

2세대 고온초전도선재의 제조기술 연구 동향

오상수 책임연구원 (한국전기연구원, 초전도연구센터)

1. 서론

초전도선재를 이용하면 대전류를 손실없이 통전할 수 있고 초전도코일의 형태로 만들면 대공간에서 강자장을 발생시킬 수 있는 등의 장점이 있기 때문에 1960년대부터 초전도선재에 대한 많은 연구 개발이 이루어졌다. 그림 1은 실용화된 초전도선의 다양한 형태 [1]를 보여주고 있다. 냉각으로 액체헬륨을 사용하는 Nb-Ti, Nb3Sn 등의 금속계 초전도선재는 그림 1(a), (b)와 같은 극세다심선의 형태로 상용화되어 MRI, NMR, 핵융합장치, 입자가속기용 초전도자석에 사용되고 있으나 액체 헬륨을 사용하는 불편함과 비경제성으로 인하여 초전도기술의 응용범위를 확대시키는 데는 한계가 있었다.

한편 1986년을 기점으로 임계온도가 높은 구리산화물계 초전도체가 발견되면서 BSCCO [2-4], YBCO 물질을 선재로 가공하기 위한 연구개발 [5-9]이 활발하게 이루어졌다. 고온초전도선재를 만드는 방법으로 먼저 성공한 것은 파우더인투브(PIT)법이다. 비스무스, 스트론튬, 칼슘, 구리 산화물 분말을 조성비대로 섞고 은 튜브에 충전하여 만든 복합체를 인발-신선-압연 등의 기계가공과 열처리를 반복하여 테이프 형상의 초전도선재를 제조하며 단면 형태는 그림 1(e)와 같다. 그러나 이러한 방법으로 만든 초전도선재에는 두 가지 문제점이 있다. 하나는 매트릭스 소재로 은을 사용하기 때문에 초전도선재의 원가를 낮추기가 어렵다는 것이고, 둘째는 초전도응용을 위해

서 임계전류밀도 (J_c)는 높을수록 좋는데 임계 전류밀도가 낮다는 것이다. 외부 자장과 임계전류밀도 특성 관계를 보면 초전도선재에 인가되는 외부 자장 값이 높아질수록 선재의 J_c 는 감소하는 경향을 보이

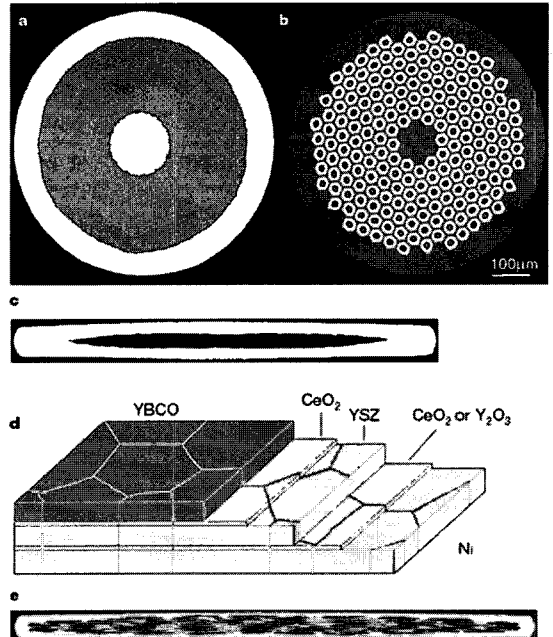


그림 1. 초전도선의 형태 (a) 극세다심 Nb47wt%Ti 초전도선재, (b) Nb3Sn 초전도선재, (c) MgB2 단심 초전도선재, (d) RABITS 기판 구조의 YBCO 초전도선재, (e) Bi-2223 초전도선재 [1].



는데 1세대인 BSCCO 선재는 동작온도가 77 K에 가까울수록 자장에 대하여 J_c 가 급격하게 감소하는 특징을 보인다. 높은 외부 자장하에서도 J_c 가 크게 감소하지 않는 초전도선을 제조할 수 있으면 고온초전도기기를 실용화하는데 아주 유리하다고 할 수 있다.

1세대 선재의 문제점을 해결하기 위하여 개발된 2세대 고온초전도선재는 그림 1(d)와 같이 유연한 금속기판위에 증착된 다층의 박막 구조로 이루어졌으며 흔히 Coated Conductor (본고에서는 이후 CC로 약기함)라고 부른다. 90년대부터 CC를 상용화하기 위한 미국, 일본, 독일의 연구 개발이 경쟁적으로 이루어지면서 최근에는 연속 공정을 이용하여 수백~km급의 CC도 제조되고 있어 1세대 BSCCO 선재를 이용하여 케이블, 변압기, 모터 등의 초전도기기를 제작하던 연구 동향이 CC를 사용하는 쪽으로 그 경향이 많이 바뀌고 있다.

본고에서는 CC의 제조 방법과 원리, 공정의 특징 등에 대하여 살펴보고 미국, 일본을 중심으로 활발하게 진행되는 CC의 최근 연구 동향과 상용화 전망에 대하여 고찰해 본다. 국내의 동향은 21세기 프론티어사업에서 수행 중인 CC 연구사업의 최근 성과 위주로 그 내용을 개괄적으로 소개하기로 한다.

