≪연구논문≫ Journal of The Korean Magnetics Society, Volume 8, Number 6, December 1998

Sol-Gel 법에 의한 $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}(0.0 \leq X \leq 1.0)$ 분말과 박막의 합성 및 자기적 특성에 관한 연구

엄영랑 · 김철성
국민대학교 자연과학대학 물리학과
서울 성북구 정릉동 861, 136-702

임연수
한국 원자력 연구소
대전시 유성구 덕진동 150, 305-600

이재광
건국대학교 자연과학대학 응용물리학과
충북 충주시 단월동 322, 380-701

(1998년 9월 12일 받음, 1998년 12월 3일 최종수정본 받음)

Sol-gel 법을 이용하여 합성한 자성 garnet $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ ($x = 0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$) 분말과 박막의 결정 및 자기적 성질에 관하여 X-선 회절기, atomic force microscopy(AFM), scanning electron microscopy(SEM), 진동시료자화기 (VSM)와 Mössbauer 분광기를 이용하여 연구하였다. X-선 회절분석 결과와 Mössbauer분광 실험으로 부터 1000 °C에서 열처리한 $x = 0.75$ 이하의 $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ 분말의 경우 모두 순수한 cubic의 garnet 구조가 형성되었음을 확인할 수 있었으나, $x = 1.0$인 경우는 $LaFeO_3$상이 함께 관측되었다. Garnet 박막의 성장을 위하여 750 °C에서 2시간의 열처리로 결정화를 이루었으며, 성장한 박막은 특정한 방향성 없이 성장하였음을 알 수 있었다. Mössbauer 분광기를 이용하여 측정한 결과는 산화물을 통하여 제조한 garnet 분말의 Mössbauer spectrum과 일치함을 알 수 있었다. 전자현미경의 측정을 통한 분말의 입자크기는 200~300 nm이며, AFM의 측정으로부터 박막의 평균 표면 거칠기가 3.17 nm임을 알 수 있었다. 진동시료자화기를 이용하여 측정한 garnet 분말과 박막의 자기적 특성은 전형적인 연자성의 자기적 속성을 가지며, garnet 분말의 경우 최대 포화자화 (30 emu/g)와 최소 보자력 (52 Oe)을 가짐을 알 수 있었다. 800 °C에서 열처리한 순수한 garnet 박막시료의 경우 수직 및 수평방향으로 측정한 자화곡선은 수직방향으로 측정한 자화곡선이 낮은 포화자화를 가지며 보자력은 양방향 모두 37 Oe를 나타냈다.

I. 서 론

자성 garnet $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG)는 초단파를 사용하는 전자소자와 bubble 모양의 자구를 이용한 자기저장에 널리 사용되고 있다. 우수한 마이크로파의 특성과 미세한 자기장에도 반응하는 자기적 특성을 응용한 초단파 소자 및 자기센서로의 응용을 위해 garnet시료의 제조방법과 전자기적 성질에 관한 많은 연구가 수행되어 왔다[1-4]. $Y_3Fe_5O_{12}$의 결정구조는 cubic이며 space group은 O_h^{10}-Ia3d에 속하며 garnet을 구성하는 철의 분포는 다른 페라이트와 달리 일정한 위치에만 분포하므로 자성연구에 매우 적합하다. Garnet의 unit cell은 16(a)과 24(d) site내 Fe^{3+}이온과 24(c) site내 R^{3+}이온의 spin이 역방향이므로 24(c) site에 치환된 원소에 따라 포화자화(M_s)의 크기가 영향을 받는다. 그러므로 24(c) site에 희토류 이온 중, 이온 반경이 큰 원소가 자리하면 M_s 값이 감소하는 특성은 부격자의 이온 치환에 따라 자기 질서를 변화시키면서 전자기적 특성의 변화를 줄 수 있는 장점을 지니고 있다[5-6]. 그러나, La은 희토류 원소이면서 4f에 전자가 차 있지 않으며 $5d^16s^2$의 최외각 전자를 가지므로 $4d^15s^2$의 최외각 전자를 갖는 Y과 매우 유사하다. Garnet의 제조에는 산화물을 이용한 세라믹스 방식이 주로 이용되고 있으며, $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$의 Y 자리에 La을 $0.0 \leq x \leq 0.4$까지 치환할 경우 초단파 소자의 이용에 중요한 공명선폭이 La의 치환량이 증가할수록 감소하는 특징을 보인다[7]. 80년대 말 일본 연구팀에 의하여 소개된 sol-gel법은 세라믹스 방식의 경우 1350 °C 이상에서 합성이 가능하던 garnet 결정을

800 °C 이하의 저온 합성을 가능하게 하였다. 또한 sol-gel 법을 이용하는 경우에는 분말과 박막을 모두 합성하기에 용이한 장점이 있다[8-9].

