

산화물 초전도체의 응용기술

김 찬 증

한국원자력연구소 원자력재료기술연구부

1. 고온 초전도체 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. 그러나 고상소결을 통하여 제조한 초전도체의 물성은 전자기적 이방성과 입계의 약접합 때문에 임계전류밀도나 자기부상력 등에서 응용 가능한 수준에 미치지 못한다. 예를 들어, 사방정 결정구조인 Y계 초전도체($YBa_2Cu_3O_{7-y}$, 이하 123상)는 결정구조의 c 축 방향으로의 임계전류밀도는 a, b 축 방향에 비해 훨씬 낮고, 외부 자장이 c 면에 수직하게 작용할 때 급격히 감소한다. 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 외부 자장을 속박해 주는 역할을 하는 미소결합이나 2차상 입자들의 밀도가 적기 때문에 고온이나 자장 하에서 쉽게 초전도상태가 깨지게 된다. 이러한 여러 가지 문제들은 물질 고유의 특성이기도 하지만 미세조직 조절이나 공정의 개선으로 어느 정도 개선할 수 있다.

1.2. 용융공정

초전도체의 임계전류밀도를 향상시키려면 입계의 면적을 최소한으로 줄이고, 특히 전류가 흐르는 방향에 c 축이 놓이지 않게 하는 일이 중요하다. 용융공정¹⁾은 이러한 관점에서 소결공정의 단점을 상당부분

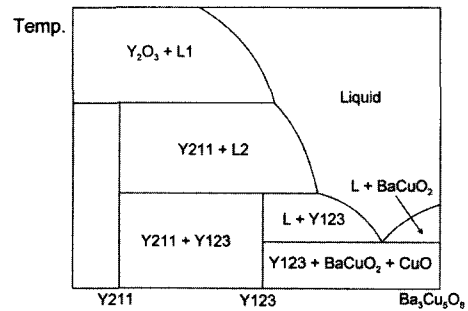


Fig. 1. YBCO 211-123-035 2원 상태도.

개선할 수 있었다. 용융 공정은 초전도 재료를 일단 용융시켰다가 다시 응고시키는 방법으로, 용융된 상태에서 온도구배를 주어 서서히 온도를 내리면 온도구배의 방향으로 단결정이 형성되는 현상을 이용한 것이다. 그림 1의 상태도에서와 같이 123 초전도상을 포정반응 온도 이상의 온도로 올리면 (Y_2BaCuO_5 (211)+액상)의 영역으로 부분 용융되는데, 여기서부터 오랜 시간에 걸쳐 서냉하면 입자크기가 크고 한 방향으로 배열된 조직을 얻을 수 있다. 이 방법을 사용하여 개선된 사항들은 크게 두 가지로 볼 수 있다. 첫 번째로, 입자들을 c 축 방향으로 적층시켜 전류가 흐르는 방향에 고각입계가 놓이지 않게 함으로써, 전자기적 성질의 이방성이나 짧은 전자간 이동거리로 인해 유발된 입계의 약접합 문제를 어느 정도 극복할 수 있었다. 두 번째, (211+액상)으로 부분 용융된 상태에서 다시 123가 형성되는 과정에서 미반응된 211 입자들이 123 결정립내에 포획된다. 이 211 입자들은 123의 미세조직을 향상시키고, 플럭스 피닝(flux pinning)에도 기여하여 임계전류밀도와 자기부상력에 유익한 것으로 알려져 있다. 그림 2는 용융공정으로 제조된 123의 미세조직을 나타내는 것으로, a/b면 방향으로 길게 배열된 결정립과 그 내부에 포획된 211 입자들을 볼 수 있다. 이 방법은 진 등에 의해 용융집합공정(MTG: melt texture growth)¹⁾이라는

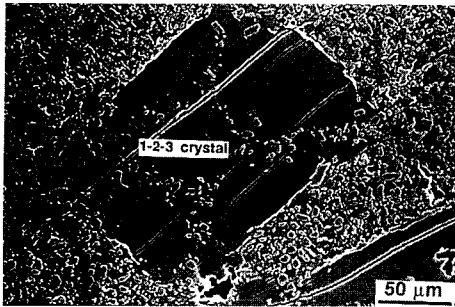


Fig. 2. 액상에서 성장하고 있는 YBCO 초전도체 결정.

