

## Zr 치환에 따른 YIG계 페라이트의 자기적 특성 연구

양승진 · 윤종남\* · 김정식†

서울시립대학교 신소재공학과

\*전자부품연구원

(2003년 3월 7일 접수; 2003년 4월 23일 승인)

### A Study on the Magnetic Properties of YIG Ferrites with Zr-Substitution

Seung-Jin Yang, Jong-Nam Yoon,\* and Jung-Sik Kim†

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

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

(Received March 7, 2003; Accepted April 23, 2003)

#### 초 록

이 연구에서는 소결온도와 Zr 치환에 따른 아이솔레이터/서큘레이터용 YIG 페라이트의 미세구조와 전자기적 특성의 변화를 고찰하고자 하였다. 조성은  $Y_{2.1}Ca_{0.9}Fe_{4.4-x}V_{0.5}In_{0.05}Al_{0.05}Zr_xO_{12}$ 에서 x의 값을 0, 0.05, 0.1, 0.2로 변화시켰으며, 일반적인 세라믹 제조 공정으로 YIG 페라이트를 제조하였다. 그 결과, Zr이 0.1 mol 정도 치환된 YIG 페라이트가 가장 높은 포화자화(1097 gauss) 값을 나타내었으며, 또한, Zr을 0.2 mol 치환한 경우 격리도 18.60 dB, 삽입손실 0.45 dB의 마이크로파 특성을 나타내었다. 자기 공명 선폭( $\Delta H$ )은 Zr의 치환량이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

#### ABSTRACT

In this study, we investigated the variation of microstructural and electromagnetic properties of YIG ferrites for Isolator/Circulator application with the sintering temperature and Zr addition. The composition of the ferrites was  $Y_{2.1}Ca_{0.9}Fe_{4.4-x}V_{0.5}In_{0.05}Al_{0.05}Zr_xO_{12}$  with  $x=0, 0.05, 0.1$  and  $0.2$ . The YIG ferrites were prepared by the conventional ceramic sintering process. The Zr-substituted YIG ferrite,  $Y_{2.1}Ca_{0.9}Fe_{4.4-x}V_{0.5}In_{0.05}Al_{0.05}Zr_xO_{12}$ , showed the highest saturation magnetization (1097 gauss) at  $x=0.1$ . The microwave properties were shown as isolation of 18.60 dB and insertion loss of 0.45 dB at  $x=0.2$ . Additionally, Zr-substitution was effective in decreasing ferromagnetic resonance linewidth with Zr content.

**Key words :** YIG, Magnetic property, Microwave ferrite, Ferromagnetic resonance

#### 1. 서 론

이트륨 가네트(garnet)형인 YIG( $Y_3Fe_5O_{12}$ )는 현재 알려져 있는 마이크로파용 자성재료 중에서도 가장 손실이 적은 재료이며, 상대적으로 낮은 포화자화 값을 갖기 때문에 이론적으로 저주파에서 마이크로파에 이르기까지 비가역적 소자로서의 한계를 극복할 수 있다.<sup>1)</sup> 또한 마이크로파 영역에서 우수한 자기적 성질을 가지므로 이동통신용 부품, 위성방송용 부품, 비가역소자, 레이더 등의 핵심소재로서 널리 이용되고 있다.<sup>2-4)</sup> 가네트 페라이트의 결정구조는  $R_3Fe_5O_{12}$ 의 화학식으로 표시되며, R은 Y 또는 Gd 등의 희토류 원소이다. 가네트 페라이트는 1952년 C. L. Hogan<sup>5)</sup>이 10 GHz대에서의 자이로 자기공명을 발표하

고, 1956년 Bertaut와 Forrat<sup>6)</sup>에 의해 가네트 자성재료가 발견된 이래 마이크로파 부품에 적용시키고자 많은 연구 개발이 진행되었다. X-ray 회절실험에 의해 밝혀진 YIG ( $Y_3Fe_5O_{12}$ )의 결정구조는 Oh10-Ia3d (230) group에 속하고, 단위정은 8개의  $Y_3[Fe]_2(Fe)_3O_{12}$  분자 단위로 구성된다. 여기서 Y는 십이면체 24(c) site, [Fe]는 팔면체 16(a) site, (Fe)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>7-9)</sup> YIG는 마이크로파용 자성 재료중 손실이 가장 작은 재료로 YIG 단결정의 경우  $\Delta H$ 는 40 A/m( $\approx 0.5$  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 때문이다. 작은 선 폭과 낮은 포화자화값

†Corresponding author : Jung-Sik Kim

E-mail : jskim@uoscc.uos.ac.kr

Tel : +82-2-2210-2758 Fax : +82-2-2215-5863

때문에 다결정 가네트는 마이크로파 범위에서 페라이트가 갖는 작동 주파수의 한계를 넓힐 수 있으며, 그로 인하여 가네트는 비선형적이고 낮은 마이크로파 장비 또는 마이크로파 필터에 매우 유용하게 사용된다.

