

## 균일침전법에 의한 Yttrium Iron Garnet 분말의 합성 및 결정화

안영수 · 한문희 · 김종오\*

한국에너지기술연구소 에너지재료연구팀

\*충남대학교 재료공학과

(1996년 3월 15일 접수)

### Synthesis of Yttrium Iron Garnet Powder by Homogeneous Precipitation and its Crystallization

Young Soo Ahn, Moon Hee Han and Chong Oh Kim\*

Korea Institute of Energy Research, Energy Materials Lab.

\*Dept. of Mater. Eng., Chung-Nam Nat. Univ.

(Received March 15, 1996)

#### 요 약

YIG 전구체 분말은 요소의 열분해반응을 이용한 균일침전법에 의해서 염산용액으로부터 제조되었다. 침전은 철이온이 먼저 침전하고, 이후 이트륨이온이 침전하는 과정으로 이루어진다. YIG 전구체 분말은 함수산화철( $\beta$ -FeO(OH))과 비정질상이 혼합, 구성되어 있다. 이 분말들의 크기는 매우 작고 구형에 가까운 형태로 되어 있으며 서로 응집되어 있다. YIG 전구체 분말의 결정화과정은 열처리온도가 증가함에 따라 중간상인  $YFeO_3$ 상이 형성되고, 이후 850°C부터 1400°C 온도 범위에서  $YFeO_3$ 와  $Fe_2O_3$ 와의 고상반응에 의해  $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG; Yttrium Iron Garnet)상이 형성됨을 확인하였다. 단일상의 YIG은 대기중 1400°C에서 6시간 소성함에 의해서 얻을 수 있었다. 치밀화를 위하여 YIG 전구체 분말을 900°C에서 2시간 하소한 후, 1450°C에서 6시간 소성함에 의해서 소결체의 밀도가 4.92 g/cm<sup>3</sup>(이론밀도의 95.1%)인 소결체를 얻을 수 있었다.

#### ABSTRACT

YIG precursor powder was obtained by homogeneous precipitation in chloride salt solution by thermal decomposition of urea. It was found that ferric ions precipitated prior to yttrium ions. The precipitate was minute and spherical in shape. The precipitate formed consisted of the mixture of amorphous and ferric oxyhydroxide. Crystallization of YIG was proceeded by solid state reaction of intermediate  $YFeO_3$  and  $Fe_2O_3$  in the temperature range of 850°C to 1400°C. Single phase of YIG was obtained by heat-treatment of the powder at 1400°C for 6 hrs in air. The powder calcined was molded into pellets and sintered in air. The maximum density of 4.92 g/cm<sup>3</sup> (95.1% of theoretical density) was obtainable for the pellet sintered at 1450°C using the powder calcined at 900°C.

**Key words:** Yttrium iron garnet, Synthesis, Homogeneous precipitation, Urea

#### 1. 서 론

회도류 원소를 포함한 철가넷은 컴퓨터의 기억연산소나, 마이크로파 영역에 있어서 비가역소자 등의 자성 재료 또는 레이저 등의 자성광학재료로서 이용되고 있다<sup>1)</sup>. 특히 Yttrium Iron Garnet(YIG;  $Y_3Fe_5O_{12}$ )은 강자성공명폭( $\Delta H$ )이 낮으므로 마이크로파 영역에 있어서 비가역소자로서 이용되며, Fe 일부를 Al이나 Ga 등으로

치환시켜 사용목적에 맞는 각종 소자<sup>2)</sup>를 제작하고 있다. 미세하고 고순도이면서 활성이 좋은 분말을 제조하기 위해서는 화학적 합성법이 유효한 것으로 알려져 왔으며 YIG 분말 합성시에는 공침법<sup>3-6)</sup>이나 급속알루미늄<sup>7-10)</sup>과 비정질 사이트레이트겔<sup>12,13)</sup>을 이용한 졸겔법이 주로 이용되고 있다.

