기 에너지적을 극대화하기 위해서는 연자성 상 및 경자성 상의 결정립은 나노크기를 가져야 하며, 특히 연자성 상의 결정립 크기가 exchange-coupling 효과를 일으키는 가장 중요한 요소임을 알 수 있다.

III. 영구 자석 개발 동향

영구 자석은 효율을 높이기 위하여 Fig. 3과 같이 최대 자기 에너지적을 높이는 방향으로 개발되어 왔으며, 그 결과 기존의 ferrite 자석, AlNiCo 자석으로부터 Sm, Nd 계열의 희토류 원소를 사용하는 자석으로 발전되어왔다. 희토류 자석을 사용하여 영구 자석을 제조하게 되면 높은 최대 자기 에너지적과 적은 부피를 가져 효율을 높일 수 있는 장점이 있지만 희토류 원소의 희소성, 자원 매장의 편중 및 높은 단가를 지불하여야 하는 단점이 존재한다. 그리하여 최근 영구자석의 개발은 희토류 원소의 저감 또는 희토류 원소 자체를 사용하지 않으며, exchange-coupling 효과를 이용하여 효율을 높이는 연구들이 진행되고 있다.

1. 희토류계 자석

현재 희토류 원소를 이용한 자석의 연구 개발은 대부분이 Sm, Nd를 기본으로 하여 진행되고 있다. 최근 연구 결과는 SmCo, NdFeB, SmFeN 계열의 합금을 제조하고 α-Fe와 혼합하여 exchange-coupling을 유도하는 연구들이 주를 이루고 있다.

Nd를 이용한 영구 자석의 경우 melt-spinning 방법을 주로 사용하는데, 이는 melting을 통해 합금계를 구성하고 이를 급냉 응고공정을 통해 비정질(amorphous) 리본 형태로 만든 뒤 기계적 밀링을 통해 분쇄하고 최종적으로 후열처리를 통해 결정화하여 영구 자석을 제조하는 공정을 통해 제조된다[14-16]. 또한, α-Fe와의 exchange-coupling을 유도하여 최대 자기 에너지적을 높이는 연구도 진행되고 있다[5, 17, 18].

NdFeB 영구자석의 또다른 연구 분야로는 NdFeB 입자의 미세 구조를 제어하여 보자력을 극대화 시키는 연구가 있다. 이 분야는 NIMS의 K. Hono에 의해 주도적으로 연구가 진행되고 있으며, NdFeB 자석에서 결정립의 크기를 미세화 시켜 보자력을 증대시키는 연구 및 HDDR(hydrogenation - disproportionation - desorption - recombination)이라 불리는 공정을 통해 이방성을 극대화 하여 보자력을 증가시키는 연구가 주로 진행되고 있다[19-22]. 이와 더불어, HDDR 처리된 NdFeB 분말에 Dy 등을 확산시켜 이방성을 증가시키는 연구 또한 진행되고 있다[23-25]. Fig. 6은 HDDR 공정의 모식도이며 disproportionation - recombination 공정을 나타낸다.

Sm을 이용한 영구 자석의 경우 SmCo 합금을 기본으로 하여 Fe와의 exchange-coupling을 유도하는 형태의 연구가 주로 진행되고 있다[8, 9]. Y. Choi의 2007년 보고에 따르면 SmCo와 Fe를 박막구조를 사용하여 다층막 형태로 구성한 뒤 SmCo와 Fe 층의 계면을 조절하여 exchange-coupling 효과를 증가시켜 최대 자기 에너지적을 높일 수 있음을 나타내었다[9]. 또한, Y. Hou의 2007년에 발표된 논문에서는 $SmCo_5$/Fe의 나노복합체를 환원 열처리 공정을 통해 제조하고 Fe의 첨가량에 따른 보자력의 변화에 대해 보고하였다[8]. 이 연구 결과에서 주목할 부분은 기존 희토류 원소를 사용한 연구에서 보여지는 melt-spinning 형태와 exchange-coupling 효과를 나타내기에 용이한 박막 구조가 아닌 나노 입자로부터 exchange-coupling 효과를 얻었다는 것이다. 경자성상인 $SmCo_5$는 염형태의 시약으로부터 제조되고, 연자성상인 Fe를 얻기 위해 Fe-oxide 분말을 제조하여 차후 환원 공정을 통해 Fe를 형성하는 단계를 거치게 되었다. Melt-spinning 방법이나 박막 공정에 비해 큰 최대 자기 에너지적을 얻지는 못하였지만 입자 형태로부터 exchange-coupling이 가능함을 보여준 결과로서 이후 연구 단계에서 시사하는 바가 크다고 할 수 있다.

