

고온 초전도체의 출현과 초전도 연구동향

이 승 원

(서울대 공대 전기공학과 교수)

1. 초전도현상의 발견

(1) 초전도 현상

초전도현상은 1911년 Leiden 대학의 Kamrling Onnes 교수에 의해서 수은의 전기저항이 절대온도 0도내에서도 불순물이 있어 0이 되지 못할 터인데도 불구하고 4K 정도의 낮은 온도에서 갑자기 상실되는 이상현상이 발견되었다. 그후 더 많은 실험을 거듭한 결과 이것은 저항이 완전히 없어졌을 뿐만 아니라 완전반자성성도 가지고 있고 또 대전류를 흘릴 수 있을 뿐만 아니라 일단 전류를 흘려놓으면 영구히 흐르게됨을 알 수 있게되었다. 이 현상은 초전도체의 기이한 여러가지 성질중에서도 가장 이해하기 어려운 기이한 현상으로서 원자궤도상을 맴돌고있는 전자들만이 영구운동을 할 수 있다고 생각하고 있었는데 궤도를 이탈한 전자까지도 영구운동을 할수 있다는 큰 뜻을 갖고있는 것이다.

(2) 초전도성의 한계

이상과같은 초전도성을 띤 물질들은 일단 초전도성을 띠게되면 영구히 초전도성을 유지하고 있는것이 아니라 물질에 따라 각기 다른 온도, 자계, 및 전류밀도에 한계가 있어 그 한계내에서 만 초전도성을 유지하는 것이다. 초전도성의 발견당시는 그 이론이 규명되지않아 실험적으로 많은 물질에 대한 그 한계점을 알아냈는데 특히 이 당시에는 주로 순수물질이어야만 그 저항이 0이 되기 용이할 것이라는 추측하에 순수물질에 대해서 초전도성을 많이 연구했었는데 이들은 그 임계자계 Hc가

표1과 같이 아주 낮어 응용면에서 그 가치가 없었는데다가 그 이론적 뒷받침이 없어 초전도현상은 그 발견 이래 약 50년간 이라는 긴 세월을 잠자고 있었다. 그후 1950년대에 이르러 J. E. Kunzler가 순수금속이 아닌 합금체에 의한 고임계자계재료를 발견함으로써 대형 초전도 자석기술이 발달하기시작 1965년에는 J. stocky 등이 처음으로 MHD발전에 사용할 수 있는 전자석을 제작, 인류에 공헌할수 있는 기술로 이용되기 시작한 것이다.

(3) BCS 이론

전기한 바와같이 초전도현상이 발견된 이래 그를 뒷받침해주는 이론이 정립되지않아 초전도의 연구개발에 막대한 지장을 초래했는데 그후 발달된 양자역학 덕분에 Bardeen, Cooper, Schrieffer 세사람이 드디어 초전도

表. 1 第一種 超電導 材料

元素	Tc(K)	元素	Tc(K)
Al	1.18	Ru	0.49
Ca	1.08	Ta	4.39
In	3.41	Tc	8.22
Ir	0.14	Tl	2.38
La	4.80	Th	1.37
Pb	7.23	Ti	0.42
Hg	4.15	W	0.01
Mo	0.92	U	0.08
Nb	9.17	V	5.3
Os	0.66	Zn	0.85
Re	1.70	Zr	0.55