공침법은 용액내부의 음이온종이 불연속적으로 유입되어 용액의 농도가 순간적, 국부적으로 변화하기 때문에

공정 전반을 조절하기 어려울 뿐만 아니라 조성의 불균일성을 초래하기 쉽다<sup>14)</sup>. 출결법은 매우 미세하고 활성이 있고 순도가 높은 분말을 제조할 수 있으나 수율이 낮고 제조비용이 비싸다는 단점이 있다. 균일침전법은 용해도 한계까지 음이온종을 계 전반에 걸쳐 서서히 도입시킴으로써 양이온과의 반응을 계 전반에 걸쳐 균일하게 한다는 장점이 있다. 이 방법에서 암모니아원으로 사용되는 요소는 용액내에서 가수분해반응을 서서히 일으켜 암모니아와 이산화탄소로 분해되는 특성을 갖고 있다. 이중 이산화탄소는 기체로서 계외로 빠져나가나 대부분의 암모니아는 수용액내에서 용해되어 용액내의 pH를 균일하게 상승시키는 역할<sup>14, 15)</sup>을 한다. Haneda<sup>16)</sup> 등은 요소를 이용한 균일침전법에 의해서 염산염으로부터 YBIG 분말을 합성하였고, 또한 Fujita<sup>17)</sup>와 Akinc<sup>18)</sup> 등은 이 방법에 의해 각각  $MgAl_2O_4$ ,  $Y_3Al_5O_{12}$ 의 복합산화물을 합성했다고 보고한 바 있다.

본 연구에서는 요소의 열분해반응을 이용한 균일침전법에 의해 염산염용액으로부터 YIG 전구체 분말을 제조하였으며 그 제조과정중의 침전특성, 전구체 분말의 특성 및 분말의 결정화과정 등에 대해서 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 침전용액 제조

출발원료로는  $YCl_3 \cdot 6H_2O$ (Aldrich Chemical Co., Inc., 99.9%),  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (High purity Chemical Co., 99%) 및 요소( $(NH_2)_2CO$ ; Aldrich Chemical Co., 99%)를 이용하였다. 침전용액 제조에 이용된 HCl과  $NH_4OH$ 는 시약급이었다. 침전용액 제조를 위해서는 이트륨과 철 각각의 염산염을 상온에서 이차중류수에 용해시킴으로써 제조하였다. 이때 yttrium 및 iron stock solution의 몰농도는 각각 0.4M, 2.5M로 제조하였으며, 특히 iron stock solution을 상온에서 가수분해되지 않도록 고농도로 제조하여 충분히 산성<sup>19)</sup>으로 유지되도록 하였다. YIG 전구체 분말의 제조과정 중의 침전특성과 분말의 특성을 규명하기 위하여 이트륨과 철 각각의 금속양이온을 이용한 침전용액도 제조하였다. 이트륨 침전용액은 0.4M yttrium stock solution에서 45 ml를 취한 후, 요소 11.26 g과 더불어 비이커에 넣고 이차중류수를 이용하여 전체량이 500 ml가 되도록 제조하였다. 이 용액내의 이트륨이온 농도는 0.036 M/l, 요소의 농도는 0.375 M/l이었다. 철 용액은 용액내의 철이온 농도가 0.06 M/l, 요소의 농도가 0.625 M/l가 되도록 제조하였다.

YIG 전구체 분말을 제조하기 위한 출발용액도 위와

**Table 1.** Initial Total Cation, Urea Concentration and Urea/cation Ratio Used in This Experiment.

| Sample | [Y+Fe]<br>(M) | [Urea]<br>(M) | [Urea]/<br>[Y+Fe] |
|--------|---------------|---------------|-------------------|
| YIG-1  | 0.096         | 1.0           | 10.4              |
| YIG-2  | 0.160         | 1.67          | 10.4              |
| YIG-3  | 0.224         | 2.33          | 10.4              |
| YIG-4  | 0.320         | 3.33          | 10.4              |

같은 방법으로 제조하였다. 침전 실험을 위한 용액은 금속총양이온 농도는 다르지만 요소대 금속총양이온의 비가 일정하도록 하였다. 이때 이트륨과 철 이온의 몰비는 화학양론적 조성이 되도록 3:5로 하였으며 이 용액내의 초기 pH는 약 2.0이 되도록 조절하였다. Table 1에는 YIG 전구체 분말제조를 위한 용액내의 금속총양이온의 농도와 요소의 농도 및 요소대 금속총양이온의 몰비를 나타내었다.

위와 같이 제조된 침전용액들은 물중탕내에 넣어 약 90°C 정도까지 가열하여 소정시간 유지한 후, 침전실험이 종료되면 요소의 가수분해반응이 일어나지 않도록 냉수로 급냉시켰으며 침전물은 원심분리하여 얻었다. 그 후 침전물은 중류수와 아세톤으로 여러번 세척되었고, 진공오븐에서 80°C로 24시간 동안 건조되었다.