2. 2세대 고온초전도선재의 제조 공정

90년대 초에 일본 후지쿠라전공에서 IBAD (Ion-Beam Assisted Deposition)와 PLD (Pulsed Laser Deposition) 공정 [10-12]을 이용하여 금속기판위에 만든 YBCO 초전도체 결정들이 양축으로 정렬된 형태를 보이는 것을 발견하였고 이러한 박막 구조의 YBCO 초전도선재가 BSCCO 선재보다 자장중에서도 높은 J_c 특성을 나타내는 것이 확인되면서 박막형태의 YBCO-CC 개발 연구가 미국, 일본, 독일을 중심으로 활발하게 이루어진다.

일반적으로 산화물계 고온초전도선재의 임계전류밀도는 여러 요인에 의하여 결정되지만 초전도체 결정입자의 배향 (Texturing)도에 큰 영향을 받는다. PIT법으로 만든 BSCCO 선재는 기계 가공과 열처리에 의하여 판상 결정들이 결정구조의

c축이 가공방향과 수직으로 배향되는 일축 배향 (Out-of Plane Texturing)이 가능하지만 전류의 통전 방향으로 결정의 a(b)축을 배향시키는 면내배향 (In-plane Texturing)도를 높이는 것이 기술적으로 어렵다. 그러나 MOD (Metal Organic Deposition)나 PVD (Physical Vapor Deposition) 같은 박막코팅기술을 이용하면 금속기판위에 초전도결정들이 양축으로 배향된 초전도선재를 만들 수 있다. Dimos 등의 연구 [13]에 의하면 YBCO 초전도체의 J_c 가 그림 2에서 나타난 것처럼 결정입계의 Tilt Angle이 커짐에 따라 크게 감소하는 경향을 보인다. 이것은 결정입자들이 c축으로 배향되어 있어도 a축이 서로 θ 각도로 어긋나 있으면 그 크기에 따라 J_c 가 감소하는 것을 의미하는 것이다. 따라서 J_c 가 높은 CC를 제조하기 위해서는 결정입자의 면내배향도를 높이는 것이 중요하다 말할 수 있고, 다결정조직이지만 결정들이 양축으로 고도로 배향된 초전도막을 만들 수 있으면 단결정 초전도체와 같은 수준의 높은 J_c 를 얻을 수 있는 것이다. PLD로 만든 YBCO-CC의 경우, 초전도층 두께가 0.5 μm 이하에서는 액체질소 온도, 자기자장 조건하에서의 J_c 가 7 MA/cm²의 값도 얻어진다는 보고 [14]도 나오고 있다.

CC를 제조하는 많은 방법들이 시도되었으나 지금은 기판을 제조하는 방법에 따라 크게 RABiTS (Rolling Assisted Bi-axially Textured Substrate)

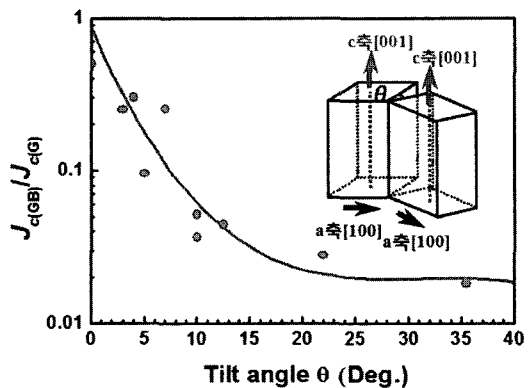


그림 2. YBCO 초전도결정의 Mis-orientation Angle 과 임계전류밀도 관계 [13].

[15,16]과 IBAD법으로 나뉜다. ORNL에서 개발된 배향금속기판인 RABiTS는 그림 3과 같은 연속공정 [17]으로 제조할 수 있으며 Ni 합금을 압연과 열처리를 통하여 금속결정을 가공방향으로 정렬시켜 결정 입자들이 양축으로 배향된 기판을 만들고 PVD, MOD 등의 방법으로 완충층인 CeO_2 , Ytria-Stabilized-Zirconia (YSZ) 등을 증착한 후에 YBCO 혹은 ReBCO 초전도층을 입혀서 CC를 제조한다.

IBAD (Ion-Beam Assisted Deposition)는 하스텔로이와 같은 다결정 무배향 상태의 금속기판위에 YSZ나 MgO와 같은 물질을 양축 배향상태의 박막으로 증착하여 최초 배향층을 만드는 기술이다. 1991년에 Iijima 등 [18]은 연마된 표면을 갖는 다결정 Hastelloy C-276기판 위에 이온빔 스퍼터링으로 Ytria Stabilized Zirconia (YSZ)막을 증착할 때 Ar^+ 이온을 30~60도로 변화시키면서 증착한 YSZ (111)면의 집합조직을 분석하여 보조이온빔의 각도가 $\langle 111 \rangle$ 방향과 일치하는 55° 에서 결정의 면내배향도 특성이 크게 향상되는 것을 확인하였다. 이후 여러 그룹들에 의하여 입방정 산화물에서 0.5~2 μm 두께를 갖는 양축 배향된 IBAD 박막 증착결과들이 보고되었으며 Wang 등은 MgO 물질에서 IBAD 기술을 이용하여 단지 10 nm의 두께에서도 높은 면내 배향성을 갖는 것을 보고 [19]하였는데 이것은 다른 입방정 물질보다 양축 배향의 IBAD-MgO막을 200배 이상 빠르게 증착할 수 있다는 것을 의미하는 것으로

