

# 고온 초전도체를 이용한 전력응용기기

홍 계 원

한국원자력연구소 기능성재료연구소실

## I. 서 론

1986년에 스위스 IBM 연구소의 Bednorz와 Muller는 30K의 임계전이온도를 보이는 산화물 초전도 재료를 발견하였고 이것은 곧 일본의 Tanaka 교수의 연구팀에 의하여 확인되었다. 세계의 과학자들은 이것을 고온초전도 현상이라고 이름지어 이 때부터 많은 과학자들이 저항에 의한 손실없이 전류를 흘릴 수 있는 산화물 복합재 개발연구를 수행하여 이 재료를 이용하여 고효율 전력기기 개발에 필요한 산업기술개발연구를 수행하고 있다. 이런 진보된 전력기기는 소형으로 많은 전류를 흘릴 수 있는 특성으로 인하여 기존의 전력기기에 비하여 생산성과 에너지 효율을 비약적으로 높일 수 있으며 전력시스템의 운영에 다음과 같은 많은 이점을 제공한다.

- 1) 손실의 감소에 의한 효율의 증가
- 2) 기기크기의 감소
- 3) 배기가스의 감소 및 시스템 규모 확장의 방지
- 4) 안정성 및 신뢰도의 향상
- 5) 송전 및 부하관리의 유연성

이런 모든 장점들은 전력비용의 감소와 보다좋은 환경이라는 이익을 가져온다.

이러한 이익을 실현하기 위해서는 우선 고온초전도체에 흘릴 수 있는 임계전류밀도가 높아야 하며 쉽게 부서지는 성질이 있는 세라믹 재료를 유연하고 긴 길이로 가공하는 기술을 개발하거나 또는 벌크형태로 응용하는 새로운 기술을 개발하여야 한다. 현재 선재응용기기로는 코일의 형태로 가공하여 이용하는 전동기, 발전기, 변압기와 초고자

장 초전도 전자석이 있으며 벌크형태로 이용하는 기기로는 에너지 저장용 플라이 휠, 영구자석, 전류인입선, 한류기, 자기차폐장치등이 있다. 이외에도 전력분야의 응용을 위한 많은 형태의 초전도체가 있으나 이 글에서는 현재 가장 연구가 활발한 선재 및 벌크의 제조기술 및 응용기기 현황에 대하여 기술하기로 한다.

### 1. 선재 제조기술

고온초전도체를 전력기기에 활용하여 상업화 하기 위한 연구개발 분야에서는 주로 쉽게 부서지는 성질이 있는 세라믹 재료를 유연하고 긴 길이로 가공하며 동시에 전선에 흘릴 수 있는 임계전류를 증가시키는 것에 목표를 두고 추진되어 왔으며 이것은 실질적인 응용을 위해 필수적으로 거쳐야 하는 단계였다. 고온초전도 선재개발의 초기에는 선재 코어 부분의 임계전류밀도( $J_c$ , Critical current density)와 임계전이온도(critical temperature)가 중요관심사 였으나 이제 선재의 기본적인 특성이 어느정도 확보됨에 따라 연구의 중점은 기본적인 특성뿐아니라 선재의 가격, 피복재료의 저항조절, 선재의 인장강도, 낮은 교류손실과 임계전류밀도, 사용과 관계된 공학적 임계전류밀도( $J_e$ , engineering current density, 완성된 선재전체단면적에 의해 계산되는 전류밀도), 권선 임계전류밀도( $J_w$ , winding current density, 완성된 코일 즉 모재, 절연재 및 고정재등의 모든 요소를 포함한 단면적에 의해 계산되는 전류밀도) 등과 같은 공학적인 데이터도 함께 고려하여 연구개발이 진행되고 있다. 표 1 은 각 응용기기에 따라 요구되는 선재의 특성, 가격범위들을 요약한 것이다.

〈표 1〉 응용기기에 따른 고온초전도 선재의 요구사항

응용분야	산업체 요구사항							
	임계전류밀도 (A/mm <sup>2</sup> )	임계 자기장 (T)	사용온도 (K)	임계 전류 (A)	선재 길이 (m)	허용 변형율 (%)	곡률반경 (m)	선재가격 (\$/KAm)
한류기	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>	1-3	77	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	100	0.2	0.1	10-100
대형전동기 (100마력급)	10 <sup>3</sup>	4-5	77	500	1000	0.2-0.3	0.05	<10
발전기 (100MVA)	5×10 <sup>2</sup>	5	20-50	1000	2000	0.2	0.1	10
SMES (1 MWh)	10 <sup>3</sup>	5-10	20-77	104	1000	0.2	1	10-100
송전선	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>	<0.2	77	25-30	100	0.4	2	10-100

## II. 복합초전도 선재의 가공공정

초전도 선재의 가공방법에는 가장 많이 사용되고 있는 OPIT(Oxide Powder in Tube)방법을 비롯하여 dip coating 방법, metallic precursor 방법, jelly roll 방법, 그리고 최근에 개발된 증착법에 의한 박막선재제조법등이 있으나 여기에서는 가장 연구가 활발하게 수행되고 있는 OPIT방법을 위주로 기술한다. OPIT법에 의한 고온초전도 복합선재는 다음과 같은 4단계의 과정을 거쳐서 제작된다. 선재제작의 첫번째 단계는 선재에 사용되는 기초분말을 다양한 화학적 및 기계적인 과정을 걸쳐서 합성하는 과정이다. 이 기초분말은 선재내에서 반응하여 최종적으로 초전도 코어를 형성하는 성분들을 포함하고 있으며 분말의 입도, 조성, 불순물의 혼입등을 잘 조절하여야 한다.