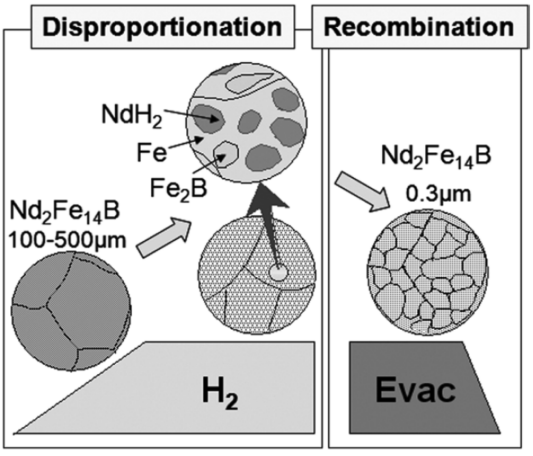

Fig. 6. Schematic diagram of HDDR process.

2. 희토류 저감 및 대체

서술한 것과 같이 희토류를 이용하여 영구 자석을 제조할 경우 고효율의 영구 자석의 제조는 가능하지만 희소원소를 사용하기 때문에 생기는 고비용, 수급의 어려움 등의 문제로부터 자유로울 수 없다. 이를 해결하기 위해 희토류 원소의 저감 및 희토류를 사용하지 않은 연구들이 진행되고 있다. HDDR 처리된 NdFeB 영구자석에 Dy를 확산시켜 보자력을 향상시킴으로써 최대 자기 에너지적을 높이는 연구가 주로 진행되었지만 최근 Dy의 가격급상승, 수급의 어려움 등으로 인해 저감을 위한 노력이 진행되고 있다. K. Hono는 HDDR 공정된 NdFeB 분말에 Dy 대신 Nd-Cu eutectic 합금을 확산시켜 보자력을 증가시키는 보고를 하였다[19]. 연구결과에 따르면 보자력을 확산공정을 거치지 않았을 때 약 16.6 kOe에서 Nd-Cu를 확산시킨 후 약 19.5 kOe까지 증가시켰다. 이는 확산 공정 후에 결정립계면에 Nd가 많은 영역이 늘어나게 되고, 이는 이방성을 증가시키는 요인이 되어 최종적으로 보자력을 향상시키는 역할을 하게 된다.

하지만 서술한 연구 역시 Nd계열의 희토류 원소를 사용한 결과이며, 희토류 저감노력을 기울이고 있지만 희토류 원소를 사용하지 않는 대체의 형태는 아니다. 희토류 자석을 대체하기 위한 연구결과로써 나노 입자를 사용하여 exchange-coupling 효과를 통한 최대 자기 에너지적을 증대시키는 연구들도 진행되고 있다[10, 13]. 본 연구진에서 2007년 발표한 결과를 통해 페라이트계열의 나노 분말을 이용하여 exchange-coupling이 가능함을 보였다[10]. 연자성상으로는 NiZn ferrite를 사용하고, 경자성상으로는 Ba-hexaferrite를 사용하였다. 연자성 및 경자성상을 각각 나노 크기를 갖는 입자로 만들기 위하여 자전 연소법을 사용하여 제조하였다. 자전 연소법은

