

Thema

| PVD법에 의한 Coated Conductor 제조 기술

1. 서론

오 상수 책임연구원/그룹장
 (한국전기연구원 초전도재료연구그룹)
 고 락길 선임연구원
 (한국전기연구원)
 김 호섭 초빙선임연구원
 (한국전기연구원)

고온초전도응용기술의 실용화에 대한 기대가 높아지면서 고온초전도 (HTS) 선재에 대한 개발 연구가 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다. 고온초전도선재는 Ag 파이프 안에 전구체 분말을 채워서 가공하는 PIT 공정으로 만드는 1세대 HTS 선재와 우리가 흔히 Coated Conductor(CC) 라고 부르는 2세대 HTS 선재가 있다. 2세대 HTS 선재인 CC는 세계적으로 많은 연구기관과 회사들이 연구개발하고 있으며, 만드는 방법이 다양하고 1세대 HTS 선재보다 복잡한 다층 구조를 하고 있다. 후지쿠라전공의 Iijima 그룹은 91년에 IBAD(Ion Beam Assisted Deposition)법으로 금속 기판위에 YSZ층을 2축으로 결정 배향이 일어나도록 증착한 후에 YBCO 초전도층을 PLD(Pulsed Laser Deposition)법으로 증착[1]하여 CC선재를 등장시켰다. 이때 만들어진 CC선재의 임계전류밀도 J_c 값은 6.0×10^4 A/cm²(77K, 0T)였으나, 해가 거듭하면서 J_c 와 선재의 길이가 향상되어 이제는 초전도기기용 모델기에 적용할 수준의 200 m이상의 CC선재가 PVD(Physical Vapor Deposition)법에 의하여 만들어지고 있다. CC선재가 상용화되기 위해서는 임계전류 I_c 를 선재의 전체단면적으로 나눈 J_e 값이 커야하고, 한 번에 끊어지지 않고 만들 수 있는 제조 길이가 길어야 한다. 어떠한 초전도기기에 응용할 것인가에 따라 요구사항이 달라지지만 자장 중에서의 I_c 값이 높아야하며 교류기기에 응용하는 경우는 교류손실 값이 작아야 한다.

PVD법은 Sputtering, IBAD[2-6], PLD[7-10], Co-evaporation[11-13] 등의 물리기상적 방법으로 완충층과 초전도층을 증착하여 CC선재를 제조하는 것으로 제조공정은 크게 보면, 금속기판위에 산화물막을 2축 배향된 상태로 증착하는 템플릿 공정과 YBCO(ReBCO) 초전도층을 증착하는 공정으로 나눌 수 있다. 템플릿공정은 압연과 재결정 열처리기술을 이용하여 Ni합금을 2축으로 배향시킨 RABiTS(Rolling-Assisted Biaxially Textured Substrate) 기판 위에 산화물 완충층을 주로 PVD법으로 증착하는 방법과, 결정이 무질서하게 배열된 스테인레스강이나 하스텔로이합금 기판 위에 주로 IBAD나 ISD(Inclined Substrate Deposition, 기판경사

증착법)와 같은 PVD법으로 산화물막을 2축으로 배향시켜서 증착하는 방법이 있다. 초전도층과의 확산 방지나 Lattice Mismatch(격자불일치)를 해소하기 위하여, 여러 층의 완충층을 추가로 입힌 템플릿 위에 PVD법에서는 초전도층을 주로 PLD 나 Evaporation 등의 방법으로 증착하고 있다.

과기부 프론티어사업에서 저자들은 PVD법을 이용한 CC선재 개발 과제를 2001년부터 수행하고 있다. 본고에서는 외국의 PVD법에 의한 CC개발 최근 동향과 함께 주로 지금까지 한국전기연구원(KERI)을 중심으로 수행한 주요 연구결과들에 대하여 기술하고자 한다. 그중에서도 DC 스퍼터링에 의한 완충층 제조와 PLD법에 의한 YBCO CC제조 연구성과들을 기술하고, 앞으로 100 m급의 실용화 CC선재를 개발하기 위한 EDDC 공정에 대해서도 자세히 설명하고자 한다.

2. 외국의 연구동향

CC선재를 상용화하여 세계시장을 선점하기 위한 미국, 일본의 개발 경쟁이 치열하게 전개되고 있다. 미국에서는 AMSC社와 IGC-SuperPower社가 각각 RABiTS-MOD법과 IBAD-MOCVD법으로, 일본에서는 주로 후지쿠라전공과 스미토모전공이 각각 IBAD-PLD법과 RABiTS-PLD법으로, ISTECE에서는 후지쿠라전공과 같은 IBAD-PLD(혹은 MOD)법으로 CC선재를 연구개발하고 있다. AMSC社에서는 YBCO 초전도층을 MOD법으로 입히지만, 완충층은 스퍼터링 PVD법으로 증착하고 있고, IGC社 역시 MOCVD법으로 초전도층을 입히지만 IBAD법으로 증착한 YSZ, MgO 템플릿을 이용하고 있다.

