

대면적 YBCO 고온 초전도 벌크 자석 및 조작용기 개발

한상철^{1,a}, 박병준¹, 정세용¹, 한영희¹, 이종원²

¹한전 전력연구원 미래기술연구소

²한밭대학교 신소재공학과

Development of Large-sized YBCO High Temperature Superconductor Bulk Magnets and Actuator

Sang-Chul Han^{1,a}, Byung-Jun Park¹, Se-Yong Jung¹, Young-Hee Han¹, and Jong-Won Lee²

¹ Future Technology Research Laboratory, Korea Electric Power Research Institute, Daejeon 305-760, Korea

² Department of Advanced Materials Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

(Received June 20, 2015; Revised June 24, 2015, 2015; Accepted June 24, 2015)

Abstract: For the practical application of a YBCO superconductor bulk, the superconductor bulk magnet with high magnetic field on a large area surface should be fabricated. To make this, YBCO single crystal bulks with fine Y_2BaCuO_5 (Y211) particles have been prepared by the top-seed melt growth(TSMG) method with $YBa_2Cu_3O_x$, Y_2O_3 , and CeO_2 mixing precursor. By using Y_2O_3 instead of Y_2BaCuO_5 as precursor, the manufacturing process became simpler and more economical. The microstructures, trapped field and critical current density of the various conditioned YBCO bulks have been observed, analyzed and measured. The different characteristic values of the several samples have been analyzed from the viewpoint of their microstructures. We have developed a 8×12 cm size superconductor bulk magnet, up to 3 T class, by using the 4 T class-high field superconducting magnetizer and confirmed the applicability of the transmission level circuit breakers by measuring the strength and speed of the superconductor bulk magnet actuator.

Keywords: $YBa_2Cu_3O_x$, Single crystal, Superconductor bulk magnet

1. 서론

초전도 벌크 자석 기술은 초전도 벌크를 제조하는 초전도재료 기술을 핵심으로 하고 착자기술과 냉동기술을 주변기술로 갖고 있다. 초전도 재료기술을 바탕으로 한 초전도산업은 초전도체가 갖고 있는 전기저항 제로 특성, 자속선 핀닝 특성, 조셉슨 특성 등의 성질을 응용하는 새로운 산업분야로 고부가가치의 기술파급 효과가 큰 21세

기 미래성장 산업으로 기대되고 있다. 특히 전력·에너지·환경 분야로의 초전도기술의 응용은 기기의 손실저감, 대용량화, 고성능화, 대전류·고자장 이용 등의 다양한 목적으로 실용화가 크게 기대되고 있다.

고자장 초전도 벌크 자석 기술은 최첨단의 기술로 초전도 모터, 자기분리기 등에 바로 적용이 가능하고, 전력산업분야에서는 초고압 및 송전급 차단기에 적용되어 신뢰성과 안정성 향상에 지대한 공헌을 할 것으로 기대되며, 부가기술인 냉동기술은 초전도 전력기기의 상용화를 앞당길 것으로 기대된다.

YBCO 고온 초전도 단결정이 임계온도 아래에서 외부자장을 포획하여 고자장을 갖는 벌크자석이 되기 위해서는 $YBa_2Cu_3O_x$ (Y123) 초전도 단결정 내에 자장 고정점

a. Corresponding author; schan@kepco.co.kr

(flux pinning point)으로 알려진 Y_2BaCuO_5 (Y211) 비초전도상이 미세하면서 균질하게 다량으로 분산되어 있어야 한다. 고자장 포획능력을 갖는 초전도 단결정을 이용한 많은 응용기술들이 개발 또는 연구되어지고 있으며, 초전도 산업분야에서 기초가 되는 초전도 단결정 제조방법에 대한 여러 연구가 이루어지고 있다. 기존의 제조방법에 의해 제조된 단결정에 비해 특성이 우수하고, 제조 비용면에서 경제성이 높으며, 대량생산이 용이한 제조방법에 대한 연구가 진행 중이다. 기존 YBCO 고온 초전도 단결정 제조에는 TSMG (top seed melt growth) [1], infiltration method [2,3], QMG (quench and melt growth) [4], PMP (powder melt process) [5] 방법 등이 이용되어 졌고, 이 중에서 TSMG법이 단순한 공정으로 인하여 가장 널리 사용되고 있으나 이 방법은 고온 초전도 단결정의 특성을 결정짓는 Y_2BaCuO_5 의 미세화에 한계를 가지며 고가의 $YBa_2Cu_3O_x$ 나 Y_2BaCuO_5 전구체 분말을 사용하기 때문에 제조원가 상승의 부담이 있어서 고온 초전도 단결정의 활용 범위를 제한하는 요소가 되고 있다. Y_2BaCuO_5 의 미세화 시키는 제조방법으로 infiltration method이 있으나 다른 제조방법에 비해 제조비용과 공정 면에서 효율성이 떨어지고, Seed 하부에서 초전도 단결정의 특성이 저하되는 단점을 갖는다. $Y_2BaCuO_5/BaCuO_2/CuO$ 전구체 분말을 사용하는 PMP방법은 제조 공정은 용이하나 Y_2BaCuO_5 을 이용함으로 제조비용이 많이 드는 단점을 갖는다.

