



超電導의 電力設備 適用展望 (上)

Status and Trends on Application of
Superconductivity to Electric Equipments

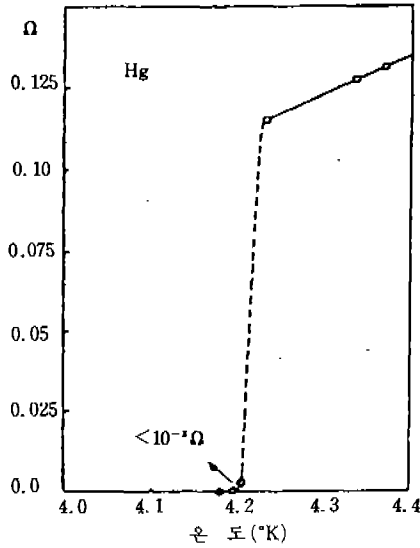
한전 기술연구원 계통연구실 급전역
권태원



1. 序 論

1911년 베덜란드 Kameligh Onnes 교수는 그림 1에서 보는 바와 같이 헬륨을 사용하여 4.2°K 전에는 수은 전기저항이 온도가 내려감에 따라 선형적으로 감소하는데 반하여 4.2°K 근방에서는 갑자기 수은의 전기저항이 "0"으로 되는 현상을 발견하였다. 이러한 현상을 초전도 현상이라 하며 이 현상을 발견한 이래 꾸준히 연구가 계속되어 물리적 특성은 해석하였으나 공학적 응용 가능성을 지닌 초전도 재료를 발견하지 못해 초전도 실용화는 좀처럼 이루어지지 못했다. 그후 1950년에 이르러 J.E Kunzler가 고임계 자체 온도를 가진 재료를 발견함으로써 초전도 실용화 단계로 접어드는 획기적인 계기가 되었으며 미국의 Z. J Stecky 등이 처음으로 MH D 발전에 사용할 수 있는 초전도 자석을 제작하기에 이르렀다. 초전도에 의한 고자계 발생 고

전류 밀도 통전은 전기기계분야, 대전력 송전분야, 대형 초전도 코일에 의한 전력 에너지 저장 등 대규모 전력분야 이용은 물론 초전도 반도체인 Josephson 소자를 이용, 전자계산기의 스위칭 소자, 각종 측정장치 등의 소규모 응용분야에도 적용되고 있다. 1987년 2월 휴스턴 대학 「폴C. W. 추」 교수 팀이 기록한 절대온도 98도(섭씨 영하 175도) 초전도체 발견을 계기로 연구의 관심이 집중되어 현재 일본의 가고시마 대학 오후라 교수 팀이 섭씨 14도(절대온도 287도) 초전도 현상이 일어나는 물질제조에 성공함으로써 바야흐로 상온 초전도 시대를 예고하고 있다 이것을 전기분야의 「제 2의 혁명」이라 일컫고 있으며 초전도의 실용화 연구가 세계 각국에서 집중적으로 진행될 것으로 보인다. 따라서 본고는 초전도에 의한 전력계통 응용기술 이해를 제고하고자 초전도 특징 및 재료, 고온 초전도체 전력분야 응용 및 연구개발 전망 등에 대하여



〈그림 1〉 H. K. Onnes가 1911년 조사한 Hg의 전기적 저항

소개하고자 한다.

2. 超電導 特徵 및 材料

초전도의 기본이론 및 특징을 이해하려면 양자역학을 도입 설명해야 하지만 간단하게 정성적인 특성을 4가지로 설명할 수 있다. ① 전기적 저항이 없는 완전도체이다. ② 내부에는 자기장이 없는 완전반자성 성질 (흔히 Meissner 효과라고 부른다)이 있다. ③ 강자계를 발생시킬 수 있다 (20T 이상), ④ 영구전류를 흘릴 수 있다.

