

## BSCCO 고온 초전도 선재 제조 및 응용 현황

유재무, 고재웅, 김해두, 정형식  
한국기계연구원 재료기술연구부

### 1. 서 언

초전도체는 1911년 4.2 K 온도에서 고체 수은에서 처음으로 발견 되었다. 그 후 1986년 산화물계 고온 초전도체가 발견되기 전까지 알려져 있던 많은 초전도물질들은 값이 매우 비싼 액체헬륨을 이용해서 온도를 20K이하로 낮추어야만 초전도 상태를 얻을 수 있었다. 따라서 당시까지는 초전도체의 대량적 상용화를 기대할 수 없었다. 그러나 1986년 이후 현재까지 La-Ba-Cu-O[1], Y-Ba-Cu-O[2], Bi-Sr-Ca-Cu-O[3], Tl-Ba-Ca-Cu-O[4] 와 Hg-Ba-Cu-O[5] 계 등에서 초전도 전이온도( $T_c$ : 저항이 영이 되는 온도)가 (그림 1) 액체질소의 비등점(77K)보다 높은 값을 보여 액체헬륨을 냉매로 사용하는 기존의 Nb<sub>3</sub>Ti, Nb<sub>3</sub>Sn 등의 저온 금속 초전도체와 비교할 때, 저가인 액체 질소를 냉매로 사용할 수 있게 되었고 이를 계기로 많은 실용화 연구가 진행 되고 있다

세라믹 산화물 고온초전도체를 가느다란 선재형태로 가공하려는 많은 연구가 진행중이며, 현재 개발된 선재 제조방법으로는 압출법, 박막법, 테일 주조법, 분말충진법(Powder-in-Tube (PIT)) 등이 있으나 이중 선재의 기계적, 화학적 안정성, 대량제조 가능성, 재현성, 우수한 임계전류밀도( $J_c$ ) 값 등을 고려할 때 분말충진법이 가장 우수한 제조방법이라 할 수 있다. 분말충진법은 은(Ag) 튜브에 초전도 분말을 넣고 봉한 후 스웨이징(swaging), 인발, 압연 등의 가공법을 거친 후 소결하는 방법이다. 현재 고온초전도 선재 분야에서 대부분의 분말충진법에 의해 제조되는 선재들은 BSCCO 초전도체이다. BSCCO계의 장점은 선재의 초전도성(임계전류밀도)을 지배하는 texturing과 입자배열이 최종 열·기계적 공정에 의해 쉽게 이루어질 수 있다는 것이다. 또한 이렇게 제조된 BSCCO 선재들의 임계전류밀도는 절대온도 4.2K와 고자장하에서 기존의 NbTi와 Nb<sub>3</sub>Sn 같은 저온 초전도체들보다 높다.

반면에, YBCO 초전도체는 근본적으로 변형성이 부족하기 때문에, 분말충진법으로 선재를 만들려면 사실상 불가능하다. 이는 고풍성의 YBCO 선재를 만들려면 전술한 변형성의 문제외에 YBCO가 a, b, c축의 3방향으로 배열되어야 (3-axis alignment) 하는 어려운 문제점을 가지고 있기 때문이다. 따라서 새로운 다른 방식으로 YBCO 선재를 제작해야 하는데, 이에 대하여 최근 니켈 테이프에 YBCO를 코팅하는 방법이 Los Alamos 국립연구소와 독일에서 연구된 IBAD (Ionbeam assisted deposition) 공정[6]과 Oak Ridge 국립연구소의 RABiTS (Rolling assisted biaxially textured substrate) 공정[7]으로 단선의 박막선재에서 문제점들을 극복해 나갈 수 있으나 아직 장선화 공정 문제로 어려움을 겪고 있다.

