

Ag와 Y₂BaCuO₅가 고온초전도체의 임계특성에 미치는 영향

11-6-13

The Effects of Ag and Y₂BaCuO₅ on Critical Characteristics of YBa₂Cu₃O_x Fabricated by MPMG Method

임성훈*, 강형곤*, 이현수**, 한병성***

(Sung-Hun Lim, Hyeong-Gon Kang, Hyun-Soo Lee, Byoung-Sung Han)

Abstracts

YBa₂Cu₃O_x samples were fabricated by MPMG(Melt Powdered Melt Growth). Initial composition of the mixed powders were prepared as follows ; YBa₂Cu₃O_x : Y₂BaCuO₅ = 1:0, 1:0.2, 1:0.3, 1:0.4. After the first melt and cooling, 5wt% to 20wt% of Ag powder was added to the pulverized powder. Effects of the different initial Y₂BaCuO₅ and Ag addition amount on J_c and magnetization of YBa₂Cu₃O_x fabricated by MPMG method were investigated. The critical current density increased with the amount of Y₂BaCuO₅ and Ag. It was also observed that the difference between negative and positive magnetization in the magnetization hysteresis measurement at 77K was larger than the case where Y₂BaCuO₅ and Ag were not added to the YBa₂Cu₃O_x powders. It is concluded that YBa₂Cu₃O_x sample with 40wt% amount of Y₂BaCuO₅ and 20wt% amount of Ag has not only the largest J_c but also the improved pinning effect.

Key Words(중요용어) : MPMG(Melt Powdered Melt Growth, 용융분쇄용융성장), Magnetization hysteresis (자화히스테리시스)

1. 서 론

산화물초전도체 단결정의 임계전류밀도(J_c)는 실생활에 응용할 수 있을만큼 높은 값을 나타내지만 실제로 응용하기 위해 가공되는 형태는 다결정구조로 산화물초전도체가 갖는 이방적 특성이나 임계의 약한 결합(weak link)등으로 인해 전력기기 등에 응용하기에는 어려움이 있다. 이러한 고온초전도체의 다결정구조의 특성을 개선시키기 위한 연구로 MTG, QMG등과 같은 용융법을 이용함으로써 미세조직과 성장기술의 개선을 통해 응용가능한 수준에 이르게 되었다.¹⁻³⁾

MTG(melt-textured-growth), QMG(quench-melt-growth)와 같은 용융과정을 거친 샘플들은 기존 방식의 고상소결법에 비해서 입자배열과 조성에 따라 10000 [A/Cm²]를 초과하는 큰 임계전류밀도를 가

진다는 것이 발견되었다.⁴⁾ 이는 공공이 크고 많았던 고상법과 달리 용융용고법은 용융된 과정을 거치기 때문에 결정입자들의 고밀도화를 가능케함으로써 임계전류밀도를 높여 주게 되고 또한 온도의 오르내림의 기울기를 달리하므로써 결정성장의 방향을 조절할 수 있어 방향용고방법에 따라 비교적 쉽게 배향성을 얻을 수 있다는 점이 임계전류를 높이는 데 기여하게 되는 것으로 보고되고 있다.^{5,6)} 또한 자장하에서의 임계전류밀도를 향상시키기 위해, 로렌츠힘에 관계하는 자속의 이동을 억제하는 자속 고정점(pinning centers)을 초전도내부에 미세하게 분산시키는 것이 가능하여 높은 임계전류밀도를 얻을 수 있다.⁷⁻¹⁰⁾

따라서 본 연구에서는 전력기기분야등에서 응용을 위해선 필수적인 고자력특성 뿐 아니라 큰 전류밀도를 가지는 벌크형초전도체의 제작을 위해, 위에서 언급한 용융법중 보다 미세하고 균일하게 Y₂BaCuO₅상을 분포시켜 자속고정력(flux pinning force)을 증가시킬 수 있는 MPMG법으로 벌크형초전도체를 제작하였다.

* : 전북대학교 전기공학과
(전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14, Fax: 0652-77-0918
E-mail : sunghun@electric.chonbuk.ac.kr
1998년 3월 14일 접수, 1998년 5월 6일 심사완료

제작한 시편의 특성평가를 위해 Y₂BaCuO₅의 첨가와 Ag첨가량에 따른 미세구조의 변화와 임계전류밀도에 미치는 영향을 J_c, SEM, XRD을 통하여 고찰하였고 자속고정(flux pinning)효과를 보기 위해 SQUID magnetometer를 이용하여 Y₂BaCuO₅와 Ag가 첨가된 YBCO시편의 온도에 따른 자화특성과 M-H hysteresis곡선을 조사하였다.

