

高溫超電導 技術

朴 鍾 喆

〈韓國標準研究所·工博〉

1. 서 론

「20세기 최대의 技術革新」으로 평가되는 고온초전도체의 연구현황이 어떠한가? 과연 발전초기에 예상했던대로 90년대말이나 21세기에 들어가면 일상생활에서 우주개발에 이르기까지 모든 분야에서 막대한 영향을 미치게 될 것 인지를 알아보는 것은 매우 흥미있는 일이다.

서울~부산간을 한 시간내에 달릴 수 있는 초전도 자기부상열차나 현재의 슈퍼컴퓨터보다 100배 내지 1,000배나 빠른 조셉슨컴퓨터가 고온초전도체의 실용화로 가능하리라는 예상이다. 뿐만 아니라 핵융합발전, 무손실 송전 초전도 에너지 저장장치(SMES), 의료진단기(MRI-CT, SQUID), 기초과학, 광물선광 등 전기를 사용하는 모든 산업분야가 영향을 받을 것으로 예상하고 있다.

어떤 임계온도(T_c) 이하에서 전기저항이 없어지는 상태가 되는 초전도체가 처음 발견된 것은 1911년 네덜란드의 물리학자 캐머린 온네스에 의해서이다. 전기저항이 없으므로 영구히 많은 양의 전류를 흘릴 수 있으며 높은 磁場의 전자석을 제작하여 이용할 수 있다. 문제는 초전도 상태가 되기 위해서는 絶對零度 근처까지 온도를 내려야 하며 온도를 내리는데 많은 어려움이 있다는 점이었다. 따라서 초전도체가 발견된 지 70년이 넘도록 이용된 분야는 최근에 와

서야 의료진단기기인 핵자기공명단층 촬영장치(MRI-CT)가 유일한 경우이었다. 이밖에는 입자물리학에 사용되는 가속기에 초전도자석을 이용한 것과 실험실용 초전도자석 등이 있을 뿐이다.

1986년 IBM 연구소의 베드노르츠와 물러는 종래의 초전도체보다 임계온도가 월등히 높은 산화물초전도체를 발견하였다. 곧이어 1987년 초에는 미국 휴스턴대학의 추에 의해 액체질소의 온도(영하 196℃)보다 더 높은 임계온도를 갖는 초전도체인 $YBaCuO(T_c = 98 K; -175^\circ C)$ 가 발견됨으로써 고온초전도시대가 열리게 된 것이다.

임계온도가 질소의 액화온도보다 높다는 것은 경제적으로 큰 의미를 갖는다. 왜냐하면 종래의 극저온초전도체를 사용하기 위해서는 1ℓ에 2만원 이상인 액체헬륨을 사용하는데 비하여 액체질소는 1ℓ에 500원 정도이고 다루기가 훨씬 쉬우며 공기중에 무진장으로 원료가 있기 때문이다.

그러면 이와 같은 고온초전도체의 특성, 연구현황과 응용전망이 어떠한지 알아보기로 하자.

2. 고온초전도체의 특성

고온초전도연구는 여러 학문분야가 참여하는 복합적인 요소가 있다. 즉 물리, 화학, 재료, 전기, 기계 등의 분야에서 연구를 수행하고 있다.

또한 기초연구와 응용연구가 동시에 진행되는 특성을 가지고 있다.

고온초전도체에는 수십 종류가 있는데 대개가 세라믹 산화물이다. 가장 흔히 사용되는 제조 방법은 固狀反應法으로 원료인 금속산화물, 예를 들면 Y_2O_3 , $CaCO_3$ 등을 함께 잘 섞은 후 $1,000^\circ C$ 근처에서 하소(Calcination)와 열처리를 거쳐 만든다. 이밖에 화학적방법으로 반응을 시킨 후 열처리하는 방법과 합금을 만든 후 산소분위기에서 열처리하는 방법 등이 있다. 박막(thin film)을 제조하는 데는 스퍼터링법, 레이저를 사용하여 증착하는 법, CVD법 등 여러 가지가 이용되고 있다. 가장 경제적으로 좋은 특성을 갖는 합성방법을 개발하는 연구과제가 실용화와 관련하여 활발히 수행되고 있다.