선재제작의 두번째 단계는 준비된 분말을 은 튜브에 채우는 과정이다. 은이나 은 합금을 사용하는 이유는 이 재질에서는 고온에서의 산소확산이 가능하여 초전도체의 반응중에 요구되는 산소분압의 미세한 조절이 가능하기 때문이다. 선재의 기계적인 강도를 증가시키고 교류용에서 나타나는 와전류손실을 줄이기 위하여 여러가지의 은 합금이 시험되고 있다. 와전류에 의한 교류손실을 감소시

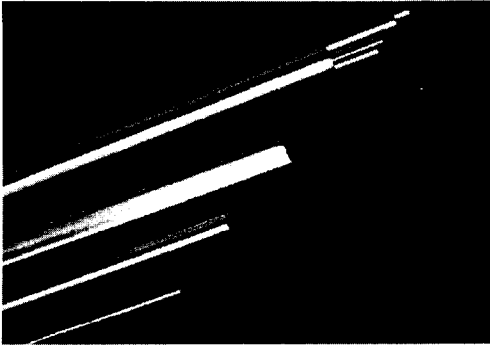
키기 위해서는 피복관의 전기저항이 커야하며 이 문제는 여러연구팀들이 심도있게 연구하고 있다.

세번째 단계는 압출이나 인발에 의하여 선으로 가공하는 과정이다. 이 과정은 최종적인 단심선재가 얻어 질 때 까지 반복된다. 다심선재를 가공하기 위해서는 여러가닥의 단심선재를 묶어서 관에 채운 후 다시 변형시킨다. 반대방향으로 회전하는 한 쌍의 원통형 압연기에 의하여 원형의 선재는 평평한 테이프 형태로 가공되는데 이 방법은 구리선을 생산하는 산업체에서 널리 사용되는 방법이며 금속계 저온초전도 선재제조에도 사용되는 방법이다.

선재가공의 최종단계는 800-900℃ 범위에서의 반복적인 열처리 과정이다. 열처리과정중에 금속 피복관내의 초기분말은 반응하여 초전도재료가 된다.

이러한 과정을 거쳐서 긴 길이의 고온초전도선재를 가공할 수 있게 되었다. 그림 1 은 PIT 공정에 의하여 제조된 여러 가지 형태의 선재를 나타낸 것이다.

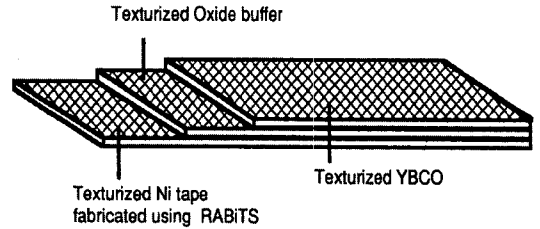
앞에서 언급한 바와 같이 현재 고온초전도 장선재 분야에서 대부분의 선재들은 Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O 초전도체로 만들어진다. BSCCO계의 장점은 선재의 초전도성(임계전류통전성)을 지배하는 texturing 과 입자배열이 최종 열·기계적 공정에 의해 쉽게 이루어질수 있다는 것이다. 선재 가공시 기계적 변형이 BSCCO의 double Bi-O층을 따라 BSCCO



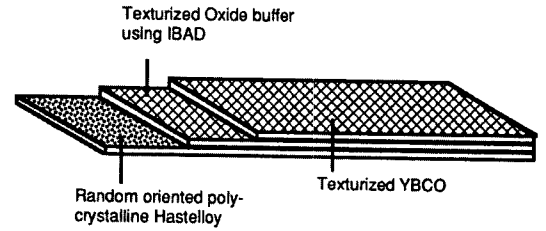
〈그림 1〉 ASC에서 제작한 여러 가지 모양의 고온초전도 선재

를 전단 변형 시키려하고 double Bi-O층의 결합력이 낮기 때문에 mica와 같이 (001) plane으로 잘 분리된다. 그러므로 BSCCO 입자들은 후 열처리동안 강한 (001) texture를 갖게 입자들이 잘 배열된다. 또한 이렇게 제조된 BSCCO선재들의 임계전류밀도는 절대온도 4.2K와 고자장하에서 기존의 NbTi와 Nb3Sn 같은 저온 초전도체들보다 높다.

반면에, YBCO 초전도체는 근본적으로 BSCCO 재료와 같은 입계의 연결성 및 기계적 가공에 의한 배향성 발달이 어려워서 PIT 공정으로 YBCO 선재를 만들려는 초기의 시도들은 실패로 돌아갔다. 일본의 Fujikura 회사의 연구진은 PIT 공정대신에 테이프형의 금속모재에 YBCO 결정립과 결정학적 특성이 비슷하며 배향성이 있는 중간층을 증착하고 이위에 YBCO박막층을 증착하는 공정을 개발하였으며 짧은 길이의 시편에서 높은 임계전류밀도를 보이는 선재를 개발하였다. 그러나 공정 기기가 비싸며 장선화 공정에 대한 해결책이 제시되지 않아서 연구가 활성화되지 못하다가 최근에 들어서 미국 Los Alamos 국립연구소와 Oak Ridge 국립연구소가 새로운 연구결과를 발표하여 주목받고 있다. Los Alamos 국립연구소에서는 그림2(b)에 나타난 것과 같이 hastelloy라는 무배향성 금속판재표면에 IBAD(Ion Beam Assisted Deposition) 방법을 이용하여 cube texture를 가지는 YSZ(Yttrium Stabilized Zirconia)박막을 증착시킨 후 이 박막의 texture를 따라 YBCO 박막을 증착시키는 방법을 개발하였다. Oak Ridge