일반적으로 세라믹 자성체를 마이크로파 부품으로 응용하기 위해서는 첫째, 부품의 크기와 구조에 적합하고 적당한 포화자화를 가질 것, 둘째, 부품의 온도 안정성을 나타내는 포화자화 온도계수( $\alpha$ )가 0.2%/°C 이하일 것, 셋째, 부품의 마이크로파 손실에 관계되는 자기공명선폭( $\Delta H$ )이 100 Oe 이하일 것 등과 같은 전자기적인 특성이 요구되어지고 있다.<sup>10)</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>11,12)</sup> In 치환 가네트의 경우, In<sup>3+</sup> 이온 반경이 0.8 Å으로 팔면체 자리의 Fe<sup>3+</sup> 이온과 치환되어 이방성에 의한 자기 공명 선폭을 작게 하는 것으로 알려져 있다.

이 연구에서는 Ca, V, In, Al을 치환 원소로 사용한 YIG 페라이트 분말과 Ca, V, In, Al, Zr을 치환 원소로 사용한 YIG 페라이트 분말을 분무건조기로 과립화(granulation)하여 일반적인 세라믹 제조 공정 방법에 따라 제조하였고, 소결온도와 Zr 치환원소의 조성비에 따른 YIG 페라이트의 미세구조와 전자기적 특성 변화를 조사하였다.

## 2. 실험방법

Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(99.9%, Johnson Matthey Co.), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(99.95%, Johnson Matthey Co.), CaCO<sub>3</sub>(99%, Johnson Matthey Co.), V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(99.8% Johnson Matthey Co.), In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(99.9% Johnson Matthey Co.), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(99%, Junsei Chemical Co.), ZrO<sub>2</sub>(99%, Johnson Matthey Co.)를 원료로 사용하여 일반적인 세라믹 공정에 따라 Y<sub>2.1</sub>Ca<sub>0.9</sub>Fe<sub>4.4</sub>V<sub>0.5</sub>In<sub>0.05</sub>Al<sub>0.05</sub>O<sub>12</sub> 조성의 YIG 페라이트 시편을 제조하였다. 원료를 조성비에 맞게 각각 칭량한 후, 에탄올과 혼합하여 24시간 동안 볼밀링 하였고, 1170°C에서 10시간 동안 하소시켰다. 하소된 YIG 분말을 과립화(granulation)시키기 위하여 결합제(PVA+PEG)와 함께 증류수에 혼합하여 spray dry용 slurry를 만들었고, nozzle atomizer type의 spray dryer (Buchi사 Mini Spray Dryer B-190)를 사용하여 약 5~20 μm 정도 크기의 과립화된 분말을 얻었다. 분말을 원통형 볼드에 넣고 약 40 MPa의 압력을 가하여 성형한 후 1300~1370°C 온도범위에서 소결온도를 달리하여 6시간 동안 각각 소결하였다.

Zr 치환에 따른 가네트의 일반 조성식은 Y<sub>2.1</sub>Ca<sub>0.9</sub>Fe<sub>4.4-x</sub>V<sub>0.5</sub>In<sub>0.05</sub>Al<sub>0.05</sub>Zr<sub>x</sub>O<sub>12</sub>으로 표시될 수 있다. Zr의 치환량 변

화에 따른 YIG 페라이트의 자기적 특성변화를 조사하기 위해 x=0.05~0.2까지 변화시켜 위와 동일한 방법으로 성형체를 제조하여 1350°C에서 6시간 동안 소결하였다.