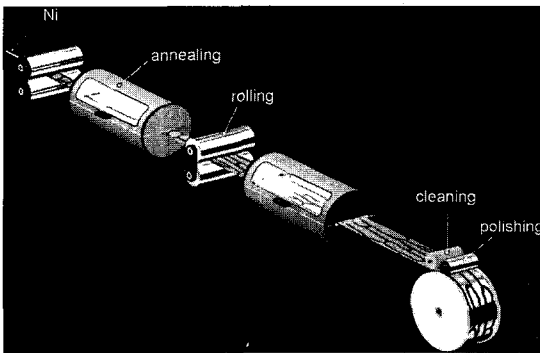


그림 3. RABiTS의 연속 공정 개념도 [17].

CC제조에서 고속 공정의 가능성을 열었다는데 기술적 가치가 크다고 할 수 있다.

RABiTS이나 IBAD법 공히 완충층을 입힌 후에 초전도 결정 격자 크기와 의 불일치도 (Lattice Mismatch)를 줄이기 위하여 $LaMnO_3$ (LMO)나 CeO_2 층을 증착한 후에 초전도층을 입히는 방법으로 CC를 제조한다.

3. 외국의 연구 동향

미국의 CC 관련 연구는 주로 DOE지원으로 수행되고 있으며, 현재는 기업들이 상용화 개발의 주도적인 역할을 하고 있다. 대표적으로는 SuperPower社와 AMSC社가 선재 길이 면에서 제조기술을 500~1,000 m급의 CC를 생산할 수 있는 수준까지 끌어올리면서 상용화의 기반을 확고히 하고 있다. 현재 두 회사들에 의해 연구용 CC가 판매되고 있으나 아직은 대부분 500 m 이하의 Piece Length를 갖는 제품이라고 할 수 있다. 특성 면에서는 임계전류 (I_c)가 $> 200 A/cm-w$ 성능의 CC선재가 개발 [20]되었으며 단척시료에서는 1 kA/cm-w의 I_c 특성을 보이는 결과들도 보고되고 있다. I_c 성능향상에 대한 연구는 I_c 향상, 후막공정 최적화, 핀닝센터 도입 [21-23], 공정개선 등의 다양한 방법으로 시도되고 있으며 증착 공정의 대면적화와 생산속도를 향상시켜서 High Throughput 공정으로 가기 위한 연구개발도 활발하게 진행되고 있다. 이러한 노력들이 수요량에도 의존하지만 CC 제조비용을 50 \$/kA-m 이하로 낮추는데 기여할 것으로 보인다.

교류기에 적용하기 위한 기반연구로서 레이저나 화학적 에칭 등의 방법으로 초전도층을 분할하여 여러 개의 필라멘트로 만드는 Filament Striation 교류손실 저감 공정 [24-26]도 활발하게 연구되고 있고, 소선 테이프를 절단 가공하여 Transposed Conductor로 만들어서 I_c 대용량화와 교류손실 저감을 동시에 달성하고자 하는 연구들도 독일, 뉴질랜드에서 이루어지고 있다.

미국 SuperPower社は IBAD-MgO Texture Template을 사용하며, MOCVD 공정으로 YBCO 혹

은 (Y,Re)BCO 초전도층을 증착하여 그림 4와 같은 구조의 CC를 제조하고 있는데 DOE Peer Review에서 발표한 2009년도의 SuperPower社의 주요 결과를 보면 1 km급에서 282 A/cm-w의 임계전류 달성하였고 고자장용 CC를 개발하여 77 K에서 1.38 T를 발생시키는 코일 개발에도 성공하고 있다. CC성능의 주요지표인 $I_c L$ 값이 처음으로 SuperPower社에 의하여 300,000 Am를 넘어선 것도 의미가 크다고 할 수 있다. 원가절감과 관련하여 주목할 만한 기술적 성과는 연속공정의 금속기판 평활화 시스템을 구축하여 20 m 길이의 Planarized Ytrria 기판 테이프를 제조하였으며 전해연마를 생략한 하스텔로이 테이프를 사용하여 0.5 nm의 표면 조도와 LMO의 In-plane texture 특성이 $\Delta \phi = \sim 7^\circ$ 정도의 우수한 성능을 확인하였다. 이러한 결과는 전해연마공정단계와 Al_2O_3 (Diffusion Barrier Layer)층 증착단계를 생략할 수 있기 때문에 제조비용 절감에도 기여할 것으로 사료된다. SuperPower社는 Planarized Ytrria 기판 테이프를 이용하여 I_c 가 140 A/cm 특성의 초전도층을 증착했다고 보고하였다.

AMSC社는 RABiTS 기판을 사용하며, MOD 공정으로 초전도층을 증착하여 CC를 제조하고 있다. 2009년도 주요 성과를 보면 연간 720 km의 생산능력을 확보한 것과, 500 m 길이의 생산공정 확보, 500 m급 CC에서 최소 100 A의 I_c 성능을 달성한 것들을 들 수 있으며 1회 코팅의 박막만으로 120 A I_c 특성을 달성하는 것을 향후 목표로 설정하고 있다.

