

EFG 법에서 heating system에 관한 연구

한종원, 오근호

한양대학교 무기재료공학과, 서울, 133-791

Study on the heating system by the EFG process

Jong Won Han and Keun Ho Orr

Dept. of Inorganic Materials Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

요 약 유도 가열로 가열하는 자체 제작한 EFG 장치에서 세가지의 다른 heating system을 고안하여 그 특성을 분석하고 다양한 형태의 sapphire 형상 단결정을 성장하였다.

Abstract We made EFG apparatus by induction heating and designed three different heating systems. Analysis of each heating systems and growth of various shaped sapphire single crystals.

1. 서 론

유도 가열은 1831년 M. Faraday가 전자기장의 유도 현상을 발견한 이후로 오랜 기간에 걸쳐서 가열 열원으로 발전하여왔다[1]. 이러한 유도 가열 방식을 사용 목적에 따라서 supply system, motor-alternator system, solid state converter system, radio frequency system 등 용도에 따른 가열 방식이 개발되었다. 단결정을 성장할 때도 성장 재료나 성장 방법에 따라서 가열 방식을 결정해야 한다. 본 연구에서는 높은 작업성과 효율, 일정하고 손쉬운 작동 방식, 순간적인 작동 가능

성, 냉각 방식, 자체 정류기능 등을 고려하여 compact하게 설계된 SCR(Silicon Controlled Rectifier) thyristor inverter type의 유도 가열 장치를 사용하였다. 이 방식은 SCR을 이용하여 교류 전원을 직류로 변환시키고 다시 고주파 전원으로 변환시켜 work coil에 고주파 전원을 공급하면 발열체가 전자장을 흡수하여 발열하는 방식으로 가열한다[2].

EFG법은 A.V. Stepanov, Labelle 등이 제안한 형상결정 성장법으로 도가니 내에 결정의 형상을 결정하는 die 또는 shaper를 넣어 성장하는 결정이 die나 shaper에 의해서 그 형상이 지배되는 결정성장 방식이다[3,4].

Induction heating에서 heating system에 대한 연구는 thermo-capillary model[5], 3차원 model[6], 2차원 model[7] 등 여러 가지 modeling으로 그 온도 분포와 안정한 성장 조건을 연구한 것이 발표되었다. 이와는 다르게 본 연구에서는 자체 제작한 EFG(Edge-defined Film-fed Growth) 장치에서 graphite 발열체를 이용하여 여러가지 형태의 heating system을 고안하여 결정을 성장하고 그 특성을 분석하여 경제적이고 안정한 성장 방법을 개발하여 sapphire ribbon, rod, tube 등의 형상 단결정을 성장하였다.

2. 실험 방법

2.1. 실험 장치

결정성장 장치는 성장로, 인상장치, 가열장치, 냉각장치 등으로 구성되어 있으며, Fig. 1은 자체 설계 제작한 EFG 장치의 사진으로 SCR type의 유도가열장치, 성장로, 인상장치, 냉각장치 등으로 구성되었고 냉각수는 20~25°C로 일정하게 순환하여 각기 다른 heating system에 대해서 손실되는 열량이

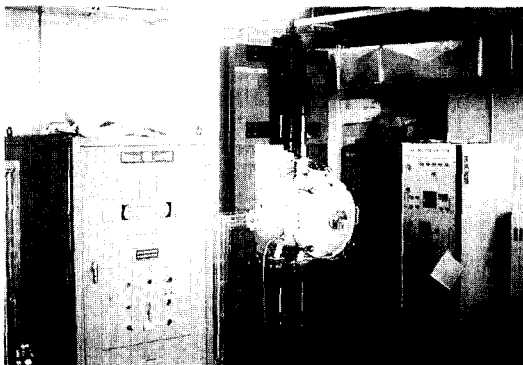


Fig. 1. Photograph of EFG apparatus.

일정하게 유지되도록 하였다. 관찰을 위해 성장로의 위부분과 정면에 시창을 만들어 결정이 성장하는 모습을 관찰하였다.

