

Magnetic levitation force and trapped magnetic field of top-seeded melt-processed YBCO superconductors with multiseeding

다중 종자결정성장법으로 제조한 YBCO 초전도체의 자기 부상력과 포획자력

Chan-Joong Kim, Young A Jee, Ho-Jin Kim,* Jin-Ho Joo,* Young-Hee Han,** Sang-Jun Kim and Gye-Won Hong

김찬중, 지영아, 김호진,* 주진호,* 한영희,** 김상준,** 홍계원

Korea Atomic Energy Research Institute, *Sungkyunkwan University, **Korea Electric Power Research Institute

한국원자력 연구소, *성균관대학교, **전력연구원

Magnetic levitation forces and trapped magnetic fields of top-seeded melt growth-processed YBCO superconductors with multiseeding were studied. The number of seeds was varied from one to six. The surface magnetic field of the prepared YBCO samples was dependent on the number of the seeds. The trapped magnetic field of the top surface decreased with increasing the number of the seed. Particularly, it drastically decreased at the YBCO grain boundary, probably due to the weak rink nature of the boundary. The magnetic levitation force also decreased with increasing the number of the seeds, similar to the variation of the surface magnetic field.

1. 서론

고온 초전도체의 자기 부상력은 초전도체에 가해진 외부자기장의 크기와 초전도 결정에서 형성되는 차폐전류의 크기와 비례한다 [1]. 차폐전류는 초전도 결정내에 제한되고 그 크기는 결정립 크기에 비례한다. 따라서 부상력을 높이려면 결정립이 큰 초전도체를 만들어야 한다. 용융공정으로 제조한 YBCO 초전도는 플럭스 피닝이 크

고 결정립을 수 cm 크기로 크게 성장시킬 수 있기 때문에 자기 부상력이 가장 뛰어나다. 용융공정 중에서도 결정립이 큰 초전도체를 제조하는 공정은 YBCO 성형체 위에 종자를 심고 열처리하는 종자 결정성장법이다 [2]. 이 방법은 YBCO 성형체위에 종자결정을 심고 성형체를 부분적으로 녹인 다음, 서서히 냉각하여 종자로 부터 YBCO 초전도 결정이 생성되게 하는 공정이다. 이 공정으로 제조할 수 있는 초전도 결정의 크기는 수

cm 정도이다. 그러나 초전도 결정을 크게 키우려면 1000 °C 부근의 온도에서 수 백 시간의 열처리 필요하다. 따라서 생산공정의 경제성을 확보하기 위해서는 단 시간 안에 초전도체를 제조할 수 있는 신 공정의 개발이 요구된다.

공정을 개선하려면 두 가지 관점에서 접근해야 한다. 첫 번째, 초전도결정의 성장속도를 증가시켜 공정시간을 단축하여야 한다. 용융 열처리 공정에서 초전도 결정의 성장속도가 느린 이유는 초전도 결정이 성장하는 액상의 휘토티원소 (YBCO의 경우는 이트륨) 용해도가 작기 때문이다. 액상에 대한 이트륨의 용해도는 온도, 분위기 압력등을 조절하여 높일 수 있다. 그러나 아직까지 이 변수들을 조절해서 초전도 결정의 성장속도를 증가시켰다는 보고는 없다.