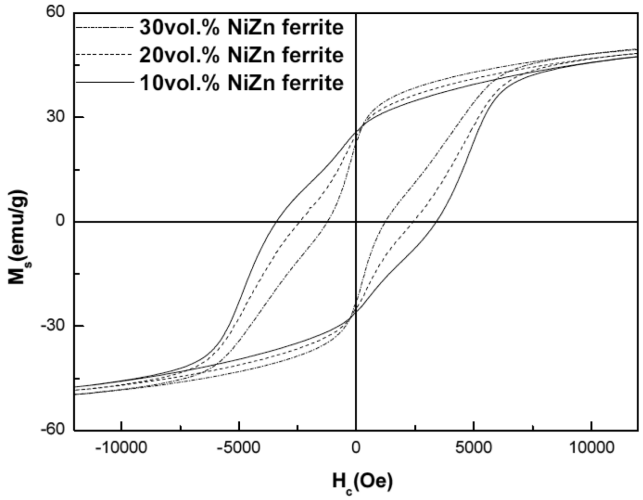

Fig. 7. Magnetic hysteresis loop of NiZn ferrite/Ba-hexaferrite composites.

비교적 간단한 공정으로 세라믹 계열의 나노 입자를 제조하기에 적합한 방법이다. 그러나 연자성상 및 경자성상을 각각 따로 제조하여 혼합한 경우 연자성상과 경자성상이 균질한 배열을 하지 못하여 exchange-coupling을 얻지 못하였다. 이를 극복하기 위해 연자성상과 경자성상의 나노 입자를 동시에 연소반응을 통해 나노입자를 제조하였고, 자성특성 측정결과 exchange-coupling 효과가 나타남을 확인하였다. Fig. 7은 나노복합체의 연자성 함유량에 따른 자기이력곡선이다. 연자성상이 부피비로 10 %일 경우 exchange-coupling 효과를 확인할 수 있으며 가장 큰 보자력을 얻었음을 나타낸다.

H. Zeng의 2002년 보고 역시 나노 입자에서 exchange-coupling 효과를 가질 수 있음을 나타내었다[13]. 이 연구결과는 FePt/Fe_3Pt의 나노복합체로 이루어져 있으며, 자기 조립(self-assembly)을 통해 연자성상과 경자성상을 매우 고르게 분포시킨 뒤 열처리를 통해 약 3 nm의 결정립을 갖는 시편을 제조하였다. 또한, 나노복합체 제조시 사용한 나노 입자의 크기에 따른 자기 조립 정도에 대한 연구 결과도 포함하고 있다.

위의 연구결과들이 중요한 이유는 희토류 대체 가능성을 보여준 것 뿐 아니라 나노 입자를 통해 exchange-coupling 자석의 제조 가능성을 보여준 것이다. Sm을 이용한 exchange-coupling 자석부분에서도 언급하였지만 나노 입자로부터 exchange-coupling 효과를 얻을 수 있다는 것은 매우 큰 장점이다. 나노 입자로부터의 영구자석 제조는 적용 가능한 산업 분야가 매우 많다는 것을 의미하기 때문이다. 박막 형태로 제조하여 exchange-coupling 효과를 얻는 것은 coupling을 얻기에는 나노 입자에 비해 유리하지만 형태의 제약이 있기 때문에 실제 적용 가능성은 매우 낮다. 또한, 희토류 원소를 사용하여 영구 자석을 제조한 경우 벌크화에는 용이하지만 지속적으로 언급한 바와 같이 가격적 문제 및 희토류 원소 수급의 문제를 피할 수 없는 것이 현실이다. 본 연구진에서 페라이트 나노 입자를 통하여 exchange-coupling의 가능성을 확인한 결과는 사용한 재료 자체의 원가가 매우 낮은 페라이트 계열이라는 장점과 나노 입자를 통해 coupling을 얻었기 때문에 적용분야가 매우 넓으며 벌크화가 가능하다는 장점도 동시에 가지고 있다.