2.2. 실험 방법

출발 원료로 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 를 사용하였다. 도가니, die, lid, screen 등은 molybdenum을 사용하였고 발열체로는 graphite 그리고 보온 단열재로는 graphite felt와 carbon wool 그리고 alumina castable을 사용하였다. Heating system을 연구하기 위해서 서로 다른 세가지 형태의 heating system을 제작하여 결정을 성장하였고 그 결과를 분석하여 경제적이고 안정한 성장 방법을 연구하였다. Fig. 2, 3, 4에 본 연구에 사용하였던 A, B, C, 3가지 형태의 heating system의 모식도를 나타내었다. 이러한 형태의 heating system은 결정성장시 위쪽의 시창을 통해 결정이 성장하는 광경을 관찰할 수 있게하기 위한 방법과 EFG법에서 가장 파손되기 쉬운 die의 파손을 고려하여

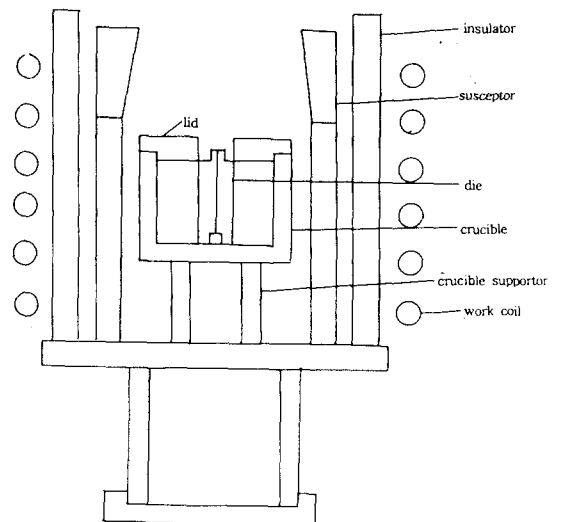


Fig. 2. Heating system A.

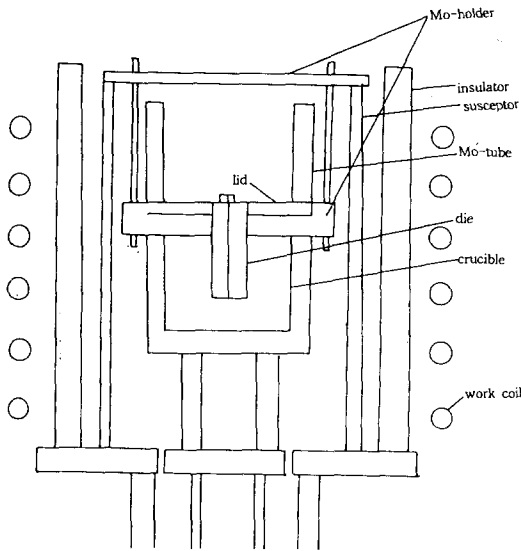


Fig. 3. Heating system B.

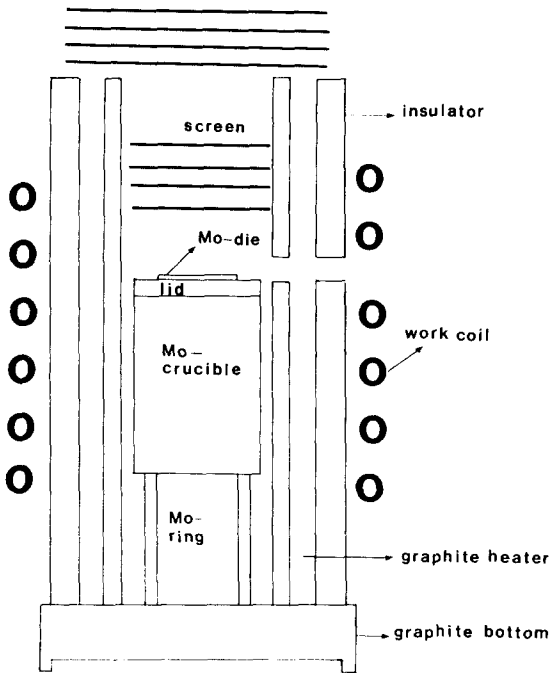


Fig. 4. Heating system C.

