

## 스크린 프린트법에 의해 제조된 YIG계 후막의 특성

이태경 · 남중희 · 오재희 · 이재춘\* · 최승철\*\*

인하대학교 무기재료공학과, \*명지대학교 무기재료공학과, \*\*이주대학교 재료공학과  
(2000년 7월 26일 접수)

## Properties of YIG Thick Films Prepared by Screen-Printing

Tae-Kyung Lee, Joong-Hee Nam, Jae-Hee Oh, Jae-Chun Lee and Seung Chul Choi

Dept. of Ceramic Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

\*Dept. of Ceramic Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

\*\*Dept. of Materials Science and Engineering, Ajou University, Suwon 442-749, Korea

(Received July 26, 2000)

### 초 록

스크린 프린트법으로 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)용 YIG 후막을 제조하였고, YIG의 조성과 프린트 조건의 변화가 다결정  $Y_{3-x}Ca_xFe_{5-x}Zr_xO_{12}$ ( $x=0\sim 0.3$ ) 후막의 미세구조 및 자기적 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.  $Ca^{2+}$ 와  $Zr^{4+}$ 의 치환 첨가량이 0.2인  $Y_{2.8}Ca_{0.2}Fe_{4.8}Zr_{0.2}O_{12}$  조성의 paste로 제조된 YIG 후막의 경우, 포화 자화값이 최대를 나타내었으며, 강자성 공명 흡수선 폭은 최소를 나타내었다. 또한, YIG 후막의 두께 및 소결 유지시간 등의 제조조건을 제어함에 따라 치밀화 및 자기 특성이 향상됨을 확인할 수 있었다.

### ABSTRACT

YIG thick film, which has been used as material for MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit), was prepared by screen printing method. It was investigated the effect of the YIG compositions and printing condition on microstructure and magnetic properties of polycrystalline  $Y_{3-x}Ca_xFe_{5-x}Zr_xO_{12}$ ( $x=0\sim 0.3$ ) thick films. In case  $Ca^{2+}$  and  $Zr^{4+}$  components were substituted for  $x=0.2$ , saturation magnetization showed maximum value and ferromagnetic resonance line width showed the narrowest value. These properties were also improved by changing the thickness of YIG thick film and holding time for sintering.

**Key words :** Screen-printing, YIG thick films, Densification, Magnetic properties

### 1. 서 론

YIG(Yttrium Iron Garnet)는 가네트형 페라이트중의 하나로서 화학식은  $Y_3Fe_5O_{12}$ , 즉  $\{Y_3^{3+}\}[Fe_2^{3+}](Fe_3^{3+})O_{12}$ 의 구조식을 가지며, 결정자기이방성 에너지가 작기 때문에 고주파에서 손실이 작아 resonator, oscillator, isolator, circulator 등의 microwave 소자에 널리 이용되고 있다.<sup>1,2)</sup>

YIG는 현재 알려져 있는 microwave 자성재료 중에서도 가장 손실이 적은 재료이며, 비가역적 소자로서의 한계를 극복할 수 있다.<sup>1-3)</sup> YIG의 응용을 위한 재료의 형태로는 microwave 소자로 이용하는데 있어서 성능면에서 균일성이 뛰어난 단결정 YIG막이 유리하나, 단결정 YIG막을 성장시키기 위해서는 비자성 단결정 GGG(Gd-Ga garnet) 기판을 사용해야한다는 제한이 따른다. 따라서, oscillator와 같이 고품질의 단결정 박막이 필요한 부품을 제외한 isolator, circulator 등의 부품은 가능한 한 다결정 박막을 증착시켜 사용하려는 추세이다.<sup>4-7)</sup>

다결정 YIG 박막의 제법으로는 sputtering법과 sol-gel법

이 사용되고 있다. sputtering법에 의한 다결정 YIG 박막 제조시  $Y_3Fe_5O_{12}$  화학조성 성분들(Y, Fe, O)이 보여주는 sputtering yield가 서로 다르므로 박막의 화학조성이 타겟의 조성과 다르게 될 가능성이 높고, microwave용 소자로 이용하기 위하여 요구되어지는 수십  $\mu m$  정도의 두께를 얻기가 힘들다. Sol-gel법에 의한 박막 제조시 두께 증가를 위하여 코팅 횟수를 증가시키면 열처리 과정에서 유기물의 영향 등에 의한 균열이 발생하기 쉽고 재현성이 좋지 않기 때문에 산업화가 어렵다. 이와 같이 isolator, circulator 등의 마이크로 소자용 다결정 YIG 박막으로 사용하기 위해서는 수십  $\mu m$  두께가 요구되며, sol-gel법과 sputtering법 등 기존의 박막 제조 방법에 의해서는 이러한 요구조건을 만족시킬 수 없으므로 박막의 두께를 수십  $\mu m$  정도로 형성시키기 위해서는 후막 제조기술에 대한 연구 개발이 필요하다. Ferrite에 대한 후막 제조법으로는 tape casting 및 스크린 프린트법에 의한 soft ferrite 후막 제조에 관한 연구가 제한적으로 수행되고 있으나,<sup>8)</sup> 스크린 프린트법에 의한 다결정 YIG 후막성장 및 자기특성에 관한 연구와 후막을 microwave 소자

로 이용하기 위한 연구는 거의 전무한 실정이다.

