

希土類磁石

신 용 진

(명지대 공대 전자공학과 교수)

1. 序 論

최근의 자석은 單磁區粒子理論에 의하여 개발되었다. 즉, 높은 磁氣異方性定數 K_u 를 갖는 물질을 그 單磁區가 되는 $1\sim 2\mu\text{m}$ 정도의 미립자로 하여, 磁化容易方向을 갖출다음 굳어지면, Fig.1과 같은 角型的 $4\pi I$ -H 히스테리시스를 갖는 자석재료가 얻어진다. 그 잔유자속밀도 B_r 과 고유보자력 H_{ci} 는 각각

$$B_r = 4\pi I_r = 4\pi I_s \quad (1)$$

$$H_u = 2K_u / I_s \quad (2)$$

로 주어진다. 여기서 I_s 는 그 물질의 포화자화이다. 응용면에서는 자석재료의 특성곡선은 일반적으로 B-H 減磁曲線으로 표시된다. $H_{ci} \geq 1/2 B_r$ 을 만족하는 충분히 높은 고유보자력을 갖는 재료에서는 그 B-H 減磁曲線은 Fig.2(a), (b)와 같이 된다. 또 結晶磁氣異方性에 의한 높은 K_u 를 가지며, 높은 고유보자력을 갖는 최근의 자석에서는, 그 최대 에너지積의 값은

$$(BH)_{\max} = 4\pi^2 I_s^2 \quad (3)$$

으로 주어지는데, 일반적으로 재료의 포화자화에 의해서 결정된다. 따라서 고성능의 자석을 개발하기 위해서는, 높은 포화자화를 갖는 물질에 충분한 고유보자력의 부여가 요구된다.

이들 재료를 각각 $2\mu\text{m}$ 이하로 분쇄하여, 자계중에서 磁化容易方向을 갖도록하고 압축한 다음, 고온에서의 소결과정을 거쳐서 자석재료로 만들게 된다(Fig.3 참조).

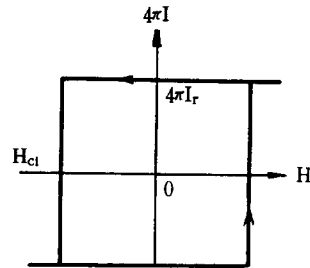


Fig. 1 $4\pi I$ -H hysteresis loop of a single domain particle.¹¹⁾

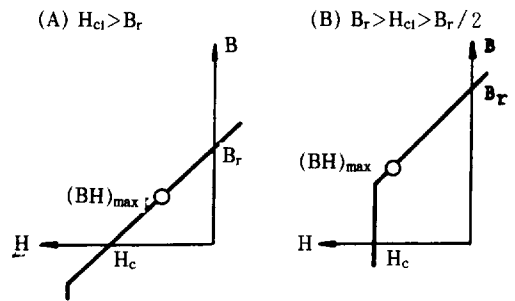


Fig. 2 Demagnetization curve of an advanced permanent magnets.¹¹⁾

이에 의해서 얻어지는 소결재료는 물질 본래의 밀도에 상당히 가까운 상태가 되는데, 원래의 미립자는 서로 접합 재결합으로 수 μm 이상의 粒度를 갖는 다결정이 된다.

최근의 자석은 이와같은 소결체로서 실용이 되는데,

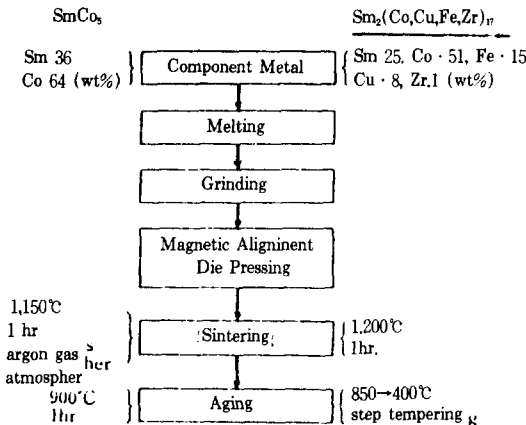


Fig. 3 Production steps for sintered RE-Cobalt magnets.⁵⁾

재료의 강도면에서나, 평균포화자화의 면에서도, 소결온도를 높게 하는것이 바람직 하다. 그런데 소결온도를 높게하면, 소결체의 結晶粒度가 너무 커져서, 고유보자력이 떨어져 $(BH)_{max}$ 의 열화를 초래하게 된다. 일반의 실용소결자석의 보자력은 일반으로 식(2)로 계산되는 이론값을 크게 밀돌게 된다. 그런데도 충분히 높은 고유보자력을 나타내어서 고성능의 자석이 될수 있는 것이다.

