

반응소결공정으로 제조된 YIG의 미세구조 및 자기특성에 대한 Bi₂O₃ 첨가 영향

장학진 · 윤석영 · 김태옥[†]

부산대학교 무기재료공학과

(2001년 4월 19일 접수; 2001년 7월 18일 승인)

The Effect of Bi₂O₃ Addition on the Microstructure and Magnetic Properties of YIG Prepared by RSP(Reaction Sintering Process)

Hak-Jin Jang, Seog-Young Yoon and Tae-Ok Kim[†]

Department of Inorganic Materials Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

(Received April 19, 2001; Accepted July 18, 2001)

초 록

반응소결공정(RSP : Reaction Sintering Process)을 이용하여 YFeO₃와 Fe₂O₃의 성분에 소결첨가제 Bi₂O₃를 첨가하여 YIG를 합성하였다. Bi₂O₃ 첨가량과 소결온도에 따른 YIG 소결체의 미세구조 및 자기적 특성변화에 대해 주사전자현미경, X-선 회절 분석기 및 시료 진동형 자력계를 이용하여 조사하였다. 소량의 소결첨가제 Bi₂O₃ 첨가시 YIG 소결체의 격자상수는 12.387에서 12.420 Å으로 증가하였다. 이는 상대적으로 이온반경이 큰 Bi 이온이 12면체 Y 이온 자리로 치환되었기 때문인 것으로 여겨진다. Bi₂O₃를 1.0 wt% 첨가하였을 때 비교적 균질한 미세구조를 보였으며, 1350°C에서 소결한 YIG의 밀도가 이론밀도의 98% 이상의 치밀화를 보였다. Bi₂O₃가 0.0 wt%에서 1.5 wt%로 첨가량이 증가함에 따라 상온에서의 포화자화값(M_s)은 조금씩 증가하는 경향을 보였으나 큰 변화는 없었다. 반응소결공정을 이용 YIG 소결시 소결첨가제 Bi₂O₃가 1.0 wt%이고, 소결온도 1350°C에서 비교적 우수한 소결특성과 자기특성을 가지는 YIG 소결체를 얻을 수 있었다.

ABSTRACT

YIG added with sintering additive Bi₂O₃ was synthesized by RSP (Reaction Sintering Process), using YFeO₃ and Fe₂O₃ as the constituents. The effects of Bi₂O₃ addition and sintering temperature on the microstructure and magnetic properties of YIG were investigated by using scanning electron microscopy, X-ray diffractometry and vibrating sample magnetometry. The lattice parameter of sintered YIG increased slightly from 12.387 to 12.420 Å with adding small amount of Bi₂O₃. This behaviour was supposed to be substituted dodecahedral Y ions site to Bi ions which are relatively large in ionic radius. Homogeneous microstructure was obtained by 1.0 wt% Bi₂O₃ addition and YIG specimen sintered at 1350°C with 1.5 wt% Bi₂O₃ addition showed above 98% densification of theoretical density. Saturation Magnetization (M_s) at room temperature had a tendency to increase slightly, even though the increasing value was not much, with increasing Bi₂O₃ addition from 0.0 wt% to 1.5 wt%. YIG sintered at 1350°C with 1.0 wt% Bi₂O₃ addition showed relatively excellent sintering and magnetic properties.

Key words : YIG (Yttrium Iron Garnet), RSP (Reaction Sintering Process), VSM (Vibrating Sample Magnetometry), Saturation Magnetization (M_s)

1. 서 론

산화물계 페리자성체인 Yttrium Iron Garnet(YIG : Y₃Fe₅O₁₂)는 1956년 개발된 이래 자기적 손실이 가장 작고, 우수한 마이크로파 특성을 지니고 있기 때문에 여러 연구팀에 의하여 그 성질에 대해 연구되어져 왔다.¹⁻⁴⁾ YIG는 가넷 구조를 가지며 공간군 Ia3d에 속하는 입방정으로, 산소 12면체 자리에 Y 이온을, 8면체 자리 및 4면체 자리에 Fe 이온을 갖는다.⁵⁾ 이와같이, YIG는 양이온 자리가 모두 채워져

있어 이온들의 배치가 공간적으로 비교적 균일하고, 자성이 온이 Fe 이온만으로 이루어져 있으며, 결정자기이방성이 작기 때문에, 마이크로파 재료중 자기공명손실이 가장 적은 재료중 하나로 알려져있다. YIG의 자기적 손실을 보다 극소화하기 위해 치밀하고 균일한 미세구조를 지니기 위한 목적으로 조성비의 변화, 첨가제 및 제조공정 등에 대한 연구도 활발히 진행되어 오고 있다.⁶⁻¹¹⁾