위와 같은 특성들은 에너지 절약 관점에서 전기기계를 초전도체로 제작할 경우 저항에 의한 발열을 제거할 수 있으며 또 대전류를 흘릴 수 있다는 특징은 도체 단면적을 작게할 수 있을 뿐 아니라 강자계 발생이 가능하기 때문에 철심을 쓰지 않아도 되므로 기기의 경량화를 이룩할 수 있다. 또한 초전도의 영구전류 특성은 초전도 코일 저항이 영이 되어 시정수가 무한대로 되기 때문에 영구전류를 흘릴 수 있어 대규모 전기에

너지를 직접 저장할 수 있는 등 많은 장점을 가지고 있다. 초전도 재료에 대하여 살펴 보면 초전도 현상은 마치 물이 얼으면 얼음이 되는 것과 같이 어떤 조건이 만족되어야만 상도체에서 초전도체로 전이하게 된다. 이 조건은 자계, 온도 및 전류 밀도이고 그 전이되는 점을 각각 임계자계, 임계온도 및 임계전류밀도라 부른다.

표 1은 순수 초전도 물질로 임계온도 및 자계가 낮아 작은 자계 침입으로도 초전도성을 잃게 되기 때문에 공학적 응용이 불가능하였고 1954년에 이르러 B. T Mathius 등이 순수물질이

〈표 1〉 제 1종 초전도체

元 素	Tc(K)	元 素	Tc(K)
Al	1.183	Ru	0.49
Ga	1.087	Ta	4.39
In	3.407	Tc	8.22
Ir	0.14	Tl	2.38
La	4.80	Th	1.368
Pb	7.23	Ti	0.42
Hg	4.153	W	0.012
Mo	0.915	U	0.68
Mb	9.17	V	5.3
Os	0.655	Zn	0.852
Re	1.70	Zr	0.546

〈표 2〉 제 2종 초전도체

목 과 명	Tc(K)	Hc(4.2K)
(화합물)		
Nb ₃ Sn	182	24T
V ₃ Ga	16.8	21
Nb ₃ (Al _{0.3} Ga _{0.2})	20.7	41
Nb ₃ Ge	~23	
Nb ₃ Al	17.5	30
(합금)		
Nb-Zr	~10	~7
Nb-Ti	~9	~12
Nb-Zr Ti	~10	~10
Nb-Zr Ta		~12.5

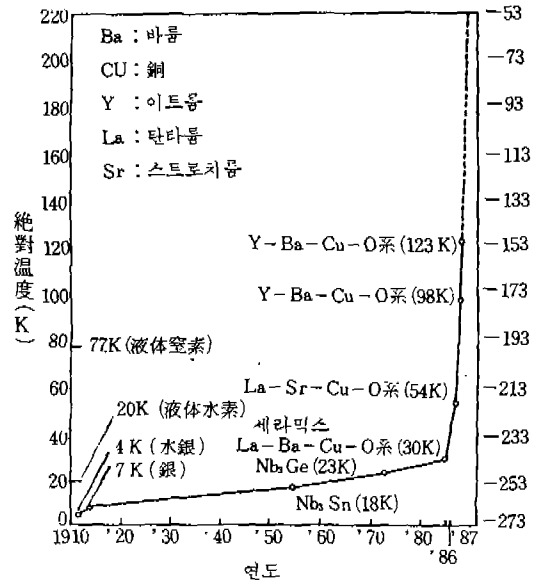
아닌 Nb₃Sn이라는 화합물이 초전도성 기점을 발견함으로써 산업계 적용의 계기를 마련하였다.

Nb₃Sn과 같은 초전도 재료는 다른 원소금속의 초전도체와 별도의 이론적 배경으로 설명해야 한다. 단열금속으로 이루어진 것을 제 1종 초전도체라 하고 합금 및 화합물로 이루어진 재료를 제 2종 초전도체(표 2)라 한다.

