≪해설논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society, Volume 22, Number 2, April 2012 http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2012.22.2.058

희토류 자원문제 해결을 위한 모터 및 영구자석 연구개발 동향

이정구* · 유지훈
한국기계연구원 부설 재료연구소 분말/세라믹연구본부, 경남 창원시 성산구 창원대로 797, 642-831

김휘준
한국생산기술연구원 주조공정연구그룹, 인천시 연수구 송도동 7-47, 406-840

장태석
선문대학교 하이브리드 공학과, 충남 아산시 탕정면 선문로 221번길 70, 336-708

(2012년 3월 5일 받음, 2012년 4월 17일 최종수정본 받음, 2012년 4월 17일 게재확정)

1983년 Nd-Fe-N계 자석이 발표된 이후 지난 20년간 많은 새로운 응용분야가 개척되었다. 모터시장과 관련해서는 자동차와 전기/전자 응용분야의 에너지절감이라는 강한 요구 때문에 그 시장이 크게 확대될 것으로 예상된다. 특히, 하이브리드/전기자동차용 영구자석 모터는 최근 크게 주목을 받고 있으며 향후 모터시장을 주도해 나갈 것이다. 하지만 이러한 친환경자동차는 약 200 ºC 정도의 높은 온도에서 작동한다는 심각한 문제점을 가지고 있다. 왜냐하면 Nd-Fe-B계 자석은 온도가 높으면 보자력이 급격히 감소하는 약점을 가지고 있기 때문이다. 현재로서 이러한 약점을 보완하기 위한 최선의 방법은 Dy를 첨가하는 것이다. 그렇기 때문에 Dy는 고성능 Nd-Fe-B계 자석이 높은 온도에서도 보자력을 유지할 수 있도록 해주는 필수원소가 되었다. 한편, 지구상의 희토류 자원은 지역편중이 심하고 대부분이 중국에서 생산되고 있다. 특히, Nd과 Sm 같은 경희토류에 비해 그 자원편중이 훨씬 심하고 생산량이 적어 가격이 Nd의 약 10배 정도인 Dy와 같은 중희토류의 사용량을 줄이는 기술이 관련산업에서 크게 요구되어지고 있다. 이 글에서는 이러한 희토류 자원문제 해결을 위한 영구자석 연구개발 동향에 대해 살펴보았다.

주제어 : Nd-Fe-B, 영구자석, 모터, 희토류

I. 서 론

21세기는 온실가스 배출에 의한 지구온난화 문제를 해결하기 위해 '저탄소/녹색성장'이라는 새로운 형태의 산업발전 모델이 필요하다. 다시 말해서 경제활동은 계속하지만 에너지의 생산과 소비 방식에서 혁신이 필요한 시점이다. 에너지 생산 측면에서는 태양전지, 풍력발전과 같은 신재생 에너지 산업이 크게 발전하고는 있지만 그 발전비중이 1.1 %(2010년 기준)에 그치고 있다. 한편, 가장 저렴한 발전방식으로 알려져 있는 원자력발전의 경우 최근 일본의 후쿠시마 원전 방사능 누출 사건 이후 설비 안전성 문제가 연일 언론에 보도되고 있어 증가하는 에너지 수요를 충족시키기 위한 대책이 시급한 시점이다. 에너지 소비 측면에서는 정부가 이러한 에너지 부족 문제 해결을 위해 대국민을 상대로 불필요한 전기사용 억제를 호소하고 유휴 전력을 효율적으로 이용하는 방안 등을 다각도로 검토하고 있다. 하지만 본질적인 에너지 부족 문제 해결을 위해서는 에너지를 소비하는 기기의 효율을 향상하는 것이 매우 중요하다. 이러한 에너지 소비와 관련하여 가장 크게 관련되는 기기가 모터이고 여기에 사용되는 핵심소재가 영구자석이다. 영구자석은 주로 모터, 액츄에이터, 발전기 등에 사용되어 에너지변환(전기 ⇔ 기계에너지)의 핵심적인 역할을 수행하는 기능성 소재로서, 1900년대 초반 영구자석이 처음 개발된 이후 점차 종전에 사용되던 전자석을 대체함으로써 산업 전반에 걸쳐 에너지 절감 및 소형화에 기여한 바가 크다. 특히, 최근 자동차 산업에서 화석원료를 사용하는 내연기관을 모터와 병행하여 사용하는 하이브리드자동차 혹은 모터만으로 구동하는 전기자동차에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1, 2]. 이러한 친환경자동차는 전기에너지를 이용하여 구동되기 때문에 영구자석형 모터 및 발전기가 필연적으로 채용되므로 영구자석 측면에서는 에너지 효율을 더욱 향상시키기 위하여 우수한 자기에너지와 보자력을 나타내는 희토류 영구자석에 대한 기술적 수요가 크게 증가하고 있다. 그러나, 이처럼 수요가 급증하는 희토류 영구자석은 현재 심각한 자원리스크에 직면해 있다. 특히 고온 환경 하에서 작동하는 친환경자동차 모터용 희토류 영구자석에 필수 원소인 Dy와 같은 중희토류 자원문제는 매우 심각한 상황이다[3].

한편, 우리나라의 주력산업인 자동차, 정보전자 산업의 지속적인 성장을 위해서는 기존 제품들의 트랜드를 친환경 쪽으로 전환하지 않으면 안 되는 시점에 있고, 이러한 제품의 트랜드 전환과 지속적 성장을 위해서는 중희토류를 사용하지

*Tel: (055) 280-3606, E-mail: jglee36@kims.re.kr

않는 고특성 영구자석의 사용이 필수적이라고 할 수 있다.

본 고에서는 이러한 희토류 자원문제 해결을 위한 모터 및 영구자석 연구개발 동향에 대해서 기술하고자 한다.

II. 모터용 희토류 영구자석의 산업동향

이전에는 모터의 회전부분에 주로 전자석이 사용되었지만 최근, 특히 소형모터에는 Nd계 영구자석이 사용되어 소형화, 경량화, 저소음화가 진행되고 있다. 엘리베이터에는 일찍부터 Nd계 영구자석이 적용되었고 이후 세탁기 모터에도 사용되어 탈수력 향상과 구동소음을 크게 줄일 수 있었다. 또한 중장비 기기에까지 그 응용분야를 넓혀갔다. 종래의 유압방식으로는 엔진을 계속해서 작동시키기 때문에 구동소음이 문제이었지만 Nd계 영구자석을 사용한 모터를 사용함에 따라 주택밀집지역과 야간공사에도 중장비기기 사용이 용이해졌다.