(a) Ni/Ceria/YBCO layer structure manufactured using RABiTS



(b) Hasloy/YSZ/YBCO layer structure manufactured using IBAD

〈그림 2〉 IBAD 및 RABiTS 방법에 의한 YBCO 초전도 선재의 제조공정

국립연구소에서 개발된 방법은 IBAD를 이용하여 YSZ박막의 texture를 얻는 대신에 RABiTS (Rolling Assited Biaxially Textured Substrate) 라는 공정을 개발하였다(그림2(a) 참조). 이 공정은 입방정계 금속을 압연하여 열처리하면 집합조직이 발달하는 것에 착안하여 집합조직이 있는 얇은 Ni테이프를 제조한 후 PLD(Pulsed Laser Deposition) 이나 sputtering 방법을 이용하여 CeO<sub>2</sub>, YSZ 중간층을 Ni의 집합조직을 따라 증착시키고 여기에 YBCO박막을 증착시키는 방법이다. 두 방법 모두 얇은 금속판위에 YBCO와 결정학적으로 집합조직이 연결될 수 있는 중간층을 형성시킨 후에 YBCO를 올리는 방법으로 현재까지의 결과로는 IBAD방법이 임계전류밀도에서는 더 우수한 값을 나타내고 있으나( $J_c = 1.2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ ) 가격이나 장선화가능성 그리고 공정속도등을 고려하면 RABiTS 방법이 더 현실성이 있는 것으로 평가되고 있다. 한편 Tl계 선재의 경우를 보면, Tl-1223상 고온초전도선재 제조연구의 결과로 얻어지고 있는  $J_c$ 는 짧은 단심선재의 경우에도 1~2

〈표 2〉 고온초전도 선재의 개발현황

Material	Ic(A)	Jc(KA/cm <sup>2</sup> )	conditon	Length(m)	Organization	
Bi-2223/Ag	70	42.5	77K	0.05	Sumitomo	
		27.8		114		
		17.7		1200		
	34	44	77K	1	ASC	
		17.8		280		
		12.7		1160		
	42	21		100	IGC	
				18		1000
		30-33	77K	0.05	Vacuum schmelze/ Siemens	
		15-20		110		
		45	77K	short	FZK(Karlsruhe)	
		23		long		
	34	17	77K	short	KAERI	
				8		long
	36	41	77k	short	KIMM	
				23		20m
				11		100m
Y-123 coated Ni alloy	200	1000	75K, 0T	0.02	LANL	
	13	90	IBAD/PLD	0.07		
Ni	2	700	RABITS/PLD	0.003	ORNL	
	18.1	1,100	77K IBAD/PLD	0.01	Fujikura	
		170	IBAD/PLD	0.8		
		200	PLD only	0.55	Sumitomo	

×104 A/cm<sup>2</sup> 정도로 Bi-2212상이나 Bi-2223상 선재에서 얻고 있는 값보다 몇 배 정도 낮고, 장척 선재의 경우에도 아직 괄목할 만한 진전을 이루지 못하고 있는 실정이다. 이는 BSCCO계에 비하여, texturing과 조직치밀화가 압연공정법으로 제대로 이루어지지 못하기 때문이다.

표 2 는 이제 까지 발표된 초전도선재의 개발현황을 정리한 것으로 고 임계전류값을 가지는 선재의 장선화가 주요연구방향임을 알 수있다.

### III. 선재의 필요특성에 관한 정의

현재 여러종류의 구리산화물 초전도체가 연구되

고 있지만 전력기기용 선재를 위해서는 Bi(Pb) SrCaCuO(BSCCO-2223) 가 가장 주목받고 있다. BSCCO 선재의 임계전류밀도는 자기장의 증가에 따라 감소하며 온도가 감소하면 증가한다. 이에 따라 응용분야에 따라 필요한 선재와 코일의 성능 그리고 자기장의 세기를 평가하게 되며 최적의 작동온도와 재료 및 냉각장치의 비용등을 결정하게 된다. 모든 경우에 냉각비용은 매우 중요한 문제이다. 예를 들면 회전응용기기는 대개 3-5Tesla의 자기장을 필요로 한다. 지금까지 개발된 재료를 사용한다면 운전온도는 절대온도로 20-40K 의 범위로서 이는 기계식 냉동기로 가능한 범위이다.

저온유지를 위한 냉각장치의 가동비용과 비용을 극복하기 위해서는 초전도 응용기기의 사용에 따른 에너지 절감량 및 기기의 크기나 중량의 감소

에 따른 이득이 훨씬 커야한다. 이런 이유로 전동기나 발전기의 규모가 1MW 또는 그 이상이 되어야 한다. 한편 전력송전케이블에서의 자체 유도자기장은 약 0.1Tesla 정도로서 이 경우에는 액체질소온도에서의 운전이 가능하며 따라서 더 많은 경제성을 확보할 수 있다.

필요한 선재의 특성을 정의할 때 그 조건을 명확하게 정의하여야 한다. 임계전류는 전기저항이 나타나는 점에서의 전류값으로 정해진다. 이상적인 초전도체는 임계전류밀도를 초과하면 정상상태 또는 저항이 있는 상태로 급격한 전이를 보인다. 그러나 산화물 복합 선재는 비교적 완만한 전이를 나타낸다. 임계전류밀도는 통상적으로  $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 저항이 발생하는 점을 측정하여 정한다. 그러나 실제의 경우에서 자석이나 기기의 설계자는 이러한 전이상태가 시작하는 부분 근처에서 기기를 사용하기를 원하지 않는다. 이런 이유로 실질적인 응용의 경우에는  $10^{-11}\mu\text{V}\cdot\text{cm}$ 의 한계값이 더 유용한 기준이라고 생각되고 있다. 보통의 경우 이런 새로운 기준을 바탕으로 측정된 임계전류밀도는  $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 값을 기준으로 측정한 경우보다 20% 정도 낮은 결과를 보인다.