### 2.2. 특성분석 및 열처리

침전특성을 규명하기 위해서는 pH-meter(TOA HM-50V, 일제)를 이용하여 침전 과정중의 용액내의 pH와 온도변화를 연속적으로 측정, 기록하였으며 앞면이 유리된 항온중탕조를 통하여 침전과정의 육안관찰도 병행하였다.

제조된 YIG 전구체 분말의 특성분석, 즉 형태, 상분석을 위해서는 SEM(Philips XL-30, 네덜란드제) 및 XRD(Rigaku RTP300RC, 일제)분석이 수행되었다. 한편 이트륨과 철 각각의 단독침전물에 대한 특성분석도 병행하였다.

YIG 전구체 분말의 결정화과정을 조사해 보기 위하여 열처리온도가 증가함에 따라 생성되는 결정상에 대해서 XRD 분석이 수행되었다. 이 분말에 대한 열처리조건은 대기중에서 4°C/min 속도로 승온시켰으며 최고온도에서 6시간 유지한 후 로냉시켰다. 치밀화, 즉 소결성 검토를 위해서는 XRD 분석결과를 참고로 하여 YIG 전구체 분말을 여러 온도에서 일정시간 하소시켰다. 이때의 승온 속도는 4°C/min이며 소정온도에서 2시간 유지하였다. 이후 이 하소된 분말을 7 mmφ×2 mm pellet으로 가압

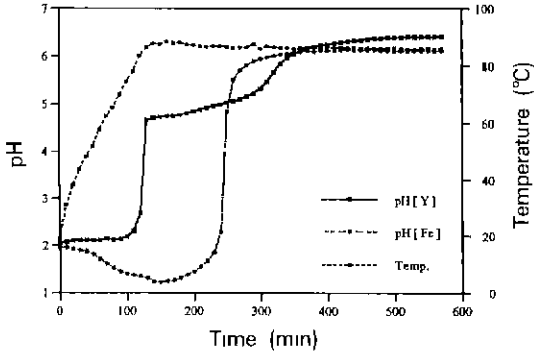


Fig. 1. Variation of pH and temperature with time for precipitation process; (a) yttrium chloride solution (b) ferric chloride solution.

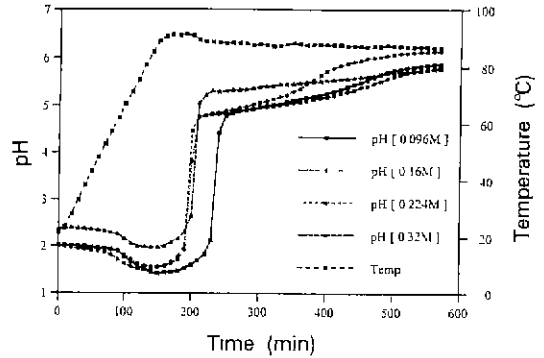


Fig. 2. Variation of pH and temperature with time for solution of cation mixture ([Y]+[Fe]) in the precipitation process.

성형한 후, 이 pellet을 200 MPa 압력하에서 5분동안 등축가압성형(CIP) 하여 4°C/min 승온속도로 소정온도에서 6시간 소성하였다. 소결체의 밀도는 Archimedes 법에 의해 측정되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 침전특성

침전실험과정중의 용액내의 pH와 온도변화는 Fig. 1, Fig. 2에 나타내었다. Fig. 1은 이트륨과 철이온의 단독침전실험의 경우이고, Fig. 2는 이트륨과 철이온이 혼합된 용액의 침전실험의 경우이다.

Fig. 1에서 철이온 단독침전의 경우를 보면, 용액의 가열과 더불어 초기의 완만한 pH 감소는 요소의 가수분해반응에 의해 형성된 중간물질(HNCO)과 물의 해리상수의 증가<sup>15)</sup> 때문이다. 이후 계속적인 pH 감소가 pH 1.2까지 지속된다. 이 과정에서 철이온의 핵생성에 의해 용액전체가 순식간에 황토색으로 변화하면서 pH 1.5 부근에서 철이온의 침전발생으로 인하여 용액이 탁해지기 시작한다. pH 1.2 부근에서는 철이온의 침전발생이 거의 완료되어 pH 값이 안정한 상태로 있다. 이후 급격한 pH 상승이 일어나는데 이것은 철이온 침전반응이 종료되어 이 pH 영역에서는 요소의 열분해반응에 의해 형성된 암모니아와 금속양이온과의 반응이 이루어지지 않기 때문에 암모니아에 의한 pH 상승으로 판단된다. 시간이 경과함에 따라 큰 pH 변화는 없고 용액내의 pH는 6.1로 거의 일정한 상태를 유지하고 있다. 이트륨이온 단독침전의 경우를 보면, 초기 pH가 거의 상승하지 않고 일정한 상태를 유지하고 있는 것은 강산성의 이트륨이온 때문이다<sup>15)</sup>. 이 상태는 약 75°C까지 지속되다가 이후 급격한