수량적으로는 전자, 정보기기에 Nd계 영구자석이 많이 사용되어 왔다. 보이스 코일 모터(VCM)은 영구자석의 자계 중에 설치된 보이스 코일에 흐르는 전류에 비례하여 직진운동을 하는 리니어 모터로 컴퓨터용 하드디스크 헤드의 위치 결정, 카메라의 줌, 조리개, 셔터, 미세가공기의 엑츄에이터 등에 널리 사용되고 있다. 또한, 휴대전화의 박형화에도 Nd계 영구자석은 크게 공헌하고 있다. 휴대전화를 얇게 할 때의 큰 문제 중의 하나가 스피크의 박형화이지만 초소형 Nd계 영구자석을 사용하면 두께 1 mm 정도의 매우 얇은 스피커 제조가 가능하다. 시대적으로는 1990년대 전세계적으로 컴퓨터의 보급에 따라 전자, 정보기기 용도를 중심으로 Nd계 영구자석의 생산이 확대되어 왔다. 최근에도 계속해서 Nd계 영구자석의 수요가 증가하고 있지만 한 가지 주목할 만 한 점은 모터 용도의 수요 증가가 전체 수요 증가를 주도하고 있다는 점이다. 그 배경에는 기후변화에 대처하기 위한 CO_2와 같은 온실가스 배출량의 저감을 위해 전력소비 저감과 에너지 절약형 기기에 대한 산업적 요구가 크게 증가하고 있기 때문이다.

Nd계 영구자석에 의해 에너지절감이 크게 실현된 대표적인 제품이 에어컨이다. 에어컨은 전력의 대부분을 컴프레셔용 모터 구동에 소비한다. 이전에는 교류모터인 유도모터가 사용되었지만 1981년에 처음으로 인버터 방식 에어컨이 판매되어 1990년대에는 고효율 브러쉬레스 DC모터가 개발되었다. 현재 세계 각국에서 가전제품에 엄격한 에너지저감 규정을 적용하고 있고 앞으로 더욱 강화될 예정이기 때문에 에어컨 제조사들은 에너지 사용저감을 위한 모터성능 향상 연구를 더욱 강화하고 있다. 예를 들어 일본의 경우 2003년 이후 거의 대부분의 에어컨 제조사가 Nd계 영구자석을 채용하여 에너지 저감을 달성하고 있다. Nd계 영구자석을 이용한 신형 모터는 구형 모터와 비교하여 특히 저 회전수에서 에너지 효율

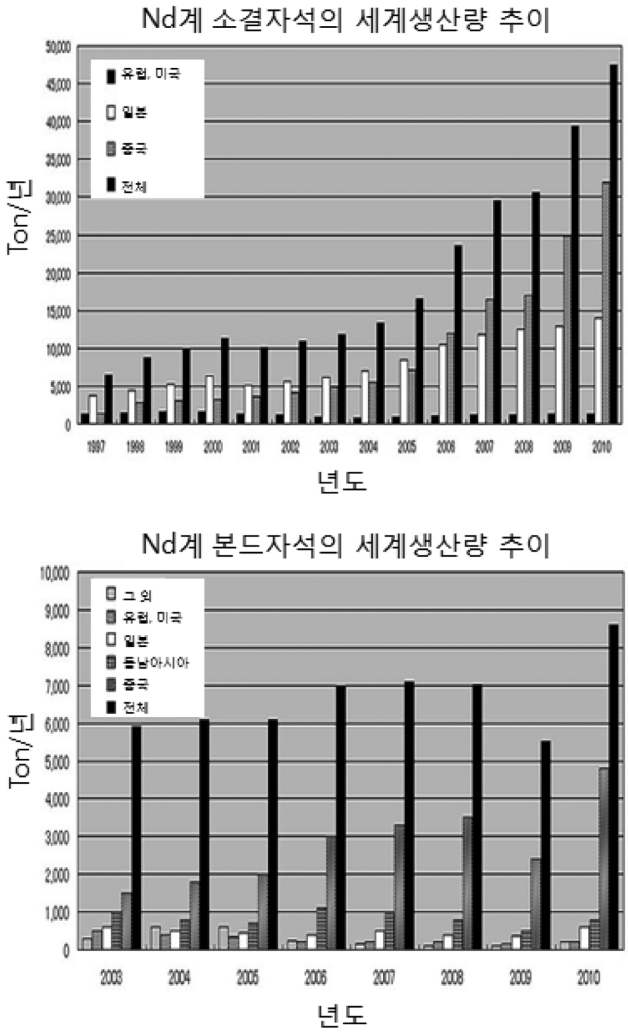

Fig. 1. Trend in production of Nd-Fe-B permanent magnets.

이 높아 약 30 % 에너지 저감효과가 있다고 알려져 있다. 또한 최근에는 '가변자력방식 모터'라는 새로운 개념의 모터를 일본 토시바 홈어플라이언스가 2009년 가을에 발매한 세탁건조기에 적용하였다. 이 모터는 48개의 자석을 배치한 로터 중에 6개의 Sm-Co 자석의 자력을 증자 또는 감자시키는 것이 가능하다. 세탁 시의 저 회전 때는 토크를 최대로 하기 위해 증자하고 탈수 시에는 감자시켜 역기전압의 발생을 억제하여 회전수를 높일 수 있다. 이 모터는 세탁 시와 탈수 시의 자력 변화방식이지만 모회사인 토시바는 모터의 회전 중에도 자유로운 자력의 변화가 가능한 모터를 연구하고 있다. 회전 중에 자력을 자유롭게 변화 시킬 수 있으면 하이브리드/전기 자동차에도 이용 가능하다.

