



한국에서의 초전도 재료 및 전자소자 연구

김 상 현
경상대학교 공과대학 전기공학과 교수

1. 서론

크게 완전 도전성과 완전 반자성, 조셉슨 효과로 대표되는 초전도 현상이 발견된 이후 초전도재료가 갖는 대전류 통전, 고자장 발생, 저 손실, 고속, 고효율 등의 장점들은 전력, 교통, 의료, 전자소자 등의 분야에 획기적인 응용을 가능하게 하고 있다. 하지만 초전도 재료는 응용을 위해서 아직도 많은 제약들이 있다. 초전도 현상 발견 이후 임계온도(T_c), 임계전류밀도(J_c) 및 임계자기장(H_c)을 향상시키기 위한 연구가 끊임없이 진행되어왔다. 이는 T_c 가 높으면 초전도재료의 냉각을 용이하게 하여 경제적이고, J_c 및 H_c 가 높으면 작은 단면의 초전도 도체에 대전류를 통전 할 수 있기 때문이다. 그리고 적은 초전도 도체로서 고자장을 발생시킬 수 있어 경제적인 뿐만 아니라 응용 기기를 소형화 할 수 있기 때문이다. T_c 는 응용에 있어서 비용의 상당부분을 차지하는 냉각 시스템의 경비를 나타내므로 가장 중요한 요소라고 할 수 있다.

그림 1에 초전도재료의 임계온도의 변천사를 보여 주고 있는데 최근 임계온도의 비약적인 상승을 눈여겨 볼만하다. 하지만 아직도 극저온 영역이라 하겠다.

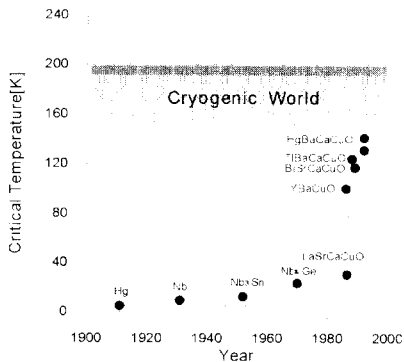


그림 1. 초전도 재료의 임계온도 변천

먼저 초전도 재료의 발전 과정을 살펴보면 1911년 네덜란드의 Onnes가 4.2K에서 Hg의 초전도 현상을 발견하고, 1930년대에 네덜란드 De Hass와 Vood가 Pb-Bi 합금을 그리고 1957년 영국의 Matthias에 비해 금속간 화합물초전도체가 발견되었으며 Kunzler는 Nb₃Sn 화합물을 최초로 선재화 하는데 성공하였다. Nb₃Sn 화합물 초전도재료는 임계자장이 높아 고자장 발생용 초전도 마그네트 재료로서 각광을 받았다. 그러나 그후에 나온 Nb-Ti 초전도선은 구리안정화재를 피복 하면서 가공성이 아주 우수하고 가공열처리를 반복하는 것에 의하여 J_c 특성이 크게 향상되기 때문에 지금 가장 많이 사용하고 있는 대표적인 초전도선이 되었다. 1986년 미국의 Chu와 Wu에 의해 T_c 가 90K 이상인 Y-Ba-Cu-O계 고온초전도 재료가 발견되면서 이전의 저온초전도 재료와 구분되어지고, 그 동안 여러가지 제약으로 인하여 소외되었던 초전도재료의 탐색이 활기를 되찾았다.

표1에 대표적인 저온초전도 재료의 J_c 특성 및 응용분야를 나타낸다[1].

Y-Ba-Cu-O계 고온초전도 재료의 등장 이후 1988

표 1. 대표적인 저온초전도 재료와 특성 및 응용분야

초전도 재료	T_c (K)	H_c (T)	J_c (A/m ²)	응용 분야
Nb-Ti	10.4	115	$\sim 10^9$ (4.2K, 8T)	MRI, NMR, SMES, 발전기, 임자가속기, 핵융합용 폴로이달 코일, 자기부상열차, 변압기, 한류기, 결정성장장치
Nb ₃ Sn	18	22	$\sim 10^9$ (4.2K, 12T)	NMR, 핵융합용 토로이달코일
Nb ₃ Al	18.9	32	$\sim 10^9$ (4.2K, 12T)	고자장마그네트

