

## 서큘레이터/아이솔레이터용 YIG 페라이트의 첨가제와 자기적 특성 연구

윤휘영 · 유승규\* · 이수형\*\* · 윤종남\*\*\* · 김정식†

서울시립대학교 재료공학과

\*진성전자(주)

\*\*청주대학교 물리학과

\*\*\*전자부품연구원

(2001년 10월 19일 접수; 2001년 11월 15일 승인)††

### The Study on the Additives and Magnetic Property of YIG Ferrites for Circulator/Isolator

Whi-Young Yoon, Seung Kyu Yoo\*, Soo Hyung Lee\*\*, Jong Nam Yoon\*\*\* and Jung-Sik Kim†

Department of Materials Science & Engineering, The University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

\*Jinsung Electronics Co., Kyunggi-do 482-840, Korea

\*\*Department of Physics, Chongju University, Cheongju 360-764, Korea

\*\*\*Korea Electronic Technology Institute, Pyungtaek 451-865, Korea

(Received October 19, 2001; Accepted November 15, 2001)††

#### 초 록

YIG 페라이트는 마이크로파 RF 대역 통신 시스템, 이동통신, 위성방송 등의 정보산업과 각종 계측기기 등에 없어서는 안될 중요한 전자부품인 서큘레이터/아이솔레이터의 핵심소재로서 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 소결온도와 치환원소에 따른 서큘레이터/아이솔레이터용 YIG 페라이트의 미세구조와 전자기적 특성을 고찰하고자 하였다. Ca, V, In을 치환시킨 YIG 페라이트를 분무건조기를 사용하여 준구형 과립상태로 만들고, 일반적인 세라믹 제조 공정에 따라 1250°C, 1275°C, 1300°C, 1325°C에서 각각 소결하였다. 소결체는 XRD를 이용하여 상분석을 실시하였고, SEM을 이용하여 미세구조를 관찰하였으며, 전자기적 특성을 측정하기 위하여 VSM을 이용한 포화자화값( $4\pi M_s$ ) 측정과 FMR(Ferromagnetic Resonance)실험을 통한 자기공명반치폭( $\Delta H$ ) 측정을 실시하였다.  $Y_{1.6}Ca_{1.4}Fe_4V_{0.7}In_{0.3}O_{12}$  조성의 YIG 페라이트에 대한 전자기적 특성 측정 결과 1300°C에서 소결한 YIG 페라이트가 높은 포화자화( $4\pi M_s$ ) 값과 낮은 자기공명반치폭( $\Delta H$ )을 지닌 우수한 전자기적 특성을 나타내었다.

#### ABSTRACT

Yttrium Iron Garnet (YIG) has been used as an important material in the circulator/isolator which is used in RF communication system, mobile phone, and satellite broadcasting, etc. In this study, we investigated the microstructural and magnetic properties of YIG ferrites with the sintering temperature and additives. We fabricated the YIG ferrites substituted with Ca, In, V by the traditional ceramic sintering method at 1250°C, 1275°C, 1300°C and 1325°C. Powders were granulated by using a spray dryer. Crystallographic and microstructural properties were measured by using XRD and SEM. Magnetic properties were measured by using a VSM for saturation magnetization ( $4\pi M_s$ ) and FMR (Ferromagnetic Resonance) experiment for ferromagnetic resonance line width ( $\Delta H$ ). The YIG ferrite,  $Y_{1.6}Ca_{1.4}Fe_4V_{0.7}In_{0.3}O_{12}$ , sintered at 1300°C, showed higher saturation magnetization and lower ferromagnetic resonance line width than any other sintering temperatures.

**Key words :** YIG ferrites, Magnetic property, Spray drying

#### 1. 서 론

가네트 페라이트(garnet ferrites)를 이용한 마이크로파 부품을 마이크로파 통신, 이동통신, 위성방송 등의 정보산업과 각종 계측기기 등에 매우 중요한 부품으로서 널리 사용되고

있다. 특히 최근 들어 이동통신 산업의 발달로 무선통신의 핵심부품인 서큘레이터/아이솔레이터(Circulator/Isolator)의 고급화, 소형화 및 다양화를 위한 연구 개발이 활성화되면서 가네트 페라이트에 대한 관심이 확대되고 있다. 서큘레이터/아이솔레이터는 페라이트의 자이로 자기 공명 특성을 이용한 소자로서 증폭기의 임피던스 정합, 합파기의 혼 변조 방지 등의 효과에 의하여 통신기간 상호 간섭방지, 증폭기의 입출력 분리, 안테나 공용기 기능뿐 아니라, 주변소

† Corresponding author : jskim@uoscc.uos.ac.kr

†† This paper was accepted as an on-site paper at the submitted 2001 fall technical meeting of the Korean Ceramic Society.

자의 보호와 같은 용도로 다양하게 쓰인다.

