

P/M 공정에 의한 자성재료와 그 응용기술

양 총 진

전자기연구팀장, 포항산업과학연구원(RIST)

P/M Magnets and their Applications

Choong Jin Yang

Electromagnetic Materials Lab., Research Institute of Industrial Science & Technology 790-600 Pohang, Korea

1. 서 론

P/M 자성재료라고 일컬으면 주로 soft magnetic materials을 취급하게 되고, 따라서 금속분말 및 그의 생산공정을 주 대상으로 생각하게 된다. 그러나 실제로 많은 자성재료 및 그 응용부품은 연자성, 경자성 (hard magnetic) 재료를 불문하고 분말야금법에 의하여 생산 또는 성형되고 있기 때문에 본고에서는 P/M soft, P/M hard magnetic materials을 구분하여 논하고, 각각의 자기특성 및 그에 따른 응용기술, 대표적 용도, 그리고 생산공정을 소개하고자 한다. 다만, ferrite관련분야는 지면제한상 생략한다.

2. P/M 공정에 의한 연자성재료 및 그 응용부품

2.1. P/M soft magnetic materials의 자기특성

연자성재료를 P/M 공법에 의하여 제조하는 가장 큰 장점은 저렴한 생산가로 bulk 재료에 거의 상응하는 자기특성을 발휘할 수 있는 기술이 개발되었기 때문이다. 즉, 연자성분말을 제조하여 소결 또는 compounding에 의한 프레스성형에 의한 제품에서도 응용부품이 요구하는 히스테리시스특성, 고주파특성 및 내식성을 가질 수 있기 때문이다. 자기특성을 고려할 때 P/M 공정에서 중시되는 것은 일단 프레스성형과정에서 최대한의 성형밀도를 얻어야 한다. 따라서 밀도극대화 와 관련한 공정변수를 함수화하여 사용하는 것이 필요하다. Table 1에는 소결공정에 의하여 성형되고 있는 대표적 P/M 연자성분말의 자기특성을 보여준다.¹⁾

연자성 재료의 자기특성으로는 일반적으로 투자율이 크고, 보자력이 작으며, 따라서 자기회로를 구성할 때 flux의 흐름이 원만하여 외부자장 또는 교류전류에 따른 응답성이 신속해야 한다. 결과적으로 전력 변화장치의 부품(power transformer), 전자기부품(ele-

Table 1. 대표적 P/M 연자성분말의 자기특성과 용도¹⁾

성분	성형밀도 g/cm ³	포화자화 B _s (Tesla)	보자력 H _c (A/m)	최대투자율 μ _{max}	비저항 ρ Ωcm	용도
Fe	7.1	1.8	150	3000	14	영구자석과 연결된 자기회로, DC 또는 저주파펄스전류코일
	7.6	2.1	80	6000	12	
Fe-0.45%P	7.1	1.8	112	4000	22	고응답성이 요구되는 yoke, DC 회로
	7.6	2.0	44	10900	20	
Fe-49%Co	7.9	2.2	136	3900	35	고포화자화력, 고 Curie 온도가 요구되는 항공부품
Fe-3%Si	7.3	1.9	64	8000	50	고주파 AC회로에서 응답성이 좋고 고포화자화력이 요구되는 부품
	7.5	2.0	44	9500	48	
Fe-50%Ni	7.7	1.3	20	20000	50	작은 전류에도 고응답성이 요구되는 부품
	8.0	1.6	13	30000	45	
Fe-17%Cr	7.1	1.4	200	1200	78	내식성이 요구되는 자기회로 부품

ctromagnetic parts) 또는 구동모터의 자심(core)이 주 용도가 된다. 그러므로 상기 모든 부품은 AC 고주파 응용범위에서 자심손실(core loss)이 적은 특성을 요구하고 있다. 자심손실이란 부품이 교류전류(또는 자장)에 노출될 때 열에너지로 변화되어 발생하는 손실을 말한다. 따라서 에너지효율을 극대화 함으로써 손실을 줄일수 있으며, (1) 자기특성에 필연적으로 발생하는 히스테리시스 손실(hysteresis loss)와 (2) 교류전류에 의하여 발생하는 와전류손실(eddy current)가 그 발생원이다.