도가니를 die와 분리할 수 있는 heating system 그리고 정면의 시창을 통해서 die-top을 관찰할 수 있게 만든 세가지 형태의 heating system에 대하여 연구하였다.

Fig. 2의 A는 die-top을 성장로 위쪽의 시창으로 관찰하기 위한 것으로 graphite 받침 위에 crucible supporter를 놓고 그 위에 도가니를 올려놓고 도가니 내에 die를 설치하고, die를 고정시키고 die의 온도 구배를 조절하기 위해서 lid를 올려놓았다. 이 경우에는 위쪽에서 관찰을 해야하기 때문에 lid위에 screen과 같은 radiation reflector를 설치할 수가 없었다. 따라서 lid의 크기 및 두께를 조절하여 die-top을 보온하였다. Graphite 발열체는 2단으로 제작하여 afterheater의 역할을 할 수 있도록 하였고 그 외부에 insulator를 설치하여 보온하였다. Fig. 5는 사용한 도가니, die, lid의 실제 모습이다. Fig. 3은 실험 종료 후 도가니와 die를 분리할 수 있는 것으로 die를 도가니 내부에 설치하지 않고 molybdenum holder를 설치하여 lid를 고정시키고 lid에 die를 고정시키고 도가니를 상하로 이동시켜 die가 파손되더라도 도가니는 반복 사용할 수 있게 제작하였다. 위쪽 시창만으로 관찰할 때는 A와 같이 위쪽으로 관찰하기 때문에 radiation reflector를 설치할 수 없었지만 정면 시창으로 관찰할 때는 die-top을 보온하기 위해서 lid위에 radiation reflector를 올려놓았으며 이때 graphite에 120° 간격으로 3개의 시창을 만들었다. Fig. 6에 도가니, die, lid와 holder를 나타내었다. Fig. 4의 C는 graphite 받침 위에 supporter를 놓고 그 위에 도가니를 올려놓았으며, die를 도가니 내부에 설치하고 lid로 고정된 후 그 위에 radiation reflector를 이중으로 설치하여 보온하였고, 정면의 시창으로 die-top을 관찰하는 형태로 제작하였다. Fig. 7에 도가니, die, lid

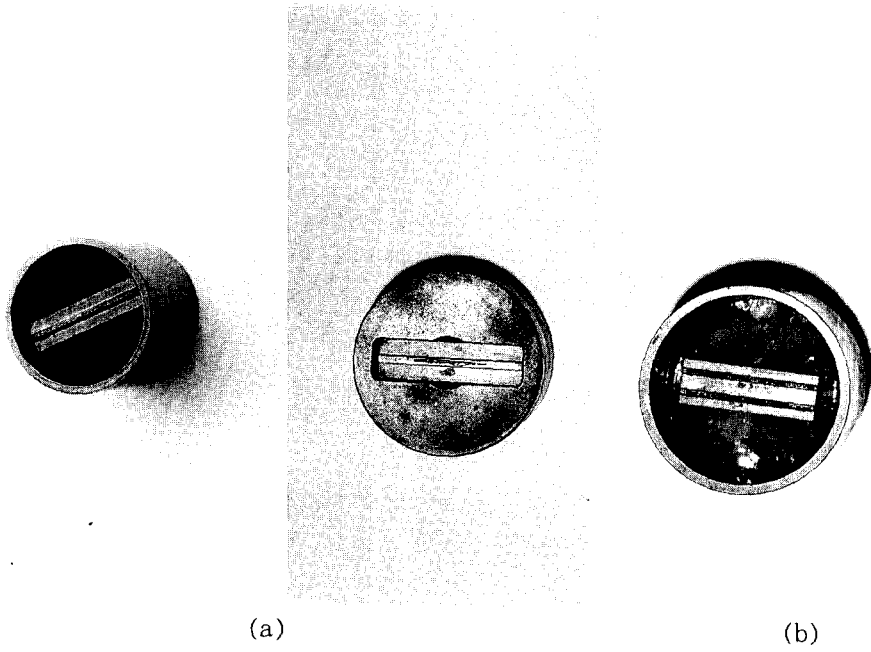


Fig. 5. Photograph of EFG die, crucible and lid system A). (a) single ribbon and (b) double ribbon.

