

## 고온초전도체의 최근의 개발 동향

기술해설 2

### The Recent Trend of High-Tc Superconductor

오상수\*, 류강식\*, 김상현\*\*

(Sang-Soo Oh, Kang-Sik Ryu, Sang-Hyun Kim)

**Key Words(중요용어)** : High-T<sub>c</sub> superconductor, Thin film(박막), Superconducting magnet(초전도 자석).

#### 1. 서 론

금속계의 저온초전도체를 근간으로 지속되어 온 초전도 응용기술에 대한 연구와 개발은 1986년의 산화물 고온초전도체 발견을 기점으로 새로운 국면에 접어들고 있다. 1986년 이후 몇 년 동안 꿈의 초전도체로 까지 인식되어진 고온초전도체에 대한 열기와 막연한 기대는 90년대에 들어서면서 지금은 어느 정도 현실적으로 바뀌어 가고 있으며 초전도응용기술이라는 하나의 카테고리 안에서 저온초전도체와 고온초전도체는 단순한 경쟁 관계만이 아닌 상호 보완 관계로서의 응용을 위한 새로운 개념을 도출하고 있다. 동(Cu)산화물 구조를 기본적으로 포함하고 있는 고온초전도체들은 재료 물성적인 여러가지 문제점들에도 불구하고 새로운 프로세스들의 끊임없는 개발로 전기, 전자, 에너지, 의료분야로의 응용을 위한 새로운 가능성을 우리들에게 던져 주고 있는 것이다. 실제 응용적인 면에서는 기술의 완성도가 높은 금속계의 저온초전도체에 비하여 아직은 개발 역사가 짧지만 고임계온도라는 장점을 이용한 재료의 응용 가능성이 무한하고 지금까지 경제적인 이유등으로 개발이 지체되고 있던 여러 분야에서 앞으로 고온초전도체의 실용화가 확대될 것으로 예측되고 있다.

고온초전도체의 임계온도는 아직도 새로운 산화물계의 신초전도체가 계속 발견되면서 그 기록이 갱신되고 있다. 지금까지 발견된 대표적인 고온초전도체들의 년도별 임계온도를 그림 1에 나타냈는데, 최근 수은<sup>1)</sup>을 포함하는 동산화물에서 고압하에서 합성하여 150~164K까지 임계온도가 상승하였다.

고온초전도체의 응용에서 임계온도 이상으로 중요한 파라메타가 임계전류밀도의 향상이다. 1988년 science지에서는 고온초전도체 선재화에 대하여 낮은 임계전류밀도 때문에 실용화에 상당히 비관적

이라는 기사가 나온 적이 있고 금속계의 저온초전도체에 비하여 고온초전도체는 코히이런스길이가 작기 때문에 대전류 응용에 불리하다는 인식이 지배적이었지만 1991년 이후로 특히 일본을 중심으로 임계전류밀도 향상을 위한 가공열처리 조건을 최적화하는 연구<sup>2-5)</sup>가 활발하게 진행되어 제로자장 액체 질소 중의 임계전류밀도가 단척시편에서  $6.6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ 나 되는 Ag피복 Bi계 테이프제도 만들어지고 있어 고온초전도 선재화의 연구는 새로운 국면으로 접어들고 있다.

미국의 ASC(American Superconductor Corp.)에서는 산화물계의 고온초전도선재를 대량생산하기 위한 대규모 투자를 계획하고 있으며 지금은 금속계 초전도선재처럼 장척의 고온초전도선재도 구매할 수 있는 시대로 접어들고 있다. 고온초전도체 벌크 및 박막의 경우도 새로운 프로세스들이 계속 시도되고 최적화 연구가 성과를 거두면서 고성능, 고품질의 재료들이 제조되고 있고 이것들을

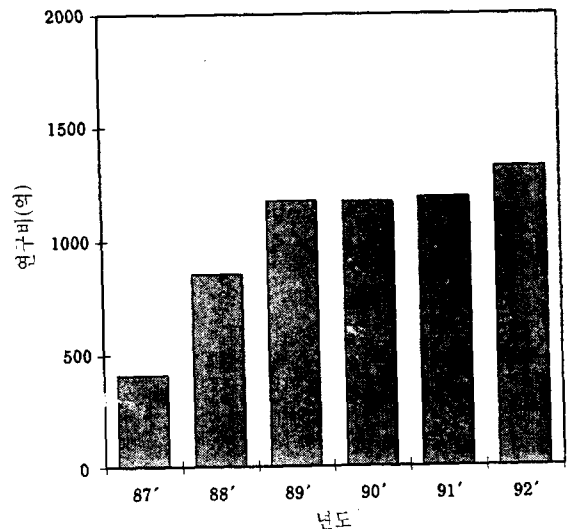


그림 1 미국의 최근의 년도별 연구비 투자 현황.

Fig. 1 Recent trend of R&D funding for High Tc superconductor in USA.

\* : 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀

\*\* : 경상대학교 공과대학 전기공학과

이용한 상용화 연구 개발이 미국, 일본을 중심으로 활발하게 이루어지고 있다. 최근 5년간의 고온초전도 분야에 대한 미국 연방정부의 연구비 투자 상황<sup>6)</sup>을 살펴보면 그림 1에서 나타났듯이 계속 증가 추세에 있으며 벤처 비즈니스의 민간 기업들이 고온초전도체를 상용화하기 위한 많은 투자와 노력을 하고 있다.

고온초전도체는 그 사용 용도에 따라 벌크, 박막, 선재 등 다양한 형태로 만들어지고 있다. 본고에서는 고온초전도체의 여러 연구분야 중 이론, 물성보다는 주로 응용기술적인 차원에서 재료 형태별로 최근의 연구 개발 동향을 살펴보고자 한다.

