

## 자성재료에 대한 기술 전망

(한국과학기술연구원 금속연구부 정원용 박사)

### 1. 서론

인류의 자성재료의 발견은 기원전이지만, 자연 상태로 존재하는 Magnetite를 항해용의 나침반으로 중국에서 사용한 것이 실용적인 면으로는 최초였다. 1600년도에 Gilbert가 자기학 연구의 시초가 될 <De Magnete>를 발간함에 따라 자기학 분야에 관한 연구가 시작되었다. 인공적으로 철강재료부터 자석의 제조가 18세기에 시도되었으며, 19세기에 전자기학의 기초이론이 등장하여, 20세기 중반까지 자기학의 주요이론 등이 거의 제시되었다. 자기학의 이론의 발전과 함께 자성재료는 표 1에서 보여주는 바와 같이 다양한 제조공정과 소재가 개발되었고, 이로 인해 많은 새로운 수요가 창출되어 왔다.

본 고에서는 연자성재료, 경자성재료 및 기록자기재료를 중심으로 지금까지의 연구발전된 경향과 앞으로의 전망을 기술하고자 한다.

### 2. 연자성 재료

연자성재료는 AC, 고주파와 DC용으로 나눌 수 있다. AC용 연자성 재료는 높은 투자율과 포화자화값, 낮은 보자력과 철손의 특성이 요구된다. AC용 연자성재료종에서 낮은 사이클영역에서는 금속을

원료로 한 Fe-Si, Fe-Ni계 합금이 주로 사용되고, 높은 주파수 영역에서는 산화물계인 페라이트가 사용된다.

자성재료종에서 사용량이 가장 많은 전기강판(혹은 규소강판)은 발전기, 회전 기기 및 변압기 등에 주로 사용되고 있다. 발전기나 회전 기기에는 주로 무방향성 전기강판이 사용되고, 변압기에는 방향성 전기강판이 사용되고 있다. 이 전기강판은 1903년에 열연전기강판이 제조되었으며, 1934년에 냉연 전기강판이 제조되었다. 1968년에 저철손 고자속밀도 방향성 전기강판이 일본의 NSC사에 의하여 개발되었고, 1982년 자구미세화 방법의 도입에 의해 철손을 더욱 더 줄일 수가 있었다. 그림 1은 상용 전기강판의 철손의 감소 추이를 나타낸 것이다. 이 그림에 의하면 전기강판분야에 있어서의 기술 발전은 레이저 조사 및 장력 코팅에 의한 자구미세화와 극박화에 의한 방법이 도입되면서 거의 한계에 달한 것으로 생각

표 1. 제조방법과 재료의 변천

용해	분쇄	증착	급속응고
제조방법	압연	성형	전착
	열처리	소결	스파터링
재 료	규소강	페라이트	CoP (Co, Fe)-(Si, B)
	Alnico	Sm-Co	Fe-Ni Co-Cr
	Permalloy	Nd-Fe-B	CoFe (Tb, Gd)-(Fe, Co)

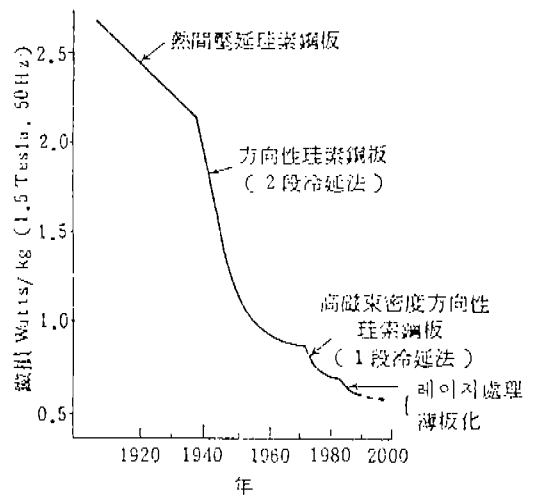


그림 1. 상용 전자강판의 최저 철손의 추이.

된다. 이와 같은 방법을 사용하면 전기강판의 철손(W 13/50)을 0.2~0.3 W/kg까지 감소시킬 수 있다고 보고되고 있다. 현재의 전기 강판의 기술에 대한 요구는 고효율화, 소형화, 저원가, 고신뢰성화이며, 주요 연구의 방향은 영구자구미세화, 비정질강 개발, Strip casting법 등의 개발이다.