그러나, 세계적으로 보면 아직 비 인버터 방식 에어컨이 주류이고 전체 산업분야에서 영구자석을 사용하지 않는 유도모터가 많이 사용되고 있다. 이것을 Nd계 영구자석을 사용한 영구자석모터로 바꾼다면 에너지 사용량을 크게 줄일 수 있

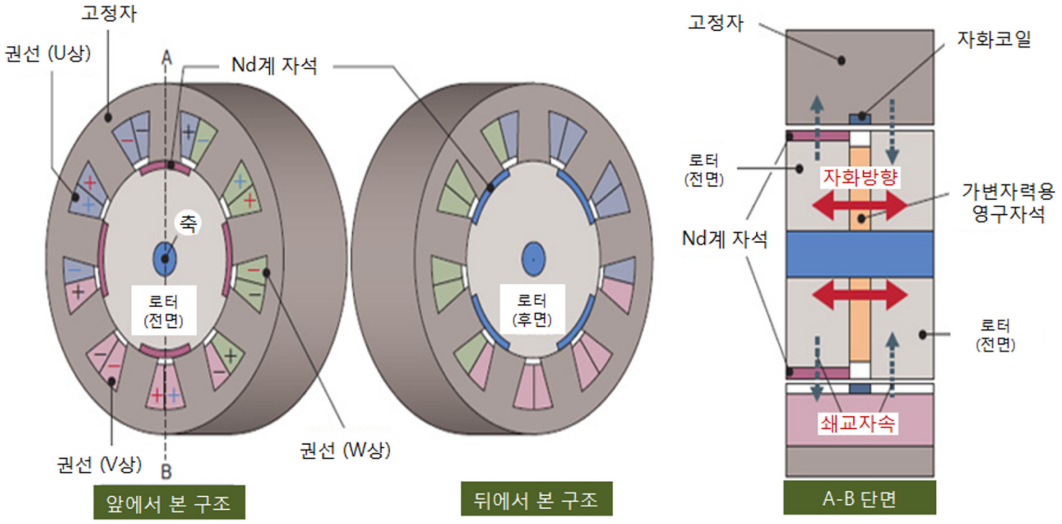

Fig. 2. (Color online) Motor using variable-flux permanent magnet.

어 결과적으로 CO_2 배출을 크게 줄일 수 있다. 최근, Nd계 영구자석의 이용이 가장 급속하게 급증하고 있는 제품은 친환경자동차용 모터이다. 친환경자동차의 생산 확대에 따라 Nd계 영구자석의 생산도 크게 증가하였고 앞으로도 계속해서 증가할 것이다.

한편, 영구자석의 자력을 변화시키는 가변자력방식에 비해 자기코일에 전류를 흘려 자속을 변화시키는 것이 '자계코일 방식'이다. 이 방식은 자계코일에 의해 전자석을 형성해서 영구자석을 대체할 수 있는 있는 것이 특징으로 고가의 Nd계 영구자석을 사용하지 않아도 된다는 점에서 희토류저감 모터로 주목받고 있다. 희토류원소 저감형 모터에 대해 일본 신에너지산업기술종합개발기구(NEDO)의 '차세대 자동차용 고성능 축전시스템 기술개발사업' 프로젝트의 일환으로 연구개발이 진행 중이다. 이 프로젝트 중에 Nd계 영구자석의 사용량을 반으로 줄이는 하이브리드 자계모터 개발을 담당하고 있는 그룹은 나고야공업대학 Kosaka 교수팀이다. 이 모터는 출력밀도를 높이기 위해 Nd계 영구자석 만을 이용하는 것이 아니고 고정자 측에 자계코일을 배치하여 자속을 보조하는 것이 특징이다. 시뮬레이션 결과에서는 토요타자동차 렉사스 RX400h의 구동용 모터와 비교하여 Nd계 영구자석의 사용량을 반으로 줄일 수 있고, 동등한 출력밀도 (3.4 kW/kg)를 달

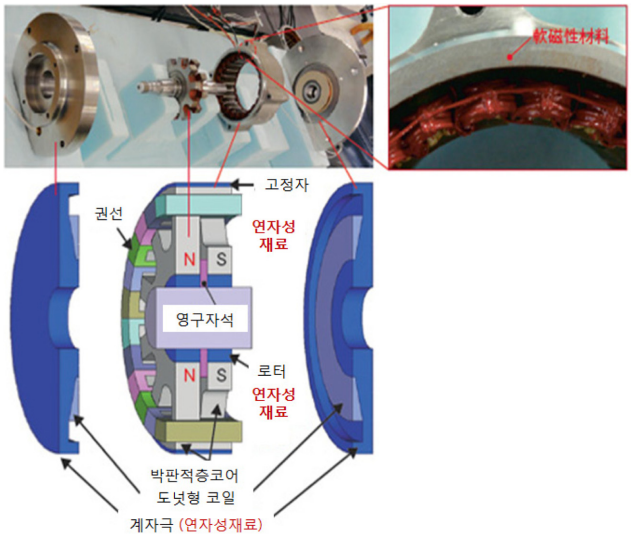

Fig. 3. (Color online) Magnetic motor reducing permanent magnet by half.

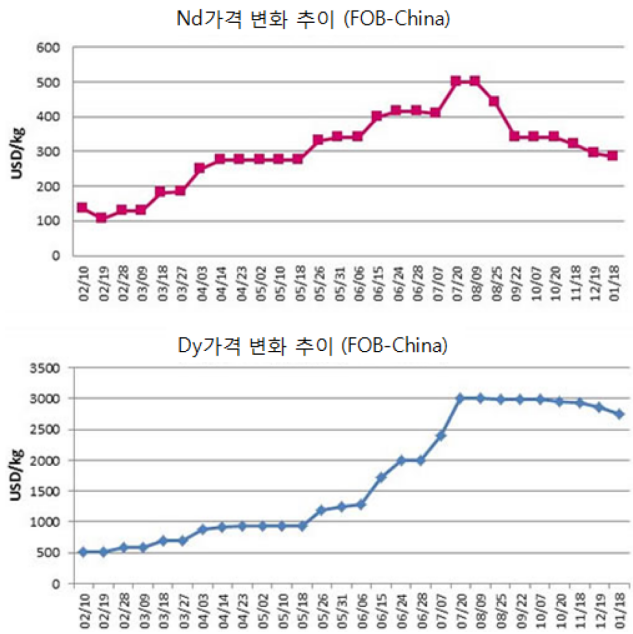

Fig. 4. (Color online) Trend in price of Nd and Dy.