가네트 페라이트의 결정구조는 다소 복잡한 형태로 입방 정계 구조를 가지고 있으며,  $R_3Fe_5O_{12}$ 의 화학식으로 표시된다. 여기서, R은 Y 또는 Gd 등의 희토류 원소이다. 이러한 가네트 페라이트는 1952년 C.L.Hogan<sup>1)</sup>이 10 GHz대에서의 자이로 자기공명을 발표하고, 1956년 Bertaut와 Forrat<sup>2,3)</sup>에 의해 magnetic garnet이 발견된 이래 마이크로파 부품에 적용시키려고 많은 연구개발이 진행되었다.

X-ray 회절실험에 의해 밝혀진 YIG( $Y_3Fe_5O_{12}$ )의 결정구조는  $Oh_{10}-Ia_{3d}$  (230) group에 속하고, 단위정은 8개의  $\{Y_3\}[Fe_2](Fe_3)O_{12}$  분자 단위로 구성된다. 여기서 { }는 십이면체 24(c) site, [ ]는 팔면체 16(a) site, ( )는 사면체 24(d) site를 나타낸다. 16(a) site는 6배위수를 가지며 산소에 의해 팔면체를 이루고 있고, 24(c) site와 24(d) site는 각각 8배위수와 4배위수를 갖고 주위의 산소에 의해 각각 십이면체와 사면체를 이루고 있다.<sup>4,6)</sup>

가네트형 페라이트의 기본이 되는 YIG는 이론 밀도  $5.17 \text{ g/cm}^3$ , 용융점  $1555^\circ\text{C}$ , 포화 자화( $4\pi M_s$ )값이  $1780 \text{ Gauss}$ , 큐리온도( $T_c$ )가 약  $280^\circ\text{C}$ 인, 마이크로파용 자성 재료 중 손실이 가장 작은 재료이다. YIG 단결정의 경우  $\Delta H$ 는  $40 \text{ A/m}$ ( $\approx 0.5 \text{ Oe}$ )이다. 이처럼 자기 손실이 낮은 이유는 가네트 구조를 구성하는 모든 부결자점들이 양이온으로 채워져 있고, 이온의 배치가 공간적으로 비교적 균일하기 때문에 결정 자기 이방성이 작아져 자기모멘트가 이방성 에너지에 구속되지 않고 세차운동을 하기 때문에 전자계의 손실이 작아지게 된다.<sup>7)</sup>

가네트형 재료의 제조시 주요 개발 대상은 고유 특성을 저하시키지 않으면서 고가의 희토류 원소를 다른 저가의 원소로 치환하는 것이다. 현재, 주로 순수한 YIG 이외에 Al 치환 가네트, Gd 치환 가네트, Ca, V 치환 가네트 등이 10 GHz 이하의 주파수대에서 사용되는 재료로 사용되고 있다.<sup>8,9)</sup>

본 연구에서는 Ca, In, V을 치환 원소로 사용한 YIG 페라이트 분말을 분무건조기로 준구형 과립으로 만들어 일반적인 세라믹 제조 공정 방법에 따라 제조하였고, 소결온도와 치환원소의 조성비에 따른 YIG 페라이트의 미세구조와 전자기적 특성 변화를 조사하였다.

## 2. 실험방법

$Y_2O_3$ (99.9%, Johnson Matthey Co.),  $Fe_2O_3$ (99.95%, Johnson Matthey Co.),  $CaCO_3$ (99%, Johnson Matthey Co.),  $V_2O_5$ (99.8% Johnson Matthey Co.),  $In_2O_3$ (99.9% Johnson Matthey Co.)를 원료로 사용하여 Fig. 1과 같이 일반적인 세라믹 공정에 따라 YIG 페라이트 시편을 제조하였다.

우선 원료를 정확한 비율로 칭량한 후, 균일한 혼합물을 얻기 위해 볼밀에 의해 습식 혼합하였다. 이때 플라스틱 용기에 혼합 분말과 Alumina ball을 넣은 후 ethyl alcohol을

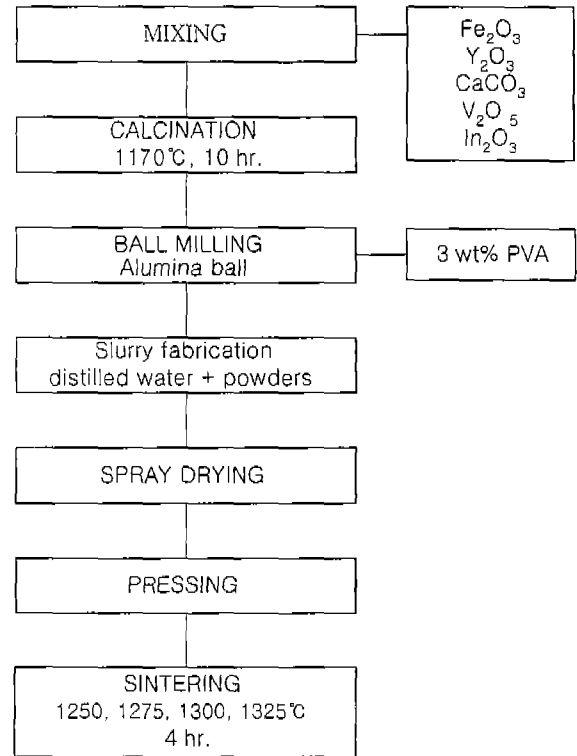


Fig. 1. Flow chart of experimental process for the fabrication of YIG ferrites.

