

다결정 $Y_3Fe_5O_{12}$ 의 미세구조와 자기적 특성 연구

이재동 · 김성재 · 이승호* · 김태옥
부산대학교 공과대학 무기재료공학과
*경북 지방 공업기술원
(1993년 7월 26일 접수)

The Study on the Microstructure and Magnetic Properties of Polycrystalline $Y_3Fe_5O_{12}$

Jae-Dong Lee, Seung-Jae Kim, Seung-Ho Lee* and Tae-Ok Kim
Department of Inorganic Materials, Pusan National University
*National Industrial Technology Institute, Kyungbuk
(Received July 26, 1993)

요 약

$Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) 형성과정과 소결체 YIG의 미세구조 변화에 따른 전자기적 특성을 고찰하기 위하여 Y_2O_3 - Fe_2O_3 계를 이용하여 세라믹의 일반 제조 방법으로 다결정체를 제조하였다. 중간상인 orthoferrite($YFeO_3$)는 900°C 에서 1100°C 에 걸쳐 생성되었으며, YIG는 1100°C 에서 형성되기 시작해서 1200°C 이상에서는 단일상의 YIG를 얻었고, 이때부터 포화자화는 급격히 상승했다. 하소 조건 변화에 따라 최종 소결체의 미세구조 및 전자기적 특성은 현저한 차이를 나타내었다. 1100°C 하소 시료 소결체 경우 포화자속밀도, 보자력, Curie 온도, FMR의 Linewidth H는 각각 1580 G, 1.89 Oe, 570 K, 78 Oe였다.

ABSTRACT

The formation process of polycrystalline YIG ($Y_3Fe_5O_{12}$) prepared by conventional method in Fe_2O_3 - Y_2O_3 system was investigated. Effect of the microstructure of sintered body on electromagnetic properties was also investigated. Orthoferrite ($YFeO_3$) was formed between 900 and 1100°C . Formation of YIG phase begin at 1100°C with sharp increased saturation magnetization simultaneously. YIG phase is identified as single phase above 1200°C . The microstructures and electromagnetic properties of sintered bodies are varied due to calcination condition of starting materials. The sintered YIG of calcined sample at 1100°C has such magnetic properties as $B_s=1580$ G, $\mu H_c=1.89$ Oe, $T_c=570$ K, $\Delta H(9.3$ GHz) $=78$ Oe.

1. 서 론

Yttrium iron garnet(YIG, $Y_3Fe_5O_{12}$) 대해 1952년 C.L. Hogan¹⁾이 10 GHz대에서의 자이로 자기공명을 발표하고, 1956년 Bertaut와 Forrat²⁾에 의해 magnetic garnets가 발견된 이래 급속히 연구, 개발이 진행되어 현재 가장 널리 쓰이고 있는 마이크로파 자성재료³⁾ 중의 한가지로서 마이크로파대에서의 전자기적 손실이 가장 작은 특성을 가지고 있다.

YIG 결정구조내 Y^{3+} ion은 모두 C site(dodecahedron site)를 점유하고, Fe^{3+} ion은 D site(tetrahedral site) 및

A site(octahedral site)에 3:2 비율로 분포하고 있으며, 여기서 tetrahedron은 두개의 모서리가, octahedron은 여섯개의 모서리가 각각 dodecahedron과 공유하고 있다⁴⁾. 이들 각 부격자점의 자기모멘트는 spinel형 ferrites의 경우와 같이 초교환 상호작용에 의하여 자기적으로 결합하고 있다. 또한 각 부격자의 ion을 자기특성이 다른 이온으로 치환함으로써 요구되는 특성에 부합시켜 여러 재료를 얻을 수 있다.

특히 YIG는 자기 모멘트의 세차운동에 의해 축적된 energy가 소비되는 energy에 비해서 크기 때문에 자기 공명상태에서 공진기로서 동작시킬 수 있으며, 이 밖에도

filter⁶, oscillator, laser, ultrasonic generator, 광집적 회로 및 차세대 이동 통신용 자심재료를 만족시키는 광범위한 응용분야를 가지고 있다⁷⁻⁹.

YIG의 제조방법으로서 크게 다결정제조, 단결정 제조, 박막으로 대별되고 있으며, 다결정 제조로서는 conventional method^{10,11}, wet-chemical method¹² 등이 있으며, 단결정 제조 방법으로는 flux technology¹³, gradient method¹⁴, top seeding¹⁵, 박막 제조는 liquid phase epitaxy(LPE)¹⁶, chemical vapor deposition(CVD)¹⁷, hydrothermal film growth¹⁸, sputtered epitaxial film¹⁹ 등 여러가지가 보고되고 있다.

