

## Floating Zone법에 의한 YIG단결정 성장

신재혁, 김범석, 오근호

한양대학교 무기재료공학과, 서울, 133-791

## YIG(Yttrium Iron Garnet) Single Crystal Growth by Floating Zone Method

J. H. Shin, B. S. Kim and K. K. Orr

Department of Inorganic Materials Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, KOREA

### 요 약

YIG는 분해용융을 하므로 FZ법을 개량한 TSFZ법을 적용하여 YIG단결정을 성장시켰다. 최적성장조건은 성장속도 1mm/hr, 상호역방향 회전속도 30rpm이었으며 소결 및 결정성장시 산화분위기를 필요로 하였고 성장된 결정의 질은 소결정도에 의해 많은 영향을 받았다.

Melt내 기포의 생성은 철이온과 산소와의 반응에 의해 발생되었으며 기포의 밀도는 성장속도가 빨라질수록 증가하였다. 성장속도가 1mm/hr 이상일 경우에는 Cell Growth가 발생하였으며 결정의 성장자리에서 전위밀도가 증가하였다. 또한 성장된 결정에서는 제2상으로 Orthoferrite가 관찰되었다.

### ABSTRACT

YIG(Yttrium Iron Garnet) single crystals were grown by FZ(Floating Zone) method. Since YIG melts incongruently, TSFZ(Traveling Solvent Floating Zone) method which was modified FZ was applied to grow YIG single crystals. The optimum growth condition were growth rate 1mm/hr, counter-rotation 30rpm and oxidized atmosphere was necessary to sintering and growth process. The quality of grown crystals depended on the degree of sintering.

The voids were generated by the reaction of Fe ions with oxygen and the density of voids was increased with the growth rate increased. When the growth rate was more than 1.5mm/hr, the cellular growth occurred and the density of dislocation was increased at the periphery of crystals. Also, secondary phases of orthoferrite( $YFeO_3$ ) composition were observed in the grown crystal.

### 1. 서 론

YIG( $Y_3Fe_5O_{12}$ ; Yttrium Iron Garnet)는 Gar-

net 구조를 가지는 연자성체(Soft Ferrite)로서 FMR(Ferrimagnetic Resonance Linewidth)이 낮은 특성을 이용하여 극초단파 소자로 사용

되며[1] 가시광선 영역에서 낮은 광흡수도를 가지므로 Light Modulator, 자기광학 기억(Magneto-Optical Memory) 소자로 사용된다[2]. 또한 Microwave 영역에서 고주파 손실이 적기 때문에 수~수십 GHz내의 Macrowave 영역에서 고주파 자성재료로서 이용되기도 한다. 최근에는 U. Kihara 등이 Optical Isolator로서 Fiber Optics 통신(Communication)에 적용됨을 보고하고 있으며[3] Four-Port Optical Circulator에도 이용되고 있다[4].

한편으로 YIG( $Y_3Fe_5O_{12}$ ) 단결정에  $Y^{3+}$ 대신 희토류 이온(Rare Earth Ion)이나  $Fe^{3+}$ 대신  $Ga^{3+}$ 와  $Al^{3+}$ 등을 부분적으로 치환하여 Induced Uniaxial Anisotropy를 유발시켜 기포 자구 기억(Bubble Domain Memory)소자, Narrow Resonant Linewidth와 낮은 자화(Low Magnetization)를 갖게 되어 통신에 이용이 가능하다[5].

본 연구에서는 1952년 Pfann[6]에 의하여 제시된 Zone Melting의 원리를 적용한 Floating Zone법을 개량한 TSFZ(Traveling Solvent Floating Zone)법을 사용해 일반적인 용액(Melt)으로부터의 결정성장이 불가능한 분해 용융(Incongruent Melting)을 하는 자기광학 성질(Magneto-Optic Properties)이 뛰어난 포정 화합물(Peritectic Compound)인 YIG(Yttrium Iron Garnet;  $Y_3Fe_5O_{12}$ ) 단결정을 육성시키고 결정성장을 위한 제반조건(조성, 소결, 분위기등) 및 최적 조건을 확립하고 결정 내부에 발생하는 결함을 분석하여 그 원인을 규명하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. TSFZ법의 원리

Fig. 1과 같은 상태에서 Fig. 2와 같은 상태를 갖는 완전 고용체를 성장할 경우 원료봉과 결정의 조성을  $C_2$ 라 가정하면  $C_3$ 로 하여 결정성장을 행한다. 이때 결정화 되는 만큼의 원료는 원료봉이 계속 용융되면서 공급되어 용융

대의 조성(Composition)과 크기(Volume)는 변하지 않고 계속 안정된 상태에서 목적으로 하는 고용체 단결정을 얻을 수 있다. 이와 같이 원료봉과 조성이 다른 용융대(Molten Zone; Solvent Zone)가 결정에 대해 상대적으로 이동(Traveling)한다는 점에 착안하여 TSFZ(Traveling Solvent Floating Zone)법이라 부른다[7].