그림1은 미국, 일본, 유럽의 대표적인 연구기관들의 CC선재 개발 결과를 선재 길이(L)와 임계전류(Ic) 특성 값으로 정리하여 프롯한 것이다. 제조 길이에서 100 m을 넘긴 기관은 미국의 IGC社와 일본의 ISTECE, 후지쿠라전공으로 모두 IBAD 템플릿 공정을 기반으로 하고 있다.

현재 성능 면에서만 보면 IBAD 템플릿 위에 PLD법으로 YBCO 초전도층을 입힌 CC선재에서 Ic특성

이 가장 높게 나타나고 있다. 최근 일본의 ISTECE 나 고야 CC개발센터(센터장: 야마다 박사)는 212 m 길이의 YBCO CC 선재에서 77 K온도에서의 Ic가 245 A라는 세계 최고기록을 달성하였다[14]. CC선재의 특성을 비교할 때 길이와 Ic를 곱한 값을 사용하는 경우가 많은데 $I_c \times L$ 값이 최초로 50,000 Am를 상회하였으며 기술적으로는 CC선재를 PVD법으로 장선화하는데 큰 문제가 없는 것으로 판단된다. ISTECE은 후지쿠라전공과 거의 같은 IBAD-PLD 방법으로 CC선재를 제조하는 연구를 수행하면서 세계 최고수준의 CC 선재를 개발하는데 성공한 것이다. ISTECE은 IBAD-GZO층 위에 PLD Self-epitaxy법으로 CeO_2 층을 입히는 독자적인 PVD 공정을 개발하여 2001년에 처음으로 CC선재를 만들었으나, 4년 만에 세계 최고 수준의 CC선재를 개발하는데 성공한 것이다. 성공의 원인은 후지쿠라전공의 원천기술의 기반에서 연구가 이루어진 점과 엄청난 규모의 연구비가 IBAD장치와 PLD장치에 집중적으로 투입된 것을 들 수 있겠다. ISTECE에서 개발한 CC선재는 1세대 고온초전도선과 비교하여 길이와 성능 면에서는 큰 차이가 없기 때문에 앞으로 CC선재를 이용한 고온초전도전력기가 일본과 미국을 중심으로 활발하게 개발될 것으로 보인다.

일본의 CC과제 총괄 책임자인 시오하라 박사는 CC선재 개발에서 기술적 장애요소의 하나였던 장선화는 이미 검증이 끝났기 때문에 앞으로는 보다 값싸게 CC선재를 만드는 저비용 공정개발에 주력할 것으로 말하고 있다. 저자도 이 의견에 적극 동의하고 있으며, PLD법으로 장선화의 기술적 검증은 성공적으로 달성하였지만 속도와 비용 면에서 불리한 PLD법으로 CC선재를 상용화하는 것은 어렵다고 본다.

IBAD-YSZ(혹은 MgO)템플릿 위에 MOCVD법으로 YBCO층을 입히는 IGC社나 IBAD-GZO 템플릿을 이용하여 PLD로 초전도층을 입히는 일본의 후지쿠라전공, ISTECE 두 기관은 모두 멀티턴 방식을 Reel-to-reel을 이용하여 증착시의 유효면적을 크게 함으로써 제조 속도를 높이는 방향으로 연구하고 있다. 독일의 EHTS社도 IBAD-YSZ 템플릿공정으로 CC선재를 제조하고 있기 때문에 그림1의 현재까지

의 연구결과를 종합해보면 RABiTS 공정보다는 IBAD 공정에서 높은 성능의 CC선재가 보고 되고 있다. 현재까지의 연구 추세를 보면 미국과 일본은 각각 2006년 100 m - I_c : 300 A, 2007년 500 m - I_c : 300 A 연구목표들을 무난히 달성할 것으로 보인다. AMSC社는 RABiTS-MOD공정에 집중하고 있는데 최근 80 m 정도의 길이에서 End-to-end I_c 값이 72 A인 CC선재를 개발하였다. 완충층 구조는 Y_2O_3 /YSZ/ CeO_2 로 증착속도가 빠른 Reactive 스퍼터링 공정을 이용하고 있다.

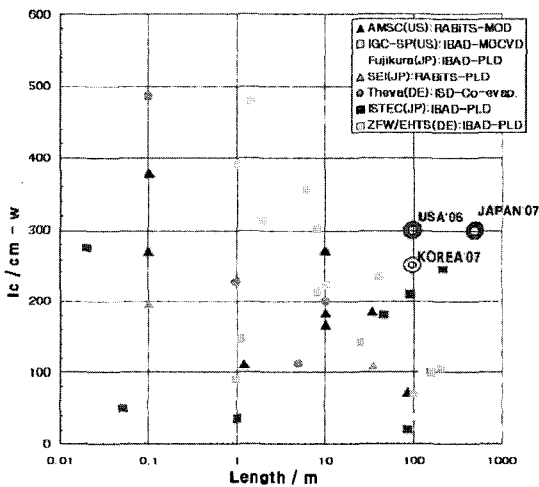


그림 1. 연구기관들의 CC선재 길이-임계전류 성능(그림 중에서 ◎는 국가별 CC선재 개발목표임).