본 연구에서는 제조 공정상 경제적이며 재현성이 높고 후막의 두께조절이 용이한 스크린 프린트법으로 alumina 기판 위에 수십  $\mu\text{m}$  정도의 다결정 YIG 후막을 제조하였으며, Ca와 Zr의 치환첨가제가 다결정 후막의 미세구조 및 자기적 특성에 미치는 영향 및 alumina 기판과 후막의 치밀화와의 상관관계 등을 검토하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 시편의 제조

본 연구에서는 YIG( $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ )에서  $\text{Y}^{3+}$  대신에  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  대신  $\text{Zr}^{4+}$ 를 치환 첨가시킨  $\text{Y}_{3-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_{5-x}\text{Zr}_x\text{O}_{12}$ ( $x=0\sim 0.3$ )를 기본 조성으로 선택하였다. 출발원료로는 고순도 시약급의  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ 를 사용하였으며, 습식 혼합한 후  $1000^\circ\text{C}$ 에서 2시간 하소하여 얻어진 단일상 분말을 40시간 동안 미분쇄한 후 유기 결합제를 혼합하여 paste(분말:유기결합제=60:40, in wt.%)를 제조하였다. 얻어진 paste로 alumina 기판에 스크린 프린트<sup>9,10</sup>한 후 충분히 건조하였다. 이 때 시편의 프린트 횟수는 3~10회로 변화시켰으며, 치밀화를 위하여 소결전  $500\text{ kg/cm}^2$ 의 압력으로 일축 가압 하였다. YIG green sheet는  $400^\circ\text{C}$ 에서 burn-out을 실시하였으며,  $1400^\circ\text{C}$ 의 소결온도에서 각각 2시간, 8시간 유지하는 조건으로 YIG 후막을 제조하였다.

### 2.2. 물성 측정 및 평가

스크린 프린트된 후막 green sheet의 burn-out 온도를 결정하기 위하여 TA Instrument SDT 1500을 사용하여  $50\sim 1200^\circ\text{C}$ 의 온도범위에서  $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 의 승온속도로 공기 중에서 열분석을 행하였다. 다결정 YIG 후막의 결정상 확인은 Philips PW 3719 X선 회절 분석기를 이용하였고, 후막의 두께 및 입자 크기와 형태는 주사전자현미경(SEM, S-4200 Hitachi)을 이용하여 관찰하였다. 또한, 다결정 YIG 후막의 자기적 특성을 고찰하기 위하여 포화자화( $4\pi M_s$ )는 1660 signal processor model의 VSM (Torque/Vibrating Sample Magnetometer)을 사용하여 인가자장 3 kO에서 측정하였고, 강자성 공명 흡수선 폭( $\Delta H$ )은 Bruker ESP 300 series의 ESR(Electron Spin Resonance) spectrometer를 사용하여 측정하였으며 주파수는 X-band 범위인 9.3 GHz에서 측정하였다. EDX(Energy dispersive X-ray) 분석을 통하여 소결 조건에 따른 alumina 기판으로부터의  $\text{Al}^{3+}$  확산 영향을 검토하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. YIG green sheet의 burn-out 온도 결정

후막 제조를 위한 paste를 제조하는데 있어서 유기물은 일

반적으로 유기용매, 유기바인더와 첨가제인 가소제, 분산제 등으로 구성된다. 본 연구의 유기용매로는 휘발온도가 높고 용해력이 큰  $\alpha$ -Terpineol를 사용하였고, 유기바인더는  $\alpha$ -Terpineol에 잘 용해되고 인쇄성이 우수한 것으로 알려진 ethyl cellulose을 사용하였다.<sup>11</sup> 또한, 첨가제인 분산제와 가소제로는 각각 Disperbyk와 Polyethylen Glycol(PEG)+Di-n-butyl Phthalate(DBP)을 사용하였으며, 유기물의 조성 함량은 Table 1에 나타내었다.

일반적으로 후막 제조 공정에서의 burn-out은 green sheet 내에 존재하는 유기물이 완전히 제거되는 온도까지 서서히 승온하면서 바인더 성분을 제거하는 과정을 말한다.<sup>12</sup> 이러한 burn-out 과정은 유기물을 많이 함유한 paste를 사용하여 후막을 제조하는데 있어서 필수적으로 거쳐야 하는 단계로서 후막의 특성에 크게 영향을 미친다. 본 실험에서 제조한 시편의 green sheet는 상당한 유기물을 포함하고 있으므로 소결한 후막의 특성은 burn-out 조건에 영향을 받게 된다. 따라서 스크린 프린트 후의 유기물 성분을 제거하기 위한 burn-out 온도를 결정하기 위하여 열분석(TG-DTA)을 행하였으며 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

열분석 결과로부터 알 수 있듯이, 온도 상승에 따른 paste의 무게감량이 약  $350^\circ\text{C}$ 까지 진행되는 것으로 보아, 이 온도에서 후막 green sheet내의 유기물질이 모두 분해되어 제

Table 1. Constituents of Paste

Solvent	$\alpha$ -Terpineol	85 wt.%	40 wt.%
Binder	Ethylcellulose	7 wt.%	
Dispersant	Disperbyk-182	2 wt.%	
Plasticizer	PEG + DBP(1:1)	6 wt.%	
Powder	YIG		60 wt.%

