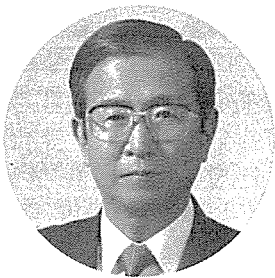


자성재료로서의 희유금속

희유금속의 定義는 명확하지 않지만 일반적으로 철강 및 4대 非鐵金屬을 제외한 모든 금속을 포함하는 것으로 해석한다면 대부분의 금속계 磁性材料들은 희유금속재료로 볼 수 있다. 니켈, 코발트와 같은 희유금속들은 오래전 부터 주요 자성재료의 基本元素로서 사용되어 왔으나, 최근에는 희토류계가 새로운 자성재료의 원소로서 각광을 받고 있다. 특히 고성능 영구자석과 광자기기록매체와 같은 新磁性材料에서 희토류금속의 역할은 절대적이라 할 수 있고, 희토류금속이 근본적으로 지니고 있는 원천적인 자기특성으로 볼 때 장래에도 풍부한 성장 잠재력을 보유하고 있다고 생각된다.

“市場性과 용도 크게 成長”



姜 日 求

〈韓國과학기술연구원 材料工學部長〉

本稿에서는 희유금속을 활용한 자성재료들에 관해 전반적으로 살펴 보고, 최근들어 눈부시게 발전하고 있는 희토류계 永久磁石에 초점을 맞추어 이의 발전배경, 공정, 특성, 응용 및 전망에 관하여 논의함과 아울러 韓國과학기술연구원에서 수행한 희토류계 영구자석 研究結果의 일부도 언급하고자 한다.

希有金屬이라 불리우는 금속의 범위가 어디까지이냐 하는 데는 넓게 보는 견해와 좁게 보는 견해의 두가지가 있고, 어느 쪽을 택하느냐 하는 것은 해석하는 사람에 따라 다르고, 또한 경우에 따라 다르다. 넓게 보는 견해는 철 이외는 모두라고 하는 생각에서 부터 철과 동, 알루미늄, 연, 아연, 즉 4대 非鐵金屬 이외에는 모두 稀有金屬이라고 말하는 것이며, 좁게 보는 견해는 티타늄, 지르코늄, 베릴륨, 규소, 니오븀, 코발트, 희토류금속 등등 신금속이라고도 불리

우는 금속들만을 포함하는 것이다.

이러한 희유금속들이 활용되는 磁性材料에 대해 살펴볼 때, 광의로 해석해서 니켈까지를 포함시킨다면 자성재료인 규소강판을 뺀 모든 용도의 자성재료를 희유금속재료라 볼 수 있다. 따라서 희유금속을 활용한 자성재료는 매우 종류가 다양한 특성을 나타내고 있으나, 물량적으로 볼 때는 규소강판이 모든 다른 자성재료를 합한 것 보다 큰 市場規模를 가지고 있다.

자성재료를 크게 나누면 연자성재료(자성재료), 경자성재료(영구자석재료)와 자기기록매체재료의 세 가지가 있다. 앞서서도 말한 바와 같이 규소강판 외에는 모두 희유금속재료라 할 수 있고, 따라서 희유금속 자성재료라 하면 거의 모든 자성재료를 뜻하게 된다.

제약된 지면에 많은 磁性材料에 대해 기술한다는 것은 무의미하다고 생각되어 본고에서는 희유금속 중 희토류금속을 포함하는 자성재료에 관해 기술하고자 한다. 최근에 크게 관심의 대상이 되고 있는 희토류금속을 포함한 자성재료로서는 永久磁性材料인 희토류금속-천이금속합금과 자기기록매체재료의 하나로서 광자기기록매체재료인 희토류금속-철, 코발트합금이 있겠으나 여기에서는 희토류 永久磁性材料에 대해서만 기술하기로 한다.

