

제2세대 고온초전도 장선재 제조기술 현황 및 전망

글 _ 유상임
서울대학교

1. 서론

1986년 초전도 특성을 발현하는 최고 온도인 임계온도(T_c)가 30 K이 넘는 $(La, Ba)_2CuO_4$ 고온초전도체가 발견된 직후¹⁾, 1987년 T_c 90 K급 $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ (YBCO)²⁾ 및 $REBa_2Cu_3O_{7-d}$ (REBCO, RE: 희토류 원소)³⁾, 1988년 T_c 105 K급 $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (BSCCO)⁴⁾ 등 초전도체의 잇따른 발견으로 고가의 희박한 액체헬륨(상압하 4.12 K)을 대체하여 저렴하고 풍부한 액체질소(상압하 77.3 K)를 냉매로 고온초전도체를 실용화 할 수 있는 가능성이 열리게 되었다. 액체질소를 냉매로 사용할 수 있는 온도 영역

(65~77 K)에서 고온초전도체를 산업에 응용하려면 높은 임계전류 (critical current, I_c) 특성을 가지는 장선재의 제조기술 개발이 필수적이다. 그 필요성에 반해 고온초전도 장선재의 제조기술 개발이 상당히 지체된 것은 금속 산화물 세라믹 재료인 고온초전도체가 기계적으로 부서지기 쉽기 때문에 금속 및 합금을 기반으로 하는 저온 초전도체 선재의 제조기술인 압출/인발 등의 소성가공을 적용할 수 없을 뿐 아니라, 손쉽게 제조할 수 있는 다결정 형태로는 높은 임계전류밀도 (critical current density, J_c)를 얻을 수 없기 때문이었다. 그러나 고온초전도체 선재가 갖는 엄청난 산업적 및 경제적 파급효과 때문에 고

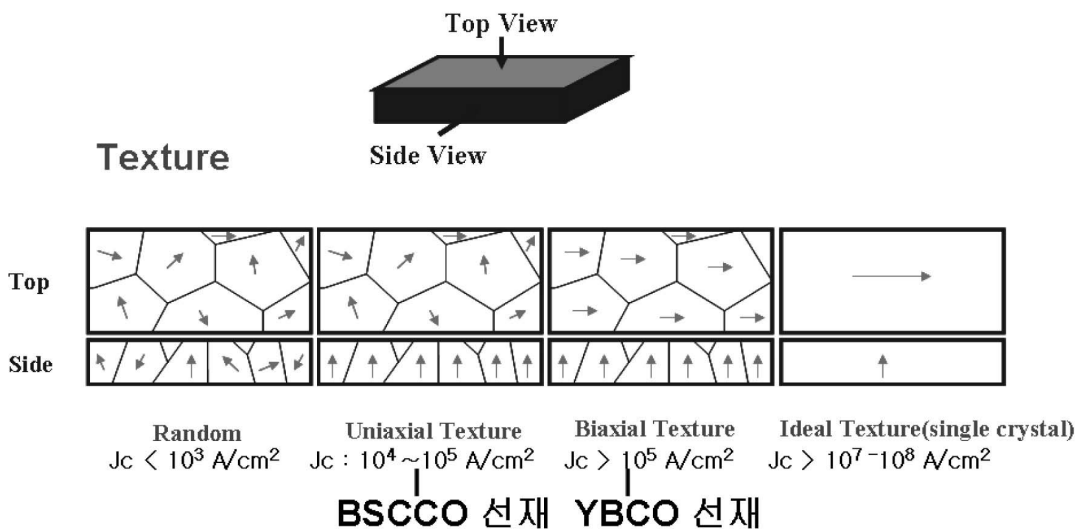


Fig. 1. 고온초전도체의 집합조직과 임계전류밀도의 상관관계.



Fig. 2. 제 2세대 YBCO 선재의 다층박막 구조.

성능의 장선재 제조를 위한 연구개발이 미국, 일본, 유럽 등 선진국과 우리나라를 중심으로 지난 20여년 간 꾸준히 전개되어 수 많은 기술적 난제들을 극복함으로써, 기계적으로 취약하고 구조적으로 복잡한 다성분산화물계 고온초전도체의 특성에도 불구하고 고임계전류의 장선재 제조가 현실화되었다. 먼저 상압 하 액체질소에서 100 A 이상의 임계전류(critical current, I_c) 및 20,000 A/cm² 이상의 공학적-임계전류밀도(engineering critical current density, J_c)를 갖는 수백 m 길이의 “제1세대 고온초전도 선재 (1st generation HTS wire)”로 알려진 BSCCO 장선재 제조 기술이 개발되어 미국과 일본에서 이미 상용화된 바가 있고, 1세대 선재 보다 자장 중 특성이 월등히 우수한 “제2세대 고온초전도 선재 (2nd generation HTS wire or coated conductor (CC))”로 알려진 YBCO 혹은 REBCO 장선재 제조기술이 개발되어 이미 일부 상용화되어 있고, 대규모 상용화를 위한 기술개발 경쟁이 치열하게 전개되고 있다.