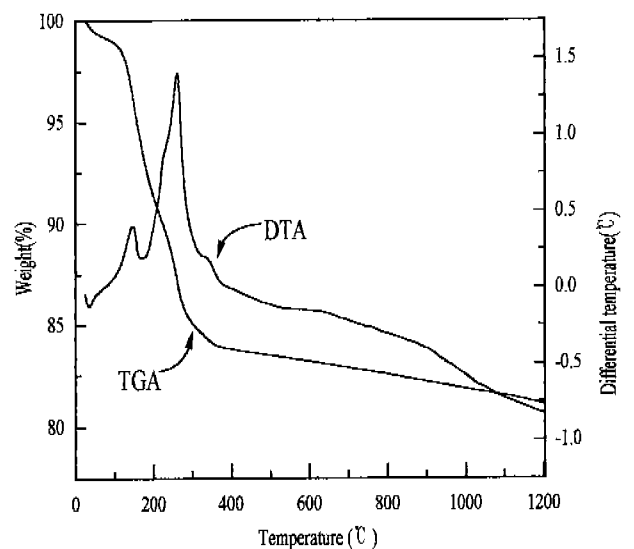


Fig. 1. Thermal analysis (TG-DTA) curve of paste with composition of YIG.

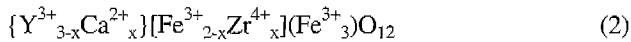
거품을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 유기물의 완전한 분해를 위해 승온 속도는 0.5°C/min으로 하여 400°C에서 10시간 동안 burn-out을 행하였으며, 유기바인더 분해시 발생하는 gas의 잔류로 인한 pore의 형성을 최소화하도록 하였다.

### 3.2. 스크린 프린트법으로 제조한 다결정 YIG 후막의 특성

#### 3.2.1. 조성에 따른 다결정 YIG 후막의 특성 변화

$Y_{3-x}Ca_xFe_{5-x}Zr_xO_{12}$  ( $x=0\sim 0.3$ ) 조성의 paste로 4회 프린트한 후 후막의 치밀화를 위해 500 kg/cm<sup>2</sup> 압력으로 일축 가압하였으며, 가압 후 1400°C에서 8시간 소결한 시편의 포화자화와 강자성 공명 흡수선 폭의 측정 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

포화자화는 Ca<sup>2+</sup>와 Zr<sup>4+</sup>의 치환첨가량(x)이 0.2 부근까지 증가하다가 그 이상에서는 감소하였다. Winkler<sup>15)</sup>에 의하면 YIG 결정 구조에 대한 일반적인 이온분포 식은 아래의 식(1)과 같이 나타내어질 수 있으며, Y<sup>3+</sup>와 Fe<sup>3+</sup> 자리에 각각 Ca<sup>2+</sup>와 Zr<sup>4+</sup>가 치환된 경우 식(2)과 같이 주어질 수 있다.



Zr<sup>4+</sup>은 8면체 배위에 강한 위치 선택성을 가지므로,<sup>13)</sup> 8면체 배위의 Fe<sup>3+</sup> 위치에 치환되어 전체적인 자기모멘트를 증가시키기 때문에 x=0.2 일 때 가장 큰 포화자화 값을 갖게 되는 것이라 생각된다. 즉, YIG의 경우 십이면체 자리(dodecahedral site)에 자기모멘트를 갖지 않는 Y<sup>3+</sup> 이온이

존재하며, 팔면체 자리와 사면체 자리에 약 5 μ<sub>B</sub>의 자기모멘트를 갖는 Fe<sup>3+</sup> 이온이 2:3의 비율로 점유하게 된다.<sup>16)</sup> 이때 팔면체 자리와 사면체 자리의 자기모멘트는 초교환 상호작용에 의해 서로 반대방향을 유지하며, 따라서 전체적인 자기모멘트는 이들의 상쇄작용 결과 잔존하는 자기모멘트의 차이로 나타나게 된다. 한편, Ca와 Zr이 치환 첨가될 경우 이온반경이 큰 Ca<sup>2+</sup>(0.112 nm ; CN=8)는 십이면체 자리를 점유하고 Zr<sup>4+</sup>(0.072 nm ; CN=6)는 팔면체 자리에 우선적으로 위치하게 된다.<sup>17)</sup> 따라서, 치환첨가량이 증가할수록 팔면체 자리와 사면체 자리의 자기모멘트 차이가 커지므로 전체적인 포화 자화값은 증가하는 경향이었으며, x=0.2 이상의 조성에서는 비자성 이온의 양이 증가함에 따라 포화자화값은 감소하는 것으로 판단된다.