초전도 선재에서 세심의 임계전류밀도도 또 하나의 성능평가 기준이다. 실질적인 응용에서는 초전도선재의 전체단면적에 기준한 전류밀도가 중요하며 따라서 공학적 임계전류밀도(Je, engineering critical current density)라는 새로운 기준이 실질적으로 더 중요하게 평가되기 시작하고 있다. 예를 들면 초전도 충전율이 25% (전체 단면적에서 25%가 초전도체이고 75%는 피복관인 경우)이고 임계전류밀도가  $20,000\text{ A}/\text{cm}^2$ 인 경우 공학적 임계전류밀도는  $5,000\text{ A}/\text{cm}^2$ 가 된다. 초전도 코일이나 자석의 설계자에게 적용되는 최종적인 기준은 권선임계전류( $J_w$ , winding critical current density)로서 이것은 전도체의 치수, 유효한 권선 인장강도, 절연층 및 고정용 합침체등을 함께 고려한 값이다.

고온초전도 선재는 다심으로 제조하는 경우 유연성과 강성을 함께 제공한다. 이러한 다심선재는 약 2cm 직경의 원통에 감을 때 5% 정도의 임계

전류 감소를 나타내는데 산화물 복합체에서는 아주 좋은 값이다. 최종적으로 제작된 선재는 권선기를 이용하여 절연층을 첨가하고 코일로 가공할 수 있을 정도로 유연하다. 고온초전도코일에 대한 반복적인 가열, 급냉시험결과 약 5%의 전류밀도 감소를 나타낸다.

선재응용에서 최종적으로 고려해야 하는 점은 교류전류를 사용과 이와 관련된 손실이다. 많은 경우의 고온초전도응용에서 코일에 의하여 발생하는 자기장에 의한 교류손실때문에 어려움을 겪고 있다. 초전도 선재에서의 와전류 손실은 구리선에 비해서는 비교적 적은 양이지만 이를 조절하지 않는 경우 냉각부하를 심각하게 증가시키게 된다. 교류손실은 filament 들 사이에서 발생하는 hysteretic 손실, 일반금속에서 발생하는 eddy current 손실, 일반금속 matrix를 통해서 발생하는 filament coupling 손실등으로부터 유래한다.

전력송전용 케이블에서는(고온초전도선재가 코일형태가 아니고 전도체에 꼬여서 감겨있는 경우) 교류손실은 비교적 심각하지 않으나 만약 고온초전도체를 변압기나 전동기 또는 발전기의 정류자(stator)로 사용하려면 이러한 교류 손실은 감소시켜야 한다. 저항이 큰 피복관을 사용하거나, 세심의 굵기를 가늘게 하거나 꼬인 필라멘트를 사용하므로써 이를 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

국내의 경우 한국기계연구원은  $\sim 2.4 \times 10^4\text{ A}/\text{cm}^2$ 의 임계전류밀도를 갖는 20m급의 BSCCO 선재를 개발하였으며 최근에 100m급의 BSCCO 장선재에서도  $1.5 \times 10^4\text{ A}/\text{cm}^2$ 의 가지는 우수한 선재를 제조하고 있다. 또한 수km급의 선재제조를 위한 접합기술연구, AC손실을 줄이기 위한 기초연구 및 자장하에서 특성열화를 막기 위한 연구등이 활발히 진행되고 있고 한국전기연구소는 조성을 변화시켜 TI계에서 높은 임계전류밀도를 갖는 선재개발 연구가 활발히 진행되고 있음. 한국원자력연구소에서는 BSCCO 장선재를 제작한 후 임계전류 10A급의 초전도모터용 race track 형 pancake coil을 성공적으로 제작하였으며 초전도 자석을 제작중에 있다.

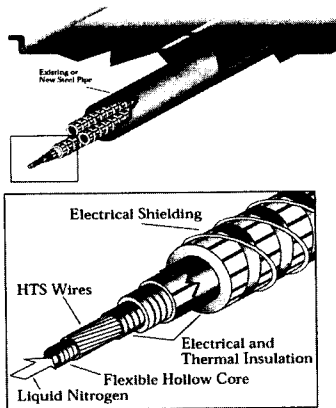
표 3은 현재까지 이루어진 고온초전도 선재응용

〈표 3〉 고온초전도 선재 응용기기 개발현황

개발국	회사		개발 연도
• 고온 초전도 송전 케이블			
이태리 & 미국	Pirelli & ASC, EPRI	길이 50m, dc 3000Amp cable at 77K	1996
덴마크	NKT	길이 30m, 10KV/2KA	1997
일본	TEPCO & Sumitomo(동경전기)	길이 50m, dc 2900A, 0.5-1 GVA, coaxial	1996
독일	Siemens	길이 50-100m, 400MVA, 110V, coaxial	functional model
미국	South wire, ORNL & IGC	길이 30.5m, 1.25KA/12.5KV(27MVA) coaxial	1997
유럽	BICC cable	1-10KA/MV, coaxial	1995
• 고온 초전도 자석			
미국	ASC(American Superconductor Corporation)	BSCCO 2223 선재를 이용하여 3.3 T at 4.2K, 2.6T at 30K	1997
일본	스미토모 전기	BSCCO 선재를 이용하여 20 K 에서 7 T 발생	1997
• 고온 초전도 모터			
미국	Reliance, ASC team	고온초전도 동기모터 개발, 200hP at 27K	현재
• 고온 초전도 한류기			
미국	IGC, Lockheed Martin & SCE	2.2 kV급 Modified Bridge 형 개발 15 kV급 Modified Bridge 형 개발 및 실용화 실증실험 예정	1995년
일본	n/a	6.6 kV급 Magnetic Shielding Type 개발	1996년
한국	연세대학교	440 V급 Magnetic Shielding Type 실험 예정	1997년
• 고온 초전도 변압기			
미국, 스웨덴, 스위스	EdF/ABB/ASC	630 kVA급 고온초전도 변압기 설계, 제작, 실계통 시험완료.	1997
일본	Sumitomo and Fuji	500 KVat 77K 시험	1996

기기에 대한 기술개발현황을 정리한 것이며 그림

3는 ASC에서 개발중인 고온초전도 케이블의 개략도이다.