1세대 BSCCO 고온초전도 선재는 은(Ag)튜브에 초전도 분말을 주입하여 가공 열처리하는 Powder-In-Tube(PIT) 가공법이 주로 이용되고 있는데, 피복제로 고가의 은(Ag)을 사용해야 하는 관계로 실용화 시 경제성이 희박하다는 점이 상용화에 걸림돌이 되고 있다. 더구나 비록 T_c 는 YBCO 혹은 REBCO보다 높지만 액체질소 온도 영역에서 취약한 자속 피닝 특성 때문에 낮은 비가

역자장(irreversibility field: 주어진 온도에서 자기장을 인가할 때 J_c 가 0이 되는 임계자장)과 인가되는 자장의 세기가 증가함에 따라 J_c 가 현저하게 감소됨으로 초전도 송전 케이블을 제외한 초전도 전력기기 응용에는 치명적인 한계가 있다. 2세대의 선재인 CC의 경우, 1축 배향성(uniaxial or fiber texture)을 갖는 1세대 선재와 달리 2축 배향성(biaxial texture)을 가지는 집합조직을 갖게 함으로서 고각 입계(high-angle grain boundary)에서 발생하는 초전도전류 흐름의 저해를 최소화함으로써 Fig. 1에 나타난 바와 같이 훨씬 높은 J_c 를 얻을 수 있다. 아울러 액체질소 온도 영역에서 CC의 재료인 YBCO 혹은 REBCO가 1세대인 BSCCO보다 자장 하에서 월등히 우수한 J_c 특성을 유지하므로 송전케이블 외에도 여러 다른 고효율 초전도 전력기기 응용에 적합하다.

CC 분야는 1990년대 중반에 2축 배향 집합조직을 갖는 금속기판에 완충층을 올린 후 초전도체를 올리는 방법으로 시작된 후, 새로운 관련 기술이 속속 개발됨으로써 아주 빠른 속도로 장선재 제조 기술이 발전해 왔다. 상용화에 필요한 CC의 특성 및 기술적인 문제들은 대부분 해결된 것으로 보이지만, 대규모 상용화를 위해서는 보다 우수한 성능의 CC를 저가로 생산, 판매하는 것이 필수적이므로 현재는 이러한 상용화 기술개발이 가장 중요한 시점이라고 볼 수 있다. 본 고에서는 먼저 현재까지 보고된 장선의 고성능 CC 제조 기술을 살펴본 후 향후 전망에 대해 논의하고자 한다.

2. Coated conductor 개요 및 초전도층 제조 방법

앞서 언급했듯이 CC에 쓰이는 초전도재료는 YBCO 혹은 REBCO인데, 고각의 입계(high angle grain boundary)에서 초전도전류의 흐름이 쉽게 끊기기 때문에, YBCO 혹은 REBCO 결정립(grain)의 에피성장이 가능한 2축 배향된 완충층을 금속소재 위에 올릴 수 있는 기술이 개발되었다. 이렇게 2축 배향된 완충층 위에 YBCO 나 REBCO를 초전도층으로 에피하게 성장시키고, 최종적으로 이러한 초전도층을 보호할 수 있는 보호층을 올

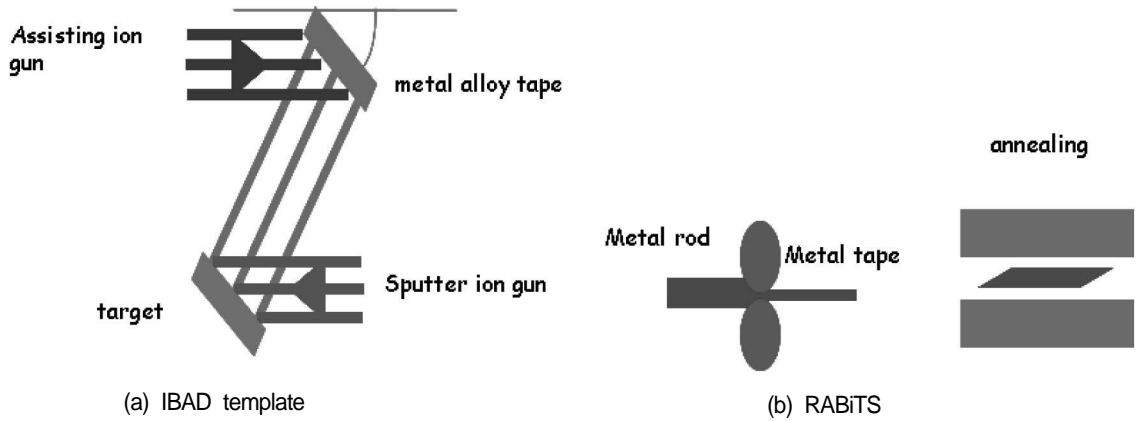


Fig. 3. 제2세대 선재의 2축 배향된 기판을 제조하기 위해 개발된 대표적인 제조공정의 모식도. (a)와 (b)는 각각 IBAD template와 RABiTS 제조공정 모식도.

려 선재를 완성한다(Fig. 2 참조).

