



고온초전도체의 기술개발 현황 및 전망



유 상 임

서울대학교 재료공학부 교수
siyoo@snu.ac.kr

약력 : 서울대학교 무기재료학과 졸업
서울대학교 대학원 공학석사
Iowa State University 공학박사
Ames Laboratory-USDOE 박사후기 연구원
Superconductor Research Laboratory-ISTEC 초빙연구원
Railway Technical Research Institute 주임연구원

I. 서 언

20세기는 과학기술의 시대라 할 만큼 눈부신 과학기술 분야의 발전이 있었다. 특히 20세기 중반 이후 고도로 발달되어 온 정보통신기술은 21세기 초를 지식정보화 사회로 견인함으로써 전세계에서 발생하는 일들을 실시간에 공유하고 상호 영향을 미치는 세계화 시대를 도래하게 하였다. 21세기 초에는 정보통신 기술의 지속적 발전외에도 생명기술, 나노기술, 환경·에너지 기술, 우주 기술 등등의 분야에서 급속한 발전이 예측되고 있다.

정보통신 분야의 발전은 대량의 지식정보를 보다 빠른 시간에 처리하고 전송할 수 있는 컴퓨터와 광통신의 발전이 토대를 이루었는데, 이러한 발전을 가능하게 한 중심적인 원천기술은 반도체와 광섬유라는 소재의 제조기술이라 할 수 있다. 그렇다면 향후 반도체와 광섬유에 필적하거나 그 이상의 파급효과를 가져 올 소재에는 어떤 것이 있을까? 필자는 가장 유력한 소재로 고온초전도체를 꼽는데 주저하지 않는다. 고온초전도체는 정보통신 분야 뿐 아니라 환경·에너지 분야에서

도 혁신적 발전을 가능하게 할 것으로 예상되기 때문이다. 본 고에서는 21C 초 꿈의 소재라 일컫는 고온초전도체의 기술개발 현황과 전망에 대해 구체적으로 설명하고자 한다.

고온초전도체의 기술개발 현황과 전망에 대한 본격적인 논의에 앞서 초전도체 과학기술의 발달 과정에 대한 설명이 긴요할 것으로 사료되어 먼저 이에 대해 간략히 논의 한 후, 고온초전도체의 산업적 응용은 소재의 유형에 따라 크게 선재(wires and tapes), 벌크(bulks) 및 박막(thin films) 등 세가지로 나눌 수 있으므로, 각각의 유형별 기술개발 현황 및 전망을 구분하여 구체적으로 기술하고자 한다.

2. 본 론

(가) 초전도체 과학기술의 발달사

20세기 초엽인 1911년 네덜란드의 H. Kammerlingh Onnes가 처음으로 수은 물질이 4.12 K(이를 임계온도, T_c 라 함)이하에서 전기 저항이 없어지는 초전도현상을 발견한 이래, 이 현상을 이해하기 위한 기초적 연구와 보다 높은

Tc를 갖는 신물질 개발 및 응용을 위한 신기술 개발이 병행되어 왔다.

Tc 이하의 온도에서 직류 저항이 0이 되는 초전도체(superconductor)의 독특한 특성 외에도 초전도성(superconductivity)을 이해하는데 결정적으로 기여한 물리학적 연구결과는 1933년에 발표된 Meissner와 Ochenfield에 의한 소위 Meissner 효과의 발견, 1950년 Ginzberg와 Landau가 보고한 현상학적 초전도 양자이론, 1957년 Abrikosov가 제안한 제 2종 초전도체의 양자화된 자속 이론, 1957년 Barden, Cooper 및 Schriffier이 발표한 미시적 BCS 초전도 양자이론, 1962년 Joshepson에 의한 초전도 전자쌍의 터널링 현상 발견 등을 들 수 있다. 이러한 초전도 물성의 깊은 이해는 일반 상전도 금속선으로 구현하기 어려운 고자장 발생용 초전도 전자석의 실현이 가능한 이유를 이론적으로 설명했을 뿐 아니라, 초전도체로 새로운 유형의 초고감도 소자를 구현하고 및 실용화하는데에 결정적으로 기여했다.

한편, 초전도체 재료의 발달과정을 살펴보면, 1986년을 기점으로 크게 두 시기로 나눌 수 있다. 먼저 1986년 이전까지 총 27종의 순수 금속과 수천종에 이르는 합금 및 수종의 금속산화물 초전도체가 발견되었는데, 이러한 재료의 특징은 가장 높은 Tc가 1973년 개발된 Nb₃Ge의 23.4 K로 모두 30 K 이하라는 점이다. 특히, 이 초전도체의 초전도 특성을 잘 설명하고 예측도 가능하였던 BCS 이론에 따르면 30 K 이상의 Tc는 얻을 수 없다는 것으로 이러한 Tc의 한계를 보이는 것이 당연한 것으로 받아들여 졌었다. 그러나 이를 뒤집은 사건이 1986년 Bednortz와 Muller에 의해 이루어졌는데, Tc가 30 K이 넘는 (La,Ba)₂CuO₄ 금속 산화물 초전도체를 발견한

것이다. 이를 계기로 새로운 물질을 발견하려는 세계적인 연구개발 노력이 경쟁적으로 이어진 결과 액체질소 온도(77.3 K)을 넘는 금속산화물들이 연이어 발견된 것이다. 이러한 이유로 30 K이하의 Tc를 가지는 재료를 저온초전도체(low temperature super-conductor)라 하고, 30 K 이상의 Tc를 나타내는 재료를 고온초전도체(high temperature super-conductor)라 하여 구분하고 있다. 이 발견은 또한 저온초전도체의 초전도성 발현 메카니즘을 잘 설명할 수 있었던 BCS 이론의 한계를 실험적으로 증명한 것으로 고온초전도체의 경우 새로운 이론이 요구되지만 현재까지도 그 메카니즘이 명확히 규명되지 않고 있는 실정이다.