본 연구에서는 garnet 입자와 박막의 물리적 및 자기적 성질에 관한 연구를 위하여 sol-gel 법을 사용하여 시료를 제조하였다. Garnet의 결정을 구성하는 Y의 자리에 La이 치환됨에 따라 발생하는 소결온도의 변화, garnet 구조 변화 및 자기적 특성 변화에 관한 연구를 위하여 X-선 분광기(XRD), 진동시료자화기(VSM) 및 Mössbauer 분광기를 이용하여 실험하였다. 박막의 결정을 확인하기 위하여 XRD와 박막의 균질성, 조성비의 분석 및 박막을 구성하는 입자크기의 측정을 atomic force microscopy(AFM), Rutherford back-scattering spectroscopy(RBS)와 scanning electron microscopy (SEM)를 이용하여 물리적 및 자기적 특성에 관한 실험을 실시하였다.

II. 실험사항

Garnet 분말과 박막의 제작을 위하여 sol-gel 방법을 사용하였으며, 상세한 시료합성의 과정이 Fig. 1에 나타나 있다. 시료의 합성에 사용한 시약은 순도 99.9% 이상의 iron-nitrate($Fe(NO_3)_3\cdot 9H_2O$), yttrium-nitrate ($Y(NO_3)_3\cdot 6H_2O$) 및 lathanum-nitrate ($La(NO_3)_3\cdot 5H_2O$)를 적정한 비율로 ethylene glycol 용매에 녹여 80 °C의 온도에서 12시간 reflux하여 sol 상태의 용액을 제조하였다. Fig. 1에서와 같이 일부의 용액은 dry oven에서 110 °C의 온도로 가열후 분말시료 제작에 사용하였으며 일부의 용액은 박막의 제조에 사용하였다. 분말시료의 경우, 대기 중에서 500 °C 이상의 여러 온도에서 8시간 열처리하였으며, 박막시료의 제작을 위하여 준비된 sol 상태의 용액을 열산화한 SiO_2 기판 위에 4000 rpm의 속도로 30초간 spin-coating하여 300 °C에서 10분간 건조한 후, 일정 두께의 박막을 위하여 상기의 증착을 5회 반복하여 비정질 garnet 박막을 제작하였다. 결정화된 garnet 박막 제조를 위해 증착된 박막을 600부터 800 °C의 온도에서 2시간 열처리 하였다.

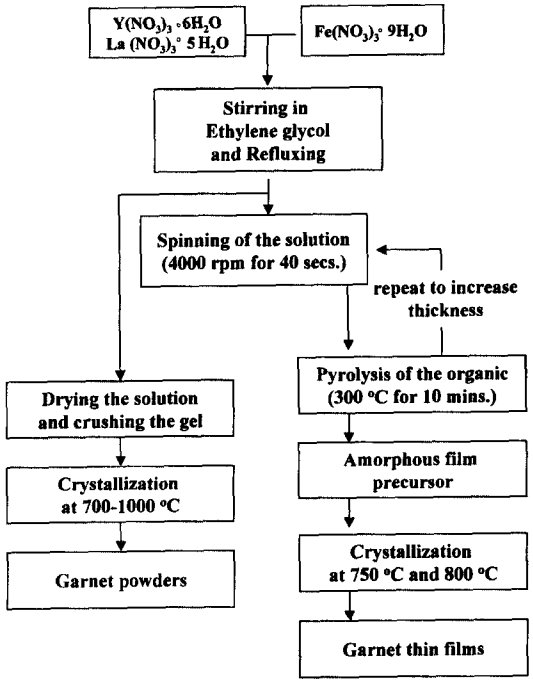

Fig. 1. Preparation process for $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ (x=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0).

열처리 온도와 조성변화에 따른 분말과 박막시료의 결정상태를 확인하기 위하여 Cu-K_α선을 사용하는 Philips사 X'Pert (PW1827) X-선 회절기를 이용하여 X-선 회절도를 취하였으며, scanning 속도를 매분당 0.25°로 하여 분해능을 증가시켰다. 분말의 입자크기와 박막 표면 거칠기의 측정을 위하여 SEM과 AFM을 사용하여 관측을 실시하였으며, 박막의 성분비를 측정하기 위하여 RBS 분석을 실시하였다. Mössbauer spectrum은 전기역학적 등가속도형 Mössbauer 분광기로 취하였으며, γ-선원은 Dupont 회사 제품의 Rh 금속에 들어있는 실온상태의 30 mCi ^{57}Co 단일 선원을 사용하였다[10]. 시료두께의 균질성과 열전도를 위해 전체 시료량을 40 mg으로 하여 두께 0.005인치 직경 1인치의 Be판을 양면에 막아서 사용하였다. 또한, 분말과 박막 시료의 자기적 특성측정을 위하여 VSM을 사용하였다. 측정은 실온에서 최대 15 kOe의 외부 자기장을 이용하여 자화곡선을 측정하였다.