Si-Fe계 합금 이외에 Al-Fe계 합금의 자기 특성은 Si-Fe계와 유사하지만 잘 사용되지 않고 특별한 목적이 있는 경우만 Si-Al-Fe계 합금이 자성재료로 일부 사용되고 있다.

Ni-Fe계 합금은 투자율이 높아 Permalloy로 명명되었다. 이 합금의 개발 초기는 주로 소형 변압기, 계기류, 전기통신 기기용으로 사용되었다. 그러나 70년대부터는 오디오 및 비디오 산업의 성장으로 주로 헤드용 합금으로 사용되었다. 이 합금의 자기특성은 용해기술, 압연기술, 열처리기술의 향상과 미량원소의 첨가로 더욱 더 향상되었다. 점차 다양한 소재의 사용 및 신소재의 개발과 함께 자성재료의 제조 공법의 개발도 함께 이루어졌다. 분말야금법, 증착,

전착, 스파터링, 급속응고 등의 다양한 방법이 자성재료의 제조와 자성특성 향상을 위하여 이용되고 있다.

연자성 재료중 고주파 영역에서 사용되는 페라이트 재료의 제조에는 주로 분말야금법이나 단결정법이 사용되고 있다. 통신기기의 고성능화와 경량화에 따라 고주파영역에서 연자성재료의 특성 향상이 요구되며, 또한 그 수요도 점차 확대되고 있다. 표 2는 각종 페라이트계의 주요 용도와 요구되는 특성을 나타내었다. 페라이트는 주로 1 kHz~300 MHz 영역대에서 사용되고 있다. 이들의 특성은 화학적 조성과 제조공정상에서 야기되는 미세구조에 크게 영향을 받는다. 화학적 조성은 사용되는 용도와 주파수 영역에 따라 제한된다.

페라이트계의 자기특성에 미치는 영향중 소결전에 첨가된 미량원소는 소결체의 미세구조, 비저항에 영향을 미친다. CaO, SiO는 비저항을 감소시켜 Mn-Zn계 페라이트의 고주파 손실을 낮추는 목적으로 사용되고 있다. VO, InO, BiO는 용점을 낮추어 결

표 2. Soft ferrite의 주요 용도와 요구되는 특성

용도	특성	사용주파수	페라이트의 종류	형태	요구되는 특성
coil	통신용 코일	1 kHz~1 MHz	Mn-Zn	항아리형	저손실, 안정도, 온도계수, L가변
		0.5~80 MHz	Ni-Zn		
	trans	0.1~300 MHz	Ni-Zn	드럼형, 나사형	저손실, 안정도, 온도계수
	안테나 코일	0.4~20 MHz	Ni-Cu-Zn	구형, 평판형	투자율, 저손실, 안정도
통신용 트랜스	중간주파 트랜스	-1.0 MHz	Mg-Cu-Zn		
		0.4~60 MHz	Mn-Zn	항아리형, E형	고투자율, 고포화자속밀도, 저변형률
			Ni-Zn	드럼형, 나사형	저손실, 안정도, 온도계수, L가변
			Ni-Cu-Zn	컵형	
로타리 트랜스	필스 트랜스	1~100 kHz	Ni-Cu-Zn	디스크형	고투자율, 저손실, 안정도
			Mn-Zn	링형, E형	고투자율
전원	fly back 트랜스	15.75~65 kHz	Mn-Zn	U형	저전력계수, 고투자율, 고포화자속밀도
	switch 트랜스	25~500 kHz	Mn-Zn	E형, 항아리형	
헤드	일반용 자기헤드	1 kHz~10 MHz	Mn-Zn	U형	고밀도, 고투자율
	전산기용 자기헤드		Mn-Zn(단결정)		
편향			Mn-Zn		고포화자속밀도
			Ni-Zn		
편향	편향 요우크(CRT용)	15.75~65 kHz	Mn-Mg	나팔꽃형, 링형	치수정밀, 저전력계수(Mn-Zn)
			Mn-Zn		
진동	자왜 진동자	20~100 kHz	Ni-Cu-Zn	NA형, π형	고자왜, 기계적 강도
센서	감온 switch		Mn-Zn-Cu		큐리온도의 정밀제어

