

스파크 플라즈마 소결법으로 제조된 Sr-페라이트의 특성

노재승* · 오명훈

금오공과대학교 신소재시스템공학부, 구미 730-701

(2003년 1월 2일 받음, 2003년 2월 13일 최종수정본 받음)

스파크 플라즈마 소결(SPS)을 이용하여 이방성 Sr-페라이트 자석을 제조하였다. SPS 장치를 이용하여 소결과 동시에 페라이트 분말을 배향시킬 수 있었으며, 낮은 온도 및 짧은 작업시간으로 치밀한 이방성 페라이트 자석을 제조할 수 있었다. 페라이트 입자의 이방성은 소결체의 바깥쪽부분에서 더 크게 나타났으며, 페라이트 입자의 배향은 SPS 전류와 밀접한 관계가 있는 것으로 판단되었다. 1060 °C에서 8분간 소결시킨 소결체의 밀도는 5.033 g/cm³이었고, 소결체의 radial plane에서 잔류 자속 밀도는 3.15 kG, 보자력은 2.67 kOe이 얻어졌다.

주제어 : 스파크 플라즈마 소결, Sr-페라이트, 배향, 이방성

I. 서 론

스파크 플라즈마 소결(Spark Plasma Sintering, SPS)은 1990년대 이후에 발달한 새로운 소결법으로써 상압 소결법에 비해 상대적으로 낮은 온도에서 단시간 내에 아주 높은 소결 밀도를 갖는 소결체를 제조할 수 있는 방법으로 각광을 받고 있다[1]. SPS 공정은 흑연 몰드 내에서 가압 중에 있는 원료분말에 on-off로 제어되는 직류펄스전류를 직접 통전시킴으로써 분말과 분말사이의 공간에서 발생하는 스파크 플라즈마를 주 열원으로 사용된다고 알려져 있으며, 그 외에 흑연 몰드에 흐르는 전류에 의해 간접 가열된다는 것과 분체에 직접 흐르는 전류에 의한 저항 열로 가열되는 것으로 설명되고 있다. 현재까지 SPS 공정에 대한 연구는 광범위하게 이루어져 기존의 난소결성 고 용점 금속, 금속간 화합물, 비 산화물 세라믹스 및 복합재료 등에 대해서도 승온·유지시간을 포함하여 20~30분 이내의 짧은 시간과 비교적 낮은 온도에서 치밀한 소결체로의 제조가 가능한 급속 소결법으로 알려져 있으며, 이처럼 단시간 열처리가 가능하기 때문에 원료입자의 성장을 억제시키면서 원료분말의 크기 및 미세 형상을 그대로 갖는 치밀한 소재 제조가 가능한 유효한 방법으로서 기대되고 있다[2-5]. 국내에서도 최근에 금속, 세라믹스, 생체재료 및 나노 복합재료 등의 분야에서 SPS 장치를 이용한 소결체의 제조에 관한 연구논문이 발표되고 있다[6-11]. 그러나 현재까지 SPS 장치를 이용한 연자성 페라이트 및 희토류 자석을 포함한 자성재료에 대한 연구[12-15]는 극히 드문 실정이며, 특히 국내 연구는 거의 전무한 실정이다.

이 연구에서는 SPS를 이용하여 치밀하고 이방성을 나타내는 Sr-페라이트 소결체를 제조하고자 하였으며, 제조된 시편의 밀도 및 결정(또는 분말)의 배향성과 자기적 특성과의 관계를 조사하여 이방성 페라이트 자석제조 가능성을 연구하였다.

II. 실험방법

이 실험에서 국내의 페라이트 제조업체에서 구입한 Sr-페라이트 분말을 원료분말로 이용하였으며, 일본 Izumi Technology Co. Ltd.에서 제작된 SPS-1030을 사용하여 SPS 소결을 수행하였다. SPS 장치의 개략도는 Fig. 1과 같으며 소결 공정은 다음과 같다. 우선 원료분말(13 g)을 원통형의 전도성 흑연 몰드(지름 20 mm)에 장입하고, 상부와 하부에 위치한 전도성 흑연 편치를 이용하여 일축 가압한다. 그리고 원료분말에 압력을 가하는 흑연 편치를 통하여 특수한 펄스의 직류 전원을 가해주면, 시료분말을 통과하는 펄스전류에 의해 분말사이에서 스파크 플라즈마가 발생되고 동시에 흑연 몰드 및 분말에 흐르는 전류에 의해 주열(Joule) 열이 발생되어 원료분말은 가열된다. 성형 중 분말과 몰드의 윤활성을 증진시키고 소결이 끝난 후 탈형을 용이하게 하기 위하여 원료분말 및 흑연 몰드 사이에는 탄소필름을 삽입하였다. 이 연구의 실험 조건을 Table I에 나타내었다. 소결은 약 10⁻² Pa의 진공분위기 하에서 진행되었으며, 방사온도계를 이용하여 온도를 측정하였다. 방사온도계로 측정되는 흑연 몰드 온도를 기준으로 승온속도는 분당 300 °C이고, 소결 온도는 1000~1060 °C의 범위에서, 유지시간은 8분, 하중은 20 MPa의 조건에서 소결시켰으며, 위와 같은 조건에서 인가된 전류는 1000~2000 암페어의 범위로 나타났다. 소결체 제조시 온도에 따른 소결 수