소결시편은 아르키메데스법을 이용하여 부피 밀도를 구하였다. 그리고 X-선 회절 분석기(Zeifert 3000 diffractometer)을 통하여 결정상을 조사하였으며, 주사전자 현미경(JEOL JSM-5800)을 통하여 YIG 페라이트의 미세 구조를 관찰하였다. VSM(Lake Shore 735)을 이용하여 포화자화(4πMs)값을 측정하였고, FMR(Ferromagnetic Resonance) 실험을 통한 자기공명선폭( $\Delta H$ ) 측정을 실시하였다. FMR 실험을 위해 EPR spectrometer를 이용하였으며, 시편을 직경 0.5 mm 이하의 구형으로 가공하였다. 또한 YIG 페라이트의 마이크로파 특성은 Network Analyzer(Advantest R3765CH)를 이용하여 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

소결온도에 따른 Y<sub>2.1</sub>Ca<sub>0.9</sub>Fe<sub>4.4</sub>V<sub>0.5</sub>In<sub>0.05</sub>Al<sub>0.05</sub>O<sub>12</sub> 소결체의 밀도를 Fig. 1에 나타내었다. 각 소결온도에 대해 4.75~4.81 g/cm<sup>3</sup> 범위의 소결밀도를 나타내었으며, 이는 이론밀도(4.97 g/cm<sup>3</sup>)의 95% 이상에 해당된다. 또한, 1350°C 소결온도에서 가장 높은 밀도값을 나타내었다. Fig. 2에서는 1350°C에서 소결된 Y<sub>2.1</sub>Ca<sub>0.9</sub>Fe<sub>4.4</sub>V<sub>0.5</sub>In<sub>0.05</sub>Al<sub>0.05</sub>O<sub>12</sub> 시편의 X-선 회절 패턴 결과를 나타내었으며, 전형적인 YIG의 X-선 회절 패턴과 일치함을 알 수 있었다.

Fig. 3은 소결온도에 따른 포화자화 값의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 1350°C에서 소결한 ferrites가 가장 높은 포화자화(4πMs=1097 Gauss) 값을 나타내었다. Fig. 1의 밀도 측정값에서 볼 수 있듯이, 소결밀도가 높아짐에 따라 치밀화가 진행되어 자구 벽 이동을 방해하고 내부 자기소거효과(internal demagnetizing effect)를 일으키는 기공등의 감소로 높은 자기적 특성을 나타냄을

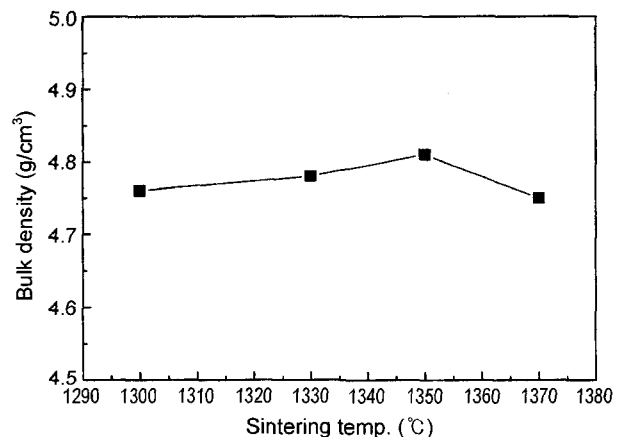


Fig. 1. Bulk density of YIG ferrites, Y<sub>2.1</sub>Ca<sub>0.9</sub>Fe<sub>4.4</sub>V<sub>0.5</sub>In<sub>0.05</sub>Al<sub>0.05</sub>O<sub>12</sub> sintered at various temperature for 6 h.

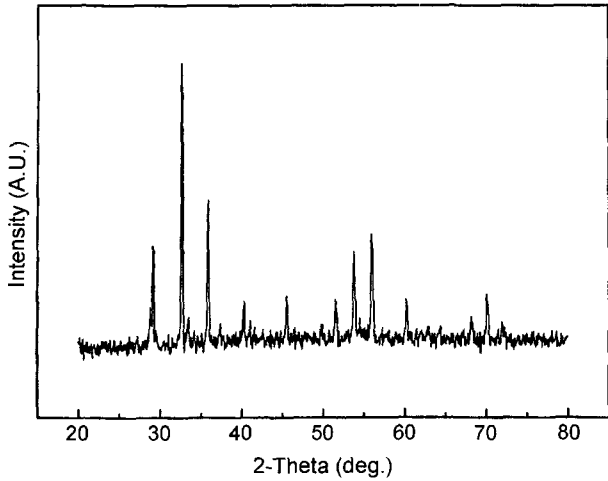


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of YIG ferrites,  $Y_{2.1}Ca_{0.9}Fe_{4.4}V_{0.5}In_{0.05}Al_{0.05}O_{12}$  sintered at  $1350^{\circ}C$  for 6 h.