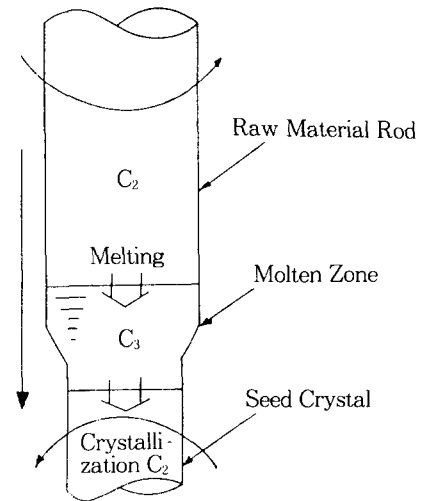


Fig. 1. Principles of floating zone method.

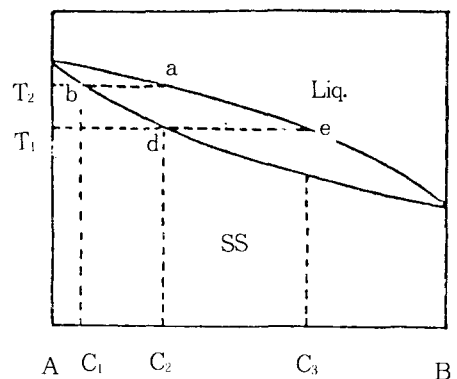


Fig. 2. Schematic diagram of perfect solid solution(A-B composition):solid phase of  $C_2$  composition coexists with liquid phase of  $C_3$  composition at temperature  $T_1$ .

다시 말해서 Fig. 2의 액상 곡선을 따라 계속 시간이 지나면서 결정 석출점은 아래쪽으로 이동해 가는 것을 억제하여 용융대의 조성을 계속 일정하게 유지시켜 주는 것이다. FZ법에서 가장 기본적이고 중요한 인자(Factor)는 바로 용융대의 유동(Fluctuation)이며 결정과 액체와의 계면(Interface)의 형상 그리고 원료봉의 치밀소성등에 있다. 특히 용융대의 형상과 안정성(Stability)은 성장된 단결정의 질(Quality)과 외형적인 문제에 직접적인 단서를 제공한다.

### 2.2. 원료봉 제조 및 결정성장

YIG( $Y_3Fe_5O_{12}$ ) 단결정을 육성하기 위해 분말 제조(Powder Preparation)를 하였다.  $Y_2O_3$ 와  $Fe_2O_3$ 의 상태도 상으로는 YIG가 약  $1582 \pm 5^\circ C$  부근에서 Orthoferrite( $YFeO_3$ )와 Liquid로 분해, 용융하는 Incongruent Melting을 하므로 CZ(Czochralski)법과 같이 용액(Melt)으로부터의 성장은 불가능하다.

따라서 YIG와 Liquid의 공존 구역인 액상선(Liquidus Line) 내부의 조성을 갖는 용융대(Solvent Zone)의 도입이 반드시 필요하다.

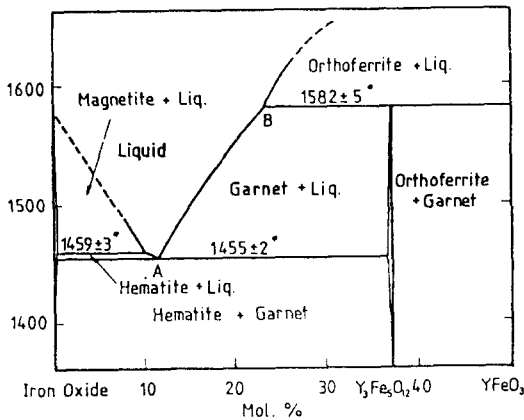


Fig. 3. Phase diagram of  $Y_2O_3$ - $Fe_2O_3$  in  $PO_2 = 1$  atm.