먼저 가장 기초를 이루는 바닥층은 합금모재 자체나 그 위에 template 형태로 2축 배향된 집합조직을 형성하는 방법으로 제조되고 있는데, 지금까지 개발된 두 가지의 대표적인 제조공정의 모식도를 Fig. 3에 나타내었다. 하나는 다결정 금속기판 표면에 산화물 박막을 증착하는 도중에 보조 이온 빔을 주사하여 완충층 박막이 기판과 관계가 없이 독립적으로 2축 배향성을 갖도록 하는 Fig. 3(a)에 나타낸 IBAD(ion-beam-assisted deposition)법이고, 다른 하나는 Fig. 3(b)에 나타낸 바와 같이 압연/진공 열처리를 통하여 2축 배향성을 가지는 결정립을 갖는 금속기판을 RABiTS(rolling-assisted biaxially textured substrate)법으로 제조한 후 2축 배향된 금속 결정립 위에 완충층을 에피 성장시키는 기술이다. IBAD template의 경우, template 재료의 종류에 따라 YSZ(Yttrium-stabilized zirconia)와 같은 복합산화물의 경우 target을 만들어 사용하고, MgO와 같은 단일 산화물의 경우, bead 형태로 만들어 thermal evaporation 등의 방법으로 증착시킨다. Template의 2축 배향 집합조직은 보조 이온 빔과 합금 tape가 이루는 각도를 조절하여 달성하는데, 예를 들면 YSZ는 35도, MgO는 45도에서 얻을 수 있다. 한편, RABiTS 공정은 Ni 혹은 Ni-based 합금 등을 압출 가공한 후, 열처리공정 시 발생하는 재결정(recrystallization)이 가지는 cube texture의 특성을 이용하여 2축으로 배향

된 집합조직을 형성한다. 이러한 모재는 YBCO 선재 제조를 위한 필수적인 공정으로 서로 장단점이 있는데, RABiTS의 경우 제조 비용이 상대적으로 저렴할 것으로 평가되는 반면에 금속모재로 가능한 물질이 매우 제한되어 있다는 점이 응용 시 단점이라 할 수 있고, IBAD template의 경우 본질적으로 어떤 금속합금도 사용할 수 있다는 장점이 있으나 설비가 고가이고 template 증착속도가 다소 느리다는 단점이 있다. 향후 어느 기술이 우위를 차지할 것인지 전망하기는 어려우나 점차 IBAD-template가 더 유리할 것이라는 관점이 우세해지고 있다.

집합조직이 잘 발달된 기판을 제조한 후, 그 위에 YBCO 혹은 REBCO와 결정격자가 잘 맞는 완충층을 올리게 된다. 완충층은 초전도층을 고온에서 성막할 때 금속모재와 초전도층 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 완충층 제조를 위한 연구개발이 경주되고 있다. 장선재의 경우 완충층 성막을 위해 주로 대면적 스퍼터가 사용되고, 이밖에 단가 절감을 위한 줄겔법 등도 연구되고 있다. 위에서와 같이 완충층이 형성되면 그 위에 YBCO 혹은 REBCO 초전도층의 2축 배향 집합조직을 유도할 수 있는 cap layer를

형성하는데 CeO_2 가 주로 쓰이고 있다.

2축 배향된 완충층 위에 고성능의 초전도층을 증착하는 방식에는 유기금속화합기체증착법(Metal-organic chemical vapor deposition: MOCVD), 유기금속증착법(Metal-organic deposition: MOD), 펄스레이저 증발법(Pulsed laser deposition: PLD), 동시증발법(Co-evaporation) 등의 제조 공정이 개발되었고, 최근 기존의 Co-evaporation을 보다 획기적으로 개선한 EDDC (Evaporation using Drum in Dual Chamber)법과 동시증발반응법(Reactive Co-Evaporation Deposition & Reaction: RCE-DR) 공정이 국내 연구진에 의해 세계최초로 개발되어 큰 주목을 받고 있다. 다음으로 이러한 초전도층의 제조 공정에 대하여 자세히 살펴보고, 각각의 장단점을 논의하고자 한다.

2.1. PLD (Pulsed laser deposition) 공정

초전도를 증착하는 방법 중의 하나인 PLD는 진공 챔버 내 만들고자 하는 초전도 물질의 타겟에 렌즈로부터 집중된 펄스 레이저를 조사함으로써 plume 형태의 플라즈마를 형성하여 고온으로 가열된 기판 위에 물질을 결정화시키는 증착 방법이다. 초전도 박막 증착 시 레이저는 주로 파장이 짧은 KrF Eximer 레이저를 사용하고 있고, 장선체 제조를 위해서는 고가의 산업용 레이저 소스를 사용해야 하나 대면적 증착이 어려워 비록 고성능의 장

선체를 제조하기에 유리하나 CC의 단가를 낮추는데 한계가 있다는 것이 문제점으로 지적되고 있다.

1992년에 일본 Fujikura사에서 Ion beam assisted deposition (IBAD)법을 이용하여 Ni 합금 위에 2축 정렬 형태로 YSZ (Ytria-stabilized zirconia)를 증착하였고, 이후 그 위에 동일한 배향성을 가지는 YBCO 초전도층을 PLD법으로 증착하여 높은 J_c 를 가지는 고온초전도박막을 제조하였다⁵⁾. 현재 일본 Fujikura사와 ISTECSRL (International Superconductivity Technology Center - Superconductivity Research Laboratory)를 비롯하여 독일의 Bruker사에서는 PLD법으로 장선의 CC를 제조하고 있다.

