

## 2세대 고온초전도선의 연구성과와 전망

오 상 수

한국전기연구원 초전도재료연구그룹

### 1. 서 론

90년대 초, Fujikura사에서 IBAD기술로 금속기판위에 2축배향의 YSZ물질을 증착하는데 성공[1]하면서 YBCO-coated conductor(CC)연구[2-5]가 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다. DAPAS사업에서도 1단계에서 Bi-2223 초전도선을 실용화하기 위한 연구 개발이 이루어졌으나, 제조비용과 성능 면에서 2세대 고온초전도선인 CC에 비하여 경쟁력이 떨어지기 때문에 2단계 DAPAS 연구에서는 CC과제에 집중하는 구도로 연구 개발이 이루어졌다.

CC연구는 최근, SuperPower사등에 의하여 수백 m급에서 높은  $I_c$  성능이 확인되면서, 장선재 제조 공정기술이 검증되었다고 볼 수 있다. SuperPower사와 AMSC사가 km급 생산라인을 구축하는 계획을 발표하면서 CC는 R&D 단계에서 M&B(Manufacturing & Business)의 단계로 접어들고 있다고 볼 수 있다.

CC 제조 공정은 완충층을 포함한 템플릿 제조기술과 초전도층 증착기술이 핵심기술이라고 할 수 있다. 2단계 CC 연구과제에서는 IBAD와 RABiTS[6-8] 2개의 템플릿 연구과제와 초전도층 증착기술인 PVD와 MOD기술에 대한 연구 과제를 수행하였으나, 본 고에서는 우수한 연구성과를 도출하여 3단계 사업에서도 계속사업으로 추진하고 있는 IBAD-PVD기술 과제의 연구 성과를 중심으로 기술하고자 한다.

### 2. IBAD 템플릿

2단계 사업에서 개발한 IBAD 템플릿 제조 공정은 기판인 하스텔로이 테이프를 연속으로 전해 연마하는 기술과 IBAD장치를 이용하여 2축 배향 구조의 산화물층을 증착하는 기술, 그리고 PLD장치로 cap layer를 증착하는 공정으로 이루어진다.

2단계 사업에서는 IBAD 장치의 single-turn reel-to-reel 시스템을 개량하여, 14-turn의 시스템을 구축하였고, 3 zone의 heating 영역과 2 zone의 예열구간을 확보하여 균일한 증착온도를 확보하고자 하였다. 장비의 개조를 통해 10 배 가까운 공정속도를 기대할 수 있었으며, 특히 가장 오랜 공정시간이 걸리는 homo-epi MgO의 증착에 걸리는 시간이 8배 이상 단축되는 효과를 가져왔다. 100 m 급 선재를 기준으로 각 층의 증착에 걸리는 공정시간을 single-turn과 multi-turn일 때 비교한 표 1에 나타내었다.

표 1. 100 m 급 선재 제조 시 single-turn과 multi-turn의 공정시간 비교

(e.g. 100m)

Each Step	Time (single turn)	Time (multi-turn)
Ion milling	14 hr	2 hr
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14 hr	1 hr 36 min
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4 hr 37 min	40 min
IBAD-MgO	2 hr 20 min	30 min
Epi-MgO	69 hr 26 min	8 hr 20 min
Total time	104 hr 23 min	13 hr 6 min

개조한 multi-turn IBAD 장비에서는 single-turn IBAD 장비에서의 공정조건이 틀려지게 된다. 이에 증착영역 곳곳에 QCM(Quartz Crystal Monitor)를 설치하여 각 증착영역에서의 증착속도와 식각속도를 측정하고, 이에 따른 공정조건을 변화시켜나가는 실험을 진행하였다. 선택된 양호한 조건에서 길이 310 m의 IBAD template을 제조하는데 성공하였고, 그림 1에 나타난 제조된 IBAD template의 2축 배향성 측정 결과 template의 in-plane 배향성이 5.8~6.5°로 아주 우수한 2축 배향성을 가짐을 확인하였다.