필자는 최근 각 분야에서 크게 주목을 받고 있는 希土類磁石가운데 그 대표적인 것 몇가지를 개략적으로 소개하고자 한다.¹¹⁻¹²⁾

2. 希土類磁石

希土類磁石은 希土類 R과 Fe 또는 Co로 형성되는 金屬間化合物을 主相으로 하는 최신의 재료이다. R-Fe, R-Co化合物의 상당수는 4f電子의 강한 磁氣異方性과 3d電子의 강한 交換相互作用이, 4f-3d 상호작용에 의해서 결합되어, 고성능영구자석재료로서 이상적인 성질을 나타낸다. 1960년대 후반에 $SmCo_5$ 형 燒結磁石이 최초로 등장하여 $(BH)_{max}=20MG0e(160kJ/m^2)$ 를 얻으므로 많은 사람을 놀라게 하였다. 1970년대에는 Sm_2Co_{17} 형 자석이 개발되고, 이어서 $30MG0e(240kJ/m^2)$ 의 벽을 깨었다.

Sm-Co化合物의 磁氣異方性에 대해서 주의를 받고있는 것은 Sm으로서, Co가 아니라는 사실이, 이들 化合物의 기초적인 연구에 의하여 밝혀졌는데, 당시, 고성능자석에 Co가 불가결이라고 하는 고정관념을 불식시키는 것은 매우 곤란하였다.

RFe자석의 연구는 SmCo자석이 개발된 이래, 미미하

게 이어져 왔었는데, 1970년대 후반의 Co의 품귀시기에 가속이 되었다. 그 결과 1980년대에 들어와서 몇개의 연구진이 독자적으로 그 목표에 도달할 수가 있었다. 그것은 Sm보다 자기모멘트가 크고, 자원이 10배나 풍부한 Nd, Pr과, Co에 비하면 무진장이라 할수 있는 Fe의 새로운 化合物 $Nd_2Fe_{14}B$ 였다.

따라서 필자는 $SmCo_5$, Sm_2Co_{17} 및 $Nd_2Fe_{14}B$ 를 주로한 希土類磁石에 관해서, 합금조성과 보자력, 재료의 종류와 특성의 비교 및 이들의 응용에 관해서 간단히 기술한다.

2.1 $SmCo_5$ 燒結磁石

希土類가운데 최초로 주목된 것은, $CaCu_2$ 형 6방정구조를 갖는 RCO_5 형의 金屬間化合物이었다. 처음에는 R로서 Y, Gd 등이 주목되었으나, 이윽고 $SmCo_5$ 金屬間化合物이 우수한 자석이 될수 있다는 사실이 발견되었다. 미국, 유럽을 중심으로 하여, 그 燒結磁石의 개발이 추진되어 $SmCo_5$ 燒結磁石은 1970년에 들어서면서 최고 성능의 영구자석으로서 실용화 되기에 이르렀다. 이 자석을 종종 1-5형 希土類磁石이라고도 하는데, 이것을 구성하는 化合物은, $112 \times 10^6 \text{ erg/cm}^2$ 라고 하는 매우 큰 結晶磁氣異方性定數를 갖는 것으로서, 單磁區粒子理論에 의하면, 높은 보자력이 기대된다. 이 재료의 경우도, Fig.3에서와 같이, 미분말로 분쇄하여, 자계중에서 배향하고 압축하여, 최후에 소결하는 방법이 취해졌다. Sm-Co化合物은 化學量論的 조성 보다도 약간 Co 쪽으로 치우친 不均일 相域을 갖는 부정化合物이다. 燒結磁石에서는 그보다도 Sm쪽으로 치우친 조성의 합금모재로부터 제조하는 편이 높은 보자력을 얻을 수 있다는 사실이 알려져 있다. 이와같이 해서 만들어지는 燒結磁石은 직경 5~10 μm 정도의 입자로된 다결정체로서, 소량의 Sm_2Co_{17} 相의 입자가 혼재한다. 그 자기특성은 $Br=8.9kG$, $H_{ci} \sim 25kOe$, $(BH)_{max} \sim 20MG0e$ 에 달한다. 이것은 당시 전세계의 주목을 받았던 것은 말할 것도 없다. 특히 1-5형 자석의 고유보자력은 아주 큰 값으로서, 현재도 이 기록을 유지하고 있다. 따라서 그 B-H減磁曲線은 H축과 45°를 이루는 직선으로 표시되며, 이상적인 현대 자석의 형태를 지키고 있다.