Y₂O₃와 Fe₂O₃ 원료로 혼합, 하소, 성형, 소결 즉 기존의 세라믹 공정으로 제조된 YIG는 가넷의 고내화, 고강도의 특유 성질 때문에 매우 높은 온도에서 장시간 소결하지 않는 이상 이론밀도에 근접한 고밀도를 얻기 힘들다.¹²⁾ 반응소결

[†]Corresponding author : kimto@hyowon.pusan.ac.kr

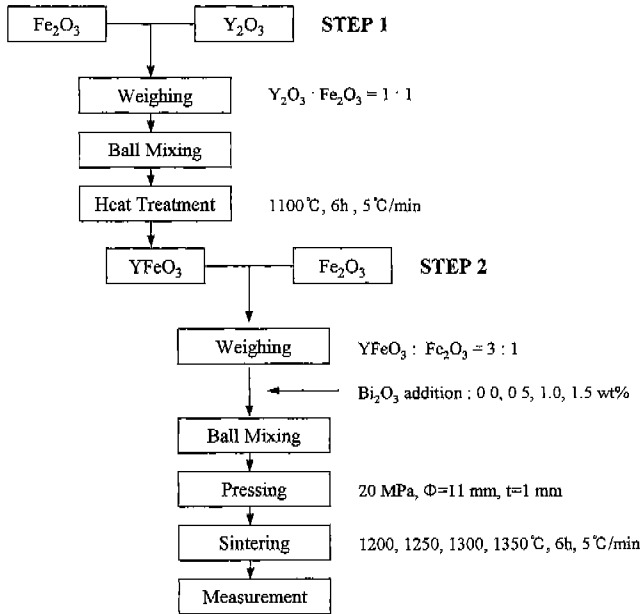


Fig. 1. Flowchart for sample preparation by RSP(Reaction Sintering Process).

공정(RSP : Reaction Sintering Process)은 소결과정에서 원료성분간의 화학적 반응에 의한 것으로 일반적인 세라믹 공정에서의 고상확산에 의한 표면에너지로부터의 구동력보다 몇 배 큰 값을 가지므로 치밀화 공정에 매우 유리한 방법이며,¹³⁾ 이미 여러 재료에 성공적으로 적용되고 있는 실정이다.¹⁴⁻¹⁷⁾

따라서, 본 실험에서는 1100°C에서 합성된 YFeO₃와 Fe₂O₃에 상대적으로 낮은 녹는점(약 825°C)을 가진 소결첨가제 Bi₂O₃를 첨가하여 반응소결공정을 이용하여 YIG 소결체를 합성하였으며, 이때 얻어진 소결체의 미세구조 및 자기특성에 대하여 조사하였다.

2. 실험방법

전반적인 실험과정은 Fig. 1에 나타나 있으며, 시료는 Y₂O₃(Daejung, above 99.99%), Fe₂O₃(Junsei, 99.9%) Bi₂O₃(Junsei, 99.99%)를 원료 분말로 사용하였다. YIG 시편을 반응소결공정을 이용하여 제조시 크게 두 단계로 나누어 실시하였다. 그 첫 단계로는 Y₂O₃와 Fe₂O₃를 1:1의 몰비로 칭량하여 24시간 습식 혼합한 후 혼합된 분말을 1100°C에서 6시간 열처리하여 orthoferrite(YFeO₃)상을 형성시켰다. 그리고, 두 번째 단계로서 열처리시킨 orthoferrite(YFeO₃)분말을 분쇄한 후 다시 YFeO₃와 Fe₂O₃를 3:1로 칭량한 후 Bi₂O₃를 0.0 wt%에서 1.5 wt%까지 변화시키면서 첨가하였다. 첨가된 분말을 12시간 습식 혼합후 20 MPa 압력으로 디스크 모양으로 성형하고, 1200, 1250, 1300, 1350°C로 공기중에서 소결하였으며, 소결시 승온 속도는 5°C/min로