3. CC선재의 구조

일반적으로 CC선재는 다단계의 공정으로 여러 산화물층을 Eepitaxial하게 쌓아 올리는 방법으로 제조한다. 그림2는 현재 대표적으로 사용 중인 RABiTS, IBAD 두가지 템플릿 구조의 단면도를 나타낸 것으로 RABiTS[15-17]의 경우, 개략적으로 보면 재결정 열처리를 통하여 집합조직이 형성된 Ni 합금 금속 기판이 있고, 그 위에 3 층의 산화물막이 완충층으로 입혀진다. 일반적으로 Ni-W 2축 배향기판 위에 Y_2O_3 /YSZ/ CeO_2 층을 단계적으로 증착하게

되는데 Ni기판의 Cube Texture(002)조직위로 초전도층까지 결정 배향이 잘 이어질 수 있도록 이 들 완충층 역시 Eepitaxial하게 증착해야 한다. Ni기판과 초전도층인 YBCO물질의 격자상수 차가 9.38 %로 크기 때문에 이러한 격자크기 불일치(Lattice Misfit)를 줄이기 위하여 주로 Y_2O_3 , YSZ, CeO_2 가 선택되어지며 CeO_2 층은 YBCO층과 Lattice Misfit가 0.52 %로 가장 작기 때문에 최상층에 입혀진다. 완충층 구조에서 또 하나의 중요한 요소는 Ni합금 기판으로부터 금속 원자의 확산을 방지하는 성질이 큰 산화물질을 선택하는 것으로 YSZ물질이 대표적으로 3층 구조에서 중간에 위치한다. CC 선재의 제조비용의 관점에서 보면 세층을 단일 층으로 하면 공정단계가 줄어들어서 제조 원가를 낮출 수 있다. 그리고 완충층 제조시, 산화물 타겟을 쓰는 rf Sputtering 증착공정보다 Reactive Sputtering법으로 가격이 싼 금속타겟을 사용하면 증착율도 높아지고 제조비용도 줄어드는 효과가 있다.

IBAD 공정의 경우는 결정배향이 무질서한 하스텔로나 스테인레스강 테이프를 사용하며, MgO나 GZO층을 IBAD 법으로 입히는 경우, 금속기판의

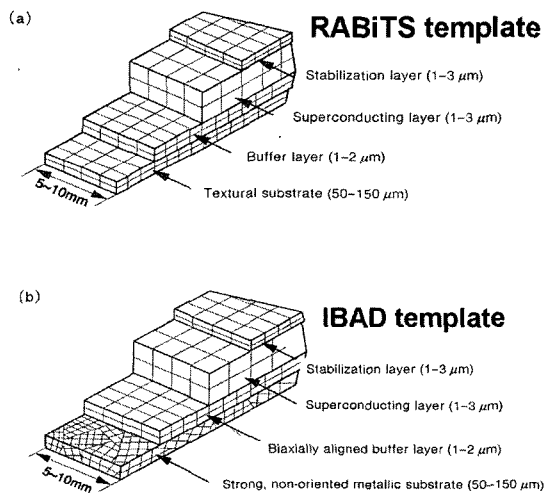


그림 2. CC선재의 기본적인 구조도 (a)RABiTS 템플릿, (b)IBAD 템플릿.

표면을 아주 매끄럽게 전해연마 등의 방법으로 가공해야 한다. 특히 IBAD-MgO 템플릿에서는 이러한 표면평활도가 MgO층의 Texture 특성에 큰 영향을 미친다. 따라서 IGC社에서는 하스텔로이 기판위에 Al₂O₃ 알루미나를 80 nm, Y₂O₃층을 7 nm정도로 아주 얇게 비정질상태로 입힌 후에 MgO를 IBAD법으로 10 nm정도로 증착하고 있다[18].

4. 스퍼터링법에 의한 완충층 제조

KERI에서는 주로 DC Reactive 스퍼터링법을 이용하여 Ni 기판 상에 CeO₂, Y₂O₃ 등의 완충층을 증착하고 있다. 그림3에는 KERI에서 보유한 스퍼터링 장치의 개념도를 나타냈으며, 기본적인 챔버 구성 요소는 챔버를 펌핑하기 위한 터보펌프 및 Diffusion 펌프가 장착되어 있고 챔버 내의 가스 종류 및 분압을 측정하기 위한 RGA(Residual Gas Analyzer)가 장착되어 있으며 금속타겟에서 금속원자를 튀어나오게 하기 위하여 DC 스퍼터링건이 장착되어 있다.

DC Reactive 스퍼터링 시스템으로 Y₂O₃, YSZ 박막을 증착할 때 다음과 같은 사항을 만족시켜야 한

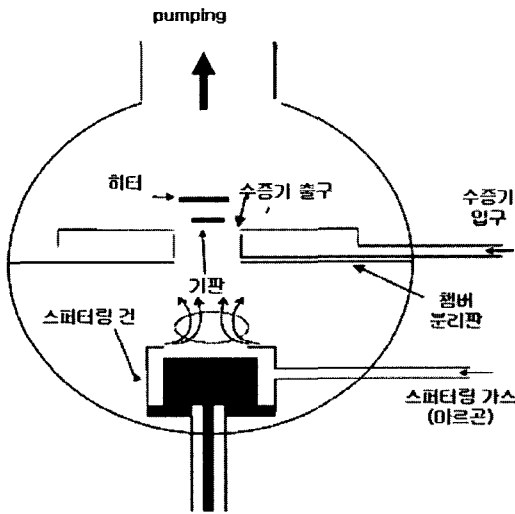


그림 3. Y₂O₃/YSZ 박막을 증착하기 위한 DC reactive sputtering system의 개략도.