기존의 연구 보고에 따르면 대부분이 YIG의 자성 특성과 마이크로파 응용을 결부시켜 연구가 행해져 왔지만, Fe₂O₃와 Y₂O₃를 출발물질로 해서 garnet 형성에 대한 단계별 자기적 특성에 관한 연구는 부족한 형편이고 국내에서의 마이크로파용 ferrite에 관한 연구는 초보단계에 있으며, 특히 다결정 garnet에 관한 연구 문헌은 접하기 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 화학양론 조성의 YIG 소결체를 conventional method로서 제조하고 소결체의 미세구조와 전자적 특성과의 관련성을 검토하기 위한 기초 실험을 통하여 첫째, garnet의 형성 과정을 고찰하고, 둘째, 하소온도 변화에 따른 소결체의 미세구조 변화를 관찰하고, 셋째, 미세구조와 전자적 특성과의 관계를 조사하였다.

2. 실험방법

Conventional method로서 yttrium iron garnet(YIG) 분체 및 소결체를 제조한 과정은 Fig.1과 같다.

화학양론 조성의 균질한 혼합물을 얻기 위해 에탄올 용매중에서 steel ball mill로써 24시간 혼합을 하였다. DTA 분석 후 공기중에서 승온 및 냉각속도를 3℃/min 조건으로 최종 하소온도를 900℃에서 1400℃까지 100℃ 간격으로 최종 하소온도에서의 유지시간을 6시간으로 하였으며, 균일한 미립자의 하소 분말을 얻기 위해 steel ball mill로써 24시간 분쇄하였다. 또한 binder(PVA 3 wt%)를 첨가하고 파쇄회환 후, 최종 하소 분말을 준비 하였다. 20 MPa의 압력으로 토로이드 형태로 성형하여 소결 준비 시편으로 하였다. 소결온도를 1300℃에서 1450℃까지 50℃ 간격으로 공기중에서 소결하였으며, 이때 승온속도, 냉각속도 및 최종 유지시간을 각각 300℃/시간, 60℃/시간, 6시간으로 일정하게 하였다.

본 연구에서는 YIG 형성과정을 X-선 회절 분석으로 관찰하였고, 온도 가변형 VSM으로 YIG 분체의 자기적

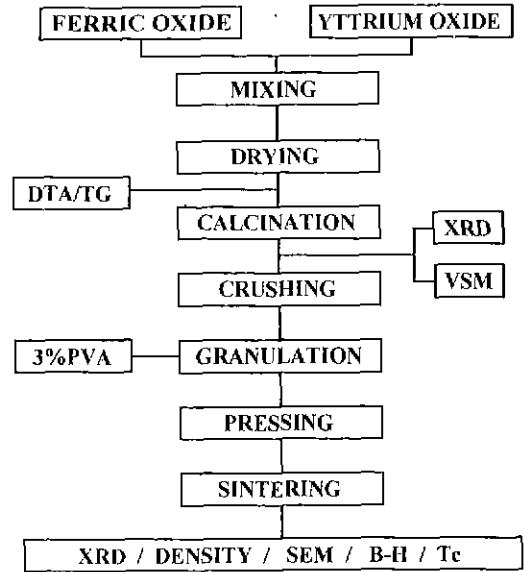


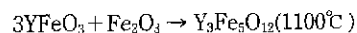
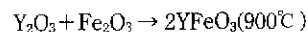
Fig. 1. Preparation process of yttrium iron garnet(Y₃Fe₅O₁₂) by conventional method.

특성을 조사하였다. 또한, YIG 소결체의 미세 구조와 자기적 특성과의 관계를 SEM, 광학현미경, EDS, B-H loop tracer, LCR-meter 등으로 고찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. Yttrium iron garnet(YIG) 형성 과정 및 자기적 특성

Fe₂O₃-Y₂O₃ 혼합물로부터 하소온도에 따른 YIG 형성 과정은 Fig. 2의 XRD 분석 결과와 같다. 900℃에서는 다량의 Fe₂O₃와 Y₂O₃, 그리고 YIG가 형성되기전 나타나는 중간상으로서 perovskite 구조를 가지는 orthoferite인 YFeO₃가 소량 존재했으며, 1000℃에서는 중간상인 YFeO₃와 소량의 Fe₂O₃, Y₂O₃가 공존하였으며, 1100℃에서 YIG상이 형성되기 시작했으며, YFeO₃ 또한 미소량 잔존하고 있었다. 1200℃ 이상에서는 대부분이 YIG 단일상만이 관찰되었다. 본 연구에서 orthoferite와 YIG가 공존하는 온도 범위는 1100℃ ~ 1200℃ 이고, 1100℃에서 YIG가 형성되기 시작했으며, 이는 Rubinchik²⁰, Sztaniszlav¹¹의 보고 문헌과 거의 일치하고 있다. YIG 형성 과정을 XRD 분석 결과로부터 요약해 보면 다음과 같다.



