

초전도 벌크의 제조공정 및 응용

김 찬 중

한국원자력연구소 원자력재료기술연구부

1. 산화물 초전도체의 제조공정

1. 1. 고상소결

고온 초전도체를 제조하는 가장 쉽고 오래된 방법은 일반적인 세라믹 공정과 같이 고상소결을 이용하는 것이다. 원료분말을 섞어 하소하여 초전도 분말을 만들고, 이를 적당한 온도에서 소결하면 길쭉한 모양을 가진 입자들로 이루어진 초전도체를 얻을 수 있다. 하지만 고상소결을 통하여 제조한 초전도체의 물성은 전자기적 이방성과 입계의 약접합 때문에 임계전류밀도나 자기부상력 등에서 응용 가능한 수준에 미치지 못한다. 또한, 결정 내에서 전자가 상호 이동할 수 있는 거리가 짧아서 초전도 전류가 결정입계를 넘어서 흐르기 어렵다. 이 현상으로 인해 c 축 방향 입계의 약접합 현상이 유발된다. 따라서 입계가 많고 입자들의 결정방위가 무작위적으로 배열되어 있는 소결조직에서는 좋은 물성을 기대하기 어렵다. 또한 소결공정을 통하여 만든 초전도체에는 외부자장을 속박해 주는 역할을 하는 미소결함이나 2 차상 입자들의 밀도가 적기 때문에 고온이나 자장 하에서 쉽게 초전도상태가 깨지게 된다.

1. 2. 용융공정

초전도체의 임계전류밀도를 향상시키려면 입계의 면적을 최소한으로 줄이고, 특히 전류가 흐르는 방향에 c 축이 놓이지 않게 하는 일이 중요하다. 용융공정은 이러한 관점에서 소결공정의 단점을 상당부분 개선할 수 있었다. 용융 공정은 초전도 재료를 일단 용융시켰다가 다시 응고시키는 방법으로, 용융된 상태에서 온도구배를 주어 서서히 온도를 내리면서 온도구배의 방향으로 단결정이 형성되는 현상을 이용한 것이다. 이 공정은 주로 Y-계 초전도체 제조에 활용된다. Bi-계

초전도는 주로 MCP(Melt cast process)공정으로 제조된다. BSCCO 원료분말을 녹여서 고속 회전하는 실린더 몰드 내에 부으면 용체가 원심력에 의해 몰드 벽에 부착되므로 Rod나 튜브형태의 벌크체가 만들어진다. 원료를 녹인 다음 다시 응고시켜 만들기 때문에 소결조직보다 치밀한 조직을 만들 수 있다.

1. 3. 종자결정성장법

온도구배가 없는 상태에서 용융공정을 이용하면 치밀하고 입자크기가 큰 단결정이 만들어진다. 플라이휠 저장장치 등에 필수적인 강한 자기부상력을 얻으려면 결정립이 큰 단결정형 시편을 제조하여야 한다. 종자결정성장법은 가장 간단하게 $YBa_2Cu_3O_y$ (이하 123) 단결정형 시편을 제조하는 방법이다. 이 공정은 123 성형체위에 그보다 녹는점이 높은 종자결정을 올려놓고 용융공정과 같은 방법으로 열처리함으로써 종자결정이 방위와 같은 방향을 갖는 123 단결정이 자라게 하는 방법이다. 종자로 123보다 녹는점이 높고 격자상수가 비슷한 Sm123나 Nd123 단결정이 사용된다. 123 성형체를 부분용융 상태로 용융시키더라도 종자는 녹지 않고 남아 있다가, 이어서 서냉하는 과정에서 123가 종자로부터 핵이 생성되어 자라난다. 이렇게 자라난 단결정은 크기가 수 cm에 이르며 자기부상력이 강력하다. 그림 1은 종자결정성장법이 공정으로 제조된 시편으로 종자결정에서 성장하는 Y-계 초전도 결정을 위에서 본 모습이다.