성하였다.

위에서 언급한 것처럼 앞으로 모터의 고효율화가 '친환경/녹색성장' 사회구축에 핵심소재이기 때문에 모터의 고효율화를 위한 연구는 더욱더 활발해 질 것으로 예상된다. 한편, 고효율 모터 수요증가에 따라 Nd계 영구자석의 수요 또한 지속적으로 증가할 것이다. 하지만 언론을 통해 많이 알려진 바와 같이 Nd계 영구자석에 사용되는 Nd와 Dy와 같은 희토류 원소는 매장량이 적어 최근 수급불균형 문제가 발생하고 있다. 특히 Dy와 같은 중희토류 원소는 Nd와 같은 경희토류 원소에 비해 매장량이 훨씬 적을 뿐만 아니라 (Dy의 매장량의 경우 Nd의 1/10 수준), 거의 100 % 중국에서만 생산 판매하고 있다. 또한 중국이 이를 자원무기화의 도구로 활용하고 있기 때문에 각국에서 이러한 희토류자원 수급문제 해결을 위해 다각도의 노력을 하고 있다. 다음은 이러한 노력 중에서 영구자석 소재 측면에서 희토류자원 문제 해결을 위해 연구 개발 중인 내용에 대해 살펴본다.

III. 모터용 영구자석 소재개발 동향

모터의 고출력화, 소형화에는 영구자석의 성능향상 또한 필수이다. 그것은 축적가능한 자력에너지가 높은 소재를 사용할수록 큰 출력의 모터를 만들 수 있고 같은 출력모터를 보다 작게 만들 수도 있기 때문이다. 따라서 현재 고출력 모터에는 상용화되어 있는 자성재료 중 자기특성이 가장 우수한 Nd계 영구자석이 사용되고 있다. 하지만 이 자석은 고온에서 역자계가 인가되면 쉽게 자력을 잃어버린다는 사용상의 중요한 결점을 가지고 있다. 현재 이러한 결점을 보완하기 위해 Dy와 같은 중희토류 원소 첨가로 보자력을 높여 내열성을 확보하고 있다. 한편, 앞에서도 언급하였지만 중희토류 중에서도 Dy는 그 산출과 생산을 중국이 거의 독점하고 있어 가격 결정권을 가지고 있다. 중국의 방침에 따라 Dy의 가격이 폭등하고 고특성 자석을 합리적인 가격으로 제조할 수 없을 가능성도 있다. 따라서 현재 이러한 중희토류 원소 수급문제 해결을 위해 일본과 같은 기술 선진국을 중심으로 산-학-연이 협력하여 새로운 영구자석소재개발을 진행 중이다. 이러한 연구개발은 크게 3가지로 구분해 볼 수 있다[4-12].

1) Dy와 같은 중희토류 원소를 가능한 줄이면서 보자력이 높은 Nd계 영구자석 소재개발

2) Dy와 같은 중희토류 원소를 포함하지 않는 Nd계 영구자석 소재개발

3) Nd계 영구자석에 버금가거나 능가하는 새로운 영구자석 소재개발

이 중에서 1), 2)는 가까운 미래에 3)은 장기적인 안목에서 고성능 모터에 적용될 것으로 예상된다.

1. 중희토류 원소 저감형 Nd계 자석소재

'Dy와 같은 중희토류 원소를 가능한 줄이면서 보자력이 높은 Nd계 영구자석 소재개발'에는 $Nd_2Fe_{14}B$가 Dy의 첨가에 의해 보자력이 향상되는 것을 고려하여 Dy를 효과적으로 첨가하는 것이 필요하다. 이 방법으로 Dy를 저감시키려고 하는 것이 TDK, 신에츠화학공업, 히타치금속과 같은 일본의 Nd계 소결자석 회사이다. Nd계 영구자석의 이론 보자력은 76 kOe 이다. 이것에 비해, Dy를 첨가하지 않는 Nd계 소결자석의 보자력은 12 kOe 정도이다. 다시 말해 현재 이론치의 15 % 정도의 보자력만 발휘하고 있다.

Nd계 소결자석은 $Nd_2Fe_{14}B$가 모여 있는 결정립상과 Nd의 농도가 결정립보다 높은 입계상으로 구성되어 있다. Nd계 소결자석의 보자력이 이론치보다 매우 작은 주된 이유는 결정립상의 표면에 보자력을 낮추는 결함이 있기 때문으로 생각되어 진다. 이 자석에 Dy를 첨가하면 보자력이 개선되는 것은 Dy 원자가 $Nd_2Fe_{14}B$의 Nd를 치환하여 강자성결정립의 이방성자장을 높여 역자구의 생성이나 이동을 억제하기 때문이다. 그런데 이와 같은 역자구의 생성과 이동은 결정립 표면부위에서 발생하므로 이 부분의 Dy 농도만 선택적으로 높게 하면 Dy 첨가량을 줄이고도 보자력을 올리는 것이 가능하다. 그래서 최근 자석회사가 적극적으로 개발하는 것이 Dy를 결정립의 표면부근에 선택적으로 분포시키는 'Dy 확산 기술'이다. 또한 Dy는 자화의 방향이 Nd와 Fe 원자와 반대방향이기 때문에 Dy 첨가에 의해 잔류자속밀도가 저하한다. 따라서 Dy 첨가량을 줄이는 것으로 잔류자속밀도도 높일 수 있다. 지금까지는 보자력이 높은 Nd계 영구자석을 제조하기 위해 Dy를 $Nd_2Fe_{14}B$의 모재와 혼합/분쇄해서 이것들을 소결하는 방법이 이용되어왔다. 하지만 이러한 방법으로는 Dy가 자석 전체에 거의 균일하게 존재하여 필요하지 않은 부분에도 Dy가 존재하게된다. 이와 달리, Dy 확산 기술은 Dy를 첨가하지 않는 Nd계 영구자석을 제조해서 그 표면에서 Dy을 침투시키는 방법을 이용한다. 이 경우 결정립에는 거의 침투되지 않고 입계에만 Dy가 확산 코팅된다.