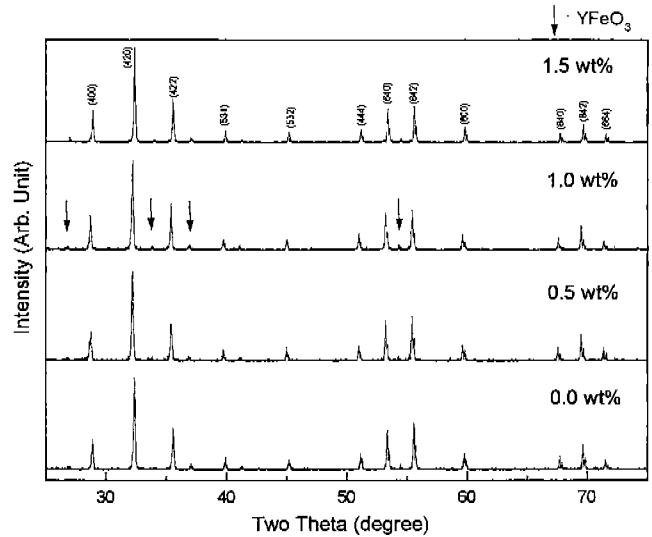


Fig. 2. X-ray diffraction patterns for YIG samples with different amount of Bi₂O₃ sintered at 1350°C.

하였다.

제조된 소결체의 결정상을 분석하기 위해 Cu-Kα선을 사용한 X-ray diffractometer(Rigaku D/MAX-11A, Japan)를 이용하였고, 회절각(2θ)은 25~75° 범위에서 수행하였다. 소결온도와 Bi₂O₃ 첨가량에 따른 치밀화 정도를 조사하기 위해 아르키메데스법과 ASTM 규격에 맞추어 밀도와 수축율을 측정하였다. 소결체의 자기적 특성을 조사하기 위해 시료 진동 자력계(Lake Shore 7300 VSM, USA)로 실온에서 외부자기장을 2.5 kOe 로 가하여 포화자화값과 보자력값의 변화를 조사하였으며, 주사전자현미경(JEOL 4500, USA)을 이용하여 소결체의 미세구조와 평균입자크기를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 소결온도 1350°C에서 Bi₂O₃ 첨가량을 변화시켜 소결한 YIG 소결체의 X-선 회절 결과를 나타낸다. 소결온도에 따른 X-선 회절결과는 변화없이 동일하게 입방정의 YIG상으로부터 회절된 것으로 나타났다. Fig. 2에서 2θ가 약 28, 33, 54° 등의 부근에서 나타난 약한 회절피크 위치는 반응소결공정시 성분으로 사용된 orthoferrite인 YFeO₃의 주피크 위치와 일치하였다. 한편, 소결첨가제 Bi₂O₃의 첨가량이 증가함에 따라 orthoferrite의 회절피크 강도가 다소 증가함을 볼 수 있다. 이것은 소결과정중에 일부의 Bi 이온이 산소 12면체 자리의 Y 이온과 치환을 이루어 Bi 이온을 일부 포함하는 YIG가 생성되고 이로인해 과잉의 Y 이온으로 인해 YFeO₃상이 남아있는 것으로 추정되며, 이는 고상반응을 통한 YIG의 형성기구를 설명한 R.J. Yang *et al.*¹³⁾ 등의 연구결과와도 일치하는 것으로 여겨진다. Fig. 2의 회절 패턴에 Miller 지수를 붙인후 최소자승법으로 격자상수를 계

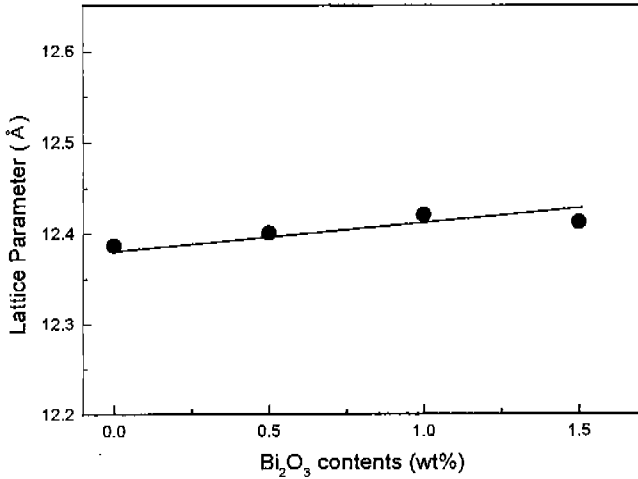


Fig. 3. The variation of lattice parameters for YIG samples with different amount of Bi₂O₃ sintered YIG at 1350°C.