한편, Fig. 2의 YIG 후막 조성변화에 따른 강자성 공명 흡수선 폭의 측정 결과를 보면, x=0.2 조성에서 가장 낮은 값을 갖는 경향이었고, 그 이외의 조성에서는 증가함을 확인할 수 있었다. 일반적으로 다결정 페라이트의 강자성 공명 흡수선 폭(ΔH)에 영향을 주는 요소는 스핀간의 상호작용 효과에 의한 고유 선 폭(ΔH<sub>int</sub>)과 자기이방성에 의한 선 폭(ΔH<sub>p</sub>), 시편 표면 거칠기에 의한 선 폭(ΔH<sub>s</sub>) 등이 있다.<sup>18)</sup> 다결정 페라이트는 자기이방성을 갖는 수많은 미세 단결정 입자들이 무질서하게 분포하고 있는 것이므로, 외부 자기장에 대하여 입자들이 서로 다른 공명 흡수선의 이동 현상을 나타낸 결과 ΔH 값이 증가하게 된다. 이러한 자기이방성 변화의 영향을 받아 증가된 ΔH<sub>a</sub>는 식(3)과 같이 표현될 수 있다.<sup>19,20)</sup>

$$\Delta H_a = 2.07 \frac{H_a^2}{4\pi M_s} \quad (3)$$

여기서, 이방성 자기장  $H_a = 2|K_u|/M_s$ 이므로 M<sub>s</sub> 값이 증가하면 ΔH<sub>a</sub>는 1/M<sub>s</sub><sup>3</sup>에 비례하여 감소함을 알 수 있다.

#### 3.2.2. 프린트 횟수의 증가에 따른 다결정 YIG 후막의 특성 변화

YIG를 isolator나 circulator등의 microwave용 소자로 사용하기 위해서는 수십 μm 정도 이상의 두께가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 포화 자화값이 가장 크고 강자성 공명 흡수선 폭이 가장 좁은 Ca<sup>2+</sup>와 Zr<sup>4+</sup> 성분의 치환첨가량(x)을 0.2로 고정한 후 다결정 YIG 후막의 두께에 증가에 따른 미세 구조 변화 및 자기적 특성을 고찰하였다.

Fig. 3은 1400°C에서 8시간 소결한 YIG 후막 시편의 두께 증가에 따른 파단면의 SEM 관찰 결과를 나타낸 것이다. 프린트 횟수가 증가함에 따라서 후막의 두께는 비례적으로 증가하여, 10회 프린트 한 다결정 YIG 후막의 두께는 약 80 μm 정도가 되었다. 또한, 후막 두께의 증가에 따라 치밀화 됨을 알 수 있었다. 이는 후막의 두께가 증가함에 따라서 YIG 결정구조내의 4면체 혹은 8면체 부격자점을 점유하고 있는 Fe<sup>3+</sup> 이온과 Al<sup>3+</sup> 이온과의 상호 확산량 감소에

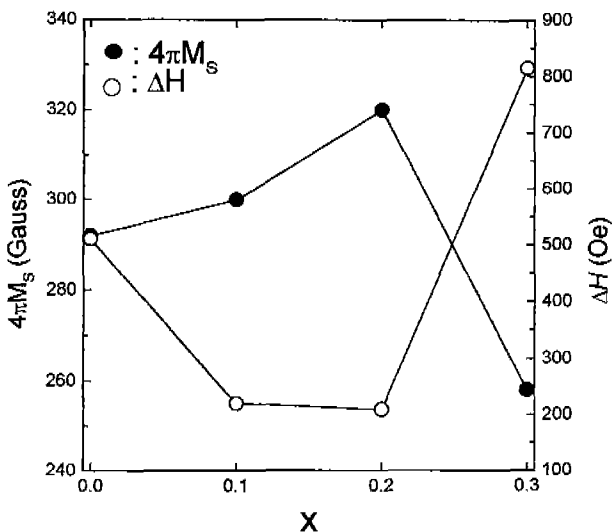


Fig. 2. Saturation magnetization(4πM<sub>s</sub>) and ferromagnetic line width(ΔH) of Y<sub>3-x</sub>Ca<sub>x</sub>Fe<sub>5-x</sub>Zr<sub>x</sub>O<sub>12</sub> (x=0~0.3) thick film sintered at 1400°C for 8 h.