Fig. 3에 보여진 산소 분위기( $PO_2 = 1$ atm)에서의  $Y_2O_3$ 와  $Fe_2O_3$ 의 상태도로부터[8] Charge Rod의 조성은  $Y_2O_3$ 와  $Fe_2O_3$ 가 각각 3:5의 몰비(Mole Ratio), 용융대(Solvent)의 조성은 15:85에서 20:80의 Mole %비를 갖도록 하여 봉형으로 성형하여 소결하였다. 소결된 원료봉의 끝부분에 Solvent Zone을 집합시킨 후 Fig. 4와 같은 장치에 장착 후 산소를 불어 넣어 주면서 Solvent Zone을 용융시켜 Seed와 집합하여 상하축을 상호역방향으로 회전시키면서 동시에 아래로 끌어 내린다.

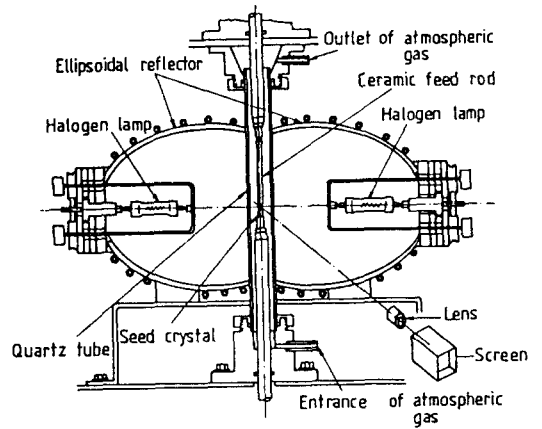


Fig. 4. Schematic diagram of floating zone system.

### 2.3. 결정의 분석방법

성장된 결정은 분쇄하여 X선 회절 분석기(XRD; Japan, Rigaku Co., D/MAX)를 사용하여  $2\theta = 10 \sim 70^\circ$  범위에서 분석을 행하여 YIG( $Y_3Fe_5O_{12}$ )의 단일상으로 성장되었는가를 조사하였다. 성장 방향에 수직, 수평하게 절단한 결정을 연마기(Polishing Machine; Denmark, Struer Co., Planopol 3)로 기계적 연마(Mechanical Polishing)를 행하고 화학적 연마(Chemical Polishing) 및 Chemical Etching을 한 시편을 광학현미경(Optical Microscope; Japan, Olympus Co., PM 10-35AD-2)으로 결정내의 기

공(Void), Secondary Phase의 유무 그리고 Striation 및 Cellular Growth의 형상을 조사하였다.

Laue Camera로 Back Reflection Pattern(배면반사 형태)을 얻어 결정의 성장 방위를 찾아내었다.

결정 성장시 Molten(Solvent) Zone의 안정성 여부 및 계면(Interface)의 형상을 관찰하기 위해 순간적으로 전원을 차단하여 급냉(Super-cooling)시킨 Molten Zone 부위를 길이 방향으로 절단하여 조사하였으며 결정내의 Secondary Phase의 성분 조사를 위해 성장 방향에 수직으로 절단한 두께 2~4mm, 직경 6~8mm의 시편을 제작하여 연마(Polishing)한 후 EDS(Energy Dispersive X-Ray Spectrometer; Japan, JEOL JSM-35CF)로 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Incongruent Melting Point를 갖는 YIG( $Y_3Fe_5O_{12}$ )를 TSFZ(Traveling Solvent Floating Zone)법에 의해 성장시킬 때 가장 Key Point는 Molten(Solvent)Zone의 부피(Volume)를 성장 초기부터 종료까지 일정하게 유지시키는 것, 즉 결정의 직경을 일정하게 해주는 것이다. 이를 위해서는 결정성장 실험전까지의 준비과정과 성장속도, 회전속도,  $O_2$  Gas의 Flow Rate, Solid/Liquid Interface의 형태, 안정된 Power의 공급 등의 여러 조건을 최적의 상태로 하여야만 한다.