부여 24시간 동안 볼밀링 하였다. 슬러리 상태의 혼합 분말을 건조, 분쇄시킨 후 공기 중에서  $1170^\circ\text{C}$ 에서 10시간 동안 하소시켰고, 이때의 승온 속도는  $5^\circ\text{C/min}$ 이었다. 하소된 분말은 다시 24시간 동안 볼밀링하여 미분말로 분쇄시켰다.

YIG 분말을 준구형의 과립으로 만들기 위하여 하소 분말을 결합제(PVA+PEG)와 함께 증류수에 혼합하여 spray dry 용 slurry를 만들었다. Spray dryer는 nozzle atomizer type (Buchi사 Mini Spray Dryer B-190)을 사용하였으며, 입구 온도는  $220\sim 230^\circ\text{C}$ 로 유지하였고, 출구 온도를  $120^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 이렇게 spray dryer를 사용하여 얻은 약  $5\sim 20 \mu\text{m}$  정도 크기의 준구형 과립 분말을 원통형 몰드에 넣고 약  $40 \text{ MPa}$ 의 압력을 가하여 디스크 형태로 성형하였으며, 성형체의 직경은  $6 \text{ mm}$ 이고 두께는 약  $0.5 \text{ mm}$ 가 되도록 하였다. 성형체는 소결 온도를  $25^\circ\text{C}$  간격으로 하여 각각  $1250^\circ\text{C}$ ,  $1275^\circ\text{C}$ ,  $1300^\circ\text{C}$ ,  $1325^\circ\text{C}$ 로 공기 중에서 4시간 동안 소결하였다. 이때 승온 속도는  $3^\circ\text{C/min}$ 으로 하였으며, 냉각할 때는 로냉하였다.

Ca, V, In의 치환에 따른 가네트의 일반 조성식은  $Y_{3-2x}Ca_{2x}Fe_{5-x-y}V_xIn_yO_{12}$ 으로 표시될 수 있다. In의 치환량 변화에 따른 YIG 가네트의 자기적 특성 변화를 관찰하기 위해 조성식을  $x=0.7$ 로 고정시키고 In의 치환량을  $y=0.1\sim 0.5$ 까지 변화시켜, 위와 동일한 방법으로 성형체를 제조하여  $1300^\circ\text{C}$ 에서 4시간 동안 소결하였다.

소결시편은 아르카네데스법을 이용하여 부피 밀도를 구하였고, X선 회절 분석(Zeifert 3000 diffractometer)을 통하여 결정상을 조사하였으며, YIG 페라이트의 미세 구조는 thermal etching을 시킨 시편을 주사전자 현미경(JEOL JSM-5800)으로 관찰하였다.

YIG 가네트의 자기적 특성을 측정하기 위해 VSM을 이용하여 포화자화( $4\pi M_s$ ) 값을 측정하였고, FMR(Ferromagnetic Resonance) 실험을 통하여 자기공명반치폭( $\Delta H$ )을 측정하였다. FMR 실험을 위해 소결시편을 직경 약 0.5 mm의 구형으로 가공하였으며, 9.44 GHz의 마이크로파 주파수를 사용하여 상온에서 실험하였다.

### 3. 결과 및 고찰

소결 온도에 따른  $Y_{1.6}Ca_{1.4}Fe_4V_{0.7}In_{0.3}O_{12}$  조성의 소결체

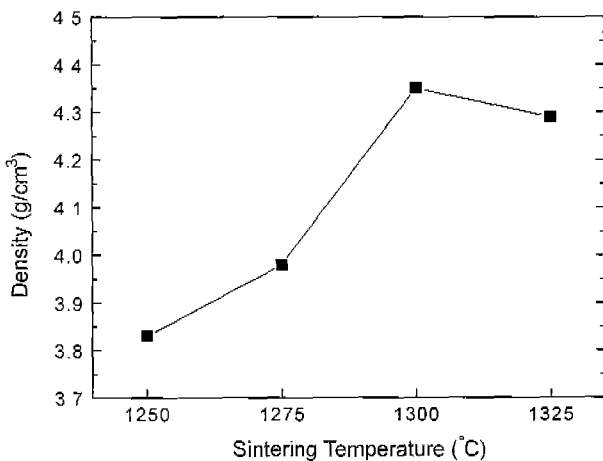


Fig. 2. Densities of YIG ferrites sintered at various temperatures.