일본은 IBAD 기판 위에 PLD 공정으로 1998년도에 1 m 길이에서 임계전류 37 A (액체질소 · 무자장 조건. 이후 제시되는 CC의 임계전류는 모두 이 조건에서 측정된 값임.) 성능의 YBCO-CC를 개발한 이후, 2008년도에는 2 단계 FTSA National Project에서 504 m×350 A 성능의 CC를 개발하였다. 또한 최근 착수한 M-PACC 프로젝트에서 2011년에 PLD 공정으로 만든 816 m 길이의 GdBCO선체에서 end-to-end 측정값으로 572 A를 확인하여 $I_c \times L$ (466,981 A · m) 값으로 세계최고 기록을 달성하였다 (Fig. 4)⁶⁾. 2011년도에 들어서 판매를 목적으로 한 상업용 CC를 개발하였으며 길이는 100 ~ 300 m, I_c 는 300 A이상의 선체를 생산할 수 있는 능력을 확보하

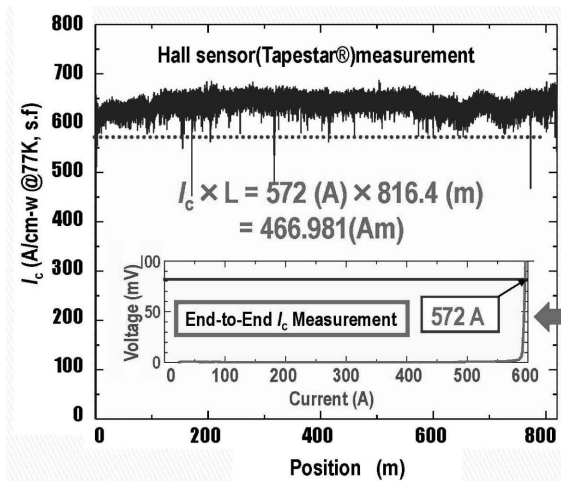


Fig. 4. 일본 Fujikura사 GdBCO CC의 임계전류 특성.

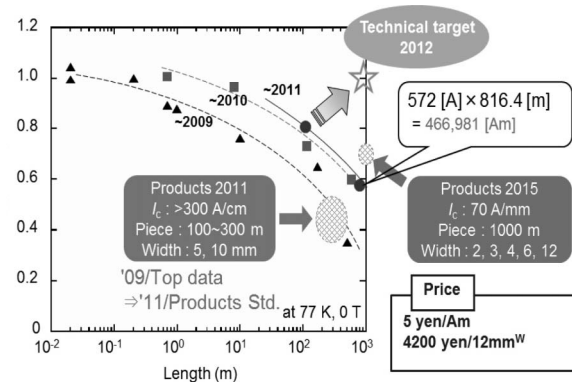


Fig. 5. 일본의 CC의 특성 현황 (2011) 및 향후 목표.

였다.

향후 일본 ISTE은 2013년부터 3세대 개념의 고온초전도선재 개발을 위한 프로젝트를 준비 중에 있으며 ~2 μm 의 초전도층 두께에서도 임계전류밀도, J_c 가 10 MA/cm^2 로 기존의 CC에 비하여 두 배 이상으로 아주 높고, 낮은 교류손실을 위하여 면내결정배향 특성 $\Delta\theta$ 가 2° 이하, 고자장 특성도 65 K, 5 T 조건에서 임계전류가 500A/cm-width인 REBCO-CC를 개발하는 목표를 세우고 있다. 또한 이러한 3세대 CC에서는 테이프 선재의 폭과 길이방향으로의 균일성 향상과 박리 문제를 해결하기 위한 고강도화 기술 개발이 병행되어야 한다. (Fig. 5)⁷⁾

독일의 Bruker사에서는 스테인리스강 (SUS) 기관위에 YSZ와 CeO_2 완충층을 입히고 고속 PLD로 YBCO층을 증착하는 연속 공정으로 CC를 제조하고 있다. 2007년에 100 m 길이의 YBCO-CC를 연속 공정으로 제조하는데 성공하였으며 10 mm폭 기준의 77 K 온도에서 임계전류는 250 A에 도달하였으며 장선화 생산계획을 발표하고 있으나 아직 km급 선재의 생산에는 이르지 못하고 있다. Bruker사는 hastelloy 금속기관이 아닌 저가의 SUS 스테인리스강 기관을 사용하고 있기 때문에 CC의 가격 경쟁력이 크다고 발표하고 있다.

2.2. MOD (Metal organic deposition) 공정

초전도체를 증착하는 MOD 공정은 주로 전구체로 trifluoroacetates(TFA)를 사용하고 있는 TFA-MOD 공정이 있으며 이 공정은 1988년에 IBM 연구소의 A. Gupta⁸⁾가

처음 발표한 이래로 많은 연구가 진행되고 있다. 이 공정의 특징은 Ba의 중간화합물로 초전도특성을 저하시키는 BaCO_3 대신에 BaF_2 이 형성되는 것을 특징으로 한다. F는 모든 원소중에서도 전기음성도가 가장 큰 물질이므로 BaF_2 로 중간화합물을 생성시 상당히 안정한 화합물을 만들게 되며 이는 고온에서 물과 반응하여 분해된다. 이 공정의 코팅 방법으로는 spin 코팅, dip 코팅 그리고 slot-die 코팅이 있으며 MOD 공정은 고진공장비가 필요하지 않고 원료사용량 대비 실제 초전도막에 쓰이는 비율이 높고, 대면적 증착이 가능하여 다른 공정들과 비교하였을 때 가격경쟁력이 높은 편이다. 이러한 MOD 공정을 통해 현재 미국의 AMSC (American Superconductor)사와 일본의 ISTE 및 Showa 전선에서 장선재를 제조하는 연구를 하고 있다.