본 연구에서는 우수한 초전도 특성 및 경제성을 갖는 고온 초전도 단결정 제조방법을 확립하기 위해 기존에 개발되었던 SLMG 방법 [6,7]의 조성과 열처리 방법을 변화시키고 종자결정성장법과 결합하여 개선된 방법을 개발하였다. 새로운 조성인 $0.9Y_2O_3 + 2.4BaCuO_2 + CuO$ 조성과 $SmBa_2Cu_3O_x$ 종자를 이용한 고액용융성장법으로 초전도 단결정을 제조하고 미세구조와 초전도특성 평가를 통해 타 제조방법과의 장단점을 비교하여 개선된 초전도 단결정 제조방법을 제시하고 제조한 단결정을 이용하여 3 T 이상의 고자장을 갖는 초전도 벌크자석과 이것을 적용한 초전도 조작기를 구현하고 결과를 제시하고자 한다.

2. 실험 방법

$YBa_2Cu_3O_x$ 단결정 제조를 위한 초기 분말은 $Y_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_x$ 에 0.5%의 CeO_2 가 첨가된 것을 사용하였다. 이 분말을 각각 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 및 $8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ 의

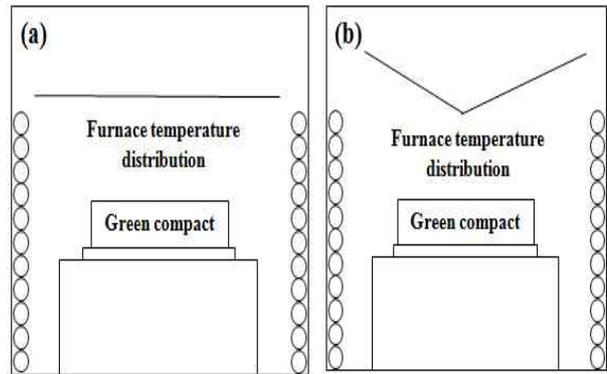


Fig. 1. Schematic of temperature distribution in the furnace. ((a) general furnace, (b) modified furnace).

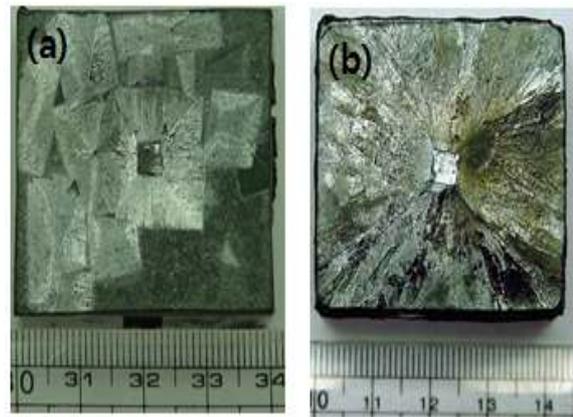


Fig. 2. Top view of superconductor fabricated by Y123+0.4Y211 precursor. (a) without temperature gradient and (b) with temperature gradient.

금형에 넣고 유압프레스를 이용하여 단축방향으로 가압한 후 CIP (cold isostatic press) 처리를 한 후에 종자를 올려놓고 $1,045^\circ\text{C}$ 에서 2시간 부분 용융시킨 다음 $1,020^\circ\text{C}$ 까지 냉각한 후 980°C 까지 0.25°C/hr 의 속도로 서냉하여 단결정을 성장시키는 열처리 공정으로 진행하였다. 열처리 시 내부의 온도분포는 다음과 같은 2종류의 분포를 가지도록 하였다.

