

고온초전도선재 제조기술과 개발 동향

Manufacturing technology and R&D status of high temperature superconducting wire

오상수, 하동우, 하홍수, 박 찬, 송규정, 고락길, 권영길, 류강식

(S. S. Oh, D. W. Ha, H. S. Ha, C. Park, K. J. Song, R. K. Ko, Y. K. Kwon, and K. S. Ryu)

Abstract

The development of high performance HTS wire is a key factor for various electrical applications of coils and cables. The purpose of this paper is to review and consider the main manufacturing technologies of HTS wire and its current status. A lot of efforts have been focused on the optimization of PIT parameters for Bi-2223/Ag wire. According to this, long Bi-2223 wires having I_c of 130 A were recently produced and their mass production has been underway in US. The current status performance of Bi-2223 wire is supposed to be used in power transmission cable because of its lower self-field property. Y-123 second generation conductor is extensively being developed throughout the world and many fabrication processes are competed with each other. 30 m-long Y-123 wire with J_c of 0.8 MA/cm² was recently fabricated using IBAD and PLD techniques in Japan. This result offers promise of scalable processing of practical multi-layer coated conductor.

Key Words : Bi-2223, Y-123, PIT, coated conductor, critical current density

1. 서 론

고온초전도선재는 초전도응용기술의 실용화에 있어서 가장 중요한 핵심기술로 최근에 전력기기 분야, 과학 및 산업용 초전도마그네트 분야 등에 응용하기 위하여 세계적으로 활발하게 연구 개발이 이루어지고 있다. 일반적으로 PIT법으로 제조하는 Bi-2223선재를 제1세대 초전도선재, 박막 코팅 프로세스를 이용하는 Y-123 선재를 제2세대(혹은 차세대)선재라고 부르고 있으며 제조기술 및 특성에 있어서 장단점을 갖고 있다. 고온초전도선재의 실용화를 위해서는 경제성 면에서 임계전류밀도, J_c 특성이 중요하며 특히 자장 하에서의 값이 높아야 한다. Bi-2223선재는 액체질소온도에서 자장중 임계전류 값이 급격하게 떨어지기 때문에 자장에 대해서 J_c 가 크게 떨어지지 않는 30 K이하의 온도조건에서 동작시키는 설계가 이루어지고 있다. 이러한 열악한 I_c 특성을 극복하기 위하여 새롭게

시도되고 있는 것이 차세대 선재로 박막 코팅기술을 이용하기 때문에 coated conductor라고도 하며 결정입자가 2축 결정방향으로 배향되어 있기 때문에 결정입계에서의 weak-link에 의한 전류감소가 크게 개선되어 Bi계 선재보다 수십배 높은 임계전류밀도의 특성을 나타낸다.

표 1에 정리한 것과 같이 선재 개발에서 중요한 기본적인 항목별 요구사항을 간략하게 살펴보기로 한다. 임계전류밀도는 실용적으로 가장 중요한 파라메타이고 기기 설계에 있어서는 임계전류 값을 선재의 전체 단면적으로 나눈 공칭임계전류밀도 J_e 가 주로 사용된다. J_e 의 향상을 위해서는 J_c 를 높이는 것이 요구되나 J_c 향상에는 한계가 있기 때문에 초전도체의 면적비율 fill factor %를 높이는 공정이 요구된다. 선재의 사용온도는 최종적으로는 응용기기의 경제성에 직결되는 사항으로 액체질소온도에서 사용하는 것이 가장 바람직하나 기기에서 요구되는 운전조건을 만족시키기 위해서 전력케이블 이외에는 대부분의 기기는 온도를 30 K이하로 내려서 사용한다. Bi-2223선재의 경우 선재의 조건에 따라 다소 달라지나 일반적으로 액체질소 77 K에서 보다 20 K에서는 자기자장 기준

한국전기연구원
(창원시 성주동 28-1,
Fax: 055-280-1696
E-mail : ssoh@keri.re.kr)