## 2. 벌크 재료의 응용

### 2.1 벌크 자석

일반적인 고상소결반응법으로 고온초전도체를 만들면 조직도 치밀하지 않고 임계전류밀도가 낮기 때문에 실용적인 응용이 불가능하게 된다. 임계전류밀도의 향상에는 자속선의 고정중심(pinning center)이 되는 미세 결함들을 도입시키는 것이 필요한데 Y계에서는 상전도상 입자인 211상을 미세하게 많이 분산시키기 위한 프로세스들인 MP-MG<sup>7)</sup>, QMG<sup>8)</sup>, MTG<sup>9)</sup>법등이 개발되어 벌크상태에서 77K의 임계전류밀도가 1만 A/cm<sup>2</sup>을 상회하고 있으며 약결함 등으로 인한 자장 특성의 저하도 많이 개선되고 있다. 또한 고에너지 빔을 이용한 irradiation<sup>10)</sup>으로 제작하는 YBCO에서도 미세 결함을 도입함으로써 높은 임계전류밀도가 보고되고 있고, 자속선 핀닝 현상을 이용하면 이러한 고성능 고온 초전도체 벌크를 지금까지 없었던 새로운 형태의 강력한 자장을 발생시킬 수 있는 영구 자석으로 사용할 수 있다. 이것은 자속선 핀닝력이 큰 초전도체에 의하여 자장이 트랩되는 것을 이용하는 것으로 MPMG나 QMG등과 같은 용융법으로 만든 벌크 시편을 영구자석위에 놓고 77K로 냉각을 시킨 후 hall probe로서 자장분포를 측정된 결과를 그림 3에 나타냈다<sup>11)</sup>. 시편의 중앙에 0.7T 정도의 자장이 트랩되고 벌크 초전도체는 영구자석으로 바뀐다. 여기서 자속선 핀닝력을 향상시키면 트랩되는 자장의 크기가 비례하여 커지게 된다.

이러한 벌크자석은 일본의 Murakami등도 활발하게 연구하고 있는데 MPMG법으로 만든 직경 10~20mm의 YBCO에 자장을 트랩시키는 것에 의하여 1000 Gauss의 자장을 발생시켰으며 최근에는 MPMG법을 개량하여 자장 1T를 발생시키는 고온 초전도 디스크 자석을 개발하였다. 벌크자석에서 가장 두드러진 개발은 미국 텍사스초전도센터의

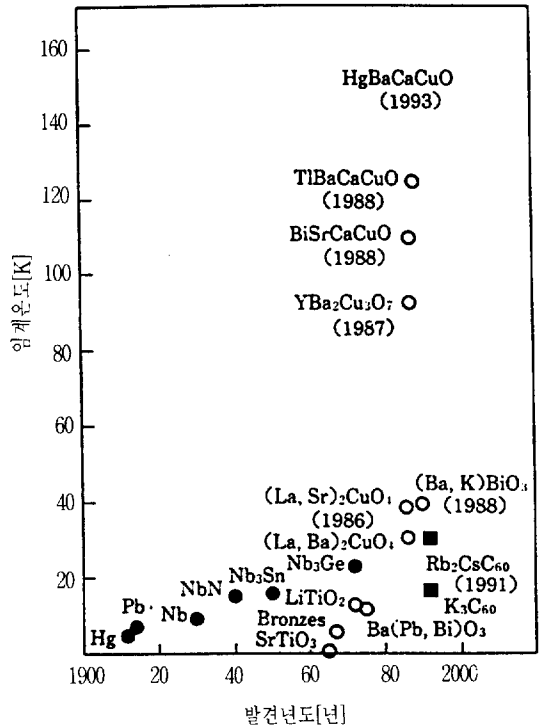


그림 2 고온초전도체의 임계온도 기록.

Fig. 2 Record of critical temperature in High Tc superconductor.

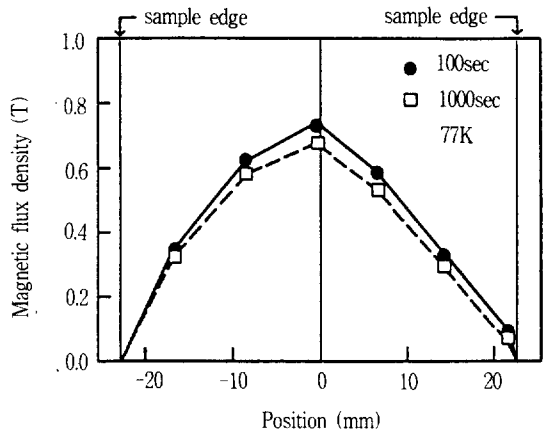


그림 3 QMG법으로 만든 고온초전도체 시편의 잔류자속밀도의 표면 분포.

Fig. 3 Surface profile of residual magnetic flux density on the single-grained QMG specimen.

Weinstein등에 의한 것으로 그들은 이온 irradiation법을 이용하여 pinning center를 시료 내부에 도

입하는데 성공함으로써 77K에서 1.42T를 발생시킬 수 있는 벌크자석을 개발하였다. 이 자석은 1×1×1.2cm<sup>3</sup>크기의 5개의 초전도체 타일로 이루어져 있고 직경 2cm의 벌크에서는 77K의 임계전류밀도가 85000A/cm<sup>2</sup>로 높은 값을 나타냈다. 그들은 이러한 고임계전류밀도의 YBCO로 초전도 소형 DC 모터, 입자빔 bending magnet 등에 응용이 가능하다고 지적하고 있다.