pH 상승이 일어나는데 이것은 철 단독침전실험에서 서술한 바와 같은 이유이다. 이때 pH 4.8 부근에서 이트륨이온의 핵생성으로 인하여 용액이 백색으로 변화한다. 시간이 경과함에 따라 용액내에서 백색의 조그마한 고상이 발생되어 아울러 침전이 시작되며 pH 5.0 부근까지 pH가 서서히 상승한다. 다시 용액내의 pH는 6.1까지 비교적 빠르게 상승하고, pH 6.4 부근에서는 거의 일정한 상태를 유지하고 있어 이트륨이온의 침전이 종료되었음을 나타내고 있다.

이트륨과 철이온이 혼합된 침전실험의 경우인 Fig. 2를 보면 각각의 단독침전실험 분석결과에서 언급한 바와 같은 비슷한 침전특성을 보이고 있으며 철이온이 pH 2 이하 영역에서 먼저 침전하고, 이후 이트륨이온이 pH 4.5 ~ 6.2 영역에서 침전하는 과정으로 이루어짐을 알 수 있다. 이들 침전용 용액들은 금속총양이온의 농도에 차이가 있음에도 불구하고 비슷한 pH 상승과 침전특성을 나타내고 있다. 이러한 이유는 특히 요소대 금속총양이온의 몰비가 일정하기 때문으로 판단된다. Fig. 2에 나타난 각각의 용액에서 침전 pH 영역의 차이는 금속총양이온의 농도차에 기인하고, 또한 침전곡선에서의 약간의 편향은 용액의 가열속도에 의한 것으로 보여진다. 왜냐하면 가열속도는 요소의 분해속도에 영향을 미치기 때문이다. 온도변화 커브는 침전실험한 4개용액의 평균값이다. 이후부터 언급되는 YIG 전구체분말의 특성분석, 즉 분말특성, 결정화과정 및 소결성적특성을 위하여 이용된 전구체 분말은 금속총양이온 농도가 0.096M이었던 분말을 대상으로 조사하였다.

#### 3.2. 분말의 형태 및 특성

이트륨과 철 각각의 단독침전실험에서 얻어진 분말의

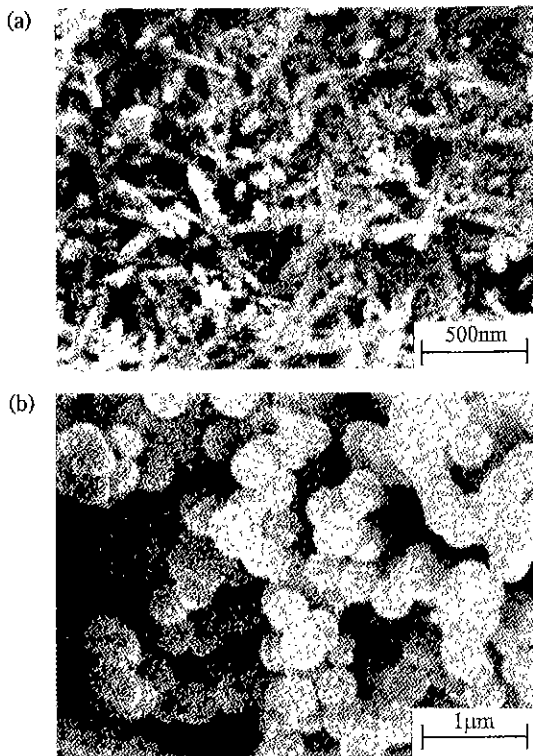


Fig. 3. SEM micrograph of yttrium and ferric precipitate prepared from solution of individual cation; (a) ferric precipitate (b) yttrium precipitate.