1. 4 다중종자결정성장법

종자결정성장법이 초전도입자의 성장방위를 제어하는 효과적인 방법이기도 하지만 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 이를 보완하고자 고안된 방법이 다중 종자결정성장법

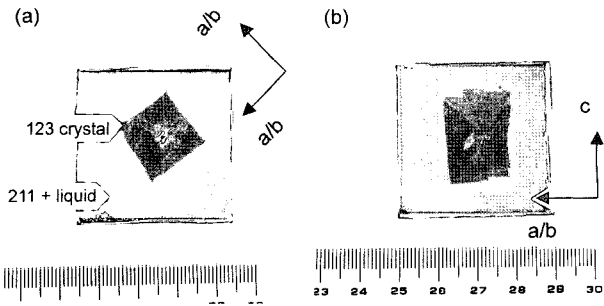


그림 1. 액상과 Y2BaCuO5 (211)으로부터 성장하는 YBCO 결정:(a) a-b 면으로 성장한 결정과 (b) a/c 면으로 성장하는 초전도 결정

이다. 다중 종자결정성장법은 여러 개의 종자에서 동시에 초전도 결정이 성장하게 하는 방법으로, 열처리 시간을 효과적으로 줄일 수 있다(그림 2 참조)

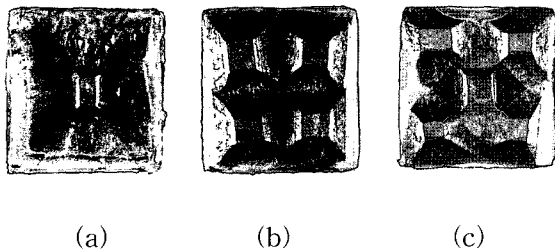


그림 2. 종자를 (a) 1 개, (b) 4개, (c) 5개 사용하여 제조한 YBCO 초전도체.

1. 5 고온 초전도체의 자기부상력

초전도 온도 이하로 냉각된 초전도체를 영구자석 위에 올려놓으면 초전도체가 부상한다. 이는 초전도체가 외부자장을 배척하는 마이스너(Meissner) 효과 때문이다. 외부자장이 고온 초전도체의 1차 자력한계(Hc1)보다 작을 때에는 마이스너 효과에 의해 초전도체가 부상한다.

그림 3은 영구자석 위에서 부상한 육각형 형상의 Y-계 초전도체의 사진이다. 초전도체가 영구자석 위에서 일정한 거리를 유지하며 안정적으로 부상하고 있다. 이는 마이스너 효과에 의해 초전도체가 영구자석의 자력을 반발하기 때문이다.

외부자장이 초전도체의 1차 자력한계(Hc1)와 2차 자력한계(Hc2) 사이에 있으면(영구자석은 자력은 대부분 이 구간에 속한다) 인가된 자력의 일부가 초전도체 안으로

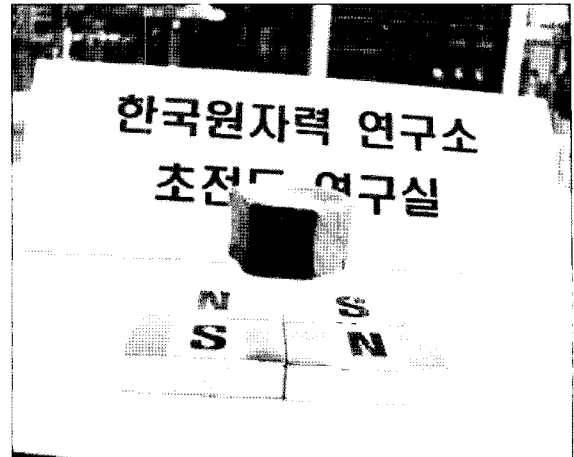


그림 3. 육각기둥형 YBCO 초전도체의 Nd-B-Fe 영구자석위에서의 자기부상

침투하게 된다. 용융법으로 제조한 초전도체와 같이 임계전류밀도가 높고 자력 속박성이 우수한 초전도체는 인가된 자장을 포획한다. 이 경우 초전도체의 자기부상특성은 마이스너 효과와 초전도체 내에 포획된 자장에 기인한다. 초전도체의 부상력은 포획된 자장의 크기와 외부자장, 즉 영구자석의 자력에 비례한다. 마이스너 효과에 의한 부상력은 물체를 밀쳐내는 단순한 반발력인 반면, 플럭스 피닝에 의한 자기부상특성은 반발력과 인력의 두 성분에 의해 결정된다. 이 부분에 대해서는 나중에 초전도 영구자석에 대한 설명에서 다시 기술하기로 한다.