**2.2 전력 저장용 플라이 휠**

고온초전도 벌크의 대규모 응용으로서 현재 가장 주목을 받고 있는 것이 초전도플라이휠<sup>12)</sup>이다. 플라이휠이란 기본적으로는 원판을 회전축에 설치한 형태로 원판을 회전시키는 것에 의하여 운동에너지를 형태로 에너지를 저장하는 것이다. 에너지의 입력은 적당한 에너지 변환장치, 예를 들면 모터를 통해서 원판의 회전속도를 증대시키고 출력은 다시 에너지 변환장치를 통해서 사용하기 쉬운 전기에너지로 변환시킬 수 있다.

이와 같이 플라이휠은 원판의 회전속도의 증가에 의하여 에너지의 저장 방법출을 행할 수가 있고 SMES보다는 다소 떨어지나 응답성도 상당히 좋다. 그러나 통상의 기계식 베어링을 사용하는 한 회전축의 마찰 때문에 대기중의 에너지가 크게 감소한다고 하는 문제가 생긴다.

플라이휠에서 저장할 수 있는 에너지는 회전 원판의 운동에너지로 계산할 수 있다. 예를 들면 질량 M(kg), 반경 r(m)의 원판을 회전각속도 ω(rad/s)로 회전시킬 때 저장되는 에너지 E(J)는

$$E = Mr^2\omega^2$$

로 나타내준다. 저장 에너지를 증가시키기 위하여는 원판을 크게 하든가 회전속도를 크게 할 필요가 있다. 원판의 중량을 크게하기 위해서는 초전도체의 반발력을 크게 할 필요가 있다.

자석이 균일하다는 가정하에서 진공중에서 회전시키면 저장 효율은 100%이지만 SMES에서와 같이 냉각의 문제나 진공장치를 필요로하기 때문에 실제의 시스템을 만들어 검토하면 84%정도까지는 효율을 높일 수 있다는 계산이 있다.

일본의 경우 초전도베어링 개발에 힘입어 일본 정공과 ISTECC는 공동으로 700 J(0.2 Wh)의 초전도플라이휠을 제작하고 총방전에 성공하였다. 최근 동경전력, 히타치, ISTECC가 공동으로 50Wh급(그림 4 참조), 또한 시코쿠전력, 미쯔비시전기, 세이코엡슨이 공동으로 60Wh급의 초전도플라이휠 장치를 개발하고 있다. 이탈리아의 CISE가 16Wh장치를 제작하고 독일의 칼스루에연구소가 주체가

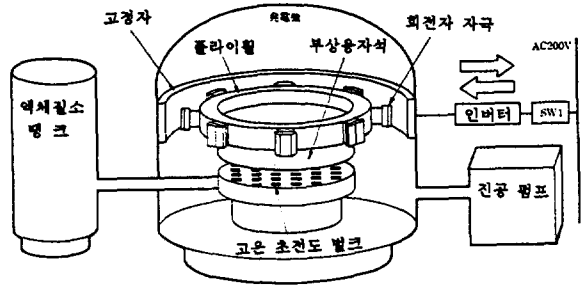


그림 4 동경전력, 히타치제작소, ISTECC 공동으로 50Wh급 초전도플라이휠의 외관.

Fig. 4 External appearance of prototype 50Wh superconducting flywheel developed by TEPCO, Hitachi and ISTECC.

되어 초전도플라이휠의 요소 기술의 검토 및 설계가 행해지고 있으며 미국의 아르곤국립연구소에서도 2kWh장치의 개발에 착수하고 있다.

플라이휠에 저장되는 에너지는 대형화 할수록 증가하지만 초전도체의 부상력이 클수록 유리하게 된다. 부상력은 초전도체의 임계전류와 자장의 크기에 의존하고 자장의 크기는 자석의 형상 및 배치를 최적화하여 개선할 수 있다. 그러나 영구자석에는 자장 강도에 한계가 있기 때문에 초전도자석을 이용하는 것도 검토되고 있다.

초전도체에 의한 중량물의 공중 고정 은 핀닝현상을 이용하고 있기 때문에 회전 방향에 대해서 자석이 균일하지 않으면 안된다. 자석이 불균일하면 마찰이 생기고 회전손실이 생긴다. 현 시점에서는 대형의 자석을 만들 수 없으므로 소형자석을 연결하여 링의 형태로 하고 있지만 접촉 부위에서는 자장이 불균질하게 되고 손실의 원인이 된다.

원판의 회전속도를 높이기 위하여는 축수 강성을 높일 필요가 있다. 초전도체의 핀닝현상에 의한 부상의 경우 초전도체내에 트랩된 자속선의 수를 증가시키면 강성을 높일 수가 있다.

초전도플라이휠은 앞으로의 전력 수요 증가를 생각하면 21세기에 중요한 기술이 될 가능성이 크며 SMES와 결합하여 전력시스템에 적용하는 것보다 각각의 특징을 살린 실제 적용이 선택의 폭을 높일 것으로 기대된다.