Hysteresis loss는 사용주파수(f) 및 연자성재료의 자기이력에 비례하여 발생하며 다음과 같이 표현된다.

$$\text{hysteresis loss} = K_h \cdot \text{loop area} \cdot f$$

Eddy current loss(와전류손실)은 연자성재료의 포화자화력(B_s), 재료의 입도 또는 두께(d) 및 사용주파수 제공에 비례하여 발생하며, 연자성재료의 전기저항(ρ)에 반비례하여 발생한다.²⁾

$$\text{eddy current loss} = K_e \cdot \frac{d^2 \cdot B^2 \cdot f^2}{\rho}$$

결국, 연자성재료의 전자기 응용부품에서 자심손실을 최소화 하기 위해서는 부품의 칫수를 최소화 하거나, 사용주파수의 한도를 정해줄 필요가 있다. 반면에 재료의 전기저항을 극대화 할수록 와전류손실을 줄일 수 있으므로 전체손실을 감소시킬 수 있게된다. Fig. 1에 상기 기술한 자심손실의 경향을 정리하여 도식화 하였다.

2.1. Eddy Current 손실의 최소화 방안을 위한 분말처리

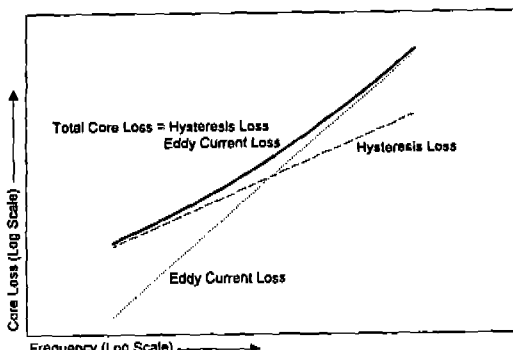


Fig. 1. Components of Core Loss vs. Frequency.

상술한 바와 같이 P/M soft magnetic powder의 가장 큰 변수는 와전류손실을 극소화 하는 것이며, 최근 P/M 공정의 신기술로 좋은효과를 보고 있다. 종래의 bulk 재료에서 와전류 손실을 최소화 하기 위해서는 얇은 연자성 강판을 적층하여 전기적으로 각 층을 절연시킴으로써 와전류 발생을 억제하였다. 그러한 예가 적층 트랜스포머 또는 구동모터의 적층 core이다. 그러나 P/M연자성 분말을 사용할 때는 분말과 분말간의 계면을 플라스틱 coating 또는 산화피막을 형성시켜 줌으로써 전기, 자기적으로 절연이 되어 bulk로서의 전기저항치가 증가하게 된다. 따라서 전자기 부품으로 사용될 때 와전류손실은 극소화 할 수 있다. 좋은 예가 Fe계의 dust core, Fe-Si 및 Fe-Ni계 분말이며, 결국 절연코팅 처리를 함으로써 고주파용 inductor, transformer 등에 응용될 수가 있었다. 최근에 Hoeganaes에서 개발한 절연코팅 방법을 Fig. 2에 보여준다. Ancorsteel이라고 명명되는 연자성 분말은 Fe계 분말에 주로 1 wt.% 정도의 수지코팅을 균일한 두께로 처리함으로써 효과적인 와전류손실을 줄일 수 있다.

상기와 같은 공정으로 절연코팅된 분말은 175°C 범위에서 예열된 후 미리 275°C 정도로 가열된 금형으로 옮겨져 프레스성형시 코팅피막이 효율적으로 열간성형되어 연자성분말의 성형밀도 향상에 크게 도움이 된다. 따라서 포화자화력 향상에도 효과적이다. 포화자화력 뿐만 아니라 bulk재료로서의 강도를 향상시키기 위해서 적절한 수지선택과 수지코팅을 실시한 후 적절한 중간열처리를 취하는 것이 핵심기술이다. Table 2에 Hoeganaes사에서 판매하는 Ancorsteel 1000 C 철분말에 대한 수지코팅 효과를 예로서 보여준다.

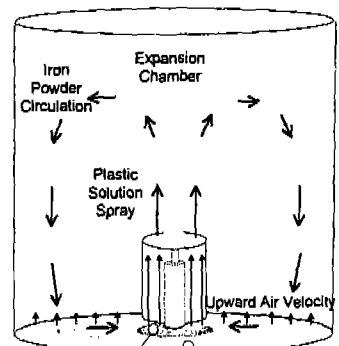


Fig. 2. Diagram of the Fluidized Bed Coating Process.

