

## 제2세대 초전도선 개발

고 락 길, 박 찬  
한국전기연구원 초전도재료연구그룹

### 1. 서 론

금속 테이프 위에 초전도층을 박막형태로 증착시켜서 제조되는 고온초전도 선재인 coated conductor (CC)는 powder-in-tube 공정으로 제조되는 1세대 고온초전도 선재에 비해 액체 질소 온도에서 높은 임계 전류 밀도와 우수한 자장 특성을 가지면서 더 경제적으로 제조 가능하기 때문에 액체질소온도에서 작동 가능한 초전도전력기기 개발에 반드시 필요한 부분으로 인식되고 있다. 최근 국내외적으로 다양한 증착 방법을 사용하여 전력기기 응용이 가능한 장선의 CC 제조공정을 개발하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 외국의 경우 이미 CC 선재의 상업화를 위해 기업체가 중심이 되어 집중적인 연구 개발이 이루어지고 있다.

본고에서는 한국전기연구원이 21세기 프론티어 차세대 초전도응용 기술개발 사업 1 단계를 통해 수행한 고온초전도 CC 연구 개발의 주요한 연구 내용에 대하여 소개한다.

### 2. CC 제조 장치 구축

#### 가. PLD 장비

초전도층의 증착을 위해서는 다양한 증착 방법이 사용되고 있으며, 한국전기연구원에서는 그 중 가장 좋은 결과를 내고 있는 PLD 방법으로 CC를 제조하고 있다. 한국전기연구원에서는 기초 실험 연구를 위한 작은 규모의 PLD 장비와 reel-to-reel (R2R) 방식의 연속 공정으로 장선의 CC 제조가 가능한 PLD 장비를 운용하고 있다. 에너지원으로는 248nm의 파장을 갖는 KrF excimer laser를 사용하며, 80W의 power와 최대 200Hz repetition rate로 운전 가능하여 고속 박막 증착이 가능하다.

장선 CC 제조를 위한 연속 공정 PLD 장비는 금속 기판이 진공 분위기 내에서 일정한

tension을 유지하며 균일한 속도로 양방향 이동이 가능하도록 제어되는 R2R chamber와 결합되어 있다. 증착 영역에서 균일한 증착 온도 유지와 plume으로 부터의 오염을 막기 위한 plume screen이 추가된 heater box가 사용된다. 직경 3 inch 세라믹 target 네 개가 동시에 장착되는 target manipulator는 target rastering을 통해 효율적인 target의 ablation이 가능하다. down steam 방식으로 gas의 분압이 제어되며, 증착 온도, 분압, 레이저 에너지 등의 증착 조건을 위한 모든 parameter는 Labview 기반의 프로그램으로 설정 및 제어된다.

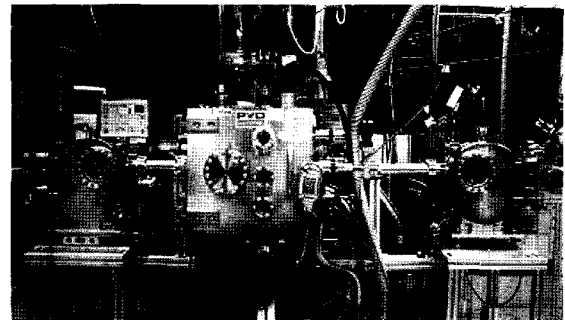


그림 1. R2R 연속 공정 PLD 장치

#### 나. evaporation & sputter 장비

장선의 완충층 제조를 위한 장비는 하나의 chamber에서 연속 공정으로 evaporation과 reactive sputtering을 할 수 있도록 특수하게 설계 및 제작되어, 곧바로 초전도 층 증착이 가능한 수 십m의 완충층 기판을 in-situ로 제조할 수 있다.

chamber의 구조를 살펴보면 한 chamber 내에 1개의 evaporator 와 2개의 sputter gun이 장착되었다. 증착률을 측정하기 위한 2 채널 thickness monitor, 1 채널 thickness monitor가 각각 1개씩 장착되어 있다.