*Tel: (054)467-4336, E-mail: saturn34@hanmail.net

Table I. Parameters for SPS process in this study

Items	Conditions
Atmosphere	Vacuum ($\sim 10^{-2}$ Pa)
Heating Rate	300 °C/min
Sintering Temperature	1000, 1030, 1060 °C
Soaking Time	8 min
Applied Pressure	20 MPa
Plasma Current	1000~2000 Ampere
Specimen Size	20 Φ ×8 h (mm)
Sample Weight	13 g

축변화를 조사하였으며, 온도변화에 따른 밀도변화를 상호 비교하여 각각의 제조조건에 따른 소결성을 비교하였고, 광학현미경을 이용하여 미세 조직을 관찰하였다. 또한 VSM을 이용하여 잔류자속밀도(Br)와 보자력(iHc)을 측정하였으며, XRD(CoK α)를 이용하여 결정상을 분석하였다. 광학현미경 관찰 및 VSM 측정, 그리고 XRD 측정을 위한 시편은 Fig. 2와 같이 준비하여 소결체의 방향 및 면에 따른 이방성 특성을 조사하였다.

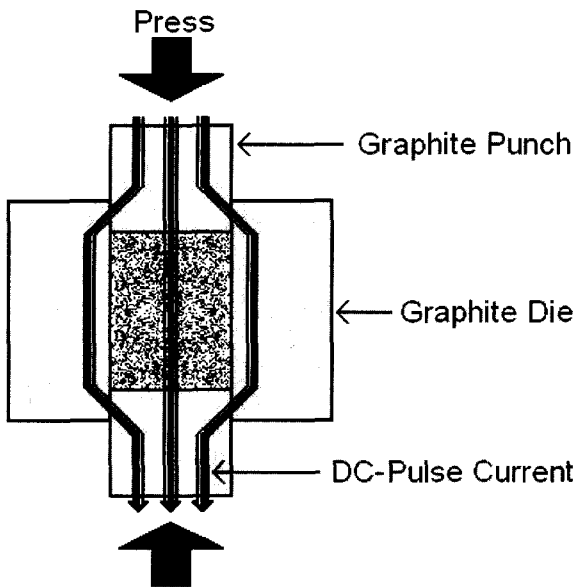


Fig. 1. Schematic diagram of the spark plasma sintering method.

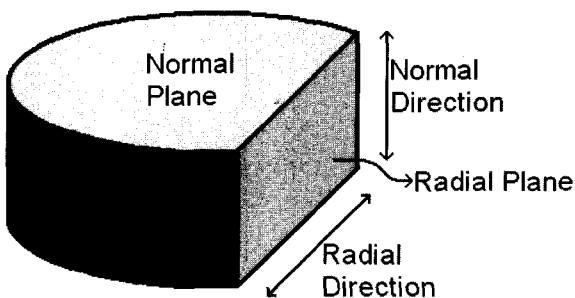


Fig. 2. Sample preparation for measurement of anisotropic properties.

III. 결과 및 고찰

Fig. 3과 Fig. 4는 이 실험에 사용한 원료분말의 결정상 및 형상을 보여주는 그림이다. 분말의 결정상 분석으로부터 원료분말은 안정한 Sr-페라이트를 형성하고 있음을 알 수 있었고, 분말의 크기는 대부분 1 μ m 내외로 비교적 균일한 분포를 보이고 있어 이방성 자석제조에 적합한 분말로 판단되었다.

Fig. 5는 1000 °C와 1060 °C에서 소결 시키면서 장치에 부착된 방사온도계와 변위 측정기로 측정된 흑연 몰드의 온도와 변위를 동시에 측정된 값을 그림으로 표시한 것이다. Fig. 5(a)의 그림에서 나타난바와 같이 1000 °C에서 소결 시킨 경우 초기 소결 온도는 약간 상승하였다가 안정되는 경향을 보인다. 1060 °C에서 소결 시킨 경우에는 Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 1000 °C에서보다 안정한 소결 온도에 도달하는 시간