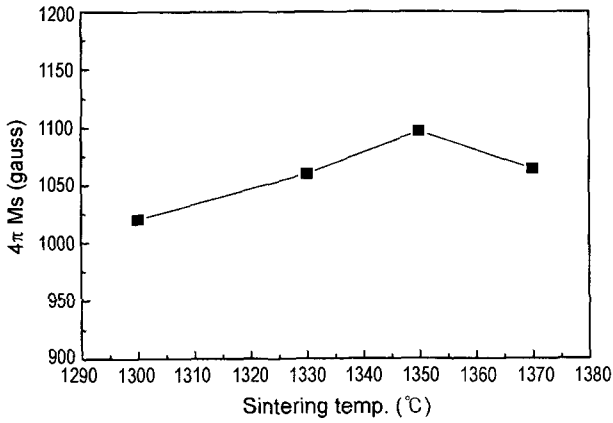


Fig. 3. Saturation magnetizations of  $Y_{2.1}Ca_{0.9}Fe_{4.4}V_{0.5}In_{0.05}Al_{0.05}O_{12}$  with sintering temperature.

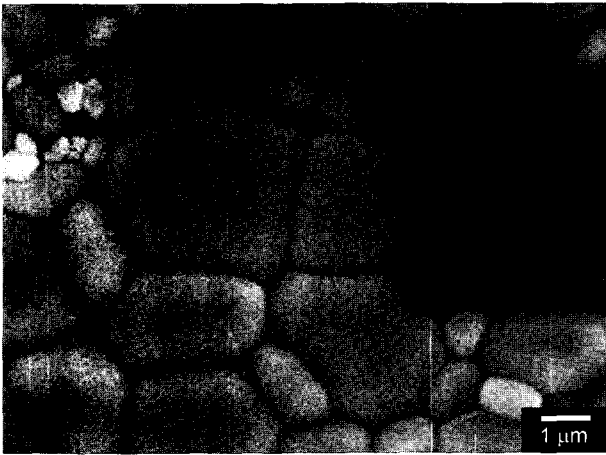


Fig. 4. SEM micrograph of YIG ferrite,  $Y_{2.1}Ca_{0.9}Fe_{4.4}V_{0.5}In_{0.05}Al_{0.05}O_{12}$  sintered at  $1350^{\circ}C$  for 6 h.

알 수 있다.<sup>13)</sup>  $1350^{\circ}C$ 에서 소결된 시편에 대하여 SEM을 이용하여 관찰한 미세구조 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

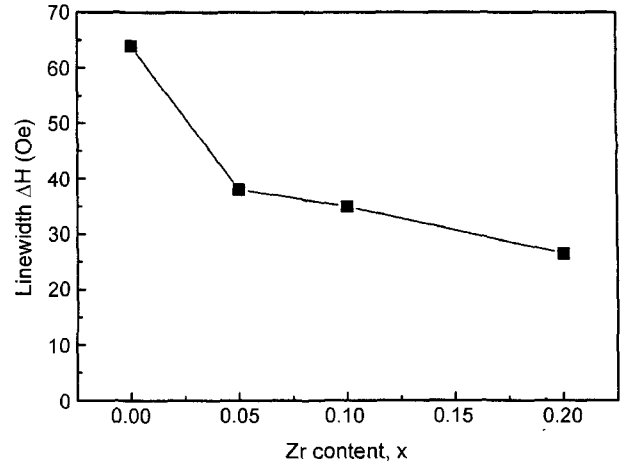


Fig. 5. Ferromagnetic resonance linewidths of  $Y_{2.1}Ca_{0.9}Fe_{4.4-x}V_{0.5}In_{0.05}Al_{0.05}Zr_xO_{12}$  sintered at  $1350^{\circ}C$  for 6 h.

사진에 나타난 바와 같이, 평균 입경이  $1\sim 3\mu m$ 로서 균일한 입자 크기의 치밀화가 잘 일어난 상태임을 알 수 있다.