**2.3 자기실드**

고온초전도체에 의한 자기실드 응용에는 자기부상열차나 MRI장치<sup>13)</sup>의 자기실드와 같은 강한 자장을 허용되는 아주 낮은 수준까지 차폐하는 타이프와 뇌자기계측과 같이 자기 잡음중의 극저자장 공간을 형성하는 타이프가 있다. 각각 강자성체에

의한 자기실드에서는 실현 곤란한 비용절감, 소형화 및 실드공간의 고품질화가 가능하게 된다. 후자의 경우, 차폐해야하는 자장 노이즈수준이  $<10^{-6}T$ 로 지극히 낮기 때문에 임계전류밀도 수준이 그리 높지 않아도되나 피 시험체가 있는 공간내에서 개구부등으로 부터의 누설자장이  $10^{-8}$ 정도의 차폐효과를 실현하는 것이 요청된다. Ag원통에 Bi2212초전도체를 도포, 소결반응시킨 실용사이즈(직경 65cm, 길이 200cm)의 자기실드 장치가 제작되어 개구부에 강자성체 링을 배치하는 것 등에 의하여 차폐 효과의 향상이 검토되고 있다<sup>14)</sup>. 한편 강한 자장을 차폐하기 위해서는 반자성자화가 큰 재료가 필요하다. 최근 YBCO 용융체나 BSCCO를 원통상의 Ag표면에 도포 소성한 자기실드재에 원통축 방향으로 자속밀도를 측정된 결과가 보고<sup>14)</sup>되고 있다. 그림 5를 보면 원통 내경에 대해서 거의 완벽하게 차폐할 수 있는 자장의 수준을 알 수 있다. 표시는 각각 Y123, Bi2212, Bi2223상의 시험체의 결과를 나타낸다. 표시 옆의 숫자는 실드층의 수이다. 또한 용융체의 타일상의 박판을 다층으로 적층한 자기실드 판을 자기부상열차 등의 대형장치의 실드재로 응용하기 위한 연구도 이루어지고 있다.

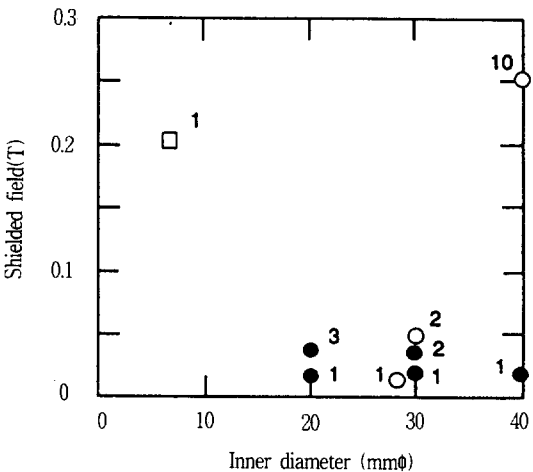


그림 5 직경 d의 고온초전도체 튜브의 최대 차폐자장. 심볼 옆의 숫자는 초전도체층의 갯수를 나타낸다.

Fig. 5 Maximum shielded field in oxide-superconducting tubes with inner diameter d. The numeral around each symbol shows the number of superconducting layers.

## 2.4 전류 리드

고온초전도체를 액체헬륨냉각의 초전도자석의 전류리드로 사용하면 기존의 전류리드와 비교하여 열전도율을 지극히 작게 할 수 있고, 주울열이 발생하지 않으므로 극저온계의 열부하 경감을 위해서 유효하게 사용할 수 있다.

Y계<sup>15,16)</sup>, Bi계 벌크<sup>17)</sup>, Ag피복 Bi계 테이프<sup>18)</sup> 등에 의해 500A로 부터 2000A급의 전류리드가 만들어 지고 있다. 그림 6은 전류 용량에 대한 극저온부로의 열 침입을 나타낸다. 표시는 각각 헬륨가스

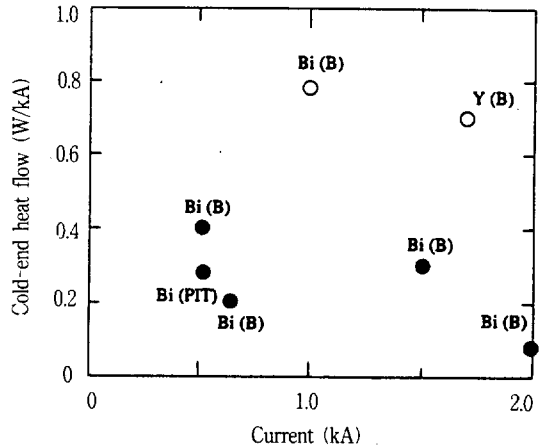


그림 6 고온초전도체 전류리드에서의 극저온부로의 열침입.

Fig. 6 Cold-end heat flow in case of oxide superconducting leads. Y(B): Y-Ba-Cu-O bulk, Bi(B): Bi-Sr-Ca-Cu-O bulk, Bi(PIT): Bi-Sr-Ca-Cu-O Ag sheathed tape.

냉각방식과 헬륨가스냉각에 액체질소 온도 수준의 thermal anchor를 겸용한 방식을 나타낸다. 종래의

Cu리드에 비해 헬륨가스 냉각만의 방식으로 극저온부로의 열침입은 60~70%정도로 액체질소 온도 정점이 있는 경우에는 더욱 낮은 수준까지 억제할 수 있다. 실제로 필요한 냉동계로의 입력 파워를 환산하여 비교하면 후자의 경우에는 종래형의 1/3 정도가 되는 계산<sup>19)</sup>이 있다. 전류리드의 대용량화를 위해서는 저손실 접속이나 피복재에 의한 열부하의 경감, 상전도 전이 시의 대책 등이 고려되어야 한다.