TBCCO 선재의 경우를 보면, TI-1223 상 고온초전도선재 제조연구의 결과로 얻어지고 있는 임계전류밀도는 단척 단심선재의

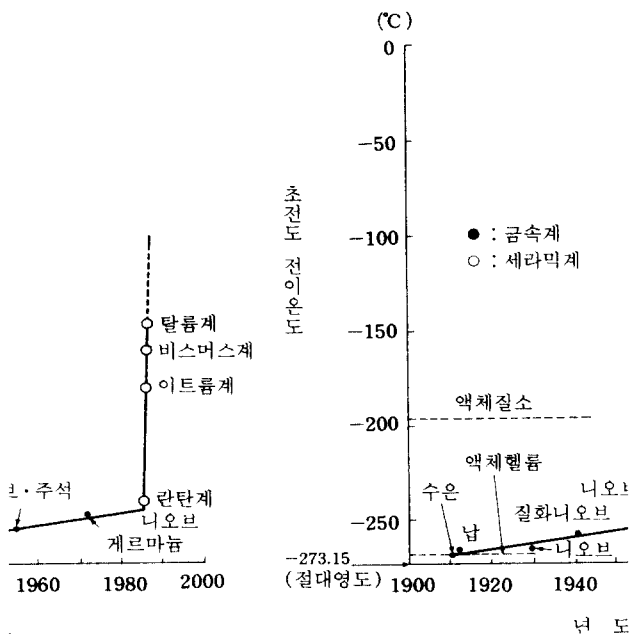


그림 1. 초전도 전이온도의 변천사

## 재료 및 소자특집

경우에도  $1\sim 2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  정도로 Bi-2212상이나 Bi-2223상 선재에서 얻고 있는 값보다 몇 배 정도 낮고, 장척 선재의 경우에도 아직 팔목할 만한 진전을 이루지 못하고 있는 실정이다. 이는 BSCCO계에 비하여, texturing과 조직치밀화가 압연공정법으로 제대로 이루어지지 못하기 때문이다. BSCCO선재를 이용하여 상업화를 위한 시제품(prototype product) 개발은 미국 에너지성(DOE)의 SPI (Superconductivity Partnership Initiative) Program 아래 고온초전도 송전선, 모터, 발전기, 한류기 등의 전력응용기기 개발을 ASC, IGC사와 이태리의 Pirelli cable사와 국립연구소들이 수행하고 있다. 지난 수 년동안 BSCCO선재의 팔목할 발전을 이루어 초기에 우려 했던 많은 어려움 들을 극복 할 수 있는 가능성이 제시 되었지만 고온 고자장하에서 최대의 성능을 발휘할 수 있는 고임계 전류를 갖는 장선재는 연구 단계에 있다. 입계의 weak link와 flux creep 같은 문제들을 어떻게 최소화 하느냐와 같은 재료적 측면과 균일하고 재현 가능한 성질들을 갖춘 1km 가 넘는 장선들을 어떻게 제조하느냐와 같은 공정적 측면들은아직도 연구 개발해야 할 과제들이다. 본문에서는 각종분야에서 고온초전도체 응용을 위해 최근 연구되어지고 있는 BSCCO 등의 고온초전도 선재의 세계적 연

구현황을 그간에 소개된 문헌과 자료등을 통하여 살펴보고 현재 개발중인 고온초전도 응용기구(device)의 현황과 실용화에 따른 고온초전도 선재의 문제점및 향후 전망등을 언급하고자 한다.

### 2. BSCCO 고온 초전도 선재의 연구동향

경제성장 및 산업구조가 고도화 됨에 따라 에너지의 사용량이 크게 증가하며 그중에서도 전기에너지의 사용량은 더욱 급격히 증가할 전망이다. 이에 따라 선진국에서는 전기에너지 절약 및 고효율화 측면에서 저온초전도 선재를 이용한 초전도 전력기기들을 개발하여 왔으나 고가의 액체헬륨을 사용하기 때문에 경제적인 면에서 기존의 전력기기에 대해 경쟁력을 갖지 못했다. 그러나 1987년 액체헬륨의 수십분의 일 정도 값싸고 대량공급이 가능한 냉매인 액체질소(77K) 이상의 온도에서 초전도성을 보이는 고온초전도체의 발견으로 초전도 선재의 실용화에 커다란 전기를 마련하게 되었다.