Table 2. Green strength and density of Acorsteel 1000C at 50 tsi (690 MPa) compaction pressure²⁾

	Density (g/cm ³)	Green strength (psi)	Green strength (MPa)
Fe+0.75wt.%	7.44	18,000	124
Fe+0.75wt.%+ thermal treatment	7.44	36,000	248
Fe+0.75wt.% Acrawax	7.30	2,000	14

수지로 절연된 연자성분말은 상기와 같이 green compact로서 사용하는 것 외에 소결처리하여 성형하는 방법이 있다. 상기와 같이 수지코팅 후 H₂ 또는 NH₃ 분위기에서 1120~1260°C로 소결처리 함으로써 Fe-P 분말의 경우 최대 성형밀도 7.57 g/cm³와 포화 자화 15.5 kG까지 얻을 수 있다.³⁾

2.3. NANOCON 분말⁴⁾

연자성 금속분말이나 ferrite 분말을 초미세립으로 제조한 후 수지코팅 대신에 산화피막을 인위적으로 형성하여 효과적인 전기, 자기적 절연을 성취할 수가 있다. Fe-base 분말을 제조후 산화분위기에서 인위적 산화처리를 하여 10 nm 두께의 산화피막을 형성하면 고포화자화력을 유지하면서 극히 높은 저항치를 보여 효과적으로 core loss를 줄일 수 있다. 같은 개념으로 연자성 ferrite 분말(Mn-Zn 및 Ni-Zn ferrite)에서도 산화피막의 효과를 볼 수 있다. 연자성 금속분말과 같이 산화피막을 인위적으로 성형하는 대신에 ferrite 분말에서는 소결과정에서 precursor에 세삼의 산화물을 doping함으로써 소결성형과정에서 grain boundary 사이에 골고루 doping 되어 피막처리 효과와 동일한 결과를 초래한다. 이렇게 산화피막 처리된 nanocon 분말은 수 MHz 범위까지 높은 포화자화와 더불어 낮은 core loss를 보여줌으로써 고주파용 전자기기에서 그 용도가 날로 증가하고 있다. Fig. 3에 nanocon 분말의 제조과정을 도식화 하여 보여준다.

3. P/M 공정에 의한 경자성재료의 특성과 응용

3.1. 희토류(Rare earth magnets)계 소결자석

영구자석재료에서 가장 응용성이 우수한 자성체이다. 원소 주기율표중 원자번호가 작은 희토류성분

Preparation of magnetic "NANOCON" material

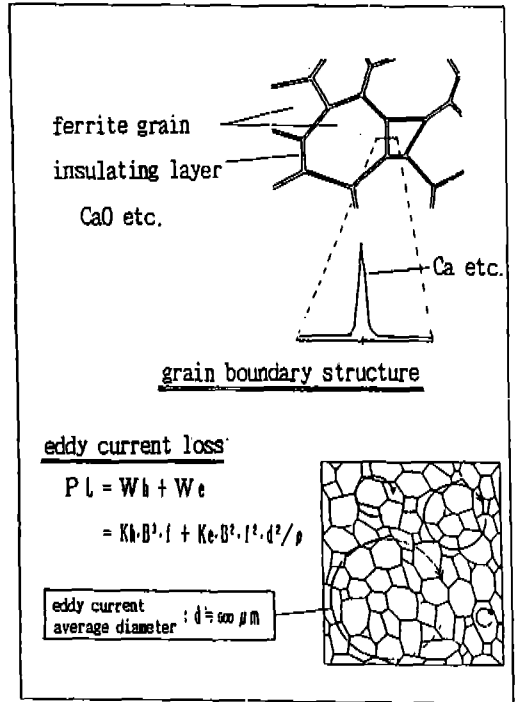
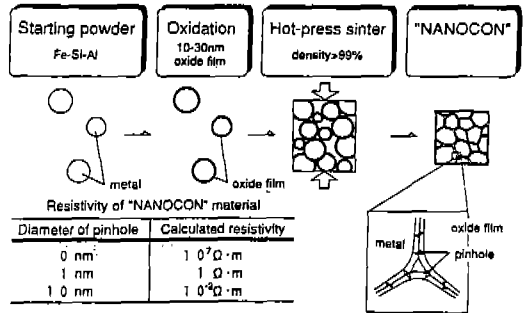


Fig. 3. NANOCON 분말의 제조원리.

(Nd, Sm)은 그 자체가 갖고 있는 최외각 전자분포(f orbit)의 vacancy 수에 따라 강자성을 띌 수 있는 자화 모멘트를 보유하며, 이들 희토류 원소와 제 2의 천이 원소(Fe, Co, Ni)를 합쳐 화합물을 만들면 상당히 높은 자화력(magnetic induction)과 보자력(coercivity)을 발휘한다. 이러한 현상은 그 자성화합물이 갖는 결정 구조에 기인한다. 즉, a 축이 짧고 c 축이 긴 육방정계 또는 정방정계의 결정구조가 c 축(장축)을 따라 자화용이성(easy magnetization axis)을 띠는 이방성(magnetic anisotropy)을 보임으로써 강한 자화능력을 발휘한다. 대표적인 희토류 화합물로는 Nd₂Fe₁₄B(te-