III. 결과 및 분석

Fig. 2는 조성비에 따른 $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ 분말의 X-선 회절도를 나타내고 있다. Fig. 2에 의하면 La 치환량이 x = 0.75 이하의 경우에서는 1000 °C의 열처리로 단일상의 garnet 분말이 생성됨을 알 수 있었으며, 이러한 실험결과는 산화물을 이용하여 제작한 garnet 분말의

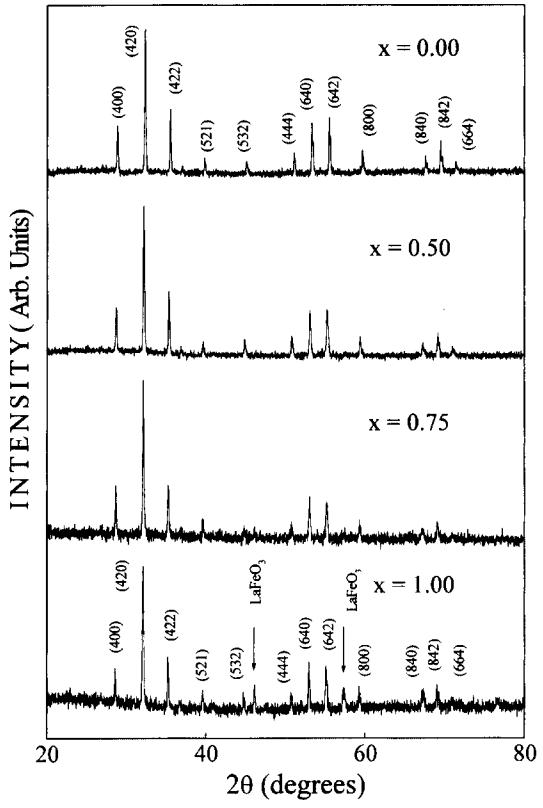

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ (x=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0) powders annealed at 1000 °C.

XRD 실험결과와 일치함을 알 수 있다[11]. 그러나, x = 1.0의 경우는 순수한 garnet에 의한 peak 외에 미량의 perovskite 구조에 의한 peak이 생성되었음을 보이고 있었다. Fig. 2의 화살표가 표시된 것은 perovskite 구조인 $LaFeO_3$에 의한 peak임을 확인하였다. $Y_3Fe_5O_{12}$의 경우는 900 °C의 열처리로부터 순수한 garnet 구조가 생성되었으나[12], Y보다 이온반경이 더 큰 La이 Y의 자리로 치환하는 경우에는 단일상의 garnet 생성을 위해서 이보다 더 높은 열처리 온도가 필요함을 알 수 있었다. $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$의 조성변화에 따른 단일상의 결정 구조와 열처리 온도의 변화에 관한 자세한 실험결과가 Fig. 3에 도식화 되어 있다. La이 치환되는 경우, 열처리 온도가 900 °C 이하에서는 주로 garnet에 의한 peak와 일부 α-Fe_2O_3에 의한 peak이 동시에 존재함을 XRD 실험으로 알 수 있었다. 기존의 산화물을 이용한 세라믹스 제조방법의 연구결과에 의하면 La이 Y에 치환될 경우, x=0.4까지 단일상이 생성되며 La의 치환량이 이보다 많은 경우에서는 단일상의 형성이 쉽

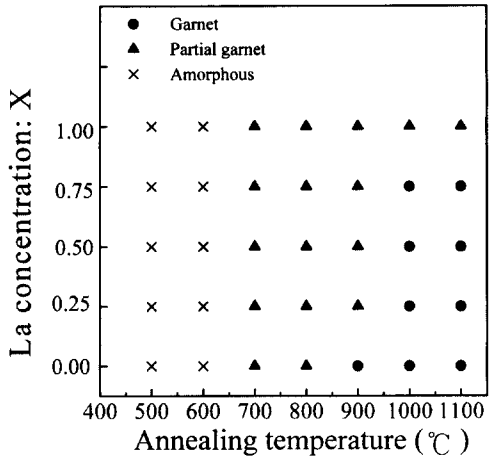

Fig. 3. Crystallographic phase of $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ as a function of the La content and annealing temperatures.