2. 벌크 초전도체의 응용

2. 1 플라이휠 에너지저장용 베어링

베어링은 회전축의 처짐을 방지하고 회전력의 손실을 최소화하고자 할 때 사용되는 기계부품이다. 일반적으로 사용되는 베어링은 베어링과 회전축이 접촉하여 축을 지지하므로 접촉에 따른 에너지 손실이 있게 된다. 마찰에 의한 에너지 손실은 윤활재를 사용하거나 구름마찰을 이용하여 줄일 수 있으나 이 방법으로 마찰을 줄이는데 한계가 있다. 영구자석간의 반발력을 이용하는 마그네틱 베어링은 마찰을 최소화할 수 있는 무접촉 베어링이다. 하지만 이 경우는 영구자석 간에는 순수한 반발력만 있게 되므로 물체의 위치를 고정하기가 어렵고, 따라서 위치고정을 위한 특수한 제어장치가 필요하다. 하지

만 초전도체는 영구자석의 자력을 속박하는 능력이 있기 때문에 특별한 위치 제어장치 없이 물체 위치를 고정할 수 있다. 초전도체를 영구자석의 자력 영향권에 위치시킨 다음 초전도체의 온도를 내려주면 초전도체 안에 영구자석의 자력을 저장할 수 있다. 이 때 저장되는 자력 성분은 반발력과 인력의 합이 된다. 이런 방법으로 자력을 냉각시킨 초전도체를 위치 고정자로 사용하여 그 위에 영구자석을 부착한 물체를 부상시키면 마찰에

한국원자력 연구소 초전도 연구실



그림 4. 무접촉 베어링의 원리를 보여주는 사진. 위는 영구자석 회전체 아래는 초전도체

너지 손실이 최소화할 수 있다(그림 4 참조). 벌크 초전도체와 영구자석을 이용하여 중량물을 회전시켜 에너지를 운동에너지로 저장한 후 저장된 운동에너지를 다시 전력으로 변환시키는 장치가 플라이휠 에너지 저장장치이다. 플라이휠 에너지 장치에는 그림 4와 같은 수평형 베어링뿐만 아니라 그림 5와 같은 수직형 베어링도 사용이 가능하다. 고온 초전도체를 베어링으로 사용하는 플라이휠 에너지 저장장치는 액체질소를 냉매로 사용하므로 냉각비용이 저렴하고, 장치의 설계 및 제작이 용이하기 때문에 고가의 자기베어링보다 실용화가능성이 높을 것으로 예상되고 있다.

고온 초전도체를 이용한 플라이휠 에너지 저장장치는 초전도체위에 영구자석을 내장한 원판형 몸체를 회전시켜 에너지를 저장한 후 저장된 운동 에너지를 다시 전력으로 바꾸는 장치이다. 플라이휠은 크게 3 부분으로 구성되어 있다. 초전도체와 영구자석을 내장

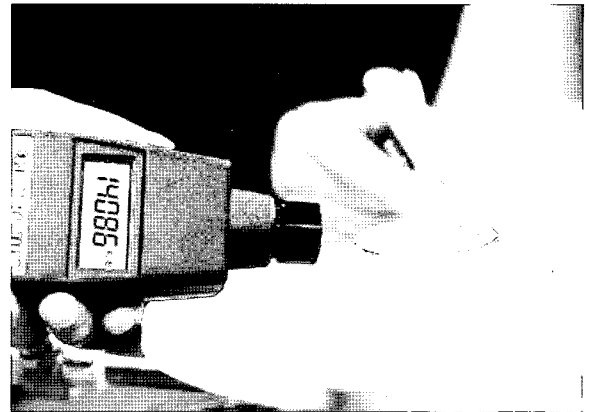


그림 5. 초전도체 위에서 고속 회전하는 영구자석 회전체, 상부는 고리형 영구자석 이고 하부는 액체질소용기.