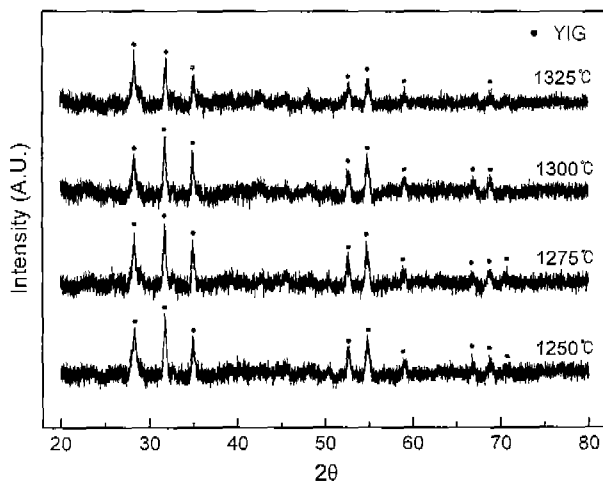


Fig. 3. X-ray diffract patterns of YIG ferrites sintered at various temperatures.

의 밀도를 Fig. 2에 나타내었다. 1250°C에서 소결한 시편의 밀도는  $3.83 \text{ g/cm}^3$ 로 매우 낮았으나, 소결 온도가 높아짐에 따라 밀도도 증가하여 1300°C에서 소결한 시편의 밀도가  $4.34 \text{ g/cm}^3$ 로 가장 높은 값을 나타내었다. 그러나 이는 이론 밀도( $5.17 \text{ g/cm}^3$ )의 84%로, 순수한 YIG에 비해 다소 낮은 밀도를 나타냈다. 1325°C 소결 시편의 경우 밀도가  $4.29 \text{ g/cm}^3$ 로, 1300°C 소결 시편보다 다소 낮은 밀도값을 보였다.

Fig. 3에 1275°C부터 1325°C까지 25°C 간격으로 소결한  $Y_{1.6}Ca_{1.4}Fe_4V_{0.7}In_{0.3}O_{12}$  조성의 가네트에 대한 X선-회절 결과를 나타내었다. X선 회절 spectra로 부터 각각의 온도에서 소결된 시편은 전형적인 YIG의 X선 회절패턴과 잘 일치함을 알 수 있었으며, 온도변화에 따라 결정구조의 변화는 거의 없다.

Fig. 4에 SEM을 통해 관찰한 각각의 소결 온도에 따른 YIG의 미세구조를 나타내었다. 1250°C에서 소결한 시편은 결정립의 크기가 약  $1\sim 3 \mu\text{m}$ 이었으며, 많은 양의 기공이 관찰되어 시편의 치밀화가 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 1275°C에서 소결한 시편의 결정립 크기는 약  $2\sim 4 \mu\text{m}$ 로 커지고, 기공의 양도 1250°C 소결 시편에 비해 감소되었음이 관찰되었다. 1300°C 소결 시편의 경우 결정립이 약  $2\sim 5 \mu\text{m}$ 로 성장하였고, 기공이 거의 관찰되지 않아 시편의 치밀화가 이루어졌음을 알 수 있었다. 그러나 1325°C에서 소결한 시편의 결정립의 크기는  $3\sim 8 \mu\text{m}$ 로 더 커졌으며, 일부 결정립의 조대화 현상이 나타났다. 또한 1300°C 소결 시편에 비해 오히려 더 많은 기공들이 관찰되었으며, 이는 소결 온도 1300°C까지는 밀도가 증가하다가 1325°C에서는 오히려 밀도가 감소하는 결과와 비슷한 경향을 보이고 있다.

Fig. 5에 소결 온도에 따른 YIG의 포화 자화( $4\pi M_s$ ) 값과 보자력( $H_c$ ) 값을 나타내었다. 소결 온도가 상승함에 따라 1300°C까지 포화 자화값은 증가하고, 보자력은 감소함을 알 수 있다. 이는 소결 온도 증가에 따른 결정립의 성장 및 치밀화 증가에 따라 자화 기구중 domain 벽 이동이 용이하게 되어 보자력이 감소하고 포화 자화값이 증가하게 되는 것으로 생각된다. 1300°C 소결 시편의 포화 자화값이 667 Gauss로 가장 높았고, 보자력 역시 22 Oe로 가장 낮은 값을 보였다. 1300°C 소결 시편보다 다소 낮은 밀도값을 가졌던 1325°C 소결 시편은 포화 자화값이 625 Gauss, 보자력이 26 Oe로, 1300°C 소결 시편에 비해 약간 떨어지는 특성을 보였다.

강자성 공명 실험(FMR)을 통해 소결 온도에 따른 YIG의 자기 공명 반치폭( $\Delta H$ )의 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 소결 온도가 높을수록 낮은  $\Delta H$ 값을 보였고, 가장 밀도가 높고 치밀화된 1300°C 소결 시편이 100 Oe로 가장 낮은 값을 보였지만 순수한 YIG에 비해 다소 높은 값을 나타냈다. 이는 시편의 구형 가공시 발행한 오차와 순수한 YIG에 비해 상대적으로 낮은 밀도 때문인 것으로 생각된다.