LANL은 DOE 지원의 CRADA 협력프로그램을 통해 CC 제조와 관련된 Co-evaporation 기술을 STI

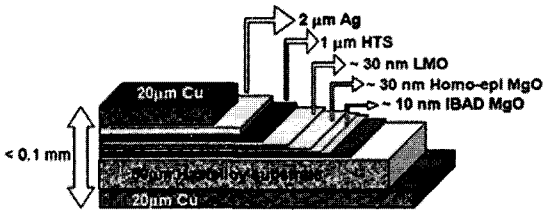


그림 4. SuperPower社에서 개발 중인 CC의 단면 구조.

社에 이전하고 있다. 주요 목표는 저가이면서 고성능의 CC를 개발하는 것으로 국내에서 수행중인 프론티어 DAPAS (Development of Applied Superconductivity Power System)사업의 목표와 비슷하다. YBCO를 증착하는데 있어서 증발소스인 금속이 저가인 점과 높은 증발율을 이용하고 대면적 증착이 가능한 점, 조성제어가 가능한 점 등을 장점으로 보고하고 있다. YBCO를 합성하는 동안 산소 분압은 10~20 mTorr로 유지하고 있다. STI社는 공정 명칭을 RCE-CDR (Reactive Co-Evaporation by Cyclic Deposition and Reaction) [27]라고 하였는데 우리가 개발 중인 EDDC (Evaporation using Drum in Dual Chamber)공정과 매우 비슷하다고 할 수 있다.

RCE-CDR로 만든 YBCO-CC의 J_c 의 두께 의존성은 PLD YBCO의 결과와 거의 일치하고 있으며 6 μm 두께의 YBCO에서 LANL은 950 A/cm-w의 높은 Self-field I_c 값을 얻고 있다. RCE-CDR공정의 제조비용 분석을 보면 2 μm 두께에서 2.5 MA/cm²의 J_c 의 YBCO를 연간 5,000 km, 수율 70%로 제조한다고 가정하여 초전도층만의 제조비용을 \$4.5/kAm가 된다고 제시하고 있다.

일본에서는 NEDO의 선행 프로젝트에서 YBCO계 선재의 장선화와 고성능화 연구를 수행하였다. IBAD층으로 $Gd_2ZrO_2O_7$ (GZO)을 이용한 구조에서 후지쿠라, 쇼와전선이 ISTEC과의 공동개발로 500 m 길이에서 $I_c > 300$ A/cm-w 특성의 CC를 개발하였

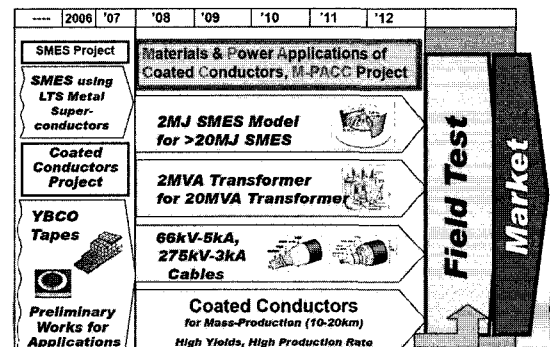


그림 5. 일본 M-PACC프로젝트의 개발 로드맵 [28].

으며 이 성과를 바탕으로 SMES, 케이블, 변압기 등의 초전도 전력기기의 프로토타입 실증을 목적으로 하는 “Y계 초전도 전력 기기 기술 개발” M-PACC 프로젝트가 2008년 6월에 시작되었다. 전체적인 연도별 개발 목표는 그림 5에 제시되고 있다. 이 프로젝트에서는 CC의 양산 기술 개발과 함께 2012년까지 프로토타입 초전도기기들의 개발·실증을 목표로 사업이 진행 중이다. CC개발과 관련해서는 장기적으로 2020년쯤으로 예상되는 초전도기기의 실용화·도입단계에 실질적 사용을 목표로 하고 있으며 현재 수준의 CC보다 자장중에서의 높은 J_c 길이 방향이나 폭 방향의 높은 균일성, 단순 완충층 구조에 의한 저비용화 등의 연구 개발이 수행될 것으로 알려지고 있다.

최근의 주요 연구성과를 보면 후지쿠라전공은 최근 IBAD-MgO의 고속화에 성공하였고 전 길이에서 CeO₂층의 In-plane 배향성이 $\Delta\phi \sim 4.2^\circ$ 라는 균일하면서 배향성이 좋은 MgO 기반의 IBAD 기판을 제조하는 기술을 개발하였다. 이 기판을 이용하여 PLD-GdBCO를 증착하여 175 m 길이에서 $J_c > 300$ A로 균일한 특성의 CC를 제조하는데 성공하였다. 또한 기존의 GdBCO(PLD)/CeO₂(PLD)/GZO(IBAD)/Hastelloy구조의 CC에서는 504 m 길이에서 $J_c(\text{End-to-End})$ 가 350 A/cm-w의 특성을 달성하여 $J_c \times L$ 값이 176,400 Am에 달한 것으로 보고하였다.