TDK와 신에츠화학공업이 채용하고 있는 것은 Dy의 화합물을 $Nd_2Fe_{14}B$ 모재의 표면에 도포하는 방법이다. 이것을 가열하여 모재의 안으로 Dy를 침투시킨다. 다른 점은 TDK가 수소화합물, 신에츠화학공업이 불소화합물을 사용한다는 점이다[13].

한편, 히타치금속은 Dy의 금속증기로 모재를 코팅한 후 열처리하여 Dy를 모재에 침투시키는 방법을 채택하고 있다[14]. 이 세가지 방법 모두 Dy를 입계상에 선택적으로 주입하는 것이 가능하다. 히타치금속은 Dy 확산기술을 사용하여 같은 양의 Dy를 투입할 경우에 비해 50도 정도 높은 온도에서 견딜 수 있는 소재를 개발했다. TDK와 신에츠화학공업도 거의 같

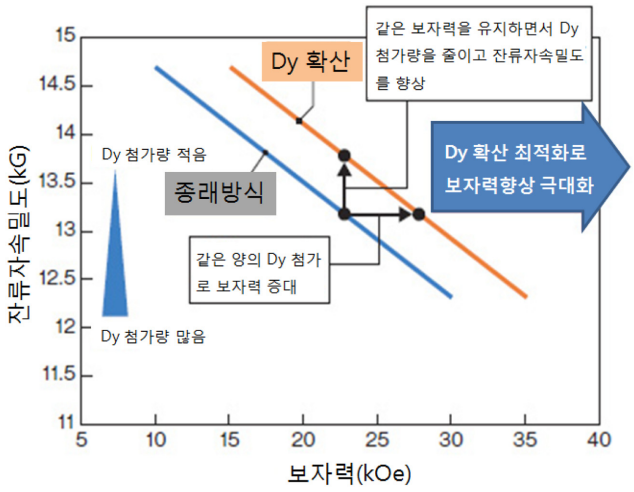

Fig. 5. (Color online) Relationship between magnetic properties and Dy diffusion.

은 결과를 얻었다. 같은 보자력이면 Dy 확산기술의 자석이 종래 제품보다 Dy의 양을 줄일 수 있다. 현재 하이브리드자동차 구동모터에서 중량비로 Dy를 5 % 전후 포함한 자석을 사용하지만 선택적으로 Dy를 첨가하는 이러한 방법으로 Dy를 2 % 정도로 할 수 있다.

2. 중희토류 원소 free형 Nd계 자석소재

Nd계 희토류 자석에서 Dy와 같은 중희토류 원소를 사용하지 않고 보자력을 높이는 방법으로 결정립을 미세화하는 방법이 알려져 있다. 일본 아이치제강에서는 $Nd_2Fe_{14}B$의 결정립 크기를 약 300 nm 정도로 미세화하여 보자력을 높이는 방법을 채택하고 있다. 결정립 크기가 작을수록 자력의 기본이 되는 각원자의 자화모멘트가 정렬되기 때문에 결정이 가지는 보자력이 높아지는 것이 알려져 있다. 또한 각 결정립의 결정방위를 한 방향으로 이방화 시킴으로써 결정립 크기가 수 μm에서 수백 μm으로 큰 소결자석과 비교해서 보자력을 크게 향상시킬 수 있다.

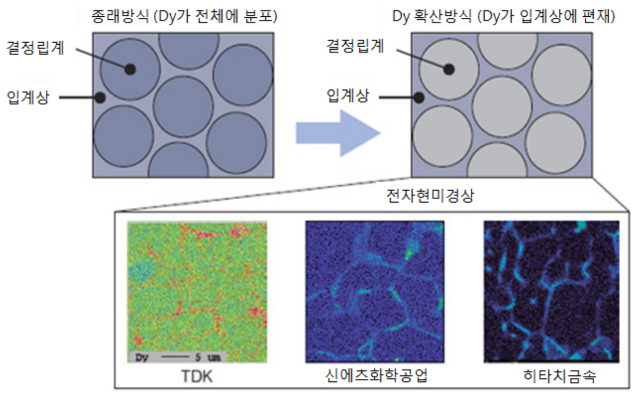

Fig. 6. (Color online) Selective diffusion of Dy into grain boundary.

결정립 크기를 약 300 nm까지 미세화시키는 방법으로 HDDR법이 이용되어 왔지만 보자력을 향상시키기 위해 Dy를 사용하지 않을 수 없었다[15, 16]. 하지만 아이치제강은 이러한 HDDR 분말표면에 Dy 이외의 합금금속을 코팅하여 보자력이 향상되는 것을 발견했다. 그 결과, Dy를 첨가하지 않고도 보자력을 약 20 kOe까지 높일 수 있었다. 지금까지 같은 보자력을 얻기 위해서는 5 % 정도의 Dy 첨가가 필요했다. 이러한 고보자력 Nd계 자성분말은 2011년부터 생산이 시작되었으며, 먼저 생산량이 많은 안티-록 브레이크 시스템(ABS)와 전동파워 스티어링(EPS), 연료펌프 등에 응용될 것이다. 이러한 부분에는 종래, Nd계 영구자석보다 자력이 약한 페라이트 자석이 사용되었지만 Nd계 영구자석을 이용하면 소형화가 가능하다. 아이치제강에서는 품질개선을 통해 최종적으로 하이브리드/전기자동차용 모터를 개발할 예정이다. 그러나 본드자석의 경우는 자분을 벌크화하기 위해 본드재가 포함된다. 그렇기 때문에 단위체적당 자분의 량은 줄어 잔류자속밀도는 소결자석의 그것에 미치지 못한다.