3. 高温 超電導體

가. 概 要

작년 4월 스위스의 IBM의 Bednorz와 Muller는 La-Ba-Cu-O 산화물에서 절대온도 30°K에서 저항이 완전히 사라짐을 발견하여 고온 초전도체의 문을 열게 되었다. 이 발견은 Nb₃Ge이 가지고 있던 최고 임계온도 기록 T_c=23.2°K보다 무려 7°K정도 높을 뿐만 아니라 물질 자체가 흔히 부도체라고 통상적으로 인식되어 온 세라믹이라는 점에서 특기할 만한 큰 발견이다. 그러나 이 당시 초전도체의 가장 기본적인 특징인 반자성 효과를 조사하지 못했고 특히 이 발표는 독일 물리학회 저널에 실린 관계로 많은 사람들의 관심을 끌지 못하였다. 그러나 '86년 11월 미국의 Chu와 일본의 Tanaka 등이 이 사실을 각각 독자적으로 재확인함으로써 고온 초전도체 개발이 본격적으로 시작되었다. 그후 이 온도는 계속 상승, 30°K(일본), 40°K(미국), 43°K(일본), 54°K(일본)로 상승하던지 지난 2월 15일에는 Muller의 산화물 Lanthanum 대신 Yttrium를 사용함으로써 액체질소에서 사용할 수 있는 98°K의 고온 초전도체가 미국의 Houston 대학의 물리학자 C. W. Chu에 의해 개발되는 획기적인 업적을 이룩하였다. 곧이어 일본의 Tanaka, 중국의 Zhao, Stanford 대학, IBM 및 AT & T에서도 Tt-Ba-Cu-O을 합성 90K 이상인 초전도체임을 확인하였고 국내에서도 서울대학교 김정구 교수 팀이 3월 중순 Y₁Ba₂Cu₃O₇ Single Phase를 합성하여 95°K의 초전도



〈그림 2〉 임계온도 상승추세

현상을 보고하였다. 그림 2는 초전도체의 임계온도 상승추세를 나타낸 것으로 '87년도 초에 폭발적인 증가추세를 볼 수 있다.

이후 6월 8일 들어서는 소련의 모스크바 대학이 308°K(섭씨 35°), 미국의 ECD사가 24일에, 일본 공업기술전자 종합연구소가 상온에서도 전기저항이 제로가 되는 물질을 개발했다. 특히 일본의 전총련이 개발한 초전도 물질은 58°C 이상에서도 전기저항이 제로가 되는 현상을 지속하는 것으로, 이 분야에 가장 높은 온도를 기록하였다.

이와 같은 상온 초전체는 아직 정식적으로 학회에 보고되어 확인된 것은 없고 또 재현성이 없을 뿐만 아니라 불안정하여 비록 저항이 사라짐이 관측되었다더라도 몇시간 또 며칠 후에는 다시 저항이 정상상태로 환원하여 초전도성을 단정하기는 어렵지만 차후 고온초전도 발생 이론을 규명하면 이런 문제도 해결 가능한 것으로 보여 상온 초전도의 개발도 머지 않을 것으로 생각된다.

이러한 고온 초전도체의 제작방법은 BaCO₃, CUO, Y₂O₃ 분말을 잘 섞어서 공기중 900°C에서

약 10시간 열처리하여 또 분쇄하고 성형한 후 산소분위기 950℃에서 약 5시간 소결하여 서서히 냉각시키는 것이다. 이렇게 소결한 시편은 대체로 기공이 많으나 초전도체의 기본적인 특성을 가지게 된다. 한편 특성 향상을 위하여 소결제품의 조성을 균일하고 정확하게 맞추는 분말합성법이 시도되고 있다.

