

SrO-5.7Fe₂O₃ 페라이트의 등방성 및 이방성 특성에 미치는 소결온도와 첨가제의 영향

A Study on the Effects of Additives and Sintering Temperature on Isotropic and Anisotropic Characteristics of SrO-5.7Fe₂O₃

송 준 태* · 신 용 덕* · 진 흥 범*

(Joon-Tae Song · Yeong-Duck Shin · Hong-Bum Jin)

요 약

SrO-5.7Fe₂O₃의 Magnetoplumbite형 Sr페라이트에 첨가제 SiO₂, H₃BO₃, CaCO₃, SrCO₃을 0.1-0.1wt%로 변화시켜 만든 등방성과 이방성의 자기이력곡선, 밀도, 감자곡선, 고유보자력 및 미세구조특성에 미치는 영향을 조사하였다.

위 첨가제는 페라이트 생성 및 특성개선에 효과적이었고 특히 등방성에서의 입도(粒度)크기를 3.5 μ m에서 1.7 μ m로 하였을때 소결온도가 40 $^{\circ}$ C 낮은 1220 $^{\circ}$ C에서 잔류자속밀도가 2300G, 보자력이 1950Oe, 밀도가 4.51g/Cm³, 고유보자력이 3500Oe로 각각 증가하였다.

이방성은 등방성 보다 월등히 우수하였고 최대에너지적 (BH)_{max}이 소결온도가 10 $^{\circ}$ C 낮은 1210 $^{\circ}$ C에서 1.13으로 부터 3.3MGOe로 증가하였다.

이값은 이론치의 61%에 도달하고 있다.

ABSTRACT

The effect of CaCO₃, SrCO₃, SiO₂ and H₃BO₃ in the range of 0.1~1.0wt% on strontium ferrites consisting of the magnetoplumbite phase SrO-5.7Fe₂O₃ were investigated.

The hysteresis loop, density, demagnetization curve and the intrinsic coercive force were measured on isotropic and anisotropic ferrite. The microstructure of the ferrite were examined using SEM. It was found that approximately 0.1 to 1.0wt% of CaCO₃, H₃BO₃ or SiO₂ are extremely effective in activating the ferrite formation and improving the ferrite properties.

*성균관대학교 전기공학과

Particle size is particularly important for the properties of isotropic ferrite. When the particle size is decreased from $3.5 \mu\text{m}$ to $1.7 \mu\text{m}$, the sintering temperature is decreased from 1260°C to 1220°C , the remance is increased from 1800 to 2300G, the coercive force from 1375 to 1950Oe, the density from 3.56 to $4.51\text{g}/\text{cm}^3$ and the intrinsic coercive force from 3350 to 3500Oe. The properties of anisotropic $\text{SrO}-5.7\text{Fe}_2\text{O}_3$ ferrite is better than isotropic $\text{SrO}-5.7\text{Fe}_2\text{O}_3$ ferrite. Maximum energy product is increased from 1.13 to 3.3MGOe and sintering temperature is decreased from 1220 to 1210°C . Maximum energy product 3.3MGOe is 61% of theoretical value.

1. 서 론

산화물계 페라이트 자석의 대표적인 것이 CoFe_2O_4 와 Fe_3O_4 의 고용체 및 Ba계 페라이트 자석이다. 페라이트 자석은 소위 Ceramic Magnet, Oxide Magnet 혹은 Hard magnet라고 부른다.

1932년 加藤興五郎 박사, 武井武 박사가 CoFe_2O_4 와 Fe_3O_4 의 고용체를 약 300°C 에서 자화할때 그 잔류자기와 항자력이 현저히 증대하는 현상을 발견하였다.¹⁾

Ba 페라이트는 1953년 Philips 연구소의 J. J. Went, G. W. Rathenau, E. W. Gorter, G. W. VanOsterhout 등에 의하여 개발되었고 武井, 杉本 등은 Ba계 페라이트에 2~20wt%의 Bi_2O_3 혹은 NaBO_3 를 첨가하여 $800\sim 1100^\circ\text{C}$ 의 온도에도 좋은 소결상태가 되도록하였으며 자성이 Philips사의 Ba계 페라이트 보다 약 20% 향상됨을 발견하였다.²⁾

武井武박사와 杉本光男박사는 CoFe_2O_4 와 Fe_3O_4 고용체에 소량의 As_2O_3 를 첨가하여 기계적강도가 현저히 향상된 자기특성을 개선하게 됨을 발견하였다.