sputter의 사양은 최대 DC 전압 1kV, 최대 전류 1A이며, 직경 2인치 타겟을 장착할 수 있다. 2개의 sputter를 동시에 작동 시

60nm/min 이상의 증착률로 YSZ를 증착할 수 있다. evaporator의 사양은 최대 DC 전압 5V, 최대 전류 400A이며 resistive boat를 1개 장착할 수 있다. reel-to-reel 이송시스템을 장착하여 기판을 이동하면서 증착영역에서 증착할 수 있다. 증착 가능한 길이는 reel에 감을 수 있는 테이프의 길이, evaporation boat의 수명, sputtering target의 수명 등에 의해서 제한을 받으며, 여러 가지 제한적 요소를 고려했을 때, 최대 50~100m 정도 증착이 가능하다.

터보펌프가 chamber 상부에 연결되어 있고 diffusion 펌프가 chamber 하부에 장착되어 있다. chamber의 진공도는 터보 펌핑시  $1 \times 10^{-6}$  Torr이하가 되며 diffusion pump와 동시 가동 시  $1 \times 10^{-7}$  Torr이하가 된다.

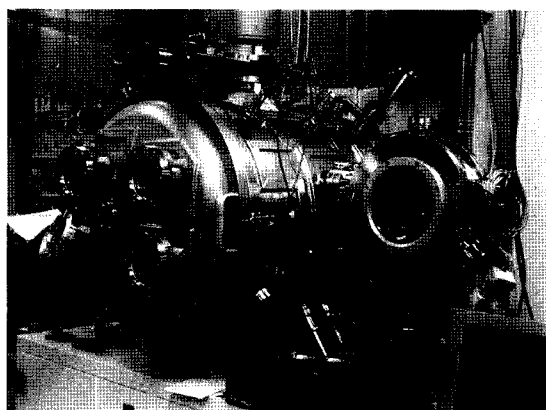


그림 2. R2R evaporation & sputter 장치

#### 다. 보호층 제조용 sputter 장비

초전도 박막을 보호하기 위한 Ag 보호층은 두께가 두껍고 박막 밀도가 높게 만들어져야 한다. 이를 위해 본 연구에는 R2R 장치가 장착된 RF sputter 장비를 구축하여 YBCO 층위에 5~10 $\mu$ m의 두께로 Ag 보호층을 증착한다.

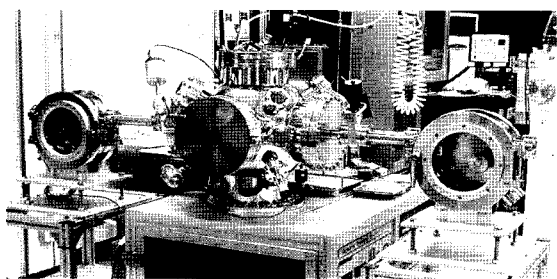


그림 3. R2R sputter 장비

#### 라. 후열처리로

YBCO 층위에 Ag sputtering을 통해 보호층까지 증착한 금속 테이프의 후 열처리 공정을 위해 R2R 방식의 연속 공정 후열처리로를 구축하였다. 3 hot zone furnace 이며, 20cm 구간에서 50cc/min.의 O<sub>2</sub> gas 흐름이 있을 때, 온도 차이는 4 $^{\circ}$ C이하이다.

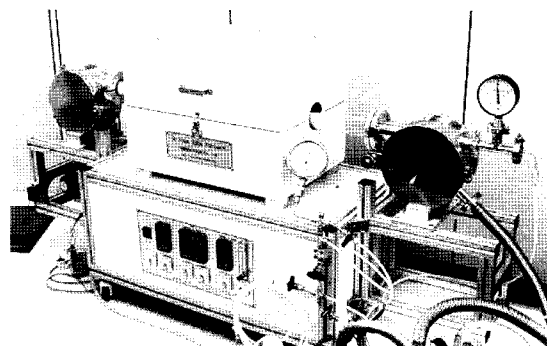


그림 4. R2R 후 열처리 로

### 3. 완충층 제조 기술

#### 가. 다층 완충층 제조 기술

초전도선재는 보호층/초전도층/완충층/금속기판의 구조를 기본으로 하며 완충층의 역할은 다음과 같다. 첫째, 기판의 구성 원자가 초전도 층으로 확산 침투하는 것을 방지하고 둘째, 기판의 grain 정렬도를 초전도 층까지 전달하며 셋째, 기판과 초전도 층의 열적팽창 계수 및 격자상수 차이에 의한 stress를 완화시켜 주는 것이다.

