

## Bi-2212/Ag 고온초전도선 개발 동향

■ 하 동 우 / 한국전기연구원 초전도재료연구그룹 책임연구원

### 1. 서 론

고온 초전도선은 전력기기분야, 과학 및 산업용 초전도 마그네트 분야 등 초전도 응용 기술의 실용화를 위한 가장 중요한 핵심 소재로서 세계적으로 활발하게 연구 개발이 이루어지고 있다. 초전도 시스템의 실용화를 위해서는 초전도 선의 임계전류밀도, 교류손실과 같은 초전도 특성이 향상되어야 기존 시스템과의 경쟁력을 확보할 수 있으며, 또한 권선 및 시스템의 운전 동안 대전류에 의한 전자기력을 견딜 수 있는 기계적인 강도를 필요로 한다. 현재까지 고온초전도 선의 개발 과정에서 Bi(Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>-(Bi-2223) 또는 Bi(Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>1</sub>Cu<sub>2</sub>O<sub>x</sub>-(Bi-2212) 산화물로 PIT법으로 제조한 것을 제1세대 초전도선 (1G), Y 또는 다른 희토류 금속인 Sm, Ho, Gd 등 Re-Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> 산화물로 박막 코팅 프로세스를 이용하여 만든 것을 제 2 세대 초전도선 (2G)이라고 부르고 있으며 제조기술 및 특성에 있어서 서로 간 장단점을 갖고 있다. PIT법이란 powder-in-tube 공정을 말하는데 즉, 은(Ag) 튜브 내에 Bi-계 초전도 하소분말을 충전하고 이를 인발 및 신성 공정에 의해 직경을 줄인 다음 이들 다발을 다시 은 또는 은 합금 튜브에 다심선으로 가공한 다음 압연과 소결 열처리 공정에 의해 테이프 형태의 Bi-system/Ag 고온초전도 선을 만드는 것이다. MgB<sub>2</sub> 초전

도선의 경우에도 마찬가지로 대부분 PIT 공정으로 MgB<sub>2</sub> 분말 또는 Mg와 B 각각의 혼합 분말을 금속 튜브 내에 충전하여 상기와 같은 공정으로 가공하고 반응시켜 선재를 제조한다.

표 1에는 현재까지 개발된 고온초전도 선의 특성을 나타내고 있다. YBCO 초전도로 대표되는 Re-BCO 초전도선은 박막 코팅기술을 이용하므로 coated conductor라고도 한다. 2 세대 초전도선은 결정입자가 2축 결정방향으로 배향되어 있기 때문에 결정입계에서의 weak-link에 의한 전류감소가 크게 개선되어, 압연에 의한 1축 결정방향으로 배향된 Bi-계 초전도선보다 수십 배 높은 임계전류밀도의 특성을 나타낸다. 또한 Bi-계보다 Y-계 자체가 자장 변화에 대한 우수한 임계전류밀도 특성을 가지고 있기도 하다. 하지만 현재로서는 길이가 짧은 시료에서 높은 임계전류 값을 얻고 있으며, 실제 초전도기에 응용하기 위한 길이가

표 1 현재까지 개발된 고온초전도 선의 특성

	Bi-2212	Bi-2223	YBCO	MgB <sub>2</sub>
T <sub>c</sub> (K)	90	110	92	39
Bc <sub>2</sub> (B//c축)	~89	39 (Ag clad)	145 (film)	34
Bc <sub>2</sub> (B⊥c축)	?	198 (Ag clad)	72 (film)	49
Cu@77 K 대비 J <sub>c</sub> (A/mm <sup>2</sup> )@3T	11.7	←	17	7.8
제조 길이 (m)	>1,000	>1,000	600	1,000

긴 장선은 연구 단계에 있다. 또한 2007 년경에는 1G 초전도선의 단가보다 2G 초전도선의 단가가 더 값싸 질 것이라고 몇 년 전에 예측하였으나 값비싼 제조 장비와 제조공정 때문에 아직까지는 2G 초전도 선의 가격이 더 고가이며 Bi-계 초전도선보다 제조단가를 낮추기 위해서는 당분간 연구가 더 필요한 실정이다. 그리고 아직은 수백 m 이상의 장선재가 필요한 시스템에 당장 사용하기는 현실적으로 불가능하다. 하지만 표 1 에서처럼 미국 Super Power 사에서 최고 600 m까지 제조한 실적이 보고되고 있는 등 활발한 연구가 진행되고 있어 가장 실용화 기대치가 높은 선재임에는 틀림없다.