〈그림 3〉 ASC에서 개발중인 고온초전도 케이블의 개략도

### 2. Bulk 제조기술

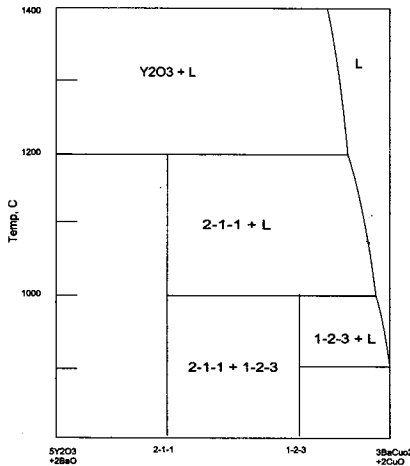
선재응용의 경우와 같이 bulk 형태의 응용에서도 높은 임계전류밀도를 가지는 초전도체가 필요하며 이를 원하는 형태로 가공하여야 한다. 또한 고자장 하에서 발생하는 Lorenz force를 극복해야 하므로 적당한 기계적 강도를 가져야 한다. 벌크응용을 위한 초전도체 제조기술은 크게 두가지로서 일반적인 소결공정과 용융공정으로 나눌 수 있다. 대부분의 경우 높은 임계전류밀도를 얻기 위하여 용융공정을 이용하여 시료를 제작하게 되나(Bi-2212, Y-123) Bi-2223의 경우는 용융공정이 개발되지 않았기 때문에 선재이외의 분야에서는 응

용에 제약이 있다. 그러나 자기차폐의 경우에는 소결공정에 의한 Bi-2223도 높은 임계전이온도에 의하여 다른 재료보다 더 유망하게 생각되고 있으며 용융을 하지 않고 높은 임계전류밀도를 얻는 방법을 개발하고자 노력하고 있다. 여기에서는 bulk용융의 주를 이루는 용융공정 및 이의 응용에 대하여 간략하게 설명한다.

### IV. 용융공정 (Melt processing)

#### 1. Melt-Texture-Growth (MTG)

분말을 용해시켜 초전도입자들을 일방향 성장시키는 용융공정은 Jin 등에 의해 처음 개발되었으며 이후 이 공정을 개선한 여러 공정들이 개발되었다. 그림 4는 Y-Ba-Cu-O 계의 2 원 상태도로서 1200°C와 1000°C 부근에서 포정 반응이 있고 1010°C이하에서 1-2-3 초전도상이 안정한 영역이 된다. 이 공정은 1-2-3 조성의 초전도 분말을 1010°C 이상으로 가열하여 Y2BaCuO5 (2-1-1)과 Ba-Cu-O 액상으로 부분용융 시킨 후 다시



(그림 4) Y-Ba-Cu-O 계의 상태도

1-2-3 상의 안정영역으로 서냉하여 초전도입자들을 성장시키는 방법이다. 이때 초전도입자들이 c-축에 수직인 방향으로 적층되어 성장하므로 이 공



(그림 5) 용융공정법으로 제조한 Y-Ba-Cu-O 초전도체의 미세구조

정의 이름을 Melt-texture growth 라 명명하였으며 최종적으로 그림 5와 같은 미세조직을 가진다. 그러나 전시편에서 모든 초전도입자들이 일방향으로 성장하지는 않지만 결정입계의 misorientation 정도는 대부분 15° 이내로서 고각입계는 잘 형성되지 않는다. 때로 입계에 약간의 미반응 액상이 남아있기도 하지만 고상반응법으로 제조한 초전도체와 비교하여 상대적으로 높은 임계전류밀도를 갖는데 자장이 없는 상태에서 17,000 A/cm<sup>2</sup>, 1 T의 자장하에서는 4,000 A/cm<sup>2</sup> 정도의 값을 보인다.

#### 2. Liquid Phase Processing (LPP)

이 공정은 MTG 공정과 유사한 방법으로, MTG의 열처리공정을 최적화 하여 생성되는 초전도 입자의 크기와 배열성을 개선하고 1-2-3 결정에 포획되는 2-1-1 입자크기를 미세화 시킨 것이다. 냉각속도에 따라 초전도입자의 생성 및 성장속도가 달라지므로 가능한 한 냉각속도를 천천히 (1°C/h) 하여 생성되는 초전도 입자의 성장을 촉진하고 배열성을 개선하였다. 또한 2-1-1 입자의 성장을 억제하기 위하여 (액상 + 2-1-1) 영역에서 유지하는 시간을 단축하고 포정온도 바로 위에서 열처리할 때 유지시간을 짧게 하여 보다 균일한 미세조직을 얻을 수 있다고 알려지고 있으며 임계전류밀도는 77K에서 18,500 A/cm<sup>2</sup> 정도이다.