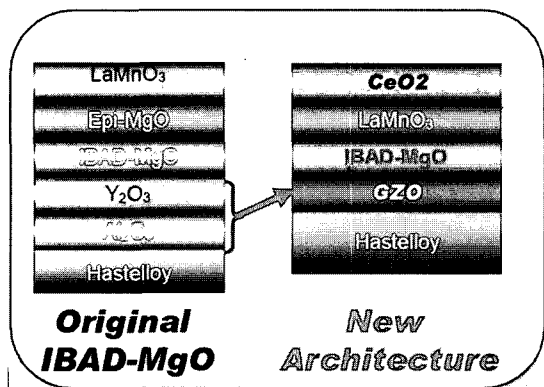


그림 6. 일본 ISTECSRL에서 개발 중인 CC용 기판의 새로운 단면 구조도 [28].

쇼와 전선은 세계에서 유일하게 배치식 열처리를 이용하여 TFA-MOD법으로 CC를 제조하고 있다. 최근 CeO₂/IBAD-GZO/Hastelloy 기판을 이용하여 제조한 CC에서 $J_c(\text{End-to-End}) > 310$ A/cm-w의 특성을 보고하였다.

ISTEC-SRL 연구소는 하스텔로이 기판위에 미국과는 다른 구조의 IBAD-MgO 기판을 개발 중에 있으며 그림 6과 같이 하스텔로이 위에 GZO층을 올리고 IBAD-MgO층을 < 10 nm 두께로 입히기 때문에 24 m/h의 빠른 공정속도를 달성하는데 성공하였고 보고하고 있다. 50 m길이의 CeO₂/LMO/GZO/Hastelloy기판에서 CeO₂의 $\Delta\phi$ 값이 $\sim 4.5^\circ$ 되는 것을 확인하였다.

4. 국내 연구 동향

국내에서는 교과부 지원으로 21세기 프론티어 DAPAS 사업에서 2001년부터 CC를 개발하는 연구를 수행하고 있으며 2010년 4월부터 3단계 마지막 4차년도 연구를 진행 중이다. 초전도기기와 계통 적용기술을 개발하는 세부과제들과 CC를 개발하는 세부과제로 구성된 DAPAS 사업에서 한국전기연구원이 CC 상용화 연구사업을 총괄하고 있고 3단계 사업부터 서남(주)이 참여기업으로 CC의 생산기술 개발 연구를 수행하고 있다.

2단계까지는 DAPAS 사업에서 기판 공정으로는 RABiTS와 IBAD 공정 모두 연구하였고, 초전도층 제조 공정으로도 MOD, MOCVD, PLD, Co-evaporation 등의 다양한 기술을 연구하였지만 3단계 사업으로 진입하면서 기판 공정으로는 IBAD법, 초전도층 공정으로는 RCE (Reactive Co-Evaporation)법이 채택되어 상용화 수준의 km급 CC개발에 주력하고 있다.

CC의 제조 공정에서 금속모재는 하스텔로이합금을 사용하고 있으나 저가의 스테인레스강 기판을 사용한 연구도 이루어지고 있다. DAPAS 사업에서 개발 중인 CC의 전체적인 층 구조는 그림 4의 SuperPower사의 것과 유사하다. 릴투릴 (Reel-to-reel, R2R) 전해연마장치를 이용하여 하스텔로이 테



이프 표면을 연마한 뒤 확산 방지막 역할을 하는 Al_2O_3 층을 증착하고 Seed Layer 역할을 하는 Y_2O_3 층을 비정질 상태로 증착한다. 그 다음 IBAD 방법을 이용하여 MgO 층을 증착할 때 결정들을 양측으로 정렬시킨다. 그림 7은 DAPAS 사업에서 개발한 IBAD- MgO 막의 증착원리를 나타낸 것이다. 제조 속도를 높이기 위하여 대면적 구조에서 멀티턴 방식으로 시스템을 개조하였으며 전자빔으로 MgO 타겟을 증발시킬 때 45° 각도로 Ar 이온빔을 쏘아주면서 양측 배향의 MgO 막을 증착하는 것이다. 시스템에 장착된 RHEED스크린으로 성장되는 MgO 막의 결정성을 실시간으로 확인할 수 있다. IBAD- MgO 증착 후 고온에서 epi- MgO 층을 더 두껍게 증착한 뒤 LMO층을 증착한다. LMO층을 증착하기 위한 방법으로 DAPAS 사업에서는 PLD를 사용하다가 경제성이 없기 때문에 최근에는 스퍼터링 증착법을 이용하고 있으며 제조 속도를 높이기 위한 연구도 이루어지고 있다.

초전도층 제조를 위하여 한국전기연구원은 그림 8에 나타낸 Batch형의 EDDC 장치를 제작하였으며 이 장치를 이용하여 100 m급의 SmBCO CC를 제조 [29]하고 있다. EDDC 장치는 하부 증발챔버와 상부 반응챔버로 구성되었고 상부 반응챔버 내에 기관 테이프가 감긴 인코넬 드럼이 $700\sim 800^\circ C$ 고온 산소분위기하에서 회전하는 구조로 되어 있다. 하부챔버에서 증발된 원자들은 상부챔버의 기관 표면에 혼합물

상태로 붙고 고온 고산소분압의 영역으로 이동할 때 원자들의 확산과 산화반응이 동시에 일어나면서 Sm:Ba:Cu가 1:2:3 조성의 초전도화합물상이 생성된다. 동시증발법으로 고품질의 초전도층을 제조하기 위해서는 정밀하고 재현성 있는 조성제어기술과 양측으로 초전도결정을 배향시키면서 성장시키는 것이 중요한데 결정배향성은 MgO 및 LMO층의 결정배향성, 반응온도, 산소분압 등에 의존한다.