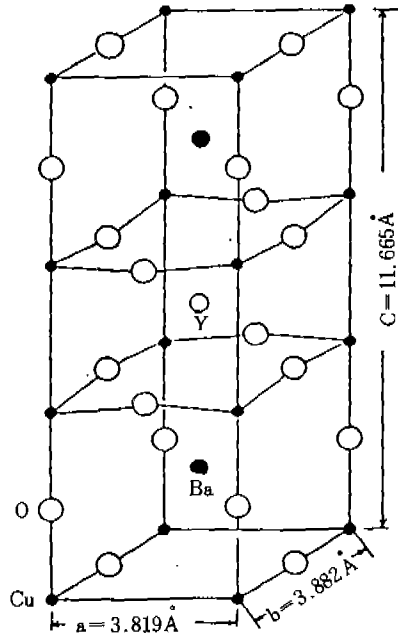
나. 구조와 이론

$Y_1Ba_2Cu_3O_x$ 화합물은 산소량 x 가 약 6부터 7 사이에 존재하며, x 는 온도와 분위기의 산소분압에 따라 결정된다. 이 화합물은 변형된 Perovskite 결정구조를 가진 것이 X-ray 와 Neutron Diffraction으로 밝혀졌으며, x 가 6.63 이상일 때 Orthorhombic 구조를 가지며 초전도 특성을 나타내는 것으로 알려졌다. x 가 6.63 이하면 Tetragonal 구조가 되면서 고온 초전도성은 없어지게 된다.

고온 Neutron Diffraction으로 이 Orthorhombic Tetragonal 변화는 일종의 Order-Disorder 상변화인 것이 밝혀졌다. 그러므로 시편의 제조에서 Orthorhombic 구조를 갖도록 산소량을 높이는 것이 중요하다.

그림 3은 이 구조를 나타낸 것으로, 격자는 $a=3.819\text{\AA}$, $b=3.882\text{\AA}$, $C=11.665\text{\AA}$ 이다. 이 구조를 보면 가운데 있는 Yttrium 주위의 산소는 모두 빠져 있으며 그리고 윗부분과 아랫부분 Octahedron에서 a 축 방향에 산소가 빠져 있다. 이렇게 a 축과 Y부분에 산소가 빠짐으로써 이 성질은 2차원 성격이 강한 층면구조(Layered Structure)와 구조상 CUO_2 Octahedron 자체가 찌그러진 모양을 갖게 된다.

현재 고온 초전도체 물리적 원리를 설명하기 위하여 BCS 이론인 격자진동(Phonon)에 의하여 전자쌍을 이루어 전류이동에 기여하게 한다는 이 이론으로 설명하기 위한 시도와 다른 새로운 물리적 이론으로 설명하기 위한 연구가 진행되고 있다. 그 하나로 동이온 중심으로한 전



〈그림 3〉 $Y_1Ba_2Cu_3O_x$ 의 Unit Cell 구조

하의 전기적 진동이 생겨 그것도 인력의 중간역할을 하고 있을 것이라고 생각하고 있다. 이와 같은 전하의 진동을 무라즈몬이라고 부른다. 이 이론에 의하면 전자가 전류이동에 작용할 뿐만 아니라 Hole도 반도체에서와 같이 전류이동에 기인하도록 하는 새로운 이론이다. 그런데 이 이론도 가설일 뿐 아직도 고온 초전도체를 물리적으로 설명할 수 있는 정설은 없으며 이 외에도 Anderson 등이 주장한 RVB(Resonating Valence Bond) Model, Leeard Ihm의 Two Band Model 등 여러 모델들이 제안되고 있고 또 다른 모델 연구가 한창 진행중이다.

다. 實用化 과제

초전도체가 갖추어야 할 조건은 첫째, 기계적 연성이 좋아서 도선으로 만들거나 굽힐 수 있어야 하며 둘째, 임계 자기장이 높아야 하며 셋째 임계 전류밀도가 높아야 한다. 이중 고온 초전도체가 당면하고 있는 가장 큰 문제는 기계적 연성이 나쁘다는 점이다. 소결하여 만든 고온 초

서울올림픽 경기장 안내

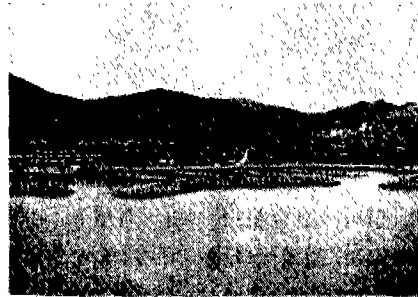
한국 제일의 항구도시 부산 해운대구 우동에 위치한 서울올림픽 요트경기장은 231,406m² (육상 : 132,232m² 해상 : 99,174m²) 규모.

3층 1,939명의 본부건물 외에도 프레젠타를 비롯한 54동의 가설 건물, 기념탑, 성화대등이 설치되어 있다. 요트 수용 능력은 1,364척.