저온초전도체 가운데, 현재 상용화되어 있는 재료는 약 30여년 전부터 본격적인 상용화가 이루어져 온 Tc 9 K급 Nb-Ti 합금이 주류를 이루고 Tc 18 K급 Nb₃Sn이 일부 사용되고 있다. 이들 저온초전도체는 다심 선재(multiple core wire) 형태로 제조하여 초전도 전자석(superconducting electromagnets)의 권선으로 사용되며, 이를 응용한 시스템으로는 의료용 자기공명기(MRI), 연구용 핵자기공명(NMR)측정기, 초전도 자기부상열차(Superconducting MAGLEV), 초전도 자기에너지저장시스템(SMES) 등이 있다. 또한, 박막형 초고감도 센서로 초전도양자간섭소자(SQUID) 등이 있다. 저온초전도체가 위에서 열거한 응용 시스템을 제외한 송전 케이블, 변압기, 한류기, 모터 등의 전력응용기기를 위시하여 새로운 응용기기에 보다 광범위하게 사용되지 못했던 가장 큰 제약 요소는 Tc가 낮아 응용기기의 작동시 냉각 매체로 고가의 액체 헬륨을 사용해야하므로 경제성이 희박하기 때문이었다.



앞서 살펴 본 저온초전도 재료의 응용 한계를 극복할 수 있는 가능성이 1986년 후 일련의 고온초전도 재료가 발견되면서 열리게 되었다. 고온초전도체 재료의 발견을 간략히 설명하면, 1986년 Tc가 30 K이 넘는 $(La, Ba)_2CuO_4$ 고온초전도체의 발견 직후, 1987년 90 K급 $YBa_2Cu_3O_{7-d}$ (YBCO) 및 $REBa_2Cu_3O_{7-d}$ (REBCO)의 발견, 이 후 수 년 내에 Tc가 각각 최고 105, 125, 134 K을 나타내는 Bi-Sr-Ca-Cu-O(BSCCO)계, Tl-Ba-Ca-Cu-O계, Hg-Ba-Ca-Cu-O계의 발견으로 이어졌다. 이 후 현재까지 상압하에서 Tc가 더 높은 재료는 발견되지 않고 있다. 단지 2001년 금속합금으로는 최고를 경신한 Tc 39 K급 MgB_2 의 발견은 주목할 만하다. 특히 90 K급 YBCO 초전도체의 발견은 고가의 희박한 액체헬륨 대신 저렴하고 풍부한 액체 질소를 냉매로 사용할 수 있는 가능성을 열었고, 따라서 고온초전도체의 산업적 응용을 실현하기 위한 제조기술 및 응용기술 개발을 촉발하는 계기가 되었다.

한편, 수천종에 이르는 저온초전도체 가운데 실제 상용화된 것은 Nb-Ti합금과 Nb_3Sn 이 주종을 이루듯이 많은 고온초전도 재료 가운데에도 실제 응용성이 있는 재료는 YBCO와 BSCCO 두 종류로 평가되고 있으며, 최근 발견된 MgB_2 는 기존에 상용화되어 있는 Nb-Ti 선재의 대체 가능성이 있는 것으로 평가되고 있다. 이밖의 재료들은 비록 임계온도는 높을지라도 유해성과 화학적 불안정성 등으로 인해 응용성이 매우 낮은 것으로 평가된다.

(나) 고온초전도체의 기술개발 현황 및 응용 전망

(a) 고온초전도 선재

고온초전도체를 산업에 대규모로 응용하려면 액체질소를 냉매로 사용할 수 있는 온도 영역(65~77 K)에서 우수한 임계전류밀도(critical current density, Jc)특성을 가지는 장선재의 제조기술 개발이 필수적이다. 고온초전도 장선재 제조기술의 개발이 재료가 발견된 이후 상당히 지체된 것은 고온초전도체가 기계적으로 부스러지기 쉬운 금속 산화물로 된 세라믹 재료이기 때문에 선재 제작시 기존에 개발된 금속 및 합금을 기반으로 하는 저온초전도체 선재의 제조기술인 압출/인발 등의 소성가공을 적용할 수 없으므로, 새로운 제조기술의 개발이 요구되었고, 더구나 세라믹으로 손쉽게 얻을 수 있는 다결정 형태의 미세조직을 가지는 고온초전도체로는 응용에 적합한 높은 Jc를 얻을 수 없다는 점이 밝혀짐에 따라 더욱 심각한 기술적 한계에 부딪혔기 때문인데, 이로 인해 한 때 매우 비관적인 고온초전도체의 응용성이 대두되기도 하였다.