1963년 경에 Sr페라이트 자석이 Ba페라이트 자석보다 자성이 양호하다고 발표된 이래 지금에 이르고있다.²⁾ 최근에는 금속합금의 자

석 대신에 Sr페라이트로 대체이용되고 있으며 더구나 DC Motors, Synchronous Motors, Electrical Relays 그리고 Magnetic Ore Separators등에 사용되고 있다. 이와같이 다양한 응용성을 가진 Sr페라이트는 SrCO_3 와 Fe_2O_3 의 새로운 조성비 개발, 제조기술의 진보 및 여러가지 산화물을 소량첨가하여 고보자력, 경량화, 고에너지밀도 등의 고안정화, 고성능화 되어가고 있다.

따라서 본실험에서는 육방정 페라이트 자석의 일종인 $\text{SrO}-x\text{Fe}_2\text{O}_3$ 에서 $x=5.7$ 의 조성비를 선택, 각 기본조성에 대해 CaCO_3 , SrCO_3 , SiO_2 및 H_3BO_3 의 첨가량을 0.1~1.0wt%까지 변화시켜 등방성과 이방성의 두 가지 형태로 시편을 제작하였고 온도 의존성에 따른 Br, μHc , μHc 특성 및 미세구조를 조사하였으며 DC Motors, Generators, Synchronous Motors 등으로의 응용가능성에 대해 고찰하였다.

2. 결정상과 치환고용체

일반적으로 육방정 페라이트 자석은 M형 페라이트로 $\text{BaO}-6\text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{SrO}-6\text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{PbO}-6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 3종류이고 화합물의 격자구조는 그림 1과 같이 육방정형이다.

이격자는 C축(그림의 상, 하방향)에 대하여

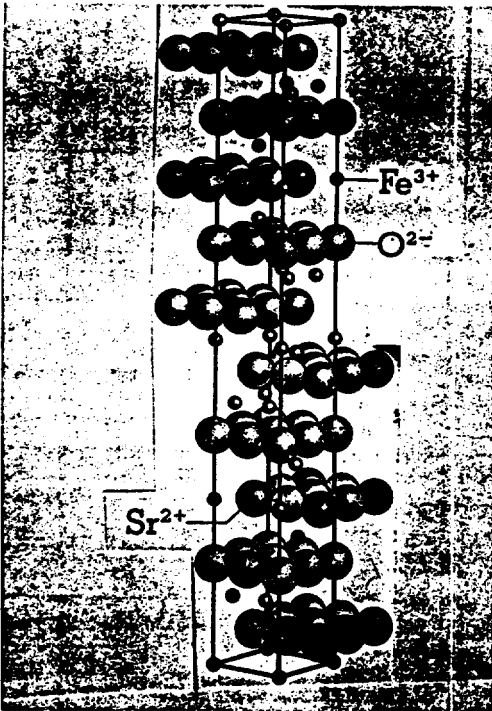


그림 1. Magnetoplumbite의 단위격자 결정구조
Fig. 1. Perspective Drawing of Crystal Model of Magnetoplumbite Unite Cell.

층상으로 Fe³⁺, Sr²⁺, O²⁻가 각각 배치하고있다. 격자구조를 C축에 직각인 평면으로 13개로 분할하고 6개의 분할면이 1분자로 이루어진 C축 중심의 180° 회전한 구조이다.

또 페리자성체에서 Fe³⁺의 스핀(spin)이 O²⁻에 끼어들어 반평행한구조라고도 할수있다. 이와같은 결정구조는 천연광물(Magnetoplumbite Pb(Fe, Mn)₁₂O₁₉)과 같은 형태이기 때문에 일반적으로 Magnetoplumbite구조라고 부른다.³⁾

Ba, Sr-페라이트 자석은 합금자석에 비해 잔류자기가 적고 온도계수가 큰 단점을 개선하고 자성특성을 개선할 목적으로 산화물을 소량첨가하는 연구가 이루어지고 있다.⁴⁻⁶⁾ 첨가된 금속이온이나 비금속 이온은

Magnetoplumbite결정내의 Ba²⁺(Sr²⁺), Fe³⁺, O²⁻의 3종류의 이온 어느것과 치환한다. 이와같은 성질을 이용하여 본 실험에서는 SrO-5.7Fe₂O₃의 조성비에 1차에 SiO₂ 0.15wt%와 H₃BO₃ 0.1wt%를 첨가하여 하소한 후 2차에 CaCO₃ 0.1wt%, SrCO₃ 0.5wt%, SiO₂ 0.3wt%를 첨가하여 M형 페라이트 자석의 자성을 개선 하였다.