2마일 3개소, 1.5마일 1개소등 총 4개의 경기 코스를 갖추고 있는 요트경기장은 총 600억원으로 83년 6월 착공하여 86년 4월 완공되었다.

87국제요트경기대회(9. 17~29)에 참가한 소련선수 Khaperskei가 "시설 규모나 이용 편의도가 세계최고"라고 격찬했을 만큼 역대 올림픽 요트경기장들에 비해 월등하다는 평을 받고 있다.

요트경기장



전도체는 기공이 많아서 기계적 성질이 더욱 나빠다. 구리 Matrix를 써서 도선으로 만들어서 시스템에 응용하면 도선에 강한 자기장의 영향으로 로렌츠 힘이 생겨서 집착 피로현상이 생길 것이므로 기계적 연성의 향상은 가장 큰 문제로 대두되고 있다. 또 문제점으로 지적할 수 있는 것은 이방성이다. H_{c2} (Upper Critical Field Intensity)는 Ba-Y-Ba 원자가 배열한 C축에 평행한 자계중에서는 그림 4에 나타난 바와같이 77°K에서 10T정도, 0°K에서 60T 정도 된다. 마지막으로 임계전류 밀도가 낮다는 점이다.

그림 5에서 보는 바와 같이 77°K에서 150~200A/cm²이다. 반면 4.2°K에서 기존 초전도체 보다 임계전류밀도가 높음을 알 수 있다. 이는 결정표면의 불균질성에 기인한다고 보고 있으며 이에 따라 더욱 미세하고 균질하며 배향성을 가진 결정을 제작하는 등으로 인해 J_c값의 개선이 도모되고 그같은 구조의 박막에서는 10⁶A/cm²의 큰 J_c를 얻고 있다. 이와 같이 산화물 초전도체의 과제를 종합해 보면 실용화를 위한 선문화(線文化) 문제로 10⁶A/cm² 이상의 전류밀도를 향상시키는 문제와 세라믹 기술과 연금술 기술 향상에 따른 이방성, 기계적 문제의 극복을 통

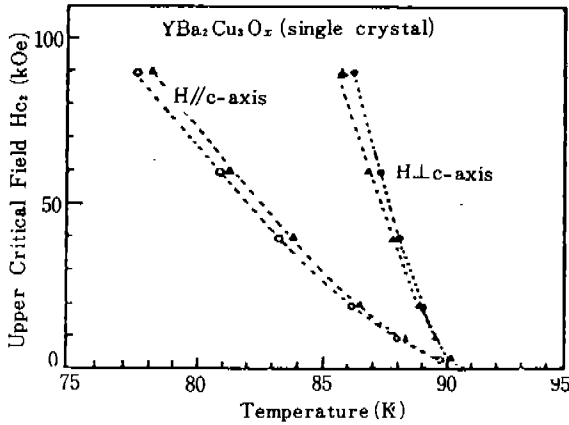
하여 낮은 Cost를 가진 안정화 도체제작이 이루어져야만 그 발전의 실효성을 거둘 수 있을 것이다.

라. 高温超電導體의 장점

만약 고온 초전도체 산업에 응용이 된다면 기존 초전도체 (NbTi, Nb₃Sn)의 광범위한 실용화 문제인 시스템 경제성과 신뢰성을 괄목하게 향상시킬 수 있을 것으로 보인다. 특히 고온 초전도체는 질소로 냉각 시스템에 이용하기 때문에 액화헬륨보다 가격면에서 약 70배정도 저렴한 뿐 아니라 공기중에서 무진장 얻을 수 있고 취급이 용이한 등 뛰어난 장점을 가지고 있다.

현재 실용화되고 있는 기존 초전도체는 손실을 줄이기 위하여, 극세다심화(Filament 직경, 0.5μm 이하) 시켜 Matrix 형태의 선재를 사용하고 있어 선재의 단가와 상승 요인이지만 액화 질소를 사용하면 이 냉각 시스템의 효율을 약 25배 상승시킬 수 있다. 이론적으로 25배의 손실 열 허용이 가능하므로 Filament의 직경을 10μm 이상으로 증가시킬 수 있어 선재의 가격이 상당히 저하된다.