산한 결과 12.387에서 12.420 Å로 증가하였으며, 이를 Fig. 3에 나타내었다. 일반적으로 치환된 가넷결정의 격자상수는 최소자승법으로 상수 C₁, C₂, C₃를 포함하는 식(1)로 표현된다.

$$a(x) = C_1 + C_2x + C_3x^2 \quad (\text{unit : \AA}) \quad (1)$$

여기서, a(x)는 x량이 치환되었을 때의 가넷 결정의 격자

상수이고, YIG에서 Bi 이온이 첨가된 Y_{3-x}Bi_xFe₅O₁₂인 경우 C₁=12.3756, C₂=0.0828, 그리고 C₃=0이다.¹⁸⁾ 본 실험에서 얻은 첨가량에 따른 격자상수의 변화는 Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 직선적으로 증가하는 경향을 보였으며, 이는 화합물의 격자상수가 치환된 양에 따라 변화한다는 Vegard's law를 따르는 것으로 추정된다. 실험치와 계산치가 일치하는 것은 앞서 회절 패턴에서 설명한 바와 같이 상대적으로 이온반경이 큰 Bi 이온(1.132 Å)이 12면체 자리(1.061 Å)의 Y 이온 자리로 치환해 들어간 것으로 생각되어지며, 이는 다른 연구자의 결과와도 일치함을 알 수 있다.¹⁹⁾

주사전자현미경(SEM)으로 각각의 온도에 대해 Bi₂O₃가 첨가되지 않은 YIG 소결체를 5000배율로 표면을 관측한 것을 Fig. 4에서 보여주고 있다. 1300°C 이하(Fig. 4(a,b))에서는 소결정도가 덜 진행되어 기공이 많이 존재하고, 평균 입자크기도 매우 작음을 알 수 있다. 소결온도 증가에 따라 급격히 입자가 커지면서 치밀화 정도가 증가하고 있음을 볼 수 있다. 마이크로파 소자로서의 특성을 지니기 위해서는 최소한 1300°C 이상에서 소결되어야 함을 알 수 있었고, 이는 기존의 하소과정을 거친 세라믹 공정보다는 반응 소결공정으로 제조한 YIG가 훨씬 낮은 온도에서 소결될 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 5(a,b)는 1350°C에서 소결한 YIG에 각각 Bi₂O₃가 첨가되지 않은 것과 1.0 wt%가 첨가되었을 때의 표면상태

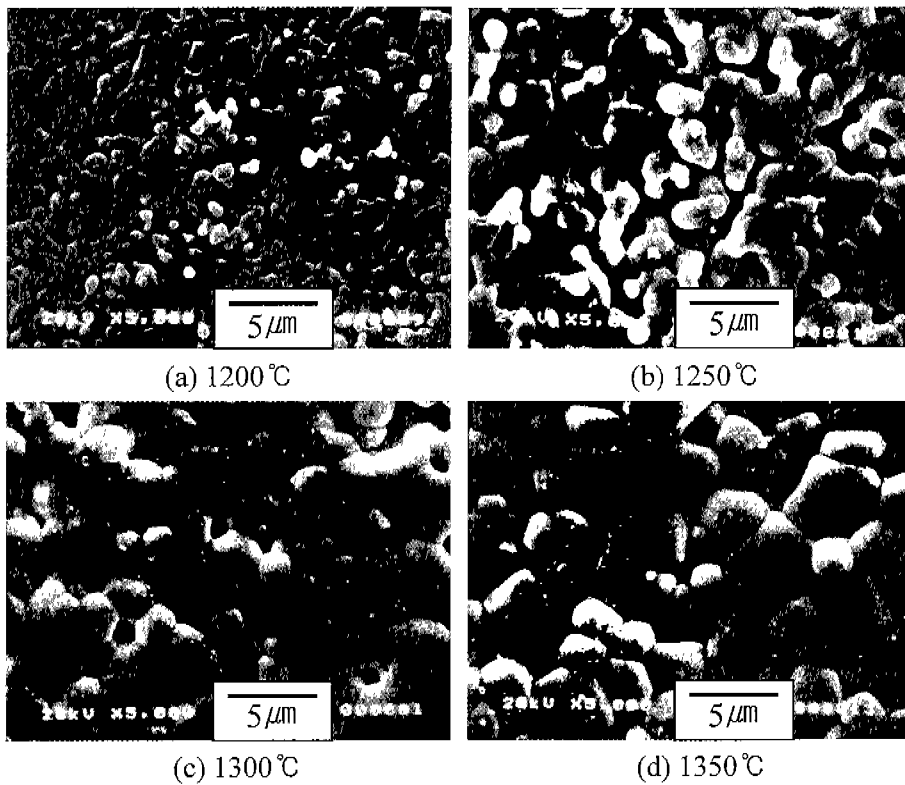


Fig. 4. Scanning electron microscopy images of YIG sintered at different temperatures (a) 1200, (b) 1250, (c) 1300 and (d) 1350°C without Bi₂O₃.