표 2. 대표적인 고온초전도 재료

물 질	Tc(K)	notations	발 견 자
(La _{2-x} Sr _x)CuO ₄	38	214	J. G. Bendorz
(La _{2-x} Sr _x)CaCu ₂ O ₆	60	-	K. A. Muller
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	92	Y-123(YBCO)	M. K. Wu et al.
Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈	85	Bi-2212	H. Maeda et al.
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₂ O ₁₀	110	Bi-2223	
TlBa ₂ CaCu ₃ O ₇	110	Tl-1223	Z. Z. Sheng and A. M. Hermann
Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	125	Tl-2223	
(Nd _{2-x} Ce _x)CuO ₄	30	T'	Y. Tokura et al.
(Nd, Ce, Sr)CuO ₄	30	T*	
Ba _{1-x} K _x BiO ₃	30	BKBO	L. F. Mattheiss et al
Hg-Ba-Ca-Cu-O	94	Hg-1212.	S. N. Putilin et al
	133	Hg-1223	A. Schilling et al

년 일본의 Maeda가 Bi-Sr-Ca-Cu-O를, 미국의 Hermann이 Tc=125K인 Tl-Ba-Ca-Cu-O를 그리고 1993년 스위스의 Schilling이 Tc=133K인 Hg-Ba-Ca-Cu-O 초전도 재료를 발견하여 비약적인 임계온도의 상승이 이루어졌다. 고온초전도 재료는 액체 He를 냉매로 하는 기존의 Nb₃Sn, Nb-Ti 등의 저온 금속 초전도 재료와는 달리 저가인 (300원/l)인 액체 N₂를 냉매로 사용할 수 있어 많은 응용 연구가 이루어지고 있다.

대표적인 고온초전도 재료의 발견 현황은 표 2와 같다. 초전도 현상은 한 분야에서 노벨상을 4번에 걸쳐 받았을 만큼 전 세계적으로 많은 과학자들에게 큰 영향을 준 과학기술의 커다란 발견이었다. 21세기를 개척하는 기초기술중 신소재 분야에서 첫째로 꼽히고 있는 고온초전도 재료를 중심으로 본 원고에서는 국내외 각 연구 그룹에서 행해지는 연구 성과 및 연구 동향, 전망 등에 대하여 설명한다.

2. 저온초전도선

임계온도가 낮은 금속계 저온초전도재료를 이용한 선재화 연구는 이미 1960년대 초부터 미국, 일본, 러시아, 유럽 등지에서 활발히 연구되어 다양한 초전도선 제품이 개발, 생산되고 있지만 국내의 경우는 이보다 아주 늦게 1990년대 초부터 시작되었다. 금속계 초전도선에 대한 연구 역사는 선진 외국에 비하여 많이 뒤떨어져 있으며 한국전기연구소가 "저온초전도선재개발" 생기발과제에서 MRI 마그네트용 Nb-Ti 초전도선 개발 연구를 수행하기 시작한 1992년부터 본격적 연구가 시작되었다고 할

수 있다. 이시기에 600 ton 간접압출기가 도입되어 필라멘트수가 20~40개가 되는 여러 형태의 MRI용 Nb-Ti 초전도선이 국내 최초로 제조되었으며 4.2 K 액체헬륨 온도 중에서 외부 자장을 가변시키면서 선재의 임계전류를 평가할 수 있는 측정 시스템이 개발되어 저온초전도 선재 개발을 위한 연구 기반이 마련되었다고 할 수 있다. "저온초전도선재개발"과제는 산·학·연 공동으로 수행된 것으로 한국전기연구소 이외에도 산업과학기술연구소, 한국기계연구원등이 참가하여 저온초전도선재의 가공 및 미세조직 해석 등의 기초 연구를 수행하였고 한국자원연구소에서는 전자빔 용해장치를 이용하여 Nb-Ti 잉고트를 용해 제조하는데 성공하였다. 또한 국내 업체 중에서는 최초로 대성전선이 1992년부터 초전도선 가공 업체로 참여하고 있으며 MRI용 초전도선 시제품을 생산하여 한국전기연구소에서 제작한 MRI 마그네트에 사용되었다.

그림 2는 한국전기연구소와 대성전선이 공동으로 개발한 MRI용 Nb-Ti 초전도선의 임계전류특성을 나타낸 것으로 외국 선재에 비하여 임계전류 값이 우수한 것으로 판명되었다. 그림 3은 24심 선재의 단면을 나타낸 것으로 무산소동의 매트릭스에 Nb-Ti 필라멘트가 원주 상으로 24개 배치된 형태를 하고 있다. MRI용 Nb-Ti 초전도선은 그후 보건복지부 주관의 의료공학연구개발사업(G7과제)에서 계속 수행 중으로 현재 필라멘트가 50심 이상이 되는 극세다심형 Nb-Ti 초전도선이 개발 중에 있다. 이러한 극세다심 Nb-Ti 초전도선은 동비가 작은 만큼 더 많은 전류를 흘릴 수 있고 향후 고자장 MRI, NMR 등에 적용될 수 있을 것으로 예상되고 있다.