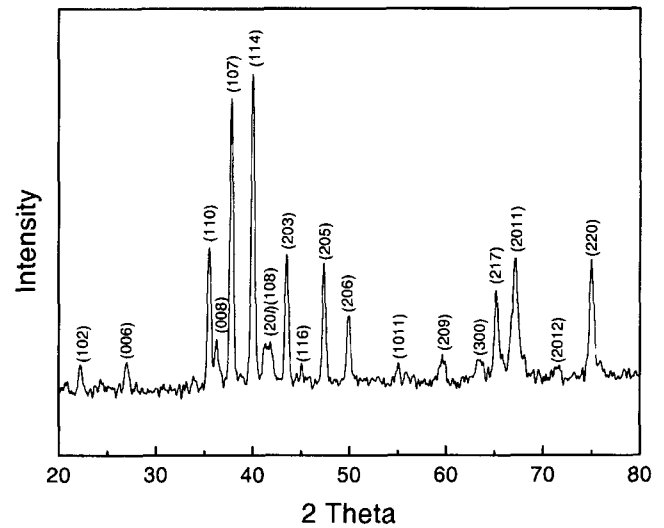


Fig. 3. XRD pattern of the Sr-ferrite powder.

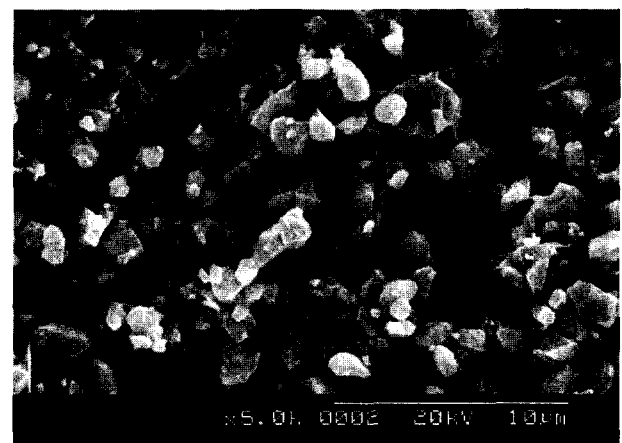


Fig. 4. SEM micrograph of the Sr-ferrite powder.

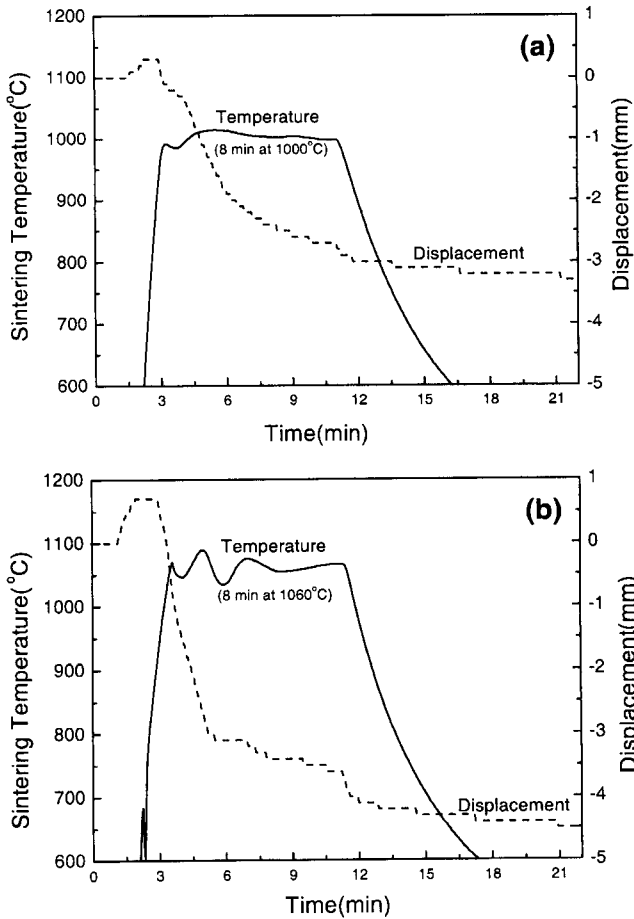


Fig. 5. Temperature and displacement variations during spark plasma sintering at 1000 °C (a), and 1060 °C (b).