이름으로 처음 개발되었으며, 그 이후에 여러 가지 개선된 공정들이 개발되었다. 서냉 시에 온도구배를 주면 MTG에서와 같이 한 방향으로 길게 자란 미세 조직을 얻을 수 있지만, 온도구배 없이 서냉할 경우에는 결정의 방향성은 없으나 그 크기가 cm 단위에 이르는 큰 결정립들을 얻을 수 있다. 또 123상을 1200°C 이상의 (Y_2O_3 +액상) 영역으로 용융시켜서 Y_2O_3 단계에서부터 211과 123의 형성을 제어하고자 하는 방법²⁾도 시도되었으며, 제 3의 원소를 첨가하여 211의 분포를 조절하려는 연구^{3,4)}도 있었다. 이러한 방법들은 모두 123 결정립의 방향성을 향상시키고, 자장속박에 기여하는 211 입자들을 미세화, 균일화하기 위하여 시도된 것이다.

1.3. 종자결정성장법

온도구배가 없는 상태에서 용융공정만을 이용하면 입자크기가 큰 다결정이 만들어지는데, 플라이휠 저장장치 등에 필수적인 강한 자기부상력을 얻으려면 결정립이 큰 단결정형 시편을 제조하여야 한다. 종자결정성장법은 가장 간단하게 123 단결정형 시편을 제조하는 방법이다. 이 공정은 123 성형체위에 그보다 녹는점이 높은 종자결정을 올려놓고 용융공정과 같은 방법으로 열처리함으로써 종자의 결정 방위와 같은 방향을 갖는 123 단결정이 자라게 하는 방법⁵⁾이다. 종자로서는 보통 123 보다 녹는점이 높고 격자상수가 비슷한 $SmBa_2Cu_3O_{7-y}$ (Sm123)나 $NdBa_2Cu_3O_{7-y}$ (Nd123) 단결정이 사용된다. 123 성형체를 (211+액상) 상태로 용융시키더라도 종자는 녹지 않고 남아 있다가, 이어서 서냉하는 과정에서 123가 종자로부터 핵생성이 되어 자라난다. 이렇게 자라난 단결정은 크기가 수 cm에 이르며 강력한 자기부상력을 나타낸다. 그림 3은 종자결정성장법으로 만든 단

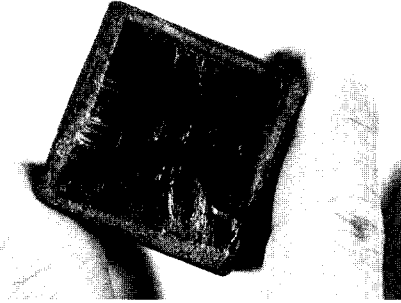


Fig. 3. 종자결정 성장법으로 제조한 YBCO 초전도체의 사진.

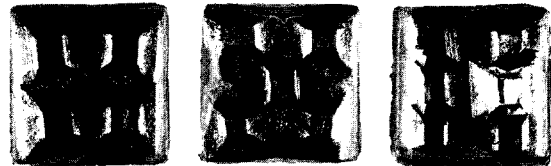


Fig. 4. 다중종자결정 성장법으로 제조한 YBCO 초전도체의 사진.

결정을 위에서 본 모습이다. 사각형 모양의 123 단결정이 성장된 모습을 보여준다. 이 방법에 의해 제조된 단결정형 초전도체의 물성은 용융공정에서와 마찬가지로 열처리 온도나 조성, 종자결정을 123 성형체위에 올려놓는 방법 등의 여러 가지 공정 변수에 따라 좌우된다. 종자결정성장법이 초전도입자의 성장 방위를 제어하는 효과적인 방법이기기는 하지만 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 공정의 경제성을 확보하려면 열처리 시간을 줄일 필요가 있는데 이를 위해 고안된 방법이 다중 종자결정성장법이다. 다중 종자결정성장법은 동일한 결정방위를 갖는 여러 개의 종자를 동시에 올려놓는 방법⁶⁾으로, 여러 개의 종자에서 초전도 결정이 성장하기 때문에 열처리 시간을 줄일 수 있다(그림 4 참조).