3. 실험 및 측정

3-1. 등방성, 이방성 시편의 제조

Sr 페라이트 자석을 등방성형으로 제조하기위해 순도 99.5% 이상의 SrCO₃, Fe₂O₃원료분말을 몰비 1 : 5.7에 따라 1차 첨가제 SiO₂ 0.15wt%, H₃BO₃ 0.1wt%을 각각 전자천평(Geber Bosch S2000)으로 평량한후 알루미늄아 유발에 넣어 아세톤을 분산매로 혼합하였다.

혼합이 끝난시료를 100°C에서 건조시킨후 알루미늄아 도가니에 넣어 전기로(Eurotherm Controller/Programmer Type 818 Mode in England)를 사용하여 600°C/hr씩 증가시켜 1200°C에서 60분 동안 1차 열처리하였다.

1차 열처리를 행한 분말에 2차 첨가제 CaCO₃ 0.5wt%, SrCO₃ 0.5wt%, SiO₂ 0.3wt%를 재첨가한 후 아세톤을 분산매로하여 마그네시아 불밀에서 2시간과 8시간동안 각각 milling한후 3.5 μ m와 1.7 μ m로 하였다. 혼합분쇄가 끝난 시료를 100°C에서 다시 건조시킨후 이분말을 원통형 금형(10 ϕ mm)에 2.5gr씩 넣고 196(MPa)의 압력으로 성형하였다.

성형된 시편을 전기로에 넣어 180°C/hr씩 증가시켜 온도변화에 따라 2시간 동안 소결하였고 이때의 온도를 1180~1280°C까지 변화시켰다. 또 소결된 시편의 표면을 가공처리하였으며 이와같이 건식방법으로 제작된 등

방성 시편의 자기이력곡선, B-H감자곡선, 미세구조 특성을 조사하였다.

이방성형은 자계 하에서 습식법으로 성형한 것이 등방성과 다른점이고 이때의 자계는 9000Oe 이며 50(%)의 수분함유량을 갖고있는 분말을 원통형 금형(φ40.09mm)에 80gr씩 넣고 49MPa의 압력으로 성형하였다. 또 2차 첨가제 중 CaCO₃를 0.1~1.0wt%까지 변화시켰고 입도를 0.8μm로 미분쇄 하였다. 그 이외의 제조방법은 등방성형과 동일하게 하였다.

3-2. 측 정

3-2-1. 자기이력곡선의 측정

가공처리된 시편은 B-H Curve Tracer(Rinken Denshi Co. Ltd Made in Japan)을 사용하여 실온에서 자기이력곡선 B Vs H의 2상한인 감자곡선을 측정하여 잔류자속 밀도(Br), 보자력(_BHc), 고유보자력(_HHc) 및 에너지적(BH)을 측정하였다. E. C Stoner와 E. P Wohlfarth가 제안한 단자구 입자의 자화과정 M-H Loop을 계산할수있는 S-W Model $H_c = 0.48$

표 4-1. 시편의 조성 및 자기특성(Isotropic)

Table 4-1. Composition and Magnetic Properties of Specimens.

Specimen	Composition and additives
S-1, S-2, S-3, S-4, S-5	SrO-5.7Fe ₂ O ₃ + SiO ₂ 0.15wt% + H ₃ BO ₃ 0.1wt% (1차)
S-6, S-7, S-8, S-9, S-10, S-11, S-12, S-13, S-14, S-15	SrO-5.7Fe ₂ O ₃ + SiO ₂ 0.15wt% + H ₃ BO ₃ 0.1wt% (1차) + CaCO ₃ 0.5wt% + SrCO ₃ 0.5wt% + SiO ₂ 0.3wt% (2차)