한편 동북대 스기모토 교수 연구팀에서는 결정립 미세화를 위하여 자석의 원료합금에서의 라멜라 간격을 줄이고 원료합금을 분쇄해서 자분을 미세하게 만드는 관점에서 연구개발을 수행 중이다. 입계상의 개선과 관련해서는 Dy를 입계상에 균일하게 분산하기 위해 새로운 방식개발을 시도하고 있다. 그 중에서 라멜라 간격의 축소를 담담하고 있는 것이 (주)산토구이다. 통상, Nd계 소결자석의 원료합금은 주상인 $Nd_2Fe_{14}B$ 상 사이에 거의 일정한 간격으로 Nd-rich 상이 형성되어있는 라멜라 구조이다. 라멜라 간격을 축소하는 이점은, 원료합금을 분쇄하여 제조하는 자분을 미세화하여도 주상 주위에 Nd-rich 상이 붙어있는 자분을 많이 만들 수 있다는 것이다. 자분의 입경에 대해서 라멜라간격이 너무 넓으면 Nd-rich 상이 붙어있지 않은 자분이 만들어져 버린다. 이것 때문에 소결하여도 주상 주위에 Nd-rich 상을 확실하게 코팅하기가 어렵다. 일반적으로, Nd계 소결자석의 원료합금은 스트립캐스팅이라는 제조방법에 의해 만들어진다. 고속으로 회전하는 드럼 표면에 용해된 합금을 부어서 급냉각하는 방식이다. 산토구에서는 그 냉각속도 등을 최적화하여 라멜라간격을 축소하기 위해 연구개발을 진행 중이다.

자분의 미세화에 관해서는 인터메탈릭이 연구개발을 진행 중이다. 조분쇄된 원료합금을 미분쇄하는 젯밀이라고 하는 방법을 개량하여 실험실 레벨에서 약 1 μm 정도의 미세한 자분을 제조하는 기술을 개발하였다. 젯밀은 조분쇄한 자분을 고속가스흐름에 투하하여 분말끼리 충돌시켜 미분쇄하는 기술이다. 통상 질소가스를 사용하지만 인터메탈릭이 새롭게 개발한 방법에서는 헬륨가스를 사용한다. 헬륨은 질소보다 가볍기 때문에 유속을 빠르게 하지 않고도 단시간에 미분쇄할 수

있어 표면산화를 최소화 할 수 있다. 또한 헬륨은 불활성가스이기 때문에 질소와 달리 Nd와 화합물을 잘 형성하지 않는다. 주목할 만한 것은 이 방법으로 미세화한 자분을 소결하기 위한 새로운 방식 'PLP(PressLess Process)'도 개발한 것이다. 자분을 미세화하면 자분의 표면적이 증가하여 Nd-rich 상이 산화되기 쉬어진다. 이것을 방지하기 위해 고안한 것이 PLP 방식이다. PLP의 최대 특징은 고농도의 아르곤 가스로 채워진 파이프 내에서 자분의 충진에서 소결까지 일련의 공정을 실시하는 것이다. 구체적으로는 먼저 호퍼에서 카본재질의 용기에 자분을 공급하고 그것을 손으로 누르는 정도의 압력으로 용기에 채운 다음, 코일을 이용하여 50 kOe 정도의 강한 펄스자장을 가하여 자화의 방향을 정렬하여 소결하면 자석이 완성된다. 종래의 소결법과는 달리 프레스를 위하여 공기 중에서 자분을 몰드에 넣거나 빼는 작업이 필요없고, 윤활제나 바인더가 적어도 되기 때문에 자분이 잘 산화되지 않고 불순물도 혼합되기 어렵다. 또한 프레스 없이도 소결체의 밀도는 프레스한 것과 거의 비슷하다. 인터메탈릭에서는 실증장치 2대를 제조하여 이미 효과를 확인하였다. 라멜라간격이 3~4 μm의 원료합금을 헬륨 젯밀로 미분쇄한 입경이 약 1 μm 의 자분을 사용하여 소결 후의 주상의 입경이 약 1.5 μm 정도로 미세한 Nd계 소결자석을 제조하여 Dy와 Tb을 첨가하지 않고 약 20 kOe 정도의 보자력을 얻었다.

3. 비 Nd계 영구자석 소재

◆ 질화철 영구자석 소재

Nd계 영구자석이 가질 수 있는 에너지양을 나타내는 최대자기에너지적의 이론치는 512 kJ/m^3(~64 MGOe)이다. 한편 공

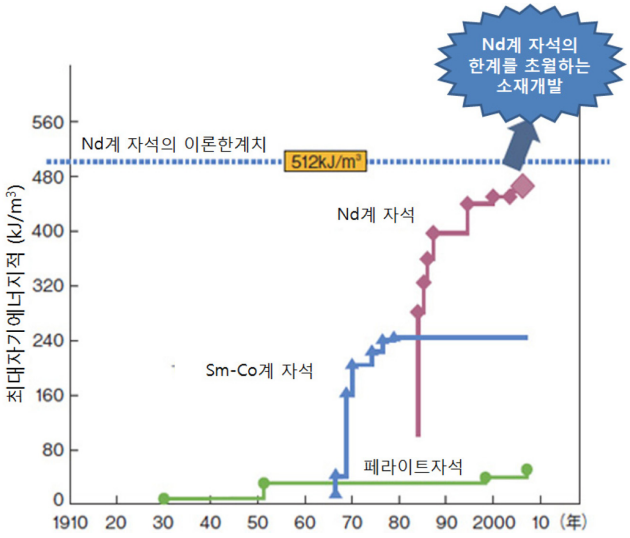

Fig. 7. (Color online) Improvement of magnetic properties of permanent magnets.

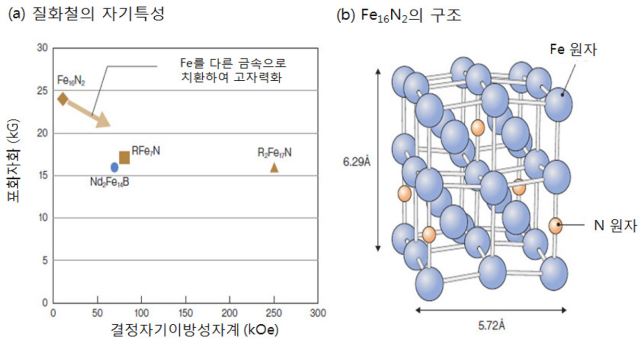

Fig. 8. (Color online) Magnetic properties and structure of iron nitride.

업제품의 경우 과거 25년간 큰 발전을 보여 최대자기에너지적이 480 kJ/m^3 정도를 육박하고 있다. 그래서 Nd계 영구자석은 가까운 미래에 자석소재로서는 한계를 맞이할 것이라는 예상과 함께 Nd계 영구자석의 성능을 능가하는 새로운 자석소재에 대한 연구가 최근 활발해지기 시작하였다. 요점은 고가인 희토류를 사용하지 않는 점이다[17].