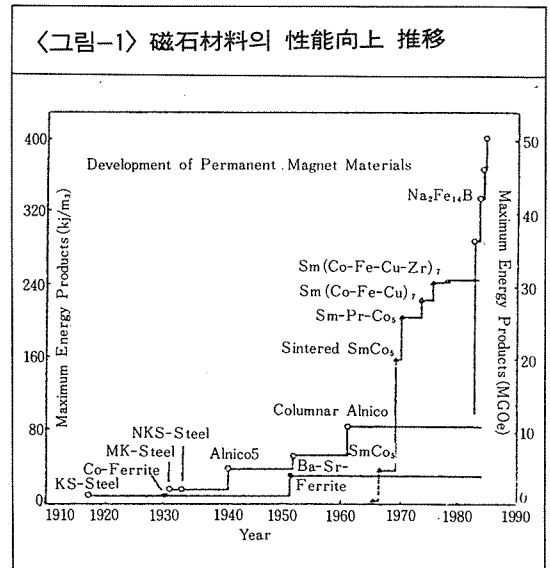
희토류 永久磁石의 발전

먼저 영구자석재료의 발전사를 살펴보기 위해 <그림-1>에 금세기 초부터 현재에 이르기까지 영구자석의 특성을 대표할 수 있는 최대 에너지적의 向上推移를 나타내었다. 여기에서 보는 바와 같이 영구자석은 과거 80년 사이에 매우 괄목할 만한 발전을 이룩하여 왔고, 앞으로도 이러한 발전은 계속될 것으로 전망된다. 최근 영구자석분야의 획기적인 特性向上은 1960년대 후반과 1980년대 중반에 있었다. 이 두번의 비약적인 영구자석 성능의 향상은 모두 희토류 영구자석의 출현에 기인하였으므로 최근 영구자석분야의 관심은 거의 이들 희토류계 永

久磁石에 집중되고 있는 실정이다.

희토류자석의 역사는 1966년에 Stranat 등이 YCo_5 화합물에서 큰 이방성을 발견하고, 곧 $SmCo_5$ 영구자석을 발견한 것으로 부터 시작한다. 그 후의 발전을 보면, 第1世代로서 $SmCo_5$ 을 기초로 한 Sm-Co 1-5 자석이 최대 에너지적(BH) max가 20MGOe을 나타내었고, 第2世代로서는 (HB) max가 30 MGOe인 Sm_2Co_{17} 을 기초로 한 Sm-Co 2-17 자석, 第3世代로는 1983년에 나타난 (BH)max 40 MGOe인 $Nd_2Fe_{14}B$ 가 기본조성인 Nd-Fe-B 자석으로 이어진다.

<그림-1> 磁石材料의 性能向上 推移



다음에는 왜 $SmCo_5$ 와 Sm_2Co_{17} 이 영구자석재료로서 우수함을 생각해 보기로 하자. 3d 천이금속(T)과 4f 천이금속(희토류금속, R)은 여러 조성비의 金屬間化合物을 형성하는 것이 잘 알려져 있다. 이러한 R-T 화합물에서는 강한 3d-3d 교환상호작용(exchange interaction)이 고온에서의 열적 흐트러짐에 대해 자기적 질서를 안정하게 유지하고 4f-3d 자기적 결합을 유지하게 함으로써, 강한 4f 이방성을 실은 웬슨 위까지 갖게 한다. 이러한 이유 때문에 R-T계 化合物이 영구자석재료로서 가장 중요한 特性을 지니게 해 준다.

위에서 R과 T사이에는 여러 조성의 화합물이 $RT_2(\text{fcc})$ 에서 $RT_5(\text{hex})$ 사이에 존재하며, 관심의 대상인 RT_5 의 단위 셀은 $T(=Co)$ 의 hcp가 기본이 되어 있다. 여기서 희토류금속 중 Gd 보다 경희토류에서는 T의 자기모멘트가 R의 자기모멘트와 평행으로 결합하고, Gd 보다 중희토류에서는 R의 자기모멘트가 T의 자기모멘트와 역평행으로 결합하는 것이 알려져 있다. 따라서 높은 포화자화가 요구되는 영구자석으로서는 중희토류보다 경희토류가 유망하게 된다. 이것은 다른 한편으로 경희토류가 중희토류에 비해 존재량이 많다는 工業的 자원사정으로 보아서도 매우 유리하다고 할 수 있다.

RT_5 중에서는 $SmCo_5$ 가 가장 영구자석 특성이 뛰어나므로, 이 조성을 기본으로 하고 Sm의 일부를 미쉬메탈(misch metal), Ce, Pr, Nd 등으로 치환한(BH)max 15-28 MGOe급의 자석들이 商業的으로 제조되어 널리 사용되어 왔다.