그러나 고온초전도체 선재가 가질 엄청난 경제적 파급효과 때문에 새로운 선재 제조기술을 개발하기 위한 노력이 미국, 일본, 유럽 등 선진국을 중심으로 꾸준히 전개되어 많은 기술적 난제들을 극복함으로써 초기에는 상상하기도 어려웠던 장선재 제조를 위한 신기술이 개발되어 왔다. 그 결과 기계적으로 취약하고 구조적으로 복잡한 산화물계 고온초전도체의 특성에도 불구하고, 선진국의 회사들은 액체질소온도(77 K)에서 100 A 이상의 임계전류(critical current, Ic) 그리고 20,000 A/cm² 이상의 공학적-전류밀도(Je)를 가지는 수백 m 길이의, “제 1세대 고온초전도 선재”로 알려진 BSCCO 고온초전도 선재의 제조에 성공하여 이미 판매되고 있다. 그러나 BSCCO 선재는 은(Ag)튜브에 초전도 분말을 주입하여 가공

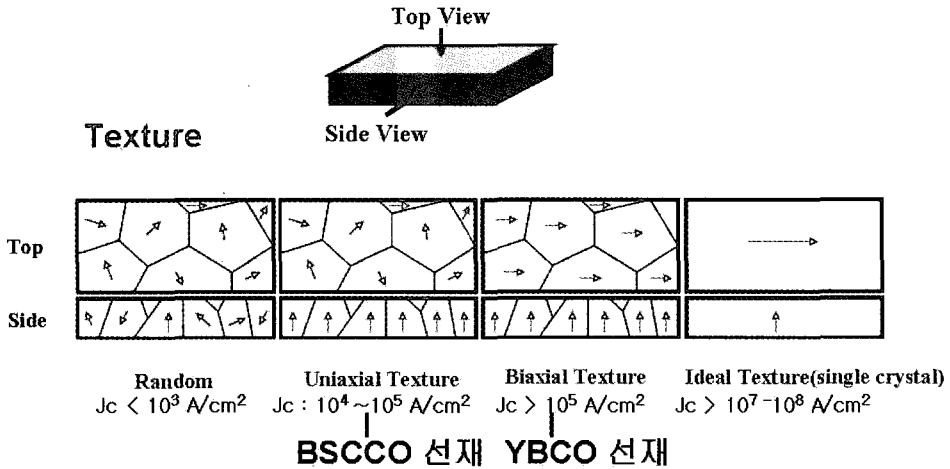


그림 1. 고온초전도체의 집합조직과 입계전류밀도의 상관관계

열처리하는 Powder-In-Tube(PIT) 가공법이 주로 이용되고 있는데, 피복제로 고가의 은(Ag)을 사용해야하는 관계로 응용기에 적용하기는 아직 경제성이 희박하다는 점이 향후 상용화에 걸림돌로 남아있다. 더구나 BSCCO 초전도체는 액체질소 온도 영역에서 취약한 자속피닝(flux pinning) 특성 때문에 낮은 비가역자기장(irreversibility field: 주어진 온도에서 자기장을 인가할 때 J_c 가 0가 되는 임계자장)과 인가되는 자기장의 세기가 증가함에 따라 J_c 가 현저하게 감소되는 단점으로 인해 초전도 송전 케이블을 제외한 초전도 전력기기 응용에는 치명적인 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 최근 선진국을 중심으로 개발 경쟁이 치열하게 전개되고 있는 것이, “제 2세대 고온초전도 선재(coated conductor)”라고 일컫는 YBCO 및 REBCO 선재이다. 제 2세대 고온초전도 선재 분야는 1990년대 중반 2축 배열 집합조직 금속기판에 완충층을 올린 후 초전도체를 올리는 방법으로 시작된 후, 새로운 관련 기술이 속속 개발되었

고 현재 아주 빠른 속도로 장선재 제조 기술이 발전하고 있다.

미세조직으로 볼 때, 제 1세대와 제 2세대 고온초전도 선재의 가장 큰 차이점은 1세대 선재의 경우 1축 배향성(uniaxial texture)을 가진 집합조직을 2세대의 경우 2축 배향성(biaxial texture)을 가지는 집합조직을 형성하는 것이다. 이러한 집합조직은 고각 입계(high-angle grain boundary)에서 발생하는 초전도전류 흐름의 저해를 최소화하기 위한 것이기는 하지만, 그림 1에 나타낸 바와 같이 2축 배향 집합조직의 경우 보다 효과적이므로 월등히 높은 J_c 를 얻을 수 있고, 더구나 액체질소 온도 영역에서 2세대의 재료인 YBCO 혹은 REBCO가 1세대인 BSCCO보다 자장하에서 월등히 우수한 J_c 특성을 유지하므로 송전 케이블 뿐 아니라, 여타의 초전도 전력기기 응용에 적합한 것으로 평가되고 있다. 고온초전도 선재의 기술개발 현황을 제 1세대와 제 2세대로 나누어 구체적으로 설명하고자 한다.



제 1세대 선재 : BSCCO 선재

BSCCO계 초전도체는 Tc 85 K급인 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 와 105 K급인 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ 등 두 종류가 있는데, 액체질소에 사용될 수 있는 것은 후자 뿐이므로 여기서는 이 재료에 국한하여 설명하고자 한다. 하지만 이 두 재료의 장선재 제조공정은 열처리 공정변수를 제외하면 대동소이하다.