Table. 1 Basic requirements for development of HTS wire

항 목	방 향
임계전류밀도 J_c	↗
사용 온도	↗
기계적 강도	↗
장산화 가능성	↗
제조 가격	↘

으로 5 배이상 임계전류가 향상된다. 그리고 초전도선재로 감은 코일에 전류를 인가하면 선재에는 전자력이 작용하기 때문에 기계적 강도를 가능한 높이지 않으면 고자장이 발생되거나 크기가 대형인 초전도코일에는 사용할 수가 없다. 그리고 산화물 자체가 기계적으로 취약하기 때문에 이를 보강할 수 있는 선재 구조와 공정 개발이 필요하다고 할 수 있다. 초전도기기가 대형화될수록 piece length가 긴 선재가 요구된다. 초전도선재는 일반 구리선과 같이 쉽게 제조공정에서 서로 이을 수 없기 때문에 가능한 선재를 길게 제조할 수 있어야 한다. 또한 장산화 여부는 선재 가격에도 크게 영향을 주기 때문에 공정 선택에 있어서 중요한 요소라고 할 수 있다. 상용화를 위해서는 선재의 특성과 함께 무시할 수 없는 요소가 바로 선재 가격이다. 결국 고온초전도선재가 상용화되기 위해서는 저온초전도선이나 구리선과 비교하여 가격이 저렴해야 기존의 기기를 고온초전도기기로 대체할 수 있는 것이다. 표 2는 선재를 개발하는데 있어서 미국 DOE가 상용화를 전제로 하여 각 기기별로 요구되는 사양과 특성치를 정리하여 나타낸 것이다. 각 응용기기별로 요구되는 선재의 특성이 다르다. 예를 들어 초전도전력케이블의 경우, 케이블 권선 구조에서 발생하는 자기자장이 낮기 때문에 액체질소중의 소선 테이프의 I_c 가 40 A정도에서도 응용이 가능하다는 보고이다. 또한 송전케이블의 경우는 요구 가격대가 최고 100 $\$/kA \cdot m$ 로 평가되고 있어 그만큼 선재가격이 다소 높더라도 수요 측면에서 필요성이 크기 때문에 상용화 가능성이 높은 것으로 해석할 수 있다. 한류기, 송전케이블, 변압기 등의 교류기기 응용의 경우는 J_e 도 높아야 하지만 교류손실 저감이 중요

Table. 2 Requirements for commercialization of HTS wire analyzed by DOE

응용 기기	고온초전도선재의 상용화 요구 조건									
	J_e	가격	자장 (T)	절대 온도 (K)	I_c (A)	교류 손실	권선 반경 (m)	변형률 (%)	선재 길이 (m)	
한류기	1,000 - 10,000	10 - 30	0.3 - 3	40 - 65	100	0.4	0.15 - 0.05	0.2 - 0.4	200 - 1,000	
모터	10,000	10	4	> 25	300	NA	0.05	0.2 - 0.3	1,000	
송전 케이블	1,000 - 10,000	10 - 100	< 0.2	> 65	> 30	0.15	0.01	> 0.4	100 - 1,000	
변압기	1,000 - 10,000	5 - 20	0.15	20 - 65	200	0.25	0.1 - 0.2	0.1	250 - 3,000	
발전기 (100 MVA)	1,000	10	4 - 5	20 - 65	100 - 200	NA	0.1	< 0.2	500 - 1,000	
고자장 마그네트	1,000 - 100,000	1 - 5	> 20	4.2 - 65	300 - 500	NA	0.01	0.5	500 - 1,000	
자기분리	100	10	2 - 3	77	500	NA	0.5	0.2	1,000	

(주 : J_e : A/cm^2 , @77 K, self field, 가격 : $\$/kA \cdot m$, 교류손실 : $mW/A \cdot m$)

하다. 그러나 기기의 동작전류가 커질수록 교류손실도 비례하여 증가하는 경향이 있기 때문에 교류기기에서는 I_c 가 높은 선재를 사용하는 것이 반드시 바람직하다고는 말할 수 없다. 표1에서 고자장 마그네트 응용의 경우는 선재의 J_e 요구특성치가 가장 높고 가격 부담도 1 - 5 $\$/kA \cdot m$ 로 가장 큰 보고되고 있다. 이것은 현재의 선재가격이 약 $\$200 - 300 /kA \cdot m$ 인 것을 고려하면 현실적으로 고온초전도선재만으로 고자장마그네트를 제작하는 것은 경제성이 없다는 것을 의미한다. 현재로서는 1 GHz NMR마그네트 구조에서 알 수 있듯이 Nb-Ti나 Nb₃Sn과 같은 저온초전도코일과 복합구조를 갖는 마그네트에서 최내층 코일만 고온초전도코일로 하기 때문에 고온초전도선재는 고자장 마그네트 분야에서 당분간 제한적으로 사용될 수밖에 없다고 본다.