### 3. Quench-melt growth와 Melt-powder-melt-growth 공정

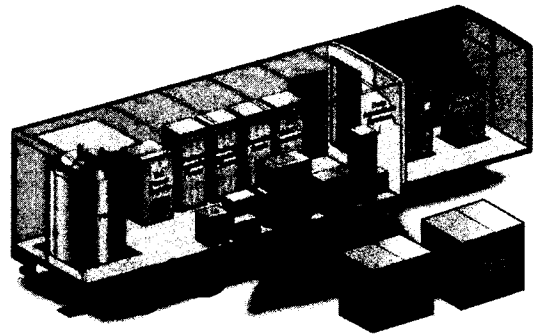
Murakami 등에 의하여 개발된 공정으로 Y-123 분말을 백금도가니에서 1200°C 이상으로 가열하여 ( $Y_2O_3+L$ ) 로 분해시킨후 급냉하여 MTG와 유사한 방법으로 열처리하면 역시 초전도체가 일방향 배열된 조직을 얻을 수 있다. 이 공정의 장점은 초기의 고온가열 및 급냉에 의하여 고온에서 분해된  $Y_2O_3+L$ 가 Y211상을 형성하여 미세한 Y211상을 얻을 수 있으므로 더 큰 자기속박효과를 얻을 수 있다는 점이다. MPMG 공정은 QMG 공정에 급냉 후 분쇄과정을 추가하여  $Y_2O_3+L$ 의 미분쇄를 통하여  $Y_2O_3$ 입자를 더욱 미세하고 균일하게 분포시켜 최종 열처리후 시편의 Y211입자가 1 마이크로 이하로 미세하고 시편전체에 분포되게 하여 자기속박효과를 더욱 크게한 점이다. 이러한 열처리 방법의 개발에 의하여 임계전류밀도가 1 T의 자장에서  $10^4 A/cm^2$  이상인 시료를 제작할 수 있게 되었으며 Y-123 보다 용융온도가 높은 Sm-123나 Nd-123등의 중자결정을 열처리 중의 서냉전에 투입함으로써 결정립의 크기가 10cm 이상인 대면적 시료의 제작도 가능하게 되었다. 이런 시료는 1개로 10kg 이상의 중량체를 부상시킬 수 있는 자기부상력을 보임으로서 플라이휠 개발을 가능하게 하였다. 또한 최근에는 Y-123보다 자기모멘트가 큰 Nd-123계에서 열처리중의 산소분압을 조절하는 Nd-123의 용융공정법이 개발되어 더 큰 부상력을 보이는 시료의 제작기술도 연구되고 있다.

## V. Bulk형 Y-Ba-Cu-O 초전도체의 응용현황

### 1. 전력저장 (Energy Storage)

초전도체의 응용중에서 전력분야에서 가장 효과가 큰 것이 전력저장이다. 전기에너지는 편리성이 뛰어나서 산업과 문화의 발전에 따라 사용량이 증가한다. 그러나 전기에너지의 최대 약점은 저장수단이 적당하지 않다는 점이다. 소규모의 경우 화학전지를 사용할 수 있지만 환경오염 및 저장용량이

너무 적으며 시간이 지나면 효율이 떨어지는 단점이 있다. 전력저장은 일반적으로 최대수요값에 맞추어 건설하는 발전설비의 규모를 크게 줄일 수 있게 해주며 부하에 따른 전압의 불안정, 최대수요에 따른 송배전 설비의 축소, 순간적인 정전이나 전압변동에 의한 정밀기기 및 반도체 산업의 품질향상등에 크게 기여할 수 있다. 최근의 개발방향은 발전시설에 설치하기 위한 전력저장은 규모가 커야 하기 때문에 현실적이지 못하며 전압이나 전류의 안정화를 위한 송배전이나 수요처의 소형 저장설비의 개발이 주 목적이다. 그림 6은 미국의 ASC 회사에서 계획중인 trailer에 실려서 이동가능한 초전도 전력저장장치의 모형을 나타낸 것으로서 안정한 전압이 필요하거나 군사적인 목적에서 무정전 전원이 필요한 시설, 그리고 순간적으로 대전류가 필요한 기기가 장치된 곳으로 이동시켜 사용한다.



(그림 6) 이동식 초전도 전력저장장치 trailer

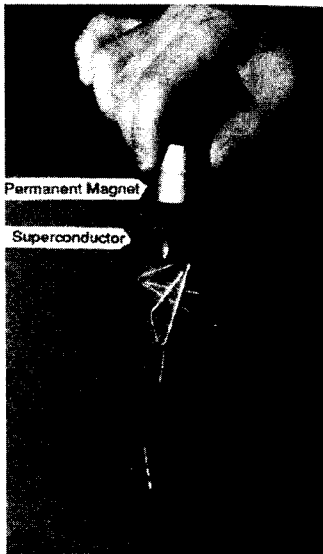
초전도현상을 이용하여 전력을 저장하는 방법에는 초전도 자석으로 구성된 폐쇄된 회로에 전류를 공급하여 저장한 후 원하는 시기에 저장된 전력을 외부로 추출하여 사용하는 SMES(Superconducting magnetic energy storage)와 bulk용 초전도체와 영구자석을 이용하여 원판체를 초전도체 위에서 회전시켜 에너지를 저장한 후 저장된 운동에너지를 다시 전력으로 변환시키는 fly wheel 장치가 있다.

초전도 자석을 사용하는 에너지를 저장방법은 입출력이 빠르고 저장효율이 좋으나 현재의 고온 초전도 선재로는 전자석의 제작이 어려우며 또한



〈표 4〉 여러 가지 에너지 저장방식의 비교

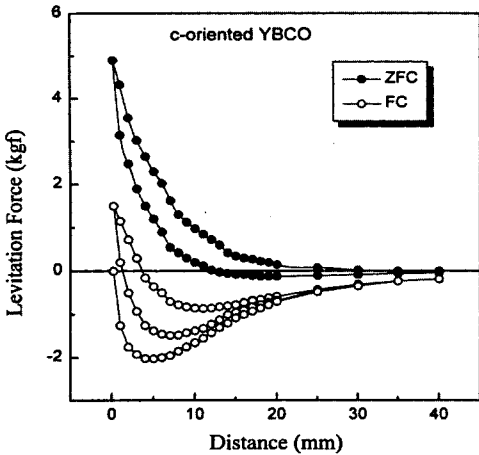
	FES	Batteries	Pumped Hydro	Compressed Air/Gas	Micro-SMES	SMES	Com - bustion Turbine
Efficiency	~90%	~70%	~60%	<50%	~90%	~90%	~50%
Energy Capacity	high	medium	high	high	very low	high	N/A
Modular	yes	yes	no	no	yes	no	>30MW
Cycle Life	unlimate	x100	x1000	x1000	unlimate	unlimate	x1000
Charging Time	minutes	hours	hours	hours	minutes	hours	medium
Site Availability	very high	medium	low	low	high	very low	medium
Stored Energy Measurement	excellent	poor	excellent	excellent	excellent	excellent	N/A
Construction Time	weeks	months	years	years	weeks	years	months
Environmental Impact	benign	large	very large	very large	benign	very large	large
Accident Consequence	low	medium	high	medium	low	high	medium
Environmental Controls	none	significant	some	some	none	none	some
Thermal Requirements	LN2	elevated	none	high	LHe	LHe	high
Availability	under development	now	now Geo limited	now Geo limited	under development	under development	now