앞서 간략히 설명한 바와 같이 BSCCO 선재는 PIT(Powder-In-Tube)법으로 은(Ag) 튜브에 BSCCO 초기 분말을 충전한 후, 인발(drawing) 및 압출(rolling) 가공하고 그 다음 열처리공정-압출 가공-열처리 공정을 반복하여 최적의 미세 구조 및 1축(결정학적으로 c-축)배향 집합조직(texture)을 달성함으로써 높은 J_c 를 얻는 방법으로 장선의 다심선재 제조를 위한 주요 공정도를 그림 2에 나타내었다. 이러한 제조 기술은 연성이 취약한 세라믹 분말의 1축 배향 집합조직을 구현하는 신기술로 이전에는 그 예를 찾을 수 없는 독창적인 기술이다. 이러한 공정으로 집합조직이 형성되는 이유는 BSCCO 결정립들이 열처

리시에 판상으로 성장하는 특성과 압출 공정시 판상의 결정립이 서로 평행하게 배열되는 현상을 적절히 활용한 것이다.

고온초전도 선재의 J_c 특성 향상은 초전도체 결정립간에 존재하는 고각의입계에서 초전도전류 흐름이 크게 저해되는 현상을 최소화하기 위한 집합조직을 어떻게 발달시키는가(그림 1 참조)와 초전도상 내에 침투하여 초전도전류의 흐름을 저해하는 자속(magnetic flux)의 열적 유동을 제어할 수 있는 효과적인 자속고정점(flux pinning center)을 구현하는 기술에 달려있다. 특히 BSCCO 고온초전도체는 다성분계이기 때문에 초전도 단일상 형성 및 입자성장을 통한 초전도 집합조직의 제어를 위한 압출 및 열처리 공정의 최적화 만으로는 장선재의 임계전류 특성 향상 및 재현성 구현이 불가능하므로 초기 분말 특성의 제어가 필수적이다. 현재 100 A 이상의 높은 I_c 를 가지는 장선재를 생산하는 미국 AMSC사 및 일본의 Sumitomo사는 이러한 분말제조에 대한 자체 Know-how를 확보하고 있고 노출을 극히 꺼리고 있는 실정이다.

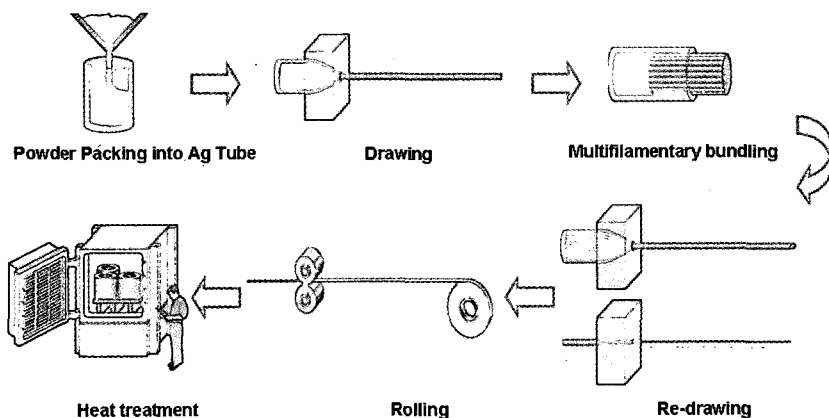


그림 2. BSCCO 장선 다심선재의 주요 제조공정도.

BSCCO 선재 분야에서 선두라고 할 수 있는 미국의 AMSC(American Superconductor) 사는 2002년 BSCCO 고온 초전도 선재의 생산라인을 연간 10,000km 수준으로 증설하여 본격적인 상용화를 시작하였다. AMSC사는 현재 시판되고 있는 고온초전도 선재 중에 최고 특성인 임계전류 100 A급 이상의 선재를 시판하고 있다. 현재 BSCCO 장선재 분야에서는 미국의 AMSC사 외에도, 일본의 Sumitomo사, 독일의 Trithor사 및 Siemens/Vacuum-Schmelze사, 최근 중국의 InnoST사 등 5개사가 주로 생산하여 판매하고 있다. BSCCO 선재는 특성에 따라 많은 가격차를 보이며 1m당 20~60\$의 가격으로 판매되고 있는데, 상업화가 가능하려면 30\$/kA-m 이하로 가격이 떨어져야 하나 채산성을 맞추기 어려운 문제가 남아 있다. 향후 BSCCO 고온 초전도 선재의 단가를 낮추기 위해서 피복재인 은(Ag) 대비 초전도분말 충전율을 증대, 은 피복재 대체 재료 연구 및 임계전류밀도(Jc) 향상을 좌우하는 고품성 초전도 분말제조 등에 연구개발 노력이 집중되어야 할 것으로 사료된다.

국내에서도 한국기계연구소에서 상당한 기술개발 경험을 축적하여 왔고, 특히 2001년 과학기술부의 프론티어사업으로 차세대초전도응용 기술개발사업이 시작되어 기존의 한국기계연구소와 한국전기연구소의 공동연구를 통해 액체 질소 온도에서 60A가 넘는 Ic를 가지는 100m급 BSCCO 선재의 제조에 성공하여 Nexans-Korea사를 통한 상업화를 추진 중에 있다. 그러나 BSCCO는 아래에 논의할 제 2세대 선재인 YBCO 장선화 기술이 확립되면 가격 및 성능면에서 경쟁력이 낮아 제 2세대 선재가 상용화 되기 전까지 응용기기의 개발에 한시적으로

적용될 가능성이 높으므로 선진국에서도 보다 과감한 설비 투자를 꺼리고 있는 실정이고, 선두 그룹인 미국의 AMSC 및 일본의 Sumitomo를 제외하면 기존의 여러 생산 회사도 세계적인 경쟁력을 확보하기는 매우 어려울 것으로 전망된다.