본 논문에서는 고온초전도선재들 중에서 대표적으로 개발되고 있는 Bi-2223계와 Y-123계 초전도선재들에 대해서 제조기술의 특징과 기술적으로 문제가 되고 있는 부분들에 대해서 고찰하기로 한다. 또한 미국, 일본 등의 선진국에서 이루어지고 있는 최근 연구동향을 분석하여 향후 국내 연구개발에 지침으로 삼고자 한다.

2. PIT법에 의한 Bi-2223선재 제조기술

PIT(Powder-In-Tube)법이 고온초전도선재 제조에 사용된 것은 1987년부터 많은 연구자들이 이 방법을 이용하여 Bi-2223선재를 제조하고 특성을

향상시키기 위하여 부단한 노력[1,2,3,4,5]을 하였다. PIT 공정의 개략도를 그림 1에 나타냈다. 선재제조 공정은 크게 전구체 분말제조공정, 가공 및 열처리 공정으로 나눌 수 있으며 분말 특성에 따라 공정조건이 달라지기 때문에 균질한 전구체 분말을 사용하는 중요하다. Bi-2223선재는 Bi-2212 초전도상과 Ca_2PbO_4 , CuO , $(\text{Sr,Ca})_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_x$ 상으로 이루어진 전구체 분말의 고상반응에 의하여 만들어지기 때문에 미세조직을 관찰하면 많은 공극과 불순물상이 관찰되기도 하며 주로 전구체 분말을 취급하는 과정에서 들어온 탄소원자는 결정입계에 편석하여 전류를 제한하기 때문에 전구체 분말의 특성에 따라 최종 제조되는 Bi-2223선재의 I_c 특성이 크게 좌우된다.

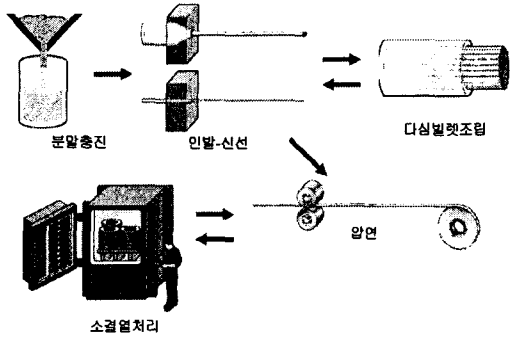


Fig. 1. Schematic layout of Bi-2223 wire fabrication [7]

PIT법에 의한 다심 선재의 가공에서 유의할 점은 무엇보다도 내부 필라멘트를 균일하게 가공하는 것이다. 필라멘트를 균일하게 가공하기 위해서는 전구체 분말의 입도, 충전밀도, 빌렛 구조, 인발 다이스 각도, 압연롤의 직경, 단면 감소를 등과 같은 많은 요소들이 최적화되어야 된다. Han등[6]은 고온초전도선재의 압연시에 필라멘트 소세징이 발생하는 원인을 분석하였다. 튜브내부의 분말이 입계밀도에 달하면 분말입자들 사이의 마찰력이 커져서 분말유동이 멈춘다. 길이 방향으로의 은의 자유도가 은이 분말에 작용하는 최대압력을 제한시켜 고밀도 분말영역으로 은을 유도시키고 테이프의 저밀도 영역에 달했을 때 은 시스는 다시 분말 유동을 일으키게 함으로서 그림2와 같이 길이방향으로 반복적으로 소세징이 발생한다고 설명했다. 판상 구조의 2223상이 열처리 공정에서 2212상과 불순물상들의 반응에 의하여 생성되나 상세한 메카니즘에 대해서는 아직도 통일된 견해가 없고

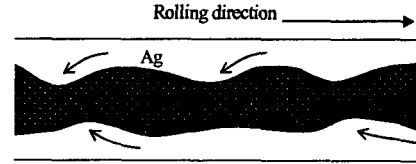


Fig. 2. Schematic layout to show the occurrence of filament sausageing.

intercalation 모델과 핵생성-성장 모델이 대표적으로 보고되고 있다. intercalation 모델은 고분해능 TEM을 이용한 미세구조 관찰기법으로 주로 행하여졌으며 소결 반응의 초기과정에서 Bi-2212 결정 구조 층 사이로 Ca-Cu-O 층이 삽입되면서 Bi-2223상이 생성된다는 이론[8]이다. 한편 핵생성-성장 이론은 XRD와 EDX 분석에 의해서 이루어졌다. 소결 반응시 Bi,Pb-2212상이 Ca과 Pb농도의 증가로 용점저하가 일어나고 분해되면서 액상이 발생하는데, $(\text{Sr,Ca})_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_x$ (AEC)상이 이 액상과 접촉하여 분해되어서 만든 과도적인 액상으로부터 Bi,Pb-2223상이 석출하여 성장한다는 것이다[9].