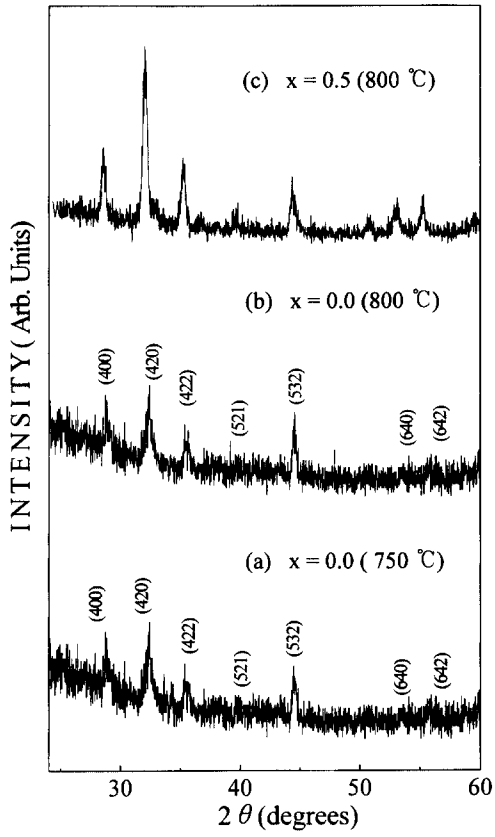

Fig. 4. X-ray diffraction patterns of thin $Y_3Fe_5O_{12}$ films annealed at (a) 750 °C and (b) 800 °C and (c) those of $Y_{2.5}La_{0.5}Fe_5O_{12}$ film fired at 800 °C.

지 않음이 알려져 있다[13]. 그러나 본 연구에서는 sol-gel 방법을 이용하여 garnet 분말 합성시 La 치환량이

x=0.75인 $Y_{2.25}La_{0.75}Fe_5O_{12}$ 시료의 경우에서도 상대적으로 낮은 열처리 온도 (1000 °C)에서 단일상의 결정구조를 가지는 분말을 얻을 수 있었다. Fig. 3에서와 같이 Y^{3+}에 비하여 이온 반경이 매우 큰 La^{3+}이온이 Y자리에 x = 1로 치환될 경우에는 순수한 garnet 구조의 분말을 얻지 못하였으며 이를 위해서는 1200 °C 이상의 더 높은 열처리가 필요함이 예측된다.

Spin-coating한 박막시료의 결정화를 위하여 750 °C의 온도에서 2시간 열처리한 $Y_3Fe_5O_{12}$와 $Y_{2.5}La_{0.5}Fe_5O_{12}$ 박막의 XRD 실험결과를 Fig. 4(a), (b), (c)에 나타내었다. 이들 박막의 XRD 실험결과로 750 °C이상에서 2시간 열처리 후에는 단일상의 garnet 박막이 생성되었음을 알 수 있었다. 박막 실험결과로부터 박막의 제작을 위하여서는 750 °C 이상의 열처리가 필요함을 알 수 있었으며, 박막시료의 XRD의 peak이 분말의 실험결과와 같이 모든 면에의한 peak과 일치함으로 열산화한 Si 기판 위에 성장한 박막시료는 방향성이 없이 성장하였음을 나타내고 있다. 또한 박막시료의 경우에서는 La의 치환양에도 열처리 온도가 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

X-선 회절 실험결과 900 °C 이상에서 열처리한 $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) 분말시료와 La을 첨가하여 1000 °C 이상에서 열처리한 $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ (x=0.25, 0.5, 0.75) 분말시료들과 750 °C이상에서 열처리한 박막시료의 결정구조 모두 cubic임을 확인하였다. X-선 회절선에 Miller 지수를 붙인 후 얻은 격자상수 값을 최소자승법으로 맞추어서 구하였다. 본 실험을 통하여 얻은 격자상수는 $Y_3Fe_5O_{12}$의 경우 12.381 Å, $Y_{2.5}La_{0.5}Fe_5O_{12}$의 경우 12.415 Å임을 알 수 있었다. 이들 격자상수 값으로부터 이온반경이 더 큰 La^{3+}(1.14 Å)이 Y^{3+}(0.95 Å)에 치환되면서 garnet의 격자상수가 매우 크게 증가하였음을 알 수 있었다. 한편 박막의 조성비를 확인하기 위하여 RBS를 측정 하였으며 측정값이 simulation에 의한 이론값과 잘 일치 함으로 준비한 시료의 조성비가 모두 옳바름을 알 수 있었다. Fig. 5는 박막 $Y_{2.5}La_{0.5}Fe_5O_{12}$의 RBS 측정 spectrum을 나타내 보이고 있으며 정확한 조성비를 확인 하였다.