이 더 길며, 이것은 승온 속도가 매우 빠르기 때문에 일어난 현상으로 판단된다. 한편 그래프에서 소결이 진행되는 동안의 팽창-수축 변화를 알 수 있는데, 전체적으로 충전 분말은 소결 초기에 팽창했다가 소결이 진행됨에 따라 수축하는 경향을 보인다. 이 그래프로부터 소결 중에 일어나는 치밀화 과정을 직접 확인할 수 있다. 그런데 팽창-수축단계를 자세히 살펴보면 1000 °C와 1060 °C가 조금 다른 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 1000 °C에서, 시편은 승온 도중에 약간 팽창했다가 소결 온도 근처에서 1차 수축이 일어나고, 잠시 후 본격적인 수축이 일어나며, 소결이 진행됨에 따라 수축속도는 감소하다가 냉각이 시작되면서 3차의 수축이 다시 한번 일어난다. 1차 및 3차 수축은 고온에서 팽창했던 충전 분말 및 흑연 볼드의 수축에 의해 발생하는 현상으로 판단되며, 2차 수축이 본격적인 치밀화 과정으로 보인다. 1060 °C에서, 시편은 승온도중 더 많이 팽창하여 1000 °C에서와 달리 소결 온도에 도달하기 전에 수축이 시작되고 있으며, 소결 온도에 도달한 후 약 2~3분 내에 최대 수축률을 보이고, 1차 수축이 끝나기 전에 2차 수축이 바로 일어난다. 따라서 고온 소결의

Table II. Summary for properties of Sr-ferrites prepared SPS process

Sintering Temperature (°C)	Bulk Density (g/cm ³)	Relative Density (%)	Br (kG)	iHc (kOe)	Remarks
1000	4.380	85.9	2.30	2.58	Normal Plane (Radial Direction)
1030	4.463	87.5	2.38	2.47	Normal Plane (Radial Direction)
1060	5.038	98.7	2.81	2.49	Normal Plane (Radial Direction)
			3.15	2.67	Radial Plane (Normal Direction)

치밀화 속도가 더 빠르고, 고온 소결체의 밀도가 더 클 것이라는 것을 예상할 수 있다. 그러나 모든 실험 온도에서 냉각하기 전까지 계속해서 수축이 일어나는 것으로 보아 완전한 치밀화가 일어난 것으로 보이지 않는다.

Table II는 Archimedes법으로 측정된 소결체의 밀도측정결과 및 VSM을 이용하여 측정된 잔류자속밀도(Br) 및 보자력(iHc) 값을 정리한 도표이다. 소결체의 밀도는 소결 온도가 높을수록 증가하여 1000 °C에서 제조된 소결체의 밀도는 4.380(g/cm³)이고 1030 °C에서는 4.463, 그리고 1060 °C에서 제조된 소결체의 밀도는 5.033으로 측정되어 순수한 Sr-페라이트의 이론밀도(5.100 g/cm³)에 대하여 98.7%의 높은 상대밀도를 갖는 소결체를 제조할 수 있었다. 이 값은 기존에 보고된 Sr-페라이트 자석의 소결체의 밀도가 4.3~4.9(g/cm³)정도인 것과 비교하면 치밀화가 잘 되었음을 알 수 있다[15, 20]. 또한 소결체의 normal plane에서 radial 방향으로 측정된 잔류자속밀도 및 보자력은 소결 밀도가 증가함에 따라 증가하여 1060 °C에서 제조된 소결체는 각각 2.81 kG(Br) 및 2.49 kOe(iHc)이었다. 그러나 1030 °C 소결체의 보자력(2.47 kOe)이 1000 °C 소결체(2.58 kOe)보다 작은 것으로 보아 약간의 입자성장이 일어난 것을 추측할 수 있다. 또한 1060 °C 소결체를 수직방향으로 절단한 면(radial plane)의 normal 방향으로 측정된 값이 3.15 kG(Br) 및 2.67 kOe(iHc)으로써 radial 방향으로 측정했을 때 보다 큰 값을 얻었고, 이 때 배향도(Br(∥)/Br(∥)+Br(⊥)×100(%))는 52.9%이다[16]. 따라서 이 연구에서 이용한 Sr-페라이트 분말은 SPS 공정 중에 normal 방향으로 배향되었음을 알 수 있다.

상압소결법으로 제조되는 소결성 자석은 성형 단계에서 자장을 인가하여 분말의 자기배향을 증가시켜야만 고성능 자석으로 제조될 수 있으며, 본 연구의 원료인 Sr-페라이트도 결정의 c-축으로 배향을 시켜야만 강한 이방성을 갖는 영구자석재료로 제조될 수 있는 재료이다[17-20]. N. Murillo 등은 Sr-페라이트 자석의 잔류 자속 밀도는 이방화를 위한 자장을

가하지 않고 성형시켰을 경우 1.7~2.0 kG이고, 4.5 kG의 자장으로 성형시켰을 경우는 2.5~3.1 kG이라고 보고하였다[21]. 이 연구에서 얻은 잔류자속밀도값으로 볼 때 SPS 공정은 상압 소결법의 자장 중 성형효과를 나타낸 것으로 판단된다.