2. 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(H_c)보다 작을 때에는 마이스너 효과에 의해 초전도체가 부상한다. 반면, 외부자장이 초전도체의 1차 자

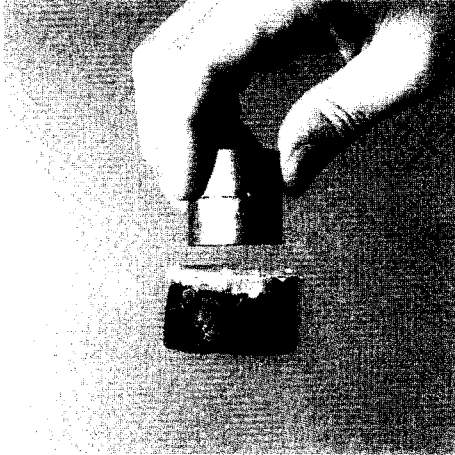


Fig. 5. Nd-B-Fe 영구자석 밑에 매달린 YBCO 초전도체.

력한계(H_{c1})와 2차 자력한계(H_{c2}) 사이에 있으면 (영구자석은 자력은 대부분 이 구간에 속한다) 외부자력이 초전도체 안으로 침투하게 된다. 이 때 초전도체 내에 이 자력선들을 속박하는 미세결합들이 존재하면 자력선을 초전도체 내에 포획할 수 있다. 용융법으로 제조한 초전도체와 같이 임계전류밀도가 높고 자력 속박성이 우수한 초전도체는 외부자장을 쉽게 포획한다. 이 경우 초전도체의 부상력은 마이스너 효과에 의한 것이 아니라 초전도체 내에 포획된 자장에 기인한다⁷⁾. 플럭스 피닝에 의한 부상력은 마이스너 효과에 의한 부상력 보다 상대적으로 크다. 또한 초전도체의 부상력은 포획된 자장의 크기와 외부자장, 즉 영구자석의 자력에 비례한다. 마이스너 효과에 의한 부상력은 물체를 밀쳐내는 단순한 반발력인 반면, 플럭스 피닝에 의한 부상력은 반발력과 인력의 두 성분을 갖는다. 그림 5는 영구자석 밑에 매달린 Y-계 초전도체의 사진이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 초전도체가 영구자석 밑에서 일정한 거리를 유지하며 매달려 있다. 이는 초전도체내에 포획된 자력의 인력성분(그림 6 참조)과 영구자석의 척력이 서로 평형을 이루고 있기 때문이다.

3. 초전도 벌크의 응용기술

3.1. 무접점 베어링(Contactless bearing)

베어링은 회전축의 처짐을 방지하고 회전력의 손실을 최소화하고자 할 때 사용되는 기계부품이다. 일반적으로 사용되는 베어링은 베어링과 회전축이 접

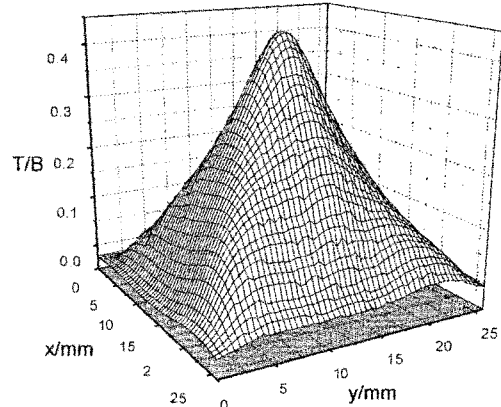


Fig. 6. 초전도 내에 포획된 영구자석의 자력분포.