입자크기와 박막의 표면상태에 관한 측정을 위하여 SEM과 AFM의 실험을 수행하였다. Fig. 6(a)는 800

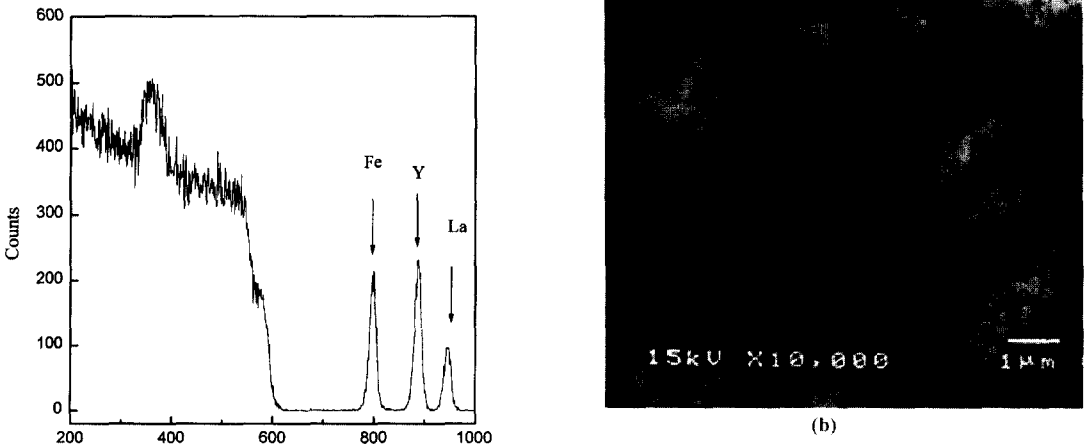

Fig. 5. RBS spectrum of $Y_{2.5}La_{0.5}Fe_5O_{12}$ film annealed at 800 °C.

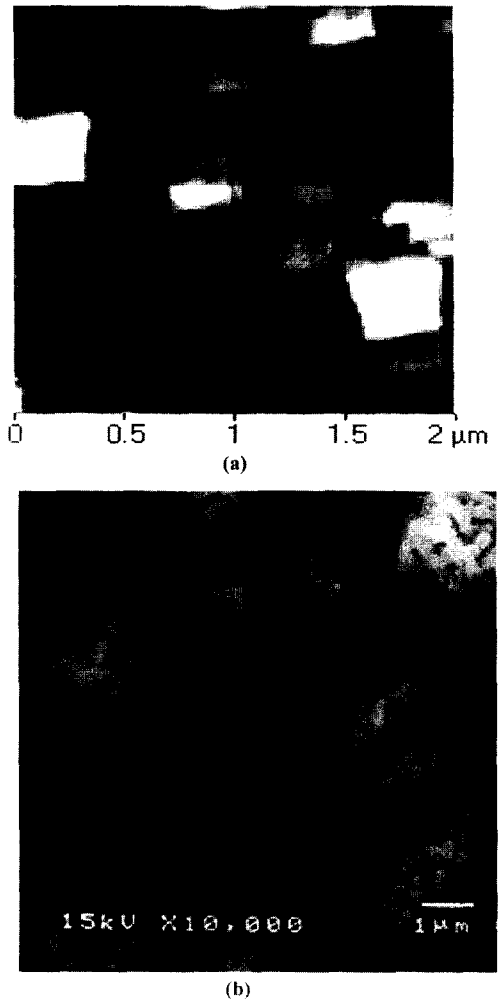

Fig. 6. (a) Atomic force microscopy image of a thin $Y_3Fe_5O_{12}$ film. (b) Scanning electron microscopy image of an $Y_3Fe_5O_{12}$ powder.

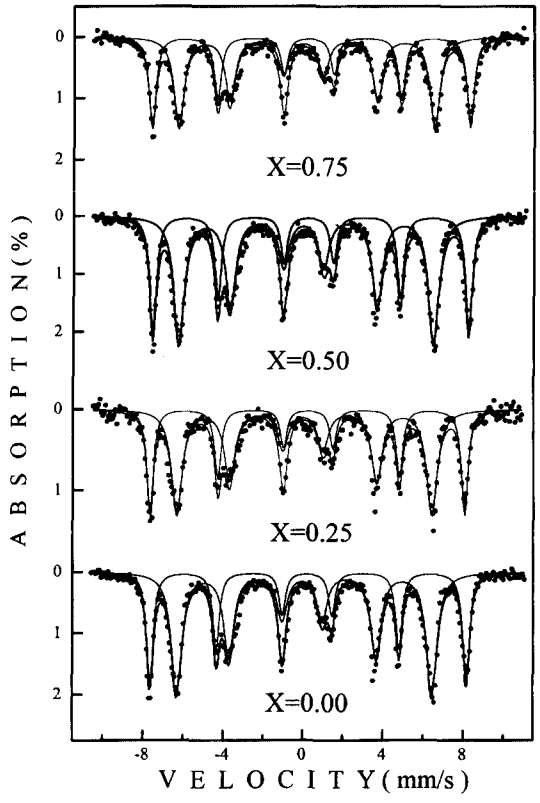

Fig. 7. Mössbauer spectra for $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ as a function of La concentration measured at room temperature.