또, 시스템 안정도 관점에서 고온 초전도체의

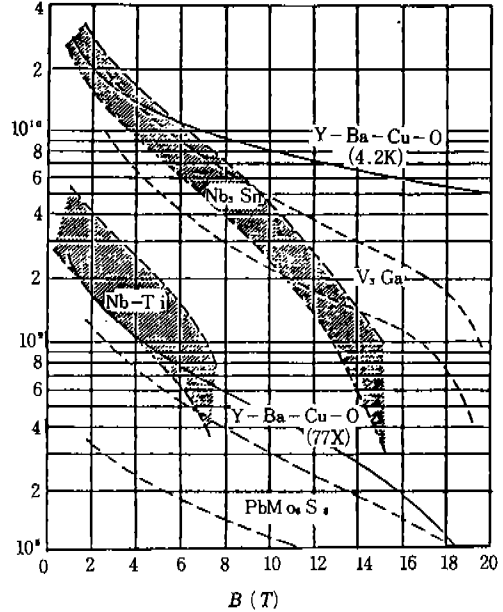


〈그림 4〉 다고온초전도체 단결정의 H_c 의 이방성

비열이 기존 초전도체보다 약 300배 정도 크므로 시스템의 MQE (Minimum Quench Energy)를 300배 증가시킬 수 있고 더 나가서, 액화 질소는 열전달 (Heat Transfer)에서도 액체질소보다 약 10배정도로 커 MQE을 크게 할 수 있고 높은 전류밀도를 가진 기기로 제작이 가능하기 때문에 보다 콤팩트한 기기제작으로 경제성을 한층 도모할 수 있는 등 매력적인 장점을 가질 수 있다.

마. 高温超電導體의 實用化 개발현황

선진 각국에서는 고온 초전도체의 물리적 이론의 해석에 관심의 초점이 집중되어 있을 뿐 아니라 실용화 되면 그 파급효과가 대단히 크기 때문에 이 초전도체의 실용화 연구도 병행하여 집중적으로 행해지고 있다. 현재 미국은 초전도 개발 가속계획을 수립하고 초전도 기술을 21세기 전략기술의 가장 핵심적인 기술로 삼는다는 것으로 3개 입법과 8개 행정조직의 입법을 추진, 초전도 개발에 참여하고 있는 미국 기업에 대하여 세제·법제적인 측면에서 혜택을 줄 방침으로 있어 거국적인 개발 지원체제 확립에 나서고 있다. 현재 AT&T사의 Bell연구소 연구팀이 5월에 열린 미국물리학회에서 초전도 세라믹스를 옷감처럼 부드럽게 가공한 테이프 형태로 개발했



〈그림 5〉 산화물 초전도체의 온도에 대한 전류밀도 변화

고 온을 피복한 전선과 코일 형태로 같은 가공품도 개발했다.

또 아르곤 연구소, 스탠포드 대학에서도 선재화에 성공한 바 있다. 한편, 일본은 이 분야에서 미국보다 앞서 있는 것으로 평가되고 있다. 금속재료연구소가 폭 5%, 두께 0.3%의 초전도체 선재화 시켰고 도시바와 쇼와(昭和)전선이 공동으로 직경 0.6% 길이 20~30m의 선재를 만드는 데 성공했다. 박막기술은 미국은 IBM에서 초전도 세라믹스 단결정을 두께 4 μ m의 박막으로 만들어 섭씨 영하 196°에서 10만A/cm² 전류를 통전했고 NTT도 최근 원료를 기관위에 스퍼터링해 퇴적시킨 다음 산소 속에서 열처리하여 초전도 박막을 만들어 영하 189°에서 180만A/cm² 전류를 흘리는 데 성공한 바 있다. 이처럼 실제 사용할 수 있는 형태로 가공할 수 있는 새로운 연금술이 잇달아 개발됨으로써 고온 초전도체의 실용화는 몇가지의 문제점이 있음에도 불구하고 급진전될 것으로 기대된다.

(다음 호에 계속)