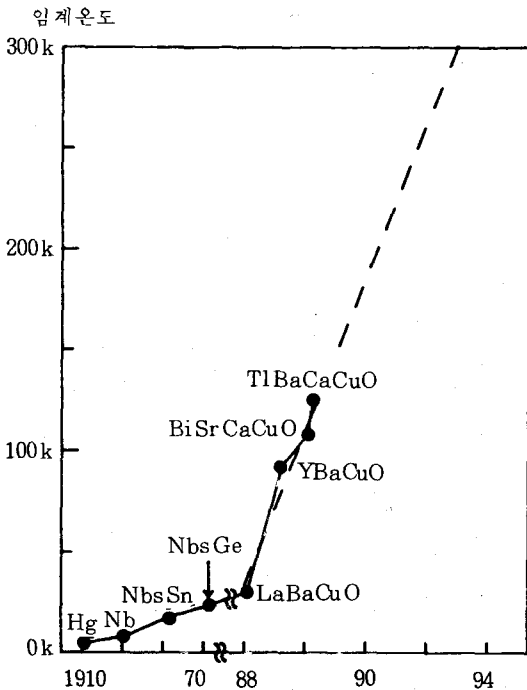
초전도체의 성질 중 가장 중요한 특성은 임계온도이다. 추교수에 의해 $YBaCuO$ 가 발견된

이래로 더 높은 임계온도를 갖는 초전도체를 찾기 위한 연구가 전세계적으로 밤낮을 가리지 않고 이루어졌다. 일반적인 경향은 稀土類 금속인 이트륨을 다른 금속으로 치환하거나 첨가하는 것이었는데 이와 같은 노력의 결과로 1988년 초에 일본 금속재료연구소의 마에다는 임계온도가 110 K 정도인 Bi-계 고온초전도체를 개발하는데 성공하였으며 같은 해 3월에는 미국에서 Tl-계 고온초전도체가 개발되었는데 임계온도는 125 K이다. <그림-1>에 초전도임계온도가 향상되어온 역사가 나와 있다. 이보다 더 높은 임계온도를 갖는 고온초전도체가 발견되었다는 뉴스가 매스컴을 통하여 보도되곤 하지만 이 물질들은 안정성이 없거나 재현성이 결여되어 있어서 인정을 받지 못하는 실정이다. 그러나 현재의 125 K보다 더 높은 임계온도를 갖는 물질이 존재할 것이며 상온초전도체도 가능하다는 의견이 일반적으로 받아들여지고 있다.

초전도체를 응용하는데 있어 임계온도에 못지않게 중요한 성질이 임계전류이다. 초전도체라고 해서 무한정으로 전류를 흘릴 수 있는 것이 아니고 어떤 임계치 이상이 되면 초전도성을 잃게 된다. 이 임계전류의 크기는 온도와 磁場에 따라 달라지는데 온도가 낮을수록 그리고 자장의 세기가 약할수록 임계전류는 커진다.

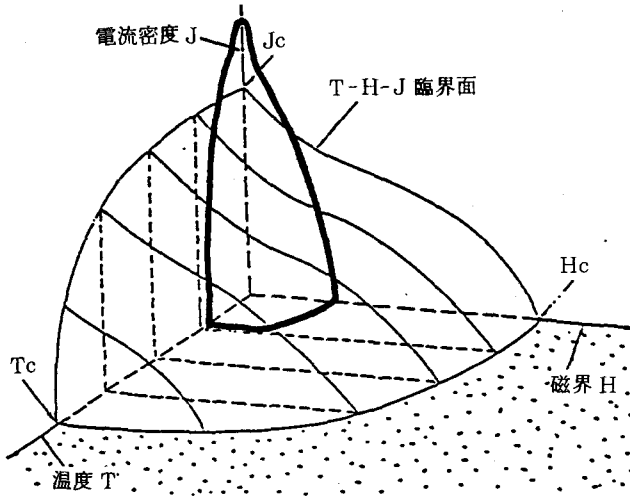
<그림-2>에 온도, 전류 자장의 관계가 나타나 있다. 액체헬륨온도에서 사용되는 극저온초전도체의 임계전류는 대략 $10^6 A/cm^2$ 인데 비하여 고온초전도체의 경우에는 액체질소 온도에서 $10^4 A/cm^2$ 가 최고기록이므로 아직도 10배 내지는 100배 정도의 향상이 필요하다. 다행스러운 점은 단결정의 경우 임계전류가 $6 \times 10^6 A/cm^2$ 정도로 높다는 것이 보고되어 있으므로 임계전류가 낮다는 것은 고온초전도체 자체에 문제가 있는 것이 아니라 기술적인 문제이므로 앞으로 해결될 수 있다고 판단된다.