tragonal, $c/a=1.38$) 결정체와 Sm_2Co_{17} (hexagonal, $c/a=1.45$) 및 $SmCo_5$ (hexagonal, $c/a=0.56$) 결정체가 있다. 그러나 높은 보자력과 고자화력 및 높은 Curie 온도에도 불구하고 Sm-Co계 자성화합물은 가격이 비싸 특수용도에만 제한적으로 사용되며, 최근에는 가격이 저렴하고 최대자기에너지적, $(B.H)_{max}=45$ MGOe까지 가능한 Nd-Fe-B계 자석의 용도가 급속히 확산되고 있다. 이론적으로 Nd-Fe-B계 소결자석은 최대자기에너지적이 64 MGOe(512 kJ/m³)으로 계산된다.⁵⁾ NdFeB계 소결자석은 원천적으로 강자성인 Nd₂Fe₁₄B상, 비자성이면서 B 함량이 큰 Nd₁₁Fe₄B₄ 상, 비자성이면서 Nd함량이 큰 Nd₁₉Fe(Sumitomo사 주장)상으로 구성된다. 따라서 고성능의 소결자석을 제조하기 위해서는 전술한 세가지 상의 부피분율과 각 상의 결정입도 및 분포, 그리고 결정조직의 조절이 가장 중요하다.

소결자석의 잔류자속밀도(Br)를 결정하는 요인을 조직학적 요소와 합수화 하면 아래와 같다.⁶⁾

$$B_r \propto (I_s \beta) \{(\rho/\rho^0) \cdot (1-\alpha)^f\}^{2/3}$$

- 여기서 I_s : Nd₂Fe₁₄B 상의 포화자화력
- β : Nd₂Fe₁₄B상의 포화자화력에서 temperature coefficient
- ρ : 소결자석의 밀도
- ρ^0 : 원료합금의 밀도
- α : 비자성상인 Nd₁₁Fe₄B₄와 Nd-rich상의 부피분율
- f : 강자성상 Nd₂Fe₁₄B 결정입의 배향도

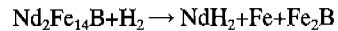
결국 높은 Br을 얻기 위해서는 (1) 소결자석의 밀도를 이론치에 근접하도록 하는 방법, (2) 강자성상의 부피분율을 최대화 하는 방법, 그리고 (3) 강자성상 결정립의 배향도를 극대화 할 수 있는 기술을 확립하는 것이다. 최근에 Sumitomo사는 Nd₂Fe₁₄B상의 부피분율을 95%로 올리고, 소결시 자성분말의 입도 분포를 거의 3 μm 입도로 유지하면서 소결전에 rubber mold에서 펄스착자(pulse magnetization)를 이용하여 결정입도를 배향시킨 후 냉간정수압(cold isostatic pressing)을 함으로써 배향도(f)를 90~95%까지 취득하여, 최대자기에너지적, $(B.H)_{max}=54.2$ MGOe까지 얻을 수 있는 기술을 확립하였다. 이러한 개발을 성공할 수 있는 또 다른 요인으로는 종래에는 보자력(coercivity) 향상을 위해 첨가하던 Dy 혹은 Al 등을

될 수 있는한 첨가하지 않는 방법을 강구했기 때문이다. Dy 또는 Al이 첨가되면 Nd₂Fe₁₄B상의 포화자화력이 감소하기 때문이다.

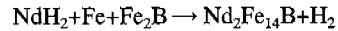
3.2. 수소환원, 확산반응, 탈수소(Hydrogenation, Decomposition, Desorption, Recombination) 반응에 의한 희토류 자성분말 제조기술

전술한 바와같이 합금 잉곳으로부터 P/M 공정에 의하여 분말을 얻기까지는 많은 노력과 그에 따른 경비를 소모하게 된다. 최근에 희토류 자성화합물의 미세분말을 얻기위해 1 atm 이상의 H₂ 분위기에서 희토합금 hydride를 인위적으로 형성시켜 자체균열에 의해 쉽게 분말을 만든 후 다시 탈수소 과정에서 희토류성분과 천이원소 성분이 재결합 반응을 하는 경제적인 분말제조기술이 개발되어 사용중에 있다. 좋은 예가 Nd-Fe-B계 화합물 자성체 이다. 아래 Fig. 4에 HDDR 과정을 도식화하여 보여준다.⁷⁾

• Hydrogenation & Decomposition (at 200~400°C):



• Desorption & Recombination (at 500~700°C):



위와같은 반응과정에서 Zr 원소를 doping하면 desorption중에 형성된 Nd₂Fe₁₄B핵생성이 특정 결정 방향으로 성장하면서 1 μm 이하의 초미세립으로 분포하여 이방성 자성분말을 얻을 수 있는 부수적인 효