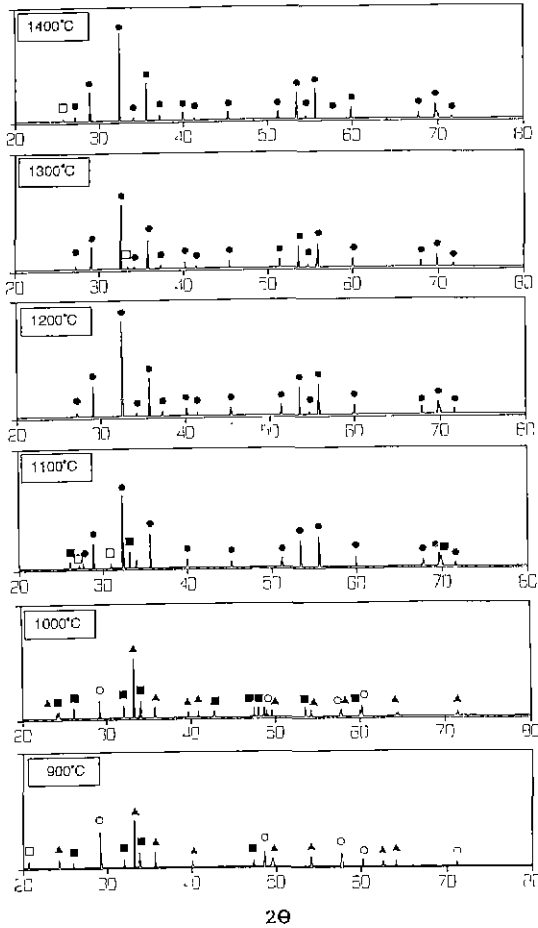


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of the specimens calcined at various temperatures for 6 hours.

앞의 XRD 분석 결과와 비교하기 위해 여러 온도에서 하소된 분체의 자기적 특성을 온도 가변형 VSM으로 측정된 결과는 Fig. 3과 같다. YIG상이 형성되기 시작한 1100°C 부터는 포화자화값이 현저하게 상승하였으며 이것으로부터 VSM 결과와 XRD 분석 결과는 일치함을 알 수 있다. 1300°C 에서 하소한 YIG 시료의 포화자화 값은 약 22 emu/g으로 이는 보고된 단결정 포화자화값의 약 82% 값에 해당하며($\sigma_{max}=26.4$ emu/g) 다소 낮은 값 특성을 보이고 있는데, 그 이유는 YIG상이 외에 미소량의 Fe_2O_3 및 Y_2O_3 의 존재가 전체 포화자화에 영향을 준 것으로, 뒤에 서술될 소결체내 생성되는 2차상과 관련이 있는 것으로 사료된다.

3.2. 하소온도 변화에 따른 소결체의 미세구조 변화

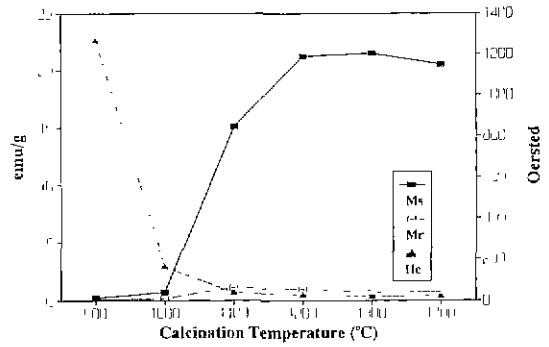


Fig. 3. Magnetic characteristics of $5Fe_2O_3-3Y_2O_3$ mixtures calcined at various temperatures for 6 hours.