그런데, 單磁區粒子理論에 의해서 기대되는 고유보자력 290kOe와 비교하면 소결 $SmCo_5$ 의 실제 측정값은 보통것의 1/10 정도이다.

위에서 기술한바와 같이, $SmCo_5$ 자석의 보자력은 대단히 크기 때문에 보통의 방법으로는 측정이 곤란하였다. Fig.4는 펄스자계에 의한 減磁曲線計測技術로 얻어낸 결과이다. 여기서는 脫磁상태로부터 출발하여 매

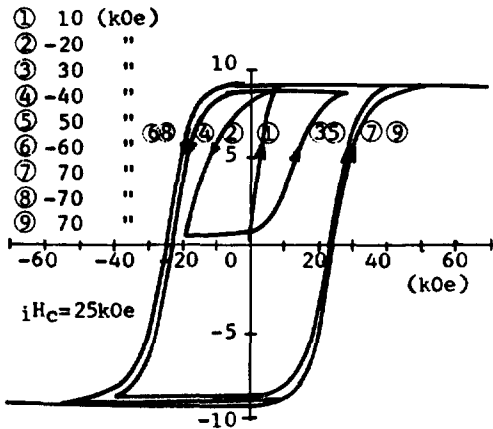


Fig. 4 Hysteresis loops of SmCo₅ magnet measured by a pulse field technique.¹¹⁾

회 펄스자석의 방향을 반전하여, 그 간격 10kOe씩 진폭을 증가하면서 측정을 되풀이한 결과를 나타낸 것이다. 결국 ±7kOe의 인가에 의해서 처음으로 완전한 히스테리시스·환전을 그럴수가 있었기 때문에, H_{ci}=2kOe를 결정할수 있었다. 특히 그 초기자화곡선으로 부터, 이 재료의 경우 磁壁의 이동이 비교적 용이하다는 것을 알 수 있다. 이러한 높은 보자력을 갖는 재료에서 보자력보다도 훨씬 작은 자계로 磁壁이 이동할수 있다는 것은, 물론 불가사의 하다고 할수 있을 것이다.

2.2 Sm₂Co₇, 希土類磁石

SmCo₅자석이 실용화된 수년뒤에, 그보다 더 큰 (BH)_{max}를 가질 수 있는 자석의 개발연구가 전세계에서 활발히 진행되었는데, 그 결과 새로운 형태의 希土類磁石이 나타나게 되었다. 앞서서도 기술한 바와같이, 그것은 보다 큰 포화자화를 갖는 재료에 충분한 고유보자력을 부여한다고 하는 발상에 근거한 것이었다.

Sm-Co 2원계에 있어서 SmCo₅보다도 Co에 치우친 6방정Th₂Zn₁₇형 Sm₂Co₁₇의 金屬間化合物이 존재하며, 12KG 라고 하는 높은 포화자화를 갖는다는 사실이 알려져 있다. 그런데, 이 화합물은 1-5형과 같은 높은 고유보자력이 얻어지지 않기 때문에, 고성능자석의 부류에는 들어갈 수가 없었다. 그 이유는 1-5형 화합물에 비하면 結晶磁氣異方性定數가 32×10⁶erg/cm³로 낮기 때문이다. 그런데, 이 난점은 교묘한 방법으로 해결되어 2-17형 화합물을 사용하는 고성능자석이 드디어 만들어지게 되었다. 그것은 R(Co, TM)_z형의 조성을 갖는 합금으로써, 역시 소결체로서 제조된다. 여기서 R은 希土類 원소, TM은 Co 이외의 천이금속원소, Z는 希土類원

소와 천이금속의 原子比를 표시한다.