또 다른 방법은 종자결정 성장 시 사용하는 종자의 수를 제어하는 방법이다. 이제까지 적용된 종자결정 성장법에서는 YBCO 성형체 윗면에 1 개의 종자를 올려놓은 후 용융 열처리하였다. 만약, 성형체 윗면에 n 개의 종자결정을 올려놓고 결정을 성장시키면, 각각의 종자에서 초전도 결정들이 독립적으로 성장하므로, 이론적으로는 초전도체의 성장속도를 n 배로 증가시킬 수 있다. n 개의 종자를 모두 같은 방위로 성형체 위에 심으면 시편 전체의 결정방위를 한 방향으로 만들 수 있다. 그러나 이 경우 결정 입계의 특성을 조절하는 것이 중요하다. 초전도체의 물성, 특히 포획자력은 입계특성에 따라 결정되므로 n 개 결정입계를 잘 결합시켜 주어야 한다. 만약, Y123 결정들의 결정입계가 약하게 결합되면 이로 인해 결정입계에서 초전도 특성이 저하될 수 있다. 초전도결정을 단 시간에 성장시키면서 물성 저하를 최소화하려면 결정방위가 동일한 종자결정을 사용하고 성장한 결정입계의 미세조직을 적절히 제어하여 각 결정들을 강하게 결합시켜야 한다. 본 연구에서는 여러 개의 종자결정을 사용하여 종자결정성장법으로 YBCO 초전도체를 제조한 후, 종자결정 수에 따른 초전도체의 자기 부상력과 포획자력을 측정하였다. 얻어진 결과는 초전도 제조 신공정 개발의 가능성 기초자료로 활용하였다.

2. 실험방법

여러 개의 종자를 심어 Y123 결정을 성장시키는 다중 종자결정성장법으로 YBCO 초전도체를 제조하였다. 종자결정은 YBCO 보다 용융점이 50 °C 높은 SmBCO 결정을 사용하였다. 이 종자결정은 Sm123 분말에 Sm211을 몰비로 40% 첨가하여 고전적인 용융공정으로 제조한 것이다. YBCO 초전도체를 만들기 위해 1 몰 Y123 분말과 0.4 몰 Y211 분말을 섞어 YBCO 성형체를 만든 다음, SmBCO 종자를 YBCO 초전도 성형체 위에 올려 놓고 성형체 바닥에 MgO 단결정 기판을 깔았다. YBCO 성형체는 표면 핵생성을 억제[3,4]하기 위하여 표면을 Yb_2O_3 분말로 코팅하였다.

종자 수는 1-6 개까지 변화시켰으며, 성형체 윗면과 종자의 c-축이 수직하도록 하였다. 준비된 성형체는 전기로에서 용융열처리 하였다 (그림 1 참조). 시편을 YBCO 성형체와 SmBCO 종자의 용융점 중간온도로 가열하여 종자는 녹지 않고 YBCO 성형체 만 부분적으로 녹는 온도에서 적당한 시간 유지한 후, 다시 Y123 상이 생성되는 온도로 서서히 냉각시킨 다음, 일정한 온도에서 150 시간 유지하여 Y123 결정이 SmBCO 종자에서 성장되도록 하였다. 성장이 완료된 시편을 전기로에서 꺼내어 다시 산소 분위기 로에서 다시 500°C, 50 시간 가열하였다.

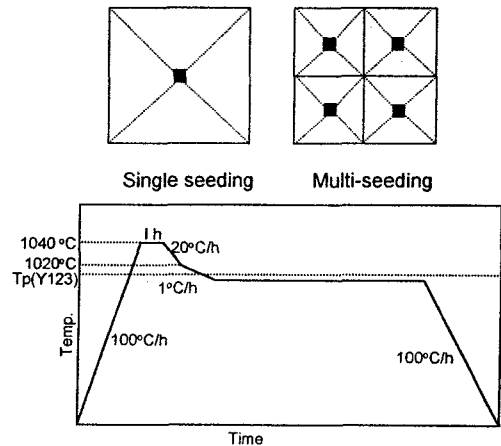


그림 1. 다중 종자결정법의 개념과 용융 열처리 공정

YBCO 초전도시편들은 액체질소 용기에서 냉각시킨 후 초전도체의 자기 부상력과 표면 포획자력을 측정하였다. 시편은 자력냉각과 무자력 냉각의 두 가지 방법으로 냉각시켰다 (그림 2 참

조). 자기 부상력 측정 시편은 무자력냉각법으로, 표면 포획자력 측정 시편들은 자력냉각법으로 냉각하였다. 자기부상력 측정에는 직경이 각각 4500 Gauss과 15 cm인 Nd-B-Fe 영구자석을 사용하였고, 표면자력은 시편 상부면 위 1 mm 떨어진