## 3. 초전도선재의 응용

### 3.1 고온초전도마그네트

세계적으로 가장 활발하게 선재화의 연구가 진행되고 있는 산화물계는 Bi계의 2212와 2223상이다. Bi계는 가공열처리를 최적화 함으로서 초전도상의 결정립이 선재의 길이 방향으로 배향되는 특성을 나타내고 "power-in-tube method"으로 만든 2223상의 Ag피복 초전도테이프와 "dip coating"법으로 만든 2212상 초전도테이프<sup>20)</sup>에서 높은 임계전류밀도가 보고되고 있다. Bi2223상은 77K에서의 사용을 목적으로 길이가 수백m나 되는 단심 및 다심 Ag피복테이프 제조되어 77K운전의 pancake형태의 초전도마그네트로 이용되고 있다.

한편 Bi2212상은 4.2K에서의 임계전류밀도 특성이 기존의 금속계 선재에 비하여 그림 7에 나타낸 것과 같이 우수하기 때문에 주로 고자장 마그네트용 선재로 실용화하기 위한 연구가 진행되고 있는데 현재 Ti첨가의 Nb<sub>3</sub>Sn선재로 만든 15T정도의 back up자장을 발생시킬 수 있는 초전도마그네트에 Bi2212테이프선재로 만든 코일을 내부에 삽입한 20T이상의 자장을 발생시킬 수 있는 초전도마그네트가 일본, 프랑스 등에서 개발 연구 중이다.

가장 최근에 일본의 금속재료 기술연구소에서는 Bi2212코일을 삽입한 초전도마그네트에서 세계 최고의 21.5T의 자장을 발생시키는데 성공하였다. 이 Bi코일은 Bi2212/Ag테이프 선재로 제작한 싱글 팬

케이크형(single pan cake type) 코일이며 코일의 외경은 45mm, 내경 15mm의 구조로 되어 있다. 포화초유동헬륨(1.7K)중에서 금속계 초전도마그네트만으로 20.8T를 발생시키고 상기 고온초전도코일로서 0.7T를 발생시켜 21.5T에 도달했다고 한다.

Bi2223상 초전도테이프를 측정 온도를 변화시켜서 임계전류밀도의 자장의존성을 조사<sup>21)</sup>해보면 40K이하의 온도 범위에서는 임계전류밀도의 자장특성의 저하가 그다지 크지 않은 것으로 보고되고 있다. 이러한 특성을 이용하여 소형 냉동기를 조합시킨 상온 보아(bore)형 초전도마그네트가 개발되고 있다. Ag피복 Bi계 선재를 이용하여 50mm의 상온보아에서 1~2T이 자장을 발생시킬 수 있는 마그네트<sup>22)</sup>가 일본 미국등을 중심으로 개발되고 있는데 20~30K운전의 소형 냉동기와 결합된 구조로 되어 있고 열침입을 방지하기 위하여 Bi2223상의 전류리드를 사용한 것이 특징이라 할 수 있다. 미국의 IGC사에서는 4개의 테이프선재를 평행으로 권선하여 만든 냉동기부착 마그네트를 시판하고 있는데 4.2K냉각에서는 2.6K, 27K에서는 1.2T를 발생시킬 수 있다고 한다. 이러한 마그네트를 사용하면 액체헬륨을 사용하지 않고 자장을 발생시킬 수가 있어, 앞으로 자성 측정장치 등으로 실용화될 가능성이 크다.

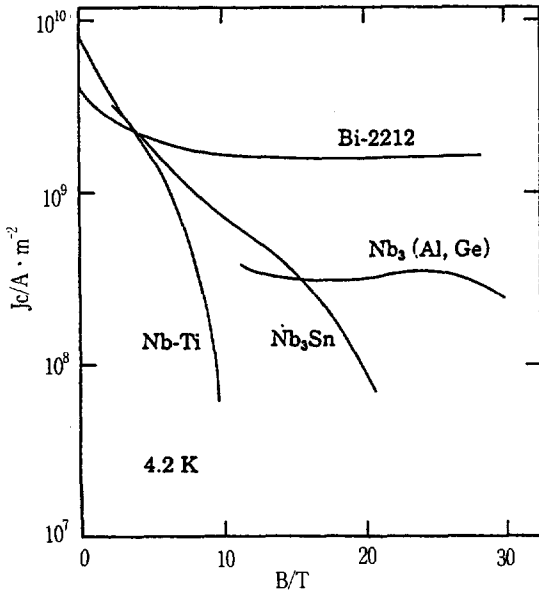


그림 7 4.2K에서의 Bi2212 선재와 금속계선재의 Jc-자장특성의 비교.

Fig. 7 Comparison of Jc-magnetic property for Bi2212 wire and metallic superconducting wire at 4.2K.

### 3.2 고온초전도 송전케이블

Ag피복 Bi2223초전도테이프의 응용에 있어서 현재 세계적으로 가장 주목을 받고 있는 것이 액체 질소 냉각형 고온초전도 송전케이블이다.

전력수요는 앞으로도 그 수요가 증가할 것으로 예측되고 있고 지중송전케이블 계통을 대상으로 한 경우 일본에서는 전력수요의 증가를 년 2.3%로 가정하여 30년 후에는 현재의 2배의 전력을 케이블계통으로 송전할 필요가 대두되고 있다고 한다. 또한 한국에서도 유사한 상황이지만 도심부에서의 전력수요밀도의 증가 경향은 계속될 것으로 예측되고 있다.

현재 도심부의 각 수요에 지중케이블계통을 확충하여 전력공급의 증대를 생각할 수 있지만 중장기적으로는 지하철, 통신, 수도, 빌딩 군이 조밀한 대도시의 지하 공간에 새로운 통도를 건설하는 것은 곤란할 것으로 예상된다. 여기서 고온초전도체를 이용하여 콤팩트한 대용량 케이블을 이미 설치한 관로나 통도에 수납할 수 있으면 지하 공간을 유효하게 이용할 수 있고 건설 경비도 절감할 수 있으며 안정하고 신뢰성이 있는 전력공급이 가능하게 될 것이다. 현재 일본에서는 동전전력과 스미

토모전공이 공동으로 Ag피복 Bi2223초전도테이프를 이용한 송전케이블을 개발<sup>23)</sup>하고 있다.