이론을 정립, 이를 1957년 발표 1972년에는 이에의해 노벨상을 수상하기에 이르렀다. 이 세사람 이름의 머리글자를 따서 BCS이론이라고 불리우는 이 이론에 의하면 자유전자는 자기운동량과 크기가 같고 방향이 반대인 운동량을 가진 것과 쌍을 만든다. 또 이 쌍이 되는 또하나의 조건은 그 스핀이 반대가 되어야 하는것이다. 이와같이 전자가 쌍을 이루면 그중하나가 격자와 충돌을 일으켜 진로가 바뀔것 같으면 또하나의 전자가 그 진로를 즉시 수정 전체로서는 아무런 영향을 받지않아 저항이 없는 운동을 계속할수 있다는 것이다. 그리고 같은 부(-)의 전하를 가진 전자가 어떻게 쌍을 이루느냐는 것은, 전자가 양자와 충돌한다는것은 양자로부터 에너지를 얻게되는 것인데 이 경우의 에너지를 Phonon이라고 부르는데 원래는 전자와 양자사이에서 주고받는 Phonon을 전자끼리 주고받으면 인력이 생긴다는 것이 BCS이론이다. 즉 진동하고 있는 격자사이를 한 전자가 지나갈 때 격자를 구성하고있는 원자는 (+)전하를 갖고 있기 때문에 (-)전하를 가지고있는 전자가 지나가면 그쪽으로 인력을 받지만 전자가 중량이 가벼우므로 순간적으로 지나가 버리고 격자는 무거워서 천천히 움직이므로 결과적으로 (+)의 전하밀도가 높게된다. 그때 다른 전자가 지나가면 이를 잡아당기기 때문에 제1의 전자가 제2의 전자를 잡아당기게 되는것이다. 이 이론은 합금 초전도체, 화합물초전도체의 발전도 크게 뒷받침하여 표2와 같은 초전도체가 탄생하게 초전도체가 탄생하게 되어 드디어 제일차 초전도체이용의 문을 열게 한 것이다.

表. 2 第二種 超電導 材料

材 料 名	Tc(K)
(化合物)	
Nb ₃ Sn	18.2
V ₃ Ca	16.8
Nb ₃ (Al _{0.3} Ge _{0.2})	20.7
Nb ₃ Ge	~23
Nb ₃ Al	17.5
(合金)	
Nb, Zr	~10
Nb, Ti	~ 9
Nb, Zr, Ti	~10

(4) 초전도체의 응용

1911년 Onnes교수에 의해서 발견된 초전도현상은 BCS 이론의 뒷받침을 얻어 고임계자제합금초전도체를 개발

하게 함으로써 초전도 응용시대는 개막하게 되었다. 처음에는 MHD발전, 핵융합용초전도자석등에 이용되기 시작하였다. 한편 초전도에 의한 고자계의 발생, 고전류밀도의 통전은 전기기기 제작분야에서도 매력을 느끼기 시작 단극직류발전기로 부터시작해서 동기발전기의 시작품이 출현하기에 이르렀다.

송전분야에 있어서도 앞으로 전력수요의 증가와 더불어 대두될 고밀도송전에 의한 거대전력수송에 이 초전도를 이용하기 위해 많은 연구를 진행시키고 있다. 또 현재 심야의 잉여전력의 저장장치로서 사용되고 있는 효율이 대단히 낮은(65%) 양수발전소대신에 전력을 직접적으로 저장할 수 있는 장치로서 대형초전도코일을 이용하려는 연구도 진행되고있으며 이 에너지저장장치는 부대시설에 있어서의 손실을 합해서 그 효율이 90%를 넘을 것으로 예상될 뿐 아니라 저장에너지의 방출응답도가 높아 계통안전에도 크게 기여할 것으로 예측되고 있다.

그리고 이 초전도의 고속수송분야에의 응용연구도 활발이 진행되어 현재 시속500Km를 넘는 시험운정에 성공을 거두고 있는 형편이며 해상수송에 있어서도 초전도자석을 이용한 전자추진선박이 연구되고 있다. 또 고자계를 이용한 자기분순물체저장치는 이미 실용화되고 있으며 의료분야에 있어서도 각분야에서 실용화 되고있는데 그 대표적인 것으로 π 이온빔을 초전도자계에 의해 환부에 조사시키는 것이 있고 핵자기공명을 이용해서 환부를 탐색하는 NMR진단기에 초전도자석을 사용함으로써 그 성능을 월등히 개선시키고 있다.