2. 실험 방법

MPMG법으로 YBa₂Cu₃O_x초전도체에 Y₂BaCuO₅ 입자의 도입을 위한 초기조성으로 YBa₂Cu₃O_x:Y₂BaCuO₅의 비가 1:0.0, 1:0.2, 1:0.3, 1:0.4가 되도록 99.99%의 순도를 갖는 Y₂O₃, BaCO₃, CuO분말을 칭량하였다. 칭량 후 알루미늄이나 막자사발에서 균일하게 혼합하여 910℃에서 36시간동안 하소처리하였다. 다시 이것을 분쇄하여 백금도가니에 넣고 (Y₂O₃+L(액상))의 영역에 도달하기 위해 1410℃에서 40분간 유지하였고 즉시 로에서 꺼내어 구리판에 급랭하였다.

용융급랭한 시료를 분쇄한 후 #230인 표준망체를 통과시켜 시료를 분류하였다. 또한 Ag첨가효과를 관찰하기 위해 YBa₂Cu₃O_x와 Y₂BaCuO₅의 초기조성비가 1:0.4인 시료에 5wt%, 10wt%, 15wt%, 20wt% 비율의 AgO분말을 첨가하였다. 이와 같이 준비된 각각의 시료를 1g씩 칭량한 후 가압하여 2×3×30[mm]크기의 샘플을 만들었다. 전기로의 온도가 900℃일 때 펠렛들을 백금플레이트에 담아 전기로에 넣어 (Y₂Ba₁Cu₁+L(액상))영역인 1120℃까지 15분동안 상승하여 적절한 시간인 20분간 유지하였다. 유지 후 시료를 포정반응의 직상온도인 1000℃까지 급냉시킨 다음 950℃까지 40시간에 걸쳐 서냉시켰다. 다시 950℃에서 상온까지 3시간정도에 걸쳐 냉각하였다. 이와 같은 MPMG공정을 걸친 시료를 500℃산소분위기하에서 최종적으로 열처리하였다.¹¹⁻¹²⁾

준비된 각시편의 결정구조 및 상생성을 조사하기 위해 X선회절분석을 실시하였다. 임계온도측정은 시편들을 냉동기저온장치(Helix, CTI-CRYO-GENICS 8001, U.S.A.)에 넣고 controller (Lake-Shore, DRC-82C, U.S.A.)를 이용하여 실온에서부터 20K까지 온도에 따른 전기비저항의 변화를 DC4 단자법을 이용하여 측정하였다. 또한 DC정전류원과 nanometer를 이용하여 1 [μV/cm]일 때 공급한 전류를 임계전류로 측정했으며 이를 단면적으로 나누어 임계전류밀도를 측정하였다.

주사전자현미경(SEM)을 이용하여 Y₂BaCuO₅상과 Ag첨가에 따른 파단면의 미세조직과 은첨가량에 따른 시료표면의 조직을 관찰한 후 비교분석하였다. 마지막으로 자속고정(flux pinning)효과를 보기 위해 SQUID magnetometer를 이용하여 이들 YBCO시편의 온도에 따른 자화의 변화와 M-H hysteresis곡선을 측정하였다. 그림 1에 앞서 설명한 시편의 준비 및 실험방법에 대한 순서를 나타내었다.

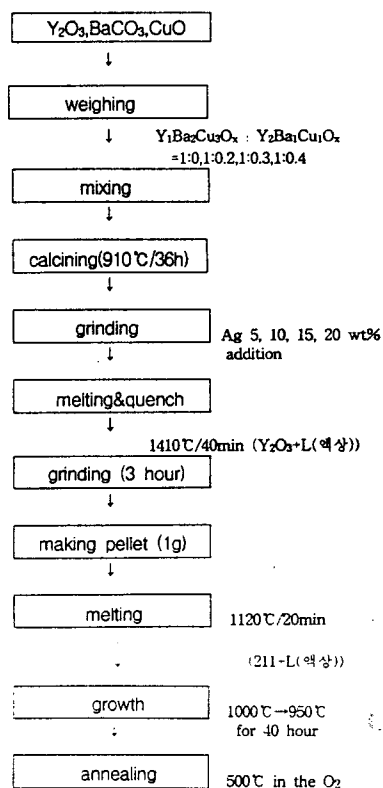


그림 1. MPMG시편제작공정도
Fig. 1. Block diagram for sample preparation

3. 결과 및 고찰

MPMG공정과정 중 첫번째 급냉과정과 두 번째 용융 및 성장과정, 그리고 마지막으로 산소분위기하에서 열처리한 시편의 상생성을 보기 위하여 공정중간마다 채취한 시편의 X선 회절패턴을 그림 2에 나타내었다. 첫 번째 급냉과정을 거친 시편에서는 액상과 Y₂O₃의 상을 관찰할 수 있었고 Y₂BaCuO₅에 해당하는 피크도 관찰되었다. 두 번째

용융 및 성장과정을 거친 시편에서는 $YBa_2Cu_3O_x$ 상과 Y_2BaCuO_5 상에 해당하는 피크가 모두 관찰되었으나 $YBa_2Cu_3O_x$ 상피크중 32° 부근에서 이중피크가 발견되는 것으로 보아 정방정의 $YBa_2Cu_3O_x$ 상임을 알 수 있으며 완전한 초전도상인 사방정상으로 상 전이는 이루어지지 않았음을 알 수 있었다. 마지막으로 산소분위기하에서 열처리한 시편은 Y_2BaCuO_5 상과 성장한 $YBa_2Cu_3O_x$ 상이 주 피크임을 볼 수 있었다.