형태는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 철 용액으로부터 얻은 분말에 대한 SEM 사진으로 그 분말들은 침상형태로 되어 있으며 서로 응집되어 있다. Fig. 3(b)는 이트륨분말에 대한 SEM 사진으로 그 분말들은 구형으로 크기가 비교적 균일하며 평균입경은 약 0.4 µm이다. 이 구형입자들은 서로 응집되어 있으나 이것은 비교적 약하고 쉽게 분리될 수 있다. 이트륨과 철이온이 혼합된 침전용액으로부터 제조된 YIG 전구체 분말에 대한 SEM 사진은 Fig. 4에 나타내었다. 이들 분말의 크기는 매우 작고, 구형에 가까운 형태로 되어 있으며 서로 응집되어 있다. 이와같이 YIG 전구체 분말이 철 분말과는 다른 구형모양의 입자를 갖게 된 것은 Haneda<sup>16)</sup>등이 침전물 형성기구에서 제시한 바와 같이 이트륨은 철과는 독립적으로 일차입자를 형성하고, 미리 형성된 철의 이차입자들 사이로 들어가 YIG 분말을 형성하기 때문으로 판단된다.

### 3.3. XRD 분석

열처리온도가 증가함에 따른 YIG 전구체 분말의 결

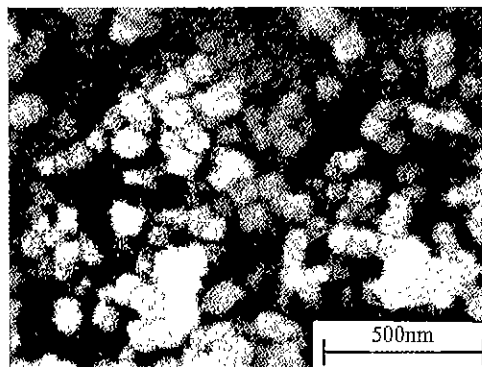


Fig. 4. SEM micrograph of YIG precipitate prepared from solution of the initial concentration of 0.096M.

정화과정을 조사하기 위하여 이 분말외에 이트륨과 철 각각의 단독침전물에 대해서도 XRD 분석을 수행하였다. YIG 전구체 분말의 결정화과정은 계속적인 열처리과정 중에 형성된 결정상에 대해 XRD 분석을 통해서 조사하였으며 그 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

이 분석결과를 보면, YIG 전구체 분말은 비정질상과 더불어 함수산화철( $\beta\text{-FeO(OH)}$ )로 구성되어 있음을 알 수 있다. 이 분말을 300°C 및 450°C로 열처리하면 모두  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (haematite)상에 해당되는 약한 회절 pattern을 보였다. 이 결과와 관련, 결정상에 대한 좀 더 정확한 분석을 위하여 철 단독침전물에 대해서도 XRD 분석을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 이 분석결과를 보면, 철 침전물은 함수산화철인  $\alpha\text{-FeO(OH)}$  및  $\beta\text{-FeO(OH)}$ 로(Fig. 6(a)) 되어 있다. 철 침전물을 300°C로 열처리하면  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (haematite) 외에 소량의  $\alpha\text{-FeO(OH)}$ 상이 존재(Fig. 6(b))하고 있으나 400°C 경우에는  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 상만이 존재하고 있어 이 온도에서  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 로 완전한 상전이(Fig. 6(c))가 일어난을 알 수 있다. Kato<sup>20)</sup>은 요소를 이용한 균일침전법에 의해  $\text{FeCl}_3$  용액으로부터  $\alpha\text{-FeO(OH)}$  및  $\beta\text{-FeO(OH)}$ 상을 얻었다고 보고한 바 있으나  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 로의 상전이에 대해서는 조사되지 않았다. 계속해서 YIG 전구체 분말에 대한 열처리온도를 650°C로 증가시키면, 이 온도에서  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 상이 형성되며 이외에도  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 와  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 와의 고상반응에 의해  $\text{YFeO}_3$ 상이 형성됨을 확인하였다. 이 온도에서는  $\text{YFeO}_3$ 상이 주 결정상으로 존재하고 있다. 750°C에서 열처리한 경우는 650°C의 경우와 비슷하나  $\text{YFeO}_3$ 상에 해당되는 회절 pattern의 강도가 증가함을 보였다. 850°C에서 열처리한 경우는 이 온도에서 YIG상이 형성되었고, 열처리온도가 1100°C까지