In의 치환량을 0.1 mol부터 0.5 mol까지 치환시켜 1300°C

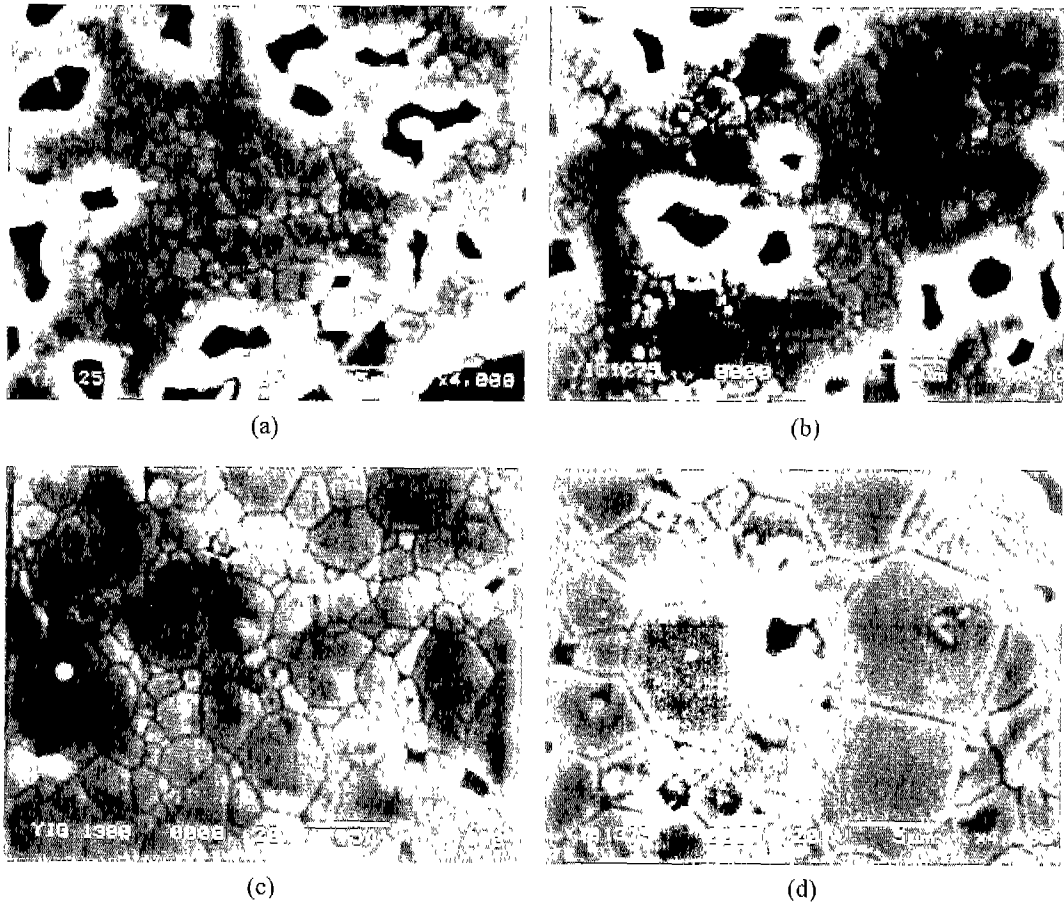


Fig. 4. SEM micrographs of YIG ferrites at sintered at (a) 1250°C, (b) 1275°C, (c) 1300°C and (d) 1325°C.

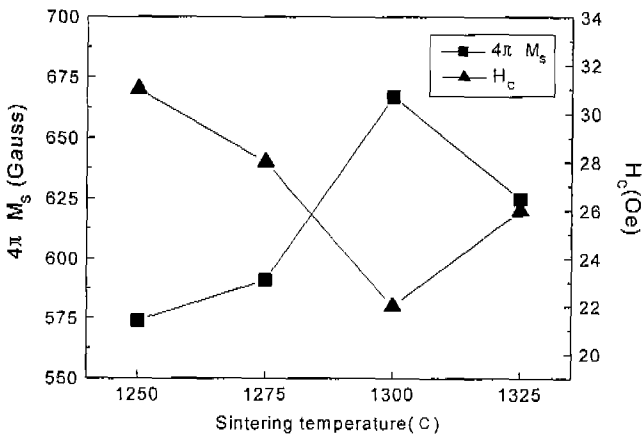


Fig. 5. Magnetic properties of YIG ferrites sintered at various temperatures.

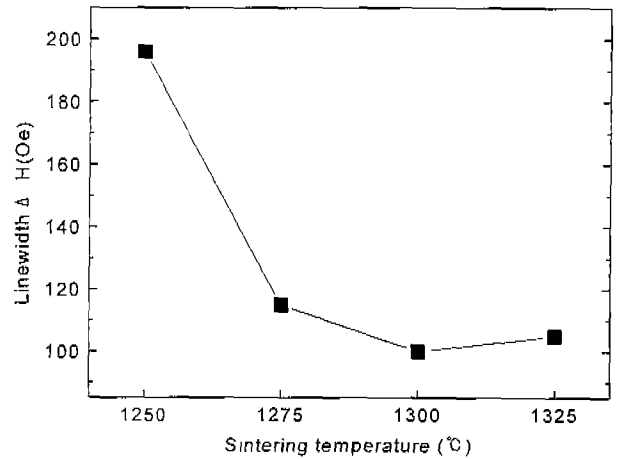


Fig. 6. Ferromagnetic resonance line widths of YIG ferrites sintered at various temperatures.