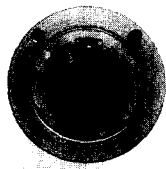


Fig. 6. Photograph of EFG die, crucible and lid system B).

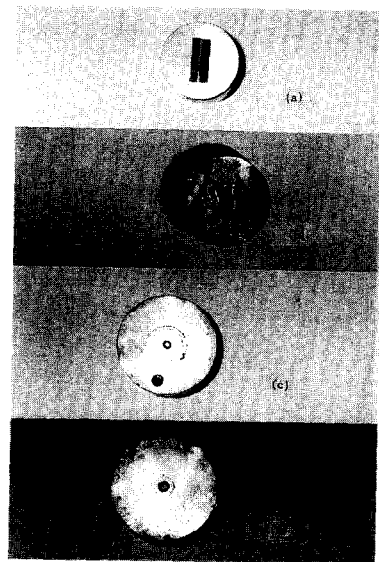


Fig. 7. Photograph of EFG die, crucible and lid system C). (a) single ribbon, (b) triple ribbon, (c) tube and (d) rod.

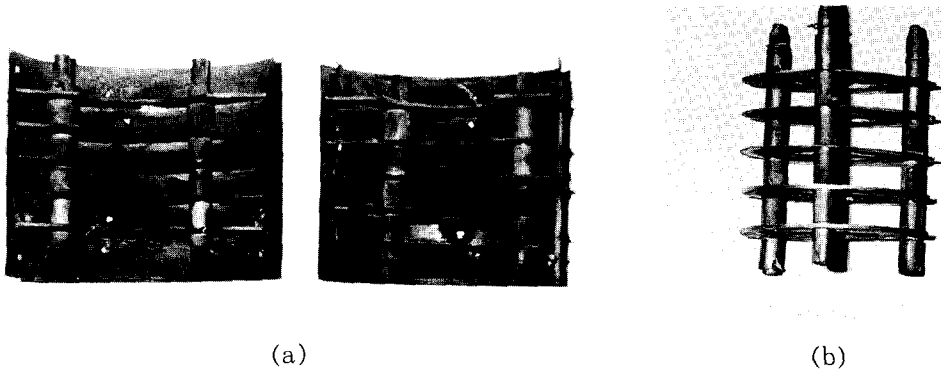


Fig. 8. Photograph of radiation reflector. (a) upper screen and (b) inside screen.

를 나타내었고, Fig. 8에 사용한 radiation reflector를 나타내었다.

3. 고 찰

3.1. A system

A는 도가니 위쪽으로 아무런 보온 장치가 없어서 결정의 성장은 가능했지만 die-top의 온도를 2100°C 정도 유지하기 위해서 28~30 kW의 power를 공급해 주어야 했다. 또한 die위의 온도구배가 급격히 형성되어 결정을 빠르게 인상하면 thermalelastic strsse로 인하여 균열이 발생하기가 쉬워 인상속도가 0.06~0.3 mm/min 정도로 나타났다. 또한 seeding시 die의 파손이 쉽게 일어났다.

3.2. B system

Die가 도가니 내부에 있는 경우 die가 파손되면 도가니도 사용하지 못하는 경제적인 낭비를 극복하기 위해서 B를 고안했다. 이 경우에는 원료를 도가니에서 용융시킨 후 도가니를 상승하여 die가 도가니 내로 들어가

게 만들어 결정을 성장하고 성장이 종료되면 도가니를 내려 die와 도가니를 분리할 수 있는 장점이 있다. 그러나 도가니가 상하로 움직여야 하므로 하부의 보온이 어려웠다. Heating zone도 A나 C보다 더 길어야 결정 성장을 할 수 있었다. 결정성장시 하부로 열손실이 심해서 radiation reflector를 사용하지 않은 경우에는 더 높은 power를 공급해야 했으며, radiation reflector를 사용한 경우에는 하부로의 열손실이 심해 die-top의 온도는 17~19 kW에서 2100°C 정도 유지가 가능했으나 하부로 급격한 온도 구배가 나타나는 것으로 관찰되었다.