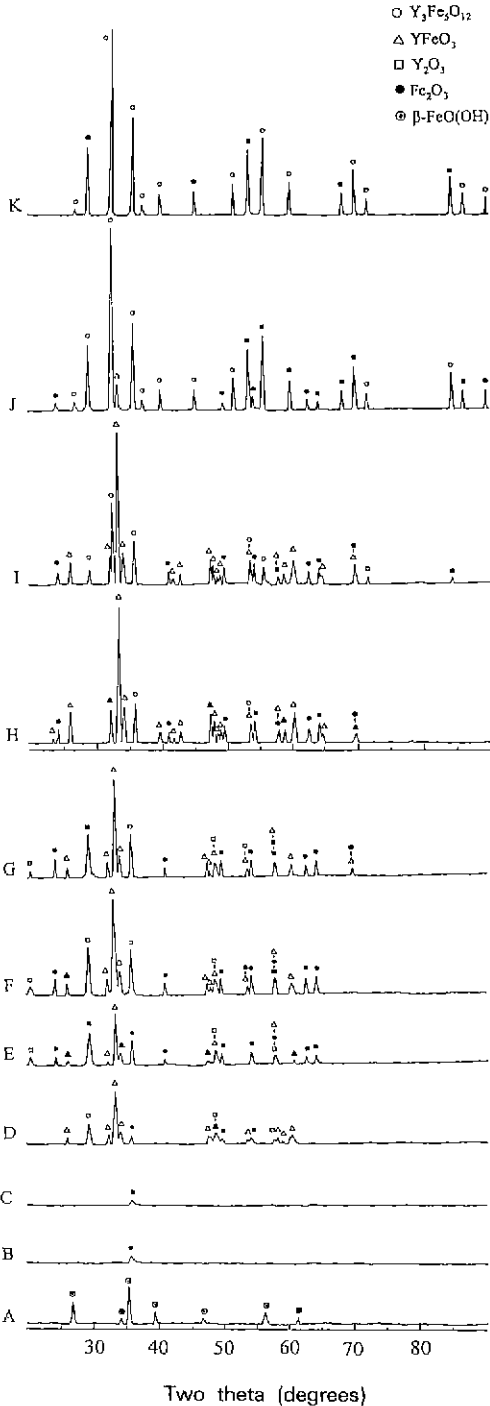


Fig. 5. X-ray diffraction pattern for YIG precipitate heat-treated at various temperature in air; A: dried precipitate, B: 300°C, C: 450°C, D: 650°C, E: 750°C, F: 850°C, G: 900°C, H: 1000°C, I: 1100°C, J: 1200°C, K: 1400°C.

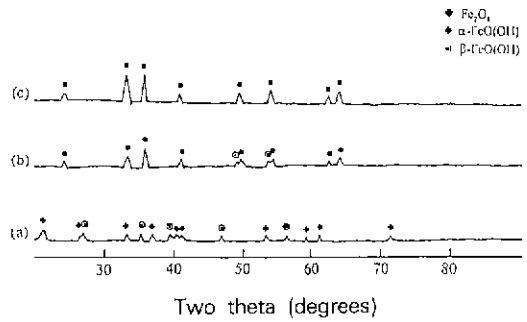
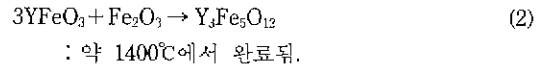
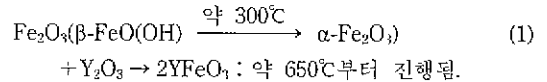


Fig. 6. X-ray diffraction pattern of ferric precipitate; (a) dried ferric precipitate (b) ferric precipitate heat-treated at 300°C (c) Iron precipitate heat-treated at 400°C.

증가됨에 따라 YFeO<sub>3</sub>상에 해당되는 회절 pattern의 강도가 증가함을 보였다. 1200°C에서 열처리한 경우는 YIG상이 주 상으로 있고 소량의 YFeO<sub>3</sub>와 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>상에 해당되는 회절 pattern은 감소함을 보였다. 1400°C에서 열처리한 경우는 YIG상에 해당되는 회절 pattern만을 보여 이 온도에서 YIG 단일상이 형성됨을 확인하였다. 이 분석결과로부터 YIG 전구체 분말의 결정화과정은 다음과 같은 반응에 의해서 진행됨을 알 수 있다.



YFeO<sub>3</sub>(Yttrium orthoferrite)상은 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와의 고상반응에 의해 약 650°C 부근 온도에서 형성되기 시작하고, YIG 결정화는 850°C부터 1400°C 사이의 온도범위에서 YFeO<sub>3</sub>와 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와의 고상반응에 의해 진행됨을 확인하였다.