에서 소결시킨  $Y_{1.6}Ca_{1.4}Fe_{4.3-y}V_{0.7}In_yO_{12}$  가네트의 밀도변화를 Fig. 7에 나타내었다. 그래프에서 In의 치환량이 증가함에 따라 상대적으로 밀도가 감소함을 볼 수 있으며, 특히 0.5 mol이 첨가된 시편의 밀도는  $4.19 \text{ g/cm}^3$ 로 급격히 낮아졌다. 이는 녹는점이 낮은 In의 첨가에 의한 영향으로 사료

되며, 이로부터 In의 치환량이 증가함에 따라 고밀도의 YIG 상을 얻기 어렵다는 것을 알 수 있으며, 이미 보고된 문헌 자료에도 잘 나타나 있다.<sup>1)</sup>

In 치환량에 따른  $Y_{1.6}Ca_{1.4}Fe_{4.3-y}V_{0.7}In_yO_{12}$ 의 X-ray 회절

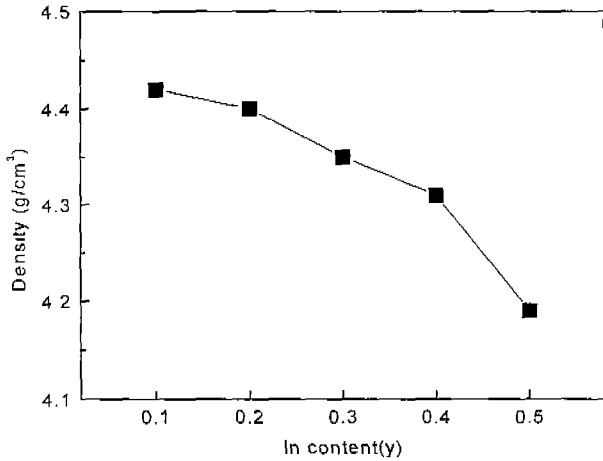


Fig. 7. Densities of YIG ferrites with In content.

그래프를 Fig. 8에 나타내었다. In의 치환량을 0.1 mol에서 0.5 mol까지 증가시킨 시편은 모두 YIG의 X선 회절패턴과 잘 일치하고 있음을 알 수 있으나, 0.5 mol을 치환시킨 시편에서는  $YFeO_3$ 가 제2차상으로 나타나는 것이 관찰되었다. 이는 많은 양의 In이 치환됨에 따라 상분리 현상이 일어났을 알 수 있다.

SEM을 통해 관찰한 In의 치환량에 따른 YIG의 미세 구조를 Fig. 9에 나타내었다. In의 첨가량이 적어질수록 결정립의 크기가 커지고 기공률도 낮아지는 반면 In의 첨가량이 증가하면 결정립의 크기가 작아지고 기공률이 증가하는 경

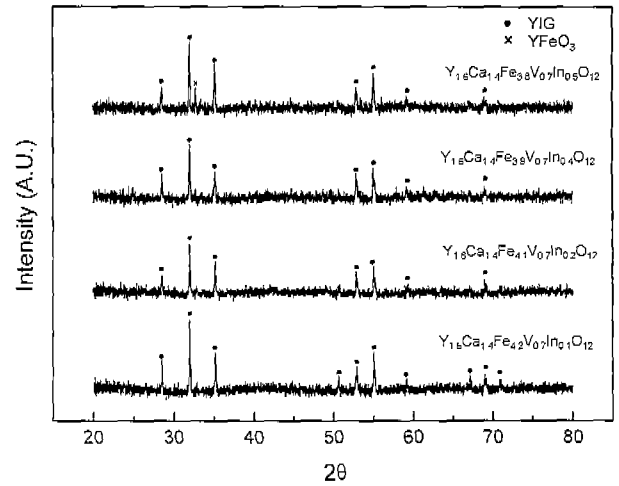


Fig. 8. X-ray diffracton patterns of YIG ferrites with In content.

향을 보였다. 0.1 mol이 첨가된 소결 시편의 결정립 크기는 약  $6\sim 8\ \mu m$ 로 매우 조대하였으나 0.5 mol이 첨가된 소결 시편의 결정립 크기는 약  $1\sim 3\ \mu m$ 로 미세하였다. 특히 0.5 mol이 첨가된 소결 시편의 경우 결정립과 결정립 사이에 작은 기공들이 많이 관찰되어, 상대적으로 낮은 밀도를 보였던 결과와 일치하였다.