이 형태의 자석은 2-17형 希土類磁石으로 불리워지며, 1200℃ 부근의 고온에서는 TbCu₇ 구조의 단상(1-7相)이지만, 800℃ 이하에서는 2상으로 분해하고 미세한 2-17相이 망목상으로 석출하는 1-5相에 의해서 셀구조를 형성한다. 이 상태에서는 고성능자석으로서 충분히 높은 보자력을 나타낸다. 그 이유는 磁壁이 셀경계에 고착되어서 그 이동이 곤란하기 때문인 것으로 생각하고 있다. 이 자석의 자화곡선은, Fig. 5에 나타낸 바와같이, 낮은 오름세의 초기자화곡선으로 특징지워지는 형상을 갖으며, SmCo₅ 燒結磁石과는 대조적이다.

2-17형 자석의 대표적인 것은, Sm(Co_{0.67}, Fe_{0.21}, Cu_{0.10}, Zr_{0.01})_{7.4}로 표시되는 조성의 합금자석이다. 이것도 합금을 써브미크론의 미분말로 파쇄한 다음, 자계중에서 압축하여 소결하므로써 만들어진다(Fig. 3 참조). 1200℃ 이상에서는 TbCu₇형 6방정구조의 1-7형 單相狀態이지만, 800℃ 이하의 적절한 時効燒鈍에 의해서 셀狀 구조의 1-5相과 2-17相의 2相狀態로 변태한다. 이것을 모식적으로 나타내면 Fig. 6과 같이 되며, 얇은 망상으로 퍼진 1-5相에 의하여 소세포상으로 분할된 2-17相으로 되는 2相狀態가 된다. 이 때, 磁壁이 그의 相境界에 포착되어 그 이동이 곤란하게 되므로 높은 보자력을 나타내게 된다. Zr을 함유하는 이 希土類燒結磁石에서는 B_r=11.2kG, H_{ci}=6.7kOe, (BH)_{max}=30MGOe의 우수한 자석특징을 나타내었다. 그 조성에서도 알 수 있는 바와같이, Sm과 천이금속의 原子比는 7.4로서 높기 때문에, 그의 4πI_s 값은 SmCo₅를 웃돌고 있으며, 열처리에 의해서 얻어진 보자력은 B_r/2를 넘기 때문에, Fig. 2(b)와 비슷한 B-H減磁曲線을 나타내고, 높은 (BH)_{max}의 값을 달성할 수가 있다.

이런 형태의 希土類磁石은 2-17형으로서, 2相구조를 갖는다는 것이 특징이다. Fig. 5는 2-17형 자석의 4πI-H 히스테리시스환전인데, Fig. 4와의 비교로 분명한 바와같이, 거의 수평에 가까운 초기자화곡선이 특징적이다.

2-17형 자석은 消磁상태에서는 磁壁을 갖는다는 점에서는 1-5형과 마찬가지로 하지만, 양자는 초기자화곡선의 형상에서는 전혀 다르다. 이들 두 종류의 希土類磁石이, 磁壁移動에 따라 그 보자력의 기구가 대칭적으로 서로 다르다는 것은 주목할만한 것이다.

2.3 Nd₂-Fe₁₄-B 磁石

Nd-Fe-B계의 새로운 希土類磁石은 일본의 住友特殊金屬(株)의 연구진에 의하여 개발된 것인데, 처음 보고된 자석의 특성은 B_r=12.5kG, H_{ci}=11.1kOe, (BH)_{max}

