

제11회 기초과학문화포럼 발표자료 (이성익 교수, 포항공대 초전도 연구단 단장)

## 새로운 초전도체를 찾아서

### 서론

초전도체가 왜 많은 사람들의 관심을 끌게 되었을까? 그것은 초전도체가 가지는 무궁무진한 응용성에 기인한다. 예를 들어 의학에서는 자기공명현상(Magnetic Resonance Imaging : MRI)을 이용하여 뇌의 내부구조를 알아내는데 초전도자석이 쓰여 왔다. 초전도를 이용하면 서울시내에서 사용되고 있는 모든 전류를 지름 5cm의 초전도 전선에 실어 운반할 수 있다. 또한 핵융합 반응을 이용한 미래의 에너지원의 제조 시에도 초전도체가 쓰인다. 또한 서울과 부산을 50분 만에 주파하는 자기부상열차를 만들 수 있다. 박막 선재나 조셉슨 소자를 이용한 고속소자, 자기장 및 전압 변화를 정밀하게 측정하는 센서, 열 발생 없고 엄청나게 빠른 속도의 컴퓨터 등이 다른 응용 가능성이다. 이러한 응용을 하기에 매우 적합한 높은 온도의 새로운 초전도체가 개발되고 있다. 이 강연에서는 새로운 초전도체 MgB<sub>2</sub>를 만드는 방법을 소개하고 이 초전도체의 응용 가능성을 설명하려 한다.

### 초전도란 무엇인가?

1911년 최초로 초전도체를 발견한 사람은 네덜란드의 물리학자 오네스(Onnes)였다. 그는 1908년 기체 헬륨을 압축하여 절대온도 4도(4K, 즉 영하 269도)의 액체 헬륨을 만들어내는 데 성공하였고, 이 액체 헬륨을 이용하여 물질을 절대온도 0도에 가깝게 냉각시킬 수 있었다. 그는 수은을 저온으로 냉각시키면서 전기저항을 측정하던 중 액체헬륨의 기화 온도인 절대온도 4.2도 근처에서 수은의 저항이 급격히 사라지는 것을 발견하였다. 이렇게 저항이 사라지는 물질이 초전도체이다.

초전도체는 온도가 낮은 곳에서만 나타난다. 초전도체는 보통 물질과 달리 자기장을 배척하는 성질이 있으므로 자석은 초전도체 위에 떠 있을 수밖에 없다. 하지만 이때 주위의 온도가 올라가면 시료는 초전도의 성질을 잃어버리게 되고 따라서 자석은 더 이상 떠있지 못하게 된다. 이와 같이 어떤 특정한 온도(이를 임계온도라고 부른다) 이하에서 저항이 완전히 사라지고 내부에 자기장이 존재하지 못하는 상태를 초전도 상태라 한다. 이러한 성질을 가진 초전도물질은 금속, 유기물질, 세라믹 등에서 1천종

이상 발견되었으나 나이오비움-티타늄 합금과 나이오비움-주석 합금 등 5~6 종만이 실용화 되어 있다. 이러한 이유는 초전도 현상이 매우 낮은 온도에서만 일어나므로 값비싼 액체헬륨을 써서 냉각시켜야 하기 때문이며, 따라서 그 냉각비용이 엄청나서 고도의 정밀기계 이외에는 이용되지 못하고 있었다.

초전도체가 왜 많은 사람들의 관심을 끌게 되었을까? 그것은 초전도체가 가지는 무궁무진한 응용에서 비롯된다. 예를 들어 의학 분야에서는 초전도 자기공명현상(Magnetic Resonance Imaging : MRI)을 이용하면 뇌의 내부에 상처를 입히지 않고서도 뇌를 밖에서 볼 수가 있다. 초전도체를 사용하면 뇌뿐 아니라 신체의 어느 부분을 관찰하는데 우리 몸에 해로운 X-선 장비를 사용하지 않아도 된다.