3.3. C system

이 경우 graphite에 120° 간격으로 3개의 시창을 만들고 die 두개의 radiation reflector를 설치하여 보온하였고, 하부도 graphite felt로 보온하였고, graphite 외부에 carbon wool로 다시 보온하였다. 이 경우 power 14~15 kW에서 die-top의 온도를 2100°C 정도로 유지하는 것이 가능했고 reflector의 사용으로 온도구배도 완만하여 결정의 형상에 따라서 0.5~1mm/min의 속도로 성장이 가능했

고 안정한 성장을 할 수 있었다. 또한 A, B로는 성장하기 어려웠던 3개의 ribbon 단결정을 동시에 성장할 수 있었다.

4. 결 론

$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 는 고융점 산화물이기 때문에 이 온도에서 대부분의 열은 radiation으로 이동하므로 따라서 radiation을 조절하여 안정한 성장을 할 수 있는 온도구배를 만드는 것이 가장 중요하였다. 또한 결정성장이 mensicus에 의해서 좌우되기 때문에 mensicus가 안정한 상태를 유지하도록 die-top의 온도를 조절하는 것이 중요하였다. 실험 결과 Fig. 9에 나타낸 것과 같이 A는 die-top위로 급격한

온도구배를 나타내고 있으며 B는 thermal reflector의 영향으로 위로는 완만한 온도구배를 나타내지만 도가니 하부로 열손실이 심하게 나타났다. 따라서 A, C보다 더 긴 heating zone을 가져야 안정한 성장을 할 수 있었다. 그러나 3장의 ribbon을 성장하기는 어려웠다. Fig. 9에 실험을 통하여 얻은 온도 분포를 개략적으로 나타내었다. A의 경우는 상부의 온도구배가 급격했으며 B의 경우에는 하부의 온도구배가 심하였고 이를 절충하여 C와 같이 만들었을 때 안정한 상태에서 다양한 형태의 결정을 성장할 수 있었다. Fig. 10에 이 방법으로 성장한 여러 가지 형태의 결정의 사진을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 공업기반기술개발사업과제로 상공자원부와 남성세라믹(주)의 연구비 지원으로 연구되었다.

참 고 문 헌

- [1] J. Davis and P. Simpson, Induction heating handbook, McGraw-hill (1976) p. 1.
- [2] 부리전기(주) 기술자료집, Inducting heating (1991) A-5.
- [3] P.I. Antonov and S.P. Nikanorv, J. of Crystal Growth 50 (1980) 3.
- [4] H.E. Labelle, Jr. and A.I. Malvsky, Mat. Res. Bull. Vol. 6 (1971) 571, 581, 681.
- [5] P.M. Gresho and J.J. Derby, J. of Crystal Growth 85 (1987) 40.
- [6] S. Rajendran, K. Holmes and A. Menna,

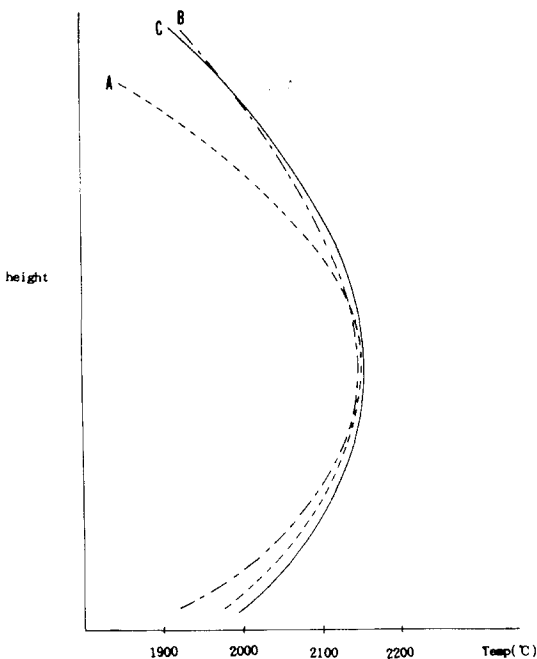


Fig. 9. Schematic temperature distribution of system A, B and C.