SPS 공정 중 Sr-페라이트 분말의 배향은 X-선 회절 분석과 광학현미경 관찰 등으로 분명하게 확인할 수 있다. Fig. 6은 각각 1000 °C와 1030 °C에서 소결된 소결체의 미세 연마된 normal plane에서의 XRD 측정 결과를 나타내고 있다. Fig. 4에서 본 바와 같이 원료 분말의 회절 패턴은 주 피크가 (114)이었으나 소결체의 주 피크는 (107)이다. 또한 원료 분말과 소결체의 회절 피크에서 주의해서 봐야 할 회절 피크는 (006)과 (008)로써 소결체의 (006) 및 (008)의 상대강도가 원료 분말에 비하여 더 높아진 것을 볼 수 있는데, 이는 소결체가 이방성을 띄고 있음을 말해준다.

이방성 자성분말은 외부 자장에 관계없이 그 형상 때문에 외부응력에 대하여 회전이 가능하며, Jeung 등은 시출성형으로 이방성 Sr-페라이트 레진본드 제작 시 X-선 회절 분석으로 무 자장 중에서도 매우 높은 배향도를 나타낸다고 보고하였다[22]. Jeung 등은 Lotgering과 Gillan에 의해 제안된 식을 보정하여 자성분말의 방향성을 값으로 나타낸 방향계수(q)를 구한 결과 무 자장에서 방향계수는 0.5, 6 kOe의 외부자장을 인가하였을 경우에 0.85를 얻었다. Jeung 등이 이용한 식은 다음과 같으며, ϕ_1 과 ϕ_2 는 각각 기저면과 (107), (108)면이 이루는 각도이다.

$$q = \frac{I_{006} + I_{008} + I_{107} \cdot \cos \phi_1 + I_{108} \cdot \cos \phi_2}{\sum I_{hkl}}$$

이 연구에서 얻은 X-선 회절 분석 결과를 위 식을 이용하여 방향계수를 구해본 결과 모든 공정 온도에서 0.44(배향도 44%)가 얻어졌다. 이 때 배향계수 계산을 위한 X-선 회절피크의 2θ 범위는 (006)면과 (008)면 사이의 회절만을 고려하여 25-43°(Co K α)로 하였다. 이 연구에서 배향도는 Jeung 등이 구한 값보다 작지만 레진본드 제작시 이용되는 결합제는 유동성이 좋기 때문에 무 자장 중에서도 페라이트 분말이 쉽게 회전하여 배향도가 우수했을 것으로 판단된다. 실제 SPS와 상압소결과의 배향도 차이를 비교하기 위하여 이 연구의 원료분말을 무 자장 중에서 40 MPa의 압력으로 일축 성형한 후, 1220 °C에서 2시간 소결시킨 후 배향도를 조사하였다. X-선 회절법으로 분석한 상압소결된 소결체의 배향계수는 0.38로써 SPS 소결법으로 제조된 소결체의 배향도가 높음을 확인할 수 있었다. 물론 두 공정의 배향도 차이가 매우 크지는 않지만, 보다 작은 압력에서 분말의 배향이 잘 된다는 것은 SPS 공정 중 압력 이외의 어떤 인자가 분말 배향에 영향을 주고 있음이 분명하다. G. Obara 등도 SPS 장치로 Sr-페라

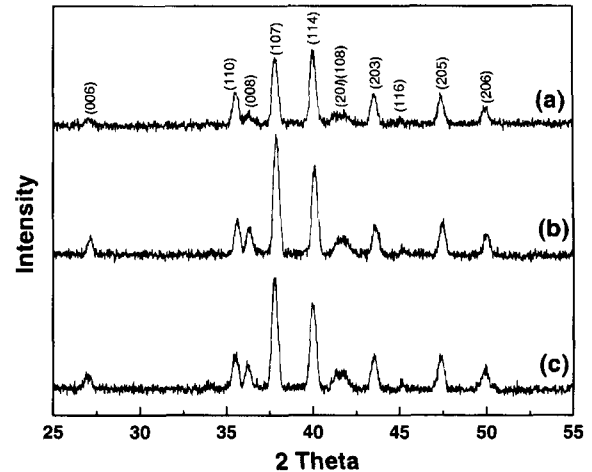


Fig. 6. XRD patterns of Sr-ferrite powder (a), and XRD patterns on the normal planes sintered at 1000 °C (b) and 1030 °C (c).

이트 소결체를 제조하여 무 자장 상압소결시킨 페라이트보다 자기적 특성이 우수하다고 보고하였으나 그 이유에 대한 언급은 없었다[15].