다. 첫째, 타겟의 산화를 방지하는 동시에 증착된 타겟 물질은 충분히 산화시켜야 한다(일반적으로 타겟 표면이 산화되면 전하가 타겟 표면에 축적되어 아르곤이온의 가속전압이 낮아져서 증착률이 급감하기 때문이다)[19]. 둘째, 금속상태로 기판 상에 증착되므로 세라믹상을 형성하기 위하여 기판 주위에는 산화분위기가 형성되어야 한다. 이를 만족시키기 위하여 KERI에서는 그림3과 같은 특수한 챔버를 제작한 것이다. 챔버는 타겟 물질이 스퍼터링되는 영역과 증착된 물질이 산화되는 영역으로 이분화 되어 있다. 수증기는 산화영역에서 흘러나오고 아르곤 가스는 스퍼터링 영역에서 흘러나온다. 두 영역을 분리하는 분리판이 챔버의 중간에 존재하고 분리판 중앙에 타겟의 원자가 통과하여 증착될 수 있도록 직사각형 형태의 구멍이 존재한다.

그림4는 증착률과 반응가스 분압과의 관계를 보여주는 그래프이다. 사각형 라인에서 수증기 분압을 증가시키에 따라 증착률의 변화가 없다가 P_c 분압 이상에서 증착률이 급감한다. 급감하는 이유는 과도한 수증기 분압으로 인하여 금속타겟의 표면산화가

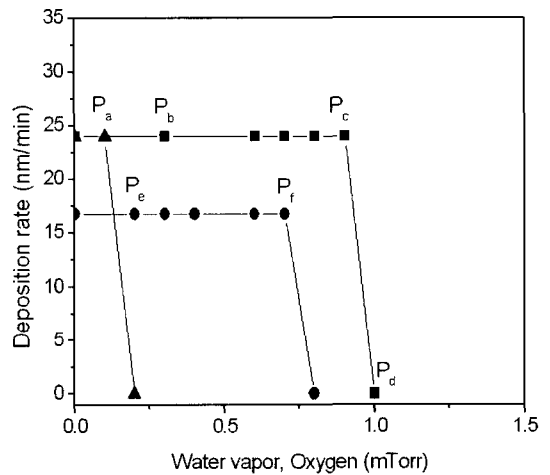


그림 4. 증착률과 반응가스 분압과의 관계 (1) 사각형 라인; DC 스퍼터링 power: 209W, 반응가스: 수증기, (2) 삼각형 라인; DC 스퍼터링 power: 209W, 반응가스: 산소, (3) 원형 라인; DC 스퍼터링 power: 129W, 반응가스: 수증기

진행되기 때문이다. 수증기 분압 P_b 이하의 범위에서는 금속기판에 증착된 타겟원자들이 충분히 산화 반응하지 못하여 국소적으로 Metallic Phase가 형성되고 그림5에서 볼 수 있듯이 $Y_2O_3(001)$ 외에 (111) 결정성장이 된다. 따라서 수증기 분압의 범위의 하한은 P_b 이며 상한은 P_c 가 된다. 삼각형 라인은 반응가스로서 산소를 사용할 때 증착률과 반응가스 분압과의 관계를 보여준다. 수증기와는 달리 낮은 산소분압(P_a)에서 증착률이 급감하기 시작한다. 따라서 산소를 사용하면 완전 산화된 세라믹상을 얻기가 힘들다. 원형 라인은 DC Sputtering의 Power를 129 W로 낮춰 증착했을 때의 그래프이다. 수증기분압의 범위는 $P_e \sim P_f$ 로서 209 W에 비하여 조금 감소했다.

DC Reactive 스퍼터링법을 이용하여 Ni - 3 %W 기판 상에 Y_2O_3 단일완충층을 증착하고, 그 위에 YBCO 초전도층을 PLD로 입혀서 CC선재를 제조하였다. 그림6은 단일완충층위에 입힌 YBCO-CC선재의 임계온도 및 임계전류를 보여주는 그래프이다. 증착된 YBCO 박막의 T_c ($I_c(77\text{ K, Self Field})$, $J_c(77\text{ K, Self Field})$) 는 각각 89 K, 64 A/cm, 1.1 MA/cm²이었다.

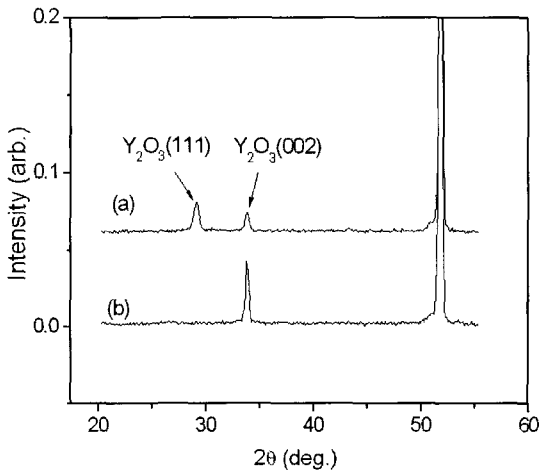


그림 5. XRD θ - 2θ -scan of Y_2O_3/NiW (T_s : 800°C, D.R.= 24 nm/min, (a) $P(H_2O)$: 0.2 mTorr, (b) $P(H_2O)$: 0.4 mTorr.