제 2세대 선재 : Y- 혹은 RE-계 선재 (Coated Conductor)

앞서 간략히 언급한 바와 같이 현재 개발중인 고온초전도 coated conductor는 “제 2세대 고온 초전도 선재”로서 제 1세대 BSCCO 선재를 대체할 수 있는 최적의 대안으로 인식되고 있다. 제 2세대 선재는 YBCO가 주종을 이루고 있으며 REBCO 연구도 점차 활발해지고 있다. 그 제조공정을 간략히 기술하면 다음과 같다. 다결정 금속기판 표면에 산화물 박막을 증착하는 도중에 보조 이온 빔을 주사하여 박막이 기판과의 epitaxial 관계가 없이 독립적으로 2축 배향성을 가지도록 하거나 (IBAD : ionized beam-assisted deposition), 압연/진공열처리를 통하

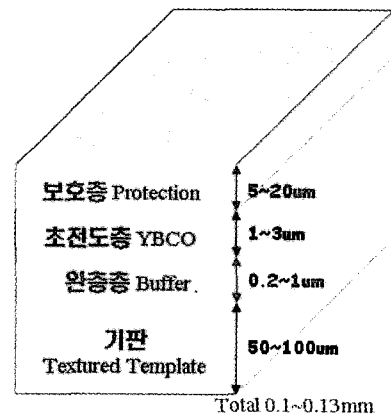


그림 3. 제 2세대 YBCO 선재의 다층박막 구조

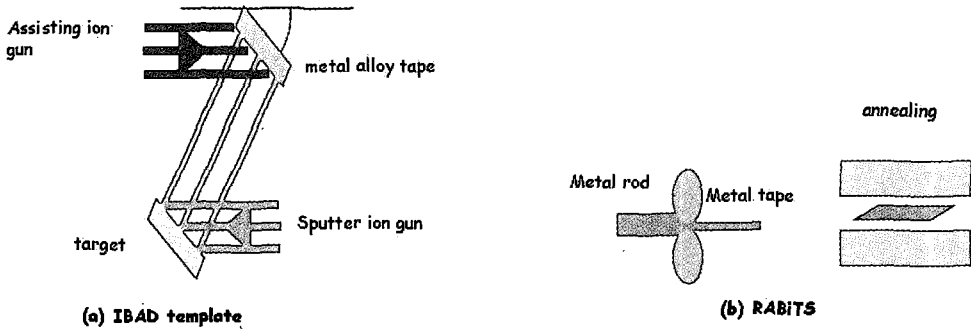


그림 4. 제2세대 선재의 2축 배향된 기판을 제조하기 위해 개발된 대표적인 제조공정의 모식도.

여 2축 배향성을 가지는 금속기판을 제조한 후, 그 위에 epitaxial하게 산화물 완충층을 증착하는 방법(RABiTS; rolling-assisted biaxially textured substrate)으로 2축 배향 집합조직을 만들고, 다시 완충층으로 덮여 있는 유연성 있는 금속 테이프 위에 2축 배향 YBCO 초전도층을 증착한다(그림 3 참조).

먼저 가장 기초를 이루는 바닥층은 합금 모재 자체나 그 위에 template 형태로 2축 배향된 집합조직을 형성하는 방법으로 제조되고 있는데, 지금까지 개발된 두 가지의 대표적인 제조공정의 모식도를 그림 4에 나타내었다. 그림 3(a)에 나타낸 IBAD template의 경우, template 재료의 종류에 따라 YSZ(Yttrium-stabilized zirconia)와 같은 복합산화물의 경우 target를 만들어 사용하고, MgO와 같은 단일 산화물의 경우, bead 형태로 만들어 thermalevaporation 등의 방법으로 증착시킨다. template의 2축 배향 집합조직은 보조 이온 빔과 합금 tape가 이루는 각도를 조절하여 달성하는데, 예를 들면 YSZ는 35도 정도, MgO는 45도 정도에서 얻을 수 있다. 한편, 그림 3(b)에 나타낸 RABiTS 공정은 Ni 혹은 Ni-based 합금 등을

압출가공한 후, 열처리공정시 발생하는 재결정(recrystallization)이 가지는 cube texture의 특성을 이용하여 2축으로 배향된 집합조직을 형성한다. 이러한 모재는 YBCO 선재 제조를 위한 필수적인 공정으로 서로 장단점이 있는데, RABiTS의 경우 제조 비용이 상대적으로 저렴할 것으로 평가되는 반면에 모재로 가능한 물질이 매우 제한되어 있다는 점이 응용시 단점으로 작용할 가능성이 높고, IBAD template의 경우 본질적으로 어떤 금속합금도 사용할 수 있다는 장점이 있으나, 설비가 고가라는 단점과 template 증착속도가 다소 느리다는 단점이 있으므로 향후 우위를 점하기 어려우나 점차 IBAD-template가 더 유리할 것이라는 관점이 우세해지고 있다.

집합조직이 잘 발달된 기판을 제조한 후, 그 위에 YBCO와 결정격자가 잘 맞는 완충층을 올리게 된다. 완충층은 초전도층을 고온에서 성막할 때 금속 모재와 초전도체 사이의 반응에 의한 초전도층의 성능 열화를 방지하고 바탕층의 집합조직을 잘 유지하거나 개선하여 그 위에 성막되는 초전도층의 집합조직을 최적화하기 위한 것인데, 현재에는 주로 2개 이상의 금속 산화물 완충층이

주로 쓰이고 있으나 공정 단가를 낮추고 선재 제조 속도를 향상하기 위한 단일 완충막의 제조 노력이 경주되고 있다. 장선재의 경우 완충층 성막을 위해 주로 대면적 sputter가 사용되고, 이밖에 단가 절감을 위한 sol-gel법 등도 연구되고 있다. 위에서와 같이 완충층이 형성되면 그 위에 YBCO 초전도체의 2축 배향 집합조직을 유도할 수 있는 cap layer를 형성하는데 CeO₂가 주로 쓰이고 있다.