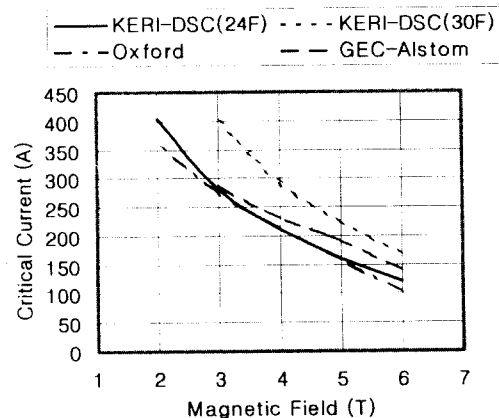


그림 2. 한국전기연구소와 대성전선(주)이 공동 개발한 MRI용 Nb-Ti 초전도선의 임계전류 특성치

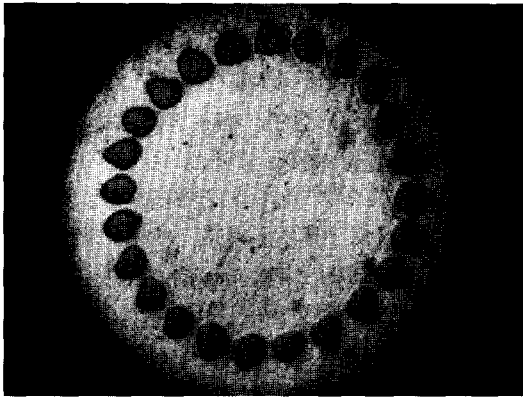


그림 3. 한국전기연구소에서 대성전선과 공동으로 개발한 24심 MRI용 Nb-Ti 초전도선의 단면

고자장 발생이 가능한 화합물계의 Nb₃Sn 초전도선 개발은 차세대 초전도 핵융합 토카막장치개발(KSTAR 프로젝트) G7과제에서 산·학·연 공동으로 수행되고 있으며 관내연선도체(CICC)에 들어가는 소선 개발을 한국전기연구소와 대성전선, 고려제강이 담당하여 개발하고 있다. Nb₃Sn 초전도선은 여러가지 방법으로 제조될 수 있으나 KSTAR에서는 번거로운 중간소둔 공정을 생략하기 위하여 내부확산법을 채택하고 있으며 선재 설계 및 공정 개발은 한국전기연구소에서 선선 및 필라멘트 트위스트 가공은 대성전선 그리고 도체의 교류손실 저감을 위한 Cr코팅은 성균관대 및 고려제강에서 담당하고 있다. 열처리 완료된 선재의 특성 평가는 한국전기연구소, 기초과학지원연구소, 삼성종합기술원등이 분담하여 수행될 예정이며 임계전류에 대해서는 시스템 구축과 아울러 평가방법이 이미 표준화되어 있고 RRR평가에 대해서도 측정장치를 제작하여 IEC/TC90 국제 비교시험에서 평균치에 가장 근접한 좋은 결과(2)가 나왔다. 현재 KSTAR에서 사용될 Nb₃Sn 초전도소선의 Jc 와 교류손실 사양이 각각 700 A/mm² (12 T, 4.2 K) 이상, 200 mJ/cc(±3 T) 이하로 요구치가 ITER수준을 상회하기 때문에 빌렛부터 가공하는 자체 개발과 함께 미국의 IGC사나 일본의 미쯔비시사로부터 직경 7 mm 정도의 중간 봉재를 수입하여 대성전선에서 후가공하는 개발 계획을 세우고 있으며 이미 시험적으로 수입하여 국내에서 가공하고 열처리한 HP3 선재에서 만족할 만한 Jc 값을 확인하고 있다.

그림4는 IGC사에서 개발하여 KSTAR에 납품할 예정의 HP3봉재를 가공한 선재 단면을 나타낸 것으로 Sn코아 주위로 Nb필라멘트가 원주 상으로 4열 배치된 sub-element가 집합된 구조를 하고있으며 매트릭스는 순구리로 이루어졌다. 최종

0.8mm 직경까지 가공한 HP3선재를 660℃에서 반응 열처리하면 내부 Sn이 Nb쪽으로 확산하여 Nb₃Sn을 생성한다.

그림5는 Nb₃Sn 초전도소선과 구리선을 2:1 비율로 연선하여 금속관에 삽입된 구조를 하고있는 KSTAR-TF코일용 도체의 구조와 사양을 보여주고 있다. KSTAR마그네트에서는 전자력이 엄청나고 초임계헬륨을 내부로 강제 순환시키면서 고도의 안정성을 확보하여야 되기 때문에 저온 강도가 강한 재질의 금속이 초전도케이블 부분을 둘러싼 구조의 관내연선형 도체(Cable-In-Conduit Conductor)가 사용될 예정이다.