그리고  $MgB_2$  선재는 가격은 가장 저렴한 것으로 평가되고 있으나, 임계자장 특성과 임계전류밀도가 20 K 온도에서 다른 초전도체들에 비하여 크게 떨어져 자장 발생이 큰 응용시스템의 도체로 사용하기는 어려운 것으로 판단된다. 특히 20 K에서 2 T 이상의 자장을 발생시키는 마그네트를 제조하기에 어려운 실정이다.

## 2. Bi-2212 고온 초전도선의 특성

고온초전도 도체를 이용하는 전력기기가 대형화될수록 가장 핵심적으로 개발하여야하는 것이 바로 여러 가닥의 소선을 케이블 형태로 가공한 대용량 고온초전도 도체이다. 초전도 자기에너지 저장장치 (SMES; Superconducting magnetic Energy Storage)에서도 마찬가지로 초전도 코일의 에너지 밀도를 높이기 위해서는 kA급 이상의 대전류를 통전하는 것이 필수적이다. 고온초전도체 (HTS 선재)는 금속계 초전도체에 비해 임계 온도가 높고, 자계 중에서의 통전 특성의 저하가 적어 고자계 코일에 응용될 수 있다는 장점 때문에 고온초전도 SMES용 선재로 적합하다. 그러나 현재 개발된 고온초전도 선재는 단일 strand에 최고 100A 정도만을 흘릴 수 있다. 따라서 SMES코일의 대형화를 위해서는 선재를 적층하거나 케이블링하는 방법이 필요하다.

현재 개발되고 있는 고온초전도체들 중에서 Bi-2212 와 Bi-2223계가 PIT법에 의하여 테이프 형태의 장선재로 개발되어 연구용 초전도코일이나 초전도전력케이

블 시제품으로 사용되고 있다. PIT공정에서 판상의 초전도체 결정이 c-축으로 배향되는 것에 의하여 전류밀도가 향상된다. 일반적인 PIT공정에서는 압연에 의하여 산화물 조직을 치밀하게 하고 소성변형에 의한 집합조직을 유도하여 전구체 결정의 배향성을 높게 하는 공정과 소결열처리에 의하여 전구체상이 초전도상(Bi-2212 또는 Bi-2223)으로 변화할 때 결정입자의 배향성을 가지도록 하는 공정을 통하여 초전도결정들이 전류방향으로의 연결성이 향상되어 전류밀도가 증가하게 된다. 그러나 케이블용 소선으로 BSCCO선재를 적용하기 위해서는 압연공정을 생략하고 원형 단면의 세션으로 가공한 후에 소결 열처리과정을 거쳐야 된다.

그림 1에는 각 초전도 선의 4.2K에서의 인가자장에 따른 공학적 임계전류 밀도( $J_E$ )의 변화를 나타내었다.  $J_E$ 는 선재의 안정화재 (stabilizer)를 포함한 단면적에서의 임계전류밀도 값이다. Bi-2223 초전도체는 Bi-2212에 비하여 임계 온도는 높으나 6개의 원소성분(Bi, Pb, Sr, Ca, Cu, O)으로 이루어져 있기 때문에 열처리과정에서 단상의 초전도상을 만드는 것이 어렵고 불순물상의 형성과 분포에 따라 전류가 제한을 받기 쉬운 단점을 갖고 있다. 또한 원형 단면선재에서 Bi-2223선재의 임계전류밀도( $J_c$ )특성이 Bi-2212선재에 비하여 크게 낮은 값을 나타낸다.