#### 3.4. 전구체 분말의 소결

YIG 전구체 분말에 대한 소결성검토를 위해서는 전구체 분말을 대기중 900°C, 1000°C 및 1100°C 온도에서 2시간 하소하여 pellet으로 성형한 후, 이 pellet을 1400°C, 1450°C 및 1500°C 각각의 온도에서 6시간 소성하여 이 전구체 분말에 대한 소결성검토를 행하였다. 이때 이 분말에 대한 하소 및 소성온도는 XRD 분석결과를 참고로 하여 YIG상이 형성되는 850°C 온도 이상을 하소 온도로, 그리고 YIG 단일상이 형성되는 1400°C 온도를 소성온도로 정하였다. Fig. 7에는 하소온도와 성형

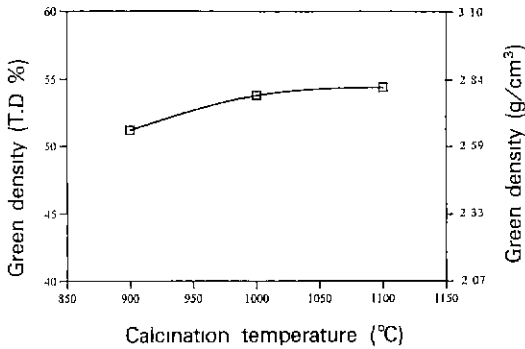


Fig. 7. Effect of calcination temperature on green density for YIG powder prepared from solution of the initial concentration of 0.096M.

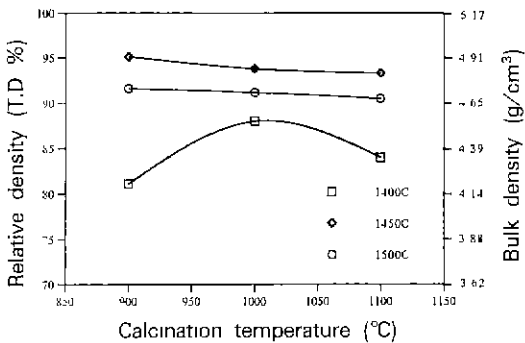


Fig. 8. Effect of calcination temperature on bulk density for YIG powder prepared from solution of the initial concentration of 0.096M.

체의 밀도와 관계가 나타내었는데 하소온도가 증가함에 따라 소성체의 밀도도 증가함을 보였다. Fig. 8에는 소성온도와 소결체의 밀도와의 관계를 나타내었다. 이 결과를 보면 1400°C, 1500°C보다도 1450°C에서 소성시키는 것이 치밀화에 유효함을 알 수 있다. 1400°C에서 소성한 경우는 900°C, 1100°C보다 1000°C 하소온도에서 소결체의 밀도가 높은 것으로 나타나고 있으나 그 밀도값은 4.50 g/cm<sup>3</sup>(87% T.D)로 낮게 있어 충분히 치밀화되지 않음을 알 수 있다. 1450°C, 1500°C 경우는 하소온도에 관계없이 모든 소결체가 90% 이상의 높은 밀도값을 나타내고 있다. 특히 900°C에서 하소시킨 분말을 1450°C에서 소결시킬 경우는 밀도값 4.91 g/cm<sup>3</sup>(95.1% T.D)인 소결체를 얻을 수 있었다.

위의 분석결과로 볼 때 소결체의 치밀화를 위해서는 하소시 다소의 미반응물질이 존재한다 하더라도 활성을 잃지 않는 온도, 즉 YIG상이 형성되기 시작하는 온도인

약 850°C보다 약간 높은 온도로 분말을 하소하여 소결시킬 필요가 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

YIG 전구체 분말은 요소의 열분해반응을 이용한 균일침전법에 의해 염산염용액으로부터 제조되었다. 침전은 철이온이 pH 1.2~1.5 부근에서 먼저 침전하고, 이후 이트륨이온이 pH 4.8~6.4 부근에서 침전하는 과정으로 이루어짐을 알 수 있다. 그 전구체 분말은 비정질과 함수산화철( $\beta$ -FeO(OH))로 구성되어 있다. 또한 그 전구체 분말은 매우 작고 구형에 가까운 형태를 갖는 입자들이 서로 응집되어 있다. YIG 전구체 분말의 결정화과정은 850°C부터 1400°C 온도 범위에서 중간상인 YFeO<sub>3</sub> 상과 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와의 고상반응에 의해 형성됨을 확인하였다. 단일상의 YIG는 대기중 1400°C에서 6시간 소성함에 의해서 얻을 수 있었다. 또한 YIG 전구체 분말을 900°C에서 2시간 하소한 다음 소결체로 제조하여 1450°C에서 6시간 소성함에 의해서 치밀한 소결체(밀도 4.92 g/cm<sup>3</sup>: 95.1% T.D)를 얻을 수 있었다.