YIG의 성장 조건은 이미 Kimura 등이 보고했던 바와 같이[9] 성장속도 1mm/hr, 상호역방향 회전 30rpm이다. 단결정으로의 성장 여부는 무엇보다도 성장속도에 의해 좌우된다. 본 실험에서는 양호하게 소결된 원료봉을 사용하여 성장속도 1mm/hr로 실험해서 양질의 단결정을 얻을 수 있었다. 그러나 이 과정에서 Seed를 단결정이 아닌 Charge Rod(YIG Polycrystal)를 사용할 경우 다른 재료(Rutile,

SrTiO<sub>3</sub>, Spinel등)등과는 달리 약 30mm가 성장된 후에야 단결정이 관찰되었다. 이는 타재료들이 Polycrystal Seed를 사용할 경우에도 1~5mm 성장후에 단결정을 관찰할 수 있었던 것과는 매우 큰 차이였다. 이를 통해 YIG의 경우 Nucleation과 Growth Rate가 매우 늦음을 알 수 있다. 또한 성장속도를 1~3mm/hr까지 증가시켜 실험했을 때, 2mm/hr까지는 시각상으로는 양호하게 성장하였으나 그보다 빨라지면 표면이 거칠거칠해진 것으로 보아 다결정(Polycrystal)이 성장되었음을 알 수 있었다. 1~1.5mm/hr의 속도로 성장시킨 결정은 표면상으로는 양호하였으나 Etching하여 광학 현미경(Optical Microscope)으로 관찰한 결과 Voids와 Secondary Phase 등이 있음을 관찰하였다.



Fig. 5. Grown crystal using YIG sintered rod as a seed.

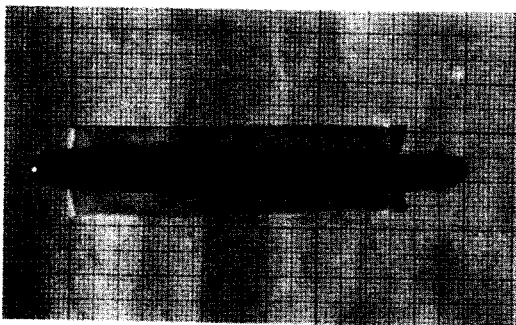


Fig. 6. Grown crystal using YIG single crystal as a seed.

Fig. 5와 6에는 성장된 결정을 나타내었다. Fig. 5의 결정은 Charge Rod를 절단한 Polycrystal을 Seed로 사용하여 성장시킨 것으로서 약 30mm가 성장된 후에야 단결정이 나타났으며 Fig. 6의 결정은 Fig. 5에서 성장시킨 단결정을 Seed로 사용하여 성장시킨 것으로서 약 10mm가 성장된 후 단결정이 나타났다. 결정 표면의 거친 부분은 Molten Zone 내의 기포가 부풀어 오르면서 소량의 Melt가 흘러 내린 것이다. 이는 결정성장시 Gas Bubble 및 Feed Rod 내의 잔류 기공들이 Melt내에 집중됨으로써 점차적으로 커진다는 Saito 등의 보고와 일치하였다[10-11].

Fig. 7은 단결정의 성장 초기의 부위를 절단하여 관찰한 것으로 여러개의 큰 결정립(Grain)이 존재하는 것을 알 수 있다. 이러한 결정립은 결정성장이 안정한 상태로 진행됨에 따라 하나의 결정립으로 성장되어 졌다.

YIG( $Y_3Fe_5O_{12}$ )의 결정성장시 성장속도의 영향을 Dislocation Etch Pits Pattern을 통해서 관찰할 수 있었다. 성장속도가 빠를 경우(2mm/hr)에는 결정의 가장자리(Periphery) 쪽으로 Etch Pits의 Cluster가 발생되어 대단히 많은 수의 Etch Pits를 관찰할 수 있었으며 성장속도가 약간 늦어질 경우(1.5mm/hr) Etch Pits의 수가 현저히 감소되었다.

Fig. 8는 YIG 결정성장시 가장 발생되기 쉬운 기공(Voids)을 관찰한 것으로 이와같은 현상은 산소의 분압 및 성장속도가 적합하지 않을 경우 심하게 발생되어 진다.

TSFZ(Traveling Solvent Floating Zone)법에 의해 결정성장시 가장 저해되는 요인 중의 하나가 조성의 변동이다. 조성의 변동은 앞서 언급했던 바와 같이 Molten Zone의 안정성 및 기타 성장 조건에 의해 주로 영향을 받지만 그외에도 원료의 순도에 의한 영향도 무시할 수 없다.