첫째는 그림 1.3(a)에서 보는 바와 같이 온도구배가 없이 반경방향으로 균일한 온도분포를 유지하도록 하였으며, 둘째는 그림 1.3(b)에서 보는 바와 같이 시편 중심부가 바깥부보다 온도가 낮은 온도구배를 유지하도록 하였다. 자장분포 측정은 77 K의 액체질소에서 Nd계 0.4 T

영구자석을 이용하여 field cooling을 한 후 자석을 제거하고 gauss meter를 이용하여 YBCO 초전도 단결정의 포획자장량을 측정하였다. 또한, INSTRON model 8871 장비를 이용하여 zero field cooling한 후 부양력 실험을 하여 물성 특성을 평가하였으며 미세 조직 분석은 한밭대에서 올림푸스 광학현미경 및 히타치 SEM (scanning electron microscope) 관찰을 통하여 수행하였다.

그림 2(a)는 그림 1(a)의 온도분포를 가지는 로에서 성장시킨 대표적인 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 결정의 표면 사진이다. 잔류 액상에서 핵 생성된 결정들이 단결정 성장을 제약하는 것을 볼 수 있으며, 4 cm × 4 cm 이상의 대면적 단결정 성장은 어렵다. 그림 2(b)는 그림 1(b)의 온도분포를 가지는 로에서 동일한 열처리조건으로 성장시킨 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 단결정의 표면 사진이며, 시편 전체가 종자결정에서 성장한 단결정으로 되어 있음을 볼 수 있다. 이 방법을 이용하면 5 cm를 훨씬 넘는 대면적 단결정의 제조가 가능할 뿐만 아니라 온도구배를 적절히 조절하여 다량의 대면적 단결정을 성장시키는 것이 가능하다.

3. 결과 및 고찰

3.1 YBCO 고온 초전도 벌크 특성평가

그림 3은 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x+0.4$ mol Y211+1% CeO_2 조성의 분말을 3×3 cm 크기로 성형 및 CIP 한 후 $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 단결정 종자를 사용하여 1,040°C에서 1시간 부분 용융시키고 1,010°C부터 0.2°C/h로 서냉하여 성장시킨 시편의 내부 미세조직 사진이다. Y211의 분포가 균일하지 못하고 밀도도 낮으며 크기도 큰 것을 볼 수 있다. Y123 초전도체의 포획자장은 외부에서 가해지는 자장이 비초전도상인 Y211에 고정됨으로써 발생되기 때문에 미세한 Y211이 높은 밀도로 균일하게 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 내에 분포되게 하는 것이 강한 포획자장을 갖는 초전도 벌크 자석을 개발하는데 중요하다. 이런 면에서 기존의 조성 및 열처리 조건은 최적 상태는 아니다.

그림 4는 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x+0.3$ mol $\text{Y}_2\text{O}_3+1\%$ CeO_2 조성의 분말을 3×3 cm 크기로 성형 및 CIP 한 후 $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 단결정 종자를 사용하여 1,040°C에서 1시간 부분 용융시키고, 1,005°C부터 0.5°C/h로 서냉하여 성장시킨 시편의 내부 미세조직 사진이다. 기존 조성의 분말 보다 Y211의 크기가 미세해졌고 밀도도 높아졌으며 분포도 상당히 균일함을 알 수 있다.

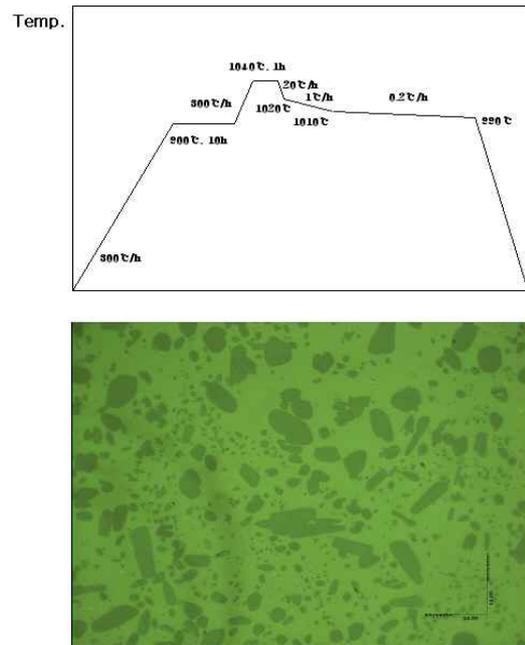


Fig. 3. Heat-treatment schedule and microstructure of Y123+0.4 mol Y211+1% CeO_2 superconductor fabricated by top-seeded MTG method.