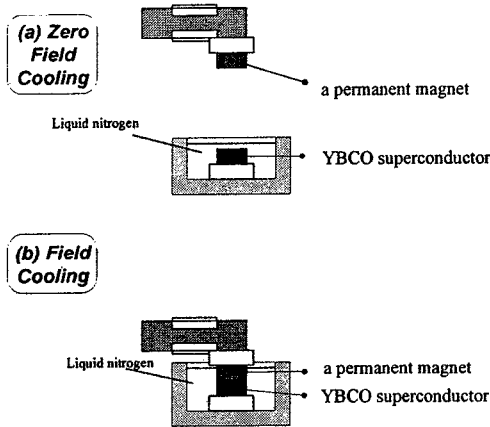


그림 2. YBCO 초전도체의 냉각방법: (a) 무자력 냉각과 (b) 자력냉각

곳에서 Hall probe를 이동하면서 자력분포를 측정하였다. 이 때 Y123 결정립계의 결합특성을 파악하기 위하여 두 결정립간의 결정립계를 중앙점으로 설정한 후, 약 25 마이크론 간격으로 시편의 양 끝단까지 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 다중 종자결정법으로 제조한 YBCO 초전도체의 상부 표면 사진이다. 각 시료에는 성형체 상부에 심은 종자 수 만큼의 Y123 결정들이 성장한 것을 볼 수 있다. 각 초전도 결정들은 종자 위치에서 정사각형 형태를 만든 다음 대각선 방향을 경계로 a와 b 축으로 성장된 모습을 보인다.

제조된 시편들에서 종자를 제거한 후 각 시편의 자기 부상력을 측정하였다. 그림 4는 각각 1 개, 3 개, 6 개의 종자를 사용하여 제조한 시료의 자기부상력 곡선이다. 각 시편 모두 유사한 형태의 히스테리시스 곡선을 보인다. 1 개의 종자를 사용하여 제조한 시편의 최대 부상력은 약 4.3 kgf 이다. 3 개의 종자를 사용하여 제조한