순수한  $Y_2O_3$ (99.9%, Japan NYC)와  $Fe_2O_3$ (99.9%, Toho Zinc co, Ltd)의 Powder를 사용

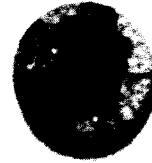


Fig. 7. Cross section of grown crystal at initial stage(perpendicular to growth orientation).

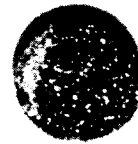


Fig. 8. Voids in grown crystal(perpendicular to growth orientation).

하여 실험한 경우에는 불순물의 영향을 무시할 수 있으므로 Yttrium Oxide와 Iron Oxide만의 Secondary Phase인 Orthoferrite( $YFeO_3$ )가 발생되기 쉬우나 그 외에 다른 불순물이 존재할 경우에는 Molten Zone의 불안정성을 초래하게 된다. 불순물이 연소될 수 있거나 휘발성이 있는 물질인 경우에는 단순히 순간적인 Molten Zone의 불안정성을 야기시키거나 점차적인 Molten Zone의 부피(Volume) 감소를 초래하지만 만일 Yttrium Oxide나 Ferric Oxide보다 용

점이 높고 치환 불가능할 경우에는 TSFZ System을 붕괴시킨다. 반면 Iron Oxide( $Fe_2O_3$ )와 치환성이 강한 Alumina( $Al_2O_3$ )의 경우에는 YAG(Yttrium Aluminium Garnet;  $Y_3Al_5O_{12}$ )로 양호하게 결정화 되며[12]  $Y_3Fe_{1-x}(Al, Ga)_xO_{12}$ 와 같이 부분 치환을 시켜 화학 성분의 분석(Analysis of Chemical Composition)을 하여 결정내의 치환된 성분의 분포도를 조사하였다는 보고도 있다[13]. TSFZ System을 안정한 상태로 유지하는데 필요한 요건은 크게 Charge Rod의 소결 정도(Degree of Sintering), Solvent Zone의 조성 및 양 그리고 성장속도의 4가지로 분류할 수 있다. 이중 Solvent Zone의 양(즉 Molten Zone의 양)은 안정한 성장계면(Growth Interface; Grown Crystal/Melt)에 영향을 끼치므로 적절한 Molten Zone의 Volume은 안정된 TSFZ System을 만들어 준다.

일반적으로 Growth Interface는 결정의 질(Quality)과 밀접한 영향이 있으며 이는 FZ법 뿐만이 아니라 이미 다른 결정성장법을 통해서도 알려져 있는 내용이다. 즉, Growth Interface가 Concave할 경우에는 기공(Voids) 및 Inclusion이 함유되기 쉬우며 Convex 또는 Flat할 경우에는 이러한 것들의 형성을 억제할 수 있다는 보고가 많이 나와 있다[14-17].

그러나 반드시 Growth Interface만이 결정 성장에 영향을 끼치는 것은 아니며 Molten Zone의 양은 오히려 원료봉과 Melt와의 계면 형태에 더 많은 영향을 끼치는 것으로 관찰되었다. Molten Zone의 양이 지나치게 적을 경우에는 결정의 직경이 감소될 뿐만 아니라 원료봉의 불규칙한 용융(부분적인 용융)으로 중앙 부분만 용융되고 가장자리 쪽은 용융이 되지 않아 용융대(Molten Zone)와 원료봉의 계면이 Concave하게 된다. 이에 따라 원료봉의 용융되지 않은 부분과 중앙의 용융된 부분 사이의 거리가 가까워져서 회전시 충돌이 일어나 Melt가 흘러내리거나 결정에 균열을 발생시킬 수 있다. 따라서 적절한 Molten Zone의 양은 특히

TSFZ법에 있어서는 절대적으로 결정의 질(Quality)에 영향을 미침을 확인하였다.

본 실험에서는 이러한 Interface의 관찰을 위해 결정이 20mm가량 성장되어 단결정의 존재를 눈으로 확인하게 된 후 모든 전원을 순간적으로 차단하였다. 이는 회전에 의한 Molten Zone의 파손을 막기 위함이었으며 이 부분을 성장 방향에 평행하게 절단하여 Polishing과 Etching을 행한 후 관찰하였다. 그 결과 양호하게 성장이 진행된 결정의 경우는 성장계면(Growth Interface)은 Convex하였으며 원료봉과 Melt의 계면(Interface)은 Flat함을 알 수 있었다. 그러나 두 계면이 모두 지나치게 Convex할 경우에는 성장된 결정과 원료봉의 끝부분이 서로 충돌하는 경우도 발생할 수 있다.