Specimen	Sintered temp (°C)	remance (G)	Coercive(Oe)		Maximum energy (BH)max(MGOe)	density (g/cm ³)	press type
			_B Hc	_H Hc			
S-1	1180	1570	1250	3325	0.49	3.24	Dry
S-2	1200	1600	1275	3125	0.526	3.36	particle size 3.5μm
S-3	1240	1700	1375	2900	0.56	3.84	
S-4	1260	1800	1325	2550	0.62	3.93	
S-5	1280	1150	350	575	0.063	4.03	
S-6	1180	1550	1250	3425	0.49	3.43	
S-7	1220	1800	1375	3350	0.64	3.56	particle size 3.5μm
S-8	1240	1820	1400	3250	0.64	3.95	
S-9	1260	1900	1450	3200	0.68	4.14	
S-10	1280	1700	1050	2250	0.425	4.38	
S-11	1180	2125	1850	3650	1.0	4.08	
S-12	1200	2250	1900	3600	1.103	4.5	particle size 1.7μm
S-13	1220	2300	1950	3500	1.13	4.51	
S-14	1240	2250	1950	3350	1.13	4.59	
S-15	1280	1950	700	1150	0.28	4.6	

(2K/Is-NIs)-1.7PIs의 이론치와 비교하였다.⁸⁾

3-2-2. 밀도측정

측정을 위해 가공된 시편은 전자천칭으로 무게를 측정하고 그 체적은 시편의 크기로 부터 계산하였다. 표 4-1은 소결온도에 따른 시편들의 밀도(g/Cm³)결과치 인데 이 가운데 특성이 우수한 시편 S-13의 값은 단자구 입자의 자화과정에서 나타나고있는 페라이트 SrO-6Fe₂O₃의 자기포화 Is(G)에서의 밀도 5.04g/Cm³이 보다 다소 큰 차이(10.5%)가 있음을 알수가있었다.

3-2-3. 미세구조

이방성 페라이트 자석의 C축의 배향성을 향상시키고 소결성을 잘 형성하여 자성을 개선할 목적으로 여러가지 산화물 SiO₂, H₃BO₃, CaCO₃, SrCO₃를 첨가하여 단자구 형성에 미치는 영향을 조사하였고 등방성에서는 육방정

이 나타나고 이방성에서는 C축 배열이 나타남을 관찰하였다.

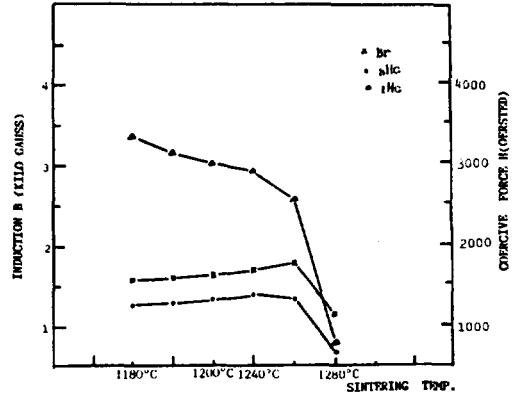


그림 4-1. 소결온도에 따른 B-H특성(1차 첨가 입도3.5 μ m)

Fig. 4-1. B-H Characteristics as A Function of Sintered Temperature(first additive 3.9 μ m particle size).

표 4-2. 시편의 조성 및 자기특성(Anisotropic)

Table 4-2. Composition and Magnetic Properties of Specimens.

Specimen	Composition	1st additives	2nd additives
A-1	SrO-5.7Fe ₂ O ₃	SiO ₂ 0.15wt% H ₃ BO ₃ 0.1wt%	SrCO ₃ 0.5wt% SiO ₂ 0.3% CaCO ₃ 0.1wt%
A-2	SrO-5.7Fe ₂ O ₃	SiO ₂ 0.15wt% H ₃ BO ₃ 0.1wt%	SrCO ₃ 0.5wt% SiO ₂ 0.3% CaCO ₃ 0.5wt%
A-3	SrO-5.7Fe ₂ O ₃	SiO ₂ 0.15wt% H ₃ BO ₃ 0.1wt%	SrCO ₃ 0.5wt% SiO ₂ 0.3% CaCO ₃ 1.0wt%

specimen	Sintered temp (°C)	Remance (G)	Coercive(Oe)		Maximun energy (BH)max(MGOe)	density (g/cm ³)	press type
			μ Hc	Hc			
A-1	1210	3650	2750	2850	3.15	4.71	Wet partice size 0.8 μ m
A-2	1210	3700	3150	3375	3.2	4.75	
A-3	1210	3800	2980	3175	3.3	4.81	