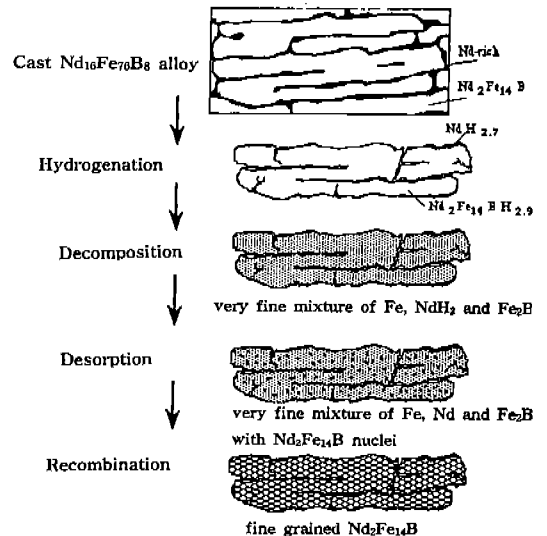


Fig. 4. A schematic representation of the HDDR process.

과도 있다. HDDR 공법은 특히 급속냉각기술로 제조한 ribbon에 적용되어 수지자석(bonded magnet)의 원료로 사용되고 있다.

3.3. 수지자석(Plastic bonded magnets)의 제조기술

수지자석이란 자성분말, 플라스틱 바인더 및 첨가제, 그리고 이를 사용한 성형방법과 이방화 기술 등이 조합된 P/M 제품의 일종이다. 본드자석의 자기특성에 미치는 요소는 자성분말의 초기특성(자기특성과 분말의 물리, 기계적 특성), 바인더의 특성 및 부피분율, 그리고 성형중에 취득한 성형밀도 등이 자석의 최종 성능을 좌우한다. 수지자석의 원료로는 전통적인 ferrite(Ba, Sr-base)자석외에 희토류 자석인 Sm-Co계, Nd-Fe-B계 모두 수지자석으로 제조, 판매되고 있다. Ferrite계 수지본드자석은 주로 이방성자석으로 사출성형(injection molding)법으로 제조되고 있으며, 희토류계 자석중에서 Nd-Fe-B계 수지자석이 압축성형법(compression molding)에 의하여 등방성자석으로 사용되고 있으나, 전술한 HDDR법으로 제조된 이방성 자성분말의 제조로 인해 압축 또는 사출에 의한 이방성자석의 수지자석도 용도가 확장되고 있다. 아래 Fig. 5에 ferrite 또는 희토류자성분말(특히 Nd-Fe-B계)을 사용한 수지본드자석의 제조공정을 도식화하였다.

수지 bonded자석의 결점은 같은 원료를 사용해서

도 소결자석에 비해 잔류자속밀도(B_r)과 최대자기에너지적, $(B.H)_{max}$ 가 낮은 것이다. 물론 제품의 특성상 복잡한 형상이나, 경박단소형 정밀제품의 제조에서 수지자석의 장점이 있으나, 본고에서는 일단 P/M 공정의 문제만 다루기로 한다. 일반적으로 수지자석의 잔류자속밀도, $B_r=4\pi I_s \times$ 배향도 $=4\pi M_s \times$ 밀도 \times 배향도의 값에 따라 영향을 받는데, 여기서 M_s 는 단위 무게당 자성분말의 포화자화값을 뜻한다. 성형밀도는 소결제품에 비해 훨씬 낮으므로 자성분말의 충진율을 높이는 것이 핵심기술이다. 따라서 자성분말의 입도 및 분포, 형상 등을 적절히 찾아야 하며, 이를 위해 수지바인더의 적합한 선택과 바인더의 물리적 특성이 또한 중요하다.

• 사출수지자석: 자성분말의 밀도와 pellet 밀도와의 관계

자성분말의 이론밀도(ρ_m)와 수지바인더의 밀도(ρ_b), 전자의 충진율(f_m) 및 후자의 충진율(f_b)사이에는 pellet이 기공이 없다고 가정할 때, pellet의 이론적밀도(ρ_p)와는 아래와 같이 관계된다.

$$1/\rho_p = 1/\rho_b + f_m(1/\rho_m - 1/\rho_b)$$

사용한 자성분말의 부피(V_m)와 무게(W_m), 바인더의 무게(W_b) 관계를 실험적으로 간단히 나타내는 식은 tap density(ρ_t)를 사용하여 표현할 수 있다. 전술한 ρ_p 와 ρ_t 와의 관계를 이용하면

$$\rho_p = \frac{W_m + W_b}{V_m} = \frac{W_m + W_b}{W_m / \rho_t}$$

위와같이 자성분말의 tap density를 알면 혼합된 자성분말의 량과 바인더의 량을 가지고 쉽게 pellet의 성형밀도를 추측할 수 있어 공정변수의 결정에 도움이 된다.