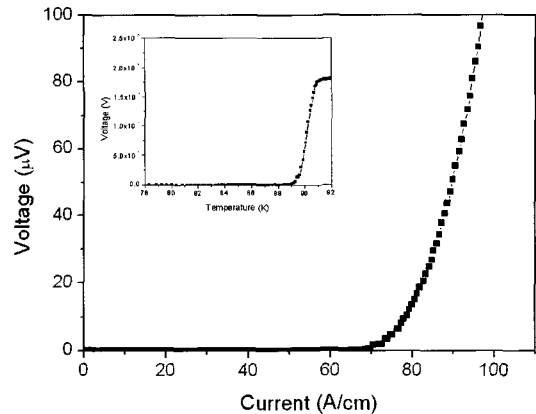


그림 6. YBCO(600nm)/ Y_2O_3 (300nm)/NiW의 (시편 크기: 20mm x 5mm) 초전도 특성(삽입도: 온도 전압 관계 그래프).

5. PLD법에 의한 YBCO-CC제조

KERI에서는 CC선재를 제조할 때, 초전도층을 입히는 공정으로서 지금까지 주로 PLD법을 이용하고 있다. PLD란 엑시머 펄스 레이저빔을 초전도 산화물 YBCO 타겟에 조사시키면 원자들이 플라즈마 플룸 형태로 기판 쪽으로 이동하여 응축이 일어나면서 성장하는 방법으로 1987년 Dijkkamp 등이 고온초전도체막을 In-situ Epitaxial 성장시키는데 성공[7]한 이후에 많은 연구그룹들이 사용하고 있다. PLD법에서는 입사되는 빔의 에너지 밀도, 펄스횟수, 타겟의 성질, 기판온도, 분압조건 등에 의하여 증착된 초전도막의 성질이 결정된다.

KERI는 DC Reactive 스퍼터링과 PLD법으로 증착하여 만든, NiW/ Y_2O_3 /YSZ/CeO₂ 구조의 RABiTS 템플릿 테이프를 Reel-to-reel 방식으로 이송시키면서, 그 위에 YBCO 초전도층은 PLD법을 이용하여 증착하는 RABiTS-PLD 공정으로 CC선재를 제조하고 있다. 지금까지, 100 A 이상의 높은 임계전류를 갖는 m급 길이의 CC선재를 여러 번 제조하여 그 공정 기술의 재현성까지 확인하였으며, 10 m급 장선재를 그 동안 축적된 연속 공정을 통한 다층산화물 박막 제조 기술과 구축된 장비의 운용 기술

을 바탕으로 제조할 수 있었다. 10 m CC선재의 End-to-end I_c 값은 액체질소온도에서 54 A의 성능을 갖는 것으로 확인되었다.

가장 최근에는 RABITS-PLD 증착 공정을 통해 세계적 수준의 200 A급의 CC선재를 연속 공정으로 제조하였다. 제조된 선재의 특성데이터는 그림7에 나타냈듯이 폭 1 cm, 길이 1.35 m에서 End-to-end I_c 가 200 A/cm_width이고, 13.5 cm 간격으로 길이 방향 I_c 분포 측정을 통해 최대 203 A/cm_width와 최소 196.1 A/cm_width I_c 로 매우 균일하게 제조되었음을 확인할 수 있었다. 임계온도, T_c 는 87.5 K이다. 본 성과는 기존 1 m - 100 A/cm_width 급 CC 선재의 I_c 를 두 배 끌어올린 것으로 이를 위해 저자들은 완충층 기판의 성능 향상, YBCO 타겟 성능 평가, 증착 영역의 확장 및 히터 개선 등의 연구를 수행했으며, 이는 그 동안 다층 산화물 박막 제조 기술과 Reel-to-reel 연속 공정 장비 운용 기술의 축적이 있어 가능했다.

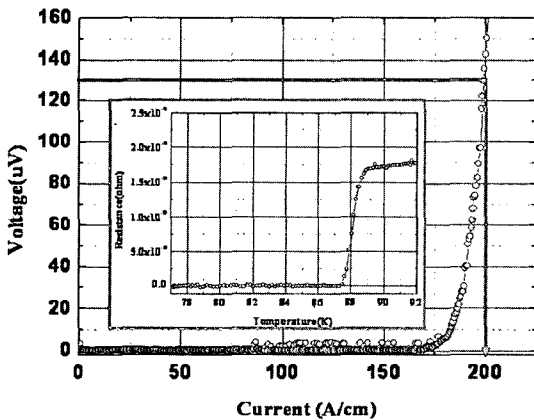


그림 7. KERI에서 RABITS-PLD법으로 제조한 1.35m 길이의 YBCO-CC선재의 end-to-end 임계 전류 및 임계온도 측정 결과