3. 고온초전도재료 및 전자소자

고온초전도체에 대한 연구는 서울대 물리학과에서 YBaCuO의 합성에 최초로 성공하고, 이어서 표준연구소, 및 대학 등에서 연구성과가 발표되면서 물리, 화학, 재료분야에서 연구가 광범위하게 확산되고 고온초전도 연구 인구가 급격히 증가하는 현상이 생겼다. 과학기술부에서도 고온초전도 연구의 중요성을 인식하고 1987년부터 표준연구원을 주관기관으로 선정하여 국내의 산·학·연 연구기관에 장기적으로 연구비를 지원하고 있으며 현재는 전자소자 및 전력응용기술 두 분야로 크게 나누어서 현재 중점국가연구사업형태 연구가 수행되고 있다.

지금까지 고온초전도국책과제에서 진행된 주요 사업내용을 보면 1단계(1987.11~1990.9)는 기반 기술확립을 목표로 기초, 물성, 합성, 가공, 응용의 4개 분과로 나누어 연구를 수행하였으며, 2단계(1990.10~1993.10)는 핵심기술개발을 목표로 SQUID(표준연), 센서(과기연), 선재(기계연), 한·일협력(과기연)의 4개 분야로 나누었다. 3단계(1993.12~1997.4)는 응용기술 개발을 목표로 SQUID(표준연), 선재(기계연), 센서(과기연)의 3개 분과로 나누어 추진했다. 이와 같은 연구사업의 추진으로 연구 인력이 많이 배출되고 외국의 논문지에 연구 논문이 많이 발표되는 등 연구 성과면에서 어느 정도 성공을 거두었다고 할 수 있으나 실용화 목표를 지향한 효율적 연구체계를 구축하는 것이 과제로 남아있다. 최근의 고온초전도 재료 연구는 국내외 전반적으로 안정되어 가는 경향으로 LG전자기술원, 삼성종합기술원 등 기업의 참여로 특히 응용연구에 박차를 가하고 있지만 아직 산업체에서의 적극적인 참여가 필요하다. 고온초전도

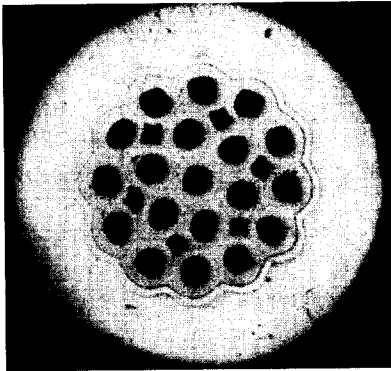


그림 4. KSTAR마그네트에 사용될 HP3 선재 단면

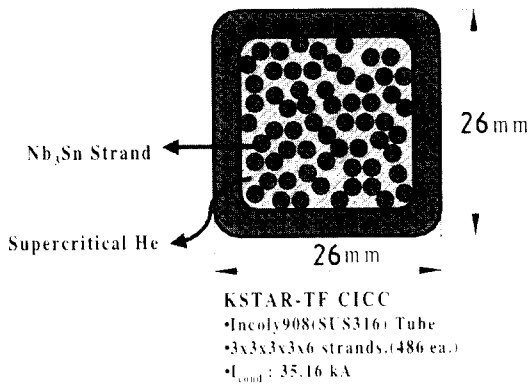


그림 5. KSTAR-TF코일에 사용될 관내연선도체의 구조 및 사양



그림 6. 한국전기연구소에서 제조한 100 m급의 Bi-2223고온 초전도 선재

재료는 전력분야에서 응용하기 위한 초전도 선재, 테이프와 전자소자에 응용하기 위한 박막으로 분류할 수 있는데 이에 초점을 두고 국내 현황을 설명하고자 한다.

3.1 고온초전도선재 및 벌크

고온초전도체는 주로 전력분야에서 선재나 테이프의 형태로 응용되어지고 있다. 고온초전도선재나 테이프를 케이블 형태로 집합하여 대전류를 송전하는 초전도 송전 케이블에 응용하거나, 초전도 코일로 권선하여 고자장마그네트, 에너지저장장치(SMES), 변압기 등에 응용되어진다. 초전도 벌크 재료는 current lead 및 자기적 특성을 이용한 fly wheel, 자기차폐, 무접촉 베어링 등의 분야에 응용되어진다. 국내에서는 Bi-2223선재, Y계 후막선재, Tl-1223상 선재 등의 Jc향상, 장선화, 교류손실 최소화 등에 초점을 두고 한국기계연구원, 한국전기연구소, 한국원자력연구소 등에서 각각 개발하고 있다. 특히 한국기계연구원과 한국전기

연구소는 PIT법으로 Bi-2223선재 개발에 주력하여 한국기계연구원에서는 액체질소온도에서 임계전류 11 A를 나타내는 100 m 급의 선재를 개발하였고 한국전기연구소에서도 기관고유사업에서 수행한 연구결과로 그림6에 보이는 것처럼 최근에 100m 급에서 13 A의 임계전류를 흘릴 수 있는 선재 개발에 성공하였다.