고온초전도체는 세라믹 산화물이므로 응용에 필요한 선재나 판재로 가공하는데 어려움이 많다. 이 문제를 해결하기 위한 노력으로는 초전도분말을 금속튜브에 넣어 가느다란 필라멘트로 뽑아낸 후 이 필라멘트를 여러개 합쳐서 선재



註: 임계온도를 섭씨로 바꾸기 위해서는 273을 빼야 한다. 즉 100 K는 $-173^\circ C$ 이다.

<그림-1> 초전도 임계온도의 향상 역사



註: 굵은 선으로 표시한 것이 극저온 초전도체의 경우로 T_c , H_c 는 낮으나 임계전류(J_c)는 높은 것으로 나타나 있다.

〈그림-2〉 초전도체의 온도-전류-자장 임계면

로 만드는 방법이 많이 사용되고 있다. 금속튜브로는 鉛이 주로 이용된다. 얇은 테이프형태로 만들어 유연성을 높이는 방법과 금속선 위에 초전도체를 증착시키는 방법도 시도되고 있다.

고온초전도체를 응용하기 위하여 해결되어야 하는 또다른 문제는 이 물질의 안정성을 향상시키는 것이다. 현재 가장 많이 연구되고 있는 YBaCuO는 수분에 약한 특성을 가지고 있으며 포함하고 있는 산소의 양에 따라 특성이 크게 달라지므로 안정성 향상에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.

3. 각국의 연구현황

고온초전도체가 발견되자 이 신물질이 가지는 과학기술적인 중요성과 실용화되었을 때 예상되는 막대한 경제적 가치 때문에 미국, 일본 등 선진국은 물론이고 중국, 인도 등에서도 국가차원의 지원을 받아 경쟁적인 연구를 하고 있다.

미국은 과학기술 분야에서 점차 일본에 뒤떨어지고 있다는 초조감과 함께 이 분야에서만은 질 수 없다는 태도를 확실히 하고 있다. 1987년 6월 레이건 행정부는 백악관 주관으로 고

온초전도연구의 국제경쟁력 향상을 위한 전략 회의를 개최하고 11개 조항의 특별지원책을 발표하였다. 이에 따라 에너지성 산하의 3개 국립연구소(알곤, 로스알라모스, 오클릿지)를 파이렛트 센터로 지정하여 집중지원하고 고온초전도와 관련된 특허신청은 특별히 신속처리한다는 것 등이다.

IBM, Bell Lab, 듀폰 등 대기업의 연구소에는 50~100명 규모의 전담연구원들이 기초 및 응용연구를 수행하고 있으며 100여개의 대학에서 기초연구를 추진중이다. 89년 정부지원 연구비는 1억3천5백만불 정도이며 이와는 별도로 SDI 등 국방 관련 연구비도 고온초전도 연구에 지원되고 있다.

한편 뉴욕, 일리노이, 앨라배마, 텍사스주에서도 주정부차원의 고온초전도 연구센터를 설립하여 운영하고 있다. 최근에는 IBM과 AT&T 그리고 MIT가 연구조합을 형성하여 공동연구를 추진하고 있는데 이러한 형태의 연구조합의 수는 이미 5~6개에 이르고 있다. 전통적으로 독립적인 연구를 하는 기업연구소들조차도 힘을 합치는 것을 보면 일본과의 경쟁을 얼마나 심각하게 생각하는지를 짐작할 수 있다.

미국은 기초연구와 단결정, 박막연구 분야에서 세계 최고수준을 자랑하고 있다. 미국의 최

대 경쟁상대인 일본은 산·학·연 협력기구가 결성되어 국가차원의 정책수립과 연구를 진행하고 있다.

일본은 그동안 반도체분야 등에서 기술모방국이라는 이름을 들어왔으므로 고온초전도분야에서만은 명실공히 세계 제일이 되기 위하여 노력하고 있다.