또한 초전도 기차를 타면 서울 도심에서 출발하면 부산의 도심까지 25 분 만에 도착할 수가 있다. 교통의 혁명을 이루어 낼 수가 있다. 전기 또한 유용하게 쓸 수가 있다. 우리가 집에서 쓰는 전기의 양은 발전소에서 보낸 전기보다도 매우 적다. 왜냐하면 전기가 중간에 열로 사라지기 때문이다. 이때 초전도를 이용하면 저항이 없기에 이러한 엄청난 양의 전기 손실을 없앨 수가 있다. 또한 원자력을 사용하여 많은 전력을 얻는 우리나라의 원자력 발전소에서는 안정을 위하여 낮이나 밤이나 같은 양의 전기를 제조하고 있다. 그런데 낮에는 전기를 많이 쓰고 밤에는 적게 쓰고 있어 문제가 되고 있어 밤에 만들어 지는 전기 중 상당 부분을 현재 거의 버리고 있다. 만약 밤에 만든 전기를 낮에 쓸 수가 있다면 이러한 낭비를 줄일 수가 있다. 초전도로 전기 저장 장치를 만든다면 이 문제는 쉽게 해결이 될 수가 있다. 우리 나라에서 쓰는 전기의 20 % 정도만 전약을 할 수가 있다면 엄청난 양의 경제적 이익을 구가할 수가 있다.

초전도체를 응용하면, 서울 시내에서 사용하고 있는 모든 전류를 지름 5cm 의 초전도 전선에 실어 운반할 수 있고, 미래 에너지원인 핵 융합 반응에도 이용할 수 있다. 초전도 선박을 이용하면 매우 빠른 속도로 운항이 가능하다. 박막 선재나 조셉슨 소자를 이용하면 지금 보다도 1000 배 이상 빠른 컴퓨터를 만들어 낼 수가 있다. 더욱이 작동 시 열 발생이 백만분의 일 정도로 작아지기에 이 컴퓨터는 계산 용량은 대형인데 비하여 그 크기는 현재 보다 열용량 감소 부분 정도로 줄일 수가 있다.

또한 인류가 만들어 낸 어떠한 감지기 보다도 감도가 좋아 매우 작은 전기 신호를 알아 낼 수가 있기에 그 응용이 엄청나다. 예를 들면 인간이 생각을 한다는 것은 일종의 미세 전기 신호를 흐르게 하는 것인데 이 신호조차 잡아낼 수가 있다. 이 원리를 이용한 초보적인 응용으로 현재는 일종의 잘못된 전기 신호 때문에 생겨나는 병인 간질 치료를 위해 초전도를 이용하고 있다.

초전도를 이용한 통신이 첩보전에 쓰인다는 것은 매우 흥미롭다. 보통의 전파를 이용한 위성간의 통신은 전리층 아래로 신호가 뚫고 들어오기 때문에 지상에서 도청이 가능하다. 그런데, 초전도를 응용한 전파는 직진의 성질이 강하여 전리층 위에서 만의 통신이 가능하기에 지상에서 염탐할 수 없다. 초전도를 이용하면 테라(10의 12승)Hz의 주파수영역을 이용할 수 있는데, 재래식 금속은 이 주파수에서 열에 의해 녹아버린다.

### 고온 초전도체의 발견

초전도 현상을 처음으로 명쾌하게 설명한 사람은 미국의 물리학자였던 바딘, 쿠퍼, 그리고 슈리퍼들이고 이들은 자신들의 이름 첫자를 딴 BCS 이론을 발표한다.

그들의 이론에 따르면 자유 전자가 격자 구조를 이루는 두개의 양이온 사이를 통과하면, 양이온을 전자 쪽으로 끌어당긴다. 즉 양이온 격자 구조에 약간의 찌그러짐이 생긴다는 말이다. 그런데 이 찌그러짐이 음파 형태로 전달돼 멀리 떨어져 있는 다른 자유전자를 끌게 한다. 이렇게 처음 자유전자의 이동으로 다른 자유전자가 이끌리게 돼 이루는 쌍을 쿠퍼쌍 이라고 부른다. 따라서 낮은 온도에서는 두개의 전자가 고체 격자의 도움을 받아 서로 이끌리게 되고 이들이 초전도를 만들어 낸다.