분말의 배향에 영향을 주는 인자가 무엇인지 알아보기 위하여 SPS 공정 중의 전류변화를 조사해 본 결과 모든 온도에서 치밀화가 일어나는 소결온도에 도달하기 전에 최대 전류값(약 2000 ampere)을 보인 후 소결 온도에 도달하는 순간 급격하게 감소(약 1000 ampere)하는 것으로 나타났다. 분말의 배향이 SPS 공정과정에서 승온 단계의 성형 중에 일어났는지, 또는 치밀화가 일어나는 소결 중에 일어났는지는 분명하지 않다. 그러나 성형압력이 높은 상압소결로 제조된 소결체보다 SPS로 제조된 소결체의 배향성이 좋고, 두 공정사이의 가장 큰 차이점이 고 전류 사용 여부이다. 따라서 SPS 공정으로 제조된 Sr-페라이트 분말의 배향은 압분체의 내부를 통과(또는 흑연몰드를 통과)하는 전류에 의해 이루어진다고 할 수 있다.

Fig. 7은 1 μ m 다이아몬드 페이스트로 연마한 소결체의 표면을 광학현미경으로 관찰한 사진으로써 (a), (b), (c)는 각각 1000 °C, 1030 °C, 1060 °C에서 제조된 소결체의 normal plane을 관찰하였다. Fig. 7(a)의 사진으로부터 1000 °C에서 제조된 소결체의 표면은 연마 도중 발생한 pull-out에 의해 많은 기공들이 존재하며 서로 연결되어 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 7(b)의 1030 °C 소결체는 표면에 보이는 기공들의 수가 감소하고, (c)의 1060 °C 소결체의 표면은 비교적 매끄러웠으며, 한편 Fig. 7(d)는 1060 °C에서 제조된 소결체의 radial plane을 관찰한 사진으로써 normal plane에서 관찰된 표면보다 기공의 수가 현저하게 감소함을 관찰할 수 있다. 이와 같이 같은 온도에서 소결된 Sr-페라이트의 면에 따른 연마정도가 차이는 것도 소결체가 이방성을 띄고 있기 때문에 나타

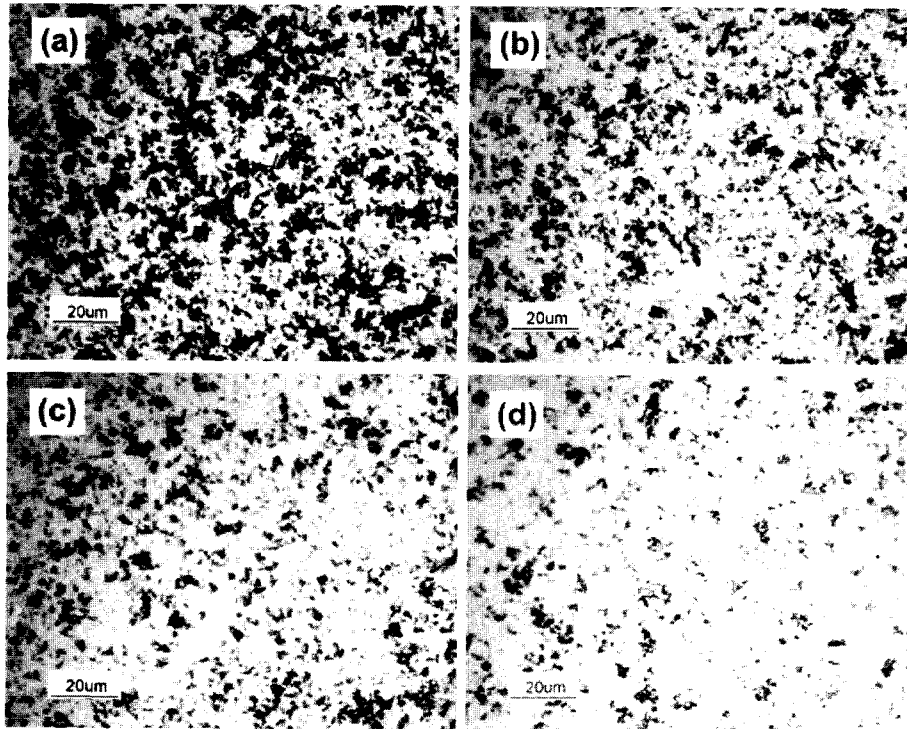


Fig. 7. Optical micrographs of Sr-ferrites on the normal planes sintered at 1000 °C (a), 1030 °C (b), 1060 °C (c) and on the radial plane sintered at 1060 °C (d).

난 현상으로 판단된다.