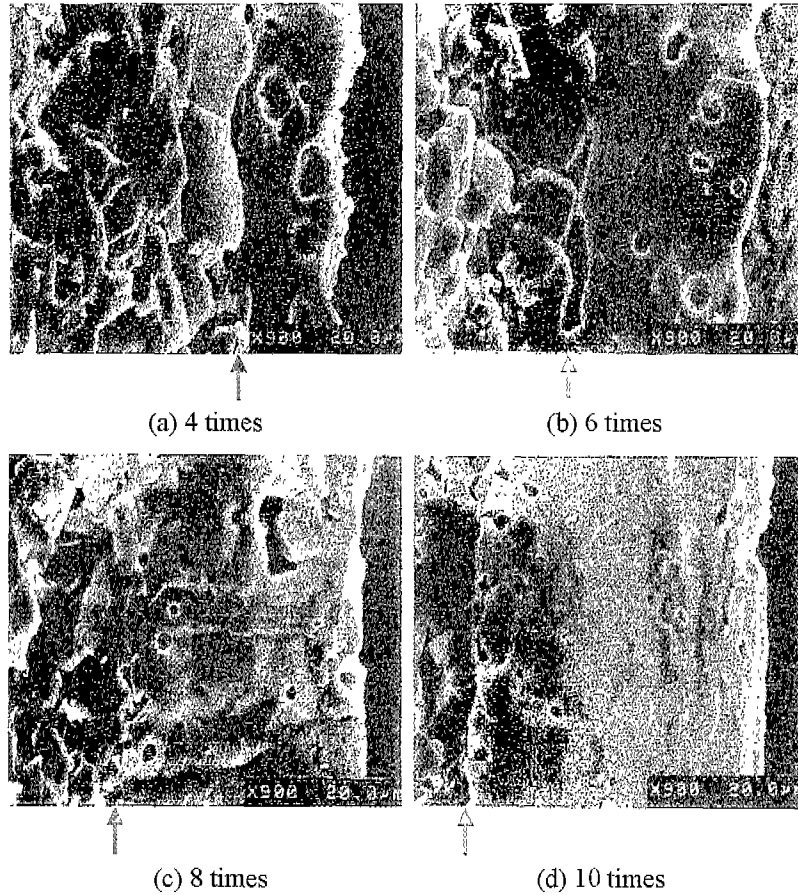


Fig. 3. SEM micrographs of  $Y_{2.8}Ca_{0.2}Fe_{4.8}Zr_{0.2}O_{12}$  thick film sintered at  $1400^{\circ}C$  for 8 h in air with printing times (scale bar, — :  $20\ \mu m$  / → : interface between alumina substrate and YIG thick film).

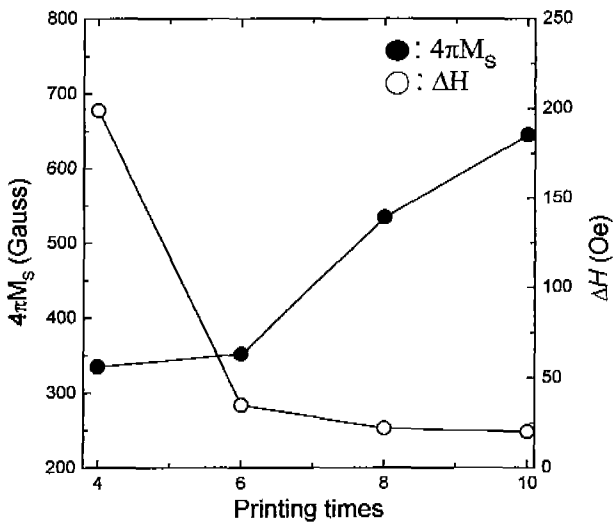


Fig. 4. Saturation magnetization( $4\pi M_s$ ) and ferromagnetic resonance line width( $\Delta H$ ) of  $Y_{2.8}Ca_{0.2}Fe_{4.8}Zr_{0.2}O_{12}$  thick film sintered at  $1400^{\circ}C$  for 8 h in air with printing times.

기인한 것이라 판단된다.

Fig. 4는  $1400^{\circ}C$ 에서 8시간 소결한 YIG 후막 시편의 프

린트 횟수의 변화에 따른 포화 자화 및 강자성 공명 흡수선 폭의 측정 결과를 나타내었다. 프린트 횟수가 증가함에 따라서 포화 자화는 증가하였고, 강자성 공명 흡수선 폭은 좁게 나타났다. 일반적으로 YIG에  $Al^{3+}$ 이 치환 첨가되면 포화 자화는 감소하고 강자성 공명 흡수선 폭이 증가하는 보고가 있는데,<sup>21)</sup> Fig. 4의 결과는 Fig. 3에도 나타낸 바와 같이, 후막의 두께가 증가함에 따라서 치밀화 되며, alumina 기판으로부터 다결정 YIG 후막 표면까지의  $Al^{3+}$  이온 확산량이 상대적으로 감소하는 것으로부터 기인한다고 생각된다. 한편, Fig. 5는  $1400^{\circ}C$ 에서 8시간 소결한 다결정 YIG 후막과 기판과의 경계부근과 후막의 표면에 대하여 EDX 분석결과를 나타낸 것인데, 후막과 기판의 경계부근에서는  $Al^{3+}$ 의 함량이 후막 표면부근에서보다 상대적으로 많은 양이 검출됨을 알 수 있었다. 즉, Fig. 5의 결과로부터 포화 자화의 증가 및 강자성 공명 흡수선 폭의 감소 등과 같은 자기 특성이 향상되는 경향을 설명할 수 있다고 판단한다.

