

## 미국의 coated conductor 개발 동향

박 찬  
서울대학교 재료공학부

### 1. 서 론

유연성 있는 얇은 금속 테입위에 증착된 다층의 산화물 박막으로 이루어진 coated conductor (CC)는 액체질소온도에서 작동하는 고온초전도 전력기기가 요구하는 초전도 성능을 가지는 유일한 초전도 선재라고 할 수 있다. 경제적으로 장선의 CC를 대량으로 제조할 수 있는 공정의 개발은 고온초전도 전력기기의 상용화를 위하여 필요한 여러 요소 중 가장 중요한 부분이다. CC 제조 공정 개발을 위하여 선진국을 중심으로 여러 나라에서 경쟁적으로 연구개발이 이루어지고 있다. CC의 상용화를 위한 노력은 국제적으로 이루어지고 있으며, 그 주요한 한 부분이 매년 미국, 유럽, 동아시아를 순회하면서 개최되는 International Workshop on Coated Conductors for Applications (CCA2007) 이다. 이 CCA workshop이 2007년 11월 제주도에서 개최되었다. 이 workshop에서 발표되었던, 미국에서 진행되고 있는 CC 연구 결과와 향후 계획을 간략하게 정리하고자 한다.

### 2. 미국의 CC 연구 동향

미국에서 CC관련 연구개발을 수행하고 있는 기관을 표 1에 정리하였다. 가장 상용화에 가까이 가고 있다고 인정받고 있는 AMSC 와 SuperPower, 그리고 이 두 회사와 긴밀하게 협력하고 있는 Oak Ridge국립연구소 (ORNL)와 Los Alamos국립연구소 (LANL)에서의 CC개발 동향을 정리한다.

#### 2.1 SuperPower

미국 SuperPower (SP)는 IBAD-MgO texture template을 사용하며, MOCVD 공정으로 초전도층을 증착하여 CC를 제조하고 있다 (그림 1). 2006년에  $I_c \sim 300A/cm$  성능을

가지는, 100meter 이상 길이의 CC를 시간당 15meter의 초전도층 증착속도로 제조한 바 있고, 2007년 1월에 595meter, 173A/cm CC 결과를 발표하여 세계최초로 <임계전류 X 길이> 값이 100,000Am를 초과하는 CC를 제조하여 경쟁기관들을 놀라게 한 바 있다. 2007년 9월 일본의 ISS 학회에서는 <임계전류 X 길이> 값이 150,000Am가 넘는 790meter, 190A/cm CC 결과를 발표하였다(그림 2).

표 1. 미국에서 CC 관련 연구를 수행하고 있는 기관들

기업	AMSC
	SuperPower
	Metal Oxide Technologies
	SC Power Systems
연구소	Oak Ridge National Lab
	Los Alamos National Lab
	Sandia National Lab
	Argonne National Lab
	Brookhaven National Lab
	Nationa Renewable Energy Lab
	NIST-Boulder
	NIST-Gaithersburg
대학	Florida STate Univ
	Univ of Houston
	Kansas State Univ

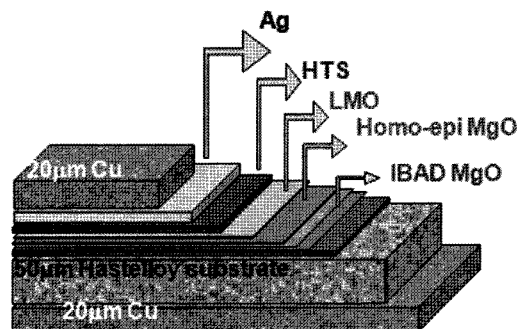


그림 1. SuperPower에서 제조하고 있는 CC의 구조

SP는 최종 제품인 CC의 성능에 영향을 줄 수 있는, 각 공정 단계에서 발생할 수 있는 문제를, 다음 공정으로 넘어가기 전에 해결하여 결함이 없는 상태에서 다음 공정이 수행되도록 하는 시스템을 구축하여, 길이 방향으로의 초전도 성능 균일성이 아주 우수한 CC를 제조하고 있다.

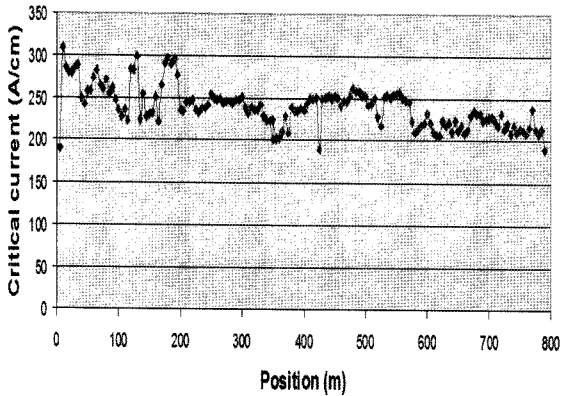


그림 2. 2007년 9월 ISS 학회에서 SuperPower가 발표한 <임계전류 X 길이> 값이 150,000Am를 초과하는 790meter, 190A/cm CC 결과

2007년 하반기 부터는 1400meter 길이의 금속 모재를 공급받아, IBAD-MgO template 증착을 수행하고 있다. 집합조직의 정도가 아주 균일한 IBAD-MgO template을 1400meter 길이로 제조하고 있으며 (그림 3), 조만간 1km 이상 길이의 CC 결과가 발표되리라고 예상하고 있다.