이상 여러 초전도응용장치는 고자계자석이 주역을 맡고 있으나 미소에너지 분야에 있어서는 초전도반도체성인 Josephson효과를 이용하고 있다. 즉 초고감도자력계, 전압계, Submilliwave의 검출기, 발전기 및 전자계산기의 스위칭소자, 기억소자가 이 효과를 이용한 것이다. 이중 전자계산기에 쓰이는 스위칭소자는 그 속도가 5~10psec 로서 현 반도체소자의 약100배에 가까우며 이것에서 발생하는 손실은 현반도체의 경우에 비해 1/1000밖에 안되며 현재의 계산기로는 수개월 걸릴것을 수일만에 처리할수 있는 계산기의 출현을 가능케 하고 있다.

2. 고온 초전도체의 현황

(1) 고온 초전도체

최근 액체 질소 온도에서 초전도체가 되는 세라믹 물질이 발견 되었는데 이 발견이 산업에 어떤 영향을 미

칠 것인가?

이 새로운 물질에 의한 응용이 개발될 것으로 예상되나 이에 있어서는 많은 난점도 예견 된다.

이를 이용할 경우 지하 송전이나 많은 전기 기기의 효율이 증가 될 것이다. 그러나 이 신 소재의 fabrication이나 design이 해결 되어야 한다. 이것이 해결되면 이 물질의 경제적 효용성은 앞으로 더욱 더 증가 될 것이다.

에너지 저장 장치로도 쓰일 것이고 또 핵 융합이라든가 M.H.D 발전도 가속적으로 발전할 것이다.

현재의 초전도체의 여러 문제점들이 우리가 기대 하는 것 보다 더 빠른 시일 내에 해결 될 것이라 기대 된다. micro전자 회로가 과거 십 수년에 걸쳐 이룩 했듯이 고온 초전도체도 앞으로 믿을 수 없을 정도로 놀라운 편리를 우리 인류에게 제공할 것이다.

현재 많은 과학자들이 고온 초전도체에 큰 관심을 갖고 열심히 연구를 계속하고는 있으나 이를 산업 분야에 널리 사용하기 위해서는 아직도 다음과 같은 문제점들이 해결 되어야 한다.

(2) 전류 밀도

새로운 고온 초전도체는 임계 온도가 비교적 높은 온도에서 형성되는 값이 싼 액체 질소 온도에서 특성을 갖는 세라믹이다.

이 초전도체의 중요한 기술적인 문제점은 전류밀도를 어느 정도까지 올릴 수 있는나 하는 것이다.

새로운 세라믹 고온 초전도체의 임계전류 밀도는 최소한 1000배 정도 금속 초전도체에 비해 낮다.

이 문제는 Single crystal과 새로운 초전도체의 박막 실험에서는 해결 되어 컴퓨터 칩이나 전자 장치에 이용 될 수 있게는 되었다. 그러나 고전력 응용에 사용하기 위해서는 bulk material이어야 하는데 이럴 경우 임계 전류 밀도를 어떻게 높이는가 하는 방법은 아직 해결되지 않고 있다. 이런 문제는 고온세라믹 초전도체에 포함되어 있는 미세한 초전도 grain 사이 경계 특성과 관련이 있는 것으로 보고 있다. 또 각 grain에는 이것에 수직인 평면에 흐르는 전류보다 Crystal plain을 따라서 흐르는 전류의 크기가 30~60배 정도 크다는 것도 중요한 문제점이다.

bulk 초전도체에는 결정면에 인접해 있는 평면은 임의로 배열 되어 있다. 이런 배열들을 물리적으로 재 배열함으로써 최적 전류를 얻을 수 있다고 보고 있다.

(3) Brittleness (잘 부서짐) 과 안정성

고온 초전도체가 이용되기 위해서 극복 되어야 할 또

다른 두 가지의 기술적 문제점은 물리적 견고성과 안정성이다. 일반적으로 perovskite계열에 속하는 물질들은 기계적 특성이 나쁘고 또한 습기와 이산화 탄소(CO₂)와의 반응때문에 초전도 특성이 나빠진다.