6. EDDC법에 의한 CC 장선재 제조

KERI에서는 PLD시스템의 레이저 성능의 한계 때문에 10 m이상으로 긴 CC선재를 제조하는 것이

어렵다. 또한 PLD공정의 높은 제조단가는 상용화의 걸림돌이 되고 있다. PLD가 아닌, Evaporation법으로 100 m급 CC선재를 제조하기 위하여 KERI에서는 그림8과 같은EDDC(Evaporation Using Drum In Dual Chamber) 장비를 최근에 제작하였다. EDDC 공정은 KAIST에서 최초로 개발되었으며, 10 m길이의 CC선재를 제조하여 4.7 m에서 97 A의 높은 I_c 특성이 검증된 바 있다. KERI에서는 KAIST와 공동으로 주로 Y계 아닌 SmBCO-CC선재를 100 m길이의 Batch Type방식으로 제조할 수 있는 EDDC 장비를 제작하였다. 장비 구조는 초전도 구성물질의 증착과 반응을 위한 두 개의 챔버로 나누어져 있으며 드럼의 회전에 의하여 증착과 반응이 반복적으로 일어난다. 테이프형 기판을 감을 수 있는 드럼이 두 영역에 걸쳐 위치하고 있으며 드럼에 감을 수 있는 테이프의 길이는 폭이 1 cm일 경우 75 m이며, 폭이 4 mm일 경우 150 m이다. 제조 속도가 빠르며 제반 공정을 In-situ화 할 수 있다는 장점을 지닌다.

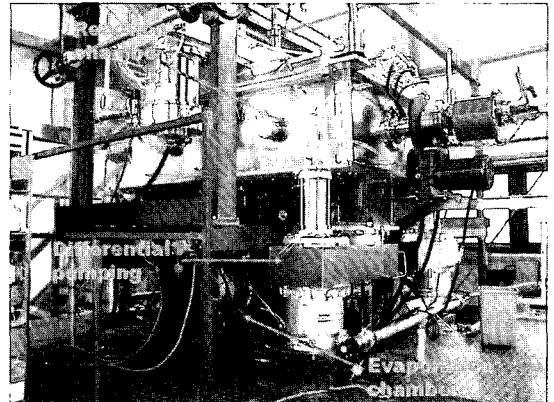


그림 8. KERI에서 KAIST와 공동으로 제작한 EDDC장치.

EDDC 챔버는 두개의 챔버로 구성되어 있으며, 상부에 반응챔버가 있고 하부에 증착챔버가 있다. 두 챔버 사이에 Differential Pumping을 위한 공간이 존재하는데 반응챔버에서 흘러나온 산소가스가 증착챔버로 흘러들어가지 않도록 중간에서 펌핑하여 외부로 방출하는 기능을 한다. 이런 기능으로 인하여 반응챔버의 산소분압이 5 mTorr 일때 증착챔버의 산소분압은 1×10^{-5} Torr 이하가 된다. 드럼은 반

응챔버와 증착챔버에 걸쳐 위치하고 있다. 증착챔버에 노출된 드럼에 초전도 구성 원소들이 증착되면 드럼의 회전에 의하여 반응 챔버로 들어가서 산소와 반응하여 초전도상을 형성하게 된다. 이와 같은 증착과 반응이 드럼의 회전에 의하여 반복하여 발생한다.

반응챔버에는 3개 영역의 히터가 존재한다. 드럼 내부, 드럼 외부의 상부와 하부에 할로겐램프로 구성된 히터가 위치하고 있고 독립적으로 가열한다. 드럼은 초당 2회전의 속도로 회전할 수 있으며 드럼 표면에 축 방향으로 5개의 온도 센서가 위치하고 있고 중앙의 온도 센서로 드럼 표면의 온도를 제어한다. 상부덮개 양 옆에 2000 liter/sec의 배기능력을 가진 터보펌프가 2개가 연결되어 있다.

증착챔버의 하단 원판에 1개의 가열 증발기와 4개의 고주파 유도가열기가 장착되어 있다. 가열 증발기는 중앙에 위치하고 있고 Ba의 증발에 사용된다. 양 옆에 2개의 고주파 유도가열기에서 Sm 및 Cu가 증발된다. 그리고 완충층 증발에 사용될 고주파 유도가열기가 양 끝에 위치하고 있다. 증착용 가열기는 드럼 축과 수직으로 배치된다. 이는 축 방향으로 조성비를 균일하게 하기 위함이다. 조성비를 제어할 목적으로 6채널 QCM Sensor가 4개 달려 있고 3개의 QCM 제어가 장착되어 있어 3개 Boat의 증착률을 동시에 제어할 수 있다. 그리고 1개의 Cryo Pump가 장착되어 있다.

반응챔버와 증착챔버 사이에 위치한 Differential 챔버에는 1000 liter/sec의 용량을 가진 4개의 터보펌프가 장착되어 있다.