### 3.2.3. 소결 유지시간 변화에 따른 다결정 YIG 후막의 특성변화

다결정 YIG 후막에 있어서 alumina 기판으로부터 확산되

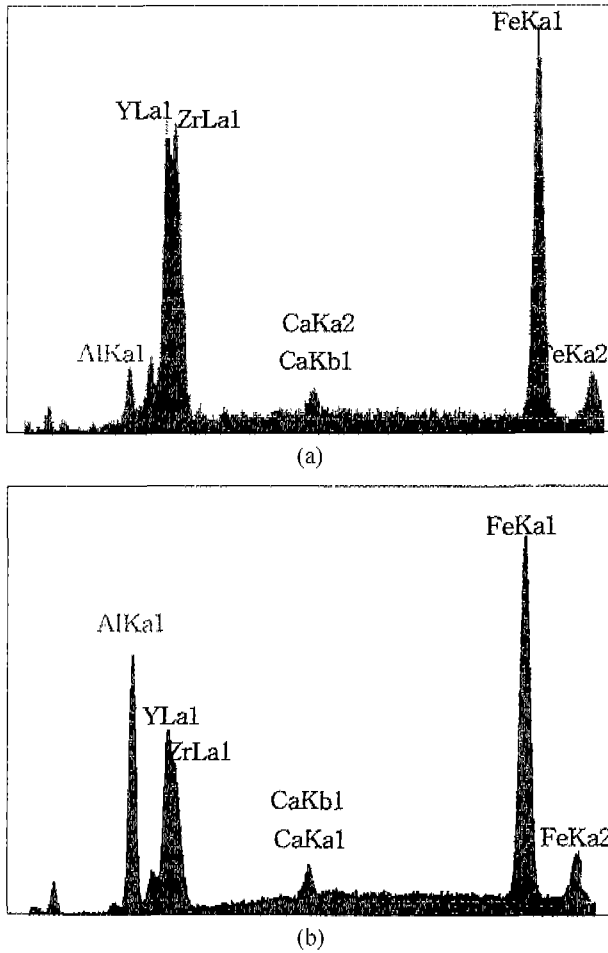


Fig. 5. EDX analysis of  $Y_{2.8}Ca_{0.2}Fe_{4.8}Zr_{0.2}O_{12}$  thick film sintered at  $1400^{\circ}C$  for 8 h in air (printing times=10); (a) free surface of YIG thick film, (b) contacted region of alumina substrate.

는  $Al^{3+}$  성분과 YIG 조성의  $Fe_2O_3$ 로부터 확산되는  $Fe^{3+}$  성분의 소결 유지시간에 따른 상호확산 현상을 검토하기 위해, 소결 온도는  $1400^{\circ}C$ 로 고정하고 소결 유지시간을 2시간과 8시간으로 각각 변화시켰을 때의 EDX line profile 분석결과를 Fig. 6에 나타내었다.

즉, 후막의 두께가 증가하고 소결 유지시간이 감소함에 따라 alumina 기판으로부터의  $Al^{3+}$  성분의 확산량이 감소함을 알 수 있었으며, 다음과 같이 식(4)의 Kirkendal effect<sup>22)</sup>에 의한 소결 유지시간과 확산거리와의 관계식에 의해서도  $Al^{3+}$  확산량의 감소를 예측할 수 있다.

$$\frac{X_1^2}{X_2^2} = \frac{t_1}{t_2} \quad (4)$$

여기서, X는 확산거리이고, t는 소결 유지시간이다. 즉, 식(4)를 보면, 확산거리는 소결 유지시간의 1/2승에 비례한다는 것을 알 수 있으므로, Fig. 6의 결과와 같이, 소결 유지시간

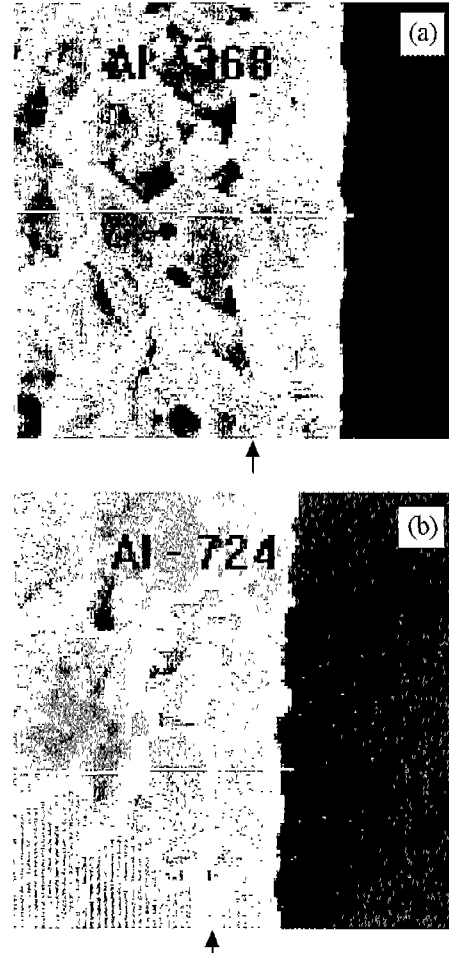


Fig. 6. EDX line profile of  $Y_{2.8}Ca_{0.2}Fe_{4.8}Zr_{0.2}O_{12}$  thick film sintered at  $1400^{\circ}C$  in air with holding time of (a) 2 h and (b) 8 h. (  $\rightarrow$  : interface between alumina substrate and YIG thick film).

이 감소할수록  $Al^{3+}$  확산 거리가 감소하는 경향임을 확인할 수 있었다.

한편, Fig. 7에 나타낸 바와 같이, 소결 유지시간이 2시간과 8시간일 때  $1400^{\circ}C$ 에서 소결한 다결정 YIG 후막의 프린트 횟수에 따른 포화 자화의 변화를 보면, 10회 프린트한 시편을  $1400^{\circ}C$ 에서 8시간 소결한 시편의 포화 자화값(약 645 Gauss)이 2시간 소결한 시편의 경우(약 805 Gauss)보다 감소하였음을 알 수 있었다. 이는 소결 유지시간이 적을수록  $Al^{3+}$  이온의 확산 정도가 상대적으로 감소함에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 7의 결과로부터 소결 시간이 2시간일 경우, 상대적으로 8시간인 경우보다  $Al^{3+}$  확산에 의한 자기적 특성의 열화를 최소화할 수 있음을 확인하였으므로, 2시간 소결한 경우에 대한 YIG 후막의 미세구조 및 자기 특성에 대하여 검토하였다. Fig. 8은  $1400^{\circ}C$ 에서 2시간 소결한 경우의 평균 입자 크기를 측정된 결과를 나타낸 것이다.