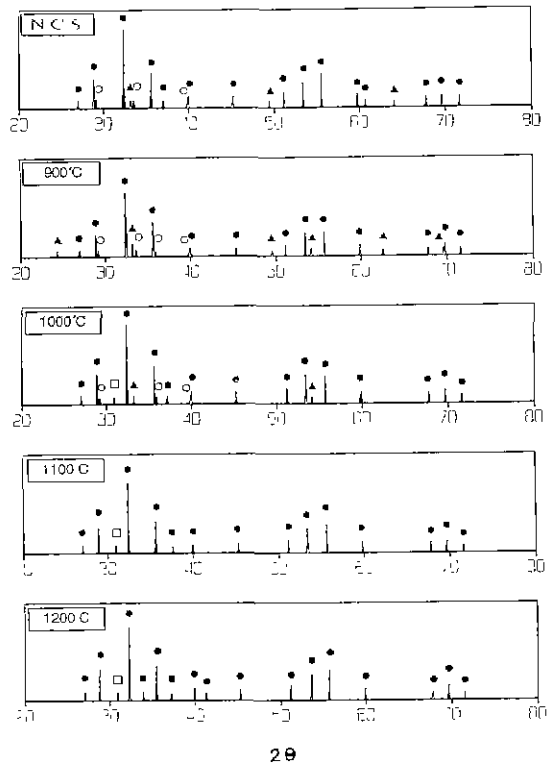


Fig. 4. X-ray diffraction pattern of YIG calcined at various temperatures for 6 hours and sintered successively at 1300°C for 6 hours (●; YIG phase, ■; $YFeO_3$ phase, ○; Y_2O_3 phase, ▲; Fe_2O_3 phase, □, unknown phase).

여러 온도에서 하소된 분말로부터 1300°C 에서 소결한 시편의 XRD pattern을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 미하소 시료(no calcined sample, N.C.S.), 900°C, 1000°C

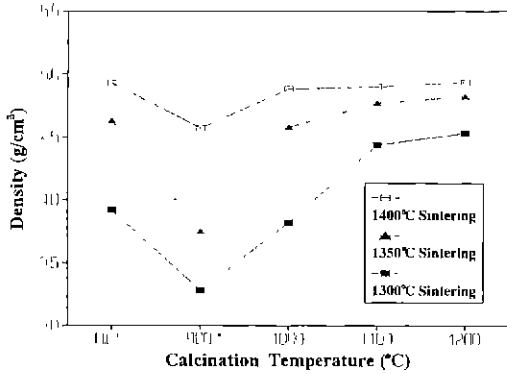


Fig. 5. Density of YIG calcined at various temperatures for 6 hours and sintered successively at various temperatures for 6 hours.

하소 시료의 소결 시편의 경우 주상인 YIG상과 미소량의 미반응 Fe_2O_3 와 Y_2O_3 가 확인되고 있으며, 1100°C 이상의 하소 시편의 경우는 대부분 YIG상임을 확인할 수 있었다.

이와 같이 소결체내 YIG상의 양은 하소온도 변화에 의존성을 가짐을 알 수 있으며, 1100°C를 전후로 현격한 차이가 관찰되었다. 하소 온도에 따른 소결체의 밀도 변화를 Fig. 5에 나타내었다. YIG상을 가지는 1100°C, 1200°C 하소 시료를 1300°C에서 소결한 경우는 치밀화가 완전히 이루어지지 않은 상태로 다소 낮은 밀도를 나타내고 있으며, 1350°C 소결의 경우는 하소 온도에 따른 소결체 밀도 변화가 1300°C 소결의 경우와 비슷한 양상을 보였으며, 1400°C에서 소결한 시편은 900°C 하소 분말로부터의 소결 시편을 제외한 모든 시편에 대하여 밀도가 유사했고. 이때의 소결체의 밀도는 이론밀도 ($d_{\text{theo}} = 5.172 \text{ g/cm}^3$)의 약 96%로 측정되었다. 따라서 본 연구에서의 미세구조 및 전자기적 특성 평가는 밀도가 유사하고 하소 조건이 현격한 차이가 있는 미 하소 시료 및 1100°C 하소 분말로부터 제조된 소결체에 대해서 행하였다.

Fig. 6은 1100°C 하소 시료로부터 1400°C에서 6시간 동안 소결한 직후의 표면 SEM 사진으로서 입경은 4~7 μm 로 추정되고, 표면에는 기공들이 관찰되지 않았으나 파단면 관찰에서 기공들이 소수 존재함을 알 수 있었다.