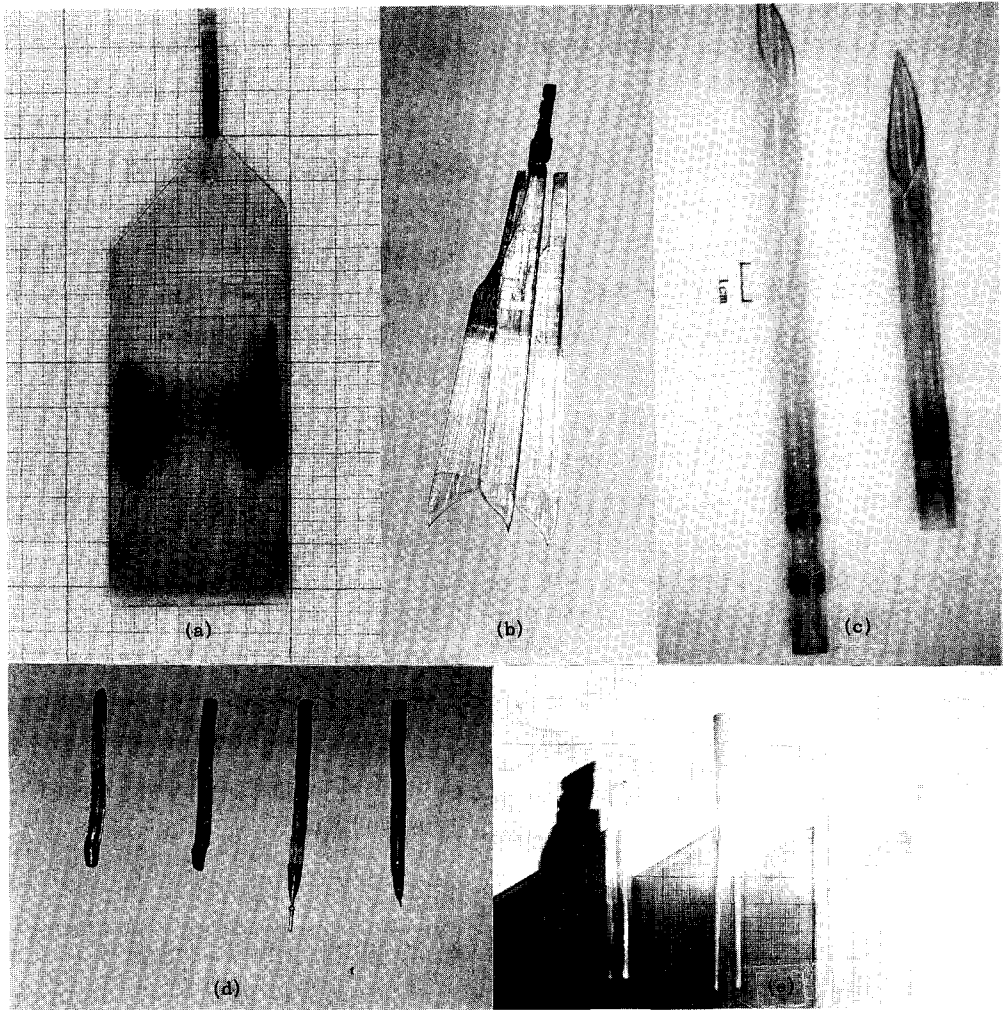


Fig. 10. Photograph of shaped single crystals. (a) single ribbon, (b) triple ribbon, (c) tube, (d) rod and (e) double ribbon.

J. of Crystal Growth 137 (1994) 77.

[7] S. Rajendran, C.C. Chao, D.P. Hill, J.P.

Kalejs and V. Overbye, J. of Crystal Growth 109 (1991) 82.