동북대 Takahashi 교수팀은 질화철에 주목하고 있다. 질화철 중에서도 가장 주목받는 것이 $Fe_{16}N_2$이다. $Fe_{16}N_2$는 큰 자기이방성이 없어 자석으로서의 성능은 좋지 않지만 Fe보다 포화자화가 큰 Fe-Co와 거의 같은 정도의 포화자화를 가지는 것이 알려져 자력에너지를 가둘 수 만 있다면 Nd계 영구자석을 능가하는 자석소재 개발이 가능할 것으로 보고 현재 박막을 이용하여 이러한 소재를 탐색하고 있다. 자기이방성은 $Fe_{16}N_2$의 Fe원자를 다른 금속원자로 치환하는 것으로 가능할 것으로 예상된다. 또한 $Fe_{16}N_2$는 자성분말과 같이 큰 덩어리로 만드는 것이 어렵다. 그래서 자석소재의 탐색과 병행하여 Fe 원자를 포함하는 화합물에 화학적 방법을 사용하여 질소를 첨가하거나 산화환원반응과 질화반응을 이용하여 $Fe_{16}N_2$의 덩어리를 합성하는 것도 시도되고 있다. 2015년까지 공업화를 목표로 현재 프로젝트가 진행 중이다.

◆ 한계에 도달한 전기강판

자성소재의 개발과 별도로 모터를 고성능화하려는 시도도 있다. 고정자 전자석의 철심과 모터의 로터에 사용되는 소재를 개량하려는 것이다. 현재, 철심과 로터에는 일반적으로 적층전기강판을 이용하고 있다. 적층전기강판은 모터내의 손실을 줄이기 위하여 약 0.3 mm 정도의 규소철을 적층한 구조로 되어 있다. 모터 내부에는 로터를 돌리기 위해 회전자계가 발생하지만 그 결과 철의 내부에 와전류가 생기고, 와전류는 재료 내부저항에 의해 열에너지로 변한다. 적층전기강판은 와전류의 발생이 적어 일반적인 철보다도 손실이 적다. 하지만 적층전기강판의 성능은 최근 25년간 거의 변화가 없을 뿐만 아니라 최근 모터는 소형화에 따라 고회전이 요구되어

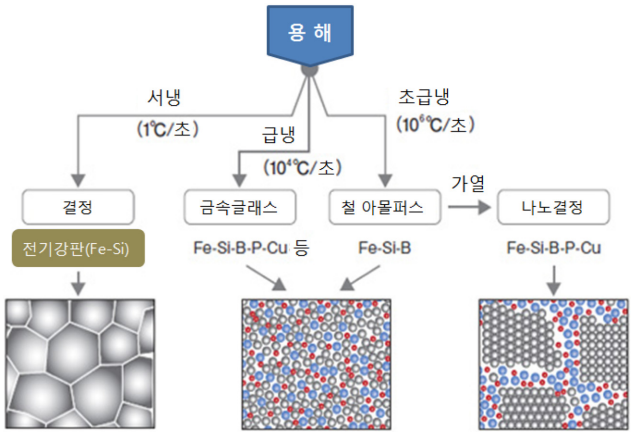

Fig. 9. (Color online) Production process of materials for motor core.

지고 있다. 철손은 자계변화 주파수의 2승에 비례하기 때문에 고회전에 대비하여 보다 철손이 적은 재료가 필요하다.

이러한 문제를 해결하기 위해 최근 많은 연구가 진행 중이지만, 가장 주목받고 있는 것이 금속분말을 수지와 함께 경화시킨 압분자심을 사용하는 방법이다. 그 결과, 철분끼리 전기적으로 절연되기 때문에 전기저항이 높고 와전류가 흐르기 힘들게 된다. 하지만, 압분자심은 철의 밀도가 낮아 적층전기강판과 비교해서 포화자속밀도가 낮아져버리기 때문에 적층전기강판보다 모터의 소형화와 고출력화에 불리하다. 포화자속밀도가 클수록 많은 자력을 통과시킬 수 있기 때문에 보다 손실이 적고 포화자속밀도가 큰 비정질금속의 사용이 검토되기 시작했다. 그중에서도 유망한 것은 동북대학 금속재료연구소 Makino 교수팀과 NEC Toking이 공동개발하고 있는 '나노결정'으로 불리는 소재이다. 이 소재는 10~20 nm 크기의 철 결정 주위에 규소(Si), 붕소(B), 인(P), 동(Cu)등이 싸고 있는 구조를 가진다. 질량비는 97 %의 철을 함유하는 전기강판과 비교해 비중은 크지 않지만 93~95 % 정도의 철을 함유하고 있어 압분철심과 다른 재료보다 포화자속밀도가 높다.

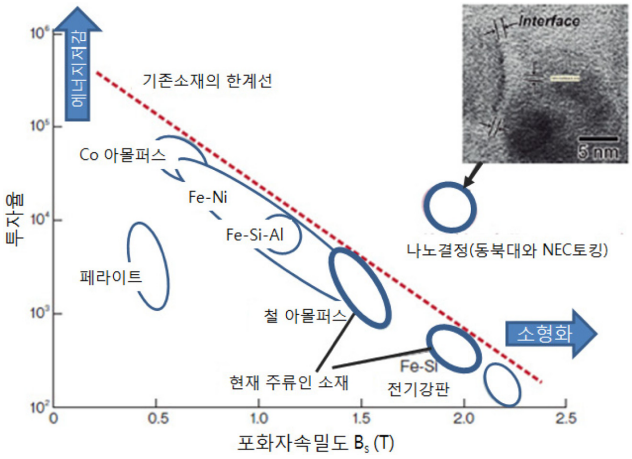

Fig. 10. (Color online) Nano crystalline developed by Tohoku University and NEC toking.