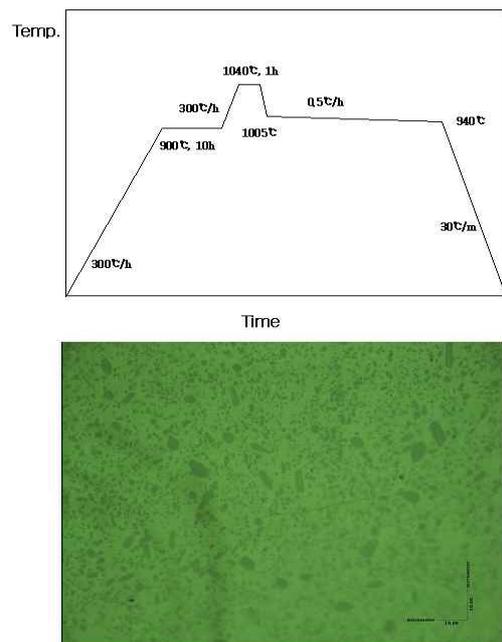


Fig. 4. Heat-treatment schedule and microstructure of Y123+0.3 mol Y211+1% CeO_2 superconductor fabricated by top-seeded MTG method.

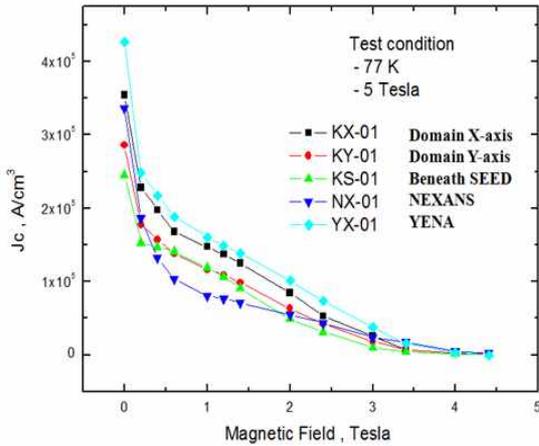


Fig. 5. Critical current density measured by MPMS.

그림 5는 $0.9\text{Y}_2\text{O}_3 + 2.4\text{BaCuO}_2 + \text{CuO} + 0.5\% \text{Pt}$ 단결정 ($3 \times 3 \text{ cm}^2$)의 임계 전류 밀도 측정값을 나타낸 그래프이다. 측정 장비는 MPMS (magnetic properties measurement system) 장비를 이용하였으며, 실험 조건은 77 K, 5 T에서 수행되었다. KX-01, KY-01, KS-01은 본 연구의 결과이며 NX-01, YX-01은 기존 초전도 단결정 생산업체의 임계전류 밀도 결과이다.

본 연구에서 얻어진 결과 값들이 기존의 단결정들 보다 우수하거나 거의 동등한 수준의 임계전류밀도 값을 갖는다는 것을 알 수 있다.

3.2 YBCO 고온 초전도체 극저온 냉각/착자/포획장치 측정

그림 6에는 6개의 YBCO 초전도벌크 냉각용 전도냉각 저온용기의 외관모습과 조작기를 구성하게 될 2조의 초전도 벌크자석을 착자하기 위해 6개의 초전도 벌크를 전도냉각하는데 걸리는 시간을 나타낸다. 초전도 착자에 전도냉각 저온용기를 장착하고 착자에 최고 3.5 T의 고자장을 부가한 상태에서 6개의 초전도벌크를 18 K까지 냉각하는데 15시간이 소요되는 것을 알 수 있다. YBCO 고온 초전도 벌크에 자장을 포획하여 영구자석처럼 사용하기 위해서는 Nd계 소결체를 착자하여 영구자석으로 만들듯이 초전도체도 착자라는 단계를 거쳐야 한다.

첫 번째로 최대의 자장을 포획하기 위하여 그림 7(좌)에서 보듯이 초전도체가 고정된 전도냉각 용기를 상온에서 착자에 장착한다.