Fig. 7은 1400°C에서 6시간 동안 공기 분위기 중에서 소결한 시편으로서 밀도가 거의 유사한 두가지 시편의 미세구조를 SEM 사진으로서 조사하였는데, (A)는 1100°C 하소 시료의 소결 시편에 대한 파단면으로서 입계 파괴로 인해 입자의 형상이 뚜렷하게 나타났고, 균일한 입자 분포를 가졌으며 기공은 주로 입계에 존재하였고,

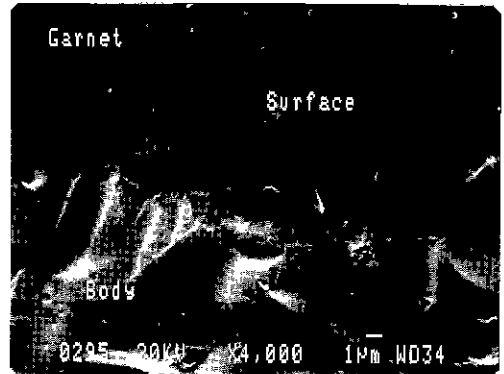
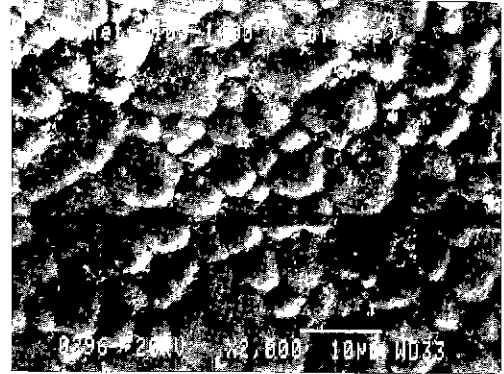
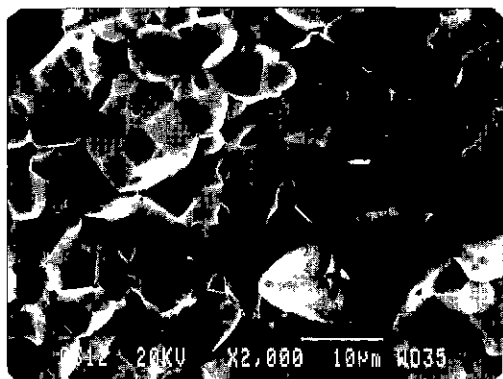
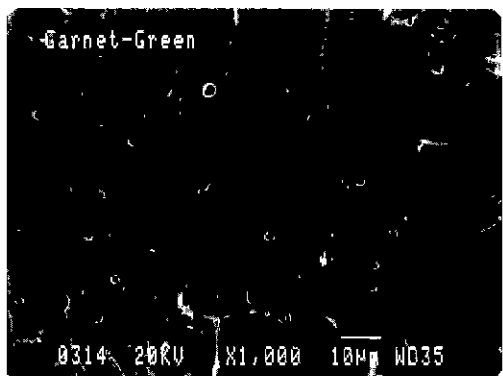


Fig. 6. SEM micrographs of YIG calcined at 1100°C for 6 hours and sintered successively at 1400°C for 6 hours.

(B)는 미 하소시료의 소결 시편에 대한 파단면으로 입내 파괴가 주로 관찰되어 입자의 형상이 명확하지 않고 20 μm 보다 훨씬 큰 입경을 가지고 있으며 기공들은 주로 입내에 있었다. 이로부터 유사 밀도를 가지고 입경, 기공의 크기 및 분포가 다른 미세구조를 하소 온도 변화를 통하여 얻을 수 있음을 알 수 있다. 하소 온도의 변화는 소결 구동력에 영향을 줄 것으로 생각되는데 일반적으로 높은 온도에서 하소한 시료의 경우 하소시 물질간의 화학 반응이 모두 종료되기 때문에 소결의 구동력은 입자의 표면적 감소에 주로 기인하는 반면에, 낮은 온도에서 하소된 시료의 경우 소결 과정에서 미 반응물 간에 화학 반응이 동시에 일어나므로 화학반응과 관련된 구동력이 전체 소결 기구에 영향을 미칠 것으로 사료된다. 또한 일반적으로 소결 온도에 비해 화학 반응 온도는 낮으며 소결 기구에서 치밀화 온도는 입자의 조대화 온도보다 높기 때문에 화학 반응에 의한 구동력은 입자의 조대화와 밀접한 관련이 있을 것으로 추측되며 그 결과 낮은 온도에서 하소한 시료로부터 소결한 시편일수록 입경이



(A)



(B)

Fig. 7. SEM micrographs of fracture surfaces of the YIG sintered at 1400°C for 6 hours. A: calcined at 1100°C, B: no calcined.