표 3. 민생용 video 제품의 특성동향 및 연자성 재료의 요구특성

분 야	필요조건	성 능	관련 연자성 재료의 요구 특성	
TV 수상기	-대형화	-high power	편향 yoke	-대형, 고정도화, 다품종 소량화
	-고화질화	-저손실 온도상승 대책		-고주파화: HD; 33.75 kHz
	-고주파화	-low loss화		-재료의 고성능화
	-digital화	-저 noise화		-방사 noise 대책
Video	-고화질화	-multi-head화	자기 head	-고주파화, 고주파 high $\mu$
	-고대역화	-다 channel화		-multi-head화
	-digital화	-부품 소형화	회전 trans.	-high Bs: MIG head
	-소형화			-고주파화
				-고정도, 동축화

정성장을 촉진시키는 역할을 하므로, 고투자율 재료에 사용되고 있다. TaO, ZrO는 결정입자를 억제시키는 역할을 하여 고주파로 야기되는 손실을 중요시하는 저손실재에 사용된다. SnO, TiO는 페라이트 결정입자내에 고용된 Fe, Fe+e 등의 전하이동을 감소시켜 결정입자의 비저항을 증가시키므로 고자계 저손실을 요하는 고성능 페라이트계에 사용된다. 미량원소의 선택 이외에도 소성시의 산소농도, 소결시간, 소결온도가 이 페라이트의 자기특성을 좌우하기도 한다.

TV/Video 분야에서 고화질, 대형화, 고주파 등의 새로운 요구가 있고, 이에 따라 편향요크도, 고주파화, 고출력화가 요구되고, 또한 국제 위성방송이 97년부터 본격화 될 전망이어서 이에 필요한 고화질 영상 기술에 관련된 새로운 연자성 재료의 개발이 절실히 요청되고 있다. 표 3은 현재 TV/Video 제품의 품질특성 및 여기에 사용될 연자성 재료의 요구특성을 나타내었다.

DC용 연자성재료로는 특히 낮은 보자력과 높은 투자율이 요구되며 주로 사용될 수 있는 원료는 Fe, Co계이며, 현재 이러한 성분계 이외의 새로운 재료의 개발보다는 이들 기존 조성계를 이용한 새로운 제조공정 개발에 노력을 기울이고 있다.

### 3. 자기헤드용 연자성 재료

자기헤드는 자기기록매체에 기록, 재생, 소거를 담당하는 자기기록의 핵심부품으로 자기신호-전기신호 상호 변환기능을 가진 부품이다. 자기헤드가 가져야 할 특성은 신호자계를 쉽게 잠지할 수 있어야

하고, 고주파신호에 대하여 재생출력을 크게 할 수 있어야 한다. 이를 위하여 헤드의 자기특성은 높은 포화자속밀도, 낮은 보자력, 높은 투자율을 지녀야 한다. 또한 비저항이 커야 하고 강도가 높아야 하며, 헤드공시에 고온에 견딜 수 있어야만 한다. 자기헤드재료는 MnZn ferrite의 다결정 혹은 단결정 재료와 NiFe와 sendust 등의 박막재료가 사용되었으나, 최근에 헤드재료로 요구되는 특성이 고기능화함에 따라 새로운 박막재료들이 개발되고 있다. 표 4는 오디오, 비디오, 컴퓨터에 사용되고 있는 헤드의 종류와 특징을 나타내었다. 자기헤드용 MnZn, NiZn ferrite 다결정이나 단결정 block과 비정질 합금 리본이 사용되고 있으나, 산화물계는 포화자속값이 낮고, 리본은 가공이 곤란하며, 내열성과 내식성에 문제가 있다. 이에 대한 해결방안으로 Sendust를 사용하여 단층 혹은 다층박막을 한 소재가 이용하고 있다. 표에 나타난 바와 같이 최근에 개발된 Fe계 나노결정 박막은 포화자속값이 20 kG이며, 5 MHz에서도 투자율이 3000 이상을 유지할 수 있는 연자성 특성을 지닌다.