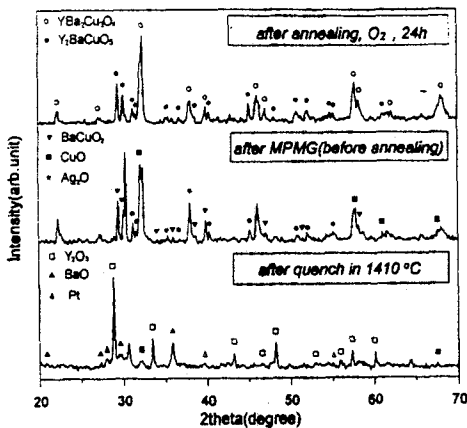


그림 2. MPMG공정단계별 X-ray 회절 패턴
 Fig. 2. X-ray diffraction patterns of $YBa_2Cu_3O_x$ superconducting bulk in each fabrication step of MPMG process.

그림 3은 MPMG법으로 제작시 Y_2BaCuO_5 첨가량에 따른 X-선회절패턴으로 Y_2BaCuO_5 량이 1:0.2, 1:0.3 일때는 1:0.0일때보다 Y_2BaCuO_5 에 해당하는 피크가 여러곳에서 나타남을 볼 수 있으며 1:0.4일 때는 Y_2BaCuO_5 피크강도의 증가와 함께 $YBa_2Cu_3O_x$ 피크강도도 더욱 증가함을 볼 수 있었다. 이는 그림 5(a), 5(b)에서 보는 것처럼 Y_2BaCuO_5 첨가가 없는 경우(그림 5(a)), Y_2BaCuO_5 의 부족으로 인해 포정반응을 이용한 서냉과정동안 반응하지 못한 조대한 액상입자와 함께 부분적으로 미세한 Y_2BaCuO_5 입자를 볼 수 있지만 1:0.4로 첨가한 시편(그림 5(b))에서는 액상입자감소와 함께 전체적으로 미세한 크기의 Y_2BaCuO_5 입자들이 조밀하게 배열되어 있는 것을 볼 수 있다. 이로 볼 때 Y_2BaCuO_5 의 첨가는 pinning center로서 역할뿐 아니라 불안정한 포정반응으로 인한 잔류액상의 발생을 억제해 주어 $YBa_2Cu_3O_x$ 성장을 촉진시켜 주는 역할을 하는 것을

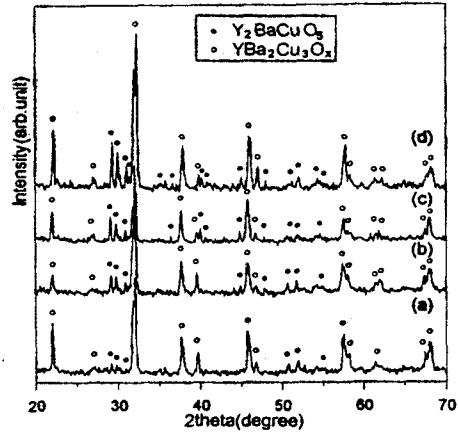


그림 3. $YBa_2Cu_3O_x$ 와 Y_2BaCuO_5 의 조성비에 따른 X-ray 회절 패턴
 (a) 1:0.0 (b) 1:0.2 (c) 1:0.3 (d) 1:0.4
 Fig. 3. X-ray diffraction patterns of $YBa_2Cu_3O_x$ superconducting bulk due to the initial composition rate of $YBa_2Cu_3O_x$ and Y_2BaCuO_5
 (a) 1:0.0 (b) 1:0.2 (c) 1:0.3 (d) 1:0.4

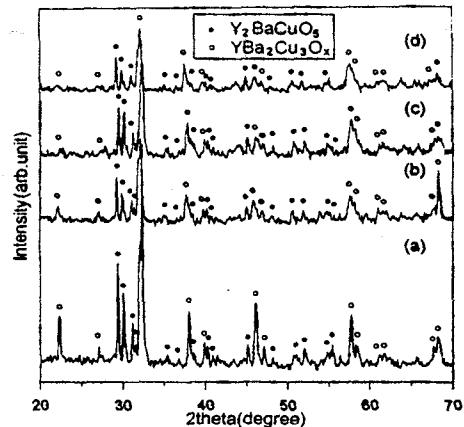


그림 4. MPMG로 제작한 $YBaCuO$ 초전도체의 은첨가에 따른 X-ray 회절 패턴
 (a) 0wt% (b) 5wt% (c) 10wt% (d) 20wt%
 Fig. 4. X-ray diffraction patterns of $YBa_2Cu_3O_x$ superconducting bulk with different Ag addition amount
 (a) 0wt% (b) 5wt% (c) 10wt% (d) 20wt%

확인할 수 있었다.