촉하여 축을 지지하므로 접촉에 따른 에너지 손실이 있게 된다. 마찰에 의한 에너지 손실은 윤활제를 사용하거나 구름마찰을 이용하여 줄일 수 있으나 이 방법으로 마찰을 줄이는 데는 한계가 있다. 영구자석간의 반발력을 이용하는 마그네틱 베어링의 사용하면 마찰을 최소화할 수 있다. 그러나 반발력만 있게 되면 물체의 위치를 고정하기가 어려우므로 이 경우 위치 고정을 위한 특수한 제어장치가 필요하다. 반면 초전도체는 영구자석의 자력을 속박하는 능력이 있다. 초전도체를 영구자석의 자력 영향권에 위치시키고 적절한 냉각방법으로 초전도체의 온도를 내려주면 초전도체 안에 영구자석의 자력을 저장할 수 있다. 이 때 저장되는 자력성분은 반발력과 인력을 합이 된다. 이런 방법으로 자력 냉각시킨 초전도체를 위치 고정자로 사용하여 그 위에 영구자석을 부착한 물체를 부상시키면 마찰에너지 손실이 최소화할 수 있고, 특별한 위치 제어장치 없이 물체 위치를 고정할 수 있다.

베어링 재료로는 플럭스 피닝능과 자기부상력이 큰 Y-계 초전도체가 가장 널리 사용된다. 그림 7은 한국 원자력 연구소에서 개발한 초전도체 베어링 시스템이다. 회전체는 고리형태의 영구자석이며 영구자석 밑의 냉각조에는 액체질소에 담긴 초전도체가 들어 있다. 이 초전도체와 영구자석간의 부상력으로 회전체를 부상하기 때문에 14,000 rpm의 고속회전이 가능하게 된다.

3.2. 플라이휠 에너지 저장(Fly wheel energy storage)

초전도체와 영구자석을 이용하여 원판체를 초전도



Fig. 7. 초전도체 위에서 부상하여 고속으로 회전하는 무접촉 초전도 베어링.

체 위에서 회전시켜 에너지를 저장한 후 저장된 운동에너지를 다시 전력으로 변환시키는 플라이휠 에너지 저장장치가 있다. 초전도 자석을 이용하는 에너지 저장방식은 전력의 입출력이 빠르고 에너지 손실이 극히 적은 방식이다. 그러나 저온 초전도자석을 이용하는 에너지 저장장치는 자석에서 발생하는 고자장의 영향, 과도한 냉각설비비 및 적합한 특성의 초전도선재 확보의 어려움 때문에 장치의 대형화에 한계가 있다. 이에 비하여 고온 초전도체를 베어링으로 사용하는 플라이휠 에너지 저장장치는 냉매로 액체질소를 사용하므로 냉각비용을 어느 정도 절감할 수 있고, 장치의 설계 및 제작이 용이하기 때문에 저온 초전도 자석을 이용하는 경우보다 실용화 가능성이 높을 것으로 예상되고 있다^{8,9)}.

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 내장한 디스크로 구성되어 있는 베어링, 회전에 의해 운동 에너지를 발생시키는 회전체, 그리고 동력 발생 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 영구자석을 플럭스를 속박하여 발생하는 플럭스 피닝에 의한 인력으로 인해 자기부상의 안정성(stiffness)이 높다는 장점이 있다. 영구자석 간의 반발

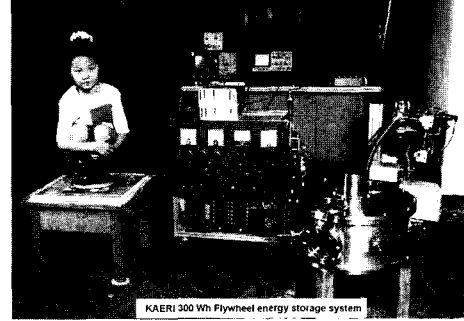


Fig. 8. 한국원자력 연구소에서 개발한 300 Wh급 플라이휠 에너지저장장치.