### 4. 자기기록용 자성 재료

데이터 저장기술분야에서 기록매체는 광기록 매체, 광자기 기록매체, 자기기록 입자매체, 자기기록 박막매체로 분류되고 있다. 저장기술은 기록과 기억으로 나눌 수 있으며 기억재료로는 페라이트 환상자심을 이용한 코아메모리, 퍼멀로이 자성박막을 이용한 와이어 메모리, 광자기메모리로 발전한 디지털 정보의 저장재료 등이 있다. 표 5는 광기록 디스크의

표 4. 분야별 헤드의 특징

분 야	방 식	Head	특 징
Audio	DAT	MIG(ferrite, sendust)	- sendust : single layer - metal tape 대응, 4.7 MHz
Video	1/2" VTR	ferrite	- single crystal, 4.5 MHz
	8 mm VTR	MIG(ferrite, sendust)	- sendust : single layer
	S-VHS	ferrite(double-azimuth)	- amorphous : multi-layer - 7 MHz
	digital VTR	MIG(ferrite, amorphous) thin film(sendust, amorphous)	- multi-layer, 20 MHz
Computer	FDD	ferrite	- MR(thin film + MR)
	HDD	ferrite, MIG, thin film composite-MIG	
	tape drive	ferrite, multi-gap, MIG	

표 5. Optical disk의 종류

형 식	DISK TYPE	직경 (cm)	Capacity (MB)	판매개시	주 용 도	비 고
재생전용 (ROM)	CD	12		1982. 10	disital음향 74분 수록	
		8		1988. 2	disital음향 20분 수록	
	CDV	12		1987. 8	음향 20분과 영상 5분 수록	
		LD	30		1981. 10	양면 영상 120분 수록 가능
	CD-ROM	20		1987. 10	양면 영상 50분 수록 가능	
		12	680	1985. 12	문자, 화상, 음향 수록	
CD-I	12		개발완료	교육, 오락	Computer에 응용	
1회 기록용 (WORM)	상변화 WORM	30	3,600	1988	Computer에 사용 (전자 filing system 등)	기록막이 결정, 비정질로 변화함
		20	1,500	1988		
	개공식 WORM	13	600	1988		
		9	180	1988		
		30	3,600	1983		기록막에 구멍을 뚫
		20	1,500	1983		(Hole-Burning)
		13	600	1983		광반응 이용
		13	600	1988		
Dye CD-R	12		1988	소규모 CD 생산		
반복기록용 (Erasable)	광자기 (MO)	30	4,000	1987	Computer에 사용 (전자 Filing system 등)	광 및 자기 특성을 이용
		13	650	1987		
	상변화 (PC) Dye-Polymer	9	120(단면)	1989	개발중	
					개발중	기록막이 결정, 비정질로 변화함 기계적 요철형태

형태, 용량, 용도 등을 나타내었다. 초기에 개발될 때는 주로 재생전용으로 개발되었으나, 점차 기술개발이 진행됨에 따라 기록막이 열에 의하여 결정, 비정질로 변화하는 성질을 응용하거나, 또는 기록막에 구멍을 내는 방식을 응용한 1회 기록용 optical disk가 개발되었다. 최근에는 광자기 특성을 이용하여 반복기록용 optical disk가 개발되고 있다.

기록재료로는 강선으로 출발하여 감마페라이트, Co가 첨가된 페라이트분말을 도포 시킨 테이프, Co, Ni, Fe 등을 테이프에 도금, 증착, 스파터링시킨 테이프에 아날로그 정보를 저장시킨 재료 등이 있다. 표 6은 자기기록매체의 개발현황을 나타낸 것이다. 그림 2는 이 기록매체가 제품에 응용된 경우를 나타낸 것으로 기록 분야에서도 저장방식은 아날로그