크게 나타난다고 생각한다.

1100°C 하소 시료를 1400°C 에서 소결한 YIG의 연마면을 광학현미경으로 관찰하여 Fig. 8에 나타내었다 Fig. 8에서 검은 부분은 기공이고 광학현미경상 황색을 띠는 2차상이 균일하게 분포되어 있음을 관찰할 수 있는데, 이것은 앞의 XRD 분석과 연관시켜 고찰해 보면 Fe_2O_3 상과 관련이 있을 것으로 판단되었으며, 2차상의 존재가 표면에 국한되어 있는지를 확인하기 위하여 파단면 관찰 결과 Fig. 9에서와 같이 시편 내부에도 2차상이 관찰되었다. 이때 2차상의 조성을 EDS를 통하여 분석한 결과 Fe가 주위 모상보다 많음을 알 수 있다.

이러한 2차상의 생성 원인으로서는 분쇄 제조시 steel ball mill 사용에 의한 화학양론적인 조성보다 과잉의 Fe_2O_3 가 혼입되어 나타난 것으로 예상되는데 혼합 및 분쇄시 ball 종류 및 시간등에 관한 연구가 향후 계속 검토되어야 할 과제로 생각한다.



1 cm = 50 µm



1 cm = 11 µm

Fig. 8. Optical micrographs of polished surface of the YIG calcined at 1100°C for 6 hours and sintered successively at 1400°C for 6 hours.

3.3. 미세구조와 전자기적 특성과의 관계

Fig. 10는 1400°C 에서 소결한 1100°C 하소 시편의 B-H loop 특성을 나타내고 있으며, 여러가지 하소 분말로부터 제조된 소결체의 B-H loop 특성 평가 결과를 Table 1에 나타냈다. 1100°C 하소 시편의 경우 소결온도가 상승함에 따라 보자력이 감소하고 있는데 이는 소결 온도 증가에 따른 입 성장 및 치밀화 증가에 기인하는 것으로 여겨진다. 즉, 입 성장 및 치밀화 증가에 따라 자화 기구중 domain 벽 이동이 용이하게 되어 보자력이 감소하게 되는 것으로 판단된다. 포화 자속 밀도(B_m)와 잔류 자속 밀도(B_r)는 1400°C 에서 소결을 했을 경우 각각 1580 G, 592 G이다. 보고되고 있는 4πM_s는 1680~1750 G로서 측정된 B_m 에 비해 100~200 G 더 높은 값을 얻을 수 있다. 그러나 보고된 문헌의 경우는 강자기장하에서의 포화 치화로부터 밀도를 고려한 계산값임을 생각한다면 본 연구에서의 B_m 과 거의 유사한 값을 알 수 있다²⁾.

미 하소 시료의 소결 시편 경우는 1100°C 하소 시료의

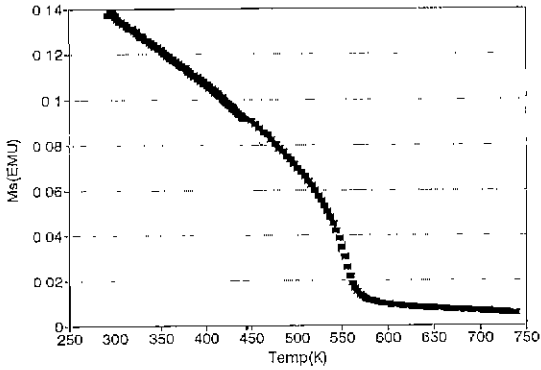


Fig. 11. Temperature dependence of saturation magnetization of the YIG calcined at 1100°C for 6 hours and sintered successively at 1400°C for 6 hours.

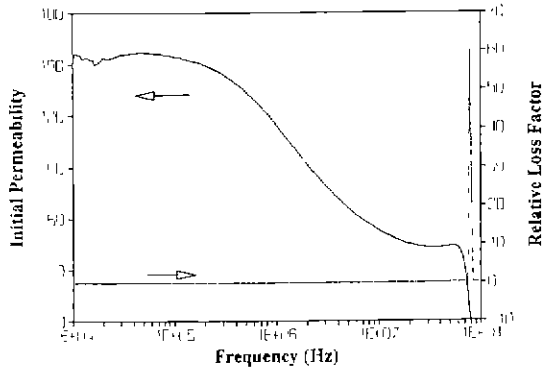


Fig. 13. The frequency dependence of the initial permeability and relative loss factor of the YIG calcined at 1100°C for 6 hours and sintered successively at 1400°C for 6 hours.