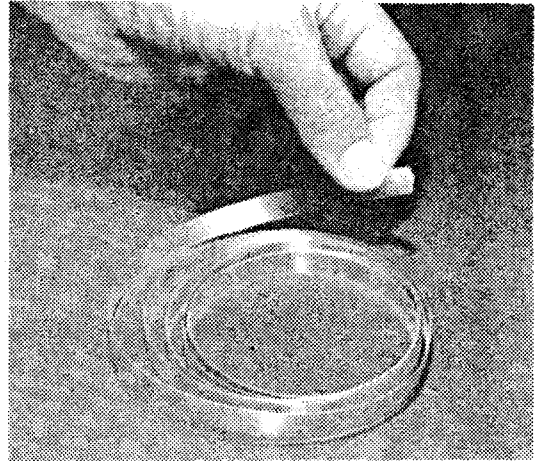
과기청 산하의 여러 국립연구소가 핵심이 되고 산업체와 대학을 연결하는 “멀티코아 프로젝트”가 수행되고 있으며 통산성의 후원하에 100개의 기업체가 참여하여 국제초전도기술센터(ISTEC)를 1988년 1월에 설립하고 연구를 시작하였다. 89년에 8천9백만불(인건비 제외)의 연구비를 정부에서 지원하는데 기업체에서 사용하는 연구비를 고려하면 연 2~3억불을 고온초전도연구에 투입하는 실정이다.

일본은 선제가공, 센서 등의 기기개발에서 좋은 결과를 내고 있으므로 실용화에 있어서는 일본이 앞설 것으로 예상된다.

유럽의 경우에는 영국, 프랑스, 독일 등이 중심이 되어 유럽공동체를 연결하는 공동연구를 구상하는 것으로 알려져 있다.

국내의 경우에는 고온초전도연구의 다양성과 국내의 연구인력, 시설 등이 선진국과 비교하여 많이 뒤떨어져 있는 점을 고려하여 처음부터 대학과 출연연구소가 협력하여 연구를 수행하여 왔다.

대학, 출연연구소, 산업체의 연구책임자들로 구성된 “고온초전도 연구협의회”가 연구방향 및 전략에 관한 자문과 연구발표, 정보교환을 위한 워크숍을 주관한다. 지금까지 11차의 워크숍을 개최하였으며 최근에 개최된 용평워크숍에는 미국, 대만, 일본에서 전문가를 초청하기도 하였다. 특정연구비로 지원되는 연구비 규모는 89년에 15억 5천만원이며 8개의 출연연구소와 10여 대학의 연구팀들이 기초·물성·합성·가공·응용분과로 나뉘어 연구를 하고 있다. 그간의 연구결과로 Y-계, Bi-계, Tl-계의 고온초전도 합성에 성공하였고 단결정 및 박막제조에도 성공하였으나 선진국 수준에는 미치지 못하고 있다. 소규모의 선제제작과 초전도



註: 은튜브안에 고온초전도분말을 충전시키고 냉간압연공정으로 제작한 것임($T_c \sim 102\text{ K}$, 한국에너지연구소개발).

<그림-3> Bi-계 고온초전도체 테이프

자석제작도 시도하였으며 조셉슨소자도 제작하였다.

90년부터는 국책과제 중 중점과제로 선정하여 초전도양자간섭장치(SQUID)와 선재를 사용한 초전도자석의 개발 등과 같이 응용에 목표를 두고 연구를 추진할 계획이다. 고온초전도체가 발견된 이래로 미국, 일본 등에서 이 분야의 연구를 수행한 후 최근에 귀국한 젊은 과학자들이 10여명이 넘으므로 더욱 활발한 연구가 예상된다.

4. 응용전망

고온초전도체가 처음 발견될 당시에는 3~5년내에 많은 분야에서 응용될 것으로 예상하는 낙관론이 지배적이었다. 현재는 개발시기를 5~10년으로 보는 조심스러운 낙관론이 있는가 하면 15~20년이 소요될 것이라는 견해도 있다.

고온초전도체를 응용하는데는 크게 두가지로 나눌 수 있는데 하나는 대규모응용으로 주로 초전도자석을 제작하여 이용하는 경우이다. 핵융합발전, MHD발전, 에너지저장(SMES)과 자기부상열차, 초전도추진선, MRI-CT, 자기분리

(magnetic separation) 등이 이에 속하며 실용화되었을 때 엄청난 경제적 효과가 있다. 다른 하나는 초전도전자공학이라고도 불리는 분야로 주로 박막을 이용하여 조셉슨소자를 제작한다든가 적외선감지기, 새로운 형태의 초전도트랜지스터를 개발하는 것으로 소규모응용이다.