AMSC사는 RABiTS 기관을 사용하여 MOD 공정으로 CC를 제조하고 있다. AMSC사는 DOE/DOD (Department Of Defence)의 Title III 프로젝트에서 40 mm폭 공정의 생산라인을 확립하였으며, 2009년에 500 m 이상의 길이에서 평균 101 A의 임계전류를 보이는 CC를 생산하였다⁹⁾. 또한 AMSC사는 솔더링 기술로 박막선재에 구리관재를 접합시킨 3~4층 구조의 적층도체를 제조하여 보다 높은 임계전류를 구현하고 있다.(Fig. 6)¹⁰⁾

일본 ISTE과 Showa전선에서는 reel-to-reel과 batch형 공정을 개발하여 Fig. 7⁶⁾에서 보는 바와 같이 hastelloy 기관 위에 IBAD법을 이용하여 기관을 2축 배향시킨 다음 MDO법으로 YBCO 고온초전도 박막을 증착하였

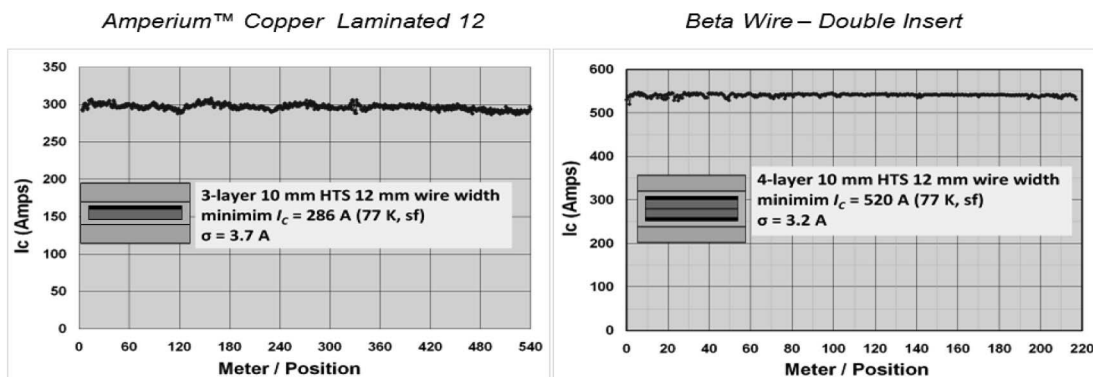


Fig. 6. 미국 AMSC사 박막선재 적층 도체의 임계전류 특성.

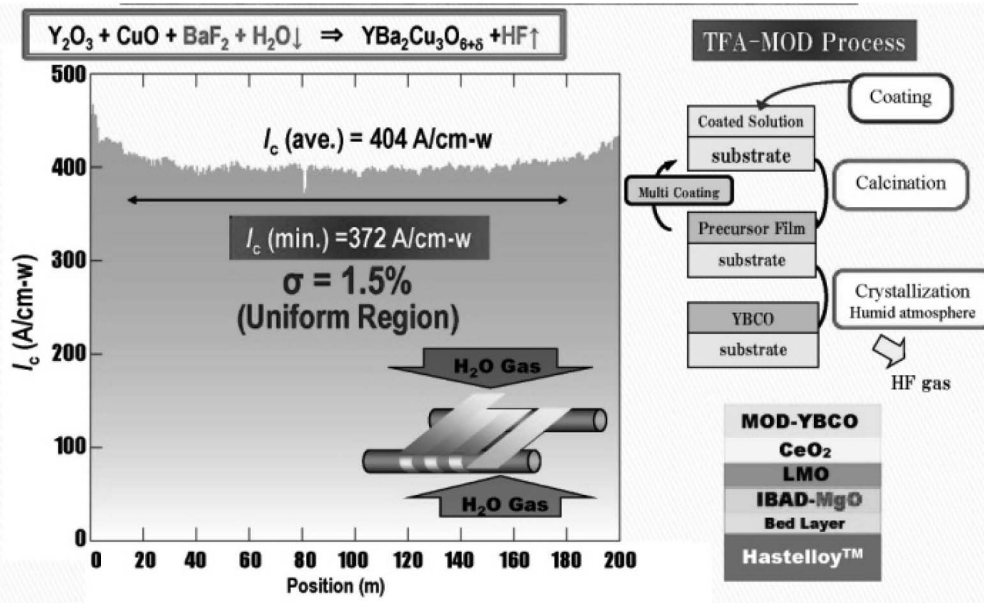


Fig. 7. 일본 ISTECC와 Showa전선에서 생산되는 CC의 임계전류 특성 및 CC 모식도.

다. 현재 200 m 길이의 YBCO 선재에서 평균 404 A의 I_c 을 달성하였다.

2.3. MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 공정

MOCVD란 금속유기원료(Metal Organic Source)에서 유기 성분의 분해 및 금속 성분의 증착을 통해 막을 형성시키는 방법이다. 막의 성장 속도가 비교적 빠르고, step coverage가 우수하며, 조성 제어가 가능하다. 또한 기판이나 결정표면에 손상 없이 증착할 수 있는 장점이 있다. 하지만 금속유기원료 물질의 가격이 비싸며, 사용하는 원료 대비 실제 막에 증착되는 양이 적어 경제적인 측면에 한계가 있다는 것이 단점이라 할 수 있다.