력만을 이용하는 기존의 플라이휠 시스템은 회전자의 위치 안정화를 위하여 특수한 제어장치가 반드시 필요하다. 이 경우 베어링에 의한 마찰을 어느 정도 줄일 수 있으나, 회전자의 위치제어장치에 에너지가 소모되므로 시간당 최소한 1%, 즉 하루에 저장된 에너지의 약 25% 이상이 손실된다. 반면, 고온초전도체의 경우 특별한 위치 제어장치 없이 초전도영구자석간의 자기부상에 의해 회전체를 띄워서 돌려주므로 저장에너지 손실은 시간당 약 0.1%, 즉 하루에 약 2%에 지나지 않는다.

그림 8은 한국원자력 연구소에서 개발한 300 Wh급 초전도 플라이휠 에너지 저장장치이다. 초전도체 위에서 부상시킬 수 있는 무게를 증가하면 플라이휠에 저장할 수 있는 에너지도 많아진다. 약 20 kg의 회전체를 수천 rpm의 속도로 회전이 가능하였다. 플라이휠 에너지 저장장치를 이용하면 전력사용이 전력소모가 적은 시간대에 남는 에너지를 저장해 두었다가 전력소모가 많은 시간대에 저장된 전력 사용할 수 있을 것이다.

3.3. 자기차폐(Magnetic shielding)

초전도체에는 외부자장을 차폐하는 효과가 있다. 초전도체가 얼마나 큰 자장을 차폐할 수 있는지는 초전도체의 임계전류밀도에 의해 결정된다. 임계전류밀도가 클수록 외부자장을 차폐하는 효과가 크다. 초전도 양자간섭기(SQUID: Superconducting quantum interference device)와 같이 미세한 자력을 측정하는 장비에는 자력을 차폐하는 기술이 필요하다. 인간의 신체부위에서 발생하는 자력은 대단히 작기 때문에 그것을 측정하기 위해서는 외부로부터 오는 잡음 신

호들을 차폐하여야 한다. 현재는 차폐체로 금속재료를 사용되고 있다. 금속재료를 초전도체로 대체한다면, 좀 더 강력한 자기차폐가 가능하며, 따라서 장비의 자력 감지효율을 높일 수 있을 것이다¹⁰⁾. 초전도 차폐용기는 심지어 측정용 초전도 양자간섭기의 자기차폐에 사용될 수 있을 것으로 전망된다.

3.4. 초전도 영구자석(Superconducting magnet)

초전도체는 플럭스 피닝에 의해 외부자력을 속박할 수 있다. 상온에서 영구자석 위에 초전도체를 올려놓으면 초전도체가 비초전도상태에 놓이게 되므로 영구자석의 자력이 초전도체 내로 침투한다. 이 상태에서 초전도상태가 되도록 액체질소온도로 초전도체를 냉각하면 침투한 자력이 초전도체 내로 속박된다. 이 냉각방법을 자력냉각이라고 한다. 초전도체내에 자력이 속박되므로 초전도체는 자력을 갖게 된다. 초전도체의 임계전류밀도가 높으면 많은 자력을 속박할 수 있다. 용융공정으로 제조한 시편의 경우, 초전도체를 표면자력 0.4 테스라의 자석 위에 올려놓고 77 K까지 냉각시킬 경우 초전도체의 중심부분에는 0.4 테스라의 자력이 속박되며 중심에서 외부로 갈수록 속박되는 자력의 양이 점진적으로 감소한다.