EDDC 증착법의 장점은 첫째, RABiTS공정을 적용할 경우, 기판테이프의 재결정 열처리부터 보호층의 증착까지 all In-situ 공정이 가능하다는 것이다. 지금까지 RABiTS 공정을 이용한 CC선재의 제조공정은 금속기판 재결정화 열처리, 환원열처리, 완충층 증착, 초전도층 증착, 보호층 증착, Lamination으로 각각 독립적으로 행해져왔고 각 공정에 필요한 시간과 제조비도 상당하였다. 그러나 EDDC는 6개의 공정 중 Lamination을 제외한 5개 공정의 In-situ화를 가능케 한다. IBAD 기판을 사용하는 경우에도, all In-situ화도 가능하기 때문에 EDDC공정을 이용

하면, 제조 공정 단계수와 장비의 숫자를 크게 줄일 수 있다는 상당한 장점을 지니고 있다고 말할 수 있다.

둘째, 초전도층의 증착 속도가 상당히 빠르다. EDDC에서 드럼에 감을 수 있는 길이는 드럼의 크기에 비례하지만 총 제조시간은 길이에 관계없이 거의 일정하다. 따라서 드럼이 크면 클수록 제조 속도는 높아진다. 예를 들어 1km 초전도CC선재를 제조하려면 직경 1.5 m, 길이 1.5 m 정도의 드럼이 필요하다. 소요시간은 11시간 (금속기판 재결정화 열처리 : 1시간, 초전도층 : 3시간, 완충층 : 2시간, 산소후 열처리 : 4시간, Cu 보호층 : 1시간) 정도이다. 그러나 초전도테이프의 제조 길이에 상응한 챔버가 필요하며 이로 인하여 챔버 제작비가 크다는 단점이 발생한다. 따라서 연속적인 장선의 테이프를 제작하기 위해서는 Reel-to-reel 방식과 드럼 방식을 접목한 가일층 진보된 챔버 구조 연구가 이루어져야한다.

셋째, 초전도 특성의 균일성 측면에서 유리하다. EDDC는 동시에 전 길이에 걸쳐 증착되므로 축 방향으로 온도 및 산소분압의 균일성만 확보되면 균일한 초전도 특성을 보이는 CC선재를 제조할 수 있다. 단 축 방향으로 증착률 차이로 인하여 두께가 다를 수 있는데 이 문제점은 기술적으로 해결이 가능하다. 넷째, 금속성 재료 및 진공을 사용하므로 재료비가 적게 든다.

생산 공정의 고속화와 저비용화는 초전도CC선재의 산업화에 있어서 중요한 과제이다. EDDC는 다른 PVD공정들과 비교하여 이러한 문제를 해결할 수 있는 가장 경쟁력이 있는 수단으로 저자들은 생각하고 있다. EDDC 챔버의 계속된 보완과 핵심기술의 노하우 축적에 지속적인 연구노력이 이루어지면 세계 최고수준의 경쟁력을 갖는 CC선재 제조공정이 국내에서 확보될 것이다.

7. 결론

일본과 미국의 연구 동향에서 언급하였듯이, PLD법을 이용한 PVD공정에서는 200 m이상으로 제조된 CC선재가 최근 보고 되고 있기 때문에, 기술적인

면에서 길이 문제는 어느 정도 해결되고 있다고 볼 수 있다. 그러나 앞으로 초전도기기를 상용화하는 관점에서 보면 가격 구성에서 냉각시스템과 함께 큰 비중을 차지하는 고온초전도선재의 높은 가격은 상용화의 큰 걸림돌이 되고 있다. 따라서 앞으로 복잡한 공정단계를 줄이는 노력과 각 단계에서의 제조비용을 줄이는 방법이 집중적으로 개발되어져야 할 것이다. 고진공이 필요한 PVD법은 MOD보다 제조비용 면에서 불리한 것으로 알려져 있다. 그러나 Batch Typ 등의 방법으로 제조 속도를 높일 수 있는 방향으로 공정 개발이 이루어진다면 경쟁력은 충분히 있을 것으로 보인다.

KERI에서 앞으로 집중적으로 개발하고자 하는 CC선재의 장선화 방법은 Bacth Type EDDC 공정으로 Sm, Ba, Cu 원자를 Co-evaporation법으로 회전하는 드럼 상에 감긴 기판위에 증착하기 때문에 제조속도가 Reel-to-reel 방법보다 훨씬 빠르다. 1 km 선재 기준으로 약 90 m/h의 빠른 제조 속도는 제조비용 면에서 크게 경쟁력이 있다고 할 수 있다. 또한 EDDC 공정은 값싼 금속 타겟을 가열하여 증착된 Sm-Ba-Cu 물질과 반응챔버 내에서 산소와 고온에서 반응시켜서 Sm-123 초전도상을 생성시키는 방법으로 만들기 때문에 재료비가 적게 든다. 저자의 원가 계산에 의하면 압연만 된 Ni합금 기판을 이용하여 앞에서 언급한 all In-situ법으로, 연 생산량 6,000 km, Ic 600 A/cm_width 조건에서 약 9\$/kAm의 가격이 도출되었다. 이 가격은 제조원가의 20% 영업 이익을 포함한 것으로 다른 나라에서 개발되고 있는 어떤 CC제조 공정보다도 높은 가격 경쟁력을 보이는 것으로 판단하고 있다.