MOCVD 공정을 통한 장선의 CC 제조는 미국의 Superpower사 (2011년 일본의 Furugawa사에 병합됨)에 의해 주도되어 왔다. 2009년 DOE Peer review에서 발표한 자료에 의하면, 선재성능의 주요지표인 $I_c \times L$ 값이 Superpower사에 의하여 300,330 A · m를 넘어섰으며, 이는 당시 세계 최고기록을 새롭게 경신하였다. (Fig. 8 참조)¹¹⁾

또한 자장중 임계전류 특성을 높이기 위하여 자속피닝

점을 도입하고 있으며, 이를 위해 Zr을 도핑하여 향상된 임계전류 성능을 보고하였다¹¹⁾. 또한 원가절감과 관련하여 주목할 만한 기술적 성과는 R2R substrate planarization system을 구축하여 전해연마가 안된 hastelloy 테이프를 사용하여 우수한 성능의 완충층을 제조하였다.¹²⁾

2.4. Co-evaporation 공정

Co-evaporation 공정은 REBCO 초전도막을 증착하기 위하여 각 원료 물질인 RE, Ba, Cu를 함께 증발시키는 방법이다. 원료 물질을 증발시키는 방식에 따라 크게 e-beam evaporation 혹은 thermal evaporation로 구분될 수 있으며, co-evaporation에서는 이 둘을 조합하여 사용하기도 한다. 금속 원료물질을 증발시킴으로써 매우 빠른 증착속도를 얻을 수 있는 반면에 각 원료의 증착률을 제어하는 것이 어렵기 때문에 막의 정확한 조성을 맞추기 힘든 단점을 갖고 있다.

YBCO 초전도체가 발견된 이후, co-evaporation을 통한 REBCO 박막 제조는 여러 그룹들에 의해 진행되었지만, 장선의 우수한 성능을 보이는 CC 제조는 우리나라 연구진에 의해 주도적으로 이루어졌다. 2004년 KAIST와

FY09: Yet another record kilometer wire

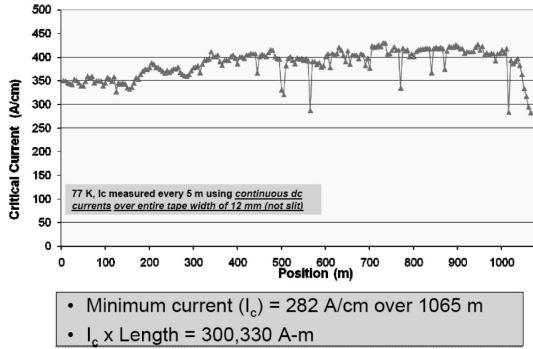


Fig. 8. Superpower 사에서 생산되는 CC의 임계전류 특성.

한국전기연구원의 공동연구로 개발된 EDDC(Evaporation using Drum in Dual Chamber) 공정¹³⁾은 두 개로 나누어진 챔버 중 하부의 고진공 챔버에서 RE, Ba, Cu 각 원소들을 증착시키며, 상부 챔버에서는 산소를 주입하여 보다 높은 분압을 유지시킨다. 이 때 기판이 부착된 드럼이 회전하며 실제로는 각 원소들의 증착과 (하부챔버) 초전도 층으로 변화가 (상부챔버) 지속적으로 일어나게 된다. 이를 통해 SmBCO CC를 제조하여 2008년 305A×27 m의 결과¹⁴⁾를 얻었으며, 2011년에는 1011A×16 m의 세계 최고수준의 고임계전류를 달성하였다.¹⁵⁾

또한 서울대학교 본 연구실과 (주)서남의 공동연구를 통해 새롭게 개발된 동시반응증발법 Reactive Co-Evaporation Deposition & Reaction (RCE-DR)은 e-beam

Table 1. CC 제조 각 제조공정별 생산속도 및 초전도층 성장속도 비교¹⁸⁾

	PLD	MOD	MOCVD	RCE-DR
생산속도 (meter/h, 4mm 폭 기준)	40 ¹⁹⁾	~100 ⁹⁾	~180 ²⁰⁾	~360 ^{16,21)}
성장속도 (nm/sec)	<10	<1	<10	>100

을 통하여 금속원소를 증발시켜 두꺼운 (~1 μm 이상) 비정질 전구체 막을 얻은 후, *ex-situ* 방식으로 2분 이내의 짧은 열처리를 통해 우수한 특성을 가지는 REBCO 초전도선을 고속으로 형성시킬 수 있는 원천기술이다¹⁶⁾. 특히 이 기술은 고온 열처리 시간이 짧아 고가의 hastelloy 합금 기판 대신 저렴한 SUS 합금 기판을 사용하여도 고성능의 REBCO CC를 생산할 수 있다는 것을 세계 최초로 입증하였다. 현재 이 기술은 CC 상용화의 최대 난제로 여겨지던 선재 가격을 10 US\$/km · A 이하로 낮출 수 있는 유일한 기술로 국제적으로 인정받고 있다. 2012년 422A · 1000 m의 GdBCO CC를 제조하였으며, 이는 $I_c \times L$ 지표로 볼 때 세계 2위의 성과라 할 수 있다. (Fig. 9)¹⁷⁾

2.5. 각 공정별 비교

앞서 논의한 CC 장선재의 주요 제조공정인 PLD, MOD, MOCVD 및 Co-evaporation (RCE-DR)의 생산속도(throughput) 및 YBCO 혹은 REBCO 박막의 성장속도