IV. 맺음말

21세기 지속가능한 사회를 구축하기 위해 신재생 에너지와 같은 에너지 생산방식의 새로운 전환은 매우 중요하다. 하지만 생산된 에너지가 실제 제품에서 여러 가지 형태의 다른 에너지로 변환될 때의 효율 또한 매우 중요하다. 영구자석 모터는 이러한 에너지변환의 핵심 부품으로 에너지 사용효율에 가장 밀접한 관계가 있다. 예를 들어 전체 에너지 소비량의 약 50 % 정도가 모터에 소비된다고 조사되어 있다. 따라서 모터 효율을 1 %만 향상시켜도 전체에너지 소비량을 크게 줄일 수 있다. 이러한 에너지 저감은 신재생 에너지 사용효율 향상 뿐 만 아니라 현재 인류가 의존할 수밖에 없는 원자력 발전의 안전상의 위협을 조금이나마 줄여주는 효과도 있다. 또한, 친환경자동차로 대표되는 차세대 산업분야에서는 기존 영구자석보다 높은 특성의 차세대 영구자석에 대한 요구가 커지고 있다. 차세대 영구자석에는 현재의 기술로는 Dy와 같은 중희토류 원소가 필수적으로 사용되어야 한다. 하지만 본문에서 언급한 것처럼 중희토류 원소의 매장량과 매장장소 그리고 광산개발에 따른 환경오염 문제 등으로 앞으로 수급에 차질이 불가피해 보인다. 한편, 우리나라의 주력산업인 자동차, 정보전자 산업의 지속적인 성장을 위해서는 기존 제품들의 트랜드를 친환경 쪽으로 전환하지 않으면 안 되는 시점에 있다. 이러한 제품의 트랜드 전환과 지속적 성장을 위해서는 중희토류를 사용하지 않는 고특성 Nd계 영구자석의 사용이 필수적이라고 할 수 있다. 현재 일본을 중심으로 한 선진국에서는 이러한 차세대 영구자석의 원천기술을 확보하기 위해 국가주도의 집중 투자가 이루어지고 있다. 그것은 차세대 영구자석이 차세대 산업의 핵심소재로 차세대 산업 시장을 선점하기 위한 전제조건이기 때문이다.

한편, 국내에서도 2014년 Nd계 영구자석의 물질특허 만료시점이 다가오고 향후 수요의 급증이 예상됨에 따라 최근에는 포스코, 삼성, LG, 쌍용머티리얼, 태평양금속, 경원페라이트 등의 기업에서 희토류자석 분야 신규사업 추진을 검토하는 등 이 분야에 대한 국내기업의 관심이 증가하는 추세이다. 또한, 2008년부터는 희토류자석 분야에 대한, 2011년부터는 중희토류-free Nd계 영구자석 분야에 대한 소재원천 기술개발사업이 시작됨에 따라 국내 다수의 전문가 집단이 참여하는 종합적인 연구의 단초가 마련되었다고 할 수 있다. 하지만 보다 실질적이고 효율적인 차세대 Nd계 영구자석 개발을 위해서는 산-학-연의 전략적이고 유기적인 협력이 필요한 시점이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] Trend in Electric Vehicle Market, KETI (2010).
[2] Trend in Hybrid Vehicle Industry, KETI (2011).
[3] 2010년도 희유금속세미나 자료집, 해외자원개발 협회 (2010).
[4] S. Hirosawa, Proc. 21th Int. Workshop on REPM and Their Applications, 16 (2008).
[5] M. Sagawa, Proc. 21th Int. Workshop on REPM and Their Applications, 183 (2010).
[6] S. Sugimoto, Spring Meeting of the Japan Institute of Metals, S3.1, 113 (2009).
[7] S. Hirosawa, T. Nishiuchi, T. Murata, and N. Nozawa, Spring Meeting of the Japan Institute of Metals, S3.2, 113 (2009).
[8] M. Sagawa, F. Fujimura, N. Togawa, H. Yamamoto, and Y. Matsuura, J. Appl. Phys. **55**, 2083 (1984).
[9] J. J. Croat, Technical Report of Magnequench (1990).
[10] Y. Luo, BM News **33**, 122 (2005).
[11] Y. Luo, Magnews, Winter, 32 (2008).
[12] Y. Luo, Magnews, Summer, 20 (2008).
[13] http://tdk.co.jp/techjournal/vol08_hal/index.htm.
[14] D. Harimoto and Y. Matsuura, Hitachi Metals Technical Review **23**, 29 (2007).
[15] I. R. Harris and P. J. McGuiness, J. Less-Common Metals **172**, 1273 (1991).
[16] O. Gutfleisch, M. Verdier, and I. R. Harris, J. Alloy. Compd. **196**, L19 (1993).
[17] J. Ozawa, Trend in Science & Technology, NEDO (2010).

Trend in Research and Development Related to Motors and Permanent Magnets for Solving Rare-earth Resources Problem

J. G. Lee* and J. H. Yu
Powder/Ceramics Division, Korea Institute of Materials Science, Changwon 642-831, Korea

H. J. Kim
Eco-Materials and Processing Department, Korea Institute of Industrial Technology, Inchon 406-840, Korea

T. S. Jang
Department of Hybrid Engineering, Sunmoon University, Asan 336-708, Korea

(Received 5 March 2012, Received in final form 17 April 2012, Accepted 17 April 2012)

Since Nd-Fe-B magnet was first synthesized in 1983, many new applications have emerged in the past two decades. With regard to motor market, it will expand because of strong energy saving requirements from the automobile and electric application markets. Especially, permanent magnet motors for hybrid and electric vehicles are drawing great attention and the usage of Nd-Fe-B magnets will increase all the more hereafter. There is, however, a serious problem as motors in such eco-friendly cars are said to operate in high temperatures of about 200 ^{o}C. Nd-Fe-B magnet has a drawback of dramatically decreasing coercive force with the rise of temperature. In order to improve this aspect. the best way is to add dysprosium (Dy) into the magnet. So, Dy has become an essential element for Nd-Fe-B high-performance magnet as it helps to maintain coercive force even at high temperatures. On the other hand, the rare earth resources in the earth crust are eccentrically-located and its majority is produced in China. There is a need to reduce its usage as, especially compared to light rare earth elements as neodymium (Nd) and samarium (Sm), heavy rare earth elements including Dy are unevenly distributed to a dramatic degree, their output low, and their prices are about 10 times that of Nd. The present article includes a summary of the trend in research and development of motors and permanent magnets to solve rare-earth resources problem.

Keywords : Nd-Fe-B, magnet, motor, rare earth