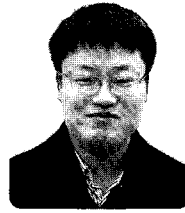
미국, 일본은 이미 200 m급의 CC선재를 개발하여 최근에 앞 다투어 발표를 하고 있다. 우리나라는 외국보다 늦게 2세대 CC 선재연구를 시작하였고, 아직 10 m 이상으로 CC선재를 만든 경험도 없다. 그러나 우리나라뿐만 아니고, 외국에서도 초전도기기 개발자를 만족시킬 수 있는 가격 수준으로 CC선재를 아직 개발하는데 성공하지 못하였다. 성능과 가격을 만족시키면서 외국과 차별화된 혁신적인 CC 제조 공정을 프론티어 사업에서 집중하여 개발한다면 몇 년 후에는 상용화 성과 면에서 얼마든지 미국,

일본 보다 앞서 나갈 수 있다고 생각한다.

참고 문헌

- [1] Y. Iijima, N. Tanabe, Y. Ikeno and O. Kohno, *Physica C*, Vol. 185-189, p. 1959, 1991.
- [2] Y. Iijima, N. Tanabe, N. Kohno, Y. Ikeno, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 60, p. 769, 1992.
- [3] Y. Iijima, Y. Onabe, K. Futaki, N. Tanabe, N. Sadakata, N. Kohno, Y. Ikeno, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 3, p. 1510, 1993.
- [4] Y. Iijima, Y. Onabe, K. Futaki, N. Tanabe, N. Sadakata, N. Kohno, Y. Ikeno, *J. Appl. Phys.*, Vol. 74, p. 1905, 1993.
- [5] H. C. Freyhardt, J. Hoffmann, J. Weismann, J. Dizik, K. Heinemann, A. Issaev, A. Usoskn, F. Garcia-Moreno, *Appl. Supercond.*, Vol. 4, p. 435, 1998.
- [6] 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, p. 1519, 1999.
- [7] D. Dijkkamp, T. Venkatesan, X. D. Wu, S.A. Shaheen, N. Jisrawi, Y. H. Min-Lee, W. L. McLean, M. Croft, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 51, p. 619, 1987.
- [8] V. Boffa, T. Petrisor, L. Ciontea, U. Gambardella, S. Barbanera, *Physica C*, Vol. 276, p. 218, 1997.
- [9] S.R. Foltyn, Q.X. Jia, P.N. Arendt, L. Kinder, Y. Fan, J.F. Smith, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 75, p. 3691, 1999.
- [10] C. Park, D.P. Norton, D.K. Christen, D.T. Verebelyi, R. Feenstra, J.D. Budai, A. Goyal, D.F. Lee, E.D. Specht, D.M. Kroeger, M. Paranthaman, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 9, p. 2276, 1999.
- [11] F. Baudenbacher, H. Karl, P. Berberich, H. Kinder, *J. Less Common Met.*, Vol. 164, p. 269, 1990.
- [12] P. Berberich, J. ate, W. Dietsche, H. Kinder, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 53, p. 925, 1989.
- [13] P. Berberich, B. Utz, W. Prusseit, H. Kinder, *Physica C*, Vol. 219, p. 497, 1994.
- [14] Y. Yamada, A. Ibi, K. Takahashi, H. Kobayashi, M. Konishi, H. Fukushima, T. Muroga, S. Miyata, R. Kuriki, S. Ishida, Y. SHiohara, T. Karoh, T. Hirayamal, *Abstracts of 18th ISS*, October 24-26,

2005.
 [15] A. Goyal, D.P. Norton, D.P. Budai, Appl. Phys. Lett., Vol. 69, p. 1795, 1996.
 [16] A. Goyal et al., US Patent 5,964,966, Oct. 12, 1999.
 [17] A. Goyal et al., J. Mater. Res., Vol. 12, p. 2924, 1997.
 [18] IGC-SuperPower, DOE Peer review, 2005.
 [19] N. Martin, C. Rousselot, Surface and Coatings Technology, Vol. 110, p. 158, 1998.

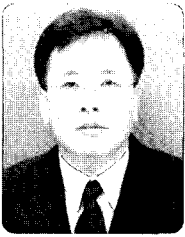


성명 : 김 호섭

- ◆ 학 력
- 1995년 연세대 물리학과 이학사
 - 1998년 한국과학기술원 물리학과 이학석사
 - 2003년 한국과학기술원 물리학과 이학박사

- ◆ 경 력
- 2003년 - 현 재 한국전기연구원 초빙선임연구원

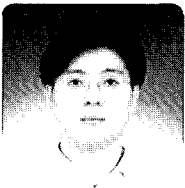
저|자|약|력



성명 : 오 상수

- ◆ 학 력
- 1982년 경북대 금속공학과 공학사
 - 1989년 일본 Kyoto대학 재료공학과 공학석사
 - 1992년 일본 Kyoto대학 재료공학과 공학박사

- ◆ 경 력
- 1992년 - 현 재 한국전기연구원 책임연구원, 초전도재료연구그룹 그룹장



성명 : 고 락길

- ◆ 학 력
- 1995년 배재대 물리학과 이학사
 - 1997년 배재대 대학원 물리학과 이학석사
 - 현 재 부산대 대학원 물리학과 박사과정

- ◆ 경 력
- 1997년 - 현 재 한국전기연구원 선임연구원