PIT공정의 열처리과정에서 Bi-2212가 주상인 전구체 분말이 Bi-2223초전도상으로 변하면서 많은 불순물 상들이 생성된다. 고온초전도체의 전류수송 메카니즘에서 percolative적인 전류 거동을 고려할 때 이러한 불순물상들을 최대한 미세하게 분산시키는 조직제어기술이 필요하다. 그리고 결정입계의 접촉 각도가 커지면 전류 제한 요소로 작용하기 때문에 가능한 판상 결정의 (a-b)면을 전류 통전 방향(테이프 표면에 대하여 평행하게)으로 배향화시키는 가공열처리 기술 개발이 입계전류밀도를 향상을 위하여 요구된다고 할 수 있다. 결정 배향은 가공과 열처리에 일어나나 가공에 의한 효과보다 열처리에 의한 효과가 큰 것으로 밝혀지고 있다[10] 그것은 그림 3에서 보는 바와 같이 판상의 2223결정이 성장할 때 c축 방향보다 (a-b)방향으로 성장속도가 빠른 것($v_{a-b} \gg v_c$)과 관계가 있으며 필라멘트 내부의 결정들의 배치를 생각할 때 시스 표면과 평행하게 배열된 결정은 성장이 잘 되나 각도를 이루는 결정들은 성장이 다른 결정들에 의하여 제한을 받기 때문에 미세조직을 관찰하면 은시스와 접한 표면 부근의 결정배향성은 양호하고 내부로 들어갈수록 떨어지는 현상이 일어난다.

PIT선재 공정에서 J_c 향상을 위한 미세조직 제어

기술이 지금까지 많은 연구를 통하여 밝혀진 부분도 있지만 전력기기에서 요구되는 km급의 장선화를 위해서는 공정 변수들에 대한 고도의 품질관리가 이루어 져야 하며 전구체 분말에서 가공조건에 이르기까지 많은 공정요소들이 최적화되지 않으면 실제 상용화급의 전력기기 등에 사용할 수 있는 산화물계 초전도선재 제조가 불가능하다고 할 수 있다. 한편 기존에 사용하는 PIT선재의 시스 금속인 Ag는 항복강도가 낮기 때문에 기계적 응력이 크게 걸리면 취약한 산화물 초전도체가 파단되어 전류특성이 크게 열화될 수 있다. 따라서 PIT선재의 기계적 강도를 높이기 위한 새로운 합금시스 개발이 요구된다고 할 수 있다.

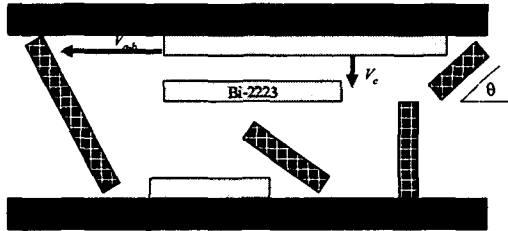


Fig. 3. Schematic arrangement of Bi-2223 crystals inside the tape

3. Bi-2223선재의 개발 현황

가장 활발하게 PIT선재 공정을 상용화하기 위하여 투자하고 있는 회사는 미국 AMSC사로 최근에 300 m급의 선재 제조 공정을 고도로 최적화하여 액체질소 자기자장하의 I_c 가 130A를 넘는 세계 최고수준의 Bi-2223 고온초전도선재를 개발하였다. AMSC사 선재의 특징은 J_c 를 높일 있는 최적의 분말 및 가공기술로부터 초전도체 필라멘트의 충전율(filling factor)를 가공이 허용하는 범위 내에서 최대한 높인 것이며 기계적 강도를 높이기 위하여 은시스 테이프 선재의 양 표면에 고강도의 얇은 SUS테이프를 연속적으로 샌드위치 구조로 납땜하여 그림4와 같은 일반 은시스 선재 보다 3 배 이상이 되는 265 MPa의 높은 강도를 나타내는 선재 개발에 성공하였다. 현재 AMSC사는 Bi-2223 선재를 연간 20,000 km 규모로 생산 가능한 815평의 공장(EMG센터)을 2001년에 완공하여 50 여명의 인력을 현재 연구개발과 생산에 투입하고 있다 [11].