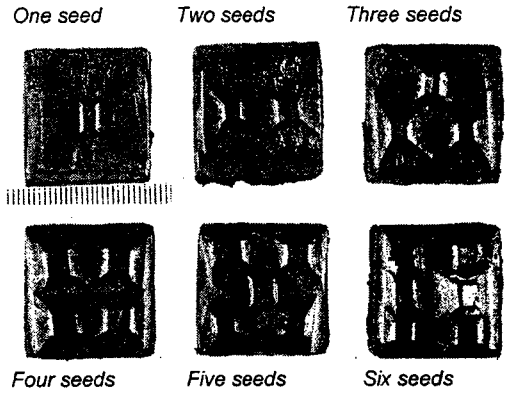


그림 3. 다중 종자결정법으로 제조한 YBCO 초전도체

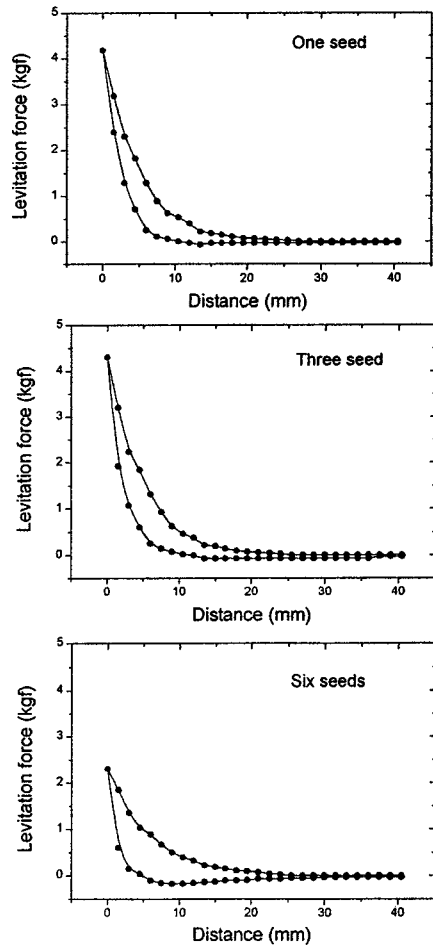


그림 4. 1 개, 3 개, 6 개의 종자를 사용하여 다중 종자결정법으로 제조한 시료의 자기 부상력

시편의 부상력이 4.4 kgf로 1 개의 종자를 사용한 시편의 부상력과 비슷하다는 것이다. 이 시편은 1 개의 종자를 사용하여 제조한 시편보다 결정입계를 많이 포함하고 있지만 부상력은 비슷하게 측정되었다. 그러나 6 개의 종자를 사용하여 제조한 시편의 부상력은 2.5 kgf로 상대적으로 작다.

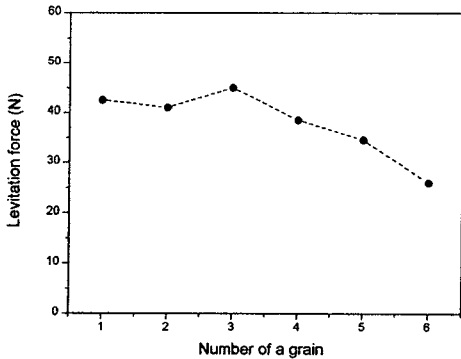


그림 5. 종자 수에 따른 YBCO 초전도체의 자기 부상력

그림 5에는 종자결정 수에 따른 평균 자기 부상력 변화를 나타내었다. 종자 수가 1 개에서 3 개까지는 자기 부상력이 4 kgf 이상으로 거의 동일하다. 종자가 4 개가 되면 1 개의 경우의 약 90 %의 부상력을, 6개에서는 60 %의 부상력을 보인다. 종자 수에 따른 자기 부상력 감소의 원인은 약결합한 Y123 결정 입계가 많기 때문인 것으로 사료된다. 종자 수가 3 개인 시편의 부상력이 1 개인 경우와 비슷한 결과에 주목할 필요가 있다. 종자를 다 수 사용할 경우 생성되는 결정의 수가 많아지고, 결정입계 수도 늘어난다. 그림에도 불구하고 종자 수가 3 개까지는 부상력이 떨어지지 않았다. 이는 결정입계가 존재하더라도 그 수와 결합상태를 잘 제어하면 부상력 감소를 최소화할 수 있음을 의미한다.

그림 6은 종자를 1 개, 2 개 3 개를 사용하여 제조한 YBCO 초전도체의 표면 자력분포이다. 종자를 1 개 사용하여 제조한 시편의 경우에는 시편 중앙 종자위치에서 최대 자력 3500 G, 중앙에서 멀어질수록 자력이 반비례하는 대칭적 자력 분포를 나타낸다. 이와 같은 자력 분포는 단결정형 시편에서 관찰되는 형태로 이 시편이 종자의 단일 결정으로 잘 성장되었음을 의미한다.