현재 미국, 일본, 독일 등 선진 각국은 의료기기인 MRI용 자석 및 대용량, 저손실 송전케이블, 산업체용 대형변압기(>10MVA), 모터(>1,000hp), 고자장자석, 발전기, 한류

표 1. BSCCO 2223 장선재를 이용한 고온초전도 전력응용기기 개발현황

응용기기	특성	개발회사	개발연도
Magnet	7T at 20K	Sumitomo Electric	1997
	2.16T at 27K	ASC	1994
Motor	200hp at 27K	ASC & Reliance	1996
	1000hp(개발중)		
Power Cable	50m dc 3000A at 77K	Pirelli & ASC	1996
	120m, 3 phase(개발중)		1999
	50m dc 2900A at 77K	TEPCO & Sumitomo	1996
Transformer	100m, 3 phase(개발중)		
	500 kVA at 77K	Sumitomo & Fuji	1996
	630 kVA at 77K	EdF/ABB/ASC	1997
	10MVA(개발중), 30MVA(계획)	EdF/ABB/ASC	1998
Current Limiter	2.4kV, 2.2kA	IGC, Lockheed & SCE	1996
Generator	15kV, 3 phase(개발중)		
	1.5MVA at 77K	GE & IGC	1996
	70MVA(개발중)	Super GM & Kansai	

기, 대용량 에너지 저장장치, 발전기의 개발(표1)을 위한 고온초전도 BSCCO 선재개발 및 이를 이용한 전력기기 연구에 막대한 연구 개발비를 투자하고 있는 상황이다. 따라서 고온초전도 선재의 기술적, 경제적 중요성으로 선진 각국은 기술의 유출을 꺼리고 있는 실정이다.

고온초전도 BSCCO 다심선재의 고임계 전류밀도화 기술이 개발되면 차세대 고효율 전력기기 개발에 필수적인 역할을 할 뿐만 아니라 향후 일반 산업체에도 다양하게 응용될 수 있으며, 21세기 고도산업 사회진입에 꼭 필요한 기술이라고 예측된다. 선진국에서는 고온초전도 선재기술이 차세대 고효율 전력기기 개발의 성패를 좌우하고, 전력·에너지, 의료 및 교통분야 등에 엄청난 파급효과를 준다는 점을 인지하여 정부 및 기업들이 이 기술분야에 막대한 투자를 하고 있으나, 국내의 경우에는 최근 IMF로 인한 급속한 경제상황 악화로 기업체에서는 단기간 이익이 발생하는 분야에만 투자가 이뤄지고 있어 국내기업체에서는 이 분야에 대한 투자가 거의 없어서 정부주도의 연구개발 투자가 꼭 필요한 상황이다.

현재 선진국에서는 화석연료 사용으로 발생하는 CO<sub>2</sub>에 의한 지구 온난화 방지를 위한 협약등을 체결하고 있으며 OECD에 가입한 우리나라의 경우에도 이에 대비할 수 있는 대체에너지기술 및 에너지의 고효율화 기술개발 측면에서 차세대 MRI용 초전도자석, 변압기, 송전선, 모터등의 고효율 전력기기 개발에 필수적인 고특성 고온초전도 장선재 제조기술 개발이 연구되어져야 할 것이다. 산업구조가 고부가가치화, 고기술화, 전문화 되고 환경저해등이 심각한 문제로 대두됨에 따라 우수한 기능성은 물론 환경친화성을 함께 갖춘 재료 및 전력응용기기 개발이 향후 새로운 산업구조로의 변화를 주도할 것으로 예측된다. 최근 선진국에서는 가속화되고 있는 지구 온난화 방지를 위한 CO<sub>2</sub>방출 억제 등 세계각국의 환경규제 및 국내의 환경보호를 위한 환경 친화적인 에너지의 공급요구가 증가되고 있다.

1999년 4월 개최된 국제에너지기구(IEA) 고온초전도 프로그램 집행위원회 발표내용을 보면 고온초전도 선재를 사용한 대용량, 고효율 초전도 전력기기의 CO<sub>2</sub>방출 억제효과

가 상당히 클것으로 예상되 향후 미래사회의 환경오염을 억제시킬수 있는 방안중 하나로 떠오르고 있다. 또한 전력기기의 절연, 냉각을 위해 사용하던 Oil 대신 환경적으로 안전한 액체질소를 사용하므로 환경친화적이어서 생활환경을 더욱 쾌적하게 한다.