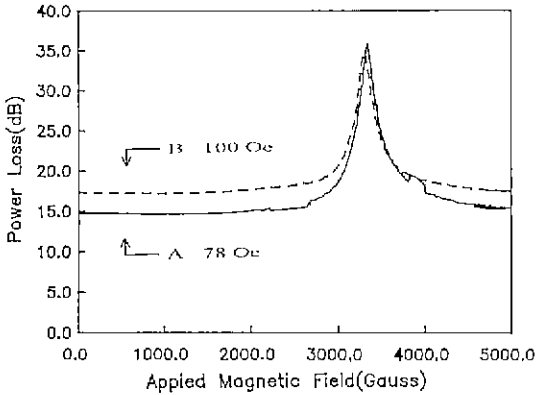


Fig. 12. Magnetic field dependence of power loss at 9.3 GHz of YIG sintered at 1400°C for 6 hours. A: calcined at 1100°C, B: no calcined.

동안 소결한 시편의 포화자화의 온도 의존성을 나타내고 있다. 560±5 K 부근에서 포화자화가 거의 0에 가까운 온도 특성을 알 수 있는데, 이것은 보고된 문헌²¹⁾의 YIG의 온도-자화특성의 결과와 일치하고 있다($T_c=550\text{ K}\sim 559\text{ K}$). 또한, 미 하소시료의 소결 시편의 경우도 동일한 경향을 나타내었다. 이로써 Curie-온도는 미세 구조에 영향을 받지 않는 고유 특성을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 두 가지 종류 하소 분말로부터 1400°C에서 제조된 YIG를 9.3 GHz에서의 FMR 특성을 평가한 결과로서 외부 정자기장 변화에 따른 페라이트에 의한 마이크로파 투과 전력 손실(power loss)의 의존성을 나타내고 있다. 여기서 A는 미 하소시료의 소결 시편의

경우로서 FMR의 반치폭, H는 약 100 Oe를 나타내고, B는 1100°C 하소 시료의 소결 시편으로서 약 78 Oe를 나타내고 있다. 이것은 단결정 YIG에 비해서 매우 크지만, 다결정 YIG에 대한 보고 내용과는 유사함을 알 수 있다²²⁾. 일반적으로 다결정체의 ΔH 는 소결체체의 기공량에 매우 의존적인 것이 보고되고²³⁾ 있는데 소결체의 밀도가 이론 밀도의 85~99% 변화함에 따라 ΔH 는 약 40~400 Oe의 큰 변화를 나타낸다. 이것은 성형 및 소성 공정이 ΔH 제어에 있어서 매우 중요하다는 것을 의미한다.

투자율과 loss factor의 100 MHz까지의 주파수에 대한 의존성을 Fig. 13에 나타냈다. 기존의 문헌²⁴⁾에서는 1 MHz까지의 투자율과 $\tan\delta$ 를 발표했으며, 본 실험에서는 발표된 내용과 거의 일치하고 있다. 투자율의 실수부, μ' 는 100 KHz까지 150의 높은 값을 나타내다가 그 후 30 MHz까지 점진적으로 감소하였고 30 MHz부터 급격한 감소 경향을 나타내었다. 한편 80 MHz에서 나타난 peak는 자연공명에서 나오는 peak로 판명되었다.

4. 결 론

Fe_2O_3 와 Y_2O_3 를 출발물질로 해서 화학 양론적인 조성으로 일반 세라믹 제조 기술을 이용한 yttrium iron garnet에 관하여 기초 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Yttrium iron garnet 형성과정에서 중간상인 orthoferrite($YFeO_3$)가 900°C에서 1100°C에 걸쳐 생성되며, YIG상은 1100°C에서 형성되기 시작해서 1200°C 이상에

서는 거의 YIG 상만이 형성된다.

2. 최종 소결체는 모상의 조성보다 Fe가 많은 조성의 2차상이 균일하게 분포되어 있다.

3. 1100°C 하소한 시료를 1400°C 에서 6시간 동안 소결한 결과 입경은 4~7 μm 였으며 기공은 주로 입체에 존재하고, 미 하소시료의 소결체는 매우 큰 입경을 갖고 입내에 많은 기공들이 존재한다.

4. 소결온도의 증가에 따른 입성장 및 치밀화 증가에 기인하여 보자력이 감소 되며, Curie 온도는 미세 구조에 영향을 받지 않는 고유 특성임을 알 수 있다.