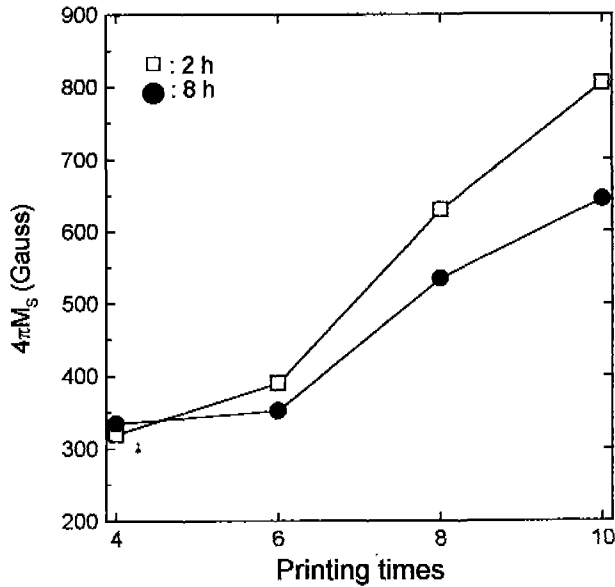


Fig. 7. Saturation magnetization( $4\pi M_s$ ) of  $Y_{2.8}Ca_{0.2}Fe_{4.8}Zr_{0.2}O_{12}$  thick film sintered at  $1400^\circ C$  in air for 2 h and 8 h with printing times.

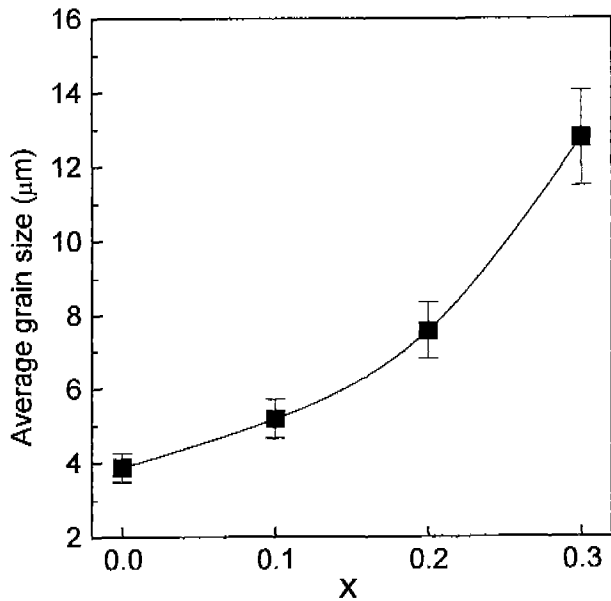


Fig. 8. Average grain sizes of  $Y_{3-x}Ca_xFe_{5-x}Zr_xO_{12}/Al_2O_3$  ( $x=0-0.3$ ) thick films with substitution content(x) sintered at  $1400^\circ C$  for 2 h in air.

Ca와 Zr의 치환첨가량이 증가함에 따라 입자 크기가 현저하게 증가하는 경향을 보임을 알 수 있는데, 이는 CaO와  $Fe_2O_3$ 가  $1200^\circ C$  이상에서 액상을 형성하여 소결 과정 중에 입자 성장을 촉진시키는 역할을 했기 때문인 것으로 추측된다.

따라서, YIG 후막의 소결 과정에서 기판으로부터 확산 현상에 대한 고찰을 위해 TEM 분석을 하였으며 그 결과를

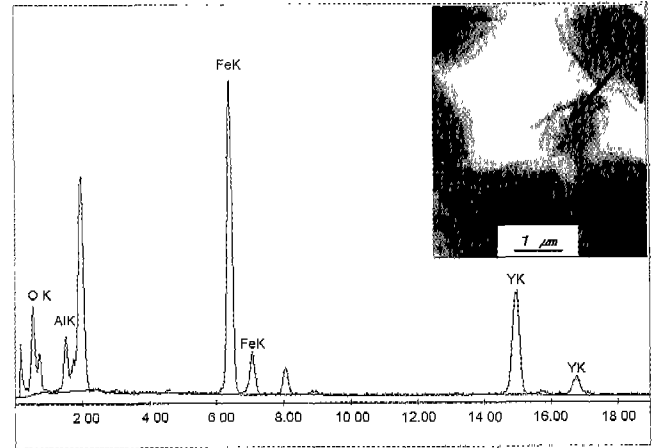


Fig. 9. TEM micrograph and EDS analysis of  $Y_3Fe_5O_{12}/Al_2O_3$  thick film sintered at  $1400^\circ C$  for 2 h in air.