따라서 Bi-2223 초전도 선과 비교하여 Bi-2212 초전도 선은 다음과 같은 몇 가지 장점을 가지고 있다. 첫

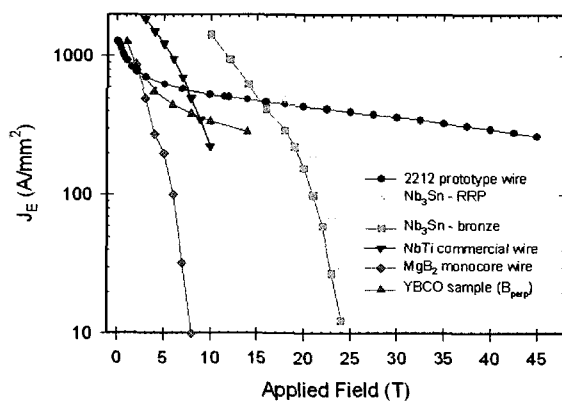


그림 1 각 초전도 선의 4.2K에서의 인가자장에 따른 공칭임계전류밀도( $J_E$ )의 변화

제로 20 K 이하의 온도에서는 Bi-2223에 비해 임계전류 값이 비슷하거나 더 우수한 특성을 나타낸다. 둘째로 Bi-2212 선의 열처리기는 1 단계로 끝낼 수 있어 Wind & React 공정의 열처리가 가능하며, 더 다양한 형상의 선재 제조가 가능하다는 것이다. 그래서 원형 소선을 이용하여 최종 열처리 전에 여러 가닥으로 이루어진 케이블, 즉 러더포드 (Rutherford) 케이블의 제조가 가능하다는 것이다. SMES와 같이 펄스적으로 운전하는 코일에서 도체의 전류 용량을 증가시키면서 동시에 교류손실을 줄이는 방법으로 도체를 제조하기 위해서는 여러 가닥의 소선을 꼬아서 만드는 러더포드 케이블로 제조할 필요가 있으며 이를 위해서는 소선이 원형 상태를 유지하고 있어야 한다. Bi-2212 초전도 선은 유일하게 원형 상태에서의 응용이 가능하므로 전력기기용 대전류 통전을 위한 집합도체의 조건을 만족시킬 수 있는 초전도 선은 Bi-2212 초전도 선이 유일하다고 할 수 있다.

또한 그림 1에서 알 수 있듯이 4.2K의 온도에서 자장 인가에 따른 임계전류밀도의 저하가 가장 낮다는 것을 장점이 있다. 이것은 Bi-2212 고온초전도선을 사용하여 고자장 마그네트를 제작하는데 유리하다는 것을 의미한다. 그래서 고자장 마그네트에 Bi-2212 초전도선을 활용하기 위한 연구도 활발하다.

그래서 Bi-2212 고온초전도선의 응용 분야 중 SMES와 고자장 마그네트 응용 분야에 대해 설명하고자 한다.

### 3. 고온 SMES 및 고자장 마그네트

초전도 자기에너지 저장(SMES) 시스템은 전기에너지를 초전도 마그네트에 자기에너지 형태로 에너지를 저장하는 장치이다. 초전도 선에서는 저항이 없으므로 초전도 마그네트에 흐르는 전류에서는 손실이 없다. 어떤 도체라도 상전도 상태에서는 미소한 전기 저항을 가지기 때문에 전류를 흘리면 에너지는 전기 저항에 의해 열에너지로 소비되지만 초전도 도체의 경우 전기 저항이 '0' 이 되기 때문에 에너지는 소비되지 않는다. 초전도 마그네트를 충전시킨 후 영구전류 스위치, PCS (Permanent Current Switch)를 사용하여 폐회로를 만

들면 전류는 영구히 계속 흐르게 된다. 에너지는 영구 전류에 의해 자기 에너지의 형태로 초전도 코일에 저장되고, 그 에너지 양  $W$  (J)는 전류  $I$  (A)와 코일의 형상과 크기 등으로 결정되는 인덕턴스  $L$  (H)에 의해  $W = (1/2)LI^2$  으로 나타낼 수 있다.

SMES는 전기에너지↔자기에너지 변환에 의해 전기를 저장하기 때문에 다른 방법과 비교하여 효율이 월등하게 높다는 점과 에너지의 저장·방출이 매우 빠른 장점을 가지고 있으며, 이외에도 유효·무효 전력을 각각 제어할 수 있고, 수명이 반 영구적이며, 환경 친화적인 에너지 저장 기술이다.

SMES의 용도는 다음과 같은 2 가지로 나눌 수 있다. 하나는 고속 응답특성을 활용하여 초 단위로 대용량의 저장에너지를 충·방전을 하는 용도로 이는 공급 측에서는 계통안정화 도모 및 대용량 부하를 보상할 수 있고, 부하 측에서는 순간정전 및 순간전압 강하와 같은 전력품질 문제를 해결할 수 있다. 다른 하나는 반복적인 충·방전에 의한 열화가 적다는 특성을 활용한 것으로, 경쟁기술인 이차전지나 커패시터 등에 비해 압도적인 Cycle 수명을 가져, 철도 등 사용빈도가 높은 변동부하를 보상하거나 태양광이나 풍력 등의 변동이 심한 불안정한 전원의 안정화를 도모할 수 있다.