## 2.1 국외 연구 개발 동향

고온초전도 BSCCO 2223 선재의 최근 개발 현황을 아래표에 정리하였는데 고임계 전류값을 갖는 선재의 장선화가 주된 연구 방향임을 알 수 있다. 미국의 American Superconductor Corp. (ASC)의 최근 결과를 보면 1,100m가 넘는 19심 BSCCO 다심선재가 임계전류(I<sub>c</sub>) 및 임계전류밀도(J<sub>c</sub>)가 각각 15.5A와 12,700A/cm<sup>2</sup>를 나타내고 있다. ASC사는 개발된 선재를 이용하여 1998년 1월 프랑스 전력공사(Edf)와 스위스의 ABB사로부터 각각 5백만 불씩 지원받아 2001년까지 10MVA급 대용량 고온초전도 변압기 개발을 두회사와 공동으로 하고 있고 향후 30MVA급 개발을 추진할 계획이다. 1998년 11월에는 DOE와 Detroit Edison사로부터 275만불을 지원받아 Pirelli Cable사와 공동으로 세계 최초로 2.4kV, 2.4kA급 고온초전도 송전선을 개발하여 2000년 중순까지 Detroit 도심부 송배전 실계통 line에 적용한다고 발표하였다. 기존의 구리 송전선에 비해 고온초전도 송전선은 3배의 송전능력으로 Detroit의 경우 도심부 배전망의 9개의 구리 송전선을 3개의 고온초전도 송전선으로 대체 가능하며 Detroit power line의 경우 기존의 18,000Lb의 구리 케이블을 250Lb의 고온초전도 케이블로 대체 가능하다.

Intermagnetic General Corp.(IGC)의 결과를 보면 길이 1,260m에서 임계전류(I<sub>c</sub>) 및 임계전류 밀도(J<sub>c</sub>)가 각각 18A, 12,500A/cm<sup>2</sup>을 갖는 37심 BSCCO 다심선재를 개발했고 Sumitomo electric Corp. 은 길이 1,200m급의 고전류도체(High amperage conductor)의 임계전류밀도값이 77K, OT에서 17,700 A/cm<sup>2</sup>를 나타내는 고임계전류 선재를 개발하였고 최근 98년 길이 수 cm급이지만 임계전류밀도가 75,000 A/cm<sup>2</sup>급인 세계 최고특성의 BSCCO 2223 선재를 개발하였다. Sumitomo electric사에서는 개발된 고임계전류 선재를 이용하여 전류인입선(Current lead), Busbar, 전력케이블

## 재료 및 소자특집

그리고 Magnet 개발에 주력하고 있다.

최근 1998년 ASC학회에서는 독일의 Siemens사가 길이 18Km의 장선재를 개발하였고

에서는  $I_c \sim 28A$ ,  $J_c \sim 23,300A/cm^2$ 급의 고품성 선재를 개발하여 1m당 40\$의 고가로 현재 시판중이다. 현재 BSCCO 2223 장선재분야에서

표 2. 세계각국의 고온초전도 BSCCO 2223 선재의 연구개발현황

Organization	$I_c$ (A)	$J_c$ (kA/cm <sup>2</sup> )	Condition	Length (m)	Material
Sumitomo Electric Corp. (Japan)	-	75	77K.0T	0.05	BSCCO 2223/Ag
	-	27.8	77K.0T	114	BSCCO 2223/Ag
	-	17.7	77K.0T	1200	BSCCO 2223/Ag
Vacuum-Schmelze/Siemens (Germany)	-	30~33	77K.0T	0.05	BSCCO 2223/Ag
	-	15~20	77K.0T	110	BSCCO 2223/Ag
	-	24	77K.0T	400	BSCCO 2223/Ag
	-	-	77K.0T	18000	BSCCO 2223/Ag
	-	-	-	-	-
American Superconductor Corp. (U.S.A)	-	70.5	77K.0T	0.05	BSCCO 2223/Ag
	-	44	77K.0T	1	BSCCO 2223/Ag
Intermagnetic General Corp. (U.S.A)	34	17.8	77K.0T	280	BSCCO 2223/Ag
	15.5	12.7	77K.0T	1160	BSCCO 2223/Ag
Nordic Superconductor Technologies (Denmark)	60	25	77K.0T	0.04	BSCCO 2223/Ag
	54	24	77K.0T	164	BSCCO 2223/Ag
	18	12	77K.0T	1260	BSCCO 2223/Ag
Nordic Superconductor Technologies (Denmark)	30	24	77K.0T	700	BSCCO 2223/Ag
	28	23.3	77K.0T	1300	BSCCO 2223/Ag
	-	-	-	-	-