### 3. SmBCO증착

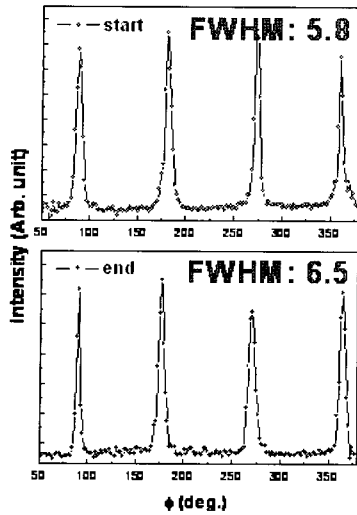


그림 1. 310m-IBAD MgO 기판의 in-plane texture 특성

이는 2단계 최종목표인 길이 300 m, in-plane 배향성  $\langle 7^\circ$ 의 목표를 달성하였고, 길이나 품질적인 측면에서 보았을 때, 세계적인 IBAD 기술에 뒤떨어지지 않는 것으로 볼 수 있다.

제조된 장선의 IBAD template 위에 reel-to-reel PLD 장비를 사용하여 완충층으로  $\text{LaMnO}_3$ 를 100m에 걸쳐서 증착한 후, 12 m 길이에 해당하는 영역을 선택해 2축 배향성을 측정한 결과를 그림 2에 나타내었다. 12 m 전 영역에 걸쳐 고른 in-plane 배향성을 가지고 있었으며, 평균값으로 보았을 때  $6.2^\circ$ 의 우수한 in-plane 배향성을 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

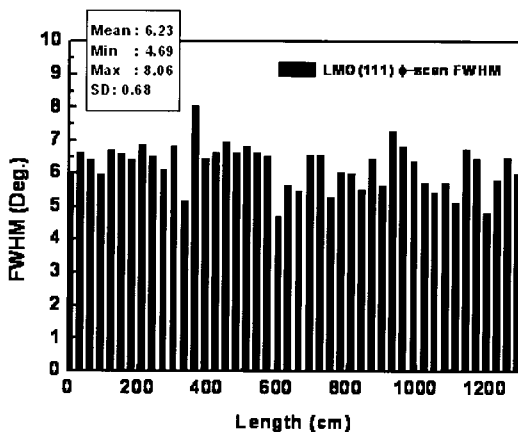


그림 2. 장선 IBAD템플릿에서 LMO층의 길이에 따른 in-plane texture 특성

IBAD템플릿위에 SmBCO초전도층을 장선으로 증착하기 위하여, KERI에서는 100m-CC제조용으로 그림 3과 같은 EDDC (evaporation using drum in dual chamber) 장치를 2단계 사업에서 에 제작하였다. 장비 구조는 초전도 구성물질의 증착과 반응을 위한 두 개의 챔버로 나누어져 있으며, 하부 증착 챔버의 하단에 설치한 도가니속의 전구체 금속소스를 전기적으로 가열하면 증발된 원자들이 드럼에 감은 템플릿 표면 붙고, 고온-산소 분위기속의 드럼이 회전하는 과정에서 증착과 반응이 반복적으로 일어난다.

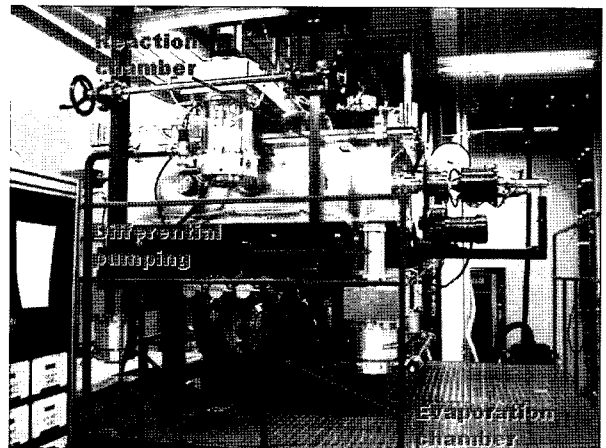


그림 3. 100m급 CC제조용 EDDC장치

EDDC장치의 금속 드럼에 IBAD-MgO 템플릿 테이프를 권선한 후, 다양한 산소분압과 증착온도 조건에서 증착 실험을 거듭하여 최적의 SmBCO형성 조건을 찾아냈으며, 높은 임계전류 성능의 SmBCO 초전도선재를 제조할 수 있는 공정을 개발하는데 성공하였다.