그림 8에 그들이 개발한 도체의 구성도를 나타낸다. 선재의 제조방법을 살펴보면 "power-in-tube"법을 이용하여 테이프재로 가공을 행하였으며 압연과 열처리를 수회 반복하는 것에 의하여 두께 0.3mm의 테이프상의 초전도선으로 만들었는데 단위면적당 임계전류밀도는 1만 A/cm<sup>2</sup> 되는 것으로 보고되고 있다. 도체권선에 중요한 굽힘특성은 다심 선재의 구조에서 Ag가 외부응력에 의한 스트레인을 흡수하는 완충재로서 작용하기 때문에 양호하고 전류특성의 저하도 거의 없었다고 한다. 이러한 선재를 사용하여 총 길이 5m의 2000A급 송전의 모델 도체를 제작하여 액체 질소

중에서 통전 측정된 결과 임계전류는 2030A인 것으로 보고되었고 실온과 액체 질소 온도의 열싸리클에 의한 저하도 없는 것으로 보고되고 있다. 전류를 더욱 증가시키기 위하여 케이블용 드럼에 감긴 상태에서도 임계전류가 감소되지 않는 것을 확인하기 위하여 플렉시블한 5m길이의 외경 24mm의 도체를 제작<sup>24)</sup>하였는데 반경 1.3m의 굽힘응력을 가한 상태에서도 3000A의 임계전류가 확인되었다고 한다.

초전도선에 직류전류를 흘리는 경우 손실 없이 전력을 송전할 수 있지만 상용주파수에서 교류전류를 흘릴 경우에는 히스테리시스손실등이 미량이지만 발생하는 것으로 확인되고 있다. 따라서 교류손실을 어떻게 최소화시키고 전류 밀도를 더 높여 케이블을 소형화할 수 있는가가 실용화의 중요한 관건이 될 것으로 생각된다.

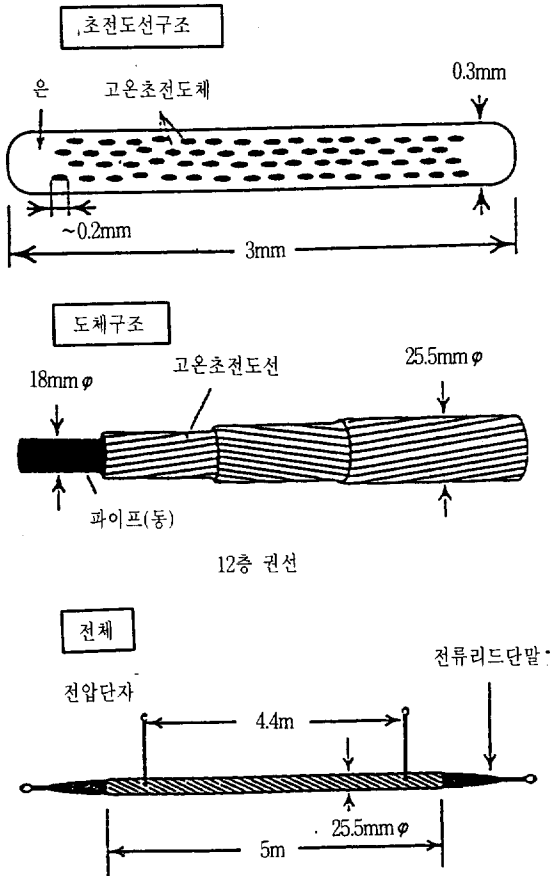


그림 8 스미토모전공에서 개발한 초전도송전케이블에서의 초전도선, 도체.

Fig. 8 Structure of superconducting wire, conductor and cable in the superconducting power transmission cable developed by Sumitomo elec.

### 3.3 고온초전도 모터

미국의 REC(Reliance Electric Co.)는 ASC(American Superconductor Corp.)사로 부터 코일을 받아 회전자에 레이스트랙형 고온초전도코일 4개를 이용한 5마력 회전자계형 동기모-터(출력 3730 watt)를 1800rpm으로 회전시키는데 성공하였다. 그들은 이미 93년에도 정자계용으로 고온초전도코일을 이용한 2마력 모-터의 개발에 성공하였지만 이번은 회전자를 초전도화 하는 것에 성공함으로써 출력을 2.5배로 높인 것이다. 코일은 전체길이가 670mm로 4개의 레이스트랙형 코일로 이루어져 있다.

미국의 경우 산업용 전력의 70% 이상이 모-터용 동력으로 소비되고 있고 그 효율 향상은 에너지 절약에 큰 효과가 있는 것으로 분석되고 있다. 액체 질소에 의한 냉각비용을 생각하면 1000마력 이상의 고온초전도 모-터가 개발되면 경제효과가 클 것으로 예상되고 있다.

## 4. 박막 초전도체 응용

### 4.1 조셉슨 소자

초전도체 2개를 절연물 등을 사이에 삽입하여 전기적으로 약하게 결합시키면 그 양단에 전위차가 없어도 초전도전류가 흐르게 된다. 이러한 효과를 이용한 조셉슨소자는 처음에는 무저항으로 전류가 흐르고 그 전류의 밀도가 임계전류를 넘으면 전기저항이 나타나서 초전도체 사이에 전압이 발생한다. 이때의 스위칭속도는 현재 주류를 이루고 있는 Si반도체 소자에 비하여 10배 이상 빠르다. 이 때문에 조셉슨 소자는 차세대 초고속 컴퓨터

의 연산소자로서 기대되고 있다.