그림 4은 은첨가량에 따른 X선회절패턴으로 은첨가가 이루어진 시편에서의 YBa₂Cu₃O_x, Y₂BaCuO₅피크강도가 은을 첨가하지 않은 시편에 비해 전반적으로 상당히 감소되는 것을 볼 수 있었지만 그 크기의 비(Y₂BaCuO₅/YBa₂Cu₃O_x)는 큰 변화가 없음을 알 수 있었다. 또한 은첨가량을 증가시켜줌에 따라 일부 YBa₂Cu₃O_x피크강도가 약간 줄어들고 Y₂BaCuO₅에 해당하는 피크의 크기는 크게 변하지 않음을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 결과로 볼 때, 은첨가시편에서는 전반적으로 줄어들긴 했지만 YBa₂Cu₃O_x상에 해당하는 일부피크는 사라지고 Y₂BaCuO₅에 해당하는 피크는 변화가 적은 것으로 보아 용융성장과정동안 YBa₂Cu₃O_x상의 성장보다 Y₂BaCuO₅과 액상과의 반응을 촉진시켜 주는 역할을 하는 것으로 기대된다.

pinning center로서 작용하는 불순물(Y₂BaCuO₅) 양을 달리한 시편의 임계온도에서 보듯이(그림 7(a)) 100K이상에서는 불순물의 함량이 증가함에 따라 초전도상의 체적감소로 저항률이 증가함을 볼 수 있으나 100K이하에서는 Y₂BaCuO₅이 없는 시편의 경우엔 금속과 같은 특성으로 선형적으로 감소한 반면 Y₂BaCuO₅을 1:0.3, 1:0.4의 비율로 혼합한 시편에서는 본래의 초전도특성이 나타남을 볼 수 있으며 Y₂BaCuO₅증가에 따라 임계온도가 조금씩 향상되는 것을 관찰할 수 있었다.

임계전류밀도측정(그림 8(a))에서도 Y₂BaCuO₅첨가량을 증가시켜줌에 따라 그 값이 향상됨을 볼 수 있는데 MPMG공정시 YBa₂Cu₃O_x에 Y₂BaCuO₅를 첨가하면 용융성장과정을 거치면서 발생하게 되는 미세결함의 발생을 억제해 줌과 동시에 정방정에서 사방정으로 상전이를 위한 산소확산을 더욱 용이하게 하는 작용을 한다는 보고와 일치함을 확인할 수 있었다.¹³⁻¹⁴⁾

Ag첨가량에 따른 저항률 & 온도곡선(그림 7(b))에서는 Ag5wt%첨가시편의 경우를 제외하고 Ag첨가에 따라 T_c가 전반적으로 향상되는 것을 관찰할 수 있었고 임계전류밀도변화(그림 8(b))에서도 Ag첨가량에 따라 수송임계전류밀도의 값도 크게 증가함을 볼 수 있는데 이는 임계전류밀도의 저하요인이 되는 YBa₂Cu₃O_x입자간의 약결합(수 많은 직렬 및 병렬로 연결된 조셉슨 접합)에 Ag가 위치하게 됨으로서 임계전류밀도가 향상되는 것을 SEM(그림 6)과 EPMA분석으로 확인할 수 있었다.

Y₂BaCuO₅와 Ag첨가에 따른 pinning 효과를 조사하기 위해 20 Gauss의 외부자계하에서 측정하

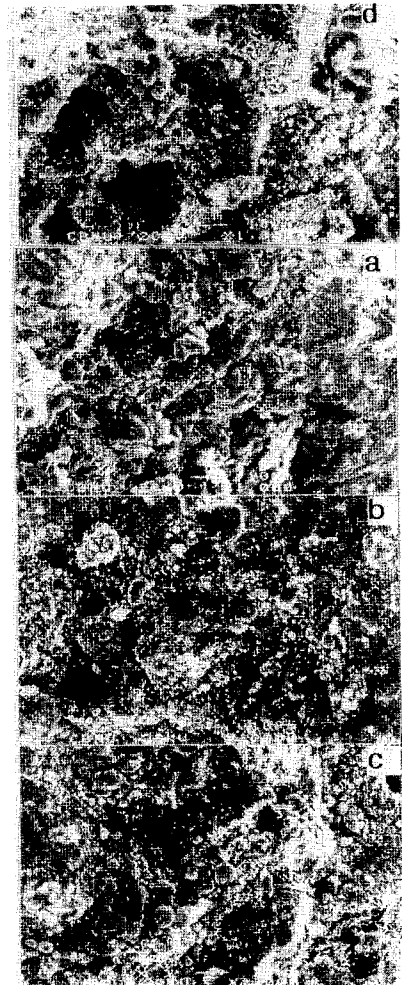


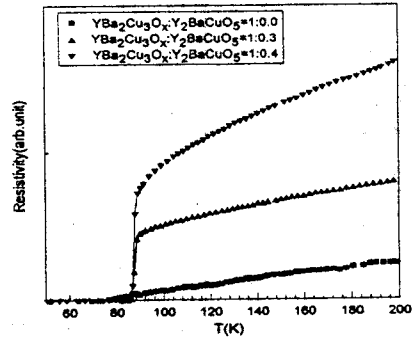
그림 5. Y₂BaCuO₅와 Ag첨가량에 따른 초전도벌크 파단면의 주사전자현미경사진
(a) YBa₂Cu₃O_x:Y₂BaCuO₅=1:0.0
(b) YBa₂Cu₃O_x:Y₂BaCuO₅=1:0.4
(c) Ag 10wt%(1:0.4)
(d) Ag 20wt%(1:0.4)