SPS 소결체의 이방성이 SPS 전류에 의해 발생된 것이라면 압분체의 위치에 따라 전류밀도 차이가 날 것으로 예상하여 Sr-페라이트 소결체의 위치별 배향성을 조사하였다. 1060 °C 소결체의 normal plane과 radial plane의 중앙과 모서리에서 XRD 분석을 수행하였고 Fig. 8에 그 결과를 나타내었다. 그림에서 (a)와 (c)는 normal plane과 radial plane의 모서리부분에 대한 결과이고, (b)와 (d)는 중앙부분에 대한 결과이다. Fig. 8의 (a)와 (b)의 normal plane의 XRD 패턴은 Fig. 6에 서와 같이 (107) 피크가 주 피크로 나타나고, (006) 및 (008) 피크가 더 커짐을 알 수 있는데, (a)의 모서리 부분에서 주 피크(107)에 대한 (008) 피크의 상대강도(23.7)가 (b)의 중앙부위(16.1)보다 크다. 또한 모서리와 중앙부위의 배향계수를 계산한 결과 모서리 부분의 배향계수는 0.47이고, 중앙부위에서는 0.41이었다. 배향도 차이가 크지 않지만 페라이트 입자는 소결체의 모서리부분에서 더 많은 배향을 하고 있음을 알 수 있다. 또한 이 현상은 normal plane을 따라 측정된 미세 경도시험 결과에서도 나타난다.

Fig. 9는 Fig. 8과 같은 시편을 미세 경도계로 측정된 값을 보여주는 그림으로써, 미세 경도 측정은 시편의 모서리부분에서부터 중앙부위로 이동시키면서 0.5 mm 간격으로 측정하였다. Normal plane의 경우 전반적인 미세 경도변화는 시편의 모서리에서 중앙으로 갈수록 작아지는 경향을 보인다.

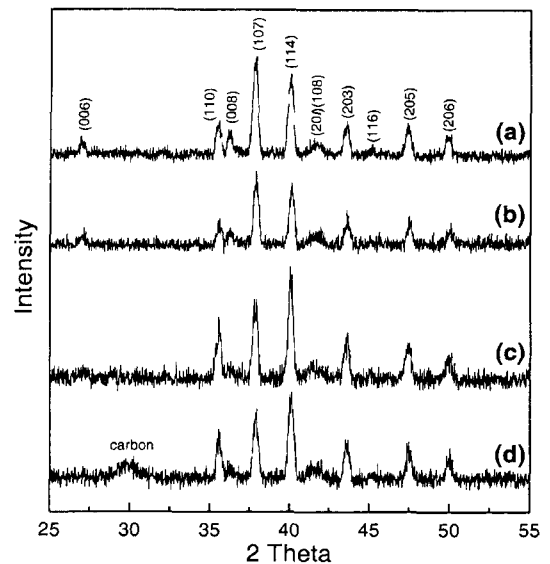


Fig. 8. XRD patterns of Sr-ferrites on the normal plane (a, b) and on the radial plane (c, d) sintered at 1060 °C. The (a) and (c) were measured at the plane edge, and the (b) and (d) were measured at the plane center.

이러한 미세 경도변화도 XRD 결과와 마찬가지로 입자 배향과 관계가 있는 것으로 판단된다. 페라이트 입자의 배향에 영향을 주는 것이 입자의 전도도와 관련된 전류 때문인지 또는 전류에 의해 유도된 자장에 의한 것인지 분명하지 않지만

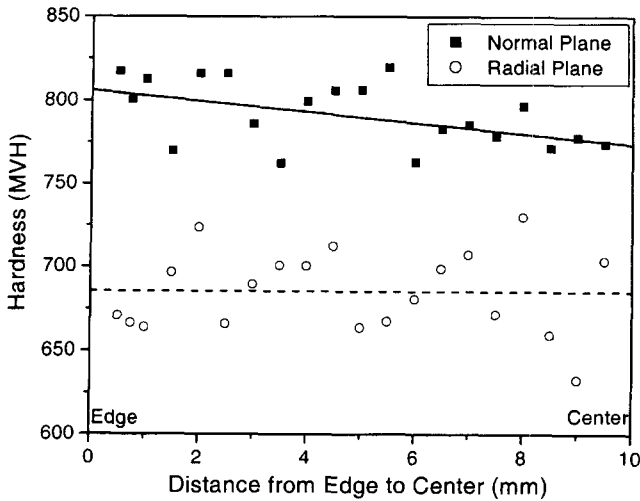


Fig. 9. Micro-hardness changes of Sr-ferrite from plane edge to plane center sintered at 1060 °C.

XRD 결과 및 미세 경도변화결과로 볼 때 흑연 몰드에 충전된 분체의 모서리 부분이 SPS 전류에 더 많은 영향을 받는 것으로 판단되었다.