이러한 공정을 거친 후, YBCO 초전도층 박막을 성막한다. 초전도층을 제조하는 방법은 크게 물리적 증착법과 화학적 증착법으로 나눌 수 있다. 물리적 증착법에는 PLD(pulsed laser deposition), Sputtering, PED(pulsed electron deposition) 등등이 사용되고 있으나, 현재까지는 10 m급 이상에서 100 A/cm-width 우수한 I_c를 갖는 선재 제조에는 주로 PLD법이 사용되어 왔다. 하지만 장선재를 제조를 위해 요구되는 고진공의 산업용 PLD 제조장비가 워낙 고가이므로 선재의 단가 측면에서 상

용화를 위한 제조공정으로는 PLD법이 부적절할 것이라는 견해가 많다. 이에 반해, 제조장비가 상대적으로 매우 저렴할 것으로 예상되는 화학적 증착법으로는 저진공의 MOCVD법(metalorganic chemical vapor deposition) 및 MOD(metal organic deposition)법 등이 주로 사용되어 왔다. 10 m 이상의 장선재에서 현재까지 PLD 결과가 가장 높은 J_c값을 보여 왔으나, 최근 MOCVD법과 MOD법이 급속히 발달하여 이미 10 m 급에서 100 A/cm-width 이상의 I_c가 보고된 바 있고 향후 더 높은 특성이 구현될 것으로 예상된다. 아래 그림 5에 2003년 10월 현재까지 선진국의 각 연구기관 및 기업에서 달성된 선재 길이에 따른 임계전류 특성을 나타내었다.

그림 5에 나타난 바와 같이 동일한 제조공정을 사용하여 선재를 제조하는 경우, 대체로 선재의 길이가 증가함에 따라 임계전류 I_c가 감소하는 경향을 보이고 있는데, 100 m급 장선재에서 100 A/cm-width 이상의 I_c를 구현하기 위해서는 아직도 기술적으로 상당한 난제를 극복해야 할 것으로 사료된다. 그림 5에 2001년 시작된 차세대초전도전력응용기기 프론티어 사업단(CAST)이 설정한 한국의 연구목표를 나타내었고, 비교를 위해 미국 및 일본의 목표도 나타내었다. 특히, 미국의 경우 대단히 도전적인 연구목표를 설정하여 2007년 까지 1 km급 장선재를 상용화할 계획을 설정하였다.

우리나라의 경우, 본격적으로 제 2세대 선재의 연구개발이 앞서 언급한 프론티어 사업의 출범과 함께 시작되어 이제 1단계인 3년이 곧 종료될 예정이다. 선진국에 비해 후발주자로서 연구

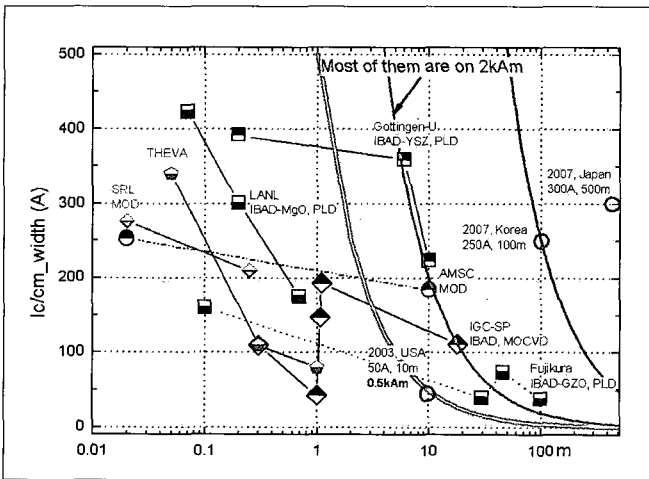


그림 5. 2003년 10월까지 발표된 YBCO coated conductor의 길이에 따른 임계전류 특성.



의 3박자인 연구비, 연구 인프라 및 전문 연구 인력 모두 열악한 상태이나 사업단과 연구진인 한국전기연구소, 한국기계연구소, 원자력연구소, 서울대학교, 한국산업기술대학교 등의 열정적인 협동 연구개발 노력으로 PLD법에 의해 우수한 특성의 5 m급 YBCO 선재가 곧 제조될 예정이고, 선재의 기반이 되는 textured template 제조를 위해 RABiTS법과 IBAD-template 제조 장비 구축이 완료되어 안정적인 선재 연구에 돌입할 기반이 마련되었다. 또한 비록 단선이기는 하나 MOD법으로 세계 최고 수준의 J_c 를 얻는데 성공했고, 새로운 공정 개발도 이루어져 IP(intellectual property)도 출원하기 시작했으며, MOCVD법으로도 가능성 있는 결과를 얻기 시작했다. 따라서 2단계 말까지는 선진국 수준의 기술개발이 이루어 질 수 있을 것으로 전망된다.