한 디스크로 구성되어 있는 베어링, 회전에 의해 운동 에너지를 발생시키는 회전체, 그리고 동력발생 및 플라이휠 회전을 담당하고 에너지 전환을 위한 모터와 발전기이다. 이외에도 진공, 냉각, 그리고 제어장치 등이 필요하다. 초전도체를 이용하여 에너지를 저장할 경우에는 1) 마찰에 의한 에너지 손실이 거의 없고 2) 임계온도 이하에서 자체 자장을 발생함으로써 외부 자장 침투를 억제하는 마이스너(Meissner)현상 및 영구자석의 플럭스를 속박하여 발생하는 플럭스 피닝에 의한 인력으로 인해 자기부상의 안정성(stiffness)이 높다는 장점이 있다.

2. 2. 초전도 영구자석

초전도체는 플럭스 피닝에 의해 외부자력을 속박할 수 있다. 상온에서 영구자석 위에 초전도체를 올려놓고 액체질소를 부어 초전도체를 냉각시키면 초전도체로 침투한 영구자석의 침투한 자력이 초전도체 내에 속박된다. 이 냉각방법을 자력냉각이라고 한다. 초전도체내에 자력이 속박되면 초전도체는 자력을 갖게 되므로 초전도체를 영구자석으로 사용할 수 있다. 포획자력은 초전도체의 임계전류밀도에 비례하는데 초전도체의 임계전류밀도가 높을수록 상대적으로 많은 자력을 속박시킬 수 있다.

용융법으로 제조된 초전도체를 자석으로 이용한 경우 77 K에서 1 테슬라 이상의 자력을 속박할 수 있다. 가동온도가 낮을수록 초전도체의 임계전류밀도가 높아지므로 저온



그림 6. 자력냉각에 의해 자력을 갖게 된 초전도 영구자석. 영구자석 아래에 매달린 모습.

에서는 상대적으로 많은 자장을 속박시킬 수 있다 (4.2 K에서 6 테스라 이상의 자력). 벌크 초전도자석은 자력을 이용한 초전도 자기 분리장치에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

2.3 전류 인입선

의료기기로 사용되고 있는 MRI나 초전도 자석은 Nb_3Ti 이나 Nb_3Sn 의 금속간 화합물 초전도선재를 솔레노이드 형태로 감아서 만든다. 초전도자석을 가동하려면 자석을 가동 온도로 냉각한 후 외부에서 전류단자를 사용하여 초전도자석으로 전류를 공급해 주어야 한다. 소규모 실험용 자석에는 수 십 암페어, 초전도 발전용 자석이나 핵융합로 용 자석의 경우는 수만 암페어의 많은 전류를 공급해야 한다. 일반적으로 사용되는 초전도자석은 구리나 황동 등 금속재질로 만든 전류단자로 초전도자석에 전류를 공급한다. 하지만 금속재질의 전류단자들은 열전달이 빠를 뿐만 아니라, 도선에서 발생하는 전기저항에 때문에 이곳을 통해 냉각계의 열이 외부로 방출된다. 냉매(액체헬륨) 사용비와 냉각기 가동비가 상당한 비중을 차지하므로 전류단자의 재료 선정이나 설계를 최적화하여야 가동 중 열 방출을 최소화하여 한다.

고온 초전도체를 전류단자로 사용하면 저항발생에 따른 열손실이 없고, 작은 단면적에 많은 전류를 흘릴 수 있다. 또한 산화물이기 때문에 초전도체를 통한 열전달이 어려

우므로 열손실이 적다. MCP법으로 제작된 Bi-계 초전도체에는 천 암페어 가량의 전류를 흘릴 수 있다. 전류가 흐를 때의 열 손실은 Bi-계가 Y-계 보다 우수하다. 초전도체에 약 천 암페어의 전류를 지속적으로 흘릴 때 열손실은 금속재 전류단자의 약 30%이었다. 그림 7은 Bi-계 전류 인입선의 사진이다. 원료분말을 녹여 고속 회전하는 튜브형 틀에 부어서 열처리하여 만든 것으로 양 끝단에 전선을 연결하기 위해 금속 은판을 부착한다.



그림 7. MCP공정으로 제작한 BSCCO 튜브.