#### 4. 결정의 성장방위 및 미세구조

결정의 성장방향에 수직하게 절단하여 연마(Polishing)한 후 얻은 Laue Back Reflection Pattern을 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 볼

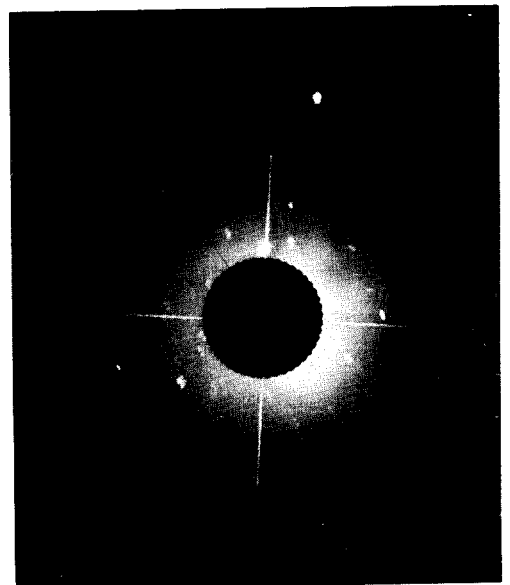


Fig. 9. Laue back reflection pattern.

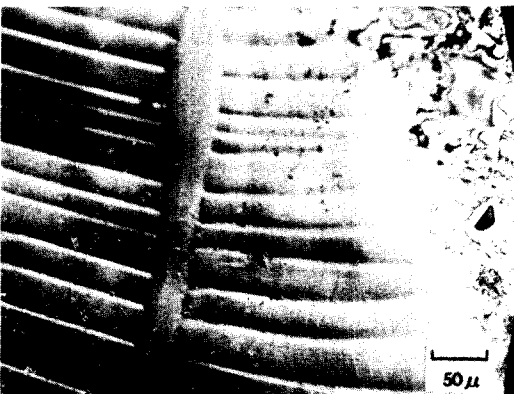
수 있는 바와 같이 두 개의 Spot이 겹친 것으로 보아 Twin현상이 나타났음을 알 수 있었으며 결정은 (111) 방향에서 약 14° 벗어나게 성장되었다.

양호하게 성장된 결정의 경우에는 Laue pattern 상에서 Spot이 뚜렷하게 확인되었으나 Block Boundary 및 Voids, Crack이 발생한 결정의 경우에는 전압과 전류의 양, 노출시간 등을 증가시켜도 Spot이 매우 흐리게 나타나 분석이 불가능하였다.

광학현미경(Optical Microscope)을 통해 미세 구조를 관찰하였다. YIG의 결정 성장에 있어서



(a)



(b)

Fig. 10. Striation in grown crystal (a) (b)(parallel to growth orientation).

가장 쉽게 관찰할 수 있는 것은 Growth Striation이다. Fig. 10은 양질의 결정의 Striation 사진이다. (a)에서는 Thermal Shock에 의해 Crack이 발생하기는 하였으나 Striation이 계속 이어져 있는 것으로 보아 결정성장 후에 Crack이 발생한 것으로 사료되었다. (b)의 우측 가장자리(Periphery)에는 Secondary Phase가 관찰되었으며 기타 Voids등도 관찰할 수 있었다. 이는 Shindo, Kimura 등이 보고한 결과와 일치한다[18].

