

## 한국의 coated conductor 개발 동향

오 상 수

한국전기연구원 초전도재료연구그룹

### 1. 서 론

케이블, 모터, 변압기, 한류기, SMES 등의 고온초전도전력기기를 실용화하는데 있어서 무엇보다 중요한 것은 값싸고 성능이 우수한 고온초전도소재의 안정적인 공급이라고 할 수 있다. 이를 위하여 미국, 일본, 유럽에서는 일찍이 고온초전도소재를 실용화하는 연구를 시작하였고, Bi계 1세대 고온초전도소재의 상용화 개발에 이어, 지금은 성능대비 경제성 측면에서 상대적으로 우수한 2세대 고온초전도소재인 ReBCO (Re : 희토류원소) coated conductor (CC)를 박막 혹은 코팅 공정으로 제조하는 연구가 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다.

2001년 DAPAS사업이 시작되면서 한국에서도 본격적으로 CC를 연구하는 계기를 마련하게 되었고, 선진국인 일본, 미국 보다는 늦게 시작된 연구 분야지만, 그간 정부의 지속적인 지원과 많은 연구자들의 노력에 힘입어 세계적으로 자랑할 만한 많은 연구 성과들이 개발되고 있다.

CC는 고온초전도기기의 실용화에서 중요한 성능과 경제성에 큰 영향을 미치기 때문에 고온초전도응용기술을 개발하는 DAPAS사업에서도 중점 과제로 추진되고 있으며, 본 고에서는 지난 2007년 11월 제주에서 개최되었던 CCA2007에서 발표한 한국의 CC 연구의 주요 연구결과들과 향후 계획에 대하여 간략하게 기술하고자 한다.

### 2. CC 제조 공정

안정화층인 구리를 집합(도금)하거나 보호층인 Ag를 코팅하는 공정을 포함할 수 있으나, CC공정은 크게 기판(템플릿)제조 공정과 초전도층 제조공정으로 구분할 수 있다. 한국에서 기판공정으로는 RABiTS와 IBAD 방법이 시도되었으나, DAPAS 2단계 연구를

마무리하는 과정에서 IBAD기판 공정이 선택되었고, 2단계 연구과정에서 MOD, PLD, Co-evaporation등의 초전도층 제조 방법들이 모두 시도되었으나, 우리 고유의 반응형 동시증발법 (Reactive Co-Evaporation)방법인 EDDC (Evaporation using in Dual Chambers)가 선택되어 IBAD-EDDC법에 의한 장선화 연구가 2단계 연구에서 집중적으로 이루어졌다.

그림 1은 DAPAS-CC의 개략적인 층 구조와 각 층의 제조방법을 나타내고 있다.

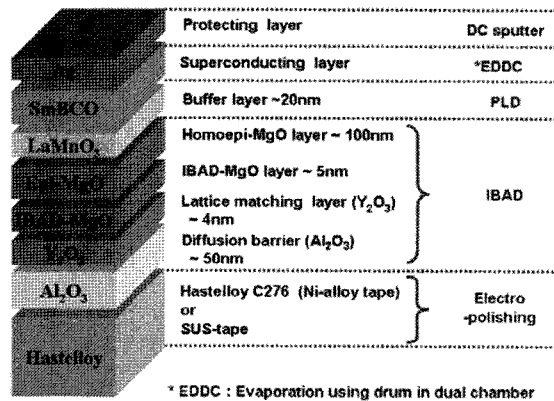


그림 1. DAPAS-CC의 층 구조도

금속기판은 하스텔로이합금을 사용하고 있으나 저가의 SUS금속기판을 사용한 연구도 이루어지고 있다. 릴투릴(reel-to-reel, R2R) 전해연마장치를 이용하여 표면을 연마한 금속테이프 표면 위로 전자빔 증착장치와 보조이온빔 증착장치로 구성된 IBAD시스템을 이용하여 연속적으로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - IBAD-MgO - epi-MgO층을 증착하고, cap layer층으로 LMO층을 PLD를 이용하여 증착하면 기판공정이 완료된다.

초전도층은 EDDC공정으로 SmBCO 초전도층을 증착하는데 2단계 DAPAS 연구에서 100 m급의 CC를 제조할 수 있는 batch형 EDDC장치를 제작하여 사용 중에 있다.