Zr 치환량 변화에 따른  $Y_{2.1}Ca_{0.9}Fe_{4.4-x}V_{0.5}In_{0.05}Al_{0.05}Zr_xO_{12}$  시편의 자기적 특성 평가는 온도를  $1350^{\circ}C$ (Figs. 1과 3에서 보는 바와 같이, Zr이 치환되지 않을 경우, 가장 높은 밀도값과 포화자화 값을 나타낸 온도임.)로 고정하여 6시간 동안 소결하였다.<sup>14)</sup> Fig. 5에 FMR(Ferromagnetic Resonance) 실험을 통하여  $1350^{\circ}C$ 에서 소결된  $Y_{2.1}Ca_{0.9}Fe_{4.4-x}V_{0.5}In_{0.05}Al_{0.05}Zr_xO_{12}$  시편의 Zr 치환량에 따른 자기공명선폭( $\Delta H$ ) 측정 결과를 나타내었다. Zr 치환량이 증가할수록  $\Delta H$  값이 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 Zr이 0.2 mol 치환된 시편의 경우, 가장 낮은 값인 26.5 Oe를 나타내었다. 다결정체 페라이트에서 자기공명선폭( $\Delta H$ )은 식(1)와 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta H = \Delta H_a + \Delta H_{inh} + \Delta H_p + \Delta H_s + \Delta H_{int} \quad (1)$$

여기서,  $\Delta H_a$ 는 자기이방성에 의한 선폭이며,  $\Delta H_{inh}$ 는 비균질 내부자기장에 의한 선폭이다.<sup>15)</sup> 또  $\Delta H_p$ 와  $\Delta H_s$ 는 각각 시료내의 기공이나 결함에 의한 선폭과 표면의 흡동에 의한 선폭이다.  $\Delta H_{int}$ 는 스핀간의 상호작용 효과에 의한 고유선폭이다. 이 중 조성변화에 따른 이방성 변화에 의한 선폭과 기공율(porosity)에 의한 선폭이 가장 큰 영향을 주는 요인으로, Zr이 YIG에 치환될 경우, 결정자기 이방성 상수( $K_1$ )의 감소에 영향을 준다고 알려져 있다.<sup>16,17)</sup>  $K_1$ 이 작아진다면 자화용이축, 즉 이방성 자계( $H_a$ ) 방위에 묶여져 있던 자기모멘트의 자유도는 그만큼 증가하므로, 외부로부터 가하여진 직류자계 방위로 쉽게 향하게 되어  $\Delta H$ 의 값이 감소될 수 있다. 기공율과  $\Delta H_p$ 의 관계는 식(2)과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta H_p = 1.5p(4\pi Ms)(1 + p)^{-1} \quad (2)$$

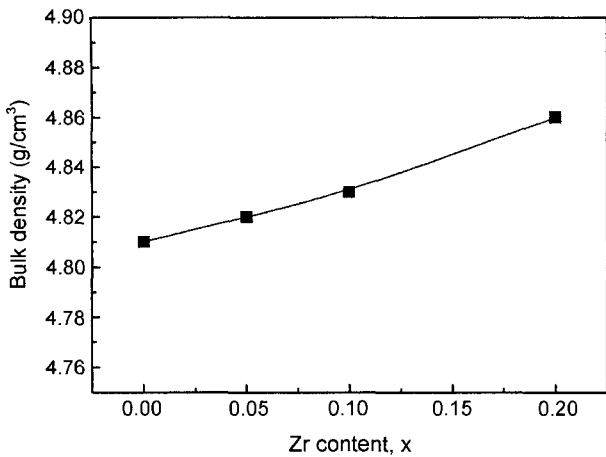


Fig. 6. Bulk density of  $Y_{2.1}Ca_{0.9}Fe_{4.4-x}V_{0.5}In_{0.05}Al_{0.05}Zr_xO_{12}$  with Zr content sintered at  $1350^{\circ}C$  for 6 h.

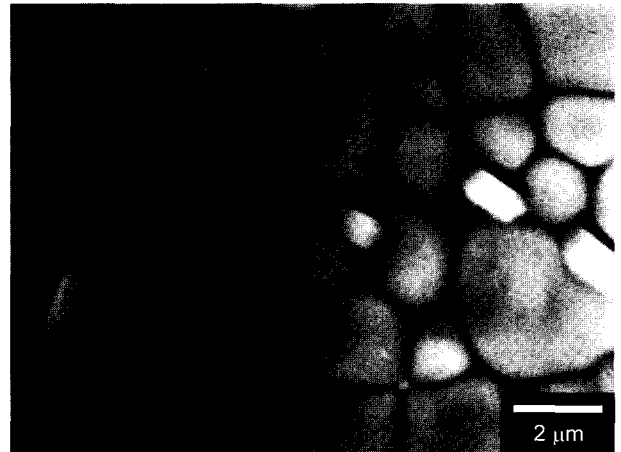


Fig. 8. SEM micrograph of YIG ferrite,  $Y_{2.1}Ca_{0.9}Fe_{4.2}V_{0.5}In_{0.05}Al_{0.05}Zr_{0.2}O_{12}$  sintered at  $1350^{\circ}C$  for 6 h.