그런데 BCS 이론에 따르면 초전도 현상은 금속이나 그 합금에서만 나타나며, 절대온도 25K를 넘어설 수 없다. 온도가 높아지면 쿠퍼쌍이 깨지기 때문이다. 그러나 1986년 새로운 실험결과가 발표됐다. 스위스에 위치한 IBM 연구소의 뮐러와 베드노르츠는 당시로서는 가장 높은 온도인 절대온도 30K에서 초전도 현상을 보이는 세라믹 합성물이 자연에 존재한다는 사실을 알아냈다. 이들이 합성한 물질은 란타늄, 바륨, 구리, 그리고 산소로 이뤄져 있었다. 1987년 이후 초전도 현상을 나타내는 온도가 점점 올라가 현재에는 절대온도 1백 38K에서도 가능해졌다. 점점 그 온도가 상승하고 있는 것이다. 그러나 과학자들은 초전도체가 생각했던 것보다 높은 온도에서도 가능한 이유가 무엇인지, 또 무엇이 초전도성을 띠게 하는지 아직 완벽하게 알지 못하고 있다. 상당한 부분을 이해하고 있다고 생각하지만 아직도 전체를 설명하고 있지는 못하고 있다. 그리고 문제점 하나는 이 고온 초전도체가 금속이 아니고 딱딱한 벽돌과 같다는 것이다. 고온 초전도체는 응용을 하기엔 너무도 딱딱하다는 것이다. 그래서 고온 초전도체 발견후인 지난 10여년 동안에도 사람들은 벽돌처럼 딱딱하지 않지만 높은 온도에서 작동하는 초전도체를 계속 찾고 있었다. 그들은 반도체 혁명을 능가하는 새로운 세상을 만들 새로운 초전도체를 찾고 있었다. 그런데 2001년 1월 새로운 초전도체가 개발이 되었다. 이것이 MgB2란 초전도체인 것이다.

## ■ MgB2 초전도체란?

마그네슘 다이보라이드, 이보론 마그네슘, 이붕소 마그네슘 등으로 불리는 이 물질은 1953 년에 개발된 이후 40 여년이 넘도록 쓰여져 왔으나, 초전도 현상이 있다는 사실이 발견된 것은 불과 2001 년 1 월이었다.

이 MgB2 는 화학회사에서 순수 보론을 만들기 위해 쓰던 물질로서 수 Kg 정도는 쉽게 공급 받을 수 있었다. 이 흔한 물질에서 이제까지 발견된 금속계 초전도체 중 초전도 전이온도가 가장 높았던 Nb3Sn 보다도 15K 가 더 높은 절대온도 39K 에서 초전도현상이 나타났다는 것에 대해 과학자들은 놀라움을 감추지 못하고 있다. 절대온도 140K 까지 올라간 구리 산화물계 초전도체가 발견된 지 14 년이 지난 지금 절대온도 39K 인 이 물질에 대해 세상 사람들이 놀라는 이유는 무엇일까?

첫째, 1972 년에 노벨상을 받은 BCS(Bardeen, Cooper, Schriffer)이론을 되새겨 보면 알 수 있다. 이 이론에 의하면 초전도는 절대온도 30K 를 넘지 못할 것으로 생각되었는데, MgB2 는 산화물계 초전도체와는 달리 BCS 이론을 만족하면서도 이 한계를 뛰어넘었다는 것이다. 따라서 물리학적 관점으로 본다면, 이 물질이 가지고 있는 특성을 찾아내어 이 속에 숨어있는 신비로운 새로운 물리학 법칙을 풀어내어야 한다.