조셉슨소자를 이용한 소자로서는 전자파검출소자, 고속스위칭소자, SQUID 등이 있다. 이들 소자들은 모두 거시적 양자현상에 근거한 동작 원리를 갖는 소자들로서 그 성능은 초전도체의 gap energy로 규정된다. gap energy를 전압으로 표현한 것이 gap voltage(Vg)이다. 초전도체를 이용한 전자파검출소자가 주목되고 있는 것은 주파수가 100 GHz 이상의 고주파의 검출에 적합하기 때문이다. 전자파를 검출하려고 하는 경우 검출 가능 주파수의 상한은 Vg에 비례한다. 예를 들면 Vg가 1mV 이면 검출 가능한 주파수 한계는 500 GHz이다. 현재 300 GHz 이상의 서브밀리파 영역의 이용기술의 개발이 진행되고 있고 전자파검출소자의 고주파화가 요구되고 있다. 이 때문에 Vg가 큰 초전도체를 검출 소자의 재료로서 이용하는 것이 기대되고 있다. 응용으로서는 군사적 응용 이외에도 위성 방송이나 우주통신의 안테나, 믹서 등의 새로운 민생 응용의 가능성이 제시되어 현재 활발하게 연구되고 있으며 이를 위하여 표면손실의 저감, 접합 개발 등의 과제 등과 함께 냉동기의 소형화, 고신뢰화가 요구되고 있다.

초고속 LSI에 응용의 기대되고 있는 스위칭소자에서는 접합의 초전도상태와 상전도상태 사이의 전이가 아주 고속으로 일어나는 현상을 이용한다. 소자에 부하저항 R이 접속되어 있는 경우의 스위칭시간은 저항 R과 접합임계전류치 Ic의 곱에 역비례한다. 저항과 전류의 곱은 Vg에 의하여 결정된다. 이것은 큰 갭전압을 갖는 초전도체를 이용하면 스위칭소자의 고속화가 가능하다는 것을 의미한다.

SQUID에 의한 미소자속의 측정에서 검출감도는 자속에 대한 출력전압의 비에 의하여 결정된다. SQUID의 S/N비는 접합 임계전류와 저항의 곱이 크게 되는 접합을 이용하는 것으로 개선될 수 있다.

최근에 미국의 Conductus사는 고온초전도체를 이용한 77K운전의 SQUID를 개발하여 시판하고 있다. Dr. SQUID란 이름이 붙은 이 모델은 마그네토메타의 pickup코일(YBCO)도 일체화되어 있고 실제의 자장측정이 가능하다고 한다. 조셉슨소자부에 대해서는 아직 명확하게 보고된 바가 없지만 노이즈레벨은 심자계측정에 충분한 수준이라고 한다.

#### 4.2 고온초전도박막 한류소자

한류소자는 사고 등으로 정격이상의 전류가 흘

렀을 때 신속하게 대응을 하여 전류를 한류시켜 전원계 및 회로를 보호하는 기능을 한다.

현재 한류소자로서는 주로 상전도형 리액터가 사용되어 왔었지만 부하전류의 변동에 따르는 전압 변동이 크고 한류 특성도 불충분하였다. 초전도 한류기는 대전류가 흘렀을 때 임계전류를 넘으면 초전도가 파괴되어 순간적으로 상전도상태로 전이하는 것을 이용하는 것으로 Nb-Ti 합금계 초전도선으로 만든 S-N전이형 한류기의 경우는 전력계통에의 실용화의 연구가 진행 중이나 소형 냉동기의 문제가 지적되고 있다. 한편 고온초전도체의 경우는 한류기소자로 벌크와 박막의 두가지 형태를 생각할 수 있는데 벌크의 경우는 임계전류밀도가 낮기 때문에 단면적이 크게 되고 상전도 전이시의 발생 저항이 충분히 높지 않다는 문제점이 있다. 박막의 경우는 임계전류밀도는 벌크에 비하여 상당히 높으나 국소적으로 발열부가 생겨서 한류 동작 중에 타 버리는 등의 문제점으로 충분한 정격이 이루어 지지 않았다. Hayashi등<sup>25)</sup>은 SrTiO<sub>2</sub> 기판상에 Y계 박막을 증착하고 이것을 photo etching하여 폭 1mm, 유효길이 40mm의 지그재그형으로 가공하여 그 위에 0.12 $\mu$ m Ag보호막을 입혀서 고온초전도 한류소자를 제작하였다. 이 고온초전도 한류소자는 특성시험에서 200V/400A의 사고전류를 200 $\mu$ s 사이에 그림 9에 나타낸 것처럼 11.3A로 한류시키는데 성공하였다. 박막을 사용하는 것으로 동작시의 소자 저항이 최대 30.5 $\Omega$ 으로 높게 되고 또한 박막의 균일성으로 인하여 대응속도가 빠른 것으로 생각되어 지고 있다. 앞으로 박막형의 고온

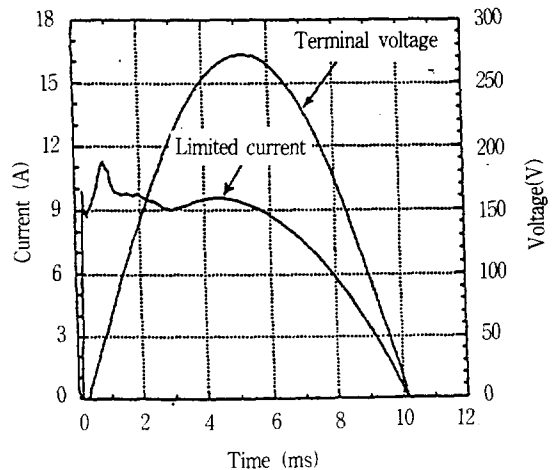


그림 9 YBCO한류소자의 특성시험 결과.