일본에서는 2000년부터 고온 SMES 가능성 검토를 시작으로, 중부전력에서는 도시바와 함께 그림 2와 같은 순간 정전 및 순간 전압강하 보상을 1 MJ급의 고온 SMES 실증 기를 개발하였다. 이 시스템은 코일의 크기

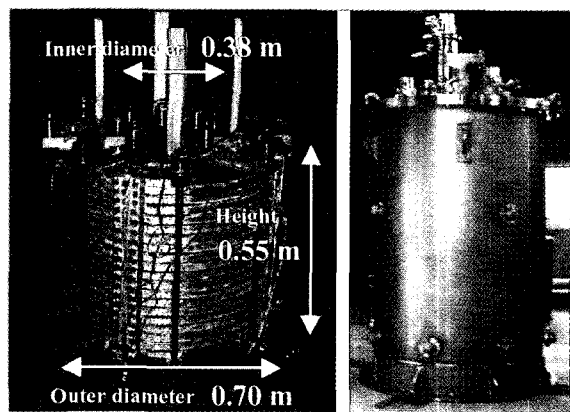


그림 2 중부전력의 Bi-2212 도체로 제작한 SMES용 마그네트 및 극저온 용기

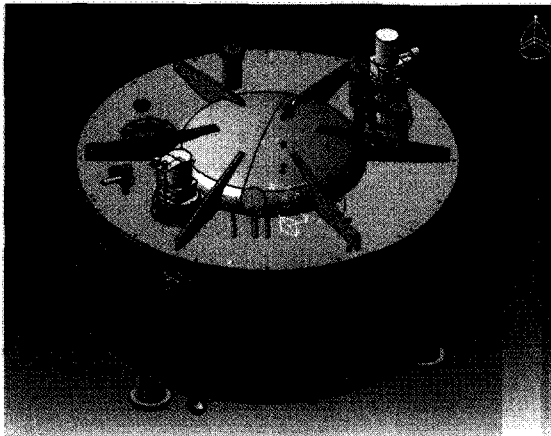


그림 3. Nexans사의 800kJ 고온 SMES

가 외경 70 cm, 내경 38cm, 높이 55cm이며 운전전류는 500A, 최대자계는 6T로, 내부에 액체 헬륨을 사용한 전도 냉각방식을 채택하고 있다. 이 시스템은 현재까지 개발된 고온 SMES로는 세계 최고 용량으로, 2004년 중부전력의 전력 기술연구소에서 실증시험을 성공적으로 마쳤다.

프랑스의 Nexans사에서는 그레노블 연구소와 공동으로 펄스에너지 원으로 사용하기 위한 용도로 그림 3과 같은 800 kJ급 고온 SMES를 개발하고 있다. Bi-2212 테이프 선재 3개를 사용한 적층형 초전도 선재가 이용되었으며, 마그네트는 26개의 싱글 팬케이크 코일을 수직으로 적층한 구조이다. 특히 고온 SMES에서는 처음으로 극저온 냉동기에 의한 전도 냉각방식을 채택하고 있다. 현재 제작된 시스템에 대한 특성시험이 실시되고 있는데, 2007년 8월에 시스템의 특성에 대한 공개가 계획되어 있다.

국내에서는 기초전력연구원에서 “21세기 다품질 전력공급시스템 개발”의 일환으로, 100 kJ 규모의 고온 SMES에 대한 연구개발을 4년간 진행하였다. 그리고 한국전기연구원에서 “전력품질 개선용 고온 SMES 시스템 개발” 사업을 2004년부터 진행하고 있다. 이 사업은 총 10년간 상용화 수준의 MJ급 고온 SMES 개발을 목표로 하고 있으며, 현재는 이를 위한 첫 단계로 “600 kJ 고온 SMES 개발”을 목표로 산·학·연 공동으로 연구개발을 진행하고 있다. 사용된 초전도 선재는

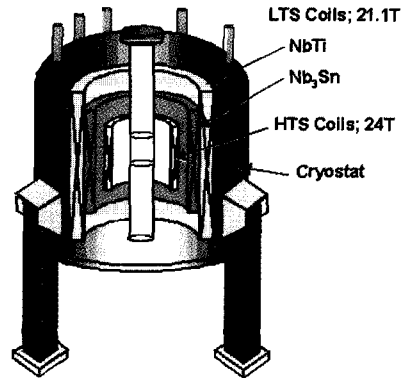


그림 4 일본 NIMS에서 개발 중인 1 GHz급 NMR용 초전도 마그네트의 구조.