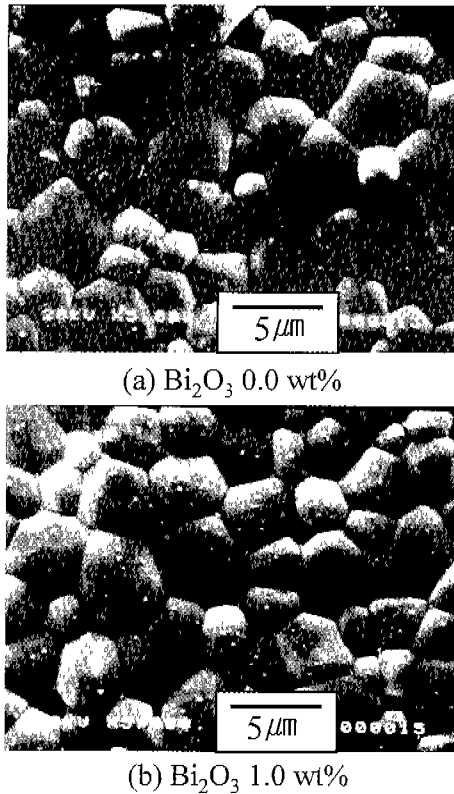


Fig. 5. Scanning electron microscopy images of YIG sintered at 1350°C without (a) and with (b) 1.0 wt% Bi₂O₃.

를 나타내고 있다. 각각에 대해서 치밀화 정도는 비슷하지만 낮은 녹는점(약 825°C)을 가진 Bi₂O₃를 적당량을 첨가하였을 때 입계에서의 액상을 형성시켜 보다 나은 균질성을 가져올 수 있음을 알 수 있었다. 이는 고밀도와 균질한 구조를 지녀야 하는 마이크로파 소자의 재료로서의 조건에 잘 부합되는 결과이다. 평균입자크기는 각각의 온도에서 약 0.7, 1.5, 2.5, 4.3 μm 정도의 크기를 가졌으며, 각 온도에서 Bi₂O₃ 첨가에 따른 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

Figs. 6, 7은 1350°C에서 소결한 것과 각 온도별로 1.0 wt% Bi₂O₃ 첨가한 YIG 소결체의 수축율과 밀도를 나타낸 것이다. 1250°C 이하에서 팽창을 보인 뒤 1300°C 이상에서는 급격한 수축이 일어남을 Fig. 6에서 보여준다. 이는 하소 과정을 거친 일반세라믹 공정으로 제조된 경우 팽창 과정 없이 1400°C 이상에서 수축을 보이며, 반응소결공정으로 제조할 때에는 1200°C 부근에서 팽창을 보인 뒤 급격한 수축을 가져온다는 R. J. Yang *et al.*¹³⁾의 연구결과와 일치함을 보인다. 상대적으로 낮은 녹는점을 가진 Bi₂O₃ 첨가시 입계에서 액상을 형성시켜 치밀화 구조에 기여해 수축율을 증가시키는 것으로 사료된다. 소결체의 밀도는 소결온도에 매우 민감하게 변화하며, 소결온도가 증가함에 따라 소결체의 밀도가 증가하고 있으며, 소결온도가 1350°C인 경우에는 순수한 YIG의 격자상수로부터 구한 YIG의 이론밀도인

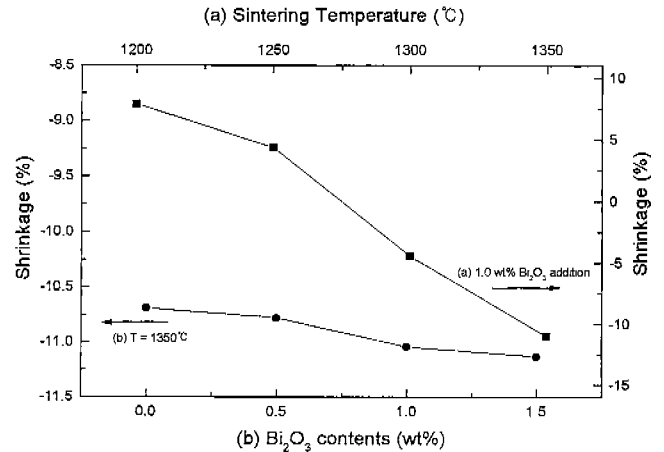


Fig. 6. Shrinkages of YIG (a) at different sintering temperatures with 1.0 wt% Bi₂O₃ addition, (b) at 1350°C with different amount of Bi₂O₃ addition.