Fig. 5. SEM photographs of fracture surface of superconducting bulk with different Y₂BaCuO₅ and Ag addition amount
(a) YBa₂Cu₃O_x:Y₂BaCuO₅=1:0.0
(b) YBa₂Cu₃O_x:Y₂BaCuO₅=1:0.4
(c) Ag 10wt%(1:0.4)
(d) Ag 20wt%(1:0.4)

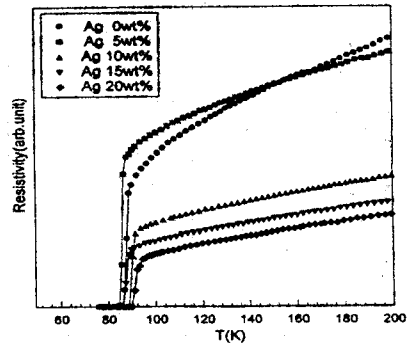


그림 6. Ag 첨가량에 따른 YBa₂Cu₃O_x 초전도체 상층면의 주사현미경사진
 (a)Ag5wt% (b)Ag10% (c)Ag15% (d)Ag20wt%
 Fig. 6. SEM photographs of upper surface in the superconducting bulk YBa₂Cu₃O_x fabricated by MPMG with different Ag addition amount
 (a)Ag5wt% (b)Ag10% (c)Ag15% (d)Ag20wt%

온도자화특성을 그림 9에 나타내었으며 Y₂BaCuO₅를 첨가함에 따라 ZFC과정에서 자화값이 향상되는 것을 볼 수 있고 FC과정에서는 시편의 온도를 내려줌에 따라 구속되어 있던 flux에 의해 상쇄되어 0에 가까운 음의 자화값을 갖게 되는 것을 모든 시



(a) Y₂BaCuO₅ 양에 따른 임계온도



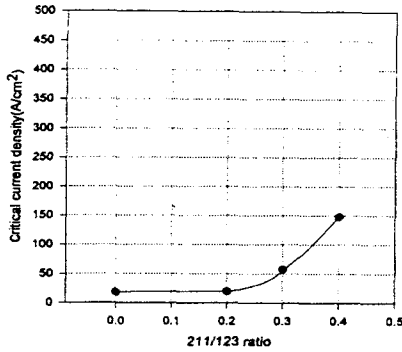
(b) Ag 첨가량에 따른 임계온도

그림 7. YBa₂Cu₃O_x 초전도체의 Y₂BaCuO₅와 Ag 첨가량에 따른 임계온도곡선

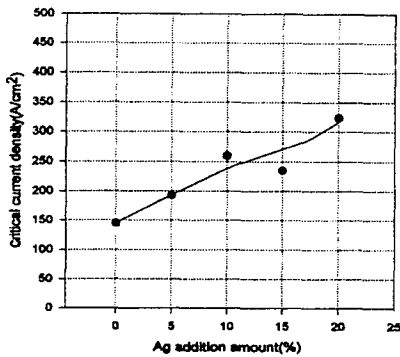
Fig. 7. Critical temperature of YBa₂Cu₃O_x superconducting bulk fabricated by MPMG with different Y₂BaCuO₅ and Ag addition amount
 (a) Critical temperature with different Y₂BaCuO₅ amount
 (b) Critical temperature with different Ag amount

편에서 관찰할 수 있었다. 따라서 잔류자화값은 첨가량을 1:0.4로 했을 때 가장 큰 값을 보여 주었으며 이로부터 pinning 효과가 첨가량을 1:0으로 한 경우보다 향상되었음을 알 수 있었다. 또한 Y₂BaCuO₅ 첨가량이 증가됨에 따라 전이폭도 점점 넓어지고 완만해지면서 임계온도가 회복되는 것을 볼 수 있었고 이는 T_c 측정결과와 일치하였다.