Bi-2223 고온초전도선재는 외국에서는 이미 ASC, Eurus, NST등의 벤처기업에서 활발하게

상용화를 추진하고 있으며 현재 1km가 넘는 선재도 시판되고 있다. 최근에 우리나라에서도 앞으로 외국과 경쟁이 가능한 선재 개발을 위해서는 업체와 출연연구소가 유기적으로 연계된 개발 전략이 필요하다 하겠다. Tl-1223상 고온초전도체는 다른 고온초전도체에 비하여 비가역전 위치가 높고 40 K 온도 부근에서도 Jc가 높기 때문에 Bi계와 더불어 국내에서도 한국전기연구소에서 선재화 연구가 이루어지고 있다. 명목조성과 가공열처리 조건을 최적화 함으로서 단척시료에서 77 K, 0 T중의 Jc가 2.5×10^4 A/cm² 되는 선재를 제조[3]하고 있다. 한국에서의 고온초전도선재 연구 결과는 길이와 특성 면에서 아직은 선진외국에 비하여 다소 떨어지는 것으로 지속적으로 연구 개발할 필요가 있다. 마그네트 응용을 고려할 때 순은으로 피복한 고온초전도선재는 기계적 강도가 문제가 된다. 기계적 특성을 향상시키기 위한 Ag 피복재의 합금화 연구도 착실히 진행되고 있으며 한국기계연구원에서 Ag-Au-Mg합금을 개발하여 높은 기계적 강도와 Jc를 확인하고 있다.[4] 한편 Bi-2223선

재의 J_c 는 공정변수에 아주 민감하고 미세조직의 제어가 어렵다. 또한 필라멘트의 소세이징 현상은 장척화 개발에서 반드시 해결해야할 과제로 성균관대, 전북대 등에서 공정변수가 J_c 와 가공성에 미치는 영향 등을 조사하고 있으며 한국원자력연구소에서는 후막프로세스를 이용하여 차세대 YBCO 선재를 개발하고 있다. YBCO 벌크에 대한 연구는 한국원자력연구소에서 가장 활발하게 수행하고 있으며 최근에 대형 벌크를 제조하여 fly wheel에 응용하고 있으며, 액상용침법으로 제조한 Y-123 벌크에서 공정변수에 따른 Y-211 입자의 분포변화 및 YBCO 초전도체의 자기부상력을 조사하고 있다. 연세대에서는 Bi-2212 벌크를 이용한 한류기에 대한 연구를 수행하고 있다. 고온초전도선재의 교류손실 평가에 대한 연구는 선진 외국에 비하여 많이 뒤떨어진 분야로 연세대, 경상대 등에서 평가방법의 개발 및 해석연구를 수행하고 있다.

Bi-2223 고온초전도선재는 외국에서는 이미 ASC, Eurus, NST 등의 벤처기업에서 활발하게 상용화를 추진하고 있으며 현재 1 km가 넘는 선재도 시판되고 있다. 최근에 우리나라에서도 앞으로 외국과 경쟁이 가능한 선재 개발을 위해서는 업체와 출연연구소가 유기적으로 연계된 개발 전략이 필요하다 하겠다. Tl-1223상 고온초전도체는 다른 고온초전도체에 비하여 비가역선 위치가 높고 40 K 온도 부근에서도 J_c 가 높기 때문에 Bi계와 더불어 국내에서도 한국전기연구소에서 선재화 연구가 이루어지고 있다. 명목조성과 가공열처리 조건을 최적화 함으로서 단척시료에서 77 K, 0 T 중의 J_c 가 2.5×10^4 A/cm² 되는 선재를 제조[3]하고 있다. 한국에서의 고온초전도선재 연구 결과는 길이와 특성 면에서 아직은 선진외국에 비하여 다소 떨어지는 것으로 지속적으로 연구 개발할 필요가 있다. 마그네트 응용을 고려할 때 순은으로 피복한 고온초전도선재는 기계적 강도가 문제가 된다. 기계적 특성을 향상시키기 위한 Ag 피복재의 합금화 연구도 착실히 진행되고 있으며 한국기계연구원에서 Ag-Au-Mg 합금을 개발하여 높은 기계적 강도와 J_c 를 확인하고 있다.[4] 한편 Bi-2223 선재의 J_c 는 공정변수에 아주 민감하고 미세조직의 제어가 어렵다. 또한 필라멘트의 소세이징 현상은 장척화 개발에서 반드시 해결해야할 과제로 성균관대, 전북대 등에서 공정변수가 J_c 와 가공성에 미치는 영향 등을 조사하고 있으며 한국원자력연구소에서는 후막프로세스를 이용하여 차세대 YBCO