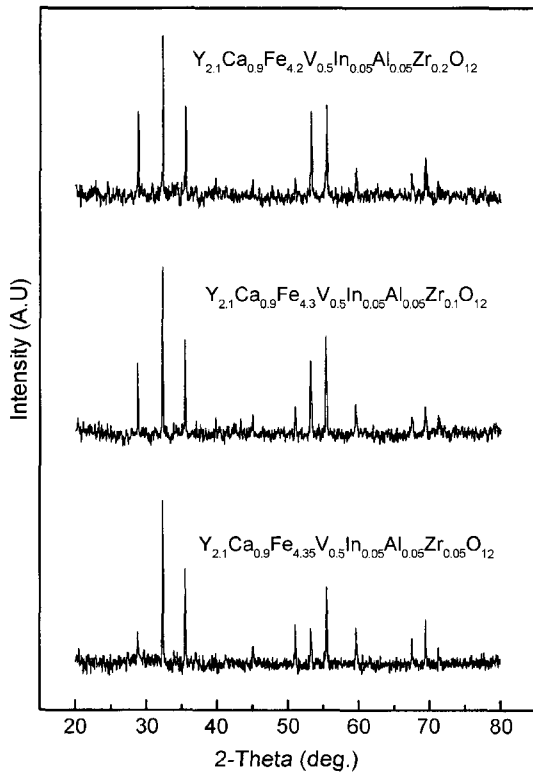


Fig. 7. X-ray diffraction patterns of Zr substituted  $Y_{2.1}Ca_{0.9}Fe_{4.4-x}V_{0.5}In_{0.05}Al_{0.05}Zr_xO_{12}$  ferrites sintered at  $1350^{\circ}C$  for 6 h.

여기서,  $p$ 는 기공율을 나타낸다. Zr 치환에 따른 고밀도화에 의한 기공을 감소로 인하여 자기공명선폭이 감소함을 알 수 있었다.<sup>18)</sup>

Zr을 0~0.2 mol까지 치환시켜  $1350^{\circ}C$ 에서 소결시킨  $Y_{2.1}Ca_{0.9}Fe_{4.4-x}V_{0.5}In_{0.05}Al_{0.05}Zr_xO_{12}$  시편의 Zr 첨가량에 따른 밀도변화를 Fig. 6에 나타내었다. Zr 치환량  $x=0$ 일때의 밀도값과 비교하였을 때 Zr의 첨가에 의해 밀도가 다소 증가함을 알 수 있다. Zr 치환량에 따른  $Y_{2.1}Ca_{0.9}Fe_{4.4-x}$

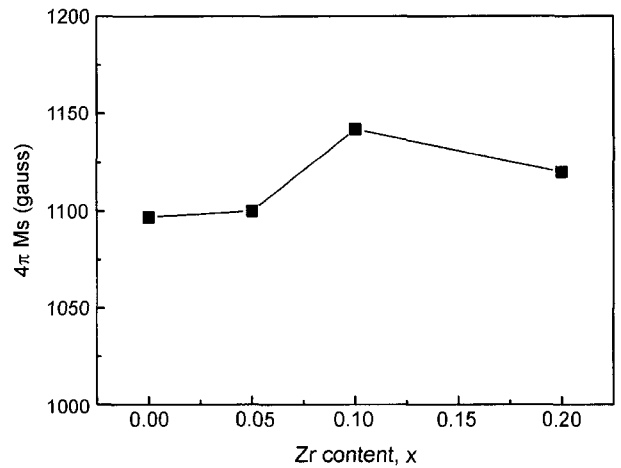


Fig. 9. Saturation magnetizations of YIG ferrites with Zr content sintered at  $1350^{\circ}C$  for 6 h.

$V_{0.5}In_{0.05}Al_{0.05}Zr_xO_{12}$ 의 X-선 회절 패턴을 Fig. 7에 나타내었다. Zr의 치환량을 0.05 mol에서 0.2 mol까지 증가시킨 시편은 모두 YIG 페라이트의 X-선 회절 패턴과 일치하며, 이는 Zr의 고용한계 이내의 조성임을 말해준다. Fig. 8은 Zr이 0.2 mol 치환된 YIG 페라이트 소결체의 미세구조이며, 밀도 측정값에서 볼 수 있었던 치밀화가 잘 일어난 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 Zr 치환량에 따른 소결체의 포화자화( $4\pi Ms$ ) 측정 결과를 나타내었다. Zr이 첨가될 경우, 앞서 기술한 Fig. 3의 Zr이 첨가되지 않은 결과보다 높은 포화자화( $4\pi Ms$ ) 값을 가졌다. Zr이 0.1 mol 치환시켰을 경우 1097 gauss의 포화자화 값을 가졌으며, Zr이 0.2 mol 치환시켰을 경우 1064 gauss의 포화자화 값을 나타내었다. 이는  $Zr^{4+}$ (0.072 nm; CN=6)은 사면체 자리보다는 팔면체 자리를 선호하여  $Fe^{3+}$  이온과 우선적으로 치환된다.<sup>19)</sup> YIG의 경우 자기 모멘트를 갖지 않는  $Y^{3+}$  이온이 십이면체 자