RABiTS 방법으로 제작된 금속 기판 위에 CeO<sub>2</sub>/YSZ/CeO<sub>2</sub> 및 CeO<sub>2</sub>/YSZ/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 구조로 이루어진 완충층을 증착하였다. 완충층을 구성하는 각 층은 각기 다른 역할을 하는데, 기판으로부터 첫 번째 층은 기판의 결정 정렬성을 윗 층으로 전달하는 역할을 하며, 두 번째 층은 기판의 구성 원자가 초전도층으로 확산 침투하는 것을 방지하는 역할을 하며, 세 번째 층은 초전도 층과 두 번째 완충층과 격자상수 정합 역할을 한다. 각층의 역할 및 특성에 적합한 증착방법을 선택해야 하는데, CeO<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 층은 thermal evaporation을 이용하고, YSZ 층은 금속 target을 사용하며 target 물질의 산화작용가스로 수증기를 사용하는 DC reactive sputtering을 이용하여 증착하였다. 금

속 target을 사용하는 reactive sputtering은 장시간의 사용에도 target의 변질이 없고 고속 및 안정된 증착이 가능하며 세라믹 target에 비하여 가격이 저렴하고 조성비 및 산소 도핑량 등 박막물성 제어가 용이하다는 장점이 있다.

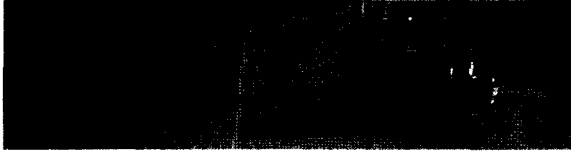


그림 5. NiW/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/YSZ/CeO<sub>2</sub> 구조의 완충층 테이프

**나. 단일층 완충층 제조 기술**

Ni 금속기판위에 YBCO 박막을 증착하면, Ni 원자들이 YBCO박막층으로 확산하여 초전도 특성을 저하시키는 결과를 초래한다. 이러한 금속기판의 확산 침투를 방지하기 위하여 일반적으로 금속기판과 초전도층 사이에 완충층이 있는 초전도층/다층완충층/금속기판의 다층 박막형태의 구조로 이루어진다. 가장 일반적으로 사용되는 완충층은 CeO<sub>2</sub>/YSZ/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CeO<sub>2</sub>/YSZ/CeO<sub>2</sub> 등의 구조를 가진다. 이러한 다층 산화물 박막을 2축배향성을 가지는 금속 테이프에 증착하여 제조되는 coated conductor를 만들기 위하여 각 층의 최적화된 증착 방법과 조건들이 제시되고 있다. 완충층은 앞에서 언급한 바와 같이 금속기판의 확산 방지와 화학적으로 기판과 초전도 박막에 모두 안정적이며 기판과 초전도층사이의 중간값의 열팽창계수를 가지는 재료를 이용하여 박막의 crack을 억제하기도 하며 epitaxial한 박막 성장을 위해 격자상수 값이 중간인 재료를 이용한다. 이러한 다층 박막 제조공정의 단순화와 경제성을 개선하고자 단일 완충층으로 YBCO coated conductor를 제조하고자 하는 연구가 이루어지고 있다.

perovskite 구조를 가지는 SrTiO<sub>3</sub> (STO)는 YBCO와의 격자정합성(3%)이 매우 우수하여 단결정 기판으로 YBCO박막 성장에 많이 이용되어지고 있기에 금속 기판 위에 epitaxially 증착 될 수 있다면 단일 완충층으로 사용될 수 있을 것으로 기대되어진다.