초전도 벌크를 초전도 자석으로 사용하게 되면 초전도체의 가공공정이 단순해진다. 용융법으로 제조된 초전도체를 자석으로 이용한 경우 77 K에서 1 테스라 이상의 자력을 속박할 수 있다. 77 K 보다 더 낮은 온도에서 작동할 경우에는 초전도체의 임계전류밀도가 상대적으로 높아지므로 많은 자장을 발생시킬 수 있다(4.2 K에서 6 테스라 이상의 자력). 벌크 초전도자석은 비자성체나 약자성체에 일정한 자장을 공급하는 MRI(Magnetic Resonance Image)와 같은 장비에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

3.5. 전류 인입선(Current lead)

의료기기로 상용화되고 있는 초전도자석은 Nb_3Ti 이나 Nb_3Sn 의 금속간 화합물 초전도 선재를 솔레노이드 형태로 감아서 만든다. 초전도자석을 가동하려면 외부에서 전류를 공급해 주어야 한다. 소규모 실험용 자석에는 수 십 암페어 정도의 전류를, 초전도 발전용 자석이나 핵융합로용 자석의 경우는 수 만 암페어의 많은 전류를 공급해야 한다. 일반적으로 상용되는 초전도자석은 구리나 황동 등 금속재질로 만든

전류단자를 사용하여 초전도자석에 전류를 공급한다. 이러한 금속재질의 전류단자들은 열전달이 빠를 뿐만 아니라, 도선에서 발생하는 전기저항에 의해 이곳을 통해 냉각계의 열이 외부로 방출된다. 초전도자석의 운영비 중 냉매(액체헬륨) 사용비와 냉각기 가동비가 상당한 비중을 차지한다. 따라서 열방출의 원인이 되는 전류단자의 재료선택이나 설계를 최적화하여 운영비를 줄여야 한다.

산화물 초전도체는 독특한 열적, 전기적 특성을 가진다. 고온 초전도체를 전류단자로 사용하면 저항발생에 따른 열손실이 없고, 작은 단면적에 많은 전류를 흘릴 수 있다. 고온 초전도체는 산화물이기 때문에 열적특성은 금속이온과 산소이온의 이온결합에 의존한다. 이온에 의해 전달되는 열전달량은 자유전자를 통해 열이 전달되는 금속계와 비교해 현저히 작다. 따라서 산화물 초전도체에는 전류는 많이 흐르지만 열은 적게 흐른다. 산화물의 열적 특성과 초전도체의 전기적 특성을 동시에 이용한 것이 초전도 전류 인입선이다¹¹⁾. 결정면의 a-b 방향으로 일방향 성장시킨 Y-계 초전도체에는 수천 암페어의 전류를 흘릴 수 있다. 용융법으로 제작한 Bi-계 초전도체에도 천 암페어 가량의 전류를 흘릴 수 있다. 전류가 흐를 때의 열 손실은 Bi-계가 Y-계 보다 우수한 것으로 평가되었다. 세라믹 초전도체는 초전도 전이온도가 액체질소온도 부근이므로 전류 인입선 전체를 초전도체로 제작하려면 별도의 냉각장치가 필요하게 된다. 따라서 한 재질로 전체 전류인입선을 만들기보다는 상온에서 77 K까지는 구리나 황동과 같은 금속 전도성 재질로, 77 K 이하에서 자석의 가동 온도구간까지는 세라믹 초전도체를 사용하는 것이 바람직하다. 구리선과 초전도체를 연결하여 제작한 하이브리드(hybrid)형 전류인입선의 전기 및 열 특성을 측정 한 결과, 초전도체로 약 1,000 암페어의 전류를 지속적으로 흘릴 수 있었으며, 이 때 열손실은 금속재 전류단자의 약 30%이었다. 그림 9는 현재 상업적으로 시판되고 있는 Bi-계 전류 인입선의 사진이다. 원료 분말을 녹여 적당한 틀에 부어서 열처리하여 만든 것으로 양 끝단에 전선을 연결하기 위해 금속 은판을 부착하였다. 이 초전도 전류 인입선에 흘릴 수 있는 전류량은 수 천 암페어 정도로 매우 높다. 초전도 전류인입선은 냉동기로 초전도 코일을 냉각하는 초전도 자석에 사용되고 있다.