°C에서 열처리한 $Y_3Fe_5O_{12}$ 박막시료의 AFM 측정 사진이며, Fig. 6(b)는 900 °C에서 열처리한 $Y_3Fe_5O_{12}$ 분말시료의 SEM 측정 사진이다. AFM 측정결과로 YIG 박막의 평균 거칠기는 3.17 nm였고, 입자의 크기는 300 nm임을 알 수 있었다. SEM 측정에 의하면 분말의 모양은 응집된 둥근모양을 이루고 있으며, 분말시료의 입자크기는 200~300nm로 낮은 온도에서도 상대적으로 큰 결정입자가 성장되었음을 알 수 있다. 이러한 분말시료의 모양은 P. Vaqueiro등의 실험 결과와 일치함을 알 수 있었다[14].

Fig. 7은 1000 °C에서 열처리한 $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ (x= 0.0, 0.25, 0.5, 0.75) 분말시료를 실온에서 측정한 Mössbauer spectrum을 나타내고 있으며 이들 spectrum은 전형적인 garnet 구조의 Mössbauer spectrum의 모양과 일치함을 알 수 있었다. 이 경우 La 첨가량이 x=0.75까지 치환되더라도 단일상의 garnet 구조를 가짐을 확인할 수 있었으며 또한 분말시료가 ferrimagnetic의 자기적 특성을 보이기에 충분한 입자크기를 가짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 XRD의 실험결과와 일치한다. Cubic $Y_3Fe_5O_{12}$ garnet은 O_h^{10}-Ia3d의 결정구조로 24(c), 16(a)와 24(d)의 세 site가 존재하지만 Fe는 16(a)와 24(d) site에만 존재하므로 이들 spectrum의 분석은 x= 0.75 이하의 경우는 2 set의 6 Lorenzian으로 분석하였다. Isomer shift 값은 16(a)-site인 경우 0.22~0.24 mm/s, 24(d)-site인 경우 0.02~0.06 mm/s를 나타내었다. 이 값은 상온에서 α-Fe에 대한 상대값으로 $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ (x= 0.0, 0.25, 0.5, 0.75) 시료들은 16(a)-site 및 24(d)-site 모두 Fe^{3+} 이온 상태임을 알 수 있었다. 그러나, Mössbauer 분광실험로부터 x=1.0의 경우, garnet에의한 2 set의 6 Lorenzian 이외에 orthorhombic $LaFeO_3$의 흡수 spectrum이 존재함을 확인하였으며, 이러한 분석결과는 XRD의 second phase의 관측 결과와 일치함을 보이고 있다. $LaFeO_3$에 의한 초미세 자기장 크기는 520 kOe를 얻었다. 이들 Mössbauer spectrum들의 분석결과로부터 La의 치환양이 증가할수록 초미세 자기장 값이 작아짐을 확인할 수 있었으며 Table I에 이들 값을 제시 하였다.

1000 °C에서 열처리한 $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ (x=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0) 분말시료의 조성비 변화에 따른 자기적 특성을 측정하였다. 분말의 자기적 특성에 관한 측정을 위하여 실온에서 최대 외부 자기장 (15 kOe)을 사용하였으며, 조성변화에 따른 포화자화 및 보자력의 변

Table I. Lattice parameter (a_0), magnetic hyperfine field (H_{hf}), quadrupole splitting(ΔE_Q), isomer shifts (δ) for $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ (x=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0)

x	a_0 (Å)	H_{hf} (kOe)			ΔE_q (mm/s)			δ (mm/s)		
		$LaFeO_3$	16(a)	24(d)	$LaFeO_3$	16(a)	24(d)	$LaFeO_3$	16(a)	24(d)
0.00	12.381	–	491	396	–	0.01	0.04	–	0.24	0.02
0.25	12.402	–	488	397	–	−0.02	0.02	–	0.23	0.02
0.50	12.415	–	490	395	–	0.04	0.05	–	0.30	0.06
0.75	12.432	–	494	398	–	0.04	0.07	–	0.30	0.05
1.00	12.447	520	491	397	−0.03	0.04	0.05	0.26	0.29	0.06

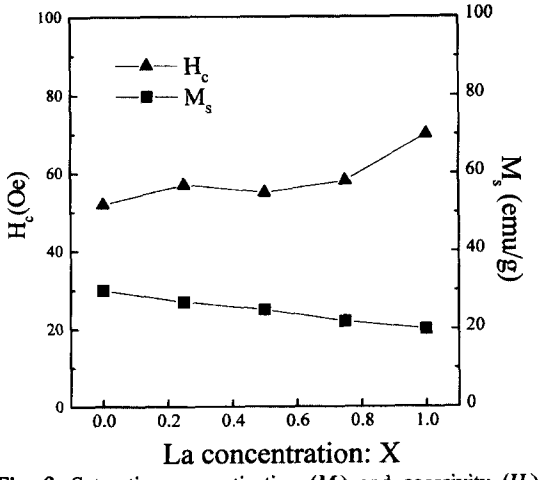

Fig. 8. Saturation magnetization (M_s) and coercivity (H_c) of $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ as a function of La concentration.