둘째, 이 물질은 구조가 간단하며 화학적으로 매우 안정되어 있고, 지상에서도 풍부하게 저장되어 있을 뿐 아니라 바닷물에도 많은 양이 들어 있어 공급이 원활하다는 것이다. 또 고온초전도가 네 개 이상의 원자로 구성이 되어있어, 제조과정, 분자 모양 등이 너무도 복잡하다. 또한 외부환경에 의한 초전도성의 저하 등의 문제점이 거의 없다. 한 번 전기 부품으로 만들어 놓는다면 수십 년 수백 년이 지나도 변하지 않기 때문에 반영구 적으로 쓸 수가 있다.

셋째, 재래식 초전도물질보다 초전도 전이온도가 매우 높다는 것이다. 이 정도의 온도라면 액체헬륨을 쓰지 않고 단순한 전기 냉장고를 이용하여도 충분히 온도를 낮출 수 있기 때문에 그 응용이 무궁무진하다. 예를 들어 통신을 위한 중계소에서 초전도 부품을 사용한다고 하자. 그런데 이를 위해서 큰 대륙의 사막 한 가운데나, 심심 산골의 높은 산에 있는 중계소에 액체 헬륨 공급은 불가능 하다. 그런데 이곳에서 전기 냉장고로 중계소의 초전도를 유지시킬 수가 있다.

넷째, 현존하는 어떤 초전도체 보다 도 초전도 전류를 많이 흘릴 수 있는 장점이 있다. 현재까지 알려져 있는 사실로 전기를 1 제곱 cm 에 천만 암페어나 1 억 암페어를 흘려도 저항이 나타나지 않는다는 사실이다. 예를 들면 서울시 전체에서 쓰는 모든 전기를 지름 1cm 의 전선으로 운송할 수 있다.

다섯째, 앞으로 알려질 새로운 사실에 대한 기대감이다. 본격적인 연구가 시작된 지 세 네 달 밖에 지나지 않은 상태에서 밝혀진 이 초전도체의 비밀은 빙산의 일각이고, 앞으로 새롭게 밝혀질 성질은 엄청날 것이기 때문에 이 물질의 응용 가능성이 얼마나 될지는 아무도 예측할 수가 없다는 것이다. 현재에도 마이크로파를 이용한 통신, 초전도 디지털 소자의 응용 가능성이 예측되고 있다. 만약 이 물질을 이용하여 무선 통신의 기지국 수를 지금보다 10 분의 1 또는 100 분의 1 로 줄일 수 있다면 그 경비 절감이 어마 어마할 것이다. 특히 미국, 호주 등 땅 덩어리가 넓은 나라일수록 기지 수를 많이 깔아야하는데, 만약 초전도 중계소를 만든다면 그 응용가치가 무한할 것이다. 또한 초전도를 사용하면 인터넷의 속도를 지금 보다 1000 배 이상 빠르게 할 수가 있기에 이 새로운 초전도의 연구가 매우 시급하다.

새로운 초전도체인 MgB2 연구에 세계적으로 앞서가고 있는 한국인들

포항공대 초전도 연구팀이 세계 최고 성능의 초전도 박막을 개발하였을 뿐 아니라 미국 버클리 대학의 최형준 박사는 이 물질의 초전도 원리를 규명하는 이론을 제기 이 분야 연구에서 세계를 이끌어 가고 있다.

2001 년 포항공대 연구진은 초고속 슈퍼 컴퓨터, 마이크로파 통신, 뇌파측정장치 등의 개발에 쓰일 수 있는 세계 최고 성능의 초전도 박막을 제조하는 데 성공했다. 과학기술부 창의사업 연구단인 포항공대 초전도연구단의 이성익(李星翊), 강원남(康元南 40, 이상 물리학과) 교수는 절대온도 39K(영하 234 도)에서 초전도 기능을 지닌 마그네슘 다이보라이드(MgB2) 박막을 세계 최초로 제조하는 데 성공했다. 연구단의 이 같은 연구결과는 미국에서 발행하는 세계적 과학저널인 '사이언스'(Science)가 세계 주요 언론을 상대로 특별 기자회견을 통해 소개했었다. 또 이 초전도 박막 제조 비법은 미국, 일본, 유럽 등에 특허를 출원 중이다. 이 연구단은 2001 년 1 월 중 이 연구에 착수, 1 월 말 섭씨 850~1000 도, 3 만 기압하에서 'MgB2 고온 고압 시료'를 세계최초로 합성하는데 성공해 세계를 놀라게 했다. 이어 2 월 초에 박막 제조 연구에 들어갔으며 이 당시 미국일본유럽에서는 수백 개의 국립연구소와 기업 연구소가 초전도 응용의 기본인 초전도 박막화를 위한 연구에 돌입했으나 결국 포항공대 초전도연구단이 세계