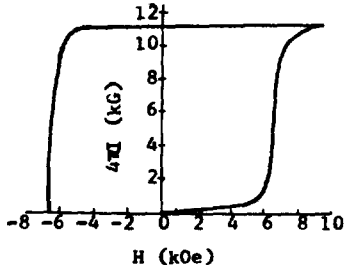


Fig. 5 Hysteresis loop of 2-17 type rare earth magnet. ¹¹⁾



Fig. 6 Scheme of wall-pinning mechanism. ¹⁰⁾

=36MGoe 로서 놀라운 것이었다. Neomax로 이름 붙여진 이 재료도, 이제까지의 希土類磁石과 마찬가지로, 미분말의 소결에 의하여 만들어진다. 그 주성분은 $Fe_{14}Nd_2B$ 로 표시되는 정방정구조의 3원金屬間 化合物이다. 이것은 $a=8.80\text{\AA}$, $c=12.21\text{\AA}$, $c/a=1.39$ 의 격자정수 정방정에 속하며, 단위포중에 68原자를 함유하는 복잡한 구조를 갖는다. Nd와 Fe의 2원계에 존재하는 金屬間化合物 Nd_2Fe_{17} 은 $T_c=54^\circ\text{C}$, $4\pi I_s=8.9\text{kG}$ 의 강자성 化合物이지만 K_u 가 負이기 때문에 자석재료로서는 무시되어 왔다. 이에 대해서 약간의 B를 첨가한 $Fe_{14}Nd_2B$ 가 $T_c=312^\circ\text{C}$, $4\pi I_s=1.61\text{kG}$, $K_u=45 \times 10^6 \text{ erg/cm}^2$ 의 훌륭한 자기특성을 나타내는 것은 주목할만한 사실이다.

자석의 제조는 $Fe_{77}Nd_{15}B_8$ 조성의 합금을 고주파용해한 다음 그 ingot를 수 μm 이하로 미분쇄하고 자계중에서 압축한 다음, Ar분위기중에서 1100°C 로 소결한다. 그런 다음에 다시 600°C 에서 完結燒鈍을 한다. 합성조성이 Fe에 치우치게 되면 B_r 이 상승하지만 H_{c1} 는 떨어지는 경향을 나타낸다. 소결재의 결정립은 약 $10\mu\text{m}$ 로서 粒界 부근에서는 Nd 혹은 Nd산화물 등의 혼재가 확인되지만, 粒內는 일반적으로 主相 $Fe_{14}Nd_2B$ 化合物로서 磁壁移動에는 전혀 장애가 없는 것으로 생각된다.

$Fe_{14}Nd_2B$ 자석도 $SmCo_5$ 자석과 마찬가지로 큰 結晶磁氣異方性定數를 가지며, 높은 H_{c1} 를 나타낸다. 그 위에 이 化合物에서는 Fe와 Nd의 原子 자기모멘트가 강자성적, 즉, 평행으로 결합한다. 또 함유되는 Fe의 성분原子%가 크기 때문에, 그 포화자화는 $SmCo_5$ 의 그것을 크게 웃돌고 있으며, 위에서 기술한 바와같은 큰 $(BH)_{max}$ 를 얻을 수가 있다. 지표에 존재하는 希土類원소 가운데 Nd는 풍부한 것 중의 하나이며, 또 자원적으로 부족한 Co를 포함하지 않는다는 사실도 이 자석이 $SmCo_5$ 자석에 비해서 유리한 조건으로 되어있다. 그렇지만 $Fe_{14}Nd_2B$ 化合物의 Curie온도는 312°C 이하로서 낮기 때문에, 열안정성이 떨어진다는 것, 또한 Fe를 주성분으로 하기 때문에 녹슬기 쉽다는 것이 실용상의 결점으로 되어 있다.

Nd-Fe-B계 자석도 熱消磁된 상태에서는 그 결정립 내에서는 많은 磁壁의 존재가 확인 되었으며(Fig.6), 또 그 초기자화곡선은 급격한 오름세를 나타내고, 핵생성 지배형의 자석재료라는 것이 알려져 있다. 여기서도 10kOe를 넘는 높은 고유보자력의 원인은 아직 미해결의 상태에 있다. 이 새로운 초고성능자석의 출현은 전세계의 많은 연구종사자를 자극하였으며, 현재 그 규명에 노력이 집중되고 있는 실정이다.

최근 GM社의 연구진이 超急冷法으로 만든 리본 재료 Nd-Fe-B계 자석의 제조기술 개발에 성공했는데, 이 방법으로 만들어진 자석도 Neomax와 같은 정도의 자기특성을 나타내는 것으로 알려져 있다.

3. 希土類磁石의 응용

Table 1은 여러가지 希土類磁石의 자기특성을 정리해 놓은 것이다.