〈그림 7〉 영구자석에 매달린 고온초전도체

의 경우 큰 lorentz force와 발생하는 자기장의 영향등 많은 제약이 따르므로 대용량 장치개발에 많은 제약이 있다. 이에 비하여 플라이휠 저장방식은 이제 까지 개발된 bulk형 Y-123를 이용할 수 있으며 장치의 대용량화도 적은규모의 소용량 장치를 병렬연결함으로써 해결할 수있기 때문에 실용화에 훨씬 유리하다고 할 수 있다.

표 4는 여러 가지 에너지 저장방식을 비교한 것으로 플라이휠 저장방식의 우수성을 잘 나타내고 있다. 그림 7에서 보는 것과 같이 용융법으로 제조한 초전도체는 외부자력에 대한 강력한 반발력(Repulsive force) 뿐만 아니라, 자력이 초전도체에 포획되어 발생하는 인력(Attractive force)을 보유하게 되므로 회전체를 초전도체 위에서 안정적 위치에 고정시킬 수 있다. 그림 8은 MTG 공정으로 제조한 초전도체와 영구자석간의 거리에 대



〈그림 8〉 영구자석과 Y-123 고온초전도체의 거리에 따른 자기부상력의 변화

한 힘을 나타낸다. 자석과 초전도체와의 간격이 가까울수록 반발력이 증가함을 알 수 있다. 반대로 초전도체를 자석에서 멀리하게 되면 반발력은 작아지면서 상대적으로 인력이 증가하게 된다. 이러한 인력은 자력이 초전도체에 속박되는 flux pinning force로 인해 발생하는데, 이 때문에 fly wheel이 기계적으로 회전할 때 상당량의 에너지가 소모된다. 이 magnetic damping 현상은 사용되는 영구자석의 형상에 따라 달라진다. Murakami 등은 고리모양의 영구자석을 사용함으로써 damping을 최소화시킬 수 있었다. 또한 회전체의 균일성을 부여하고 회전체와 대기와의 마찰을 줄일 수 있도록 진공중에서 사용한다면 기계적인 회전에 의한 에너지 손실은 상당량 감소시킬 수 있다.

### 2. 자기차폐 (Magnetic shielding)

초전도체는 외부자장을 차폐, 속박하는 효과가 있다. 속박도는 초전도체의 임계전류밀도와 비례한다. 초전도 양자간섭기(SQUID: Superconducting quantum interference device)와 같이 미세한 자력을 측정하는 장비에는 자기장을 차폐하는 기술이 필요하다. 인간의 신체부위에서 발생하는 자력은 대단히 미약하기 때문에 그것을 측정하기 위해서는 외부로부터의 잡음신호를 차폐

하여야 한다. 초전도재료의 완전반자성을 이용하면 외부 자기장의 간섭없이 미세한 자장을 탐지할 수 있다. BSCCO 초전도체를 인체를 수용할 수 있는 크기(내경 65 cm, 길이 200 cm)의 실린더형 초전도 용기를 제작하여 측정된 결과 우수한 자기 차폐성능을 보였으며 초전도체로 제작한 차폐용기는 SQUID를 이용한 neuromagnetic 측정에 사용될 수 있을 것으로 전망된다.

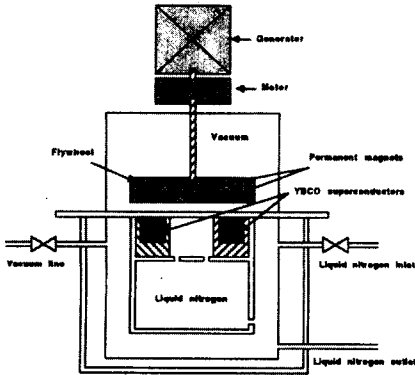
### 3. 초전도 영구자석(Superconducting permanent magnet)

용융법으로 제조된 초전도체는 flux pinning에 의해 외부에서 작용하는 자력을 속박할 수 있다. 영구자석위에 초전도체를 올려 놓고 77 K까지 온도를 서서히 내리면 초전도체는 영구자석으로 부터 발생하는 자력을 속박하게 된다. 이 현상은 초전도체가 자석이 될 수 있음을 의미한다. 초전도체의 임계전류밀도가 높을수록 속박되는 자력의 양은 커지므로 가능한한 임계전류밀도가 높은 초전도체를 만들면 강력한 bulk형 초전도 자석을 제작할 수 있다. Bulk 형 초전도체를 초전도 자석으로 사용하게 되면 초전도체를 선재로 제작할 필요가 없으므로 가공이 단순하다는 잇점이 있다. 용융법으로 제조된 초전도체를 자석으로 이용한 경우 77 K에서 1.35 T의 자력이 보고되었으며 낮은 온도에서 작동할 경우에는 초전도체의 임계전류밀도가 상대적으로 높으므로 더 높은 자장을 발생시킬 수 있다. 예를들어, 용융법으로 제조한 Y-Ba-Cu-O 단결정의 경우 4.2 K에서 6 T 이상의 자력을 발생시킬 수 있다. Bulk 초전도 자석은 비자성체나 약자성체에 일정한 자력을 공급하는 MRI와 같은 장비에 이용될 수 있을 것이다.