덴마크의 NKT Research사의 선재분야의 벤처기업으로 새로이 설립된 Nordic Superconductor Technologies (NST)사가 길이 700m에서  $I_c \sim 30A$ ,  $J_c \sim 24,000A/cm^2$ , 길이 1300m

는 앞서 언급한 선두그룹인 5개사의 벤처기업 또는 대기업과 미국의 Eurus, 영국의 BICC cable, 호주의 MM cable등이 선재의 특성에 따라 1m당 20~60\$의 고가로 판매중이어서 향후

표 3. 고온 초전도 선재 제조기술의 비교

	BSCCO 2223 선재	YBCO 박막선재
임계전류 특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>길이 수 cm: 우수 <math>J_c \sim 7.5 \times 10^4 A/cm^2</math></li> <li>장선재: 우수 길이 1,300m, <math>J_c \sim 2.3 \times 10^4 A/cm^2</math></li> <li>자장열화의 단점이 있음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>길이 수 cm에서 가장 우수</li> <li>ORNL: <math>J_c \sim 10^6 A/cm^2</math> (RABiTS法)</li> <li>길이가 길어질수록 임계전류 특성 급격히 감소 (길이 1m에서 1/10로 감소, Sumitomo)</li> <li>현재 길이 1m급 개발중</li> </ul>
장선화 공정	<ul style="list-style-type: none"> <li>압연공정 사용하여 대량생산 용이</li> <li>일본의 Sumitomo electric 길이 1,200m, <math>J_c &gt; 17,700 A/cm^2</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>완충층 및 YBCO 증착을 위한 IBAD 공정 및 PLD 공정을 거쳐야 하므로 장선화 공정이 어렵고 장시간을 요함</li> <li>ORNL등에서 연속 공정법 연구중</li> </ul>
응용기기 연계개발 계획	<ul style="list-style-type: none"> <li>미국의 ASC, IGC, 일본의 Sumitomo electric, 프랑스의 Alcatel group, 독일의 Siemens사, 스위스의 ABB, 이태리의 pirelli cable 등이 고온초전도 송전선, 모터, 변압기, 한류기, 고자장자석 등의 차세대 전력기기 개발에 도체로 사용중</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>장선화 공정의 어려움으로 현재까지는 없음</li> </ul>
환경 및 기타	<ul style="list-style-type: none"> <li>공기중에서 화학적으로 안정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>공기중에서 장시간 보관시 특성 저하</li> </ul>

고임계 전류밀도특성을 갖는 장선재가 훨씬 고부가가치를 가질 것으로 예상되고 있다. 현재 선진국에서는 해당 기술분야에서 길이 1Km 이상의 장선화 공정은 개발되어 있고 재현성 및 임계전류밀도 향상을 위한 초전도 precursor 분말연구, 교류 손실 최소화 및 자장하에서 flux pinning 향상연구가 활발히 진행중이다.

고온초전도 YBCO 박막선재의 경우 1994년 니켈 및 Hastelloy 테이프에 YBCO 및 완충층을 증착시키는 방법이 Los Alamos 국립연구소와 독일에서 연구된 DIBAD (Double Ion Beam Assisted Deposition) 공정과 Oak Ridge 국립연구소의 RABiTS (Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate) 공정으로 길이 수 cm급에서  $J_c \sim 10^6 A/cm^2$ 급의 좋은 결과를 얻었으나 전술한 바와같이 길이가 길어짐에 따라 임계전류밀도 특성이 급격히 감소되는 문제 및 장선화 공정문제로 어려움을 겪고 있어 현재까지도 개발목표를 길이 1m급에 두고있는 상황이다. 특히 RABiTS법은 우선배향성이 좋은 기관제조 공정에 대한 know how가 공개되지 않았고 그 공정자체에 대하여 특허화 되어있기 때문에 이 기술의 도입은 불가능해서 국내 연구개발시 다결정 금속모재의 biaxial texture 층을 형성시키는 새로운 연구개발 방법이 요구되어지고 있다. 표 3에 고온초전도 선재제조 기술들을 임계전류특성, 장선화 공정가능성, 선진국의 응용기기 연계개발 계획등에 따라 비교 분석하였다.