표 6. 자기기록매체의 발달사

Prehistory	- Steel wire, tape and drum : 1900 1950 - Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> power on paper or acetate tape (~1935, Germany) - $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : H <sub>c</sub> =50 Oe, B <sub>r</sub> =100 G (~1940, Germany) - Acicular $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : H <sub>c</sub> =230 Oe, B <sub>r</sub> =500 G(Std), 1100 G(oriented) (~1947, US, UK) - Ni-Co-P films, electroplated on drums (1952)
1961	- CrO <sub>2</sub> , process for single phase synthesis (US)
1963	- Elongated single domain Fe tape (lad) : H <sub>c</sub> =800 Oe, B <sub>r</sub> =3000 G (Japan)
1960~1965	- Cobalt-substituted $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : H <sub>c</sub> =400~600 Oe, f(T)!
1965~1970	- Nonstoich, $\gamma$ -Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (lab, comm'l) : H <sub>c</sub> =400 Oe (Japan)
1965~1967	- Metal films, vacuum deposition (lab) : H <sub>c</sub> =50~1000 Oe (US, UK, France)
1967	- CrO <sub>2</sub> tape (comm'l) : H <sub>c</sub> =300~500 Oe, B <sub>r</sub> =1500 G
1969~1974	- ESD Fe tape (lab) : H <sub>c</sub> =1200 Oe, B <sub>r</sub> =3000 G (Neth., US)
1971~1974	- Co-impregnated $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (?), (lab, comm'l) : H <sub>c</sub> =575 Oe, B <sub>r</sub> =1500 G (Japan)
1974~1975	- Acicular metal, perpendicular recording textured base : H <sub>c</sub> =1~3 kOe (Japan)
1977	- Co-Cr sputtered film, perpendicular recording (lab) (Japan)
1978	- Comm'l high H <sub>c</sub> CrO <sub>2</sub> tape : H <sub>c</sub> =640, 720 Oe, (US)
1978	- ESD Fe tape (comm'l) : H <sub>c</sub> =1000 Oe, B <sub>r</sub> =3400 G (US, Japan)
1979	- Co(?) vacuum vapor deposited tape (comm'l) (Japan)

에서 디지털로 변환되고 있음을 보여주고 있다.

5. 영구자석 재료

그림 3은 1900년 이후 영구자석의 발전된 과정을 자기특성으로 나타낸 것이다. 현재 단위 부피당 갖고 있는 최대 자기에너지적은 1900년 초기보다 약 100배 증가하였다. 주요 개발소재로서 1940년대에 알리코, 1950년대에 페라이트계가 있고, 특히 1960년대 이후에 개발된 희토류계 영구자석은 희토류계 금속과 천이금속의 금속간 화합물을 응용하여 보다 안정되고 자기특성이 우수한 특징을 지녔다. 1959년

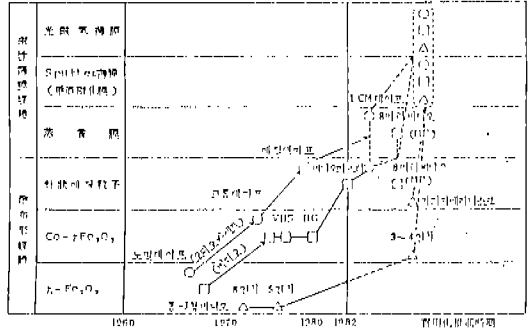


그림 2. 기록매체 분야의 개발 추이.

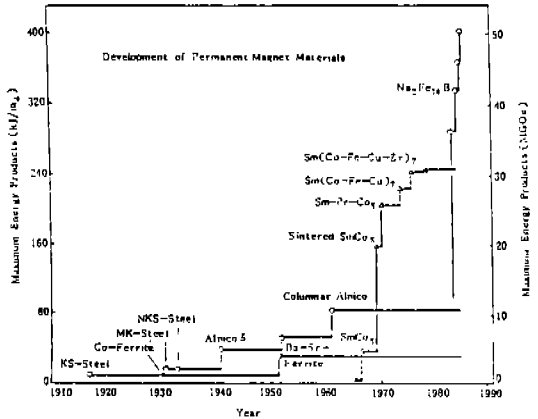


그림 3. 영구자석의 성능 향상 추이.

미국의 Bell 연구소의 Nesbitt 등은 천이금속과 희토류계 금속의 화합물에 관한 자석과 결정구조에 대한 연구를 행하여 자기이방성에 대하여 발표하였으며, 이것이 희토류계 영구자석에 대한 연구의 시초였다. 1967년에 SmCo<sub>5</sub>계, 1970년대 후반에 Sm<sub>2</sub>(Co, Fe, Cu, Zr)<sub>14</sub>계로 최대 자기에너지적은 33 MGOe인 영구자석이 개발되었다.