표2에서 정리하여 나타냈듯이 AMSC사 이외에도 일본, 유럽, 독일, 덴마크의 회사에서 Bi-2223고온

초전도선재를 개발하고 있지만 아직 AMSC사의 특성치에는 못 미치고 있다.



Fig. 4. Cross-section of high strength SUS reinforced type Bi-2223 tape developed by AMSC.

한편 국내에서는 정부 연구사업을 통하여 전기 연구원과 기계연구원, 원자력연구소를 중심으로 PIT법에 의한 Bi-2223 은시스 고온초전도선재를 개발하였으며 전구체 분말 합성기술, J_c 향상을 위

Table 3. Average long length performance [11]

제조회사	$J_e(77K, sf)$	$J_c(77K, sf)$	Max stress
	A/cm ²	A/cm ²	
AMSC			
Bare	15,200	130	75
Laminated	10,400	130	265
Sumitomo			
	9,000	80	150
VAC			
Bare	9,000	80	120
Clad	7,200	80	200
NST			
	5,000	35	120
Furukawa			
	5,000	37	120

한 가공열처리기술, 은합금 시스 제조기술 등의 PIT공정을 확립하기 위한 기반 연구를 수행하였다. 국내에서 개발된 Bi-2223 PIT선재의 전체적인 특성치 수준은 선진국의 일류 회사 수준보다는 다소 떨어지나 외국의 국립 연구소나 대학 수준보다는 장선 제조 능력이 앞선다고 할 수 있다. 그림 5는 KERI에서 개발한 단선재에 대한 J_e 값을 나타낸 것으로 19심 선재에서보다 55심 선재에서 비교적 높은 J_e 값을 보이고 있으며 8 kA/cm²의 최고치를 나타냈다. 장선재의 경우는 250 m길이에서 34 A정도의 I_c 값을 나타내는 선재개발을 한 적이 있으며 현재 21세기 프론티어사업에서 1단계 3년 후에 7 kA/cm²의 J_e 를 갖는 1 km급 선재를 개발하는 것이 목표로 되어있다.

4. Y-123 선재(coated conductor) 제조기술

제2세대(혹은 차세대) 고온초전도선재로 부르는

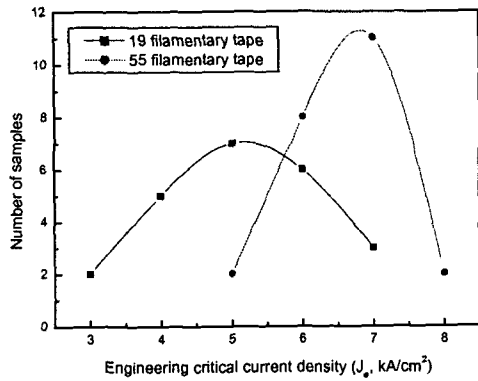


Fig. 5. Je property of Bi-2223 wires which are being developed by KERI [12]

Coated Conductor (CC)는 제1세대 BSCCO 선재를 대체할 수 있는 최적의 대안으로 인식되고 있다. 제2세대 선재는 YBCO 초전도체가 주종을 이루고 있으며, 그 제조 공정을 간략히 기술하면 다음과 같다. 다결정 금속기판 표면에 산화물 박막을 증착하는 과정에서 IBAD (ionized beam-assisted deposition)법으로 보조 이온 빔을 주사하여 박막이 기판과의 epitaxial 관계가 없이 독립적으로 2축 배향성을 가지도록 하거나, 압연/진공열처리를 통하여 2축 배향성을 가지는 금속기판을 제조한 후, 그 위에 epitaxial하게 산화물 완충층을 증착하는 방법으로 (RABiTS; rolling-assisted biaxially textured substrate), 2축 배향성을 가지는 완충층으로 덮여 있는 유연성 있는 금속 테이프 위에 2축 배향 YBCO 초전도체를 증착한다. 그림 6은 다층구조를 갖는 CC의 결정배향성을 나타낸 것으로 기판이나 완충층의 2축 배향(bi-axial texturing) 정도가 높을수록 높은 전류밀도의 YBCO층을 생성시킬 수 있다. 이렇게 제조된 YBCO CC는, BSCCO PIT 선재와는 다르게, 고-자기장 및 액체 질소온도에서 BSCCO 초전도체 보다 현저하게 좋은 비가역-자장 특성을 가지며, 액체 질소온도에서의 마그네트 응용이 가능하다. 또한 PIT BSCCO 선재제조 비용의 상당부분을 차지하는 은(Ag)의 사용이 감소하여 비용 및 경제성에서도 장점을 가지고 있다. 현재, CC의 개발에 있어 필수적인 2축 배향된 완충층/금속기판 제작에는 각각 장-단점을 가지는 두 가지의 대표적인 방법들이 있다. IBAD 방법은 1차 완충층 제작 속도가 느리며 고가의 장