Bi-2223 테이프 선재를 적층한 Multi-ply 구조를 채택하여 제작 중에 있으며 추후 Bi-2212 러더포드 케이블이 개발되면 이 도체를 채택한 시스템을 개발할 예정이다.

최근에는 모든 생체 고분자의 구조를 분석하기 위하여 더욱 뛰어난 해상력을 가진 1 GHz 급 고자장 NMR 개발이 세계적으로 활발히 추진되고 있는데, 그림 4는 일본 NIMS에서 계획하고 있는 1 GHz급 NMR용 초전도 마그네트의 구조를 보이고 있다. 통상 NbTi 코일을 외층 코일로 하고, Nb<sub>3</sub>Sn 코일을 내층 코일로 사용하는 하이브리드형이 일반적으로 사용되고 있으며, 이 경우 발생시킬 수 있는 최대자장은 1.8 K 정도의 초유동헬륨을 사용하는 경우 약 21 T(테슬라, T = 10,000 Gauss) 내외이며, 4.2 K의 포화 액체헬륨을 사용할 경우에는 18 T까지 사용할 수 있다. 그림 1에서처럼 급속계 초전도선으로는 자장 발생에 한계가 있으므로 20 T 이상의 자장을 발생시키기 위해서는 고온초전도 마그네트가 반드시 필요하다. 그래서 Nb<sub>3</sub>Sn 코일내부에 임계자장이 더욱 높은 고온초전도선을 사용하여 insert coil로 사용하여 1 GHz 급인 23.5T의 자장을 발생시켜 1GHz급 NMR 마그네트로 사용할 계획을 가지고 있다. 고온초전도 인서트 코일을 위하여 NIMS에서는 Bi-2212 도체를 사용하는 연구를 진행 중에 있다.

미국의 NHMFL에서도 초고자장 NMR 마그네트를 개발하기 위하여 Bi-2212 초전도선의 연구를 미국의

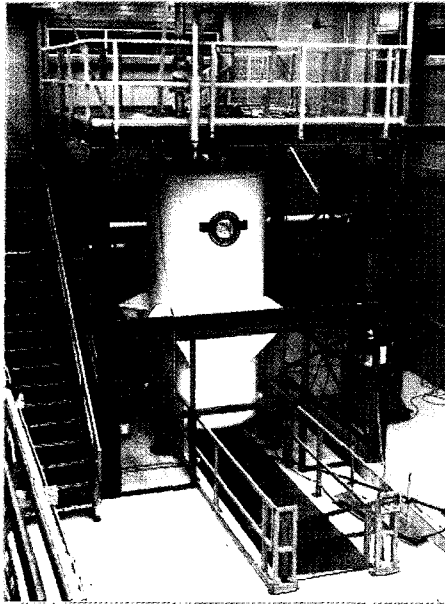


그림 5 미국 NHMFL의 900 MHz NMR

초저도선 제조업체인 OST와 지속적으로 연구를 추진 중에 있다. 그림 5에는 미국 NHMFL의 900 MHz NMR의 외형을 보이고 있는데, 이 마그네트 내부에 Bi-2212 코일을 제작하여 고자장 마그네트 특성 평가 및 연구전류모드 마그네트 개발을 수행하고 있다.

#### 4. Bi-2212 초전도 선의 국외 개발 동향

Bi-2212 고온초전도체를 선재화하는 방법으로서 PIT (Powder-In-Tube) 법과 Dip-Coating 법이 주로 사용되고 있다. Showa전선, Nexans, OST, IGC AS, Hitachi, Sukegawa전기, Mitsubishi 등이 현재 연구하고 있거나 연구한 경험을 가지고 있으며 NIMS, NHMFL, ISTE, LBNL, BNL, CRIEPI 등 연구소에서도 연구하고 있다. Dip-Coating법은 OST나 NIMS에서 주로 연구하고 나머지 기관은 주로 PIT법으로 선재를 제조한다. 소선을 꼬아서 케이블 형태로 만드는 대용량 도체 개발은 주로 일본의 NEDO프로그램에 의하여 이루어졌으며, 가장 대표적인 Bi-2212 러더포드 도체가 대전류를 펄스적으로 통전하는데 적합한 것으로 판명되고 있다.