$W_m/(W_m+W_b)=f_m$ 의 관계식에 따라 pellet에 최대로 충진할 수 있는 임계충진율(f_{cr})을 계산하면 아래와 같이 표시된다.

$$f_{cr} = \frac{1/\rho_b}{1/\rho_t + 1/\rho_b + 1/\rho_m}$$

희토류 수지자석(Nd-Fe-Co-Zr-B)의 경우⁸⁾ 위의 관계식에 따라 자성분말 입도 75~150 μm 의 분말을 사용하여 사출성형을 하면 자석의 밀도(ρ), $\rho(\text{cm}^{-3})=1.1+kV_m$ 의 경험식이 얻어지며 이때 $k=5.3\sim 5.6$ 의 값을

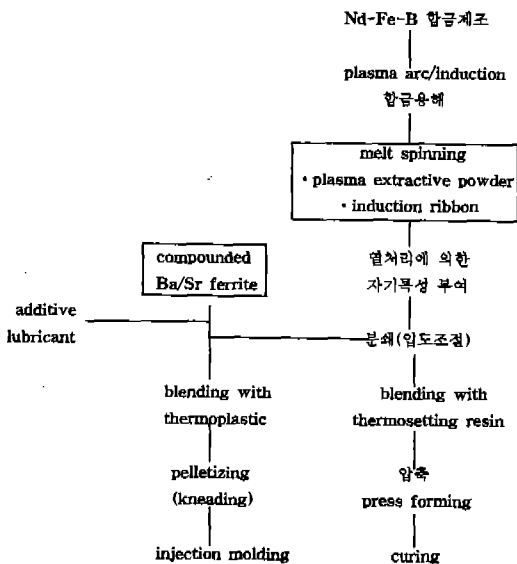
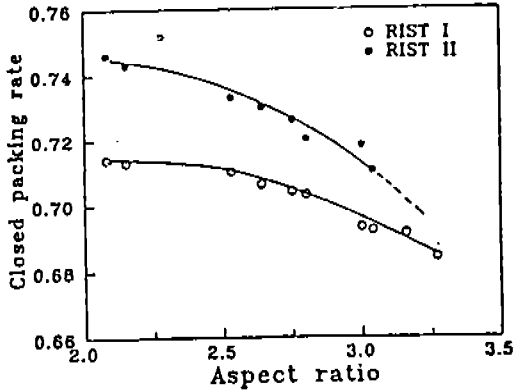
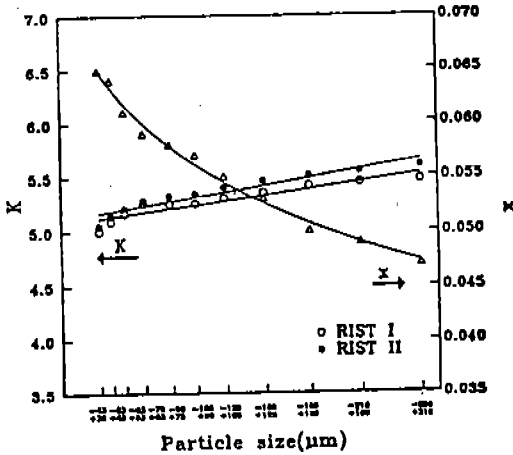


Fig. 5. 수지 bonded magnets의 제조공정도.



Closed packing rate of RIST powders as a function of aspect ratio.
 RIST I (Nd₁₄Fe₇₆Co₄B₆)
 RIST II (Nd_{10.5}Fe₇₉Co₂Zr_{1.5}B₇)



Size dependency of K and x in power relationship between density and applied pressure.
 RIST I (Nd₁₄Fe₇₆Co₄B₆)
 RIST II (Nd_{10.5}Fe₇₉Co₂Zr_{1.5}B₇)

Fig. 6. 자성분말의 형상과 입도가 압축수지자석에 미치는 영향.

보인다.