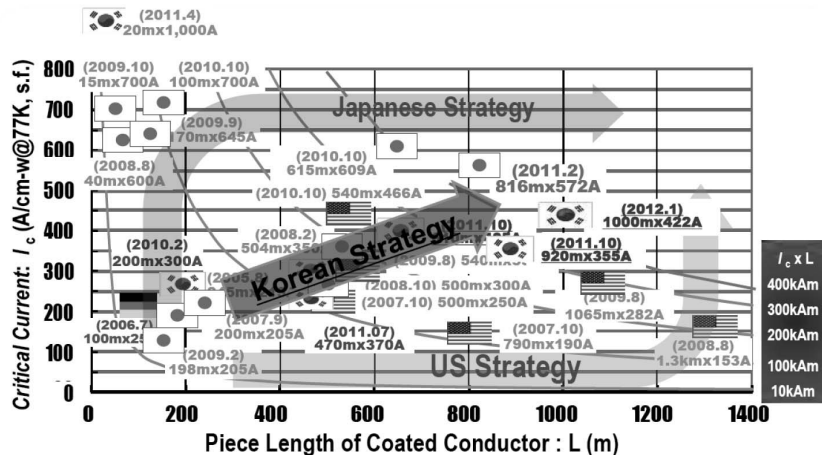


Fig. 9. 국가별 CC의 임계전류 (Ic) 및 길이 (L) 성능 비교.

를 비교하면 Table 1과 같다.

초전도층의 생산속도는 RCE-DR > MOCVD > MOD > PLD 순임을 알 수 있다. 생산속도는 선재 길이×선재 폭으로 표현되는 processing area에 성장속도를 곱한 값으로 표현할 수 있다. 만약 processing area가 균등하다고 가정할 경우, 생산속도는 성장속도에 비례한다고 볼 수 있으며, RCE-DR의 경우 빠른 성장속도를 구현함으로써 높은 생산속도를 얻을 수 있어 저가의 CC 공급이 가능하므로 상용화에 가장 유리한 제조공정이라 할 수 있다. 이러한 RCE-DR 공정의 빠른 성장속도는 기판을 씨앗층으로 하는 melt-textured growth가 일어나기 때문으로 사료된다¹⁶⁾.

CC의 생산속도와는 달리 실제 응용에 중요한 자속피닝 측면에서는 PLD 공정이 가장 우수한 것으로 알려져 있다. 이는 자속피닝점을 형성하기 위해 이차상을 초전도 기저상 내부로 진입시킬 때, nanodot 혹은 columnar defect 형상으로 그 크기가 수 nm로 다른 공정들과 비교하여 작게 형성되기 때문이다. MOCVD, MOD, EDDC의 경우 수십 nm 크기의 구형 입자가 형성되어 자속피닝점의 효과가 PLD에 비하여 조금 떨어지며, 특히 RCE-DR 공정으로 제조된 CC에서는 이차상의 크기가 거의 100 nm에 달하여,²²⁾ 위의 공정 중 자속피닝 특성이 가장 뒤떨어진다. 하지만 아직까지 RCE-DR 공정에서의 자속피닝점 제어에 대한 연구가 아직 초기 단계에 있기 때문에 향후 개선의 여지가 충분히 있고, 생산속도 및 초전도층 성장속도가 탁월한 본 제조공정의 중요성에 비추어 보다 효과적인 자속피닝점의 연구개발이 시급한 과제로 남아 있다.

3. 결론

1987년 YBCO가 발견된 이래로 고온초전도체를 실용화하기 위한 노력이 꾸준히 이루어져 왔다. 특히 각종 고효율 초전도전력 기기에 큰 응용이 기대되는 CC의 경우, PLD, MOD, MOCVD, Co-evaporation 등 다양한 공정을 통해 개발되고 있다. 이러한 다양한 공정들 중 우리나라에서 독자적으로 개발된 Co-evaporation의 일종인 RCE-

DR 공정은 빠른 초전도막 성장속도를 통해 생산속도를 크게 향상시킬 수 있었으며, 이를 통해 고품질, 저가의 CC 공급에 가장 유리한 기술로 세계적인 주목을 받고 있다. 앞으로 가까운 장래에 이러한 CC 선재가 본격적으로 산업에 응용될 것으로 전망됨으로 선진국에 비해 비교 우위를 갖는 우리 고유의 CC 생산기술을 보다 발전시킴으로써 국제 경쟁력 우위를 더욱 확고히 해가는 것이 아주 중요한 시점이고, 이를 통해 우리나라 과학기술의 선진화에 크게 기여할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 특집 원고를 완성하는데 도움을 준 연구실 내 이정우, 최순미 박사과정 학생들에게 감사를 표한다.