In 치환량에 따른 YIG의 포화 자화( $4\pi M_s$ ) 값과 보자력 ( $H_c$ ) 값을 Fig. 10에 나타내었다. In의 치환량이 증가할 수록 포화 자화값은 감소하는 결과를 보였다. 이는 비자성 이

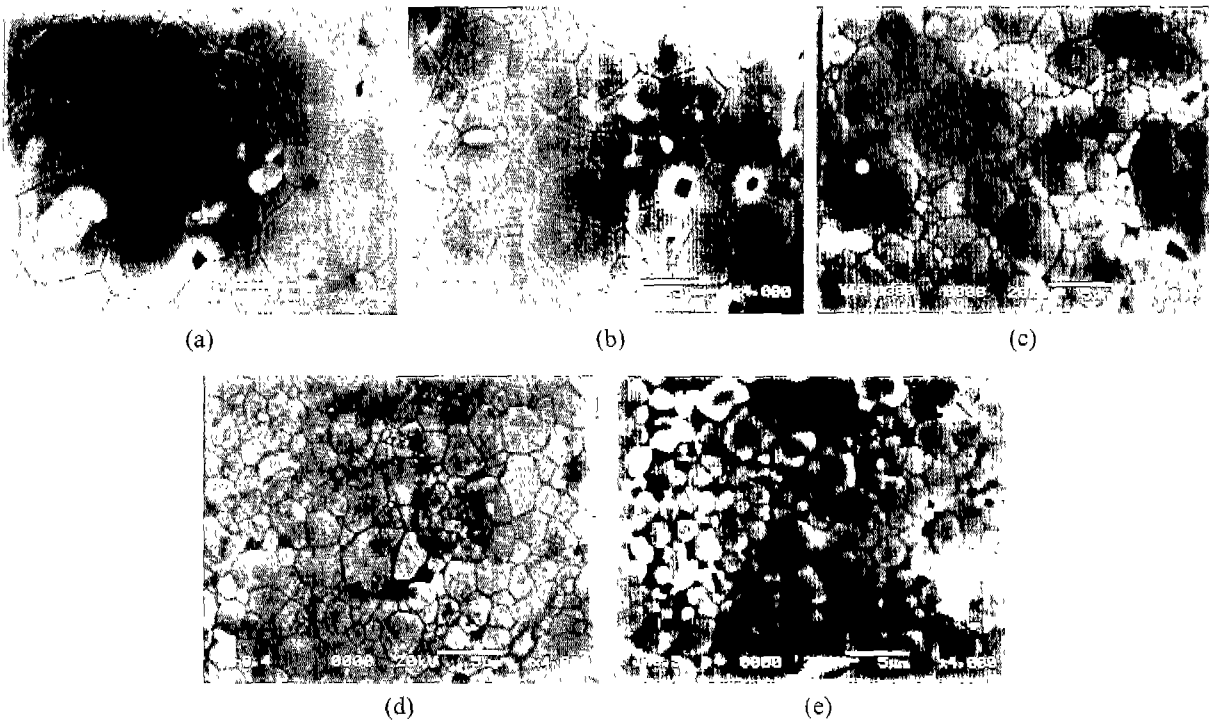


Fig. 9. SEM microrgraphs of YIG ferrites with In content (a) 0.1 mol, (b) 0.2 mol, (c) 0.3 mol, (d) 0.4 mol and (e) 0.5 mol.

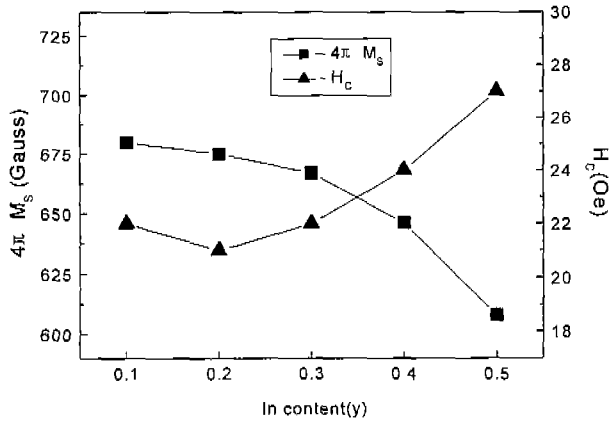


Fig. 10. Magnetic properties of of YIG ferrites with In content.

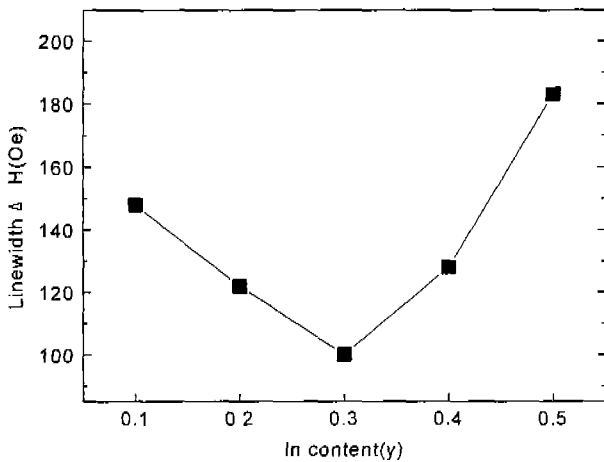


Fig. 11. Ferromagnetic resonance line widths of YIG ferrites with In content.