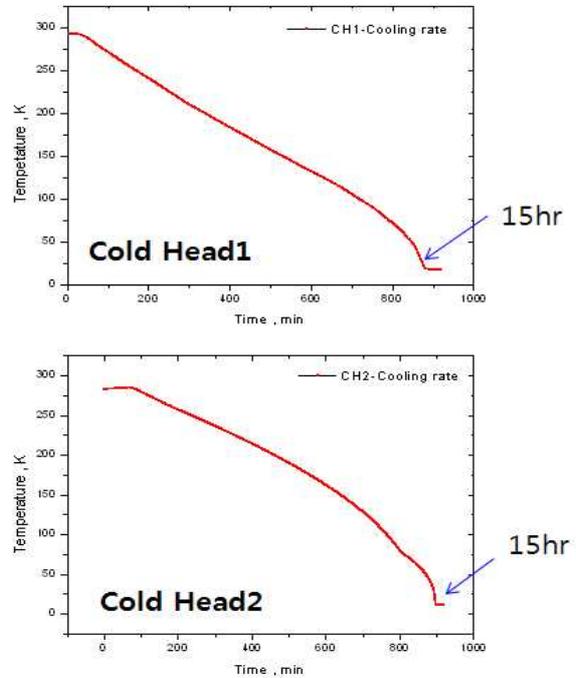


Fig. 6. External view of cryogenic vessel attached YBCO bulk and cooling time to 18 K.

착자에 전류를 통전하여 고자장을 발생시키고, 이 자기력이 상온상태의 초전도체 내부로 100% 통과하도록 한 상태에서 전도냉각 용기의 냉동기를 가동하여 초전도체를 전도냉각 시키면 정해진 착자기 능력 하에서 최대 자장을 포획한 초전도 벌크자석을 만들 수 있다. 그림 7(우)는 2 T 착자기를 사용하여 38 mm 크기 6개의 YBCO 초전도벌크를 18 K까지 전도 냉각하여 착자한 초전도 벌크자석의 자기장 분포 측정 사진이다.



Fig. 7. Magnetization of superconductor bulk(left) and measurement of trapped magnetic field(right) by using 2 T class magnetizer.

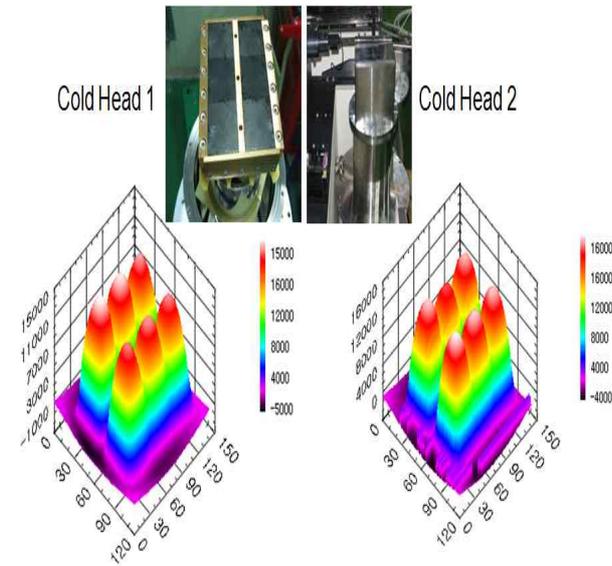


Fig. 8. Trapped magnetic field measured on the surface of cryogenic vessel.

그림 8은 초전도조작기에 사용될 두 조의 초전도 벌크 자석 표면자장 분포 측정 결과이다. 여기서 표면은 전도 냉각된 초전도체 표면이 아니라 저온용기 표면을 의미한다. 저온용기표면과 초전도체표면 간의 거리는 3 mm이다. 그림 8의 포획자장 결과에서 보듯이 초전도체에 포획된 최대표면 자장은 1.6 T로서 매우 우수한 포획 특성을

나타내었다. 3.3 T급 착자기를 사용하였을 때에는 표면자장이 약 3 T인 초전도 벌크 자석이 얻어졌다.

3.3 차단기용 초전도 벌크자석 조작기 시작품 개발

초전도벌크 자석은 3 T 이상의 고자장을 가질 수 있어서 이동 가능한 코일과 적절히 배치한 상태에서 전류를 흘리면 자장과 전류의 상호작용으로 강한 힘과 빠른 속도를 갖는 조작기를 구현할 수 있다.