참고문헌

1. J. G. Bednorz and K. A. Muller, "Possible High- T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System," *Z. Phys. B: Condens. Matter*, **64** [2] 189-93 (1986).
2. M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, and C. W. Chu, "Superconductivity at 93K in a New Mixed-phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure," *Phys. Rev. Lett.*, **58** [9] 908-10 (1987).
3. P. H. Hor, R. L. Meng, Y. Q. Wang, L. Gao, Z. J. Huang, J. Bechtold, K. Forster, and C. W. Chu, "Superconductivity above 90 K in the Square-planar Compound System $ABa_2Cu_3O_{6+x}$ with A = Y, La, Nd, Sm, Eu, Gd, Ho, Er, and Lu," *Phys. Rev. Lett.*, **58** [18] 1891-94(1987).
4. H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi, and T. Asano, "A New High- T_c Oxide Superconductor Without a Rare-earth Element," *Jpn. J. Appl. Phys., Part 2*, **27** [2] L209-L210 (1988).
5. Y. Iijima, N. Tanabe, O. Kohno, and Y. Ikeno, "In Plane Aligned $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Thin-films Deposited on Polycrystalline Metallic Substrates," *Appl. Phys. Lett.*, **60** [6] 769-71 (1992).
6. Y. Shiohara, "Future Prospects of REBCO Coated Conductors," Invited talk in 2012 DASAN Conference on Superconductivity, Nov. 7-11, 2012, Jeju, Korea.
7. T. Izumi, "Present Status & Future Prospect of Coated Conductors in Japan," International Superconductivity

- Industry Summit, Oct. 31-Nov. 1, 2011, Gwangju, Gyeonggi, Korea.
8. A. Gupta, R. Jagannathan, E. I. Cooper, E. A. Giess, J. I. Landman, and B. W. Hussey, "Superconducting Oxide-films with High Transition-temperature Prepared from Metal Trifluoroacetate Precursors," *Appl. Phys. Lett.*, **52** [24] 2077-79 (1988).
 9. American Superconductor, "AMSC 2G Wire Technology," 2009 DOE Peer Review, Aug. 4-6, 2009, Alexandria, Virginia, USA.
 10. T. Lehner, "2G HTS Wire Status in the USA," International Superconductivity Industry Summit, Oct. 31-Nov. 1, 2011, Gwangju, Gyeonggi, Korea.
 11. V. Selvamanickam, "Progress in SuperPower's 2G HTS Wire Development Program," 2009 DOE Peer Review, Aug. 4-6, 2009, Alexandria, Virginia, USA.
 12. L. Civale, "Development and Multi - Scale Characterization of IBAD MgO / MOCVD YBCO Coated Conductors," 2010 Advanced Cable and Conductors Annual Peer Review, Jun. 29-Jul. 1, 2010, Alexandria, Virginia, USA.
 13. B. S. Lee, K. C. Chung, S. M. Lim, H. J. Kim, D. Youm, and C. Park, "Fabrication of $\text{Sm}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ Coated Conductors Using the Co-evaporation Method," *Supercond. Sci. Technol.*, **17** [4] 580-84 (2004).
 14. 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. Technol.*, **21** [3] 034003 (2008).
 15. H. S. Kim, S. S. Oh, S. H. Jang, C. H. Min, H. S. Ha, K. C. Chung, D. J. Youm, S. H. Moon, and C. Park, "High Performance SmBCO Superconducting Coated Conductor on IBAD-MgO Template Using Reactive Co-evaporation Method," Invited talk in Korea Superconductivity Society Meeting, Jun.29-Jul.1, 2011, Yongpyong, Korea.
 16. S. I. Yoo, "The High Rate Conversion Mechanism of GdBCO Coated Conductors by a New High Throughput Process, RCE-DR," Invited talk in 2011 MRS Spring Meeting, Apr. 25-29, 2011, San Francisco, USA; S.I. Yoo, "Fundamental Understanding of $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Coated Conductors by the High Throughput RCE-DR Process" Invited talk in 2012 DASAN Conference on Superconductivity, Nov. 7-11, 2012, Jeju, Korea.
 17. S. H. Moon, "Practical Conductor for Application, its Fabrication and Industrialization," Invited talk in 2012 DASAN Conference on Superconductivity, Nov. 7-11, 2012, Jeju, Korea.
 18. J. W. Lee and S. I. Yoo, "Progress in the Co-evaporation Technologies Developed for High Performance $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Films and Coated Conductors," *Superconductivity and Cryogenics*, **14** [4] 5-11 (2012).
 19. H. Kutami, T. Hayashida, S. Hanyu, C. Tashita, M. Igarashi, H. Fuji, Y. Hanada, K. Kakimoto, Y. Iijima, and T. Saitoh, "Progress in Research and Development on Long Length Coated Conductors in Fujikura," *Physica C*, **469** [15-20] 1290-93 (2009).
 20. T. Aytug, "Development of MOCVD-based, IBAD-2G Wires," 2008 DOE Peer Review, Jul. 29-31, 2008, Arlington, Virginia, USA.
 21. S.H. Moon. "Advanced Fast RCE Process for REBCO Coated Conductor" Invited talk in 23rd International Symposium on Superconductivity, Nov. 1-3, 2010, Tsukuba, Japan.
 22. S. M. Choi, J. W. Lee, S. H. Moon, and S. I. Yoo, "Microstructure Analysis of $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Coated Conductors by the RCE-DR Process", *MRS Proceedings*, 1434 doi:10.1557/opl.2012.1406 (2012).

유상임



- 1982년 서울대학교 요업공학과 학사
- 1984년 서울대학교 무기재료공학과 공학석사
- 1992년 (미국) Iowa State University 공학박사
- 1992년~1993년 (미국) USDOE-Ames Laboratory, Postdoc
- 1993년~1995년 (일본) Superconductor Research Laboratory, 초빙연구원 (ISTEC Fellow)
- 1995년~1998년 (일본) Railway Technical Research Institute, 선임연구원 (Chief Researcher).
- 1998년~ 현재 서울대학교 재료공학부 교수