그림 9는 SmBCO 증착 후의 드럼에 감긴 CC의 외관과 표면의 미세조직 모습을 보여주고 있다. 양 끝단을 SEM으로 표면을 관찰한 결과 불순물이 적고 초전도결정들도 아주 치밀하게 배향된 상태로 형성된 것을 확인할 수 있었고 SmBCO(102)면의 면내배향성 $\Delta\phi$ 를 측정한 결과 약 4° 로 아주 양호한 결과를 얻었다.

그림 10은 최근 한국전기연구원에서 제조한 SmBCO-CC의 임계전류 특성을 보여주는 전류-전압 곡선이다. EDDC를 이용하여 4 mm폭의 LMO/ $MgO/Y_2O_3/Al_2O_3/Hastelloy$ 기관위에 SmBCO 초전도층 두께가 약 $3\mu m$ 되도록 증착하였으며 77 K, 자기자장 조건에서 측정된 0.9 m 길이 구간의 임계전류값이 255 A를 달성하였으며 이는 1 cm 폭 기준으로는 638 A/cm-w에 해당되는 것으로 SmBCO 물질의 CC로는 세계 최고수준의 I_c 성능을 달성하였다. 현재 한국전기연구원에서는 EDDC 뿐만 아니고

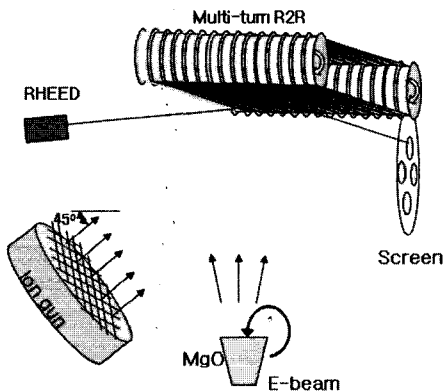


그림 7. IBAD- MgO 증착기술의 원리도.

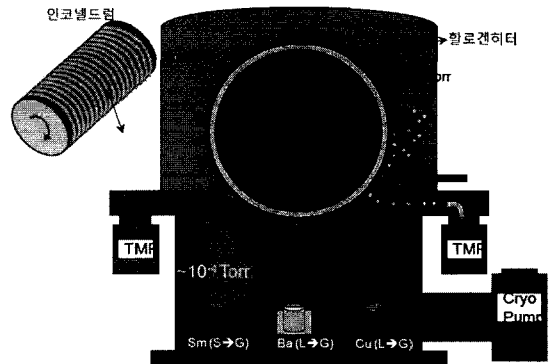


그림 8. 한국전기연구원에서 CC 제조용으로 사용 중인 EDDC 장치의 개념도.

릴투릴 방식의 RCE 장치도 제작하여 연속 공정으로 CC를 제조하는 연구를 진행 중이며 2011년까지 20 m 길이에서 1,000 A/cm-w 임계전류 성능의 CC를 개발하는 것이 DAPAS 사업의 최종 목표로 되어있다.

DAPAS 사업의 참여기업인 서남(주)에서는 최근 CC생산을 위한 Pilot 라인을 구축하였으며 금속기판의 전해연마, 완충층, 초전도층의 증착 공정, 안정화층을 위한 연속구리도금까지 전공정 단계를 릴투릴 연속 방식으로 제조할 수 있는 기술을 확립해 나가고 있다. 최근 전자빔 가열 방식의 RCE법으로 $I_c > 300 \text{ A/cm-w}$ 특성의 Gd(Sm)BCO-CC를 200 m 이상

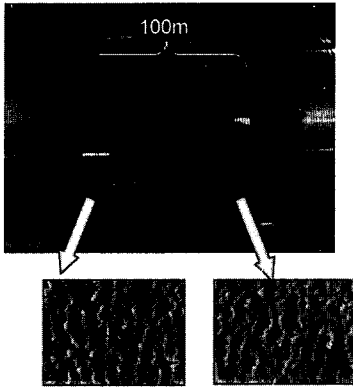


그림 9. EDDC로 증착하여 드럼에 감긴 SmBCO-CC (상)과 양 끝단의 SEM 표면 조직 (하).

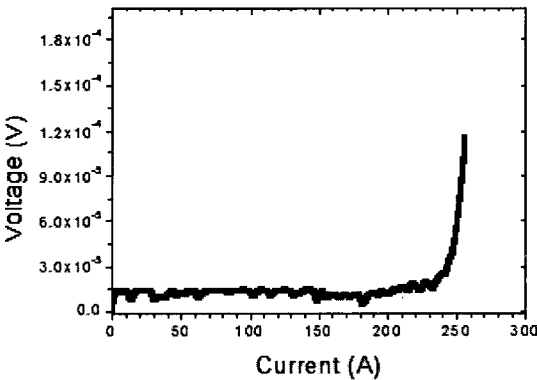


그림 10. 한국전기연구원에서 제조한 SmBCO-CC의 77 K에서의 전류-전압 특성.