또 하나의 영구자석인 Sm_2Co_{17} 의 개발배경을 살펴보자. 상태도 상에서 Sm_2Co_{17} rhombohedral 상은 $SmCo_5$ 보다 Co rich쪽에서 금속간화합물로서 존재한다. 이것도 $SmCo_5$ 에 가까운 결정자기이방성을 보유하나, Sm_2Co_{17} 만으로는 양호한 磁石特性이 얻어지지 않는다. 여기에서 $Sm_2(CoX)_{17}$ 은 $2(SmCo_5X_{3.5})$ 라고 간주 되기 때문에 $X_{3.5}$ 로서 Co 외의 非戰略元素의 첨가가 가능하였다. 이러한 이유로 제2세대 희토류자석으로서의 공업화가 추진되어, X로서는 Mn, Cr 또는 Fe, Ni, Cu로서의 치환과, 더 나아가서 Ti, Zr, Hf 등의 첨가로써 (BH)max 33 MGOe 까지의 영구자석이 얻어지고 있다.

第3세대 희토류 영구자석의 개발배경을 보면, RT 자석이 가장 우수한 영구자석 특성을 갖는다고 생각되고 있지만 R로서 Sm 이외의 금속, T로서 Co 이외의 금속이 없나를 찾게 되었다. 그 결과 Nd과 Pr이 희토류금속 중에서도 부존량이 훨씬 풍부하고 무엇보다도 Sm 보다 더 큰 자기모멘트를 갖고 있다는 것을 알게 되었다. 한편 Fe는 Co 보다 훨씬 더 풍부할 뿐만 아니라, 값도 싸고 Co 보다 더 큰 자기모멘트

를 갖고 있다는 것이 알려져 있어 R-Fe계에 대해 정력적으로 연구하였으나, Nd-Fe나 Pr-Fe 화합물은 전혀 좋은 자석특성을 나타 내지 않았다.

이러한 이유로 R-Fe 化合物은 포기하고 R-Fe-X계에 대한 정력적인 연구 결과, $R_2Fe_{14}B$ 화합물을 찾아내어 1983년에 스미스 토모특수 금속(주)의 사가와 등이 (BH)max가 38 MGOe인 Nd-Fe-B 자석을 발표하였다. 이렇게 해서 제3세대 영구자석의 장이 열린 것이다.

한편 이와는 별도의 흐름으로 1980년에 미국 GM의 Croat는 비정질리본을 만들기 위한 melt spinning법으로 Nd-Fe와 Pr-Fe 합금리본을 제조하고 이것을 600~700°C에서 열처리하면 높은 보자력을 얻을 수 있는 것을 발견하였다. 또 美國 海軍研究所의 N.C.Koon은 1981년에 $(FeB)_{0.9}La_{0.06}Tb_{0.06}$ 과 같은 비정질리본을 역시 600~700°C에서 소둔하면 보자력이 9kOe에 도달하는 것을 발견하였다. 이러한 기반 위에서 1983년에는 GM, GE, 캔사스대학, 해군연구소 등에서 R-Fe-B-(Si)의 非晶質 또는 초급냉한 리본을 적절하게 미세 재결정화시킨 재료에서 (BH)max 13-14 MGOe를 얻었다.

Nd-Fe-B 永久磁石

그후 Nd-Fe-B 자석은 계속적인 발전을 거듭하여 1984년에는 40 MGOe, 1986년에는 50.6 MGOe가 얻어졌다. 이것들은 실험실 data이고 화합양론비의 $Nd_2Fe_{14}B$ 化合物은 65 MGOe까지 얻을 수 있다는 이론적 근거가 있어 가능한 양론비에 가까운 조성의 자석을 얻도록 하는 노력이 이루어지고 있다. 그러나 실제 제조에 있어서는 이러한 極限的 特性을 달성하기란 어렵고 40 MGOe 급이 양산화되느냐 하는 것이 당면한 과제이다.

磁氣特性的 온도변화가 크다는 점과 내식성이 나쁘다는 문제가 Nd-Fe-B 자석의 결점으로 알려지고 있다. 이 문제점들을 해결하기 위해 여러 연구가 시도된 결과 Co를 첨가함으로써 가

역온도계수의 개선을 도모할 수 있고, 이와 아울러 Dy, Al 같은 첨가물에 의한 보자력의 增大効果 등이 발견되어 최근에는 실용적으로도 100℃ 이상의 온도에서 사용할 수 있게 되었다. 그러나 보자력을 증가시키는 첨가물은 비자성체로서 포화자화값을 저하시키기 때문에 용도에 따라 적절히 선택하여 사용할 필요가 있다. 내식성의 향상방안으로서는 재료자체의 내식성 향상도 시도되고는 있으나, 피복방법이 실제적으로 가장 효과적이다. Al이온 크로메트, Ni도금, 에폭시 수지도장 등이 일반적으로 實用化되고 있으며, 이것도 용도에 따라 골라서 사용해야 한다.