Fig. 9 Result of characteristic property test of YBCO current limiter.

초전도 한류소자를 고전압화, 대용량화하는 연구가 필요하다고 본다.

### 5. 결 론

지금까지 고온초전도체의 최근의 개발동향을 살펴보았는데 벌크나 박막의 경우는 Y계, Bi계 그리고 초전도선재의 경우는 Bi, Tl계에서 일본, 미국을 중심으로 실용화를 위한 많은 연구들이 활발하게 진행되고 있는 것을 알 수 있었다. 앞으로 급속계 초전도체와 같은 광범위한 응용을 위해서는 고온초전도메카니즘의 이론적 규명과 함께, 재료 물성 및 가공프로세스 차원에서 1) 임계전류밀도의 향상, 2) 약결합(weak link)의 개선, 3) 기계적 특성 향상, 4) 안정하고 균질한 초전도상의 제조 등의 문제들에 대하여 지속적인 개선과 대책이 필요하다고 본다.

### 참 고 문 헌

- 1) L. Gao, Y.Y. Xue, F. Chen, Q. Xiong, R.L. Meng, C.W. Chu, J.H. Eggert and H.K. Mao, preprint.
- 2) Y. Yamada, M. Satou, S. Murase, T. Kitamura and Y. Kamisada : Adv. in Superconductivity V, p. 717(1992).
- 3) M. Ueyama, T. Hikata, T. Kato and K. Sato : Jpn. J. Appl. Phys., 30, p.L1384, (1991).
- 4) K. Sato, K. Ohkura, N. Shibuta, H. Mukai, M. Ueyama, T. Kato, Fujikami and M. Muranaka : Proc. of 5th US-JAPAN workshop on High  $T_c$  Superconductors, Tsukuba, Japan, p. 27(1992).
- 5) J. Sato, A. Nomoto, T. Sasaoka, T. Umezawa M. Seido, K. Aihara, T. Kamo : Proc. of 5th US-JAPAN workshop on the High  $T_c$  Superconductors, Tsukuba Japan, p.38 (1992).
- 6) Superconductor industry spring 1993.
- 7) H. Fujimoto, M. Murakami, S. Gotoh, N. Koshizuka and S. Tanaka : Adv. in Superconductivity 2, p.285 (1990).
- 8) M. Murakami, M. Morita, K. Doi, M. Miyamoto : Jpn. J. Appl. Phys., 28, p.1189 (1989).
- 9) S. Jin, T.H. Tiefel, R.C. Sherwood, M.E. Davis, R.B. Van Dover, G.W. Kammlott, R.A.

- Fastnacht and H.D. Keith : Appl. Phys. Lett., 52, p.2074 (1988).
- 10) R. Weinstein, I.G. Chen, J. Liu and K. Lau : J. Appl. Phys., 70, p.650 (1991).
- 11) K. Sawano et al. : Jpn. J. Appl. Phys., 30, p. 1157 (1991).
- 12) T. Suzuki et al. : Advances in Superconductivity VI, in press.
- 13) P.A. Rios and E.T. Laskaris : Proc. of 9th Int. Conf. on Mag. Technol., Zurich, Switzerland p.231 (1985).
- 14) T. Sasaki et al. : Jpn. J. Appl. Phys., 31, p. 1026 (1992).
- 15) F. Grivon, A. Leriche, C. Cotteville, J.C. Kermarrec, A. Petitbon, A. Febrier and Y. Laumond : IEEE Trans. Magn. 27, p.1866 (1991).
- 16) J.W. Wu, J.T. Dederer, P.W. Eckels, S.K. Smith, J.R. Hull, R.B. Poeppel and C.A. Youngdahl : IEEE Trans. Magn., 27, 1861 (1991).
- 17) P.F. Herrmann, E. Beghin, J. Bouthegourd, C. Cotteville, G. Duperray, F. Grivon, A. Leriche, V. Winter and T. Verhaerge : Crit. Curr. in HTSC, Vienna, April 1992.
- 18) B. Dorri, K. Herd, E.T. Laskaris, J.E. Tkaczyk and K.W. Lay : IEEE Trans. Magn., 27, p.1858 (1991).
- 19) K. Ueda et al. : to be published in Proc. of ISS 5, Kobe, Japan 1992.
- 20) H. Kumakura : Advances in Superconductivity IV p.547 (1992).
- 21) P. Haldar and L.P. Mottowidlo : J. Minerals, Metals & Materials Soc., 44, p.54 (1992).
- 22) SUPERCOM, 2, May (1993).
- 23) H. Kikuchi, N. Uno, S. Tanaka, T. Hara, H. Ishii and T. Yamamoto : Advances in Superconductivity V, p.713 (1993).
- 24) J. Fujikami, N. Shibuta, K. Sato, H. Ishii, T. Hara : to be published in Proc. of ISS 6, Hiroshima, Japan 1993.
- 25) H. Hayashi, T. Mori, Y. Wada, S. Matsuno, S. Kinouchi, F. Uchikawa and H. Watari : Proc. IEEE Jap., Power and Energy division Conf., p.860 (1993).