최초, 최고의 MgB<sub>2</sub>(T<sub>c</sub>=39K) 박막 제조에 성공, 최후의 승자가 됐다. 이 업적으로 이성익 교수는 2002년 3월 미국 인디아나폴리스에서 열린 미국 물리학회에 초청 강연을 하였다.

이 새로운 초전도 박막은 마이크로파를 이용한 무선통신 기지국의 주요 부품으로 가장 먼저 사용될 것이며, 위성간의 장거리 통신 구축망의 핵심 부품으로 쓰이는 등 다양한 분야에 응용이 본격화될 것으로 예상된다. 특히 마이크로파 소자들을 이용한 이 부품이 우주공간에서 사용될 경우 우리나라가 절대적으로 유리한 위치를 선점할 것으로 기대된다. 특히 연구단이 개발한 초전도 박막은 두께가 500-1000옹스트롬(1옹스트롬은 1억분의 1cm) 밖에 되지 않아 이를 응용한 전자소자 개발에 결정적인 역할을 할 것으로 보인다. 선진국에서는 지금도 포항공대 연구단이 개발한 초전도 막과 같은 수준의 박막을 만들어 내기 위해 엄청난 노력을 기울이고 있으나, 아직도 이와 유사한 박막은 만들어내지 못하고 있다. 또 선진각국이 본 연구단의 박막 제조 비법을 파악하는데도 상당한 시일이 걸릴 것으로 예상되고 있어, 이 기간 동안 포항공대 초전도 연구단은 새로운 연구수행에 박차를 가해 선진국과의 연구격차를 더욱 벌여나갈 수 있게 됐다. 현재 이 박막의 우수성이 확인되자 미국유럽 등지의 연구소를 비롯한 국내 우수 대학연구소에서 포항공대 초전도 연구단에 공동연구를 제의해와 상당한 진전이 이뤄지고 있다.

최근 이 물질에 관한 한국인이 낸 또 하나의 개가는 미국 버클리 캘리포니아대 물리학과 최형준(崔炯俊·32) 박사의 이론 업적이다. 최 박사는 현재 미국에서 활동 중인데 미래의 신소재'로 주목받는 마그네슘디보라이드(MgB<sub>2</sub>)의 초전도성 메커니즘에 관한 새로운 이론을 과학전문지 '네이처(2002. 8.15일자)'에서 제안 하였다. 최 박사는 이 논문에서 MgB<sub>2</sub>가 다른 초전도체보다 높은 온도 에서 초전도성을 띠는 것은 내부 전자들이 '이중 에너지 간격(double energy gap)'이라는 특수한 성질을 가졌기 때문이라 주장 하였다. 최 박사는 MgB<sub>2</sub>에 대한 정밀한 물성계산과 엄격한 이론 적용을 통해 이 물질에 초전도현상을 일으키는 상태인 '초전도 에너지 간격(superconductingenergy gap)이 두개가 공존하면서 39K에서 초전도현상이 나타난다고 주장하였다. 이 때문에 MgB<sub>2</sub>가 다른 금속계 초전도체와 다른 성질을 보인다는 것을 밝힌 것"이라고 말했다. 이 최박사의 주장은 포항공대 연구팀이 이미 실험적으로 이미 최박사의 이론을 확인 한 바가 있다.