그림 4는 EDDC장치로 제조한 CC의  $I_c(A) \times L(m)$ 값을 제조기간별로 플롯트 한 것이다. 짧은 기간에 SmBCO-CC의 임계전류와 선재 길이가 점진적으로 크게 향상되고 있는 것을 보여주고 있다. 최근에 제조한, 100m급 SmBCO-CC에서 구간별  $I_c$ 를 측정한 결과, 대부분의 측정 구간에서 250 A를 넘는 높은  $I_c$  값들이 확인되었으며, 27m의 여러 구간에서  $I_c$ 를 측정한 결과에서는 최소  $I_c$ 값이 305A에 이르렀고, 1m구간에서는 500 A의 최고  $I_c$ 값이

확인되었다. 이로써, 우리나라도 세계에서 4 위권의 고온초전도선 제조기술을 확보하는 성과를 달성한 것이며, 향후 고온초전도선의 상용화 연구에서 특히, 제조비용면에서는 세계 최고수준의 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 본다.

그림 5는 EDDC 공정으로 제조한 SmBCO-CC의 자장특성을 SuperPower사에서 제조한 MOCVD - YBCO CC와 비교한 것이다. 우리가 제조한 SmBCO가 자장에 대한  $J_c$ 의 감소율이 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 이와 같이 SmBCO는 기존의 YBCO보다 자장특성이 우수하기 때문에 초전도기기의 응용에도 유리한 것으로 보인다.

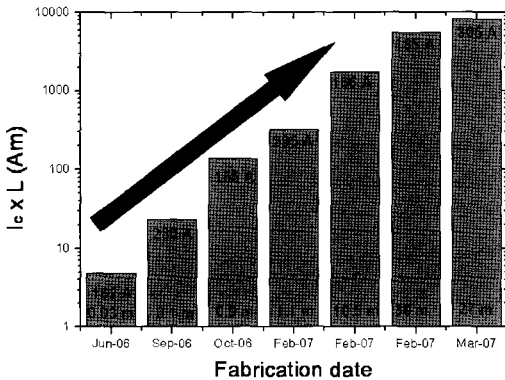


그림 4. EDDC로 제조한 CC의 연월별 I<sub>c</sub>xL 변화

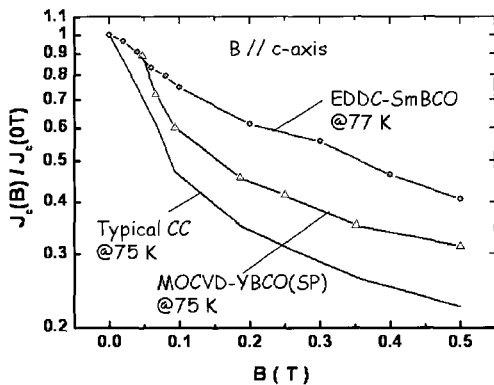


그림 5. EDDC로 제조한 SmBCO-CC의 자장특성

#### 4. 연구성과의 활용계획

2단계 사업에서는 주로 연구소와 대학을 중심으로 한 연구팀이 주축이 되어 연구를 수행하는 과정에서 어려움이 있었으나, 3단계 사업에서는 초전도박막 기술 분야에서

전문 중소기업으로 발돋움하고 있는 (주)서남이 참여기업으로 본 사업에 공동으로 참여하게 되었다.

3단계 사업에서는 지금까지의 개발된 연구 성과를 기업에 이전하고, 산·학·연 공동연구를 통하여 km급의 고성능 CC를 고속으로 생산할 수 있는 상용화급 제조 기술을 개발할 것이다.