### 4. 무접점 베어링 (Contactless bearing)

베어링은 회전축의 처짐을 방지하고 회전력의 손실을 최소화하고자 사용되는 기계부품이다. 일반적으로 사용되는 베어링은 회전축과 접촉하여 축을 지지하므로 접촉에 의한 에너지 손실이 있게 된다. 영구자석의 반발력을 이용하여 베어링을 만들면 접촉에 의한 마찰을 줄일 수 있으나 이 경우

회전자의 위치를 고정하기 위한 특수한 제어장치가 필요하다. 용융법으로 제조된 초전도체는 반발력과 인력을 동시에 보유하므로 회전을 임의의 위치에 접촉 없이 고정시킬 수 있으므로 접촉에 의한 에너지 손실이 발생하지 않으므로 고속으로 회전을 회전시킬 수 있다. Bulk 형 초전도체를 이용한 베어링 시스템에 대한 연구들이 발표된 바 있으며 가능한 부상력을 증진시켜 많은 무게를 회전시키려는 노력이 진행 중이다. 그림 9는 한국원자력 연구소에서 개발한 초전도체 베어링 시스템의 개략도이다. 전자석의 극성을 연속적으로 변화시켜 영구자석을 포함한 회전축을 회전시키며 이때 회전체의 위치를 고정하는 고정자로 초전도체를 사용한다.

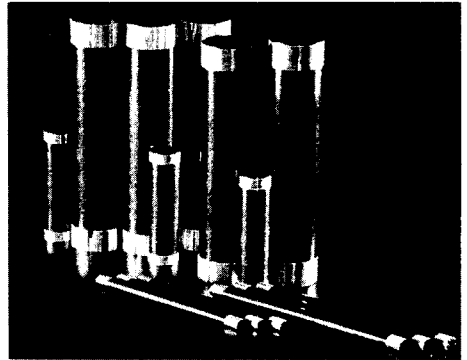


(그림 9) 초전도 베어링의 개략도

### 5. 전류단자 (Current lead)

의료기기로 상용화되고 있는 MRI에 사용되는 자석이나 실험용 초전도자석은 NbTi나 Nb<sub>3</sub>Sn의 화합물 초전도선재를 solenoid 형태로 감아서 제작된다. 초전도자석을 가동하려면 외부에서 전류를 공급해 주어야 하는데, 소규모 실험용 solenoid는 30 A 정도의 전류를, MHD발전용 자석의 경우는 10,000 A의 많은 전류를 공급해야 하며 구리나 황동으로 제작한 전류단자가 현재 사용되고 있다. 이러한 금속재질의 단자들은 열전달이 빠를 뿐만 아니라 전류단자의 전기저항에 의하여 열이 발생하므로 냉각부하를 증가시켜 초전도 자석의 운용 비용을 증가시킨다. 세라믹 고온 초전도체를 전류

단자로 사용하면 저항발생에 따른 열손실이 없으며 작은 단면적에 많은 전류를 흘릴 수 있으므로 냉각부하를 크게 감소시킬 수 있다. 세라믹 초전도체는 초전도전이온도가 액체질소온도 부근이므로 전류단자 전체를 초전도체로 제작하기 위해서는 또 다른 냉각장치가 필요하게 된다. 따라서 현재 재료로 전체 전류단자를 만들기 보다는 상온에서 77K까지는 구리나 황동의 전도성 재질, 77K 이하에서 자석의 가동온도까지는 세라믹 초전도체를 사용하는 hybrid 형의 전류단자가 바람직하다. Argon National Lab.에서 구리선과 BSCCO를 이용하여 hybrid형 초전도 전류단자를 제작하였으며, 이 경우 1000 A 전류를 지속적으로 흘릴 수 있었으며 열손실은 기존의 전류단자에 비해 약 30 % 정도 줄일 수 있었다. 그림 10은 독일의 Hoechst 회사에서 시판하고 있는 Bi 계 전류인입선의 사진이다. 초전도체를 용융공정으로 제조한 것으로 최대 1000 A의 전류를 흘릴 수 있다. 이런 전류단자를 채용하여 oxford, sumitomo 등에서는 액체헬륨을 사용하지 않고 냉동기만에 의해 자석을 냉각시켜 사용하는 Cryogen free 초전도 자석이 개발되어 판매되고 있다.



(그림 10) BSCCO-2212로 만들어진 current lead

## VI. 결 론

지난 수년동안 BSCCO 선재개발분야의 괄목할

연구결과에 따라 초기에 우려 했던 많은 어려움들을 극복 할 수 있는 가능성이 제시 되었지만 고온 고자장하에서 최대의 성능을 발휘할 수 있는 고임계 전류를 갖는 장선재는 아직도 많은 연구가 필요하다. 입계의 weak link와 flux creep 같은 문제들을 어떻게 최소화 하느냐와 같은 재료적 측면과 균일하고 재현 가능한 성질들을 갖춘 1km가 넘는 장선들을 어떻게 제조하느냐와 같은 공정적 측면들은 아직도 연구 개발해야 할 과제들이다. bulk 제조분야에서는 소결공정과 용융공정이 거의 확립됨에 따라 이를 이용하는 한류기나 current lead와 같은 분야에서는 이미 실용화를 이루었으며 플라이휠 분야도 활발하게 연구되고 있으며 새로운 공정개발도 추진되고 있다.

## 저 자 소개



### 洪 啓 源

1956년 4월 3일 생, 1978. 2 서울대학교 요업공학과 졸업(학사), 1980. 2 한국과학원 재료공학과 졸업(석사), 1983. 2 한국과학기술원 재료공학과 졸업(공학박사), 1983. 3~현재 한국원자력연구소,

1983. 6~1984. 6 캐나다 원자력공사, post doc, <주관 심분야: 고온초전도 재료합성 및 응용 고기능성 세라믹스 제조(SiC, TiO<sub>2</sub>)>