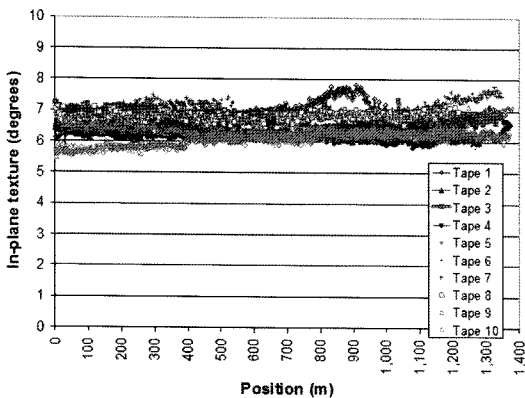


그림 3. 1400meter 길이의 IBAD-MgO texture template 결과 (SuperPower)

2006년에 비하여, 2007년에 임계전류값은 30%, <임계전류 X 길이> 값은 84%, 완충층 테입 길이는 150%, CC길이는 85% 증가하는 등 빠른 속도로 공정이 개선되고 있으며, 미국 국방부에서 지원하는 Title III 사업의 목표인 “500A/cm(77K, sf) - 1000 meter 길이 - 연간생산능력 200,000kA-m 이상”을 사업 종료 시한인 2008년 6월 이전에 충분히 달성하리라고 예상된다.

## 2.2 AMSC

AMSC는 RABiTS template을 사용하며, MOD 공정으로 초전도층을 증착하여 CC를 제조하고 있다 (그림 4).

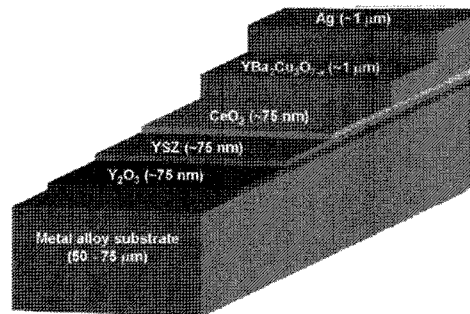


그림 4. AMSC에서 제조하고 있는 CC의 구조

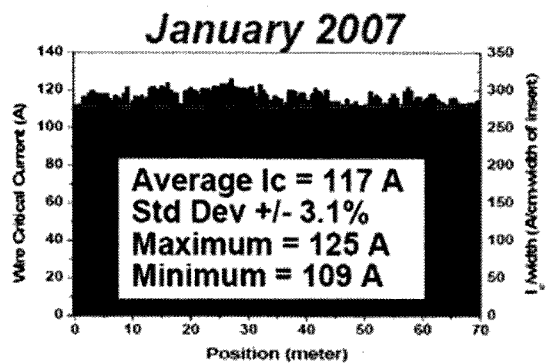


그림 5. AMSC에서 2007년에 발표한 CC 결과

90meter 길이에서 350A/cm 이상의 성능을 가지는 CC를 제조하고 있으며, 2006년에 비하여 2007년의 결과가 개선되었지만 (그림 5), 2007년 1월 이후에 길이와 성능이 획기적으로 개선된 CC결과는 발표되지 않고 있다. 2007년 말까지는 장비 구축과 공정 조

건 연구를 수행하고 그 이후에 200meter 이상 길이의 CC를 제조한다는 계획을 가지고 있다. 장선 제조 장비가 구축되고 장비가 안정화되면 본격적인 장선 제조가 시작될 수 있는 준비를 다 갖추고 있으며, 2008년 초에 장선 결과가 발표될 것이라고 예상하고 있다.

### 2.3 ORNL과 LANL.

ORNL 과 LANL은 두 기관 모두 SP와 AMSC 두 회사와 공동 연구를 진행하고 있다. 수년 전에는 SP-LANL, AMSC-ORNL로 팀이 나누어져 있었던 것과 비교하면 큰 변화가 있었다. 특히 ORNL과 SP의 협력이 점점 더 탄력을 받고 있다. 2008년 1월 9일 ORNL에서 배포한 news release 는 SP가 ORNL이 개발한 CC관련 기술을 사용할 수 있는 license agreement를 맺었다는 것을 보도하고 있다. ([http://www.ornl.gov/info/press\\_releases/get\\_press\\_release.cfm?ReleaseNumber=mr20080109-00](http://www.ornl.gov/info/press_releases/get_press_release.cfm?ReleaseNumber=mr20080109-00))

두 국립연구소가 CC공정과 특성 개선 기술 연구를 수행하고 있다. flux pinning 특성, 교류손실, 특성분석 기술 등의 부분에서 기업체 파트너와 협력하고 있다. 여기서는 CC의 구조(주로 완충층 구조) 개선과 완충층 증착 공정 단순화를 통하여 CC전체 공정을 개선하는 연구결과를 살펴본다.