(b) 고온초전도 벌크

고온초전도 벌크는 저온초전도 재료로는 산업

적으로 응용해 본 경험이 없는 새로운 유형의 소재이다. 금속이나 합금을 바탕으로 하는 저온초전도 재료는 열용량이 낮고 열전도도가 높아 국부적으로 발생하는 열에 대한 안정성이 매우 낮기 때문에 벌크소자로 응용되지 못한 반면에 산화물인 고온초전도 재료는 열용량이 월등히 높고 열전도도가 낮아 발생하는 열에 대한 안정성이 매우 높으므로 벌크로도 응용이 가능하게 된 것이다. 고온초전도 재료 가운데에도 벌크 응용이 가능한 재료는 Tc 90K급인 YBCO 혹은 REBCO가 유일하다.

산화물 세라믹에 금속재료의 전통적 제조공정인 일방향 응고법(unidirectional solidification process)을 적용하여 YBCO의 c-축 방향으로 집합조직이 잘 발달된 벌크결정을 제조한 결과, 세라믹의 전통적 제조공정인 소결법(sintering process)을 통해 제조한 다결정 시편의 입계에서 초전도 전류의 흐름이 크게 손상되던 소위 약결합(weak link 혹은 weak coupling)의 문제점을 크게 개선할 수 있는¹⁰⁾

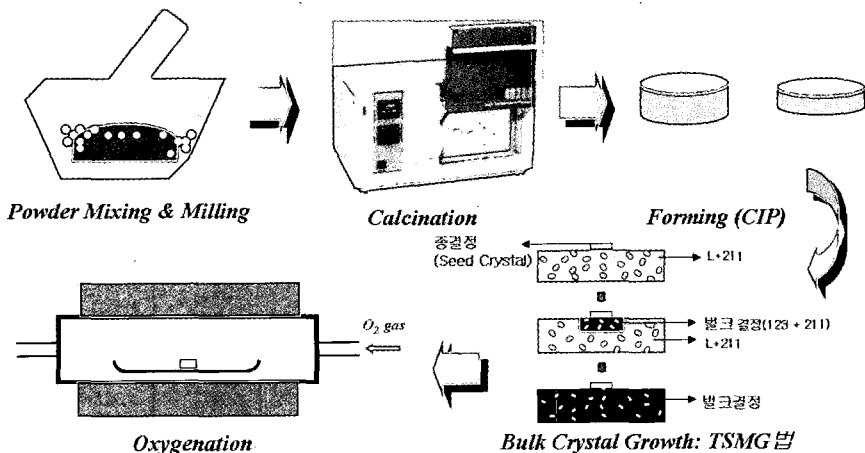


그림 6. YBCO 고온초전도체 벌크결정의 제조공정 모식도.

A/cm² 이상의 높은 Jc를 얻는데 성공하여 고온 초전도체의 실용화를 위한 연구개발의 기폭제가 되었다. 앞서 설명한 제조방법을 MTG(melt-textured growth)법이라 하는데, 이 제조방법의 단점은 제조할 수 있는 벌크결정의 크기가 매우 제한되어 있다는 것인데, 이 문제는 한층 개선되어 보다 높은 Jc를 달성할 수 있는 자속 피닝센터의 개발과 c-축 배향 벌크결정의 대형화를 위한 제조기술의 개발을 양측으로 하여 발전되었다. 특히 시편 전체에 단일 도메인(single domain) 혹은 단일 결정립(single grain)으로 된 벌크결정을 얻을 수 있는 TSMG(top-seeded-melt-growth)법이 개발되어 현재는 YBCO 및 REBCO 공히 높은 Jc를 갖는 3-10cm 직경, ~2 cm 두께의 벌크결정 제조기술이 확립되어 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서 상용화되고 있으며, 국내에서도 원자력연구소와 한국전력연구원을 중심으로 상당한 수준의 YBCO 벌크결정의 제조기술력을 확보한 상태이나 상용화되지는 못한 상태이다. 그림 6에 YBCO 벌크결정의 제조공정을 도시하였다.

고온초전도 벌크는 기존의 금속 영구자석에 대한 반발력 및 인력을 이용한 수동소자로 자기베어링, 플라이휠 에너지 저장장치 등의 응용기기 개발이 진행되고 있고, 착자를 통해 초전도 영구자석을 만든 능동소자로 자장발생장치, 자기분리기, 모터 등의 응용기기 개발이 진행되고 있다. 이 가운데 실용화가 가장 유력한 두 기기에 대해 간략히 설명하고자 한다.

먼저 고온초전도 벌크를 이용한 중·대용량 전력저장용 플라이휠 에너지 저장장치의 실용화를 기술개발 현황이다. 이 장치는 전기에너지를 이용하여 자기부상된 플라이휠을 고속으로 회전시켜 기계적인 에너지로 저장하였다가 필

요시 다시 전기에너지로 변환하여 전력수효가 발생하는 요소에 공급하는 장치인데, 미국, 일본에서는 수 kWh급 초전도 플라이휠을 개발한 바 있으며 현재는 수십에서 수백 kWh급을 개발 중에 있다. 국내의 경우도 한국전력연구원에서 수년전부터 수백 Wh급의 소형 플라이휠을 개발하고 있다. 이러한 플라이휠의 부상을 위해 상용화된 초전도체는 직경 5~10cm, 두께 2 cm 정도의 YBCO 벌크가 주로 사용되고 있는데, 바닥에 벌크 초전도체를 깔고 밑면에 영구자석을 부착한 플라이휠을 부상시킨 후 회전시키는 수직형 플라이휠이 주로 시도되고 있으나, 최근에는 영구자석간의 반발력으로 부상시키고 회전하는 플라이휠 축의 고정을 위해 플라이휠 축에 일련의 영구자석을 붙이고 그 주위에 초전도체 벌크를 배열하여 회전시 축의 흔들림을 최소로 고정하는 자기베어링의 원리를 사용하는 방법도 시도되고 있다. 현재의 기술개발 수준으로 볼 때, 향후 10년 이내에는 상용화될 것으로 전망된다.