4. 결과 및 고찰

4-1. Br, μ Hc, Hc, (BH)max 실험치

표 4-1은 본 실험에서 입도의 크기를 3.5 μ m과 1.7 μ m의 두가지 형태로 선택하여 제작한 등방성 페라이트의 조성 및 실온에서의 자기 특성이고 표 4-2는 이방성 페라이트의 특성이다. 그림 4-1은 SrCo₃/Fe₂O₃의 1/5.7몰비에 1차첨가제 SiO₂ 0.15wt%와 H₃BO₃ 0.1wt%만을 첨가하여 하소하고 소결온도변화에 따른 B-H곡선이다. 그림 4-2는 SrCO₃/Fe₂O₃의 1/5.7몰비에 1차첨가제 SiO₂ 0.15wt%와 H₃BO₃ 0.1%를 첨가하여 하소하고 CaCO₃ 0.5wt%, SrCO₃ 0.5wt%, SiO₂ 0.3wt%를 2차첨가제로 한후 소결온도 변화에 따른 B-H곡선이다.

1차 첨가제 시편의 경우 잔류자속밀도 Br (G)크기가 소결온도 1260°C에서 가장 크게 발생하였고 보자력 μ Hc(Oe)는 1240°C에서 최대값을 나타내었으며 이때에 최대에너지적 (BH)max(GOe)을 (퍼어미언스 계수는 1) 갖는다. 1, 2차 첨가제의 경우는 1260°C에서 Br

(G), μ Hc(Oe), (BH)max(GOe) (퍼어미언스 계수는 1)의 최대값을 각각 갖는다.

또 입도의 크기를 3.5 μ m에서 1.7 μ m로 하였을 때는 그림 4-3의 B-H Curve상에 나타난 바와 같이 Br=2300(G), μ Hc=1950Oe, (BH)max=1.13MGoe로 2배 정도의 최대에너지를 나타내고 있다.

아울러 소결온도는 1220°C로 40°C가 낮은 점에서 반응이 이루어졌다. 이것은 1907년 WEISS가 자발자화설을 발표한 단자구(單滋區)형태에 가까운 것으로 사료된다.¹⁾

SiO₂, H₃BO₃는 Sr페라이트 보다 용점이 낮기 때문에 소결 과정에서 고상반응을 보다 빠른 온도에서 일으키기 시작하여 페라이트 생성이 완료된 것으로 본다.

표 4-1에서 1, 2차 첨가한 시편의 경우 나타난 바와같이 비금속 개재물(介在物) 등이 분산되어 있을경우 자벽의 이동을 막아 보자력 Hc(Oe)을 크게 한다.

4-2. 자기이방성시편

Sr페라이트와 같은 육방정의 경우는 C축이

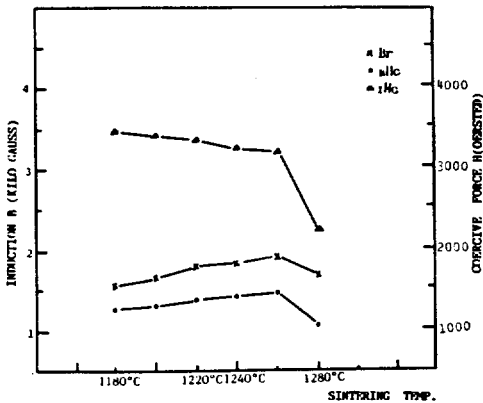


그림 4-2. 소결온도에 따른 B-H특성(1, 2차 첨가, 입도 3.5 μ m)

Fig. 4-2. B-H Characteristics as A Function of Sintered Temperature(first and additive, 3.5 μ m particle size).