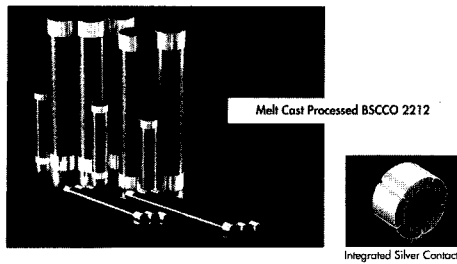


Fig. 9. 용융-주조공정으로 제조한 Bi-2212 전류 인입선 (ACCEL Intr. Co.).

3.6. 자기부상운송(Levitated linear carrier)

반도체를 생산하는 공정에서 가장 주의를 기울여야 할 점은 공정 내로 분진이 유입되는 것을 막는 것이다. 먼지가 조금이라도 있게 되면 반도체의 품질에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 따라서 반도체 공정은 청정실에서 이루어진다. 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. 일본 도시바에서 청정실에서 사용되는 운송장비를 초전도체의 자기부상 원리를 이용하여 제작하였다. Y-계 초전도체를 사용한 1.3 키로의 용기를 자석 위에 띄워서 리니어 모터로 이동할 수 있게 하였다. 영구자석영구자석 가이드 레일이 없이도 무접촉 운송장비를 제작할 수 있다. 일본 신큐에서 설계한 운송장비는 외부와 고립된 냉각조 내부에 초전도체로 구성된 이동부를 위치시키고, 초전도체에 상응하는 위치에 영구자석을 배치한 운송부를 설치하여 접촉 없이 이동할 수 있게 하였다.

3.7. 초전도 한류기(Fault current limiter)

산업사회의 거대화로 인해 발전량이 증가하고 있고, 이에 따라 전기의 단락사고 발생률이 높아지고 있다. 전력량이 커지게 되면 대용량의 차단기를 추가적으로 설치해서 전력 계통의 안정성을 확보해야 하지만, 차단기 설치용 부지확보에 드는 비용부담이 크고, 차단기에 사용되는 절연유 등이 환경오염원이 되기 때문에 차단기의 추가설치에는 많은 문제가 있다. 이런 문제점의 해결방안으로 고온 초전도체를 사

용한 한류기가 개발 중이다. 고온 초전도체는 초전도체가 감당할 수 있는 일정 전류한도까지는 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, 벌크용, 선재형 한류기로 나눌 수 있다. 대용량의 한류기에는 선재를 슬레노이드 형태로 감아 사용하며, 중소형 한류기에는 박막형이나 벌크형의 초전도체가 사용된다. 과부하 시에 초전도체에 발생하는 저항을 이용하는 저항용 한류기와 초전도체에서 발생하는 자기장을 이용하는 자기 차폐형 한류기가 개발 중이다. 스위스 전력사에서 10.5 kV급 자기 차폐형 한류기를 개발하였고, 미국, 일본 등도 전력회사를 중심으로 수 십수 백 kV급 한류기를 개발 중이다.

3.8. 천체 관측용 망원경(Lunar telescope)

지구는 대기와 두꺼운 구름 층으로 둘러 쌓여 있기 때문에 천체를 관측하기가 쉽지 않다. 일반적으로 천체 관측소는 날씨가 좋고 공기밀도가 낮은 고산지역에 건설된다. 공기밀도가 낮아야 천체를 관측하기 쉽기 때문이다. 천체를 관측하기에 가장 좋은 장소는 대기가 전혀 없는 달이다. 달에는 공기가 없으므로 천체 관측이 용이하고 관측 시간에 제약이 거의 없다. 그러나 천체 관측소 설치하려면 관측시설을 지구로부터 달까지 운반하므로 비용이 많이 든다. 또한 설비의 유지, 관리하기가 쉽지 않다. 만일, 초전도체를 베어링으로 사용하여 천체 관측용 망원경을 만들면 망원경의 회전부나 기기 작동부의 구성이 간단해지므로 장치의 부피를 줄일 수 있고, 제작, 설치, 유지비용을 줄일 수 있다. 달에 도달하는 태양 빛을 차단할 수 있다면 달의 표면온도는 약 40 K가 될 것이므로 냉매 없이도 고온 초전도체 베어링을 사용할 수 있다. 90 K의 초전도 온도를 갖는 고온 초전도체가 달에서는 상온 초전도체가 되는 셈이다. 또한 달의 중력은 지구에 비해 매우 작기 때문에 지구에서보다 초전도체 위에 더 많은 중량을 띄울 수 있다. 그림 10은 Chen 등¹²⁾이 고안한 초전도 망원경이다. 대물렌즈와 대안렌즈가 주 망원경의 주구성부이고, 하부에는 초전도 베어링을 설치하여 망원경의 위치