IBAD-MgO template을 이용하여 제조하는 CC는 박막층의 수가 많고 구조(그림 1)가 복잡하다는 단점이 있다. 이를 개선하기 위하여, ORNL과 LANL에서는 각각 LaMnO<sub>3</sub> 박막과 Samarium Zirconate (SmZrO<sub>3</sub>) 박막을 epi-MgO층 없이 IBAD-MgO층 위에 직접 증착하는 공정을 개발하여, 완충층의 구조를 단순화하였으며, 이를 통하여 제조경비를 절감할 수 있는 가능성을 보여주었다. LANL에서는 IBAD-MgO 완충층 구조에서 필요한 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>층과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>층을 한 개의 Al-Y-O 층으로 대체하는 기술을 개발하여 IBAD-MgO template 제조 공정을 더욱더 간단하게 만드는데 성공하였다.

RABiTS 공정에서는 3층으로 이루어진 완

충층(그림 4)을 물리적 증착법인 sputtering을 주로 이용하여 제조하고 있다. ORNL에서는 3층의 완충층을 화학적 방법인 MOD공정으로 증착하는 기술을 개발하고 있으며, YSZ층을 MOD-La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>층으로 대체하는 공정을 개발 중이다. ORNL에서는 3층의 완충층 가운데 seed layer 역할을 하는 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>층을 없앤 구조와 CeO<sub>2</sub> cap layer 까지 없앤 단일 완충층 구조 CC공정도 개발 중이다 (그림 6).

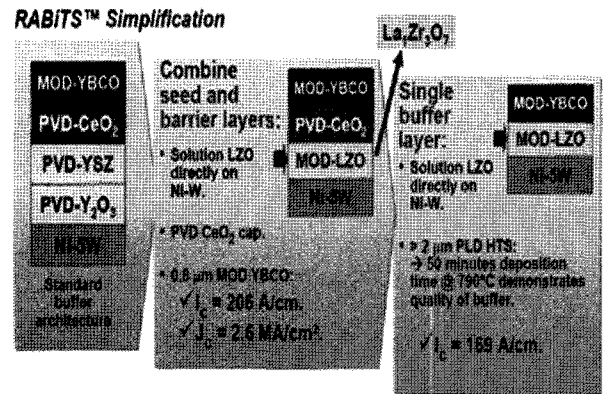


그림 6. ORN에서 개발 중인 RABiTS 완충층 구조 개선 연구 결과

### 3. 맺음말

미국에서의 CC 연구 동향을 2개의 기업(AMSC와 SP)과 2개의 연구소(ORNL과 LANL)를 중심으로 간략하게 정리하였다. SP는 <임계전류 X 길이> 값과 제조 공정의 경제성 부분에서 가장 앞서 있다는 평가를 받고 있다. 지난 2년 동안의 공정 및 특성 개선 추이로 보아 앞으로도 상당 기간 동안 가장 앞선 결과를 발표할 것이라고 예상하고 있다. AMSC는 장선 제조 장비 구축과 장선 제조시의 문제점 해결 준비에 많은 노력을 기울여 왔으며, 2008년 초반부터 수백 미터 길이의 장선 결과가 발표될 것이라고 기대되고 있다.

ORNL과 LANL의 기업체와의 협력은 기업체에서 필요로 하고 요구하는 연구를 연구소에서 수행하여, 실제로 기업체의 공정개선에 도움을 주고 있다는 점에서, 우리에게도 많은 교훈을 주고 있다. AMSC와 SP의 성

공적인 CC공정 개발은 ORNL, LANL, Argonne 국립연구소, NIST등 많은 연구소의 도움이 없었다면 이루어 지지 않았을 것이라고 생각하는 것이 전혀 무리가 아니다.

오랫동안 (20년 이상) 기다려왔던 고온초전도 전력기기의 실용화가 멀지 않은 미래에 실현될 것이고, CC가 가장 중요한 역할을 하게 될 것이라고 기대한다. AMSC와 SP는 이미 각각 33개와 35개의 고객에게 11.5km와 16km의 CC를 공급했다. 상당한 부분이 판매된 것이 아니기 때문에 공급했다라는 표현을 사용하고 있다. 머지 않아 수십 km 혹은 수백 km의 CC가 초전도 전력 케이블을 만들기 위하여 판매된다는 소식이 나올 것을 기대한다.

### 감사의 글

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

### 저자이력

박 찬(朴 燦)



1964년 4월 30일생, 1986년 서울대학교 무기재료공학과 졸업, 1988년 동 대학원 졸업 (공학 석사), 1996년 미국 NY State College of Ceramics at Alfred Univ 졸업 (공학박사), 1996~2000년, 미국 Oak Ridge 국립연구소 Research Associate 2000~2001 미국 IGC-SuperPower senior materials scientis 2001~2005 한국전기연구원 선임연구원, 2005~현재 서울대학교 재료공학부 부교수.