하지만 페라이트의 특성상 낮은 포화 자화값과 희토류 자석에 비해 상대적으로 작은 보자력을 가지고 있다. 이를 극복하기 위해 본 연구진에서는 기존 사용한 Ba-hexaferrite의 보자력 증대를 위해 비자성 원소의 치환을 통한 연구를 진행하였고, 포화 자화값이 높은 Fe 계열의 연자성 나노 입자를 제조하기 위한 연구를 진행하였다[26, 27]. Ba-hexaferrite에 Al을 치환시켜 보자력을 치환시키지 않았을 때의 약 5,000 Oe로부터 약 7,600 Oe까지 증가시켰다. 또한, 제조된 Ba-hexaferrite 분말은 약 50 nm 크기를 가짐을 확인하였다[26]. 연자성 상으로는 포화 자화값이 큰 Fe를 선택하였고, 대기 중에서도 산화 방지가 가능한 분말을 제조하였다[27]. 이는 나노 입자 제조 시 수 wt%의 Al을 첨가한 뒤 Fe-oxide를 제조하고, 수소 환원 공정을 통해 Fe로 환원 시 입자의 표면을 FeAl-oxide가 감싸는 core/shell 형태의 구조를 얻어 산화 방지가 가능하게 하였다. 포화 자화값의 경우 약 180 emu/g 를 나타내었으며 이는 순수 α-Fe의 약 220 emu/g에 80 %에 해당하는 높은 결과이다.

IV. 결 론

그린 에너지 및 환경문제로 인한 풍력발전, 태양광 발전, 전기 자동차 등의 산업 분야가 확대됨에 따라 고효율 영구자석의 필요성이 증가하게 되었다. 이를 해결하기 위해 희토류계 원소 사용 및 exchange-coupling 효과를 이용한 영구자석 분야의 연구가 많이 진행되고 있다. 그러나 희토류계 자석이 갖는 자원의 희소성, 고비용, 자원수급의 문제점 등이 지속적으로 제기되어 희토류 저감 및 대체에 대한 연구 분야 또한 매우 중요하게 되었다. 희토류 저감 및 대체를 위해서는 높은 최대 자기 에너지적을 얻을 수 있는 exchange-coupling 현상을 이용하는 것이 매우 효과적이기 때문에 희토류계 자석에서도 exchange-coupling을 이용하여 효율을 높이고 있으며, 희토류 대체 분야에서도 exchange-coupling을 통한 영구 자석 제조를 진행하고 있다. 본 연구진에서는 희토류 대체를 목적으로 페라이트계 나노 입자를 통해 exchange-coupling의 가능성을 확인하였으며, 특성 향상을 위해 경자성 재료의 보자력을 높이는 연구와 높은 포화 자화값을 갖는 나

노 크기의 연자성 입자 제조 연구를 진행하였다. 이로부터 나노 입자를 통한 exchange-coupling 자석의 제조가 가능할 것으로 판단되며, 이를 위한 연구를 지속적으로 진행하고 있다.