또한 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 fluorite 구조를 가지는 재료로 금속 기판과 YBCO 초전도체와의 격자정합성이 1.88%, 6.09%이며 화학적으로 안정하며, 두께가 두꺼워 짐에 따른 crack이 없다.

본 연구에서는 SrTiO<sub>3</sub>와 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 이용한 1MA/cm<sup>2</sup> 이상의 J<sub>c</sub>를 갖는 단일 완충층 YBCO CC를 제조하여 그 가능성을 확인하였다.

**STO single buffered CC**

- NiW/STO(600nm)/YBCO(250nm)
- I<sub>c</sub> = 8.96A(3mm width, @77K, 0T)
- J<sub>c</sub> = 1.2MA/cm<sup>2</sup>
- T<sub>c</sub> = 86K

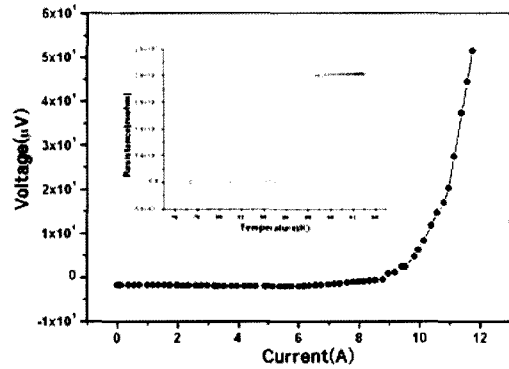


그림 6. STO 단일 완충층 CC의 I<sub>c</sub>와 T<sub>c</sub> 그래프

**Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single buffered CC**

- NiW/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(450nm)/YBCO(450nm)
- I<sub>c</sub> = 14A(2.8mm width, @77K, 0T)
- J<sub>c</sub> = 1.1MA/cm<sup>2</sup>
- T<sub>c</sub> = 88K

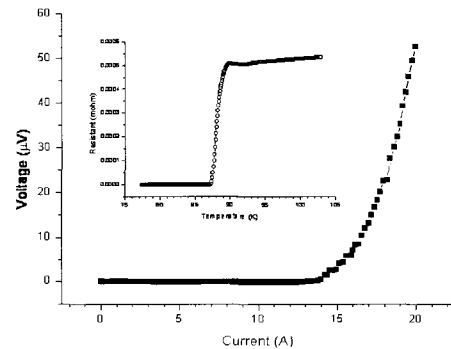


그림 7. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 단일 완충층 CC의 I<sub>c</sub>와 T<sub>c</sub> 그래프

**4. PLD법에 의한 CC 제조 기술**

**가. 연속 공정에 의한 장선 CC 제조**

한국전기연구원에서는 보호층/초전도층/산화물완충층/금속기판 으로 구성된 CC의 다

층 박막을 물리적 증착법 (physical vapor deposition - PVD)인 evaporation, sputtering, pulsed laser deposition (PLD) 등의 방법을 이용하여 coated conductor를 제조하고 있다. 초전도층의 2축배향성을 금속기판으로부터 얻는 rolling-assisted-biaxially-textured-substrate (RABiTS) texture template은 미국 Oxford Superconducting Technology사에서 제조된 2축배향 Ni-W 합금 테이프 위에 evaporation과 sputtering 공정을 이용하여 다층의 산화물 완충층 박막을 증착하여 사용하고 있다. 증착되는 박막에 이온빔을 주사하여 다결정 금속테이프위에 2축배향성을 가지는 산화물 박막을 증착하여 얻을 수 있는 ion beam assisted desposition (IBAD) texture template은 독일의 Goettingen 대학교에서 공급받아 사용하고 있다. texture template 위에 초전도박막을 증착하는 공정은 PLD법이 사용되고 있으며, 은 보호층은 sputtering법으로 증착하고 있다. 보호층까지 증착된 CC는 후 열처리과정을 거친 후, 초전도특성과 2축배향성 등의 특성분석을 하게된다. 모든 증착공정은 연속으로 이루어지고 있으며, 미터급 길이 CC의 초전도 특성을 분석할 수 있는 장치가 사용되고 있다. 다음은 최근 발표된 한국전기 연구원의 결과이다.