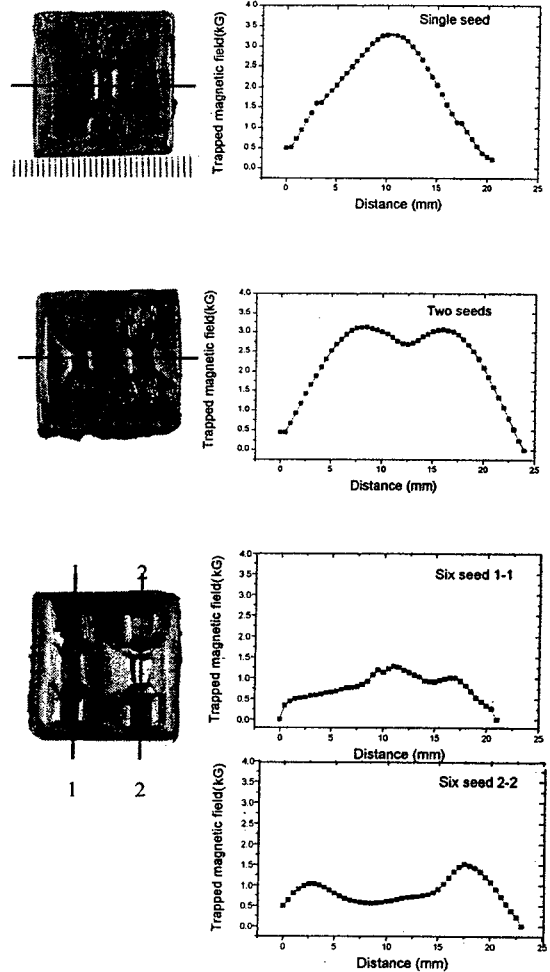


그림 6. 다중 종자법으로 제조한 YBCO 초전도체의 표면 포획자력 분포

반면 종자를 2 개 사용해서 제조한 시편의 자력분포에는 두 종자 위치에서 최대점이 있고 두 결정의 계면에 해당되는 부분(시편 중앙)에서 변곡점이 있다. 최대점에서의 자력은 3200 G 이고 변곡점에서는 2900 G의 자력이 포획되어 있다. Schatzle의 연구 결과[5]에 의하면, 다중 종자결정법으로 제조할 경우 결정입계에 잔류액상이 많이 존재하게 되어 이 부분의 초전도결합이 매우 약해져서 자력이 거의 포획되지 않는다고 하였다. 그러나 본 연구결과에서는 결정입계에서도 최대치의 약 50 % 이상의 자력이 포획되었다. 이는 두 연구의 시편 제조 조건이 달랐기 때문으로, 본 연구에서 사용된 시편의 결정입계가 좀

더 강한 결합을 하고 있는 것으로 판단된다. 6개의 종자를 심어서 성장시킨 YBCO 초전도체에서의 자력 분포는 여러 개의 변곡점이 나타날 뿐 아니라 포획자력 양도 상대적으로 작다. 다수의 종자를 사용하면 크기가 작은 여러 개의 초전도 결정이 성장되므로 포획자력의 양도 상대적으로 작아지기 때문이다. 자력 분포 곡선에서 최대 포획자력은 1500 - 2000 G 정도로 다른 시편에 비해 작다.

4. 결론

본 연구에서는 YBCO 초전도체 제조에 대한 다중 종자결정 성장법의 적용 가능성에 대해 살펴 보았다. 그 결과 YBCO 초전도체의 자기 부상력과 표면 포획자력이 초전도 표면에 심은 종자 수에 반비례한다는 것을 알 수 있었다. 종자를 3개 사용할 경우 자기 부상력은 1개의 종자를 사용한 경우와 비슷하다. 6개의 종자를 사용할 경우, 1개의 종자를 사용하는 경우의 약 60%의 부상력을 얻을 수 있었다. 표면 포획자력도 자기 부상력과 유사한 경향을 보인다. 1개의 종자를 사용한 시편의 경우 약 3500 G가 포획된 반면, 6개의 종자를 사용한 경우는 1500 - 2000 G의 자력이 포획되었다. 자기 부상력과 포획자력 모두 YBCO의 결정립 크기 및 결정입계의 결합도에 의해 좌우되는 것으로 판단된다. 열처리 공정의 최적화를 통해 결정입계 미세조직을 최적화한다면 입계의 초전도결합을 강하게 만들 수 있으며, 이로 인한 물성 향상을 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력연구원의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] M. Murakami, T. Oyama, H. Fujimoto, T. Taguchi, S. Gotoh, Y. Shiohara, N. Koshizuka and S. Tanaka, Japan J. Appl. Phys. 29 L1991 (1990).

[2] M. Morita, S. Takebayashi, M. Tanaka, K. Kimura, K. Miyamoto, K. Sawano, Adv. Supercond. III 733 1991.
 [3] T. Meignan, P.J. McGinn, C. Varanasi, Supercond. Sci. Technol. 10 109 1997.
 [4] C-J. Kim, Y. A. Jee, S-C. Kwon, T-H. Sung and G-W. Hong, Physica C 315 263 1999.
 [5] P. Schatzle, G. Krabbes G. Stover, G. Fuchs and D. Schlafer, Supercond. Sci. Technol. 12 69 1999.