비를 이용하여야 하나, RABiTS 방법은 제작 속도가 빠르며 경제적 비용이 적게 드는 공정이라고 할 수 있으나 아직 수 m 길이의 장선재 제조가 보고되지 않고 있다

초전도체를 증착하는 대표적인 PLD법에 대해서 살펴보면, 그림 7에서 보듯이 역시머레이저를 이용하여 고진공 챔버내의 YBCO target의 표면으로부터 플라즈마상태(plume)를 만들어 기체 상태의 원자들을 기판 위에 결정이 같은 방향으로 성장하도록 증착한다. 이때 초전도체를 생성하기 위하여 기판을 히터로서 고온으로 가열한다. 선재를 연속으로 제조하기 위해서는 PLD 진공챔버 내에 기판테이프를 연속으로 권선했을 수 있는 reel to reel spool장치가 필요하게 된다.

CC 프로세스의 단점은 약 1%에 불과한 아주 낮은 초전도체 fill factor이다. 예를 들어 1 μ m두께의 YBCO를 100 μ m두께의 금속 테이프위에 코팅하여 $J_c(77\text{ K}, 0\text{T})$ 가 1 MA/cm² 라고 하면 Je는 10 kA/cm² 정도에 해당되므로 AMSC사가 만든 현재 최고 수준의 PIT선재의 Je에 못 미친다. 따라서 Je를 높이기 위해서는 기판과 완충층 두께를 최대한 줄이거나 초전도체 두께가 증가하면서 고배향성의 치밀한 미세조직이 그대로 유지되는 에피택셜 성장기술 개발이 요구된다고 할 수 있다. PLD와 같은 진공프로세스에서 제조한 CC에서 높은 J_c 값이 보고되고 있으나 reel-to-reel 시스템에서 연속적으로 2축 배향성이 높은 YBCO막을 빠른 속도로 증착할 수 있는가가 실용화의 관건이라고 할 수 있다. 한편 MOD나 Sol-gel과 같은 비진공프로세스는 공정이 간편하고 제조비용을 낮출 수 있는 장점이 있다. 최근 AMSC에서 MOD-TFA법으로 만든 선재에서 진공프로세스로 만든 YBCO 박막에 필적하는 높은 J_c 를 나타낸 것은 크게 주목할 만한 일이다.

5. Y-123선재의 개발현황

액체 질소온도에서 전력기기응용이 가능한 고온 초전도 CC를 개발하기 위한 연구가 미국에서는 에너지부(DOE) 주도하에 국립연구소 위주로 진행되어 현재에 이르고 있다. 대표적인 미국내의 연구 그룹들 연구현황을 살펴보면 다음과 같다. 로스알라모스국립연구소(LANL)는 다결정 Ni-alloy 기판 위에 IBAD 기술로 2축-배열 집합조직(biaxial texture)을 가지는 YSZ, MgO 등의 완충층을 성장