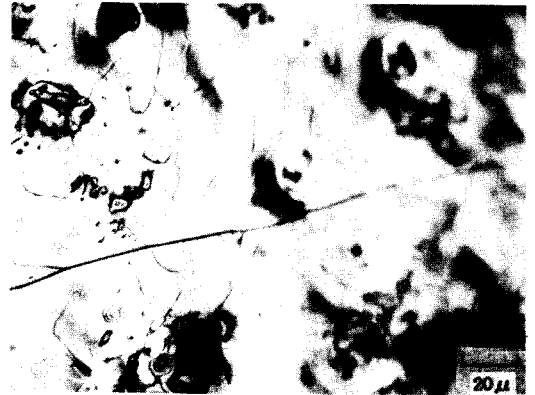


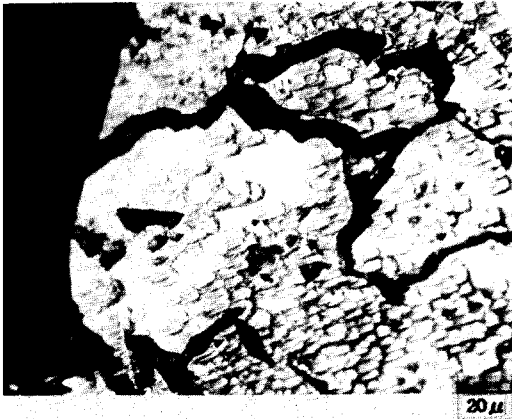
Fig. 11. Cellular growth pattern(perpendicular to growth orientation).



Fig. 12. Dislocation etch pits(perpendicular to growth orientation).

또한 Striation의 불규칙성이나 Mismatching은 Molten Zone과 Boundary Layer의 순간적인 불안정성에 의한 것으로 사료된다. 이는 불규칙한 용융도 그 원인이 될 수 있으나 그 밖에 성장 장치상의 문제 즉 Electrical, Mechanical Noise도 영향을 미쳤으리라 여겨진다.

YIG는 결정의 성장속도가 2mm/hr 이상일 경우에는 양질의 단결정을 얻을 수가 없으며 Cellular Growth를 하는 경향이 있다. Fig. 11은



(a) periphery



(b) block boundary.

Fig. 13. Etch pits pattern of different growth orientation by supercooling:(a) periphery (b) block boundary.

성장 방향에 수직으로 절단하여 연마하고 Etching한 결정의 표면을 관찰한 것으로 Cellular Growth의 양상을 관찰할 수 있으며 Voids의 함입도 관찰할 수 있다.

결정내에서 발생하는 결함 중 Dislocation은 가장 대표적인 예가 될 것이다. Fig. 12는 성장 방향에 수직인 표면의 Etch Pits Pattern이다.

성장된 결정은 300°C의 인산( $H_3PO_4$ )에서 1분간 Chemical Polishing한 후 200°C의 동일한 용액에서 3분간 Etching하는 방법과 끓는 염산(HCl)에서 일정시간 Etching하는 두 가지 방법 중에서 전자의 방법을 택하여 실험하였다.

Fig. 13의 (a)는 Fig. 14와 같은 결정 표면에 있는 것으로서 결정의 가장자리(Periphery)가 성장도중 과냉각(Supercooling)되면서 부분적으로 다른 방향으로 성장된 Block의 Dislocation Etch Pits Pattern이다. 그림에서 알 수 있듯이 결정표면의 과냉각으로 인해 균열(Crack)이 발생됨과 그 주위를 따라 Etch Pits가 Cluster를 이루고 있음을 볼 수 있다. 또한 이러한 형태의 내부구조는 성장속도가 지나치게 빠른 경우에도 발생할 수 있으며 이 경우에는 결정 표면에 원모양의 Secondary Phase가 유입될 수 있다.

Fig. 13의 (b)는 과냉각 된 부분과 그렇지



Fig. 14. Secondary phase in grown crystal(perpendicular to growth orientation).



얇은 부분과의 경계(Boundary)를 나타내었다. 결정의 질(Quality)의 차이를 확인할 수 있다.

YIG는 결정성장시 Hematite나 Orthoferrite와 같은 Secondary Phase가 발생되기 쉽다. Fig. 14에서는 거대한 Secondary Phase를 관찰할 수 있으며 이로 인해 Striation의 진행이 방해받아 끊어졌음을 볼 수 있다.