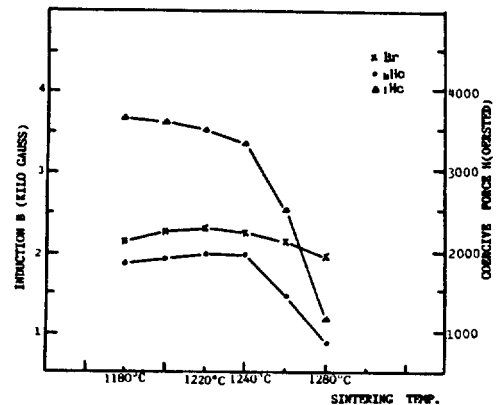


그림 4-3. 소결온도에 따른 B-H특성(1, 2차 첨가, 입도 1.7 μ m)

Fig. 4-3. B-H Characteristics as A Function of Sintered Temperature(first and additive, 1.7 μ m particle size).

1축 이방성으로 되는 경우가 많기때문에 자화의 방향을 되도록이면 자화용이 축과의 기울기 θ 를 최소화하여야하고 θ 만큼에 해당하는 내부 에너지 즉 결정이방성 에너지 E_a 는 다음과 같다.

$$E_a = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + K_3 \sin^6 \theta \dots$$

(K₁, K₂, K₃.....결정자기이방성정수)

여기서 $E_a=0$ 이 되기 위해서는 $\theta=0$ 즉 자발자화와 자화용이축과의 기울기를 일치시켜야 한다. 이와같이 각도를 최소로 하기위하여 성형시에 B_H 의 3~4배 크기인 자계하에서 압축하며 아울러 c축으로 용이성을 더하기위해 wet press한다.

어느 일정크기의 자성체에 외부자장 H_{ex} 을 가할때 자성체 내부에는 외부자장과 반대방향으로 내부자장이 발생하는데 이것을 반자장 H_d 라 하고 자성체의 자화 I에 비례하는데 그 비례계수를 반자장계수 N_d 라한다.

$H_d = N_d I$ 이다. 따라서 자성체에서의 유효자장 H_{eff} 는 다음과 같이 된다.

$$H_{eff} = H_{ex} - H_d$$

이외의 외부처리 방법에 의해 나타나는 유도자기이방성, 자왜 및 교환이방성도 자기특성에 영향을 미치고있다.

그림 4-4과 표 4-2에서 알수있는 바와 같이 1210°C에서 CaCO₃의 wt%만 0.1, 0.5, 1.0으로 변화시켜 나타낸 실측치이고 S-W Model $B_H = 0.48(2K/Is - NdIs) - 1.7PIs$ 의 이론치와 비교하여보았다. 여기서 K(결정자기이방성 정수)는 3.6×10^6 (erg/cc)이고 포화자화 I_s 는 370G로 실온에서 SrFe₁₂O₁₉의 이론값이며^{1,8)} $N_d=5$, P (자성분말의 최적율)=0.95로 하여 나타낸 값이다.

등방성에 비해서는 소결온도가 10°C 낮은 1210°C이고 B_r , B_H 가 월등히 향상되었으나

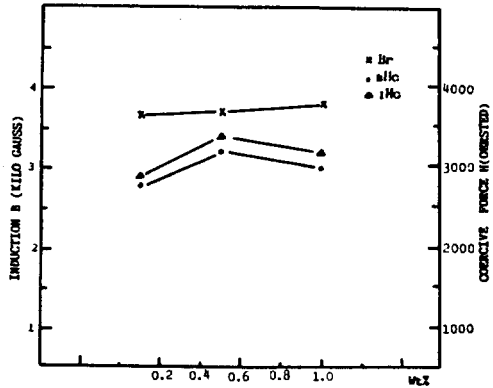


그림 4-4. CaCO₃첨가량에 따른 이방성시편의 B-H특성(1210°C)

Fig. 4-4 Anisotropic B-H Characteristics as A Function of Additive CaCO₃ Weight Percentage(at 1210°C)

이론치와는 다소 차이가 나는 현상이며 CaCO₃를 0.5wt%, 1.0wt%씩 각각 첨가하였을때 비교하여보면 0.5wt% 첨가에서는 B_H 가 3150Oe로 1700Oe 정도 크고 1.0wt%에서는 B_r 이 3800G로 100G 정도가 크게 나타난다. 퍼미언스 계수를 1로 하였을때, 1.0wt%가 3.33MGOe, 0.5wt%가 3.2MGOe로 미세한 정도 크게 나타나고있는데 Hard Ferrite에 적용한다고 한다면 보자력이 다소 높은 0.5wt%의 적용이 다소 우수하다고 본다.