Ag 첨가량에 따른 온도자화곡선(그림 9(b))에서도 Ag 첨가량에 따라 임계온도가 회복되는 것을 볼 수



(a) Y₂BaCuO₅양에 따른 임계전류밀도



(b) Ag첨가량에 따른 임계전류밀도

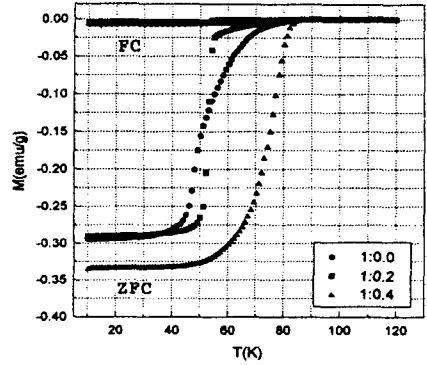
그림 8. Y₂BaCuO₅와 Ag양에 따른 임계전류밀도

Fig. 8. Critical current density of YBa₂Cu₃O_x superconducting dependent on Y₂BaCuO₅ and Ag amount

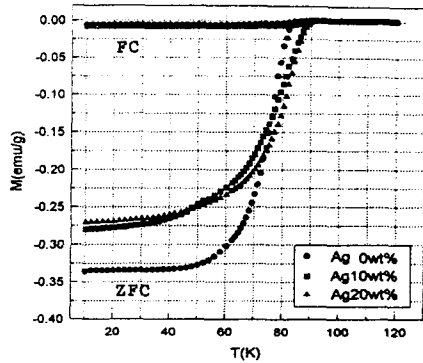
- (a) Critical current density with different Y₂BaCuO₅ amount
- (b) Critical current density with different Ag amount

있지만, 첨가하지 않은 시편(Y₁Ba₂Cu₃O_x : Y₂BaCuO₅ = 1:0.4)보다 FC와 ZFC사이의 폭이 감소되는 것을 관측할 수 있었다. 이는 Ag첨가로 YBa₂Cu₃O_x간의 입계외에도 YBa₂Cu₃O_x와 포획된 Y₂BaCuO₅입자들사이의 입계 그리고 Y₂BaCuO₅입자 주변의 미세결함등도 외부자장하에서 flux pinning 효과를 발휘하지만 Ag첨가로 이들입계조직을 결합시켜줌으로 FC와 ZFC에서 자화값의 차가 감소된 것으로 생각된다.

초전도체내의 pinning작용을 하는 불순물내에 flux들이 속박됨으로서 비가역적인 특성을 보이는



(a) Y₂BaCuO₅첨가량에 따른 온도 자화곡선



(b) Ag첨가량에 따른 온도 자화곡선

그림 9. Y₂BaCuO₅와 Ag첨가량에 따른 온도자화곡선

Fig. 9. Temperature dependence of magnetization measured by ZFC and FC process due to addition amount of Y₂BaCuO₅ and Ag

- (a) Temperature dependence of magnetization due to addition amount of Y₂BaCuO₅
- (b) Temperature dependence of magnetization due to addition amount of Ag

77K에서 측정된 자화히스테리시스(그림 10)에서도 온도자화곡선에서 예상했던 것처럼 Y₂BaCuO₅의 양을 1:0.4로 했을 때 hysteresis가 커지는 것을 볼 수 있으며 Ag을 첨가함에 따라 -자화값과 +자화값의 차이가 더욱 커지는 것을 볼 수 있다. Ag첨가량에 따른 시편에서의 M-H곡선이 온도에 따른 자화곡

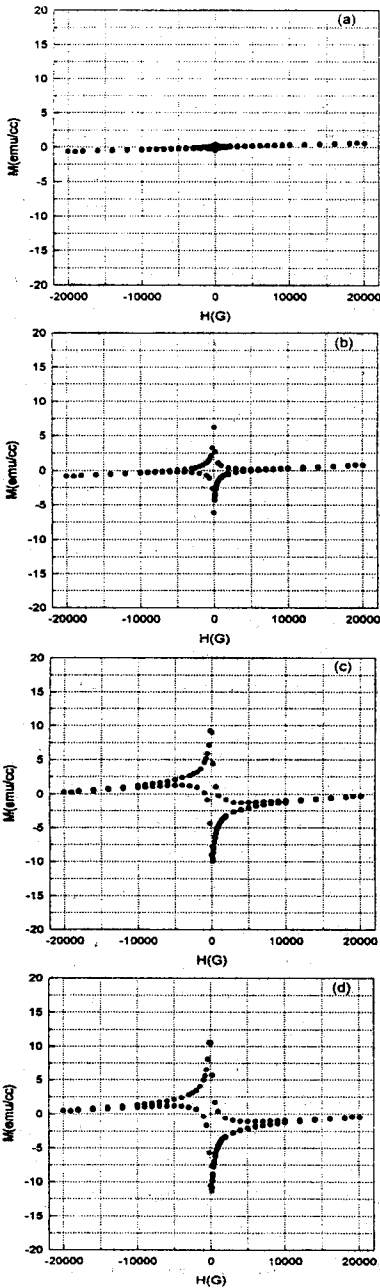


그림 10. M-H 자화곡선
 (a) 1:0.0 (b) 1:0.4 (c) Ag10wt% (d) Ag20wt%
 Fig. 10. Magnetization hysteresis with different Y₂BaCuO₅ and Ag addition amount at 77K (a) 1:0.0 (b) 1:0.4 (c) Ag10wt% (d) Ag20wt%

선과는 달리 pinning작용이 더욱 개선되는 것을 볼 수 있는데 온도자화곡선에서 77K온도에 해당하는 자화값을 비교해 보면 Ag첨가량에 따라 자화값이 증가함을 볼 수 있으며 따라서 M-H곡선에서 Ag증가에 따라 hysteresis폭이 넓어지는 것과 일치함을 볼 수 있다.