### 2.2 국내 연구 개발 동향

국내의 연구현황을 살펴보면, 고온초전도 재료기술은 1987년 과학기술부의 고온초전도 기술개발 과제로 추진되어 한국기계연구원, 한국원자력연구소, 한국전기연구소 등 출연연구소와 대학에서 기초적인 고온초전도 재료 및 응용연구가 수행되었으며 초기에는 YBCO bulk 재료합성 및 특성향상 연구가 진행되었다.

한국기계연구원에서는 BSCCO 2223계 및 선재개발에 맞추어 BSCCO 2223상 선재 제조를 위한 precursor 분말제조 연구, BSCCO 2223 선재제조를 위한 기계적 가공 공정연구, 반복적인 Thermomechanical 처리에 의한 임계전류밀도 향상연구 및 BSCCO계의 자장하에서의 특성열화를 줄이고자 초미립 MgO첨가에

의한 Extrinsic Pinning 연구등을 수행하고 있으며, 임계 변형 굽힘율이 높아 기계적 변형성능이 우수한 19심, 37심, 361심 고온초전도 BSCCO 2223 다심선재(그림 2a)를 개발하였고 고온초전도 선재의 기계적 성질을 향상시키고 기계적 경도 및 열전도도, 비저항도 등을 조절할수 있는 선재의 용도에 따른 세분화된 피복재용 Ag합금 및 PIT용 Ag합금 Tube(그림 2b)를 국내 최초로 개발하였다. 기존의 순수 Ag피복재에 비해 경도 및 비저항도가 각각 5배, 10배 높고 가공성도 좋아 기존의 PIT공정에 접목시키고 있다. 또한 1997년 국내최초로 임계전류( $I_c$ ) ~ 7.4A, 임계전류밀도( $J_c$ ) ~  $10,700A/cm^2$ 인 100m 급의 BSCCO 2223 선재를 개발하였고, 길이 20m급의 다심선재에서는 임계전류( $I_c$ ) ~ 24A, 임계전류밀도 ( $J_c$ ) ~  $24,000A/cm^2$  인 고특성 선재를 개발하였다.

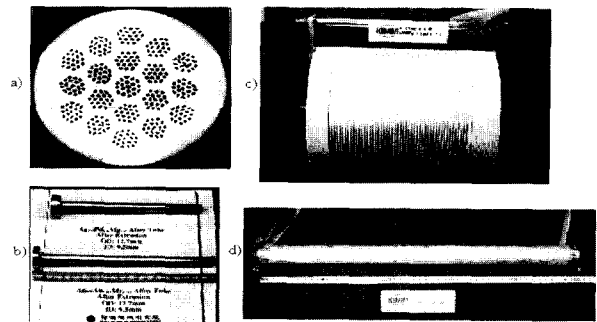


그림 2. 한국기계연구원에서 개발된 대표적 고온초전도 선재 및 관련시제품들

- a) 361심 고온초전도 BSCCO 2223 다심선재
- b) 피복재용 Ag합금 Tube
- c) 길이 100m,  $I_c \sim 21.5A$ ,  $J_c \sim 21,500A/cm^2$  (77K, 0T)인 고특성 BSCCO 다심선재
- d) 전력케이블용 500A급 고온초전도 multistrand 케이블

최근 1999년 1월에는 길이 100m,  $I_c \sim 21.5A$ ,  $J_c \sim 21,500A/cm^2$  (77K, 0T)인 국내최고인 고특성 BSCCO 다심선재(그림 2c)를 개발하여 prototype 전력케이블용 500A급 고온초전도 multistrand 케이블(그림 3d)을 제작하여 액체질소(77K) 온도에서 500A 통전실험을 수행하였다. 1999년 3월에는 초전도 분말조성 및 지속적인 임계전류 특성 향상 연구에 의해 길이 수 cm급의 시편에서  $I_c \sim 47A$ ,  $J_c \sim 47,000A/cm^2$

## 재료 및 소자특집

급의 고풍성 선재가 개발되어 향후 선진국 수준으로 도약할 가능성이 한층 높아졌다.