#### REFERENCES

1. R.L. White, *J. Appl Phys*, **40**, 1061 (1969).
2. T. Hattori, Y. Iwadate and M. Fukuda, "Characterization and Densification of Garnet-type Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> Powder Prepared by Amorphous Citrate Process," *Jpn J Chem Soc.*, **6**, 754 (1991).
3. V.P. Chalyi and K.P. Danil'chenko, "Kinetics of the Formation of Yttrium-Containing Ferrites from Metal Hydroxides," *Izv. Akad. Nauk SSSR, Neorg. Mater.*, **9**(7), 1208 (1973).
4. N.K. Ravindran, "Thermoanalytical Studies on Coprecipitated Hydroxides and Carbonates of Yttrium and Iron," *Am Ceram. Soc Bull.*, **60**(6), 626 (1981).
5. N.I. Mezin, E.N. Kuznetsov and N. Yu. Starostyuk, "Ferritization Specifics of Yttrium Ferrite and Orthoferrite Produced from Nitric Acid Solutions," *Izv. Akad. Nauk SSSR, Neorg. Mater.*, **25**(7), 1187 (1989).
6. E.N. Lukachina, V.I. Stetsenko and I.V. Ermolenko, "Mechanism of Yttrium Iron Oxide Formation in the Yttrium Hydroxide-Iron (II) Hydroxide System," *Izv. Akad. Nauk SSSR, Neorg. Mater.*, **14**(1), 102 (1978).
7. M.I. Yanovskaya, T.V. Rogova, S.A. Ivanov and N.V. Kolganova, "Alkoxy Derived Oxide Phases of the System Ferric Oxide-Yttrium Oxide," *J. Mater. Sci. Lett.*

- 6, 274 (1987).
8. O. Yamaguchi, Y. Mukaida and A. Hayashida, "Formation and Transformation of Terragonal Yttrium Iron Garnet," *J. Mater. Sci. Lett.*, **9**, 1314 (1990).
  9. O. Yamaguchi, H. Takemura and M. Yamashita, "Formation of Yttrium Iron Oxides Derived from Alkoxides," *J. Electrochem. Soc.*, **138**(5), 1492 (1991).
  10. C.D. Veitch, "Synthesis of Polycrystalline Yttrium Iron Garnet and Yttrium Aluminium Garnet from Organic Precursors," *J. Mater. Sci.*, **26**, 6527 (1991).
  11. A. Bachiorini, "Synthesis of Ferrite Yttrium Iron Garnet," *Silicates Ind.*, **5-6**, 121 (1990).
  12. V.K. Sankaranarayanan, N.S. Gajbhiye and D. Bahadur, "Characterization of Dysprosium and Samarium Iron Garnets Synthesized by the Citrate Gel Process," *J. Mater. Sci. Lett.*, **6**, 281 (1987).
  13. Vellancheri K. Sankaranarayanan and Namdeo S. Gajbhiye, "Low-Temperature Preparation of Ultrafine Rare-Earth Iron Garnets," *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**(5), 1301 (1990).
  14. P.L. Chen and I-Wei Chen, "Reactive CeO<sub>2</sub> Powders by the Homogeneous Precipitation Method," Department of Materials Science and Engineering University of Michigan 48109-2136.
  15. D. Sordélet and M. Akinc, "Preparation of Spherical, Monosized Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Precursor Particles," *J. Colloid Interface Sci.*, **122**(1), 47 (1988).
  16. H. Haneda, T. Yanagitani, A. Watanabe and S. Shirasaki, "Preparation of Yttrium Iron Garnet Powder by Homogeneous Precipitation Method and Its Sintering," *Jpn. J. Ceram. Soc.*, **98**(3), 285 (1990).
  17. K. Fujita and I. Kayama, "Formation of MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> from the Amorphous Substance Prepared by the Homogeneous Precipitation Method," *Jpn. J. Ceram. Soc.*, **86**(9), 433 (1978).
  18. M. Akinc, M.L. Panchula and M.H. Han, "Synthesis of Yttrium Aluminium Garnet Precursor Powder by Homogeneous Precipitation," *J. European Ceram. Soc.*, **14**, 123 (1994).
  19. E. Matijevic and P. Scheiner, "Ferric Hydrous Oxide Sols," *J. Colloid Interface Sci.*, **63**(3), 509 (1978).
  20. A. Kato and Y. Morimitsu, "Formation of Iron Hydroxide Particles from Iron Salt Solutions by Homogeneous Precipitation Method," *Jpn. J. Chem. Soc.*, **6**, 800 (1984).