음향기구나 OA기기, FA기기의 소형, 경량화 및 고성능화의 요구에 따라, 이들에 사용되는 영구자석은 종래의 alnico자석이나 ferrite 자석으로부터 希土類磁石으로 옮겨지고 있다. 또 MRI(核磁氣共鳴像裝置)등의 새로운 용도도 생겨나고 있다.

여기서는 希土類磁石의 중요한 용도 두가지를 소개하기로 한다.

3.1 VCM

VCM(Voice Coil Motor)은 자기디스크장치의 자기헤드 위치선정에 사용되는 actuator이다. VCM에서는 영구자석이 만드는 자계중에서 코일 만이 움직인다. 이 때문에 VCM은, 가동부의 무게가 작고, 고속출발·정지가 가능하며, 스무스한 연속운동이 되고, 정밀한 제어가

Table 1 Magnetic properties of various kinds of rare-earth permanent magnets.^{1,2)}

Materials	B_r (kG)	H_{c2} (kOe)	H_{c1} (kOe)	$(BH)_{max}$ (MGOe)	α (%/°C)	β (%/°C)	T_c (°C)
SmCo ₅	9.0	8.4	16.0	19	-0.045	-0.3	725
Sm ₂ (Co-Fe-Cu-Zr) ₇	11.3	8.0	9.0	30	-0.03	-0.15	850
Sm ₂ (Co-Fe-Cu-Zr) ₇	10.5	9.0	16.0	26	-0.03	-0.15	850
Sm ₂ (Co-Fe-Cu-Zr) _{8.8}	8.5	6.8	9.5	16			
(Nd-Dy) ₁₁ Fe ₁₇ B ₇	12.4	11.8	15	37	-0.12	-0.6	310
(Nd-Dy) ₁₁ Fe ₁₇ B ₇	12.1	11.5	13	35	-0.12	-0.6	310
(Nd-Dy) ₁₁ Fe ₁₇ B ₇	12.1	11.6	17	35	-0.12	-0.58	310
(Nd-Dy) ₁₁ Fe ₁₇ B ₇	11.2	10.7	17	30	-0.11	-0.58	310
(Nd-Dy) ₁₁ Fe ₁₇ B ₇	11.2	10.7	21	30	-0.11	-0.58	310
Nd ₁₃ Fe ₁₀ B ₄	6.1	5.3	15.0	8	-0.19	-0.42	310
Nd ₁₃ Fe ₁₀ B ₄	7.9	6.5	16.0	14	-0.157	-0.47	310
Nd ₁₃ Fe ₁₀ B ₄	11.8	10.5	13.0	32	-0.137	-0.6	310

되며, 인덕턴스가 작고 무효소비전력이 작은 것 등, 정밀하면서, 고속의 위치선정장치로서 가장 우수한 actuator 이다. VCM에 고성능의 希土類磁石을 사용하면, 소비전력의 경감(ferrite, alnico자석의 경우에 비해서 20~40%감소), 그래서 응답성의 제고가 시도되고 있다. 자기디스크장치의 대용량, 고속화, 경량화에 따라서, 希土類磁石은 점점 고성능화가 기대되고 있다. 현재는 Sm₂Co₁₇형 자석이 주류를 이루고 있지만, 앞으로 이보다 고성능으로서, 싼값의 Nd-Fe-B焼結磁石으로 바뀌어 갈 것으로 예상된다. 100°C이상에서 사용되는 일은 거의 없기 때문에 熱減磁의 문제는 없는 것으로 생각해도 된다.

3.2 MRI

인체의 임의의 방향의 斷層撮像이 되는 MRI장치가 보급단계에 들어가려하고 있다. 이 장치에서는 사람을 수용할수 있는 충분한 크기의 공간에, 강력하면서 시간적, 공간적으로 ppm수준의 균일한 자계가 필요한 것이다. 자계를 발생하는 수단으로서, 영구자석, 常傳導磁石 및 超傳導磁石의 3방식이 있다. 그중에서 영구자석방식은 전력이나 헬륨의 소비를 수반하지 않는 가장 경제적인 것으로 생각된다.