5. 다결정체의 linewidth, ΔH 는 소결체 내의 기공량에 매우 의존하며, 9.3 GHz에서 미 하소 시편의 소결체 경우 100 Oe, 1100°C 하소시료의 소결체 경우는 78 Oe이다.

REFERENCES

1. C.L. Hogan, *Bell Syst. Tech. J.*, **31**, 1 (1952).
2. F. Bertaut, F. Forrat, "Structure Des Ferrites Ferri-magnetiques Des Terres Rares," *Compt Rend*, **242**, 382 (1956).
3. 未踏加工技術協會, 新時代の磁性材料, 工業調査會 (1981).
4. G.A. Novak, G.V. Gibbs, "The Crystal Chemistry of the Silicate Garnets," *Amer. Mineralog*, **56**, 791 (1971).
5. S. Geller, H.J. Williams, G.P. Espinosa, R.C. Sherwood, "Importance of Intrasublattice Magnetic Interactions and of Substitutional Ion type in the Behavior of Substituted Yttrium Iron Garnets," *Bell Syst Tech. J.*, **43**, 565 (1964).
6. W.J. Keane, "Narrow-Band YIG Filters And Wide-Open Receivers," *Microwaves*, **17**, 9, 50 (1978).
7. Wilhelm, H., Von Aulock, "Handbook of Microwave Ferrite Materials," Academic Press, New York and London (1965).
8. P.P. Bakare, J.J. Shrotri, C.E. Deshpande, M.P. Gupta and S.K. Date, *Indian J Chem.*, **26A**, 1 (1987).
9. G. Economos, *J. American Ceram. Soc.*, **38**, 11, 408 (1954).
10. C. Kooy, "Anisotropic Sxaggerated Grain Growth and Sintering in MnFe_2O_4 and $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$," *Sci. Ceramics*, **1**, 21 (1961).
11. A. Sztaniszlav, E. Sterk, L. Fetter, etc., "Investigation of Garnet Formation by Sintering of Y_2O_3 and Fe_2O_3 ," *J. Mag. Mag. Met.*, **41**, 75-78 (1984).
12. W.R. Holmquist, C.F. Kooi, R.W. Moss, "Reaction Kinetics of Polycrystalline Yttrium Iron Garnet," *J. Amer. Ceram. Soc.*, **44**, 194 (1961).
13. H.D. Jonker, "Onvestigation of the Phase Diagram of the System $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ for the Growth of Single Crystal of $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$," *J. Cryst Growth*, **28**, 231 (1975).
14. R.C. Linares, "Substitution of Aluminium and Gallium in Single Crystal Yttrium Iron Garnets," *J. Amer. Ceram. Soc.*, **48**, 68 (1965).
15. P. Capper, D. Elwell, "Appraisal of $\text{BaO/B}_2\text{O}_3/\text{BaF}_2$ Fluxes for the Growth of Yttrium Aluminium Garnets," *J Cryst. Growth*, **26**, 65 (1974).
16. B. Uma Maheshwar Rao, P. Mukhopadhyay, C.M. Srivastava, "Ferromagnetic Relacation in LPE-grown Eu-Ga Substituted Yttrium Iron Garnet Films," *J. Appl. Phys.*, **60**, 3656 (1986).
17. McD. Robinson, "Chemical Vapor Deposition of Rare Earth Iron Garnets for Bubble Domain Devices," *J Cryst. Growth*, **18**, 143 (1973).
18. M.J.G. van Hout, J.C. Verplanke, J.M. Robertson, "Hydrothermal Systhesis of Single Crystal Thin Films of Magnetic Garnets and Their Analysis," *Mat Res Bull.*, **10**, 125 (1975).
19. J.J. Cuomo, V. Sadagopan, J. De Luca, P. Chaudhari, R. Rosenberg, "Growth of Uniaxial Magnetic Garnet Films by rf Sputtering," *Appl Phys. Lett.*, **21**, 581 (1972).
20. Ya. S Rubinehik, M.M. Palychenko, I.A. Tzibuiko, V.T. Leitzna, *Neorg. Khim.*, **10**, 1633 (1965).
21. Gonano, R., Hunt, E., Meyer, H., *Phys Rev.*, **156**, 521 (1967).
22. Winkler, G., Hansen, P., Holst, P., *Philips Res. Rept.*, **27**, 152 (1972).
23. Feu. A., Trueba, A., *J. Appl. Phys.*, **45**, 5033 (1974).