• 압축수지자석: 분말의 형상과 자석밀도 관계

압축성형으로 제조되는 수지자석의 경우 공정변수로는 물론 부하된 프레스 압력과 사용한 자성분말의 관계이다. 특히 압축성형 자석에서는 사용된 자성분말의 형상비(aspect ratio)가 실제 자석의 성형밀도에 큰 영향을 미친다.⁹⁾ 전술한 각각의 분말과 바인더의 특성을 사용하면, 압축성형된 자석의 성형밀도(ρ_p), 자성분말의 tap density(ρ), 분말의 이론밀도(ρ_m) 사이에는 아래의 관계식이 성립된다.

$$\text{압축성형 자석의 closed packing rate} = \frac{\rho_p - \rho_t}{\rho_m - \rho_t}$$

압축성형으로 제조되는 압분체의 밀도와 프레스 압력(P)과의 관계는, $\rho(\text{g/cm}^3) = k \cdot P^x (\text{ton/cm}^2)$ 으로 표현되며, 희토류 자석 Nd-Fe-Co-Zr-B의 경우¹⁰⁾ 아래와 같이 공정변수가 얻어진다.

$$\rho(\text{g/cm}^3) = (5.1 \sim 5.4) P^{0.047 \sim 0.065} (\text{ton/cm}^2)$$

Fig. 6에는 윗식의 closed packing rate 및 k, x 등의 공정변수와, 사용된 자성분말의 aspect ratio 및 입도에 따른 변화의 측정치를 보여준다. 끝으로 Table 3에는 대표적 희토류 및 ferrite를 사용하여 제조된 수지본드 자석의 자기특성을 정리하였다.

4. P/M magnets용 원료분말 제조장치

연자성분말을 생산하기 위한 장비로서 Fe, Fe-P, stainless 분말은 통상의 water/gas atomizer를 사용한다. 대량생산성이 우수하여 종래부터 도처에서 사용하고 있다. 그러나 P/M magnets의 용도가 다양해지면서 최근에는 Fe-Ni, Fe-Mo-Ni, Ti-Al-V 및 Fe-Si,

Table 3. 각종 bonded magnets의 자기특성

항 목	단위	사 출 성 형						압 축 성 형		
		ferrite		SmCo ₅	Sm ₂ Co ₁₇	NdFeB		Sm ₂ Co ₁₇	NdFeB	
• 잔류자속밀도(B _r)	G	2860	3010	6700	6400	7000	7000	8800	6100	8900
• 보자력(H _c)	Oe	2600	2420	10000	5600	7000	16500	11000	1500	7500
• 최대자기에너지적(B.H) _{max}		2.0	2.2	10	9	6.0	10.5	17	8	16.5
• 바인더	MGOe	나일론	나일론	나일론	나일론	나일론		epoxy	epoxy	epoxy
• 배향성		이방	이방	이방	이방	등방	이방	이방	등방	이방
• maker		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨

① 대일본 인크화학 EPA-190 ② 대일본 인크화학 EPA-200 ③ Sumitomo Wellmax P-10 ④ 대일본인크화학 REA-342
 ⑤ RIST 개발품 ⑥ Hitachi NdFeBGa ⑦ Seiko-Epson SAM-D ⑧ RIST 개발품 ⑨ Hitachi NdFeB

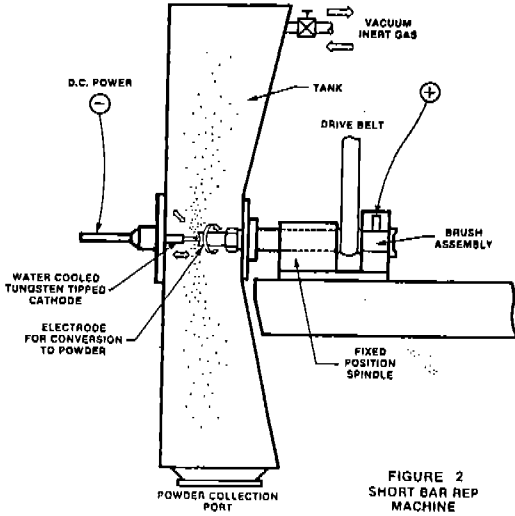


FIGURE 2 SHORT BAR REP MACHINE

Fig. 7. RIST에 구비된 Plasma Electrode Rotating Atomizer.

Fe-Si-Al-Mo 등의 반응성 자성분말은 소위 Plasma Rotating Electrode Atomization의한 제조를 하고 있다. Fig. 7은 포항산업과학연구원(RIST) 전자기연구팀에 설치된 상기 atomizer의 schematic을 보여준다. 기본적으로 plasma electrode rotating 과정에서 공정 변수(O_p)와 재료변수(M_p)사이에서 발생하는 열역학적 균형으로 자성분말이 형성된다.

$$O_p = Q \cdot \omega^{0.60} / D$$

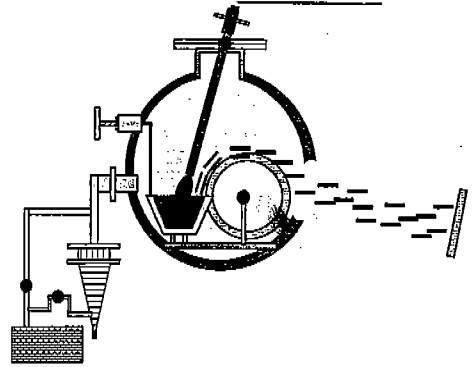
$$M_p = \gamma \cdot \eta \cdot \rho^{0.71}$$

의 관계식을 등식으로하여 정리하면 구형으로 만들어 지는 자성분말의 입도(d)는 최종적으로 아래와 같은 식으로 표현된다(중간과정 생략).