의 길이로 제조하는데 성공하였으며 이것은 RCE 공정에 의한 CC 성능 면에서 세계적 수준의 연구 성과이며 서남(주)은 DAPAS 사업을 통하여 외국과는 차별화된 고속화 증착 공정으로 CC의 상용화 개발에 박차를 가하고 있다.

5. 결론

DAPAS 사업에서 2세대 고온초전도선을 개발하기 시작한 것은 선진국보다 늦었지만 우리가 개발 중인 RCE 공정이 특화된 고속공정으로 가격 경쟁력 면에서 유리하기 때문에 상용화 측면에서는 외국보다 앞서 나갈 수 있는 여지가 많다. 현재 개발 중인 RCE 공정에 집중하여 장선 공정으로 안정화시키고 최적화를 통하여 결함이 적고 임계전류 성능이 500 A (1 cm 폭 기준)를 넘는 km급 2세대 고온초전도선을 개발한다면 우리가 만든 초전도선 제품이 세계시장을 주도할 가능성이 높다고 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] D. Larbalestier, "High-Tc superconducting materials for electric power applications", Nature 414, 368 (2001)
- [2] R. Zeng, Y. C. Guo, Y. Tanaka, J. Horvat, M. Ionescu, T. P. Beales, M. Appley, H. K. Liu and S. X. Dou "Effect on the phase formation of Bi-2223 in some Ag-alloy sheathed PIT tapes" Physica C: Superconductivity, 307, 229 (1998)
- [3] H. S. Ha, J. K. Choi, J. S. Yang, S. C. Kim, D. W. Ha, S. S. Oh, C. Park, Y. K. Kwon, S. H. Jang and J. Joo, "The effect of thermal cycling and axial strain on the IC degradation of multi-filamentary Bi-2223/Ag tapes" Physica C: Superconductivity, 412, 1096 (2004)
- [4] C. Beneduce, E. Giannini, R. Passerini, G. Witz, B. Seeber and R. Flükiger "Hot isostatic pressure reaction treatment of Ag-sheathed Bi,Pb(2223) tapes", Physica C: Superconductivity, 372, 980 (2002)
- [5] M. Mori, T. Watanabe, N. Kashima, S. Nagaya, T.