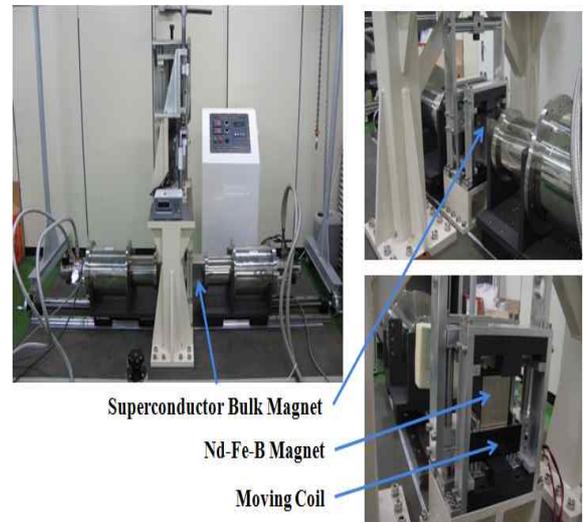


Fig. 9. Superconductor actuator composed as superconductor bulk magnet, permanent magnet and moving coil.

그림 9는 1.6 T급 초전도 벌크자석, 영구자석과 코일이 함침된 이동부, 그리고 차단부하를 1톤까지 모사할 수 있는 부하장치로 이루어진 초전도 벌크자석 조작기 시작품이다.

72.5 kV/20 kA 복합 소호식 GIS 시스템의 차단기를 기준으로 하여 이동부의 이동거리는 100 mm로 설계되었다. 코일부의 최대 허용전압은 350 V이고, 최대 허용전류는 350 A이며 안정적 운전전압은 250~300 V로 설계되었다. 사용된 Nd-Fe-B 영구자석의 크기는 가로 9 cm 세로 15 cm이고, 표면자장은 0.4 T이다.

무빙코일에 250 V, 40 ms 동안 350 A를 가했을 때 이동부의 최대 힘은 이동속도 측정값으로 계산하여 8,300 N이 얻어졌다. 8,000 N 이상의 힘에 4 m/s의 조작기 이동속도면 72.5 kV / 25 kA GCB에 적용 가능한 것으로 해석되었고 착자기의 댐핑시스템이 더욱 개발되어 초전

도 벌크자석용기의 표면자장이 3 T까지 간다면 170 kV/50 kA급 이상의 고전압용 차단시스템에 적용할 수 있는 자석형 차단기 중에서는 유일한 대안이 될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

용융응고법과 온도구배를 조합하고 Y123와 Y₂O₃ 전구체를 사용하여 대면적 고풍성 YBCO 초전도 단결정을 성공적으로 제조하였다. 제조된 6개의 단결정을 전도 냉각할 수 있도록 배열하고 2 T급 착자기에서는 약 1.6 T, 3.3 T 착자기에서는 약 3 T까지 대면적 초전도 벌크자석을 만드는데 성공하였다.

이번에 개발된 초전도 벌크자석으로 차단기용 조작기를 제작하여 힘과 속도를 측정한 결과 8,300 N의 힘과 4 m/s의 이동 속도를 얻어서 송전급 차단기에 충분히 적용 가능하다는 결론을 얻었다.

감사의 글

이 연구는 한국전력공사와 한국에너지기술평가원의 전력산업연구개발사업의 지원을 받아 수행되었다.

REFERENCES

- [1] R. L. Meng, L. Gao, P. Gautier-Picard, D. Ramirez, Y. Y. Sun, and C. W. Chu, *Physica C*, **232**, 337 (1994). [DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0921-4534\(94\)90792-7](http://dx.doi.org/10.1016/0921-4534(94)90792-7)]
- [2] H. Fang and K. Ravi-Chandar, *Physica C*, **340**, 261 (2000). [DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4534\(00\)01328-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4534(00)01328-9)]
- [3] S. C. Han, N. H. Jeong, Y. H. Han, and T. H. Sung, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **20**, 550 (2007).
- [4] M. Kimura, M. Tanaka, and H. Horiuchi, *Physica C*, **174**, 263 (1991). [DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0921-4534\(91\)91556-J](http://dx.doi.org/10.1016/0921-4534(91)91556-J)]
- [5] Z. Lian, Z. Ping Xiang, J. Ping, W. Keguang, W. Jingrong, and W. Xiaozu, *Supercond. Sci. Technol.*, **3**, 490 (1990). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0953-2048/3/10/002>]
- [6] V. Pavate, L. B. Williams, and P. J. McGinn, *J. Electron. Mater.*, **23**, 1131 (1994). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02649959>]
- [7] C. Varanasi, S. Sengupta, P. J. McGinn, and D. Shi, *Appl. Supercond.*, **2**, 117 (1994). [DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0964-1807\(94\)90028-0](http://dx.doi.org/10.1016/0964-1807(94)90028-0)]