IV. 결 론

이 연구 결과 SPS 장치를 이용하여 소결과 동시에 Sr-페라이트 입자를 특정 방향으로 배향시킬 수 있었으며, 낮은 온도 및 짧은 작업시간으로 치밀한 이방성 페라이트 자석을 제조할 수 있었다. XRD 및 미세 경도변화 결과로부터 소결체의 바깥쪽부분에서 페라이트 입자의 배향성이 더 큰 것으로 나타났으며, 이것은 인가된 직류전류와 밀접한 관계가 있는 것으로 판단되었다. 페라이트 입자의 배향이 전류와 관계가 있는 것이 분명하다면, 흑연 몰드에 충전된 분체의 모서리 부분이 SPS 전류에 더 많은 영향을 받는다고 할 수 있다. 다양한 SPS 공정변수(전류, 성형 압력, 소결 온도 및 소결 시간 등)를 제어하면 자장 중 성형공정 없이도 배향성이 증가된 이방성 페라이트 자석제조를 할 수 있을 것으로 기대되며, 이후 이방성 분말을 이용하여 미세조직 및 이방성 해석을 명확히 한다면 SPS 공정의 소결기구를 이해하는데 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 2001년도 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문으로, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Tokida M., J. of the Soc. Powder Tech. Jap. **30**, 790(1993).
- [2] T. Takeuchi, E. Betourne, M. Tabuchi etc. J. Mat. Sci. **34**, 917 (1999).
- [3] N. Zavodov, A. V. Kozlov, S. N. Luzganov, V. P. Polishchuk and A. V. Shurupov, High Temp. **37**, 135(1999).
- [4] J. F. Li, S. Satomi, R. Watanabe, M. Omori and T. Hirai, J. Euro. Cer. Soc. **20**,1795(2000).
- [5] M. Omori, Mat. Sci and Eng. **A287**, 183(2000).
- [6] Y. I. Jang, J. S. Kim, I. S. Ahn, Y. D. Kim and Y. S. Kweon, J. Kor. Met. Ins. **7**, 162(2000).
- [7] S. J. Kim, K. S. Cho and N. J. Park, J. Kor. Assoc. Cry. Growth **11**, 115(2001).
- [8] S. J. Lee and W. J. Lee, J. Kor. Met. Ins. **8**, 35(2001).
- [9] K. S. Cho, S. J. Kim, S. H. Beak, H. J. Choi and J. G. Lee, J. Kor. Cer. Soc. **38**, 687(2001).
- [10] K. H. Kim and K. B. Shim, J. Kor. Cer. Soc. **38**, 582(2001).
- [11] Y. S. Kwon, S. G. Kim, H. S. Kim, H. T. Kim, S. I. Choi and M. J. Suk, J. Kor. Met. Ins. **9**, 50(2002).
- [12] Z. G. Liu, M. Umemoto, S. Hiroswa and H. Kanekiyo, J. Mat. Res. **14**, 2540(1999).
- [13] K. Hiroto, Y. Takano, M. Yoshinaka and O. Yamaguchi, Mat. Res. Bull. **35**, 1137(2000).
- [14] S. Yamamoto, S. Horie, N. Tanamachi, H. Kurisu and M. Matsuura, J. Magnetism and Magnetic Mat. **235**, 218(2001).
- [15] G. Obara, H. Yamamoto, M. Tani and M. Tokita, J. Magnetism and Magnetic Mat. **239**, 464(2002).
- [16] P. A. Denes, Ceramic Bull. **41**, 509(1962).
- [17] P. Reynen, J. Am. Ceramic Society, **70**, 23(1987).
- [18] D. S. Kim, D. Y. Kim, W. Y. Jeung and J. H. Oh, J. Kor. Cer. Soc. **26**, 747(1989).
- [19] B. D. Chung, H. W. Moon, K. S. Seo and Y. J. Shin, J. Kor. Inst. Electrical and Electronic Mat. Eng., **5**, 329(1992).
- [20] W. Y. Jeung, Ceramist, **2**, 62(1999).
- [21] N. Murillo, J. Gonzalez, C. Guraya, M. Gutierrez and F. J. Seco, J. Magnetism and Magnetic Mat. **203**, 165(1999)
- [22] W. Y. Jeung, T. S. Cho and T. J. Moon, J. Kor. Magnetics Soc. **4**, 219(1994).

Properties of Sr-Ferrites Prepared by Spark Plasma Sintering Process

J. S. Roh* and M. H. Oh

School of Advanced Materials and Systems Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Kumi 730-701, Korea

(Received 2 January 2003, in final form 13 February 2003)

Anisotropic Sr-ferrites were prepared by the spark plasma sintering process (SPS). The Ferrite particles were oriented and densified during sintering process, and the anisotropic ferrites were manufactured at low sintering temperature and a remarkable short time processing by SPS method. It was showed that the anisotropy of ferrite particles at the specimen outer side was more higher than that at the specimen center, and it seems possible that the orientation of ferrite particles was related to DC current. Magnetic and physical properties of sintered Sr-ferrites are $Br = 3.15$ kG, $iHc = 2.67$ kOe, and density = 5.033 g/cm³ when the samples were sintered for 8 minutes at 1060 °C.

Key words : SPS (Spark plasma sintering), Sr-ferrite, Anisotropy, Orientation