Fig. 9에 나타내었다. TEM에 의한 미세 구조 관찰 및 EDS 분석 결과로부터도 알 수 있듯이, 후막의 결정 입자 내에  $Al^{3+}$ 이 존재함을 알 수 있었는데, 이는 소결 과정에서 기판으로부터 확산되었음을 명확하게 보여주는 결과라고 할 수 있다. 즉, 상대적으로 소결 시간이 감소되어도 소결 과정 중에 발생하는 기판으로부터의  $Al^{3+}$  확산은 불가피한 것으로 판단되며, 더구나  $Al^{3+}$ 가 치환된 YIG 조성에서도 결정구조에는 변화 없으므로 쉽게 후막 층 내부로 확산되었을 것으로 추측한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 스크린 프린트법을 사용하여 다결정 YIG 후막을 제조하였다. 특히, 스크린 프린트 제조조건 및 green sheet의 소결 조건, alumina 기판 등이 YIG 후막의 미세구조와 자기 특성 변화에 미치는 영향에 대하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 다결정 YIG 후막의 제조시 green sheet의 유기물질은 약  $350^\circ C$ 에서 모두 분해되어 제거됨을 알 수 있었다.
2. 다결정 YIG 후막의 치밀화를 위하여 green sheet에 압력을 가한 경우 충전성 향상에 기인하여 소결 밀도와 포화 자화가 증가하였으며 강자성 공명 흡수선 폭은 좁게 나타났다.
3. 다결정 YIG 후막의 두께 증가와 소결 유지 시간의 감소시켰을 경우 alumina 기판으로부터의  $Al^{3+}$  확산량 감소에 기인하여 자기적 특성이 향상됨을 알 수 있었다.
4.  $1400^\circ C$ 에서 2시간 소결한  $Y_{3-x}Ca_xFe_{5-x}Zr_xO_{12}$  후막의 경우, 치환첨가량의 증가에 따라 입자 크기는 현저하게 증가하였으며,  $x=0.2$ 의 조성에서 가장 높은 포화 자화값을 나타냈고, 강자성 흡수선 폭의 변화는 가장 적었음을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 1999년도 한국과학재단 특정기초연구(1999-1-301-005-5)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

1. S. Geller and M. A. Gilleo, "Structure and Ferrimagnetism of Yttrium and Rare-earth Iron Garnet," *Acta Crystallogr.*, **10**, 239~243 (1957).
2. 朴麒洙, 朴漢奎, 超高周波工學, pp. 5~29, 青文閣, 1986.
3. T. Shinohara, "Study on Densification Mechanism of Ca-V Substituted YIG," *Proc. of ICF 3*, 812~814 (1980).
4. J. W. Nielsen and E. F. Dearborn, "Growth of Single Crystals of Magnetic Garnets," *J. Phys. Chem. solid.*, **5**, 202~207 (1958).
5. I. Bahl, *Microwave Solid State Circuit Design*, pp. 325~348, John Wiley & Sons Inc., 1988.
6. Y. Konishi, *Microwave Integrated Circuit*, pp. 550, Marcel Dekker Inc., 1991.
7. 櫻井良文編, 磁氣工學講座 7 光 마이크로波磁氣工學, pp. 270, 丸善, 1976.
8. C. K. Maiti, D. Bhattacharya and N. B. Chakrabarti, "Thick-Film Ferrimagnetic Paste Using Lithium Ferrite," *IEEE Trans., Comp.*, No. 1, 221~227 (1985).
9. P. J. Holmes and R. G. Loasby, *Handbook of Thick Film Technology*, pp.50~89, *Electrochemical Publications*, 1976.
10. M. R. Haskad, *Thick-Film Hybrids*, pp. 15~30, Prentice Hall Co., 1986.
11. T. C. Patton, *Flow and Pigment Dispersion*, pp.285, Wiley-Interscience Publication, 1987.
12. 김수면, "NiCuZn Ferrite Chip Bead의 제조 및 특성에 관한연구," 석사학위논문, 인하대학교 (1995).
13. E. P. Wohlfarth, *Ferromagnetic Materials*. Vol. 2, pp.271~273, North-Holland Publishing Co., 1980.
14. 平賀貞太郎, 奥谷克伸, 尾島輝彦, *자성재료세라믹스*, pp. 204~210, 반도출판사, 1986.
15. G. Winker and P. Hansem, "Calcium-vanadium-indium Substituted Yttrium Iron Garnet with very Low Linewidth of Ferrimagnetic Resonance," *J. Apply. Phys.*, **4**, 825~883 (1969).
16. V. R. Murthy, S. Sundaram and B. Viswanathan, *Microwave Materials*, pp. 164~173, Narosa Publishing House, 1994.
17. S. Geller, "Magnetic Interactions and Distribution of Ions in the Garnets," *J. Appl. Phys.*, **31**(5), 30S~37S (1960).
18. G. Winker, "Substituted Polycrystalline YIG with Very-Low Ferrimagnetic Resonance Linewidth and Optical Transparency," *INTERMAG Conf.*, 773~773 (1971).
19. E. Schl mann, "Spin Wave Analysis of Ferromagnetic Resonance in Polycrystalline Ferrites," *J. Phys. Chem. Solids*, **6**(2-3), 242~256 (1958).
20. C. R. Buffler, "Ferromagnetic Resonance near the Upper Limit of the Spin Wave Manifold," *J. Appl. Phys.*, **30**(4), 172S~175S (1959).
21. Wilhelm H. Von Aulock. *Handbook of Microwave Ferrite Materials*, pp. 65~69, Academic Press, 1956.
22. Paul Shewnon, *Diffusion in Solid*, pp. 131~133, Publication of The Mineral, Metals & Materials Society, 1989.