마지막으로 초전도 grain내에서 임계전류밀도를 Bean이 제시한 critical state model에 따라 $J_c = 30 \Delta M/d$ 수식을 사용하여 계산하였다. 관찰한 시편의 YBa₂Cu₃O_x grain의 입자크기는 80-100 μm가량이었고 grain들의 형상이 원통형이라 가정했을 때 각 자장에서 계산한 임계전류밀도를 그림 11에 나타내었다. 고상소결한 YBCO초전도체의 경우 자장이 증가함에 따라 임계전류밀도가 크게 감소하는 것에 비해 H=1000G에서 Y₂BaCuO₅와 Ag함량에 따라 $0.69 \cdot 10^3 \sim 0.162 \cdot 10^5$ [A/cm²]범위에 이르던 임계전류밀도값이 H=11000G에서 $0.204 \cdot 10^3 \sim 0.114 \cdot 10^4$ [A/cm²]으로 서서히 감소하였다.

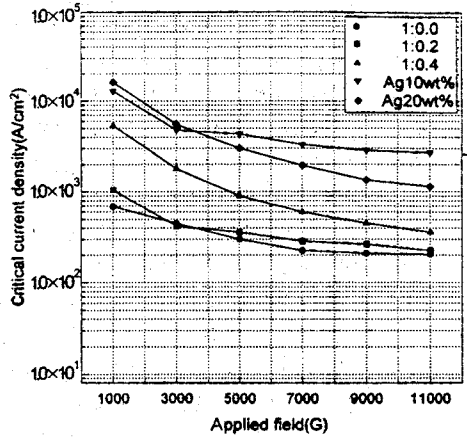


그림 11. 임계전류밀도의 자장의존곡선
 Fig. 11. Field dependence of the critical current densities at 77K for YBaCuO

4. 결 론

MPMG법을 이용하여 제조한 YBa₂Cu₃O_x 고온초전도벌크의 임계특성향상을 위해 YBa₂Cu₃O_x와 Y₂BaCuO₅의 초기조성비와 Ag첨가가 임계특성에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위해 T_c와 J_c 외에 SQUID magnetometer를 이용하여 주입된 Y₂BaCuO₅과 Ag량이 다른 YBCO시편의 온도에 따

른 자화의 변화와 M-H hysteresis를 측정하여 flux pinning 효과에 미치는 영향을 조사하였다.