선재를 개발하고 있다. YBCO 벌크에 대한 연구는 한국원자력연구소에서 가장 활발하게 수행하고 있으며 최근에 대형 벌크를 제조하여 fly wheel에 응용하고 있으며, 액상용침법으로 제조한 Y-123 벌크에서 공정변수에 따른 Y-211 입자의 분포변화 및 YBCO 초전도체의 자기부상력을 조사하고 있다. 연세대에서는 Bi-2212 벌크를 이용한 한류기에 대한 연구를 수행하고 있다. 고온초전도선재의 교류손실 평가에 대한 연구는 선진 외국에 비하여 많이 뒤떨어진 분야로 연세대, 경상대 등에서 평가방법의 개발 및 해석연구를 수행하고 있다.

3.2 고온초전도 박막 및 전자소자

무선통신분야에서의 안테나, 필터 및 자기센서, 조셉슨 소자 등 통신기술의 발달과 더불어 초전도 전자소자기술이 상당한 진전을 보이고 있다. 특히 마이크로파 응용 분야에서는 실용화 단계에 접어들고 있으며, 미세 자기장까지 측정 가능한 SQUID의 경우는 의학이나 비파괴 검사 분야에서 각광받고 있다. 조셉슨 소자는 디지털 소자개발에 응용되어지고 있다. 이러한 초전도 소자는 고주파 손실이 적고, 높은 감도와 빠른 응답특성을 가지고 있으며 소형화할 수 있는 장점이 있다. 고온초전도 재료의 전자 소자 응용은 박막 형태로 제조되어 패터닝 과정을 거쳐 필요한 형태로 가공되어져 전자소자응용에 앞서 전자소자에서 요구되어지는 특성을 가지는 박막 제작에 대한 연구가 선행되어야한다. 고온초전도 박막재료로는 $YBa_2Cu_3O_x$ (Y-123), $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ (Bi-2223), $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_x$ (Tl-2223) 등이 있다. Y-123는 단일상의 박막제작이 용이하며, Bi-2223는 판상구조로서 layer-by-layer 박막제작에 유리하다. 그리고 Tl-2223의 경우는 임계온도가 높고 Bi-2223와 같은 판상구조를 가지고 있다. 하지만 현재, Bi와 TlO의 휘발성의 단점과 coherence 길이가 $YBa_2Cu_3O_x$ 의 경우가 길어 $YBa_2Cu_3O_x$ 가 박막 제조에 유리하다.

박막 제작은 한국과학기술연구원 에서 T_c 가 89.8 K, J_c 가 2.8×10^6 A/cm²의 양질의 c축 박막을 off-axis rf 마그네트론 스퍼터링법으로 증착하였다[5]. 삼성종합기술원에서도 초전도 소자의 집적화에 필수적인 Si기판을 사용하여 박막을 제조했으며, 한국표준과학연구원 초전도그룹, 한국전자통신연구원 기초기술연구부, 한국과학기술원 응용

물리연구실, 서울대 등에서도 이와 같은 연구를 이미 수행한바 있다. 그러나 최근은 레이저 증착법이 더욱 중요한 기술로 부각되고 있어 대부분의 박막응용 그룹에서 레이저 증착장치를 설치하고 있다. 한국표준과학연구원에서는 펄스레이저 증착법으로 T_c 가 89.5K, J_c 가 1.5×10^6 A/cm²인 박막을 Al₂O₃ 단결정 기판 위에 제조하였다[6]. 한국표준과학연구원과 한국전자통신연구원에서는 a-축 YBCO박막을 제작하고 각각 85K, 88K인 T_c 를 얻고 있다. LG전자기술원, 삼성종합기술원, 한국과학기술연구원, 한국전자통신연구원 및 연세대, 서강대 등을 비롯한 각 대학의 물리, 재료과 및 전기, 전자공학과에서도 연구가 진행되고 있다.

한편 국내에서 가장 먼저 제작된 고온초전도 SQUID는 한국표준과학연구원에서 YBCO 후막을 이용하여 제작된 DC SQUID 이나 최근은 다양한 형태의 접합 연구가 시도되는 SQUID제작을 하고 있다. LG전자기술원에서 두 개의 SrTiO₃ 단결정 기판을 결정축이 어긋나게(30° 내외) 접합시켜 제작한 쌍결정 기판위에 YBCO박막을 제작한 후 포토리소그라피와 이온 식각법으로 패터하여 조셉슨 접합을 형성하고 DC SQUID를 제작했다. 또한 한국과학기술연구원에서도 biepitaxy 접합을 이용한 DC SQUID를 제작했다.