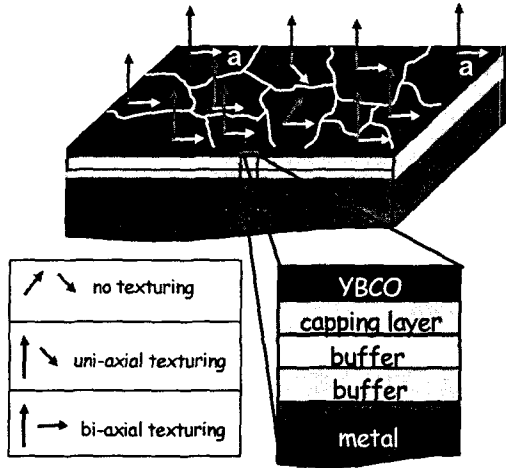


Fig. 6. Schematic multi layer architecture and texture for coated conductor

시킨 다음, PLD 방법으로 최종적으로 YBCO 초전도층을 완충층과 같은 2축 배열 집합구조로 성장시킨 결과, 실험실용 짧은 시료에 대하여 $\sim 2 \text{ MA/cm}^2$ 이상의 임계전류밀도를 얻었으며, 1998년에 1 m 길이에 0.87 MA/cm^2 정도의 임계전류밀도와 120 A의 임계전류를 갖는 YBCO CC를 성공적으로 제조하였다. 현재 LANL 내의 연구그룹은 선재의 장선화는 기업 (IGC-SuperPower)에 일임하고, 선재의 특성향상과 새로운 완충층 개발, 완충층 특성향상, 물리적 현상 규명 등에 중점을 두고 있다. 오크리지국립연구소(ORNL)는 배향성이 없는 금속기판에 IBAD 방법으로 2축 집합조직을 가지는 1차 완충층을 증착하는 대신, Ni, Cu 등의 입방정 구조를 가지는 금속이 특정한 조건하에서 압연/열처리과정을 거쳤을 때, 뚜렷한 2축 정렬 집합조직 (cube-texture)이 나타나는 것을 이용하여, 이러한 집합조직을 가지는 유연성 있는 금속기판 위에 같은 배향성을 가지도록 epitaxial하게 초전도층을 증착하여 CC를 만드는 방법을 1996년 ORNL의 연구진이 발표하였다. ORNL은 YBCO 초전도층을 증착하는 방법으로는 coevaporation-post annealing, PLD, MOD 등의 방법을 이용하고 있으며, 단선재 제조에서는 좋은 결과들을 발표한 바 있으나, 수 m 길이의 장선재 제조에서는 IBAD-PLD 방법에 뒤떨어져 있다. 실험실용 단선재 시료에서는 최고 $\sim 3 \text{ MA/cm}^2$ 정도의 임계전류밀도를 얻었으며, 1999년에 10 cm 길이에 0.75 MA/cm^2 정도의 임계전류밀도, 2001년에 $J_c = 0.6 \text{ MA/cm}^2$, $I_c = 20 \text{ A}$ 를 가지는 1 m 길이의 CC를

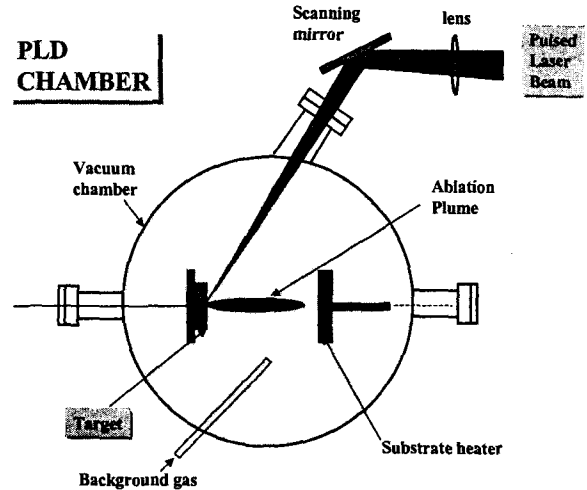


Fig. 7 Layout of PLD system

만들었다. 현재 ORNL 그룹은 고온초전도선재 제조비용을 줄이는 방안으로 간단하고 쉬운 방법으로 성장시킬 수 있는 완충층 개발과 저렴한 가격의 저-진공, 고속 증착 방법 (sol-gel, MOD) 등을 연구하고 있다.

일본내의 대표적인 연구개발 그룹으로는 SEI (Sumitomo Electric Industries), Fujikura, ISTEK 등이 있다. 특히, SEI 연구그룹은 기존의 IBAD 방법에서 벗어나서, 새로운 ISD (Inclined-Substrate Deposition) 방법으로 다결정 Ni함금 기판에 2축 배열 집합구조를 갖는 YSZ 완충층을 PLD 기법으로 입힌 후, YBCO를 같은 방법으로 성장시켰다. 이런 방법으로 임계전류밀도(J_c)가 0.1 MA/cm^2 정도인 길이 10 m CC를 제조하였다. IBAD 방법을 사용하여 얻은 결과와 비교하면, 임계전류밀도 부분에서는 비교적 뒤떨어지나 완충층 증착 속도에서는 훨씬 빠르다는 장점이 있다. 한편, 일본 내에서 YBCO 박막선재 개발이 가장 활발히 진행중인 Fujikura는 미국 LANL, IGC-SuperPower 등에서 채택한 IBAD-PLD 방법을 개발하였으며, 이 방법으로 1 m/h의 속도로 9.6 m 길이에서 임계전류 50 A, 임계전류밀도 $420,000 \text{ A/cm}^2$ 를 가지는, 10 m 길이의 CC를 제조하였고, 최근에 임계전류 40 A, 임계전류밀도 $800,000 \text{ A/cm}^2$ 급을 갖는 30 m급의 선재를 개발하는데 성공함으로써 세계 최고 기록을 달성하였다(그림 8참조).