- (1) Y₂BaCuO₅첨가량에 따른 임계전류밀도값은 YBa₂Cu₃O_x와 Y₂BaCuO₅비가 1:0일 때 18A/cm², 1:0.4 일 때 147A/cm² 값을 얻었고 Y₂BaCuO₅ 양을 증가시켜줌에 따라 7.5 배가량 증가되는 것을 볼 수 있었고 MTG법에서 보고한 Y₂BaCuO₅는 용융성장과정을 거치면서 발생하게 되는 미세결합의 발생을 억제해 줌과 동시에 정방정에서 사방정으로 상전이를 위한 산소확산을 더욱 용이하게 하는 작용을 한다는 보고와 일치함을 MPMG법에서도 확인할 수 있었다.
- (2) YBa₂Cu₃O_x와 Y₂BaCuO₅의 조성비가 1:0.4일 때 Ag첨가량을 달리한 경우, Ag첨가량에 따라 크게 향상되는 것을 관찰할 수 있었으며 Ag20wt%일 때 325A/cm²까지 증가함을 볼 수 있었고 YBa₂Cu₃O_x입자간의 약결합(수 많은 직렬 및 병렬로 연결된 조셉슨 접합)에 Ag가 위치하게 됨으로서 임계전류밀도가 향상되는 것을 SEM으로 확인할 수 있었다.
- (3) 온도에 따른 자화특성에서도 Y₂BaCuO₅ 조성비를 증가함에 따라 ZFC과정과 FC과정의 폭이 커지는 것을 관찰할 수 있으며 이는 pinning 효과가 향상됨을 알 수 있었다. 또한 Ag를 첨가(YBa₂Cu₃O_x : Y₂BaCuO₅ = 1 : 0.4)한 온도 자화특성에서는 ZFC에서의 값과 FC에서의 전온도범위에서 값의 차이가 Ag를 첨가하지 않은 경우(YBa₂Cu₃O_x : Y₂BaCuO₅ = 1 : 0.4)보다 약간 줄어들긴 했지만 액체질소의 온도인 77K에서의 차이는 점점 커짐을 볼 수 있었고 이는 M-H hysteresis곡선에서 +M과 -M의 차이가 Ag 첨가에 따라 증가하기 때문임을 확인할 수 있었다.
- (4) 마지막으로 초전도 grain내에서 임계전류밀도를 Bean이 제시한 critical state model에 따라 Jc=30△M/d을 이용하여 계산하였다. 고상소결한 YBCO초전도체의 경우 자장이 증가함에 따라 임계전류밀도가 크게 감소하는 것에 비해 H=1000G에서 0.69 · 10³ ~ 0.162 · 10⁵ [A/cm²]범위의 임계전류밀도값이 H=11000G에서 0.204 · 10³ ~ 0.114 · 10⁴[A/cm²]으로 서서히 감소하였고 이로부터 pinning 효과가 향상되었음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. M. Ikebe, H. Fujishiro, T. Naito et al., "Thermal conductivity of YBCO(123) and YBCO(211) mixed crystal prepared by MMTG", Cryogenics, vol.34, pp.57-61, 1. 1994.
2. M. Slaski, L. T. Sagdahi, L. K. Heill et al., "Excitation Field Dependence, Frequency Dependence and Anisotropy of the Irreversibility Line in MPMG YBa₂Cu₃O₇ with Y₂BaCuO₅ Inclusions", Supercond. Sci. Technol., pp.S340-342, 1. 1992.
3. J. R. Wang, L. Zhou, P. X. Zhang, K. G. Wang et al., "Bulk pinning Force Density of YBCO Superconductors by Power Melting Process", Supercond. Sci. Technol., pp.S336-S339, 5. 1992.
4. S. Elschner, S. Gauss, "Magnetic Properties of Melt Processed and Sintered YBaCuO", Supercond. Sci. Technol., pp.S300-303, 5. 1992.
5. C. Hannay, R. Cloots, H. W. Vanderschueren and P. A. Godelaine et al., "Electrical and magnetic properties of high Tc melt growth processed YBaCuO rods", Supercond. Sci. Technol., pp.S296-S299, 5.1992.
6. K. Watanabe, S. Awaji, G. Kido et al., "Magnetization Hysteresis in High Fields for Quench Melt Growth Processed YBa₂Cu₃O₇", Supercond. Sci. Technol., pp. S288-292, 5. 1992.
7. P. X. Zhang, L. Zhou et al., "The effect of annealing on stacking faults and Jc values of PMP processed YBCO", Supercond. Sci. Technol., pp.15-19, 1.1995.
8. E. Yanmz, I. H. Mutlu et al., "Ag-doped 120K YBa₂Cu₃O₇ superconductors prepared by the flame-quench-melt-growth method", Supercond. Sci. Technol., pp.903-907, 12. 1994.
9. I. Monot, T. Higuchi, N. Sakai and Murakami, "Possibility of Tc and Jc enhancement in 10% BaSnO₃ doped MPMG-processed YBCO", Supercond. Sci. Technol., pp.783-787, 6. 1994.
10. F. Frangi, T. Higuchi, M. Deguchi and M. Murakami, " The effects of different thermal

- pretreatments on the magnetic properties of YBCO MPMG samples*", Supercond. Sci. Technol., pp.891-898, 9. 1994.
11. K. Salama, V. Selvamanickam and D. F. Lee, "Processing of Melt Textured YBCO Superconductors to Enhance Critical current", Fifth US/Japan workshop on HTSC, 11. 1992..
 12. I. Monot, M. Leprope, J. Provost, G. Desgardin, B. Raveau, D. Bourgault, J.M. Barbut, D. Braithwaite and R.Tournier, "High performance in a bulk melt textured $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ceramic", Supercond.sci.Technol., pp.712-718, 1992. 5.
 13. Kamel Salama and Dominic F Lee, "progress in melt texturing of $YBa_2Cu_3O_x$ Superconductor", Supercond. sci. Technol. pp.177-193, 1994. 7.
 14. Chan-Joong Kim, Ki-Baik Kim, Dong-Yeou Won, Gye-Won Hong, "Dissolution of Y_2BaCuO_5 through the peritectic reaction rim formed at the front of growing $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ crystal", Materials Letters, pp.283-287, 1994. 8.
 15. G. A. Emel'chenko, A. A. Zhokhov, I. G. Naumenko et al., " Growth of bulk $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ single crystals and their properties", Supercond. Sci. Technol., pp.541-550, 9. 1994.
 16. E. Preisler, J. Bayersdorfer, M. Brunner et al., "Electrical contacts on bismuth based bulk high temperature superconductors in high current applications", Supercond. Sci. Technol., pp.389-396, 6. 1994.
 17. C. A. Hollin, J. S. Abell and P. W. Gilberd, "The microstructure and electrical properties of low resistance contacts to $YBaCuO$ ceramics", Supercond. Sci. Technol., pp.6-14, 1. 1995.
 18. M. Murakami, K. Yamaguchi, H. Fujimoto et al., "Flux pinning by non-superconducting inclusions in melt processed $YBaCuO$ superconductors", Cryogenics, vol 32 pp.930-935, 11. 1992.