현재 Nd-Fe-B자석의 출현으로, 영구자석 형태의 자기회로가 세계 각처에서 연구되기에 이르렀으며, 앞으로 영구자석방식은 보급형 MRI장치로서 각 병원에 설치될것으로 기대한다.

4. 結 論

영구자석의 非可逆減磁은, 보자력이 큰것일 수록 작다. 고보자력형 Sm₂Co₁₇ 자석은 현재 열적으로 가장 안정한 希土類磁石이다. Nd-Fe-B 자석은 보자력의 온도 계수가 크기 때문에, 더욱더 고보자력의 재질을 개발할 필요가 있다. Nd-Fe-B자석의 고보자력화에는 Dy의 첨

Table 2 A comparison of cost performance value of permanent magnet (in Japan).⁴⁾

	casting magnet	ferrite magnet	rare-earth magnet
$(BH)_{max}$	7	4	20
ave-cost	6	0.68	62
cost performance	0.85	0.17	3.1
ave-cost/ $(BH)_{max}$	(100)	(20)	(360)

가가 유효하다는 사실이 알려져 있는데, 최근, Ga의 첨가도 대단히 효과가 있는 것으로 보고되어 있다. 그 과정은 Co를 많이 함유하는 Nd-Fe-Co-B 합금에서 현저하다. 이것은 Nd-Fe-B자석이 아직도 개량의 여지가 남아있다는 것을 나타내고 있는 것이다. 현재의 Nd-Fe-B자석에서도 100~140°C 이하에서는 열적으로 충분히 안정하여 非可逆減磁가 적다. 150°C 이상에서는 고보자력형 Sm₂Co₁₇형 자석과 SmCo₅자석을 사용해야 할것이다. 耐候性的의 점에서도 SmCo자석은 Nd-Fe-B자석 보다 우수하다. 비바람에 쬐기거나, 고온다습한 환경에서 장시간 사용되는 경우에는 SmCo자석을 사용해야 한다.

그런데 Nd-Fe-B자석도 적당한 표면처리에 의하여 통상의 용도에 충분히 견딜수 있다. 더욱이 혹독한 환경에도 견딜수 있는 표면처리의 개발과 자석재료의 개량이 진행되고 있다. 현재 자석의 가격은 SmCo자석이나 Nd-Fe-B자석도 별로 변하지 않고 있으나, 원료가격과 자석의 생산기술개량으로 앞으로 양자간의 가격차는 점점 더 벌어져 갈것이 확실하다. Table.2는 참고로 영구자석의 cost performance를 비교한 것으로서, 일본에서의 1980년을 기준으로 한것이다.

Nd-Fe-B자석은 SmCo자석으로 부터 바뀌어 가는것만이 아니고, 고성능자석을 다량으로 사용하는 새로운 용도가 개발되어가고 있다. 앞으로는 希土類磁石가운데서 Nd-Fe-B계와 SmCo계의 생산량 비율은, Nd+Pr과 Sm의 광석중의 존재량비율에 따를 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) E.A. Nesbitt et.al.: IEEE Trans Mag., MAG-9, P.203, 1973
- 2) J.J. Becker: IEEE Trans. Mag., MAG-12, P.965, 1976
- 3) Y.Tawara et.al.: Jpn. J.Appl. Phys., Vol.14, P.1619, 1977
- 4) 新妻茂雄: 日本應用磁氣學會誌, Vol.6, No.1, P.4, 1982
- 5) 米山・福野・尾島: 日本應用磁氣學會誌, Vol.6, No.

-
- 1, P.9, 1982
 - 6) J.J. Croat et.al.: J.Appl. Phys., Vol.55, P.2078, 1984
 - 7) M. Sagawa et. al.: J. Appl. Phys., Vol.55, P.2083, 1984
 - 8) 慎篤進: 電氣學會誌: Vol.34, No.6, P.346, 1985
 - 9) P. Schrey: IEEE Trans, Mag., MAG-22, P.913, 1985
 - 10) 米山・尾島: 永久磁石の 開発・材料設計と 磁氣回路の 解析・設計技術. 總合技術センター, p.87, 1986
 - 11) 岩間義郎: 日本應用磁氣學會誌, Vol.11, No.4, P.501, 1987
 - 12) 佐川真人: 日本應用磁氣學會誌, Vol.11, No.4, P.526, 1987
-