**0.4m RABiTS-CC**

- NiW/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(evaporation)/YSZ(sputter)/CeO<sub>2</sub>(evaporation)/YBCO(PLD)
- end-to-end I<sub>c</sub> = 34A/cm(@77K, 0T)
- end-to-end J<sub>c</sub> = 0.4MA/cm<sup>2</sup>

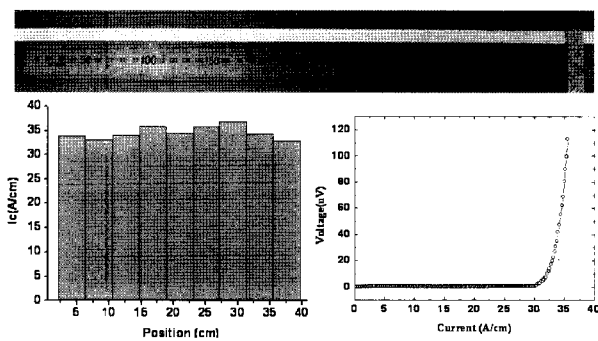


그림 8. end-to-end I<sub>c</sub>가 34A/cm인 0.4m RABiTS-CC의 모습과 길이 방향으로의 I<sub>c</sub> 분포 및 I<sub>c</sub> 그래프

**0.5m IBAD-CC**

- SS/YSZ(IBAD)/CeO<sub>2</sub>(PLD)/YBCO(PLD)
- end-to-end I<sub>c</sub> = 41A/cm(@77K, 0T)
- end-to-end J<sub>c</sub> = 1.2MA/cm<sup>2</sup>

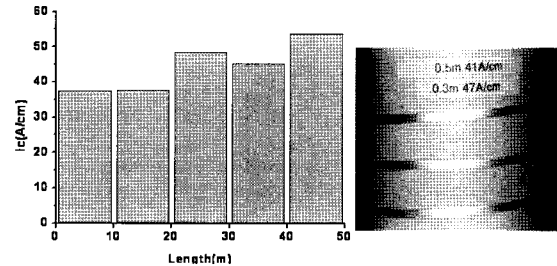


그림 9. end-to-end I<sub>c</sub>가 41A/cm인 0.5m IBAD-CC의 모습과 길이 방향으로의 I<sub>c</sub> 분포

**1.1m IBAD-CC**

- SS/YSZ(IBAD)/CeO<sub>2</sub>(PLD)/YBCO(PLD)
- end-to-end I<sub>c</sub> = 26A/cm(@77K, 0T)
- end-to-end J<sub>c</sub> = 0.7MA/cm<sup>2</sup>

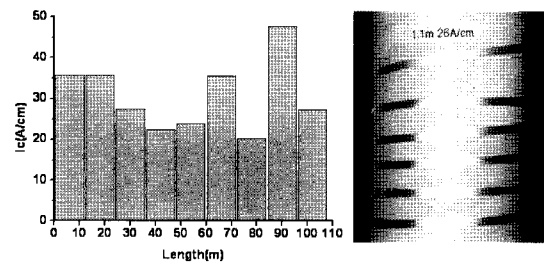


그림 10. end-to-end I<sub>c</sub>가 26A/cm인 1.1m IBAD-CC의 모습과 길이 방향으로의 I<sub>c</sub> 분포