그림 2는 현재 KERI에서 제작하여 운전 중

인 EDDC장치의 외관 사진을 나타낸 것으로 이 시스템은 크게 고진공을 요하는 하부 증발 챔버와 기판테이프가 감긴 드럼이 고온에서 회전하는 반응챔버로 이루어졌다. 반응챔버에는 초전도체 산화반응을 위하여 산소를 주입하며, 하부 증발챔버로 산소가 유입되지 않도록 두 챔버 사이에 differential pumping 부를 설치한 것이 특징이라고 할 수 있다. 증착시의 조성 제어를 위하여 하부 증발챔버에서 Sm, Ba, Cu 금속을 도가니에 넣고 전기적으로 가열하여 증발시키면서 다채널 QCM으로 각 원소의 증착율을 제어하는 방식을 사용하고 있다.

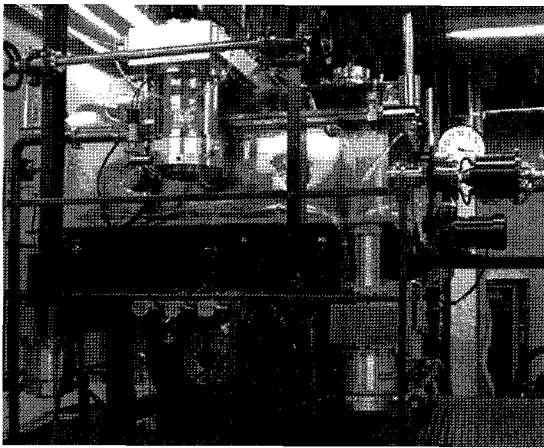


그림 2. KERI에서 운전 중인 EDDC장치의 외관 사진

도가니에서 전기적 가열에 의하여 증발되는 원자들은 기판의 LMO 표면위로 증착되고, 증착된 혼합물층 부분이 드럼의 회전에 의하여 600 ~ 800 °C 온도의 산소와 반응을 일으키면서 Sm-123초전도상으로 변태 (conversion)가 일어난다.

### 3. 주요 연구성과

프런티어 2단계 연구사업에서 얻은 결과들 중에서 장선의 IBAD-MgO 증착기술의 확보는 세계적 수준의 성과라고 할 수 있다. Bi-polar형의 연속 전해연마장치로 하스텔로이 테이프의 표면을 연마한 후에 e-beam 증착 장치가 설치된 멀티턴 방식의 IBAD 증착 시스템을 이용하여 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>층을 순차적으로 입히고, 보조이온건을 이용하여 고속으로 MgO층을 균일하게 증착하는데 성공하였다.

310m길이의 테이프에서 MgO층을 증착하여 MgO(220)면의 in-plane 집합도가 6도이하의 우수한 결정배향특성을 확인하였다. 표1은 IBAD공정시 각 단계별 제조속도를 정리한 것으로 세계에서 가장 빠르게 IBAD-MgO 기판테이프를 제조할 수 있는 기술을 프런티어사업에서 확보하였다.

IBAD-MgO테이프 표면위에 연속 PLD장치를 이용하여 LMO층을 증착시켜 100 m급의 CC용 기판테이프 제조를 완료하였다.

이렇게 만들어진 기판테이프를 EDDC장치의 드럼에 감고 반응챔버의 산소분압이 5 ~ 15 mTorr, 드럼 온도가 600 ~ 800 °C 범위에서 증착시간을 증가시키면서 장선의 SmBCO-CC를 제조하였으며 그림 3은 실제 길이 93m 기판테이프위에 1시간 30분 동안 SmBCO층을 증착한 테이프의 전체 사진을 나타낸 것이다.

표 1. IBAD-MgO기판 제조시의 층별 제조속도

| Each Step                      | multi-turn with 14-pass |
|--------------------------------|-------------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 210 m/hr                |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 500 m/hr                |
| IBAD-MgO                       | 600 m/hr                |
| Homo-epi MgO                   | ~ 70 m/hr               |

테이프 중간 7.5 m영역은 SmBCO층이 정상적으로 증착되지 않은 것을 확인하였으며, 금속기판 모재로 부터의 불균일성이나 결함 등의 원인에 의한 것으로 검토 중이나 세밀한 분석이 진행 중에 있다.



그림 3. EDDC증착 직후의 드럼에 감긴 93m급의 SmBCO-CC의 표면

전체 테이프 구간에서 두세 곳의 박리 부분을 제외하고는 대부분의 영역에서 치밀하고 결정 배향성이 높은 Sm-123초전도체층이 2.2 μm 전체 두께에 걸쳐 잘 형성된 것을 SEM 분석으로 확인하였다.