또 단자구 미립자의 자화용이축 방향의 자기특성의 이론치는 이상적인 B-H곡선 상에서의 B_r , B_H 가 각각 $4\pi I_s$ 로 4650G, 4650Oe가 되며 이에 대응하는 $(B H)_{max}$ 크기는 $1/4(4\pi I_s)^2$ 의 값으로 5.4MGOe이다. 실험치 3.33MGOe는 이론치의 61%에 해당하고 있다.

4-3. 미세구조

사진 4-1, 4-2는 등방성과 이방성 시편의 SEM 현상이다. 사진 4-1은 육방정계의 결정



사진 4-1. S-9시편의 미세구조

Photo. 4-1. Microstructure of S-9 Specimen.



사진 4-2. A-2시편의 미세구조(성형자계 평행)

Photo. 4-2. Microstructure of A-2 Specimen
(Parallel with applied H(Oe)).

을 이루었고 사진 4-2는 C축 배열의 이방성을 나타내고 있다. 또 밀도의 크기가 이방성 A-2 시편의 경우에는 4.75g/cm^3 이고 $1.7\mu\text{m}$ 입도의 등방성 S-13 시편의 경우에는 4.51g/cm^3 이었을 때 최적의 응용가능성을 나타내고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 $\text{SrO}-5.7\text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 조성비에 1, 2차로 나누어 SiO_2 , H_3BO_3 , CaCO_3 , SrCO_3 를 첨가하여 등방성과 이방성으로 시편을 소결온도에 따라 만들었고 입도크기를 3.5, 1.7, $0.8\mu\text{m}$ 로 변화시켰을 때의 자기적특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) SiO_2 , H_3BO_3 , CaCO_3 , SrCO_3 의 1, 2차 첨가는 시편 S-13, S-14의 B-H 특성에서와 같이 시편 S-9의 소결 온도 1260°C

보다 40°C 20°C 낮은 온도에서 고상반응을 일으키고 비금속 개체물등의 분산으로 인하여 자벽의 이동을 막아 보자력을 증대시켰다.

- 2) 입도의 크기를 $3.5\mu\text{m}$ 에서 $1.7\mu\text{m}$ 로 하였을 때 최대에너지적이 2배크기인 1.13 MGOe(S-13의 시편)로 나타났으며 등방성 페라이트로서 자기특성의 우수성을 나타내고 있다.
- 3) 단자구 미립자에 가까운 $0.8\mu\text{m}$ 입도 크기로 이방성 페라이트화 하기위하여 9000Oe자계를 인가하면서 습식법(수분율 50%)으로 프레스한 시편 A-1, 2, 3의 자기적 특성은 등방성에 비해 월등히 우수하였으며 최대에너지적 3.3MGOe는 이론치의 61%에 해당한다.
- 4) 저온불가역 감자현상이 발생하지 않도

특 보자력(B_H)이 클것을 고려하면 이방성
시편 A-2의 특성이 적합하다.

이와 같이 다양한 우수성을 갖는 Sr ferrite
는 고보자력, 고에너지적을 필요로 하는 DC
motor등의 hard ferrite로서 응용가능성을 나
타내고있다.

참 고 문 헌

- 1) 總合技術セクタ; 永久磁石の開発,
材料設計と磁氣回路の解析,
設計應用技術, (1987)
- 2) A. Cochart ; *J. Appl. Phys.* **34**, (4)
(Part2), 1273~1274(1963).
- 3) Y. Goto and T. Takada ; *J. Am. Ceram.*
Soc. **43**, 150(1960).
- 4) L. G. Van Uitert ; *J. Appl. Phys.* **28**,
317(1957)
- 5) L. G. Van Uitert and F. W.
Swanekamp ; *J. Appl. Phys.* **28**,
482(1957)
- 6) S. Kurisu, T. Ido and
H. Yokoyama ; *IEEE Trans. Mag.* **23**,
(5) 3137~3139(1987)
- 7) Frederic J. Klug and Jamse
S. Reed ; *Am. Ceram. Soc. Bull.* **57**,
(12) 1109~1115(1978)
- 8) C. D. Mee and J. C. Jeschke ; *J. Appl.*
Phys. **34**, (4) Part2, 1271~1272(1963)
(1990년 4월 12일 접수)