2.4 자기부상운송

반도체를 생산하는 공정에서 가장 주의할 기울여야 할 점은 공정 내로 분진이 유입되는 것을 막는 것이다. 먼지가 조금이라도 있게 되면 반도체의 품질에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 그래서 반도체 공정은 청정실에서 이루어지지만 반도체 부품을 운반하는 과정에서 분진들이 생길 수 있다. 운송에는 보통 벨트식의 운송장치를 사용하기 때문에 부품 운송 시 벨트의 마찰에 의해 분진이 생길 가능성이 높다. 초전도체의 자기 부상을 이용해 영구자석으로 가이드 레일을 만들고 그 위에 초전도체를 부착한 운반체를 놓으면 마찰 없이 물체를 운송할 수 있다.

그림 8은 영구자석과 초전도체로 구성된 가이드 레일을 만들어 그 위에서 물체를 운송하는 무접촉 운송장치의 원리를 보여주는 그림이다. 이 원리를 이용하여 일본 도시바에서 청정실에서 사용되는 운송장치를 초전도체의 자기부상 원리를 이용하여 제작하였

다. Y-계 초전도체를 사용한 1.3kg의 용기를 자석 위에 띄워서 리니어 모터로 이동할 수 있게 하였다.

2.5 초전도 한류기

현대사회는 산업화와 도시화로 인해 발전량이 급속도로 증가하고 있고, 이에 따라 전기의 단락사고 발생률이 높아지고 있다. 전력량이 커지게 되면 대용량의 차단기를 추가적으로 설치해서 전력 계통의 안정성을 확보

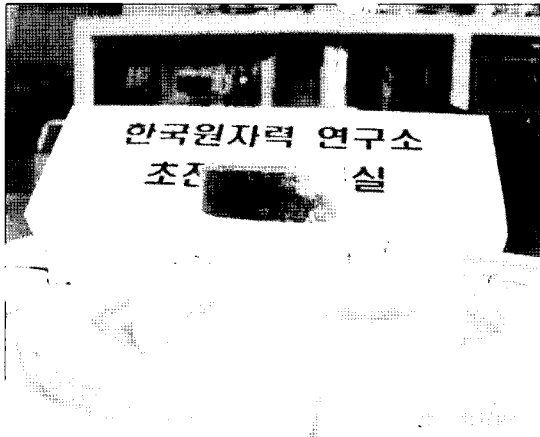


그림 8. 영구자석 레일위에서 부상하여 이동하는 초전도체. 자기부상운송과 자기부상열차의 기본원리를 보여준다.

해야 한다. 하지만 차단기 설치용 부지확보에 드는 비용부담이 크고, 차단기에 사용되는 절연유 등이 환경오염원이 되기 때문에 차단기의 추가설치에는 많은 문제가 있다. 이런 문제점의 해결방안으로 고온 초전도체를 사용한 한류기가 개발 중이다. 고온 초전도는 초전도체가 감당할 수 있는 일정 전류 한도까지는 저항이 발생하지 않지만 그 이상의 과부하가 걸리면 저항이 발생한다. 초전도체의 이런 성질을 이용하면 전력계통 사고를 방지하고 사고전류를 차단하는 안전장치를 만들 수 있다. 발전설비 보호와 환경 친화적인 측면에서 고온 초전도 한류기 개발은 대단히 중요하다. 한류기는 초전도체의 형태에 따라 박막형, 벌크형, 선재형 한류기로 나눌 수 있다. 대용량의 한류기에는 선재를 솔레노이드 형태로 감아 사용하며, 중소형 한류기에는 박막형이나 벌크형의 초전도체가 사용된다. 과부하 시에 초전도체에 발생하는 저항을 이용하는 저항용 한류기와 초전도체

에서 발생하는 자기장을 이용하는 자기 차폐형 한류기가 개발 중이다(그림 9 한류기용 Bi2212 초전도 벌크 소자).