YBCO 박막선재의 경우 1997년부터 한국원자력 연구소가 KAIST와 공동으로 RABiTS법에 의한 연구를 시작하고 있다. 한국기계연구원에서는 미국 ORNL의 특허인 RABiTS공정을 피해서 다결정 금속모재의 biaxial texture 층을 형성시키는 새로운 연구개발 방법이 필요하다는 점에 착안하여 1997년부터 훨씬 간편하고 저비용인 전착에 의한 c-axis texture층 형성을 95% 정도까지 연구개발하였고 현재 상당한 정도의 a-b방향 biaxial texture층을 갖는 다결정 Ni tape 제조결과를 얻어서 국내 및 미국특허 출원중에 있다. 따라서 전착에 의한 biaxial texture층을 갖는 다결정 금속모재 tape 제조공정법이 개발되면 RABiTS공정보다 훨씬 빠르고 적은 투자비용으로 고온초전도 YBCO용 기판을 얻을수 있을 것으로 기대된다.

### 3. 문제점 및 향후 전망

#### 3.1 문제점

고온초전도체는 다성분계이기 때문에 초전도 분말의 조성, 입자크기 및 분포, precursor 분말의 초기 상들의 분포, 기계가공조건·열처리조건 등의 여러변수들을 제어하지 않고서는 BSCCO 2223 단일상 형성 및 임계전류 특성을 좌우하는 초전도입자 성장을 달성하기 어렵다. 특히 BSCCO 2223 상 형성 및 입자성장에 큰 영향을 미치는 액상이 초전도 분말의 미세조성 변이에 따라 변화가 심해 임계전류 특성의 재현성 문제가 심하므로 고풍성 및 고균일성을 갖는 초전도 분말제조 연구가 필요하다.

산화물 초전도체에서 현재 보고된  $J_c$ 값 ( $J_c$ ) $30,000A/cm^2$ 들은 많은 분야에 걸쳐 응용이 가능한 수준이지만 이러한 data들은 대부분 수 cm의 시편들에 대한것 들이다. 실용화를 위해서는 장선화 및 재현성과 같은 선재 공정상의 문제들을 해결해야만 한다. 장선화를 할 경우 피복 재료인 금속 Ag 와 산화물 초전도체의 계면이 균일하지 못하여(sausaging effect) 임계전류등과 같은 특성이 현저 하게 떨어지게 되고 열처리시 Bi-2223의 좁은 생성 온도 구간으로 재현성의 문제가 있다.

Bi계나 Tl계 초전도체의 unit cell에서

Cu-O plane 사이의 2개의 Bi-O또는 Tl-O가 각각 두개의 고립된 초전도층으로 unit cell을 분리하므로 자장이 c축에 평행할 경우 Bi-O층(절연층)이 flux line을 short segment 하거나 pancake으로 분리해서 각각이 Lorentz force의 영향하에 움직이는 decoupling 현상이 심하다. 이러한 flux creep을 줄이기 위한 pinning center를 초전도체에 도입하고자 하는 노력이 활발히 진행되고 있지만 아직 만족할만한 단계는 아니다. 효과적인 flux pinning을 위해서는 논란의 대상이 되고 있는 pinning mechanism이 구체적으로 이해 되어야 하고 아울러 pinning 특성을 향상시킬 수 있는 연구가 필요하다.

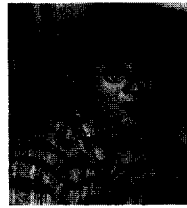
산화물 고온초전도체는 금속계 저온 초전도체와 달리 취성이 문제가 되어 실용화에 장애 요인이 되고 있기 때문에 초전도 선재가 기계적 성질이 우수하여 산화물 초전도 선재로 케이블 제조시 생기는 굽힘 변형율과 사용시 발생하는 Lorentz force에 상당한 공차를 가져야만 된다. 그러므로 각각의 선재의 응용 조건에 따라 기계적 성질, 내구성과 임계전류 등을 극대화 하기 위하여 선재의 적합 설계 및 기계적 성질을 개선시킬수 있는 피복재용 Ag 합금에 대한 연구가 필요하다.