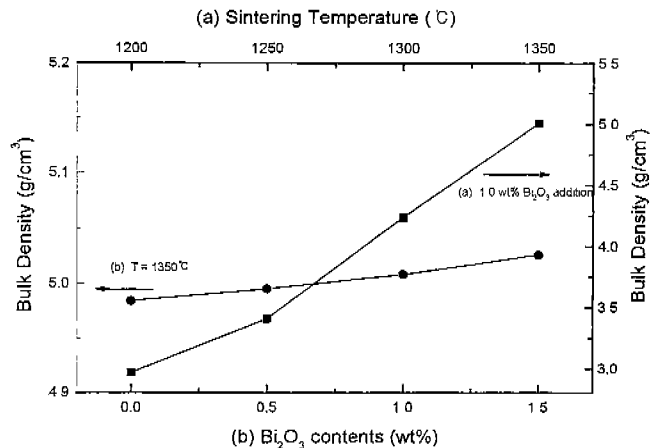


Fig. 7. Bulk densities of YIG (a) at different sintering temperatures with 1.0 wt% Bi₂O₃ addition, (b) at 1350°C with different amount of Bi₂O₃ addition.

5.17 g/cm³의 약 96~98.5%에 도달함을 볼 수 있었다. Fig. 4의 SEM 사진에서 본 바와 같이 소결온도가 1300°C이하 낮은 경우에는 소결체에 많은 기공이 존재하였기 때문에 아르키메데스법에 의한 밀도 측정시 밀도값의 편차가 크게 나타났다. 앞서 설명한 수축율에서 볼 수 있듯이 순수한 YIG 시료의 경우에는 소결 온도가 1250°C인 경우 제조된 소결체의 밀도가 3.5 g/cm³ 정도로 이론밀도에 비하여 매우 낮으며, 소결온도를 최소 1300°C이상으로 열처리하여야만 치밀한 구조를 얻을 수 있었다. 한편, 1350°C의 소결온도에서 Bi₂O₃ 첨가량의 영향을 보면 첨가량이 증가할수록 밀도가 증가하다가 1.5 wt%에서 최대의 값 5.026 g/cm³ 정도의 값을 보였다.

다결정체 페라이트에서 자기적 손실로 표현되는 자기공명 선폭(ΔH)은 식(2)와 같이 표현된다.²⁰⁾

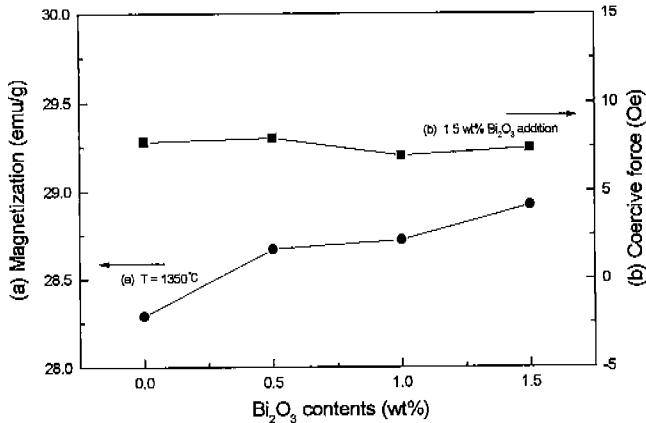


Fig. 8. (a) Saturation magnetization (M_s) of sintered YIG at 1350°C with different amount of Bi_2O_3 addition. (b) Coercive force (H_c) of sintered YIG at different sintering temperatures with 1.5 wt% Bi_2O_3 addition.

$$\Delta H = \Delta H_i + \Delta H_a + \Delta H_p \quad (2)$$

여기서, ΔH_i 는 단결정이 가지는 고유선폭이며, 이는 매우 작아 무시될 수 있다. ΔH_a , ΔH_p 는 각각 이방성과 기공에 의한 것이다. 다소 낮은 밀도를 가진 다결정체 YIG에서는 ΔH_p 는 자기공명선폭에 매우 중요한 역할을 하고, 기공율과 ΔH_p 관계는 식(3)과 같이 표현된다.

$$\Delta H_p = 1.5p(4\pi M_s)(1+p)^{-1} \quad (3)$$

여기서, p 와 M_s 는 기공율과 포화자화값을 나타낸다.²¹⁾ 1350°C에서 Bi_2O_3 첨가한 YIG 소결체는 고밀화에 의한 기공을 감소로 위 식에 나타난 바와 같이 자기공명선폭을 크게 줄이는 효과를 나타낼 것으로 사료된다.