Secondary Phase의 성분은 EDS(Energy Dispersive X-Ray Spectrometer) 분석 결과 Orthoferrite( $YFeO_3$ )였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 양질의 YIG( $Y_3Fe_5O_{12}$ ) 단결정을 육성하였으며 이때 최적 성장조건은 성장속도 1mm/hr이하, 상호역방향 회전속도 30rpm이었으며  $O_2$  Gas의 Flow Rate은 0.1~0.21/min였다. 결정의 질(Quality)은 소결정도에 의해 좌우 되었으며 소결조건은 원료봉의 경우 소결온도 1490~1510°C, 유지시간은 1.5~2.5hr이고 산소의 Flow Rate는 1~21/min였으며 Solvent Zone의 경우는 1380~1420°C에서 2~3hr이었다. YIG 결정성장시에는 Ferric Oxide의 산소와의 반응성으로 인해 Voids가 발생하기 쉬웠으며 결정 내부에 발생한 Secondary Phase의 성분은 Orthoferrite( $YFeO_3$ )였다. 출발 원료의 순도가 TSFZ System의 존속에 큰 영향을 미쳤다. TSFZ법을 이용한 결정 성장에 있어 가장 중요한 인자(Factor)는 Molten Zone의 Volume이 실험 초기부터 종료까지 일정하게 유지되어야 하는 것, 즉 성장되는 결정의 직경에 변화가 없어야 하는 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 1990년도 교육부 첨단공학(신소재 분야) 학술연구 조성비에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [ 1 ] M. H. Sirvetz and J. E. Zneimer, "Micro-wave Properties of Polycrystalline Rare Earth Iron Garnets", J. Appl. Phys., 29 (3) (1958), 431
- [ 2 ] C. S. Porter, E. G. Spencer and R. C. Lecraw, "Transparent Ferromagnetic Light Modulator using Yttrium Iron Garnet", J. Appl. Phys., 29(3), (1958), 495
- [ 3 ] T. Nakano, H. Yuri, I. Sasaki and K. Kihara, "Evaluation of Optical Isolator Applied YIG Single Crystal Grown by the TSFZ Method", Proc. 4th. Int. Conference on Ferrites, (1984), p 223
- [ 4 ] H. Iwamura, "Optical Isolator and Circulator using  $Y_3Fe_5O_{12}$  Crystal for Optical Fiber Transmission System in Ferrites", Proceedings of the ICF3(1990), Japan.
- [ 5 ] A. H. Boseck, E. G. Spencer, S. C. Abrahams and R. L. Borna, Appl. Phys. Letters, 17(1970), 131
- [ 6 ] W. G. Pfann, Trans., AIME 194, (1952), p 747
- [ 7 ] R. W. G. Wyckoff, "Crystal Structures", John Wiley and Sons Press, (1965), p 222
- [ 8 ] H. J. Van Hook, "Phase Relations in the Ternary System,  $Fe_2O_3$ -FeO- $YFeO_3$ ", J. Am. Ceram. Soc., 45(4), (1962), 162
- [ 9 ] S. Kimura and I. Shindo, "Single Crystal Growth of YIG by the Floating Zone Method", J. Crystal Growth 41(1977), 192
- [ 10 ] M. Saito, "Gas-Bubble Formation of Ruby Single Crystals by Floating Zone Method with an Infrared Radiation Convergence Type Heater", J. Crystal Growth, 71 (1985), 664

- [11] Abid, "Growth Process of Gas-Bubble in Ruby Single Crystal by Floating Zone Method", *J. crystal Growth*, 74(1986), 385
- [12] M. Sekitay and S. Kimura, "Induced Emission Cross Section of Nd:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> Grown by Floating Zone Method", *J. Appl. Phys.*, 54 (1983), 341d
- [13] K. Kitamura, N. H., I. Shindo and S. Kimura, "Interface Shape and Horizontal Variation of Al and Ga Contents in Substituted YIG Single Crystals Grown by the Floating Zone Method", *J. Crystal Growth*, 46(1979), 277
- [14] S. Kimura, I. Shindo, K. Kitamura and Y. Mori, "Evaluation of Yttrium Iron Garnet Single Crystal Growth by Floating Zone Method" *J. Crystal Growth*, 44(1978), 621
- [15] A. W. Vere, "Crystal Growth Principles and Progress", Plenum Press, (1987), p 775
- [16] W. Keller, A. Muhlbauer, "Floating Zone Silicon", Marcel Dekker Inc. (1981), p 108
- [17] R. A. Brown "Interactions Between Convection, Segregation and Interface Morphology", *Advanced Crystal Growth (ISCG6) 6-11* Prentice Hall Press, (1986), p 41
- [18] I. Shindo, Nobuo H, K. Kitamura and S. Kimura, "Single Crystal Growth of Substituted Yttrium Iron Garnets Y<sub>3</sub>Fe<sub>5-x</sub>(Ga, Al)<sub>x</sub>O<sub>12</sub> by the Floating Zone Method", *J. Crystal Growth*, 46(1979), 307