그러나 초전도체의 특성을 개선 시킬 방법이 전혀 없는 것은 아닌 것 같다. 예를 들어서 얇은 필라멘트 형태로 만들어진 세라믹은 bulk세라믹 보다 장력이 5~10배 정도 강하다. 이렇기 때문에 기계적 강도를 높이기 위해서 금속 wire안에 고온 초전도체의 심을 박아 넣은 방법도 고려 되고 있다.

고온 초전도 재료의 processing을 달리 함으로써 물리적 특성을 개선 시킬 수도 있다고 생각 된다. 위에서 설명한 화학적 물리적 특성들은 아직 상세하게 알려져 있지 않다.

(4) R&D priorities (연구의 방향)

새로운 초전도체의 상기한 결점을 해결하기 위해서는 많은 자금이 소요되는 장기적인 연구가 필요 할 것이라고 생각 된다.

연구에 있어 가장 유의해야 할 점은 고온 초전도체가 기존의 금속 초전도체보다 훨씬 더 복잡하다는 것이다.

몇몇 이론들이 새로운 초전도체의 매카니즘을 설명하기 위하여 나왔지만 아무것도 초전도 현상 전체를 설명하지는 못하고 있다. 그리고 또한 초전도체의 결정 구조와 전기적, 기계적, 화학적 물리적 특성 사이의 관계가 아직도 잘 알려져 있지 않다.

그러므로 실험적으로 고온 초전도체의 특성을 개선하려고 함과 동시에 기본적인 물질 연구를 수행해야 한다고 생각된다.

3. 외국에 있어서의 연구 동향

현재 초전도에 대한 세계적 연구 태세는 고온 초 도체의 출현으로 초전도이용에 의한 인류에 대한 산업적 공헌의 지대성에 대해서 큰 기대를 걸고 있으며 세계 연구자들에게 큰 용기와 희망을 주고는 있으나 신 고온 초전도체의 물리적 비견고성과 화학적 불안정성 및 특성 면에서 아직도 많은 연구와 시일이 소요 될 것으로 판단, 각 국 마다 금속 고온 초전도체에 의한 연구를 가속 시키고 있는 실정이다.

미국의 경우 많은 연구소와 대학에서 고온 초전도체의 개선 내지 개발에 큰 비중을 두고 연구는 하고 있으나 그의 실용 단계는 그리 가깝지 않다고 보고 있고 저온 금속 초전도체의 연구를 확충 가속 시키고 있다. 즉 wisconsin 대학에서는 IOMWH의 S.M.E.S에 대한 설계 제작

을 연구하고 있으며 이는 SDI project와도 관련이 있는 것 같다.

그리고 이 연구는 wisconsin 대학에서만 수행되고 있는 것이 아니라 Bechtel에서도 별도로 설계와 구조 재료에 관한 연구를 진행시키고 있다.

그리고 이의 완성은 1995년, 비용은 9천만불이다.

일본의 경우는 50MJ의 SEMS(폭 5m 높이 2.6m) 연구를 통상성 지원으로 수행하고 있으며 연구 내용에는 계통에의 투입, 안정화, 경제화 분야 대학에서, 기업이 공동 참여하여 안정성과 quench방지에 대한 연구로 분담 시키고 있다. 금년도 예산은 600만엔 이라고 한다.

그리고 구주에서는 그간 각 국에 전력 유통이 잘 이루어져 SMES에 대한 고려를 하지 않았으나 근자 원자력 발전량의 증대로 SMES에 대한 연구를 착수하고있는 실정이다.

본인의 금번 조사 대상이 초전도이 S.M.E.S에 대한 응용 연구이어서 외국의 예를 주로 S.M.E.S에 관해서 언급하게 된것을 유감스럽게 생각하는 바이다.

일본에서는 초전도 전자력 추진 선박이 활발히 연구되고 있고 또 제2의 신간선으로 1990년 대 말까지 초전도 자기 부상 열차를 신간선과 교체건설 사용하게 됐다는 것도 확실한 것 같았음을 첨가하는 바이다.