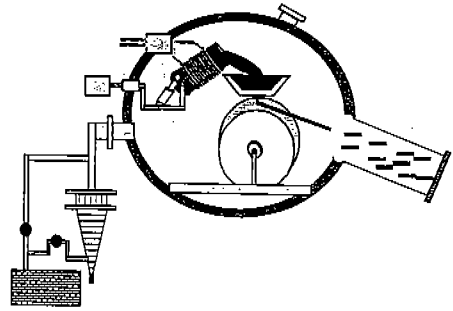
$$d = 4.63 \times 106 \frac{1}{\omega^{0.98}} \frac{1}{D^{0.64}} \frac{\gamma}{\rho} Q^{0.43}$$

여기서 D(m)는 electrode 앙곳트의 직경, $\gamma(N/m)$ 는 용해면의 surface tension, Q(m^3/sec)는 용해속도, $\omega(rad/sec)$ 는 electrode의 회전속도, $\rho(kg/m^3)$ 는 용융금 속의 밀도를 나타낸다. 상기 관계식은 Fe base의 연자성 분말제조에 비교적 잘맞는 것으로 확인된다. RIST에 구비된 장비는 상기 모든 연자성재료의 제조에 적합하며, 7000 rpm의 속도에서 입력전류/전압=800 Amp/50 Volt의 Ar plasma에서 분당 500 g의 빠른 속도로 미세립(30~150 μm)의 연자성 분말을 제조하고 있다.

한편 경자성분말의 생산을 위해서는 주로 induc-



RIST Process : plasma arc melting → short fiber



G.M Process : Induction melting → ribbon

Fig. 8. 경자성분말을 생산할 수 있는 melt spinner의 비교: RIST장비와 GM Magnequench사 장비.

tion melting & spinning을 이용하여 자성리본을 제조한 후 필요에 따라 분쇄하여 수지자석용의 원료분말로 사용하고 있다. 과거 GM의 자회사였던 Magnequench사에서 독점생산하여 연간 1200톤의 생산을 계속하고 있으며, 국내에서는 역시 RIST에서 plasma extractive melt & spinning 기술을 사용하여 각종 희토류 자성분말을 단섬유형태의 분말로 생산하고 있다. Fig. 8에 통상의 GM 공정인 유도용해 및 spinning 장비와 RIST에서 사용중인 plasma melting & spinning 장비를 비교한다. 현재 RIST에서는 본 기술로 2 kg/day의 생산능력을 보이고 있으며, 국내 업체와 수지자석용 자성분말을 상업화에 착수하였다.

참 고 문 헌

1. J. A. Bas, J. Planas and C. Molins, Proc. of 1993

- Powder Metallurgy World Congress, Japan Society of Powder Metallurgy, (1993) 710.
2. K.S.V.L. Narasimahn, C. Oliver and F. Hanejko, Soft Magnetic Materials '96, Gorham/Intertech 2nd International Business Development Conference, San Francisco, Feb. 26~28, (1996).
 3. F. J. Hanejko, H. G. Rutz and C. G. Oliver, Proc. of 1992 Powder Metallurgy World Congress, San Francisco, June 21~26, (1992).
 4. K. Kukimiya, Soft Magnetic Materials of Nano-structure Control, IEEE Trans., Mag(3), (1995) 2197.
 5. 양충진, 한국자기학회지, 5(6), (1995) 974.
 6. N. Isgaki, Proc. of 9th International Business Conference on NdFeB '95, Gorham/Intertech Consulting, San Diego, CA, Feb.26~28, (1995).
 7. I. R. Harris and P. J. McGuinness, Proc. of 11th Inter. Workshop on Rare Earth Magnets & Their Applications, Pittsburgh, PA, Oct. 21~24, (1990).
 8. C. J. Yang and W. Y. Lee, Powder Technology, 77 (1993) 285.
 9. C. J. Yang and S. D. Choi, Proc. of 12th Inter. Workshop on rare Earth Magnets and Their Applications, Canberra, Australia, July, (1992) 528.