화를 Fig. 8에 제시하였다. Garnet의 최대 포화자화는 30 emu/g과 최소 보자력은 53 Oe로 YIG에 La 치환량이 증가함에 따라 시료들의 포화자화 (M_s)는 감소하며, 한편으로 보자력이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 이온반경이 큰 La이 치환되면서 단일상의 garnet이 생성되는 열처리 온도가 높아지기 때문에 똑같이 1000 °C에서 열처리한 시료들의 경우 입자 크기가 La의 치환량에 따라 달라지기 때문에 생기는 현상으로 봐야한다. 시료들의 XRD pattern으로부터 입자 크기를 scherrer 계산식으로 구할 수 있다[15]. XRD pattern으로부터 구한 입자 크기는 La의 치환량이 증가할수록 x=0.0일 경우 113 nm에서 La 치환량이 x=0.75일 경우 94 nm 까지 감소 함을 확인할 수 있었으며 이에따라 보자력 값이 La치환량이 증가할수록 커지는 경향을 가짐을 알 수 있었다[16].

Fig. 9는 800 °C에서 열처리한 $Y_{2.5}La_{0.5}Fe_5O_{12}$ 박막의 시편에 수직 및 평행한 방향으로 측정한 자화곡선으로 최대 2.5 kOe의 외부자기장을 사용하였다. Fig. 9에서 수직방향의 자화곡선은 demagnetizing field를 고려하지 않은 값이며, 수직방향의 포화자화가 수평방향의 포화자화보다 작은 값을 나타내는 것은 최대 2.5 kOe의 자기장으로는 박막을 구성하는 garnet 입자가 자기장 방향으로 모두 자화되지 않았기 때문이다. 순수한 garnet 박막시료의 보자력 값은 박막과 자기장이 평행한 방향의 경우 27 Oe와 수직방향의 경우 40 Oe를 얻었으며, La을 치환한 박막의 경우에는 수직방향과 평행한 방향 모두 38 Oe 전후의 크기를 가지므로 분말에 의한 측정값 53 Oe보다 크게 감소함을 보였다. 이 값은 Matsumoto 등[17]이 제시한 40 Oe와 유사한 값을 가짐을 알 수 있다. Fig. 9에서 외부 자기장의 방향에 평행과 수직으로 측정된 자화곡선이 박막시료의 방향과 무관함을 보이고 있으며, 이것은 박막을 구성하는 garnet 입자의 자화용이축이 일정한 방향성을 가지지 않음을 의미하고 이러한 결과는 XRD의 실험결과에서와 같이 박막을 구성하는 입자가 방향성 없이 성장한 결과와 일치한다.

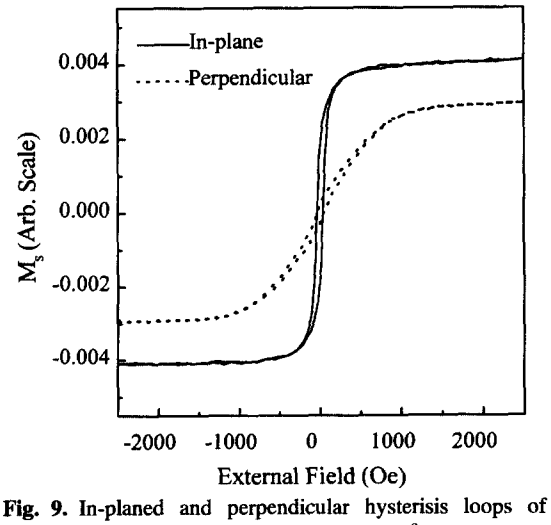

Fig. 9. In-planed and perpendicular hysterisis loops of the thin $Y_{2.5}La_{0.5}Fe_5O_{12}$ film annealed at 800 °C.

IV. 결 론

본 연구를 통하여 sol-gel 방법을 이용한 $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ 분말과 박막시료의 제조에 성공하였으며, La을 Y의 자리에 최고 0.75까지 치환시에도 1000 °C의 열처리로 순수한 garnet의 결정구조를 얻을 수 있었다. 이러한 실험결과는 산화물을 이용한 세라믹스 제조방법으로 YIG의 제조시 1200 °C 이상의 고온에서 단일상을 얻을 수 있는 반면 본 실험으로는 이온 반경 차이가 아주 심한 La과 같은 이온을 치환하더라도 1000 °C의 열처리 온도에서 단일상을 얻을 수 있었다. La을 Y 자리에 치환한 박막의 경우에 열처리 온도는 치환하는 원소의 양과는 무관함을 알 수 있었다. XRD, SEM 및 Mössbauer 분광기를 이용하여 박막과 분말시료의 결정상태와 입자의 크기 및 자기적 상태를 연구하여 합성한 garnet 분말은 ferrimagnetic의 자기적 성질을 가지

는 200~300nm의 크기로 성장하였음을 확인하였으며, garnet 박막은 산화 Si 기판에 방향성 없이 성장하였음을 확인할 수 있었다. 이러한 자기적 특성은 초단파 소자로의 사용에 필요한 보자력과 포화자화의 크기가 산화물을 이용하여 제작한 garnet의 자기적 성질에 접근함을 알 수 있다[8].