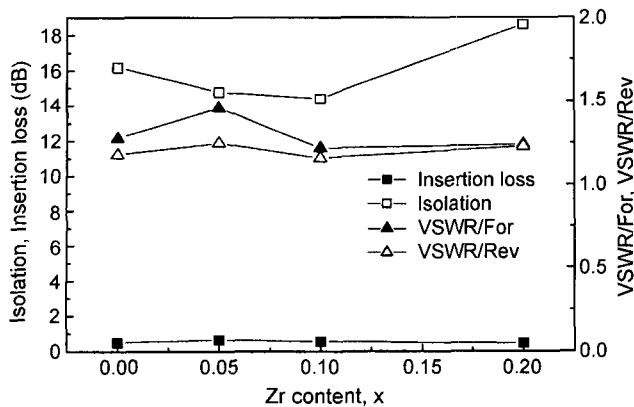


Fig. 10. Microwave characteristics of  $Y_{2.1}Ca_{0.9}Fe_{4.4-x}V_{0.5}In_{0.05}Al_{0.05}Zr_xO_{12}$  ( $x=0\sim 0.2$ ).

리(dodecahedral site)에 존재하며, 팔면체 자리와 사면체 자리에 약  $5\mu_B$ 의 자기모멘트를 갖는  $Fe^{3+}$  이온이 2:3 비율로 점유하게 된다. 따라서  $Zr^{4+}$  이온의 치환량이 증가할수록 사면체 자리의 자기모멘트를 우세하게 하여 전체적인 포화자화 값이 증가하며, Zr 치환량이 0.1 mol 이상의 조성에서는 비자성인  $Zr^{4+}$  이온이 증가함으로 포화자화값이 오히려 감소되는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 실제로 사용되고 있는 아이솔레이터(Isolator)와 동일한 조건으로 Network Analyzer를 이용하여 마이크로파 특성을 측정된 결과로, 삽입손실(insertion loss), 격리도(isolation), VSWR/Forward(voltage standing wave ratio;  $S_{11}$ ), VSWR/Reverse( $S_{22}$ ) 값을 나타내었다. 중심 주파수를 1950 MHz로 테스트한 결과, Zr이 0.2 mol 치환되었을 경우 삽입손실이 0.45 dB로 가장 낮고, 격리도는 18.60 dB로 가장 높은 값을 갖는 것으로 확인되었다. VSWR은 반사손실(return loss) 개념으로도 볼 수 있는데, 반사손실은 아래 식(3), (4)로 주어지며,

$$\text{반사계수(reflection coefficient: } \Gamma) = \frac{VSWR-1}{VSWR+1} \quad (3)$$

$$\text{반사손실(return loss)} = 20 \log \Gamma \quad (4)$$

Zr 치환량이 증가할수록 VSWR 값은 약간 감소하는 경향을 보이는데, 이는 Fig. 5에서 보는바와 같이 고밀도화에 의한 자기공명선폭의 감소와 관계되는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

Ca, V, In, Al을 치환 원소로 하는 YIG 페라이트와 Ca, V, In, Al, Zr을 치환 원소로 사용한 YIG 페라이트를 제조하여 소결온도와 Zr 치환량에 따른 미세구조와 전자기적 특성을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1.  $Y_{2.1}Ca_{0.9}Fe_{4.4}V_{0.5}In_{0.05}Al_{0.05}O_{12}$  조성의 YIG 페라이트

를 소결온도를 달리하여 제조한 결과, 1350°C에서 소결된 YIG 페라이트가 이론 밀도의 96.7%에 해당하는 가장 높은 밀도값과 포화 자화( $4\pi Ms$ ) 값을 나타내었다.