은인  $\text{In}^{3+}$  이온이 팔면체 자리에 치환되어<sup>10)</sup> In의 치환량이 증가할수록 팔면체 자리와 사면체 자리의 초교환 상호작용이 감소하게 되고, 그 결과 자기 모멘트 값이 감소하게 되어 포화 자화값은 감소하는 것으로 생각된다. 0.5 mol 치환된 시편의 경우 포화 자화값은 608 Gauss로 급격하게 감소하였다. 보자력은 0.2 mol 치환된 시편이 21 Oe로 가장 낮은 값을 보였고, 0.5 mol 치환된 시편은 27 Oe로 가장 높은 값을 보였다. In이 0.5 mol 치환된 시편의 자기적 특성이 떨어지는 것은 상대적으로 많은 In의 치환량과 상분리 현상에 의해 발생된 제2상의 영향인 것으로 사료된다.

Fig. 11에 In의 치환량에 따른 YIG의 자기 공명 반치폭 ( $\Delta H$ ) 측정 결과를 나타내었다. In의 치환량이 증가할수록  $\Delta H$  값은 감소하다가 0.3 mol일때 가장 낮은 값인 100 Oe를 나타냈고, 치환량이 더 증가함에 따라  $\Delta H$  값은 오히려 증가하였다.  $\text{In}^{3+}$  이온은 반경이  $0.8 \text{ \AA}$ 으로 팔면체 자리의  $\text{Fe}^{3+}$  이온과 치환되어 이방성에 의한 자기 공명 선폭을 작게 하는 것으로 알려져 있으나, In의 치환량이 많아지면서

밀도의 감소와 기공률의 증가로 인해  $\Delta H$  값은 오히려 감소하는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

Ca, In, V을 치환원소로 하는 서클레이터/아이솔레이터용 YIG 페라이트를 제조하여 소결온도와 치환원소의 치환량에 따른 미세구조와 자기적 특성을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1.  $\text{Y}_{1.6}\text{Ca}_{1.4}\text{Fe}_4\text{V}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{O}_{12}$  조성의 YIG 페라이트를 소결 온도를 달리하여 제조한 결과,  $1300^\circ\text{C}$ 에서 소결된 YIG 페라이트가 가장 치밀화 되었고 가장 높은 밀도를 보였으며, 자기적 특성 역시 가장 우수하였다.

2. In의 치환량을 변화시켜  $1300^\circ\text{C}$ 에서 소결한  $\text{Y}_{1.6}\text{Ca}_{1.4}\text{Fe}_{4.3-y}\text{V}_{0.7}\text{In}_y\text{O}_{12}$  시편의 경우, In이 0.1 mol 치환된 YIG 페라이트가 가장 높은 밀도값을 나타내었고 높은 포화 자화 ( $4\pi M_s$ ) 값을 보였으나, 자기 공명 반치폭( $\Delta H$ )은 In이 0.3 mol 치환된 YIG 페라이트가 가장 낮은 값을 나타내었다.

3. 이상의 결과로 부터 서클레이터/아이솔레이터 부품용 YIG 가네트는 가장 치밀화 되고 높은 밀도를 가지는 온도에서 소결되어야 그 자기적 특성이 우수하게 나타남을 알 수 있었다. 또한 순수한 YIG 가네트에 다른 원소를 치환하여 실험을 해본 결과, In이 약 0.3 mol 치환되었을 때 가장 우수한 자기적 특성을 가짐을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 전자부품연구원 2001년도 전자부품기반기술개발사업의 일부 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. C. L. Hogan, "The Ferromagnetic Faraday Effect at Microwave Frequencies and its Applications," *Bell Syst. Tech. J.*, **31**, 1-31 (1952).
2. F. Bertaut and F. Forrat, "Structure des Ferrites Ferrimagnétiques des Terres Rares," *Compt. Rend.*, **242**, 382-391 (1956).
3. A. Goloman, "Morden Ferrite Technology," Vau Nostrand Reinhold, 39-43 (1990).
4. J-D. Lee, S-J. Kim, S-H. Lee and T-O. Kim, "The Study on the Microstructure and Magnetic Properties of Polycrystalline  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **30**(12), 1015-1022 (1993).
5. V. R. Murthy, S. Sundaram and B. Viswanathan, *Microwave Materials*, Narosa Publishing House, 164-173 (1994).
6. Raul Valenzuela, *Magnetic Ceramics*, Cambridge University Press, 24-30 (1994).
7. B. J. Lax and K. J. Button, *Microwave Ferrites and Ferrimagnetics*, McGraw-Hill, 125-127 (1962).

8. 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 (2000).
9. T-K. Lee, J-H. Nam, J-H. Oh, J-C. Lee and S. C. Choi, "Properties of YIG Films Prepared by Screen-printing," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **37**(10), 1001-1007 (2000).
10. S. Geller and M. A. Gilleo, "Structure and Ferromagnetism of Yttrium and Rare earth Iron Garnets," *Acta Cryst.*, **10**(3), 239-243 (1957).