앞에서 설명한 바와 같이 임계전류라든가 가공상의 문제가 박막의 경우에 훨씬 적으므로 소규모응용이 먼저 이루어질 것임에 틀림없다. 이미 미국의 IBM에서는 조셉슨소자를 이용한 초전도양자간섭장치(SQUID)를 개발하였는데 성능이 극저온초전도체를 사용한 것에 못지않게 좋은 것으로 알려졌다. 따라서 고온초전도 SQUID가 3~5년내에 대학과 연구소의 실험실에서 사용될 가능성이 높으며 광물탐색, 地球物理學분야에서도 응용될 것이다. 磁氣센서, 적외선센서 등도 prototype이 개발되어 있으며, 스위칭소자도 개발되고 있다. 이러한 발명품들이 수년내에 우리의 일상생활에 필수적인 기구로 나타날 수도 있다.

대규모응용은 적어도 15년 이후에나 가능할 것으로 예상된다. 대규모응용 중 고온초전도체의 발견으로 새로이 관심의 대상이 되고 있는 것은 초전도 에너지 저장시스템이다. 하루중 전력수요가 적을 때에 발전된 전력을 거대한 초전도자석에 磁場의 형태로 저장하였다가 뽑아 쓰는 장치인데 양수발전보다 훨씬 효율이 높고 편리한 방법이다. SMES는 우주로 물체를 쏘아 올리는데 필요한 에너지원으로도 이용될 수 있으며 SDI와 관련하여 연구되고 있다.

이밖에 현재로서는 생각지도 못할 새로운 응용분야가 많이 있으리라는 것을 쉽게 예상할 수 있다. 만일 상온초전도체가 개발된다면 응용시기도 훨씬 빨라질 것이며 경제적 효과는 우리의 상상을 초월한 막대한 것이 될 것이다.

5. 결 론

고온초전도체는 발견되면서부터 과학기술계는 물론이고 일반 대중에게도 많은 관심의 대상이 되어왔다. 발견자인 베드노르츠와 플러는

이 발견의 공로로 1987년도 노벨물리학상을 수상하였는데 발견한지 1년도 안되어 노벨상을 받는다는 것은 극히 예외적인 일이며 이 발견의 중요성을 한층 높여주고 있다.

미국과 일본을 비롯하여 여러나라에서 국가적 차원의 연구체제를 구축하고 전력투구하여 연구를 추진하는 것도 예외적인 경우라 하겠다. 고온초전도체의 응용은 사회전반에 큰 변혁을 가져오며 21세기에 과학기술계의 주도권은 고온초전도연구에서 앞서는 나라가 가지게 될 것이라는 예상 때문이다. 고온초전도연구와 관련하여 일본이 5,000개의 특허를 출원하였으며 미국도 88년에만 700개의 특허를 출원한 것이 이와 같은 사실을 뒷받침하고 있다.

요즈음은 물질특허 뿐만 아니라 모든 공정을 특허화하는 추세에 있다. 따라서 기술자립을 통한 선진국이 되기 위해서는 우리나라도 독자적으로 고온초전도연구에 많은 노력을 기울여야 할 것이다.

고온초전도연구는 개발역사가 짧으므로 협력 연구체제가 잘 구축되고 국가적인 차원의 연구비 지원이 원활이 된다면 다른 분야에 비하여 비교적 선진국과 경쟁하여 연구를 수행할 수 있는 분야이다. 이와 같은 경우는 우리의 과학기술 개발의 역사로 볼 때 흔치 않은 절호의 기회이기도하다.

또다른 유리한 점은 고온초전도체의 개발이 기초과학적 측면에서 볼 때 큰 투자나 시설을 필요로 하지 않는다는 것이다. 그리고 지금까지의 예로 봐서 꼭 탄탄한 기초가 있어야만 새로운 개발이나 발명이 되는 것이 아니고 어느 날 갑자기 常溫에서 초전도체가 되는 물질이 개발될 수도 있는 우연성이 많은 것이 이 분야의 연구이기도 하다. 따라서 많은 대학에서 끊임 없이 기초적인 연구를 수행하고 출연연구소와 기업체의 연구소에서는 응용에 목표를 두고 연구를 계속한다면 우리도 선진국과 나란히 과학기술계에서 확고한 위치를 차지할 수 있을 것으로 기대된다.

산업체에서도 장기적인 안목에서 고온초전도 연구에 투자를 아끼지 말아야 할 것이다. ♣