감사의 글

본 연구는 정보통신부 98년도 대학 기초 연구 지원 사업과 한국 과학 재단 (97-0702-0401-5) 연구 지원 사업에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] F. Bertaut and F. Forrat, Compt. Rend. **242**, 382(1956).
[2] K. Hisataka, I. Matsubara, K. Maeda, H. Yasuoka, H. Mazaki, and K.Vematsu, J. Magn. Magn. Mater. **140**, 2127(1995).
[3] C. E. Patton, J. Appl. Phys. **41**, 1637(1970).
[4] P. W. Peterman, M. Ye, and P. E. Wigen, J. Appl. Phys. **76**, 6886(1994).
[5] Soshin Chikazumi, *Physics of Ferromagnetism*, Claredon Press, Oxford, (1997), p. 208.
[6] 송영열, 유성초, 김원태, 이수형, 박정래, 이석진, 김태홍, 응용물리 **10**, 565(1997).
[7] Y. Y. Song, S. C. Yu, W. T. Kim, S. S. Lee, and T. G. Choy, J. Phys. IV France 7 C1-445(1997).
[8] M. Gomi, T. Okazaki, and M. Abe, IEEE Trans. on Mag. 23, 2967(1987).
[9] T. Mizuno and M. Gomi, IEEE Trans. on Magn. in JPN 5, 1236(1986).
[10] C. S. Kim, H. M. Ko, M. Y. Ha, and J. Y. Park, IEEE Trans. Mag. 27, 5456(1991).
[11] C. L. Chien and R. Hasegawa, Phys. Rev. B 16, 2115(1977).
[12] 엄영랑, 김철성, 이재광, 한국자기학회지 **8**, 203 (1998).
[13] G. Gilleo, *Ferromagnetic material* II, (North-Holland Publishing Company, Amsterdam 1982), p. 108.
[14] P. Vaqueiro, M. P. Crosnier-Lopez, and M. A. Lopez-Quintela, J. Solid State Chem. **126**, 161(1996).
[15] V. A. Bokov, V. V. Vokov, N. L. Petrichenko and M. Maryshko, Phys. Solid State **40**, 1377(1998).
[16] S. Y. Bae, H. J. Jung, C. S. Kim and Y. J. Oh, J. Phys. IV France **8** Pr2-261(1998).
[17] K. Matsumoto, K. Yamaguchi, and T. Fujii, IEEE Trans. Magn. JPN **6**, 614(1991).

Growth and Magnetic Properties of $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ ($0.0 \leq X \leq 1.0$) Powders and Thin Films by a Sol-Gel Method

Young Rang Uhm, Chul Sung Kim
Department of Physics, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

Yun Soo Lim
Steam, Generator, Materials Team, KAERI, Taejon 305-600, Korea

Jae-Gwang Lee
Department of Applied Physics, Konkuk University, Chungbuk 380-701, Korea

(Received 12 September 1998, in final form 3 December 1998)

$Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ (x=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0) powders and thin films were fabricated by a sol-gel method and their magnetic properties and crystal structures were investigated by using X-ray diffraction (XRD), atomic force microscopy (AFM), scanning electron microscopy (SEM), vibrating sample magnetometer (VSM), and Mössbauer spectroscopy. XRD and Mössbauer spectroscopy measurements show that garnet powders annealed at 900 °C for 8 hours were single-phased and that thin films fired at 800 °C for 2 hours were crystallized without any preferred direction. X-ray diffraction patterns of $Y_{3-x}La_xFe_5O_{12}$ powders annealed at 1000 °C had only peaks of the garnet structure in case of $x \leq 0.75$ but those of $Y_2LaFe_5O_{12}$ powders consisted of peaks from garnets and $LaFeO_3$. Mö ssbauer sepectra of garnet powders grown by the sol-gel method had a similar shape of those of powders grown by a conventional ceramic method. Grain sizes of garnet powders were 200~300 nm and the averaged surface roughness was 3.17 nm. Results of VSM measurements show that powders and thin films had soft magnetic properties and that the garnet powders had the largest saturation magnetization, 30 emu/g, and the lowest coercivity, 52 Oe.