이 SmCo계 영구자석의 주성분인 Sm은 희토류계 광석(Monazite, Bastnassite) 중에 0.5~3 wt% 밖에 포함되어 있지 않으며, Co는 중요한 전략물자로 고가이며, 또한 산지가 자이레, 잠비아, 러시아 등 몇몇 나라에 한정되어 있어 가격변동이 심하다. 이런 관점에서 Sm과 Co를 함유하지 않고 희토류금속의 함량이 적은 새로운 Nd-Fe-B계 영구자석이 1983년대에 개발되었다. 그 이후로 점차 최대 자기에너지적의 특성이 향상되어 최근에 52 MGOe인 영구자석이 공업적으로 생산이 가능하게 되었다.

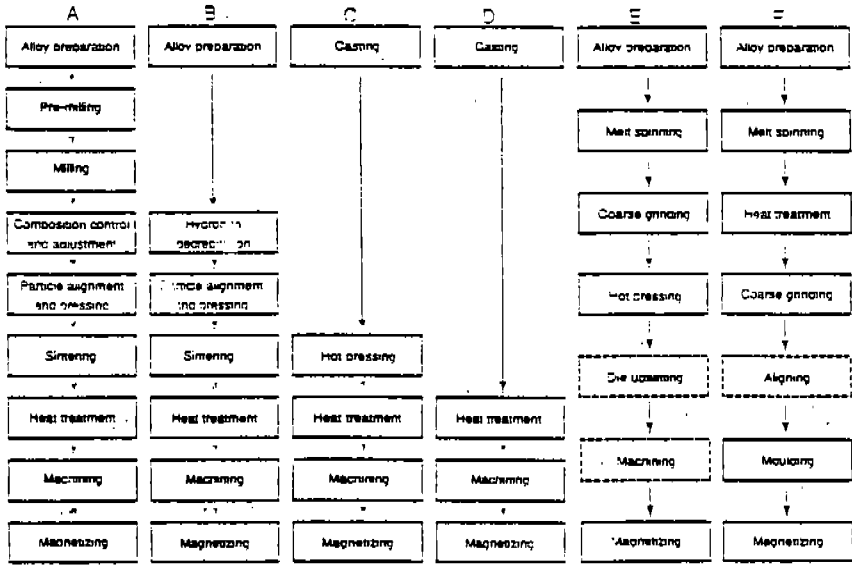


그림 4. 이방성 영구자석의 제조공정.

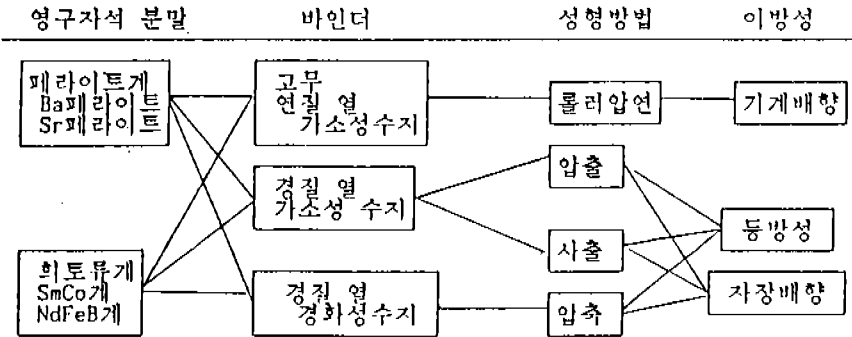


그림 5. 본드자석의 요소의 관련성.

이와 같이 새로운 재료는 지난 십여년 간격으로 개발되어 왔다. 이와 함께 최근에는 이방성 영구자석의 제조방법에 새로운 공정개발이 진행되어 왔다. 그림 4는 이방성 영구자석을 제조하는 방법을 나타낸 것이다. 여기서 제시된 공법중에서 현재 공업적으로 적용되고 있는 방법은 소결법과 급냉응고된 분말을 사용하는 본드자석 제조법이다. 한편 Nd-Fe-B계 영구자석은 큐리온도가 낮아 자동차의 부품으로 사용하기 위하여서는 온도 특성을 향상시켜야 한다. 이에 대한 방안으로 Nd-Dy-Fe-B계 조성으로 급냉응고하여 열간 압축 및 die-upset 처리하는 것에 의해 180°C 까지 사용가능한 영구자석을 제조할 수 있다.