- Muroga, S. Miyata, Y. Yamada, T. Izumi and Y. Shiohara "Development of long YBCO coated conductors by multiple-stage CVD", *Physica C: Superconductivity*, 445, 1 515(2006)
- [6] P. N. Arendt, S. R. Foltyn, L. Civale, R. F. DePaula, P. C. Dowden, J. R. Groves, T. G. Holesinger, Q. X. Jia, S. Kreiskott, L. Stan, I. Usov, H. Wang and J. Y. Coulter, "High critical current YBCO coated conductors based on IBAD MgO", *Physica C: Superconductivity*, 412, 795 (2004)
- [7] M. Inoue, T. Kiss, K. Motoyama, T. Nakamura, T. Fujiwara, D. Mitsui, S. Awaji, K. Watanabe, A. Ibi, K. Takahashi, S. Miyata, Y. Yamada and Y. Shiohara, "Enhancement of critical current in YBCO coated conductors in association with c-axis correlated artificial pinning centers", *Physica C: Superconductivity*, 463, 674 (2007)
- [8] A P Malozemoff, S Annavarapu, L Fritzsche, Q Li, V Prunier, M Rupich, C Thieme, W Zhang, A Goyal, M Paranthaman and D F Lee, "Low-cost YBCO coated conductor technology", *Superconductor Science and Technology*, 13, 473 (2000)
- [9] J. O. Willis, P. N. Arendt, S. R. Foltyn, Q. X. Jia, J. R. Groves, R. F. DePaula, P. C. Dowden, E. J. Peterson, T. G. Holesinger, J. Y. Coulter, M. Ma, M. P. Maley and D. E. Peterson, "Advances in YBCO-coated conductor technology", *Physica C: Superconductivity*, 335, 73 (2000)
- [10] Y. Iijima, K. Kakimoto, M. Kimura, K. Takeda, K and T. Saitoh, "Reel to reel continuous formation of Y-123 coated conductors by IBAD and PLD method", *IEEE on AS*, 11, 2816 (2001)
- [11] S. Hanyu, T. Miura, Y. Iijima, M. Igarashi, Y. Hanada, H. Fuji, K. Kakimoto, T. Kato, T. Hirayama and T Saitoh, "LONG-LENGTH GdBCO COATED CONDUCTORS WITH IBAD/PLD METHOD", *Journal of Physics*, 97, (2008)
- [12] S. Hahakura, K. Fujino, M. Konishi and K. Ohmatsu, "Development of HoBCO coated conductor by PLD method", *Physica C: Superconductivity*, 412, 931 (2007)
- [13] D. Dimos, P. Chaudari, J. Mannhart, and F. K. LeGoues, "Orientation Dependence of Grain-Boundary Critical Currents in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ Bicrystals", *Phys. Rev. Lett.*, 61, 219 (1988)
- [14] S. Foltyn, L. Civale, J. L. MacManus-Driscoll, Q. Jia, B. Maiorov, H. Wang, and M. Maley, "Materials science challenges for high-temperature superconducting wire," *Nature Mater.*, 6, 631 (2007)
- [15] M. W. Rupich, U. Schoop, D. T. Verebelyi, C. Thieme, W. Zhang, X. Li, T. Kodenkandath, N. Nguyen, E. Siegal, D. Buczek, J. Lynch, M. Jowett, E. Thompson, J-S. Wang, J. Scudiere, A. P. Malozemoff, Q. Li, S. Annavarapu, S. Cui, L. Fritzsche, B. Aldrich, C. Craven, F. Niu, R. Schwall, A. Goyal, and M. Paranthaman, "YBCO Coated Conductors by an MOD/RABiTS™ Process", *IEEE on AS*, 13, 2458 (2003)
- [16] S. Sambasivan, I. Kim, S. Barnett, M. A. Zurbuchen, J. Ji, B. W. Kang, A. Goyal, P. N. Barnes, C. E. Oberly, "New approach to depositing yttria-stabilized zirconia buffer layers for coated conductors", *J. Mater. Res*, 18, 919 (2003)
- [17] G. Hammer *et al*, *APL* 81, 3209 (2002)
- [18] Y. Iijima, N. Tanabe, Y. Ikeno and O. Kohno, "Biaxially aligned $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ thin film tapes", *Physica C: Superconductivity*, 185, 1959 (1991)
- [19] C.P. Wang, K.B. Do, M.R. Beasley, T.H. Geballe and R.H. Hammond, "Deposition of in-plane textured MgO on amorphous Si_3N_4 substrates by ion-beam-assisted deposition and comparisons with ion-beam-assisted deposited yttria-stabilized-zirconia", *Appl. Phys. Lett* 71, 2955 (1997)
- [20] S. Fleshler, M. Rupich, "AMSC 2G Wire Technology", FY2009 Superconductivity for Electric Systems Peer Review, Alexandria, VA, Aug. 4-7, 2009
- [21] Y. Yamada, K. Takahashi, H. Kobayashi, M. Konishi, T. Watanabe, A. Ibi, T. Muroga, S. Miyata, T. Kato, T. Hirayama, and Y. Shiohara, "Epitaxial nanostructure and defects effective for pinning in $Y(RE)Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ coated conductors", *Appl. Phys. Lett.* 87, 132502 (2005)
- [22] Z. Chen, F. Kametani, Y. Chen, Y. Xie, V. Selvamanickam and D. C Larbalestier, "A high critical current density MOCVD coated conductor with strong vortex pinning centers suitable for very high field use", *Supercond. Sci. Technol.* 22 (2009) 055013 (5pp)

- [23] M. Inoue, T. Kiss, K. Motoyama, T. Nakamura, T. Fujiwara, D. Mitsui, S. Awaji, K. Watanabe, A. Ibi, K. Takahashi, S. Miyata, Y. Yamada and Y. Shiohara, "Enhancement of critical current in YBCO coated conductors in association with c-axis correlated artificial pinning centers", *Physica C: Superconductivity*, 463, 674 (2007)
- [24] Z. Li, N. Amemiya, O. Tsukamoto, T. Takao and Y. Nakajima, "AC loss characteristics of copper-stabilized YBCO coated conductor", *Cryogenics*, 49, 280 (2009)
- [25] D. Miyagi, M. Umabuchi, N. Takahashi, O. Tsukamoto, "Study of AC transport current loss of assembled HTS coated-conductors with ferromagnetic substrate using FEM", *Physica C: Superconductivity*, 463, 785 (2007)
- [26] S. Schuller, W. Goldacker, A. Kling, L. Krempasky, C. Schmidt, "Ac-loss measurement of a DyBCO-Roebel assembled coated conductor cable (RACC)", *Physica C: Superconductivity*, 463, 765(2007)
- [27] Brian Moeckly, Viktor Glyantsev, Chris Yung, "Progress in Reactive Co-Evaporation on IBAD", FY2009 Superconductivity for Electric Systems Peer Review, Alexandria, VA, Aug. 4-7, 2009
- [28] Y. Shiohara, "R&D of coated conductor and its applications", CIGRE Workshop on Test Techniques for HTS Power Application, Wednesday, May 13, 2009, Nagoya, Japan
- [29] S. S. Oh, H. S. Ha, H. S. Kim, R.K.Ko, K J Song, D.W.Ha, T. H Kim, N. J. Lee, D. Youm, J. S. Yang, H. K. Kim, K. K. Yu, S. H. Moon, K. P. Ko and S. I. Yoo, "Development of long-length SmBCO coated conductors using a batch-type reactive co-evaporation method", *Supercond. Sci. Tech.*, 21, 3 (2008)

담|당|위|원|



성 명 : 오상수

◆ 학 력

- 1982년 경북대학교 공과대학 금속공학과 공학사
- 1989년 일본 Kyoto대학 M.S
- 1992년 일본 Kyoto대학 Ph. D

◆ 경 력

- 1992년 - 현재

한국전기연구원 초전도연구센터 책임연구원