감사의 글

이 논문은 지식경제부 소재원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] O. Gutfleisch, M. A. Willard, E. Brck, C. H. Chen, S. G. Sankar, and J. P. Liu, Adv. Mater. **23**, 821 (2011).
[2] E. F. Kneller and R. Hawig, IEEE Trans. Magn. **27**, 3588 (1991).
[3] R. Skomski and J. M. D. Coey, Phys. Rev. B **48**, 15812 (1993).
[4] R. Coehoorn, D. B. de Mooji, J. P. W. B. Duchateau, and K. H. J. Buschow, J. de Physique **C8**, 669 (1988).
[5] A. Manaf, R. A. Buckley, and H. A. Davies, J. Magn. Magn. Mater. **128**, 302 (1993).
[6] J. Ding, P. G. McCormick, and R. Street, J. Magn. Magn. Mater. **124**, 1 (1993).
[7] E. E. Fullerton, J. S. Jiang, and S. D. Bader, J. Magn. Magn. Mater. **200**, 392 (1999).
[8] Y. Hou, S. Sun, C. Rong, and J. P. Liu, Appl. Phys. Lett. **91**, 153117 (2007).
[9] Y. Choi, J. S. Jiang, J. E. Pearson, S. D. Bader, J. J. Kavich, J. W. Freeland, and J. P. Liu, Appl. Phys. Lett. **91**, 072509 (2007).
[10] K. W. Moon, S. G. Cho, Y. H. Choa, K. H. Kim, and J. Kim, Phys. Status Solidi A **204**, 4141 (2007).
[11] D. Roy, C. Chivakumara, and P. S. Anil Kumar, J. Magn. Magn. Mater. **321**, L11 (2009).
[12] D. Roy and P. S. Anil Kumar, J. Appl. Phys. **106**, 073902 (2009).
[13] H. Zeng, J. Li, J. P. Liu, Z. L. Wang, and S. Sun, Nature **420**, 395 (2002).
[14] Y. Liu, L. Xu, D. Guo, W. Li, Q. Wang, and X. Zhang, J. Appl. Phys. **106**, 113918 (2009).
[15] W. Li, D. Guo, X. Li, Y. Chen, D. V. Gunderov, V. V. Stolyarov, and X. Zhang, J. Appl. Phys. **108**, 053901 (2010).
[16] S. Zhang, H. Xu, X. Tan, J. Ni, X. Hou, and Y. Dong, J. Alloy. Compd. **459**, 41 (2008).
[17] X. Y. Zhang, Y. Guan, and J. W. Zhang, Appl. Phys. Lett. **80**, 1966 (2002).
[18] L. Withanawasam, A. S. Murphy, and G. C. Hadjipanayis, J. Appl. Phys. **76**, 7065 (1994).
[19] H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, T. Nishiuchi, S. Hirosawa, and K. Hono, Scripta Materialia **63**, 1124 (2010).
[20] H. Sepehri-Amin, Y. Une, T. Ohkubo, K. Hono, and M. Sagawa, Scripta Materialia **65**, 396 (2011).
[21] W. B. Cui, Y. K. Takahashi, and K. Hono, Acta Materialia **59**, 7768 (2011).
[22] H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, T. Nishiuchi, S. Hirosawa, and K. Hono, Ultramicroscopy **111**, 615 (2011).
[23] H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, and K. Hono, J. Apply. Phys. **107**, 09A745 (2010).
[24] W. F. Li, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, N. Hase, and K. Hono, Acta Materialia **59**, 3061 (2011).
[25] S. Sugimoto, J. Phys. D: Appl. Phys. **44**, 064001 (2011).
[26] K. W. Moon, K. W. Jeon, and J. Kim, IEEE Trans. Magn. **45**, 4405 (2009).
[27] S. G. Cho, K. W. Jeon, K. W. Moon, J. B. Kim, K. H. Kim, and J. Kim, J. Appl. Phys. **109**, 07B533 (2011).

Development of Exchange-coupling Magnets Using Soft/hard Nanoparticles

Jongryoul Kim*, Sang-Geun Cho, and Kwang-Won Jeon
Department of Metallurgy and Materials Engineering, Hanyang University, Ansan 426-791, Korea

(Received 28 November 2011, Received in final form 20 December 2011, Accepted 20 December 2011)

Magnetic materials has been applied to various fields due to their energy convertible properties between electrical and mechanical energy. Particularly, permanent magnets have been currently attracted much attention because they produce external magnetic field without any electrical current. For high efficiency, a demand for permanent magnets containing rare earth elements has been continuously increased, which abruptly raises the price and causes the supply difficulty of rare earth materials. Therefore, the development of permanent magnets with less or without rare earth elements become a urgent issue. In this report, the current trend and major issues on high efficiency permanent magnets, particularly exchange-coupling magnets, are discussed.

Keywords : exchange-coupling, permanent magnet, rare-earth materials, nano-composite