고온초전도 벌크자석은 자기분리기에도 응용할 수 있다. 자기분리기는 큰 구배의 자기장을 발생시키는 자력을 이용하여 강자성체는 물론 약자성체와 상자성체를 띠는 입자나 미생물을 포획하여 분리하는 기술로 원래는 주로 점토에 포함된 철분을 제거하기 위한 목적으로 사용되었으나 각종 오폐수의 처리, 자원회수, 가스처리 등등의 분야로 응용 범위가 확대되고 있다. 이러한 목적의 자기분리기에 사용되는 자장원으로 벌크 초전도체의 응용이 크게 기대되고 있다. 전자석이나 기존의 영구자석보다 고온초전도 벌크자석을 사용할 때의 장점은 cryocooler를 통한 전도냉각 방식으로 5 Tesla 이상의 고자장을 얻을 수 있다는 점과 초전도 벌크자석이



발생하는 자속밀도가 벌크의 중심부에서 가장 자리까지 기울기가 매우 급격하여 자기분리시 자력이 매우 크므로 자기 분리에 매우 유리하다는 점이다. 2003년 일본의 ISTECH과 Hitachi 사가 공동으로 개발한 오페수 정화용 자기분리기 시제품이 나와 수년 내로 상용화될 전망이다.

(c) 고온초전도 박막

박막 전자소자의 경우, 현재 YBCO 박막을 주요 재료로 하여 미국에서 통신 기지국용 마이크로파 필터가 상용화되어 있다. 국내에서도 LG중양연구소가 YBCO 박막으로 기지국용 마이크로파 필터의 제조기술 개발에 성공한 적이 있었으나, 시장 진입에 성공하지 못해 유보된 상태이다. 향후, 중국 시장이 열리면 큰 산업으로 발전할 소지가 있다. 박막형 초전도 소자로는 고유한 초전도체 특유의 조셉슨 효과(Josephson effect)와 자속 양자화(fluxoid quantization)의 두 가지 현상을 이용하여 만드는 의료용 SQUID와 정보 저장 및 통신용 단자속 양자소자인 RSFQ가 가장 산업적 및 경제적 파급효과가 크므로 그동안 YBCO 고온초전도체를 이용한 소자 개발이 시도되었으나, YBCO 산화물로는 재현성 있는 소자를 구현하는데 많은 기술적 한계에 봉착하여 현재는 Nb 저온초전도체를 기반으로 하는 소자 구현이 선진국을 중심으로 전개되고 있다. 우리나라도 뇌자도 측정을 위한 저온초전도체 SQUID 소자 개발과 RSFQ 소자 구현을 위한 연구개발이 한국표준연구소, 광주 광기술원 등을 중심으로 지속적으로 이루어지고 있다. 향후 박막제조 기술이 보다 고도화 되면 고온초전도체를 응용하고자 하는 연구개발이 다시 시도될 가능성도 배제할 수 없다.

3. 결론

고온초전도체가 발견된 지 20여년이 지난 현 시점에서 돌이켜 볼 때, 아직 대규모로 산업적 응용이 되지 못하고 있는 것은 액체질소를 냉매로 사용할 수 있는 우수한 특성의 제 2세대 YBCO 혹은 REBCO 장선재 개발이 지연되고 있는 것이 가장 큰 이유라고 할 수 있다. 그러나 최근 몇 년간 선진국을 중심으로 한 집중적인 개발 경쟁은 이 분야의 기술개발을 목표 이상으로 달성해 가고 있으므로 수 년대에 I_c 가 100A/cm-width가 넘는 100 m급 선재가 현실화될 가능성이 매우 높다. 이에 따라 본격적인 응용기기 개발이 시작될 전망이다. 따라서 2010년 경에는 본격적인 시장진입이 점쳐지고 있는 것이다. 과거 반도체와 광섬유를 기반으로 하는 정보통신 기기의 시장 진입이 약 20여년 걸렸던 것을 상기하면 고온초전도체도 다소 늦어지긴 했어만 곧 일반인이 접할 수 있는 문명의 이기로 등장할 것으로 믿어 의심치 않는다. 이러한 시기에 과학기술부의 프론티어사업을 통해 그 기반이 마련된 것은 매우 시의적절한 것이라고 사료된다. 비록 미국, 일본 등 선진국에 비하면 월등히 뒤지는 연구비와 연구인프라이긴 하지만 세계적 수준의 전문인력이 상당수 있으므로 긴밀한 협동연구를 수행한다면 몇몇 분야에서는 세계를 선도할 수 있는 연구개발 결과를 도출할 수 있을 것으로 확신하고, 향후 전개될 고온초전도 시대에 충분히 대비할 수 있을 것으로 믿어 의심치 않는다. 마지막으로 이 글을 작성하는데 유익한 자료를 제공해 준 한국기계연구소의 유재무 박사, 한국전기연구소의 박민원 박사와 박찬 박사, 서울대 재료공학부의 문승현 박사에게 감사를 드린다.

기획 : 이경우 편집위원, yikw@plaza.snu.ac.kr