Fig. 8은 1350°C에서 소결한 YIG의 포화자화값(M_s)과 보자력값(H_c)을 보여주고 있다. 결정 시료는 자기 이방성을 갖는 수 많은 미세 단결정 입자들이 무작위로 분포하는 것이므로, 외부자기장에 대해 개개의 입자들은 서로 다른 공명선의 이동현상을 나타내고, 그 결과 공명선이 넓어지는데 식(2)에서 이러한 자기이방성에 의해 넓어진 선폭 ΔH_a 는

$$\Delta H_a = 2.07 \frac{H_a^2}{4\pi M_s} \quad (4)$$

식(4)와 같이 표현된다. 여기서 이방성 자기장은 $H_a = 2 |K_u| / M_s$ 이다.²⁰⁾ 따라서, M_s 값이 증가하면 ΔH_a 값이 감소할 수 있다. 본 실험결과로서 Bi_2O_3 첨가량 증가에 따라 큰 변화는 없지만 조금씩 증가하는 포화자화값으로부터 ΔH_a 감소에 의한 ΔH 값을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 보자력 값은 소결온도에 크게 영향을 받았으며, 소결온도가 증가될수록 보자력값이 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 일반적으로 보자력값이 소결체 입자크기에 매우 민감하다는 사실을 반영하는 결과이며, 앞서 언급한 SEM을 통한 평균입자

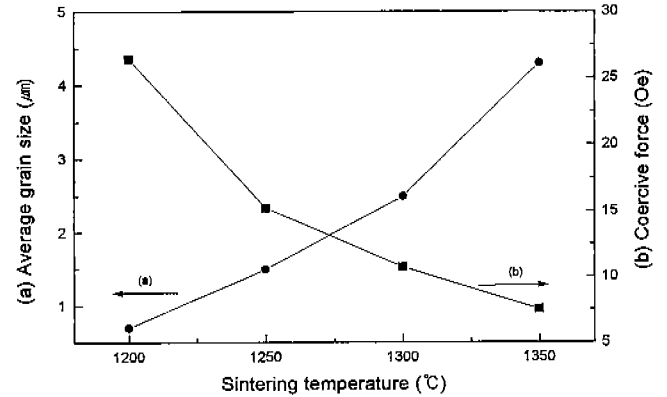


Fig. 9. Relationship between average grain size and coercive force dependence of sintering temperature.

크기 및 밀도분석의 결과와도 일치함을 알 수 있었으며, 이를 Fig. 9에 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 YFeO_3 와 Fe_2O_3 를 성분으로 이용하고, 소결첨가제로 상대적으로 낮은 녹는점을 가진 Bi_2O_3 를 선택하여 첨가량을 달리하여 치밀화에 매우 유리한 방법인 반응소결 공정(RSP : Reaction Sintering Process)으로 제조한 YIG 소결체에 대하여 미세구조 및 자기특성에 대하여 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 반응소결공정으로 YIG 합성시 일반 세라믹공정보다 더 낮은 소결온도에서 우수한 소결성을 지닌 YIG를 얻을 수 있었다.
2. 소량의 Bi_2O_3 첨가시 소결체의 격자상수는 12.387에서 12.420 Å로 증가되었으며, 이는 상대적으로 이온반경이 큰 Bi 이온이 12면체 Y 이온 자리로 치환되었기 때문인 것으로 보인다.
3. Bi_2O_3 를 1.0 wt% 첨가시 첨가하지 않은 경우보다 비교적 균질한 미세구조를 가진 YIG 소결체를 얻을 수 있었다.
4. Bi_2O_3 를 1.5 wt% 첨가하고, 1350°C에서 소결한 소결체의 밀도는 이론밀도의 98% 이상의 치밀화를 나타내었다.
5. 상온에서의 포화자화값(M_s)은 Bi_2O_3 첨가량이 증가함에 따라 큰 변화는 없었지만 조금씩 증가하는 경향을 나타내었고, 보자력(H_c)은 Bi_2O_3 첨가량에 관계없이 일정하였고, 평균입자크기가 클수록 감소하는 경향을 나타내었다.