지금까지 개발된 EDDC공정의 장점을 살리고 단점을 보완하는 방향으로 제조 길이의 제한이 없는 고속의 릴루릴 RCE (Reactive Co-Evaporation) 공정을 개발할 것이며 CC의 생산라인을 구축하여 전력케이블, 모터, 한류기, 변압기 등의 초전도기기 개발자들에게 우리가 만든 고성능의 CC를 저렴하게 공급할 계획을 세우고 있다. 또한 초고자장 NMR, MRI, 차세대 핵융합 장치 등의 다른 초전도자석 응용분야에도 우리가 개발한 고성능 CC가 적용될 수 있도록기업과 함께 노력할 것이다.

#### 5. 맺음말

우리나라는 CC분야에서 일본, 미국 등의 선진국 보다 거의 10년 늦게 연구를 시작하였지만, DAPAS사업에서의 지속적이고, 집중적인 투자의 도움으로 2단계에서도 많은 연구성과를 달성하면서, 선진국과의 기술격차를 크게 줄일 수 있었다. 특히, IBAD-MgO기술은 미국에 이어 두 번째로 고속의 템플릿 제조기술을 확보한 것으로, 세계 최고 수준의 성과를 달성한 것이며, EDDC 또한 우리나라의 원천 기술로 반응형 증발공정이기 때문에 제조 속도와 원가 면에서 경쟁력이 높은 세계적 수준의 기술이라고 자부할 수 있다. 2단계 사업을 통하여 IBAD-EDDC공정으로 만든 장선재 CC에서 높은 I<sub>c</sub> 성능이 검증되었기 때문에 앞으로 3단계에서의 CC 상용화 개발도 크게 탄력을 받을 것으로 본다.

비록, 우리의 현재 결과가 장선재CC의 I<sub>c</sub>성능 면에서 외국의 최고 기업들 보다는 다소 떨어지는 것으로 볼 수 있으나, YBCO가 아닌 특성이 더 우수한 SmBCO에서 얻은 결과이기 때문에 기술적 의의가 더 크다고 할 수 있다. 또한, IBAD-EDDC공정은 제조 속도와 비용 면에서 장점이 많기 때문에 앞으로 우리나라가 CC의 상용화 측면에서 외국보다 앞서갈 수 있는 가능성이 높다고 할 수 있다.

짧은 연구기간과 도전적인 연구목표 설정으로 마지막까지 2단계사업의 최종 목표 달성에 많은 어려움이 있었으나, 참여 연구원들이 포기하지 않고 서로 협력하면서 열정적으로 연구개발에 매진한 덕분에 좋은 성과를 이룬 것으로 생각한다. 사업단의 지속적인 관심과 지원, 그리고 연구원들의 그간의 노고에 진심으로 감사드린다.

### 참고문헌

[1] Y. Iijima, N. Tanabe, N. Kohno, Y. Ikano, Appl. Phys. Lett. Vol. 60(1992)769.  
[2] H. C. Freyhardt, J. Hoffmann, J. Weismann, J. Dizik, K. Heinemann, A. Issaev, A. Usoskn, F. Garcia-Moreno, Appl. Supercond., Vol. 4(1998)435.  
[3] S. R. Foltyn, P. N. Arendt, P. C. Dowden, R. F. Depaula, J. R. Groves, J. Y. Coulter, Q. X. Jia, M. P. Maley, D. E. Peterson, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 9 (1999)1519.  
[4] A. Goyal, D. P. Norton, D. P. Budai, Appl. Phys. Lett., Vol. 69(1996)1795.

[5] Y. Shiohara and Y. Aoki, Physica C, 426(2005)1.  
[6] T. J. Haugan, P. N. Barnes, T. A. Campbell, A. Goyal, A. Gapud, L. Heatherly and S. Kang, Physica C, 425(2005)21.  
[7] A. O. Ijaduola, J. R. Thompson, A. Goyal, C. L. H. Thieme and K. Marken, Physica C, 403(2004)163.  
[8] D. P. Norton, K. Kim, D. K. Christen, J. D. Budai, B. C. Sales, M. F. Chisholm, D. M. Kroeger, A. Goyal and C. Cantoni, Physica C, 372-376 (2002)818.

### 저자이력



오상수(吳詳秀)

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