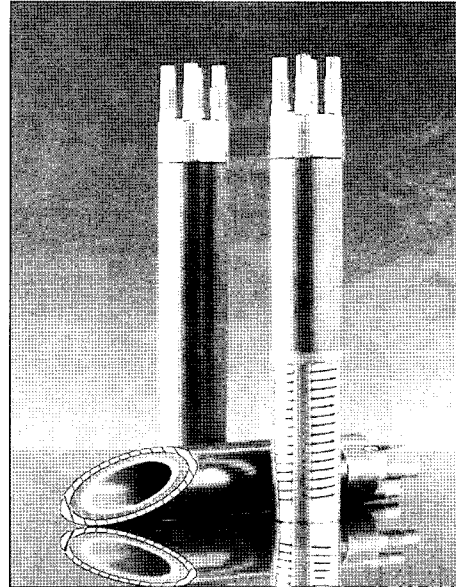


그림 9. Nexan 사의 초전도한류기용 BSCCO 소자

3. 결 론

고온 초전도체 연구는 그것이 갖는 물리학적 중요성과 더불어 미래의 에너지 관련산업에서 중요한 위치를 차지하기 때문에 각국이 국가적인 차원에서 집중적으로 지원하고 있다. 초전도재료는 초전도 송전, 전기 저장, 초전도 발전, 핵융합과 같은 기존 에너지 계통의 효율을 높일 수 있는 기술의 핵심적인 소재이며, 이 외에도 자기부상열차, 핵자기 단층촬영, 주요 지원 회수용 자기분리장치, 초고속 연산 컴퓨터와 무접촉 베어링, 초전도 전도선 등, 기타 산업분야에서도 그 용도가 점차 확장되어 가고 있다.

지난 십 수년동안의 지속적인 연구로 초전도체의 전자기적 특성이 응용화 수준까지 향상되었다. 그러나 아직도 초전도 결정간의 약결합이나 플럭스 크립과 같은 문제들이 해결되어야 하는 과제로 남아 있다. 벌크 초전도체는 초전도체의 우수한 통전성 및 낮은 열전도도를 이용하는 전류 인입선 응용, 전력계통의 사고방지를 위한 한류기, 영구자석과 초전도체간의 자기부상을 이용하는 플라

이월 에너지저장 및 자기부상운송, 초전도체가 외부자장을 차폐하는 특성을 이용한 자기차폐, 초전도체에 자력을 속박시켜 영구자석으로 사용하는 초전도 영구자석응용 등에 사용된다. 이들 중 전류인입선과 같은 분야는 이미 상용화되어 상품으로 판매되고 있으며, 플라이휠 에너지저장, 초전도한류기, 자기차폐 등의 응용분야도 2000년 중반까지 실용화될 것으로 예상된다.

감사의 글

이 글은 산업자원부 전력산업기반기금 과제 수행의 일부로 작성되었습니다.

참고문헌

[1] 김찬중 "Y-계 벌크 초전도체의 제조기술과 응용", 재료마당 14권 15호, 1-11 (2001)

[2] Y. A. Jee, C-J Kim, T-H Sung and G-W Hong "Top-seeded melt growth of Y-Ba-Cu-O superconductor with multiseeding", Superconductor Science and Technol. 13 195-201 (2000)

[3] N. Nakamura "Flywheel Technologies and High-T_c superconductor", ISTEC Journal vol. 6, no.1, (1993)

[4] H. Higasa, "Energy storage using flywheels", ISTEC Journal, vol. 7, no.1, (1994)

[5] M. Murakami et. al. "Large levitation force due to flux pinning in YBaCuO superconductors fabricated by melt powder melt growth process", Japan. J. Appl. Phys. 29 1991 (1990)

[6] "Superconducting levitation", edited by Francis C Moon, John Wiley & Sons, Inc. (1994)

[7] J. Hull et. al. "Flywheel energy storage using superconducting magnetic bearing", Appl. Supercond. 2 449 (1994)

[8] M. Murakami, "Novel application of high T_c superconductors", Appl. Supercond. 1 1157 (1993).

[9] "Melt processed high-temperature superconductors," edited by M. Murakami, World Scientific (1992).

[10] "Processing and properties of high-T_c superconductors, Part 1 Bulk Materials," edited by S. Jin, World Scientific (1993)

저자이력



김찬중(金瓚中)

1990년 한국과학기술원 재료공학과(초전도 재료) 박사 1993년 미국 Notre Dame 대학 전기공학과 (Post Doc.) 현재 한국원자력연구소 초전도 연구책임자