그림 4는 93 m 장선 SmBCO-CC 테이프 시편의 구간별 임계전류를 측정된 결과를 나타낸 것으로 27 m 길이에서  $I_c$  최소값이 300 A/cm 를 넘는 것을 확인하였다. 일부 구간에서 불량한 부분이 확인되었지만, Co-evaporation법으로 제조한 SmBCO-CC에서 얻어진 이러한 결과는 세계최고 수준이라고 할 수 있다.

본 연구를 통하여 IBAD-evaporation공정이 고성능의 장선 CC 개발에 적용 가능한 것으로 검증되었으며, 향후 상용화를 위한 프런티어사업의 표준 공정으로 채택되었다.

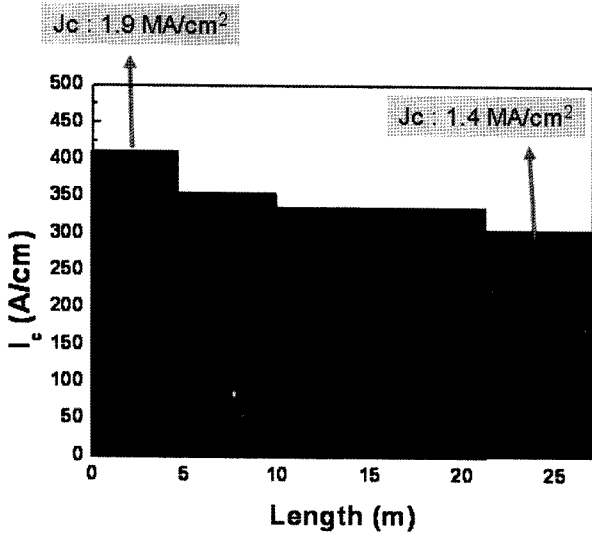


그림 4. 93 m CC의 27 m구간에서의 임계전류 분포

#### 4. 향후 연구 계획

3단계 프런티어사업에서 크게 달라진 것은 참여기업 (주)서남이 양산기술을 개발할 협동연구기관으로 본 사업에 실질적으로 참여하게 된 것이다. 금년 4월에 시작한 3단계 사업에서 KERI는 R2R 연속 공정으로 RCE 공정을 이용하여 1,000 A/cm 임계전류 성능의 CC를 개발하는 목표로 연구 중이며, 고임계전류 CC 제조기술을 기업에 이전하여 최종적으로 프런티어사업에서 1 km-500 A급의 CC를 개발하여 수요기관 및 기업에 공급하는 것이 최종

목표이다. 이러한 목표를 위하여 3단계에서는 IBAD와 RCE공정에 더욱 집중하는 구도로 참여기관의 역할과 목표가 재조정되었으며, 2단계 사업에 참여했던 국내의 많은 대학들이 표2 와 같이 3단계 사업에서도 다양한 요소기술 개발을 통하여 CC의 상용화를 지원하고 있다.

표 2. 3단계 프런티어 CC연구사업의 구도

| KERI Development of CC for applications (2 <sup>nd</sup> phase: Apr. 07 ~ Mar. 11)<br>Project Leader: S.S. Oh |  |               |  |
|---|--|---------------|--|
| KERI  | High performance CC<br>- S.S. Oh           | SUNAM         | Production tech.<br>- S.H. Moon        |
| KIMIS   | Low cost MOD<br>- J.M. Yoo                 | Seoul U.      | New materials for buffer<br>- S.I. Yoo |
| Seoul U.  | AC loss reduction<br>- C. Park             | Gyeongsang U. | Microstructure analysis<br>- C.J. Kim  |
| KAIST   | Flux pinning<br>- D. Youm                  |               |  |
| Ewha Womans U.  | High rate depo.<br>- W. Jo                 |               |  |
| Andong U.   | Electro-mechanical property<br>- H.S. Shin |               |  |

#### 5. 맺음말

본 고에서는 주로 2단계 프런티어사업에서 얻은 CC사업의 주요 성과에 대하여 기술하였다. 미국, 일본 등의 선진국보다 CC연구를 늦게 시작하였지만 프런티어사업의 집중적인 지원으로 선진국과의 기술격차를 크게 줄일 수 있었고, 우리가 개발한 IBAD-RCE공정이 CC의 성능대비 경제성 측면에서 세계적으로 경쟁력이 있기 때문에 3단계 사업에서 더욱 노력하여 양산기술까지 개발하게 되면 국내뿐만 아니고 세계 시장에도 판매할 수 있는 CC 선재의 상용화가 가능할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 저자이력



오상수(吳詳秀)

1959년 11월 1일 생. 1983년 경북대 금속공학과 졸업, 1992년 Kyoto대 대학원졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도재료연구그룹 그룹장.