#### 3.2. 향후 전망

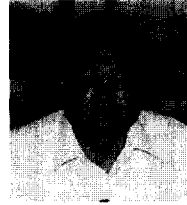
최근 1998년 1월 프랑스 전력공사(EdF), 미국의 고온초전도 BSCCO 장선재 제조회사인 ASC사, 그리고 스위스의 ABB사는 차세대 변압기용 고온초전도 BSCCO 선재 권선 개발에 공동 참여하여 10MVA급 고온초전도 변압기를 2000년까지 개발한다고 발표하였다. 또한 1998년 11월에 보도된 뉴욕타임지에 의하면 Detroit Edison 전력회사가 세계최초로 고온초전도 BSCCO 다심선재를 사용한 초전도 송전선을 2000년 중순까지 Detroit 도심부의 송배전 실계통 line에 일부 적용한다고 발표하여 이분야의 기술수요가 급격히 늘어나고 있다. 고온초전도 선재기술과 밀접히 관련되어있는 전력기기, 의료기기 및 기초과학분야의 현재의 세계시장규모는 CONECTUS의 조사에 의하면 초전도 송전선, 변압기, 에너지 저장장치 및 한류기가 4천만불, MRI, NMR 및 기초과학의 수요가 16억불 정도이다. 고온초전도 선재 및 응용기술분야의 5

년후의 세계시장 및 규모는 CONECTUS의 조사에 의하면 변압기, 송전선, 에너지저장장치, 한류기, 모터등의 초전도 전력기기가 2억 5천만불, MRI가 21억불, 기초과학 및 연구개발 투자가 약 8억불 정도로 예측된다.

향후 고온초전도 선제기술은 고임계 전류특성( $J_c > 30,000A/cm^2$ ), 길이 10Km이상의 장선화 공정, 교류손실 최소화 및 제조가격 감소를 위한 연구개발이 집중적으로 이루어질 것이며, 차세대 대용량 고효율 전력기기 개발에 가장 중요한 관건이 될 것이다. 미국, 일본, 유럽등지에서는 향후 지구온난화 방지 및 에너지의 고효율화 기술개발 측면에서 대용량전력기기 산업의 30MVA급 변압기용 고온초전도 권선, 3,000A급 송전선 시스템의 고온초전도 케이블, 산업체용 motor (>1,000hp)의 고온초전도 Race track coil, 발전기, 한류기, 자기분리용 자석등을 개발하고 있다. 향후 이와같은 대용량 전력기기 뿐만아니라, 고온초전도 선제는 고기능성 재료로 무한한 잠재적인 가능성을 가져 차세대 전기, 기계분야, 의료 및 수송분야 등의 각종분야에 그 용용이 확대되어 질 것으로 전망된다.



**고재용**  
1987년 연세대 요업공학과 졸업(학사), 1989년 서울대 무기재료공학과(석사), 현재 한국기계연구원 선임연구원



**김해두**  
1979년 연세대 요업공학과 졸업(석사), '80년 영국Sheffield 대학 요업공학과 졸업(석사), '83년 연세대(박사과정이수), '87년 독일 Aachen공대 요업공학(박사), 현재 한국기계연구원 책임연구원



**정형식**  
1970년 서울대 금속공학과졸업(학사), 1977년 미국 Drexel 대학교 금속공학과(박사), 1978-1980년 미국 Pizer Inc.(선임연구원), 1980-1985년 미국 United Technologies(선임연구원), 현재 한국기계연구원 책임연구원

### 참고문헌

1. J.G. Bednorz and K. A. Muller, Z. Phys. B64, 189 (1986).
2. M.K.Wu, J.Ashburn, C.J.Torng, P.H.Meng, L.Gao, Z.J. Huang, U.Q.Wang and C.W.Chu, Phs. Rev. Lett. 58, 908 (1987).
3. H.Maeda, Y.Tanaka, M.Fukutomi and T.Asano, Jpn. J.Appl. Phys. 27, L209 (1988).
4. Z. Z. Sheng and A. M. Herman, Nature, 332, 138 (1988).
5. S. N. Putilin et al., Nature, 362, 226 (1993).
6. X.D.Wu et.al., Appl. Phys. Lett. 65, 1961 (1994).
7. A. Goyal et al., idid. 69, 1795 (1996).

### 저자이력



**유재무**  
1987년 연세대학교 금속공학과(학사), 1990년 미국 미사건주립대 재료공학과(석사), 1994년 동대학 재료공학과(박사), Fellow, 현재 한국기계연구원 선임연구원