고온초전도 필터와 공진기 등의 마이크로파 소자는 한국전자통신연구원, 삼성종합기술원, 한국

과학기술연구원, 건국대, LG중앙 연구소 등에서 1992년 말부터 집중적으로 연구하여 부분적으로 성공을 거두고 있다. 외국에 비해 아직 미비하나 YBCO 마이크로스트립 2극 필터의 경우 삽입손실 =1.6dB, 중심 주파수=10.7GHz, 대역폭=2.3%이며 링 공진기의 경우 Q=490(40K에서)이다.

그림7은 한국전자통신연구원 성건용 박사 팀에서 개발한 세계최초, 수백기가급 고온초전도 디지털 소자를 보여주고 있다[7]. 그 외에 초전도 안테나에 대하여 한국전자통신연구원, 전북대에서 연구 중이며 광센서에 대한 연구는 한국과학기술연구원 등에서 추진하고 있다.

4. 기술의 전망

저온초전도선재 분야에서는 세계적으로 임계전류밀도특성을 더욱 향상시키기 위한 연구가 다시 주목을 받으면서 artificial pinning법을 이용한 Nb-Ti선재 개발이 다시 활기를 띠고 있으며 화합물계에서는 고자장용 J_c 특성과 기계적 특성이 우수한 Nb₃Al선재가 새로운 제조법의 개발로 양산체제로 들어갈 것으로 판단된다. 국내에서도 KSTAR관련으로 Nb₃Sn초전도선이 자체 개발되면서 상용화를 위한 기술기반이 구축되어 향후 NMR과 같은 고자장용 초전도기기 개발에 크게 활용될 것으로 생각된다. 고온초전도선재는 현재 여러 가지 문제를 안고 있다. 그 중에서 다른 저온초전도선재에 비하여 그림8에서 나타낸 것과 같이 수십, 수백배 높은 성능 대 가격 비는 상용화의 가장 큰 걸림돌이 되고 있다. 최근에 저온공학기술의 발전으로 저렴한 극저온냉동기가 개발되면서 급속계 저온초전도선을 이용한 마그네트도 전도냉각방식에 의하여 무헬륨으로 운전되는 제품이 시판되고 있다. 따라서 선재 가격과 냉각 비용을 고려한 전체적인 비용 면에서 아직은 전기분야에서의 고온초전도선재를 이용한 상용화 제품 개발은 초고자장 발생 응용(1 GHz NMR)을 제외하고는 다소 열세에 있다고 할 수 있다. 이를 극복하기 위해서는 끊임없는 공정 개선과 새로운 기술의 도입이 요구된다고 하겠다. 최근의 저온초전도 재료로는 NbN, MoC, TiN 등 Bi형(NaCl형) 초전도 재료가 새로운 화제를 일으키고 있다. 박막 합성기술의 진보와 함께 일시 Nb₃Sn, V₃Si 등의 A15형 화합물의 배후에 가렸지만 다시 응용 면에서도 높은 T_c 물질로서 각광을 받고 있다. 특히

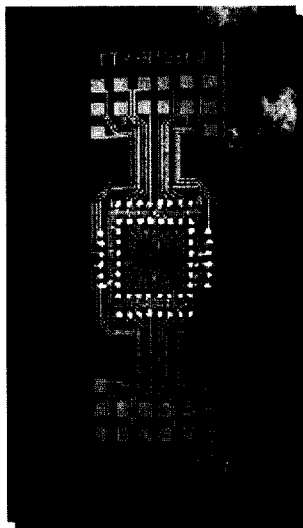


그림 7. 한국전자통신연구원
에서개발한 디지털 소자

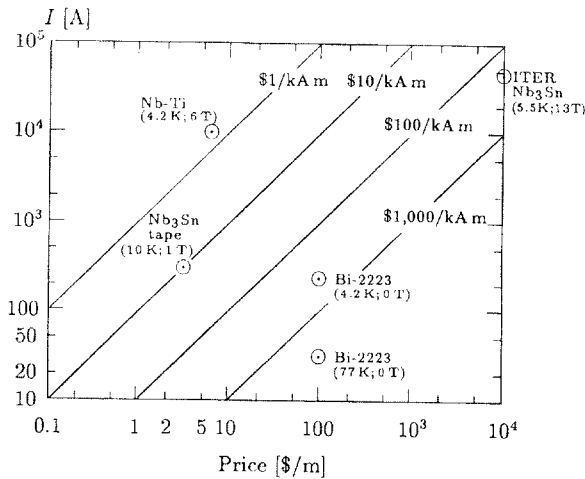


그림 8. 대표적인 초전도선재의 성능대비 가격(9)