2. Zr의 첨가에 따라 밀도값이 약간 증가하는 경향을 나타냈으며, 포화자화값은  $Zr=0.1$  mol 첨가되었을 경우 가장 높은 값을 나타내었다. 또한, 자기공명선폭( $\Delta H$ )은 Zr의 치환량이 증가할수록 감소하는 경향을 보였으며, Zr이 0.2 mol 치환된 경우 26.5 Oe를 나타내었다.

3. 이상의 결과로부터 아이솔레이터/서큘레이터용 YIG 페라이트는 가장 치밀화되고 높은 밀도를 지닐수록 그 전자기적 특성이 우수하게 나타났으며, 또한, Zr이 0.2 mol 치환되면 삽입손실 0.45 dB, 격리도 18.60 dB인 마이크로파 특성을 가졌다.

#### 감사의 글

이 연구는 전자부품연구원의 2001년도 전자부품기반기술개발사업 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

- C. J. Yang and S. W. Kim, "Magnetic Properties of Heteroepitaxial  $Y_3Fe_5O_{12}$  Films Grown by a Pulsed Laser Ablation Technique," *J. Mag.*, **5** [2] 128-33 (1995).
- R. H. Knerr, "An Annotated Bibliography of Microwave Circulators and Isolators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **23** [10] 818-25 (1975).
- D. D. Ursu and I. D. Bursuc, "Differential Device for the Determination of Magnetic Permeability or Electric Resistivity Inside Massive Cylindrical Samples," *IEEE Trans. Magn.*, **21** [2] 1201-03 (1985).
- J. Nicolas, "Microwave Ferrites," Ed. by E. P. Wohlfarth, **2** 257-80 (1986).
- C. L. Hogan, "The Ferromagnetic Faraday Effect at Microwave Frequencies and its Applications," *Bell Syst. Tech. J.*, **31** 1-31 (1952).
- F. Bertaut and F. Forrat, "Structure des Ferrites Ferrimagnétiques des Terres Rares," *Compt. Rend.*, **242** 382-91 (1956).
- J. D. Lee, S. J. Kim, S. H. Lee, and T. O. Kim, "The Study on the Microstructure and Magnetic Properties of Polycrystalline  $Y_3Fe_5O_{12}$ ," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **30** [12] 1015-22 (1993).
- V. R. Murthy, S. Sundaram, and B. Viswanathan, "Microwave Materials," Narosa Publishing House, 164-73 (1994).
- R. Valenzuela, "Magnetic Ceramics," Cambridge University Press, 24-30 (1994).
- J. R. Park, T. H. Kim, M. S. Kim, and J. W. Hahn, "The Fabrication of Microwave Circulator Using Polycrystalline  $Y_{2.4}Ca_{0.3}Sn_{0.3}Fe_{5-x}Al_xO_{12}$  Garnets," *The J. of the Kor. Ins. of Com. Sci.*, **22** [11] 2573-83 (1997).
- Y. S. Ahn, M. H. Han, and C. O. Kim, "Synthesis of Yit-

- trium Iron Garnet Powder by Homogeneous Precipitation and its Crystallization," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **33** [6] 693-99 (2000).
12. 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] 1001-07 (2000).
  13. E. K. Hur, Y. J. Kang, and J. S. Kim, "Enhancement of Lowsintering Temperature and Electromagnetic Properties of (NiCuZn)-ferrites for Multilayer Chip Inductor by Using Ultra-fine Powders," *J. of the Microelectronics & Packaging Soc.*, **9** 47-53 (2002).
  14. Japan Patent, JP7157313.
  15. G. F. Dionne, "Determination of Magnetic Anisotropy and Porosity from the Approach to Saturation of Polycrystalline Ferrites," *J. Appl. Phys.*, **29** 337-42 (1958).
  16. Y. Machida, Y. Nakayama, H. Saji, T. Yamadaya, and M. Asanuma, "Magnetic Properties and Resonance Linewidths of Zr- and Ti-substituted Ca-V Garnet," *IEEE Trans. Magn.*, **8** [3] 444-46 (1972).
  17. M. Nukaga, S. Henmi, and N. Sato, "Relationship Between Magnetic Properties of YIG Ferrites and Intermodulation Characteristic of Microwave Isolators," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **6** [3] 300-03 (2000).
  18. C. R. Buffler, "Ferromagnetic Resonance near the Upper Limit of the Spin Wave Manifold," *J. Appl. Phys.*, **30** [4] 172-79 (1959).
  19. E. P. Wohlfarth, "Ferromagnetic Materials," North-Holland Pub. Co., **2** 271-73 (1980).