국내에서는 현재까지 제 2세대 고온초전도선재인 YBCO CC에 대한 연구개발 경험이 미국과 일본에

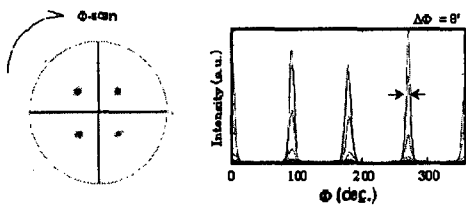
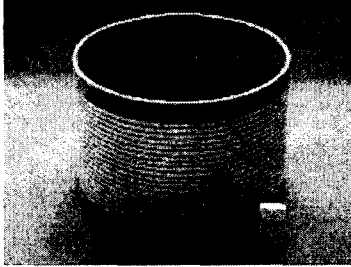


Fig. 8. Photograph of 30 m-CC recently developed by Fujikura and the degree of texture for (103) plane of Y-123 superconductor layer [13]

비하여 미비한 실정이다. KAIST 그룹에서 압연/진공열처리에 의한 2축 배향성을 가지는 Ni 기판 위에 e-beam co-evaporation 방법으로 다층 완충층과 YBCO층을 성장시킨 것이 유일한데, 1999년도에 1 MA/cm² 정도의 임계전류밀도를 얻은 것이 최고이다. 그러나 다행히 최근 21C프론티어사업에서 전기연구원과 원자력연구소를 주축으로 PLD법과 MOCVD법을 이용하여 3년 내에 J_c가 200,000 A/cm² 인 1 m급 CC를 개발하기 위한 본격적 연구에 착수하였다.

6. 결론

Bi-2223선재는 송전케이블 분야에 우선적으로 상용화될 가능성이 높은 것으로 전망된다. 앞으로 지속적인 연구개발에 의해 임계전류가 200 A를 넘는 선재도 출현할 가능성이 있고, J_e면에서는 유리하기 때문에 coated conductor와 결합적으로 사용될 가능성이 있다. 대량생산이 본격적으로 시작되었으므로 선재가격은 계속 떨어지리라 본다. 국내에서도 업체 참여에 의한 상용화연구가 본격적으로 시작되어 머지않아 500 m급의 선재가 시판될 가능성이 높다고 할 수 있다. 한편 Coated Conductor 제조기술은 아직 개념정립 단계의 기술로서 고도의 복합된 정밀기술이 적용되기 때문에 여러 가지 기술적 문제를 순차적으로 해결하는 노

력이 필요하다고 본다. 현재 높은 임계전류밀도를 나타내는 시료는 주로 길이가 짧은 시료에 국한되며, 우수한 초전도 특성을 유지하면서 선재를 장선화 하는 기술이 개발되어야 전력기기 응용이 가능하다. 국내 연구는 선진국보다 수 년 늦게 출발하지만, 실용화 단계에서는 그 기술과 시간의 차이를 대폭 줄일 수 있을 것으로 본다.

감사의 글

“본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술 개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.”

참고 문헌

- [1] P.Vase, R.Flukiger, M.Lleghissa and B. Glowacki, *Supercond. Sci. & Technol.*(2000) 13, 71.
- [2] J. Clerk Maxwell, A.P. Malozemoff, W. Carter et al. , *IEEE Trans. Appl. Supercond.* (1999) 9, 2469.
- [3] L. Marsur et al., *Proc. of ICMC conference, Montreal, Canada 1999*
- [4] J.L. Reeves, E.E. Hellstom, V. Irizarry and B.Lehndorff, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* (1999) 9, 1836.
- [5] A. Jeremie and R. Flukiger, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* (1994) 30, 1883.
- [6] Z. Han, P. Skov-Hansen and T. Freltoft, *Supercond. Sci & Technol*, 10(1997)371
- [7] AMSC homepage (<http://www.amsuper.com>)
- [8] Y.L Wang et al., *Appl. Phys. Lett.* 69(1996)580.
- [9] J-C.Grivel and R. Flukiger, *Supercond. Sci. & Sci.*, 9(1996)555.
- [10] N.Merchant, J.Suo and V.A. Maroni, *Appl. Phys. Lett.* 65(1994)1039.
- [11] Private communication by Dr. L. Masur, 2002.
- [12] S.S. Oh et al, *Cryogenics*, 2002 (to be published)
- [13] ISTECH homepage (<http://www.istec.or.jp>)