REFERENCES

1. R. F. Belt, "Etching and X-ray Topography of Flux-grown Magnetic Garnets," *J. Appl. Phys.*, **40**(4), 1644-1651 (1969).
2. J. Nicolas, "Microwave Ferrites"; pp. 257-280, Vol. 2, chapter 4 of *Ferromagnetic Materials*, Ed. by E. P. Wohlfarth,

- North-Holland Publishers, New York, 1986.
3. M. Pardari-Horvath, A. Thavendrarajah and P. E. Wigen, "Ferrimagnetism of Diamagnetically Substituted and Charge Uncompensated Yttrium Iron Garnet," *J. Magn. Magn. Mater.*, **119**, 193-204 (1993).
 4. A. Koper, A. Lehmann-Szvreykowska, R. Wojciechowski and M. Mucha, "An Analysis of the Magnetic Ground State in Yttrium Iron Garnets," *J. Phys. Condens. Matter.*, **7**, 1391-1404 (1995).
 5. D. Rodic, M. Mitric, R. Tellgren, H. Rundlof and A. Kremenovic, "True Magnetic Structure of the Ferrimagnetic Garnet Y₃Fe₅O₁₂ and Magnetic Moments of Iron Ions," *J. Magn. Magn. Mater.*, **191**, 137-145 (1999).
 6. R. Karim, S. A. Oliver and C. Vitoria, "Laser Ablation Deposition of YIG Film on Semiconductor and Amorphous Substrates," *IEEE Trans. on Mag.*, **31**(6), 3485-3487 (1995).
 7. Y. S. Ahn, M. H. Han and C. O. Kim, "Synthesis of Yttrium Iron Garnet Powder by Homogeneous Precipitation and its Crystallization," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **33**(6), 693-699 (1996).
 8. J-D. Lee, K-S. Kim, S-J. Kim and T-O. Kim, "Dependence of Microstructure of Sintered Y₃Fe₅O₁₂ in Addition of CuO," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **35**(10), 1014-1019 (1998).
 9. M-B. Park, B. J. Kim and N-H. Cho, "Microstructure and Magnetic Characteristics of Yttrium Iron Garnet Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputter," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **36**(3), 293-300 (1999).
 10. J. L. Rehspringer, J. Bursik, D. Niznansky and A. Klarikova, "Characterization of Bismuth-doped Yttrium Iron Garnet Layers Prepared by Sol-gel Process," *J. Magn. Magn. Mater.*, **211**, 291-295 (2000).
 11. A. Sztaniszlav, M. Farkas-Jahnke and M. Balla, "Kinetics of Garnet Formation in In⁺³-substituted Systems," *J. Magn. Magn. Mater.*, **215-216**, 188-193 (2000).
 12. W. R. Holmquist, C. F. Kooi and R. W. Moss, "Reaction Kinetics of Polycrystalline Yttrium Iron Garnet," *J. Am. Ceram. Soc.*, **44**, 194-200 (1961).
 13. R. J. Yang, T. B. Wu and I. N. Lin, "Densification and Microstructure Development in the Reaction Sintering Process of Yttrium Iron Garnet," *J. Mater. Sci.*, **25**, 3566-3572 (1990).
 14. R. L. Coble, "Reactive Sintering"; pp. 145-151, *Sintering: Theory and Practice*, Ed. by D. Kolar, S. Pejovnik and M. M. Ristic, Elsevier Scientific, Amsterdam, 1982.
 15. Z. A. Munir, "Synthesis of High Temperature Materials by Self-propagating Combustion Methods," *Ceram. Bull.*, **67**, 342-349 (1988).
 16. Z. A. Munir and U. Anselmi-Tamburini, "Self-propagating Exothermic Reactions: The Synthesis of High Temperature Materials by Combustion," *Mater. Sci. Rep.*, **3**, 277-365 (1989).
 17. Z. A. Munir, "Reaction Synthesis Processes: Mechanism and Characteristics," *Met. Trans.*, **23A**, 7-13 (1992).
 18. G. Winkler, *Vieweg Tracts in Pure and Applied Physics*, Vol. 5, pp. 41-57, Friedr Vieweg & Sohn Braunschweig/Wiesbaden, Germany, 1981.
 19. Y. R. Uhm and C. S. Kim, "Crystallographic and Mössbauer Studies of Magnetic Garnet Y_{3-x}Bi_xFe₅O₁₂ by a Sol-gel Method," *J. Kor. Mag. Soc.*, **8**(4), 203-209 (1998).
 20. G. F. Dionne, "Determination of Magnetic Anisotropy and Porosity from the Approach to Saturation of Polycrystalline Ferrites," *J. Appl. Phys.*, **29**, 337-342 (1958).
 21. C. R. Buffler, "Ferromagnetic Resonance near the Upper Limit of the Spin Wave Manifold," *J. Appl. Phys.*, **30**(4), 172-179 (1959).