Nd-Fe-B 자석의 製造方法

Nd-Fe-B 자석의 제조방법에는 높은 보자력 특성을 얻는 基本的方法으로 잘 알려져 있는

분말야금 방법인 소결자석 제조방법과 금속냉각법을 사용하는 등방성 플라스틱 자석 제조법 및 최근에 개발된 주조 잉고트를 열간가공함으로써 얻는 이방성자석과 이방성플라스틱 자석 製造方法 등이 있다.

한편 출발연료 쪽에서 보면 희토류금속에서 시작하는 방법과 희토류산화물에서 시작하는 방법이 있다.

이러한 제조방법을 간략하게 도시한 것이 <그림-2>이며, 이에 관한 자세한 설명은 생략하기로 한다.

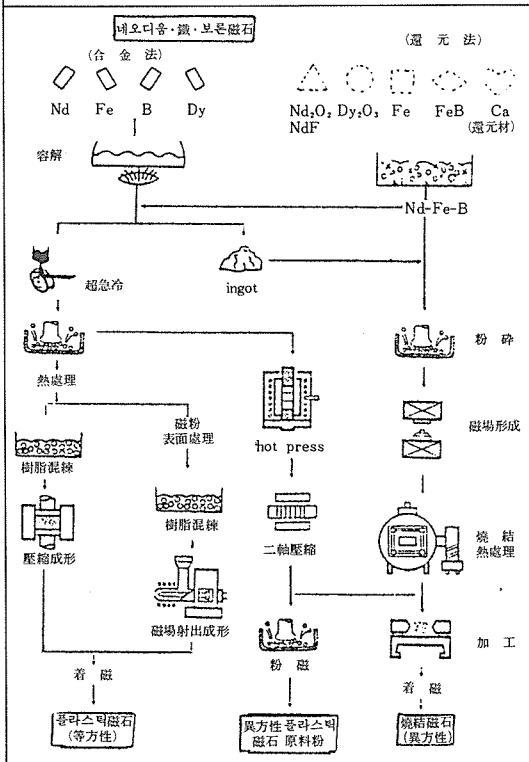
Nd-Fe-B 자석의 용도

현재 Nd-Fe-B 자석이 사용되는 최대의 용도는 컴퓨터 주변기기, 특히 뷔이스 코일모터(VCM)로서 대표되는 기록장치에의 응용이며, 이 경향은 당분간 변할 것 같지 않고 컴퓨터의 보급과 더불어 용도는 더욱 擴大되리라 생각된다. 여기에는 광디스크 플레이어의 헤드 아크세스용 VCM과 RDD장치의 헤드 아크세스용 VCM들이 있다.

다른 하나는 핵자기공명 단층촬영장치(MRI)의 바이아스 자장용으로서 종래에는 초전도 마그네트가 쓰였으나 근래 양호한 특성과 가격때문에 Nd-Fe-B 자석을 이용한 MRI가 實用化되어 급속히 보급되어 가고 있다. 또한 브러시리스 소형모터의 로터용 자석, 대형 제너레이터의 로터 등으로의 응용도 기대된다. 自動車에는 많은 수의 모터, 아크추에이터 및 센서가 사용되고 있고, 특히 스타터 모터용으로 본격적인 응용이 이루어진다면 대단히 큰 수요가 예상된다.