비철금속 원소 및 빈 격자점의 엄밀한 제어, 결합을 도입한 경우의 정밀한 band 계산에 관한 연구와 높은 Tc를 얻는 연구등이 계속되고 있다. 또한 TCNQ, (TMTSF)₂PF₆, (TMTSF)₂FSO₃ 등의 유기 고분자 초전도 재료도 일본, 러시아, 미국 등에서 개발되고 있다. 현재 유기 초전도 재료의 Tc는 기존의 Nb, Pb과 비등한 단계이나 차후 새로운 전개를 보일 것이다. Jc 향상, 가공문제, 기초 이론 등의 문제로 고온초전도 재료는 발견 초기의 흥분된 상태와는 달리 많은 응용이 현실화되지는 못하였지만 YBCO 박막 집적형 SQUID(미국의 Conductus사)가 상용화되었으며, 필터, 공진기 등의 수동소자 시제품(미국의 STI사)이 제작되었다. 그리고 이밖에 전류 lead, 베어링, 자기차폐 등의 제품이 상용화되어 있다. 과학기술부 제1차 고온초전도 개발연구사업을 이어 제2차 사업을 2006년까지 810억원을 투자해 앞으로 전력부품, 장치, 마이크로 소자 등 초전도 응용 기기를 개발하려고 있다(8). 따라서 멀지 않은 2000년에 들어서면 고온초전도선재 및 소자분야에서는 여러 가지 종류의 제품이 상용화될 것으로 예상된다.

5. 맺음말

본고에서 국내의 초전도 재료 및 소자연구 현황에 대하여 간단히 소개하였지만 준비 부족으로 언급되지 못한 부분도 많은 것 같다. 지난 10여 년간 우리 나라에서 초전도에 대한 연구비 지원은 선

진국 수준에는 비교할 수 없이 작고 연구환경도 다소 열악하였지만 초전도재료 및 소자 분야에서의 연구성과는 비교적 크다고 할 수 있다. 아직 초전도 응용에 대한 한국의 연구역사가 짧아 선진국에 비교할 수 없지만 정부, 기업의 의식도 바뀌고 있고, 연구인력은 아직 적지만 20~40대의 젊은 연구원들이 활발히 연구 중이므로 그 미래는 밝다고 할 수 있다. 이와 같은 시기에 연구목표를 실용화에 두고 연구의 효율성을 높이기 위하여 산·학·연의 협력체제의 강화가 더욱 절실하며 이러한 환경조성을 위하여 한국 초전도·저온 공학회의 설립은 조금 늦은 감은 있지만 바람직하다 하겠다.

참고문헌

1. 오상수, 류강식, "저온초전도도체의 제조기술과 개발동향", 전기전자재료, Vol.11, No.10, pp.122~127, 1998
2. 김상철, 오상수, 하동우, 하홍수, 장현만, 류강식, 권해웅, "초전도 선재의 잔류저항비 측정을 위한 장치 제작 및 특성 평가" 대한전기학회 하계학술대회 논문집D, pp.1300~1302, 1998
3. 정대영, 김희권, 손명환, 김봉준, 김영철, 하홍수, 오상수, "압연제조된 Tl-1223/Ag선재에서의 높은 Jc" Proceedings of the 8th KCMAS, Vol. 8, pp.45~54, 1998
4. 유재무, 정형식, 고재용, 김해두, "Recent Activity in HTSC BSCCO Wires at KIMM" Proceedings of the 6th KCMAS, Vol.6, pp18~25, 1996
5. 이종민, 유한영, 김영환, 김창훈, 한택상, 서준혁, 이상영, "RF 마그네트론 스퍼터링법에 의한 YBa₂Cu₃O_{7-δ} 박막 제조 및 마이크로웨이브 특성 연구", Proceedings of the 8th KCMAS, Vol. 8, pp.175~178, 1998
6. 임해용, 김인선, 김동호, 박용기, 박종철, "펄스레이저 증착법으로 Al₂O₃ 기판위에 제작한 YBa₂Cu₃O_{7-δ} 박막의 특성", Proceedings of the 8th KCMAS, Vol. 8, pp.162~166, 1998
7. Internet site, <http://www.etri.re.kr/news/n2022701.htm>
8. 초전도응용기술조사전문위원회, "제 1호 초전도 응용 기술현황", 대한전기학회기술조사보고.
9. YuKikazu Iwasa "Prospects and Ch-

allenges for HighTemperature Superconducting Magnet Technology Applications to Electricity”, 韓國超電導·低溫工學會 創立記念 國際심포지움 講演資料集, pp.13~48, 1998