레진 본드 자석은 지금까지 개발된 재료를 사용하여 이에 레진을 혼합하여 성형성을 향상시킨 영구자석이다. 본드자석은 3가지의 구성요소로 만들어 지는데, 즉 영구자석의 분말, 바인더와 첨가제, 이를 사용한 가공방법 즉 성형방법과 이방화 방법이다. 이 구성요소의 관계를 그림 5에 표시하였다.

한편, 본드자석의 자기적 특성에 미치는 요소는 영구자석의 분말의 자기적 특성과 제조시 분말의 배향성에 있다. 이 두 요소는 상호 밀접한 관계가 있다. 본드자석의 자기적 특성을 향상시키기 위하여서는 분말의 자기적 특성을 제조공정에 잘 이용하여야 한다. 표 7은 페라이트계, Sm-Co계, Nd-Fe-B계 분말을 이용하여 본드자석을 제조하였을 때의

표 7. 자석분말과 본드자석의 자기적 특성 (단위 : MGOe)

영구자석분말	등방성	이방성
Ba 페라이트계 Sr 페라이트계	0.2~0.7	0.8~2.3
Sm-Co계	2.0~5.0	6.0~2.3
Nd-Fe-B계	4.0~10.0	개발중

구자석의 최대 자기에너지적은 8~10 MGOe로 주로 소형모터나 엑츄에이터에 사용되고 있다. 만일 이방성 레진 본드자석 생산이 가능하면 이 영구자석의 최대자기에너지적은 12~16 MGOe이 될 것으로 예상된다. 이는 주로 컴퓨터의 보이스 코일 모터를 제외한 부품에 사용되고, 또한 자동차의 부품으로 사용될 가능성이 매우 높다. 소결형 Nd-Fe-B계 영구자석의 최대 자기에너지적은 30 MGOe 이상이며 이는 주로 구동력이 요구되는 공작기기, 고회력의 음향기기, 컴퓨터의 보이스 코일 모터 및 군사장비 등에 사용되고 있다.

### 6. 총 합

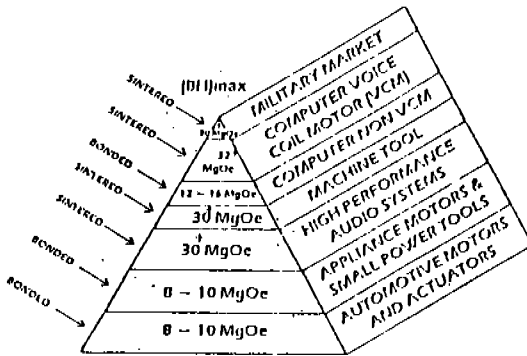


그림 6. 다양한 자기특성을 지닌 Nd-Fe-B계 영구자석의 사용용도.

자기적 특성을 나타내었다. 이외에 알리코계 분말이 있다.

페라이트계 본드자석의 제조는 주로 이방성 본드자석이, 회로류계에 있어서는 등방성 Nd-Fe-B계 압축자석이 주류를 이루고 있으나, 최근에는 이방성 Nd-Fe-B계 분말도 개발되고 있다. Nd-Fe-B계 영구자석은 그 특성에 따라 사용용도가 다르다. 그림 6은 특성에 따른 용도를 표시한 것이다. 급냉용고에 의해 제조된 분말을 사용한 등방성 Nd-Fe-B계 영

자성재료의 발전은 새로운 소재 개발로 시작하여 현재는 새로운 제조공정의 개발로 움직이고 있다. 특히 자기헤드나 레코딩 미디어는 스파터링을 이용한 박막재료로 개발되고 있다. 영구자석의 경우는 Nd-Fe-B잉코트에 수소를 흡수시켜 상의 분해와 결합을 통한 새로운 조직을 제어하여 이방화가 가능한 새로운 분말을 제조하는 기술이 개발되고 있다. 이와 같이 현재의 주요 연구 추세는 새로운 성분계의 소재 개발보다는 기존의 자성재료를 사용하여, 제조방법의 개량 및 조직제어 등에 의해 새로운 소재가 개발되고 있다. 기존의 분말야금을 이용한 자성재료에 관한 연구는 영구자석의 경우 배향성의 향상을 통한 자기 특성 향상, 연자성의 경우 분말 사출법에 의한 새로운 공법이 현재 도입중이거나, 원료의 고급화를 통한 특성의 향상이 연구되고 있다.