다음으로는 희토류자석의 용도와 그 변천을 살펴보기로 한다. 지금까지 美國에서는 산업용이나 군수용으로 희토류자석을 많이 사용해 왔

<그림-2> 希土類磁石의 製造工程

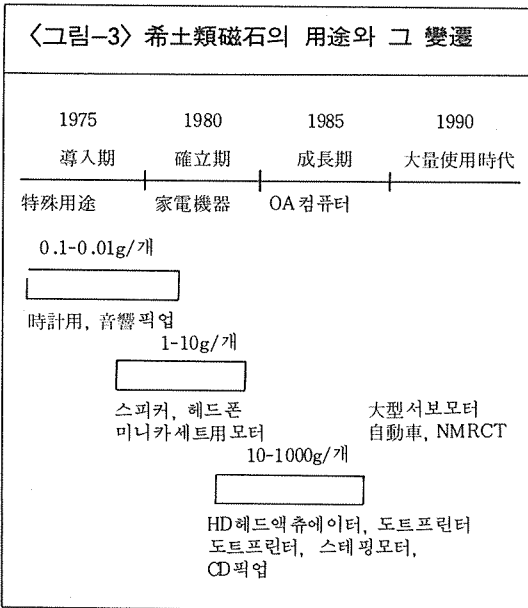


이 글은 7월 5~6일 2일간 한국과학기술단체 총연합회가 주최한 「'89국내외 한국과학기술자 학술회의 하계심포지움」에서 발표된 것이다. <편집자 註>

고, 日本에서는 주로 민생용으로 사용하여 온 것이 큰 특징의 하나이다. 우리나라의 경우에는 미국 보다 일본과 유사한 수요패턴을 나타내 왔으므로 여기에서는 일본의 예를 들어 응용면에서의 동향을 살펴보기로 한다. <그림-3>에서 보는 바와 같이 1979년대 말까지가 第1段階로, 이 시기에는 스테레오의 픽업, 시계 모터, 스피커가 주용도이었으며, 가격이 비싸고 생산량도 미미하였다. 第2段階는 마이크로 테이프 레코더의 릴용 모터나 헤드폰 등의 오디오, 비디오용에 대량으로 쓰이기 시작한 1980년대 초부터이다. 第3段階는 컴퓨터 주변기기를 중심으로 산업용에 널리 이용되기 시작한 1985년 이후가 되며, 이 단계에서는 日本의 응용분야와 美國의 응용분야가 중복되는 부분이 많아졌고 이 시기에 Nd-Fe-B 자석이 출현해서 점차 그 영역을 넓혀왔다. 앞으로는 자동차용 모터, 아쿠추에이터 및 대형자기회로 등으로의 應用이 크게 기대되고 있다.

Nd-Fe-B 자석의 수요

희토류자석의 생산은 1970년대까지는 미미하였으나, 그 후 급속한 성장을 거듭하여왔다. 일본의 예를 들면 1985년까지는 500톤 미만이었으나, 1986년에는 648톤, 1987년에는 784톤이던 것이 1988년에는 1,000톤을 돌파하여 1,071톤에 이르렀고, 판매액수로는 383억엔에 도달하였다. 세계적인 생산량은 확실치 않으나 일본의 생산량이 반 이상을 차지한다고 볼 수 있다. 1988년의 대폭적인 生産量 增加는 Nd-Fe-B 자석의 본격적인 채용에 기인한 것이며, 앞으로 Nd계 자석의 생산이 Sm계 자석의 생산을 훨씬 능가할 것으로 예상되고 있다. 차차 자동차 등에 本格的으로 쓰이면, 2000년에 가서는 Nd-Fe-B 자석의 시장은 10억불에 도달할 것으로 전망되고 있으며, Nd-Fe-B 자석에 대한 현재의 예상으로는 어느 시점에 이르면 현재 永久磁石分野의 최대 시장을 점유하고 있는 페라이트계 자석의 수요를 상회하게 될 것으로 생각되고 있다.



結 論

지금까지 最近 磁性材料分野에서 주목되고 있는 희토류 영구자석에 대해 개괄적으로 살펴 보았다. 제조기술이나 응용면을 볼 때, 이 희토류 영구자석은 아직 성숙단계에 접어든 재료가 아니라 계속적인 발전이 이루어지고 있는 도입기의 재료이므로 시장의 成長速度도 빠르고 용도 개척도 광범위하게 진행되고 있다. 따라서 희유금속을 활용한 대표적인 자성재료의 하나로서 희토류계 자성재료는 앞으로 그 展望을 주시해 볼 價値가 충분하다고 생각된다.

본고에서는 지면의 제약으로 인해 희토류자석에 대한 상세한 내용을 소개하지 못하였음을 유감으로 생각한다.

희토류 영구자석은 아직 성숙단계에 접어든 재료가 아니라 계속적인 발전이 이루어지고 있는 도입기의 재료이므로 시장의 成長速度도 빠르고 용도 개척도 광범위하게 진행되고 있다. 따라서 희유금속을 활용한 대표적인 자성재료의 하나로서 희토류계 자성재료는 앞으로 그 展望을 주시해 볼 價値가 충분하다고 생각된다.