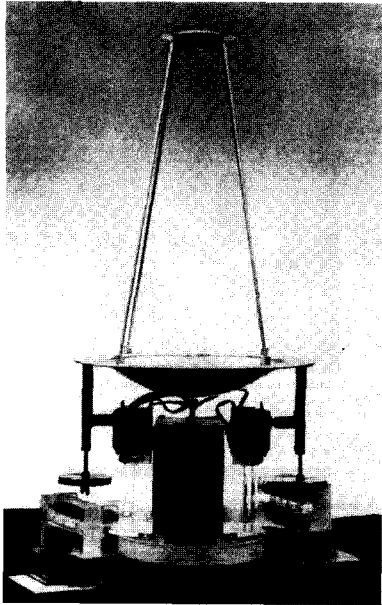


Fig. 10. NASA에서 개발한 초전도 베어링을 사용한 천체 망원경.

를 자유자재로 조절할 수 있게 고안되었다.

4. 결 론

고온 초전도체 연구는 그것이 갖는 물리화학적 중요성과 더불어 미래의 에너지 관련산업에서 중요한 위치를 차지하기 때문에 각국이 국가적인 차원에서 집중적으로 지원하고 있다. 초전도재료는 초전도 송전, 전기저장, 초전도 발전, 핵융합과 같은 기존 에너지 시스템의 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 수 년 동안의 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, 전력계

통의 사고방지를 위한 한류기, 영구자석과 초전도체 간의 자기부상을 이용하는 플라이휠 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, 자기차폐 등의 응용분야도 2000년 중반까지 실용화될 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. S. Jin: *Processing and Properties of High-Tc Superconductors*, Ch. 5, (Edited by S. Jin) p. 155-211. World Scientific Publishing Co., 1993.
2. M. Murakami, M. Morita, K. Doi and M. Miyamoto: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28** (1989) 1189.
3. C-J. Kim, K-B. Kim, H-W. Park, T-H. Sung, I-H. Kuk and G-W. Hong: *Supercond. Sci. Technol.*, **9** (1996) 76.
4. N. Ogawa, I. Hirabayashi and S. Tanaka: *Physica C*, **177** (1991) 101.
5. M. Morita, S. Takebayashi, M. Tanaka, K. Kimura, K. Miyamoto and K. Sawano: *Adv. Supercond.*, **III** (1991) 733.
6. Y. A. Jee, C-J. Kim, T-H. Sung and G-W. Hong: *Supercond. Sci. and Technol.*, **13** (2000) 195.
7. M. Murakami, T. Oyama, H. Fujimoto, T. Taguchi, S. Gotoh and Y. S. Hiohara: *Japan. J. Appl. Phys.*, **29** (1990) 1991.
8. H. J. Lee and W. G. Kim: *KAERI report RR-1044/91* (1991) 28.
9. F. C. Moon: *Appl. Phys. Lett.*, **56** (1990) 397.
10. K. Hoshino, H. Ohta, E. Sudoh, K. Katoh, S. Yamajaki, H. Takayama, H. Takahara and M. Aono: *IEEE Trans. Mag.*, **27** (1991) 2202.
11. B. Dorr, K. Herd, E. T. Laskaris, J. E. Tkaczyk and K. W. Lay: *IEEE Trans. Mag.*, **27** (1991) 1861.
12. P. C. Chen, R. J. Oliverson and H. Hojaji: *Proceeding of the TCSUH workshop in 1992*.