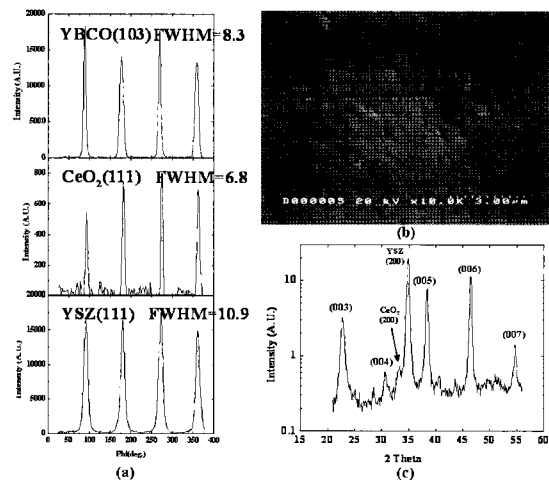


그림 11. 길이 1.1m IBAD-CC의 (a) Phi scan (b) YBCO SEM image (c) θ-2θ scan

나. 초전도 고속 증착 기술

SS/YSZ(IBAD)/CeO<sub>2</sub>(PLD)의 구조를 갖는 IBAD template 위에 PLD 방법을 사용하여 약 10nm/sec.의 높은 증착율로 YBCO를 1.2 $\mu$ m 두께로 증착하였다. 폭 4m를 갖는 시편에서 71A이상의 Ic를 획득하였으며, 이는 10mm 금속 기판을 기준으로 178A/cm 이상의 높은 Ic이다.

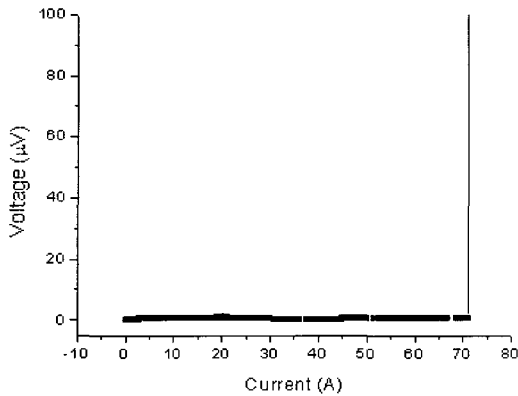


그림 12. 고속 증착으로 제조된 CC의 Ic 그래프

5. 결 론

13년 전부터 지속적인 투자와 연구를 수행해온 외국의 연구 그룹에 비해 우수한 결과는 아니지만, 2001년 가을 차세대초전도응용기술개발 프런티어사업단의 지원으로 처음 시작한 전기연구원의 CC 연구그룹은 2년6개월이라는 짧은 시간에 장비구축과 1미터 길이의 CC 제조라는 결과를 발표하였으며, 이는 연구 시작 후 1미터 길이의 CC를 제조하는데 6~8년이라는 기간이 소요된 미국, 일본, 유럽의 경우와 비교하였을 때 아주 우수한 연구 성과라고 할 수 있다. 길이, 성능, 증착속도 등을 동시에 향상시킬 수 있는 연속증착공정, 초전도층 두께를 증가시키면서 높은 전류 밀도를 유지할 수 있는 공정, 장선 제조 공정에서 나타난 균일성, 재현성 등의 문제점 해결, Batch type의 Co-evaporation을 이용한 장선 CC 제조공정 등의 연구가 2007년까지 250A/cm(77K)의 성능을 가지는 100m 길이의 CC제조를 목표로 진행 중이다. 향후 상업화를 위한 독창적인 고온초전도 CC 제조 공정 개발을 위한 연구

가 병행되고 있으며, 계속해서 더 많은 전류를 흘릴 수 있는 더 긴 CC를 제조하는 공정을 개발하기 위하여 노력하고 있다.

저자이력



고락길(高樂吉)

1972년 5월 1일생. 1995년 배재 대학교 물리학과 졸업(학사), 1997년 동 대학원 졸업(석사), 1997년 한국전기연구원 입사, 현재 한국전기연구원 초전도재료연구그룹 선임연구원, 부산대학교 대학원 물리학과 박사과정



박 찬(朴 燦)

1964년 4월 30일생 1986년 서울대학교 무기재료공학과 졸업, 1988년 동 대학원 졸업(공학석사), 1996년 New York State College of Ceramics at Alfred University 졸업(공학박사), 1996~2000년 미국 Oak Ridge 국립연구소 Research Associate, 2000~2001 미국 IGC-SuperPower Senior Materials Scientist, 2001~현재 한국전기연구원 초전도재료연구그룹 그룹장