SMES용 Bi-2212 케이블 연구에 가장 활발한 Showa 전선의 연구 실적은 다음과 같다. 소와전선은 1998년부터 Bi-2212 원형선재를 개발해 왔으며 4.2 K, 0 T에서 1 kA에서 10 kA의 전류를 흘릴 수 있는 다양한 종류의 Rutherford 케이블을 제조하였다. 주로 Chubu 전력, LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory), BNL (Brookhaven National Laboratory) 등과 함께 PIT법을 사용하여 소선을 제조한 후 러더포드 케이블을 제조하였다. 2004년에 0.8 mm 직경의 원형선재를 사용하여 30 본 러더포드 케이블을 제조하여 65 K에서 650-750A의 임계전류를 나타내었는데 이것은 4.2 K에서 11 - 13 kA에 해당한다. 고온초전도 외부시스템으로 AgMgSb 합금튜브를 사용하였고 평균 필라멘트 직경은 15  $\mu$ m였다. 소선은 Showa 전선에서 제조되고 러더포드 케이블은 LBNL에서 제조되었다

그림 6은 LBNL의 러더포드 케이블링 장치의 외형을 보이고 있다. 이 장비는 입자가속기용 금속계 초전도선의 러더포드 케이블링뿐만 아니라 고온초전도선의 가공도 가능한 장치이다.

그림 7은 소와전선에서 소선 직경 0.8 mm, 30 개의 소선으로 만든 Bi-2212 고온초전도 러더포드 케이블의 단면과 외형을 보이고 있다. 소와전선은 이러한 연구 실적을 바탕으로 현재 러더포드 도체를 제조하여 Toshiba와 함께 고온 SMES용 마그네트를 제작하고 있다.

미국의 OST (Oxford Superconductivity Technology) 사에서도 Bi-2212 초전도 선의 상품화에

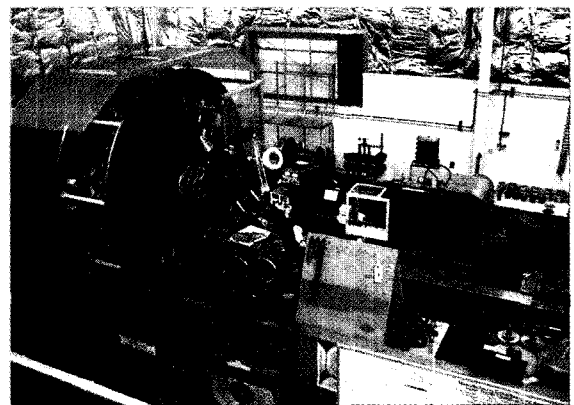
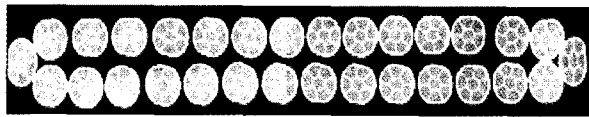
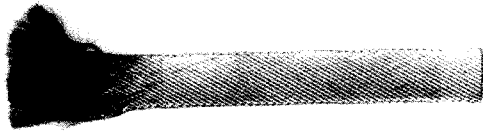


그림 6 LBNL의 러더포드 케이블링 장치



(a) 고온초전도 러더포드 케이블의 단면



(b) 러더포드 케이블

그림 7 소와전선의 Bi-2212 러더포드 케이블

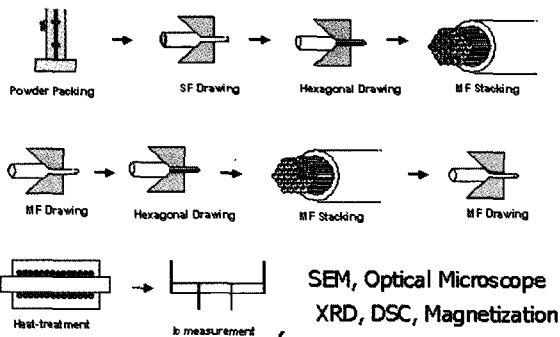
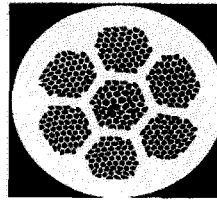


그림 8 Bi-2212 고온 초전도 선의 제조 공정

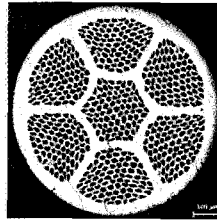
많은 노력을 기울이고 있는데, 이 초전도 선의 용도를 주로 고자장 마그네트용에 초점을 맞추고 개발하고 있다. 미국의 고자장 마그네트 연구소인 NHMFL 과 공동 연구를 추진하면서 위스콘신대의 ASC, 오하이오 대학 과 밀접한 관계를 가지고 연구를 수행하고 있다.

### 5. Bi-2212 초전도 선의 국내 개발 동향

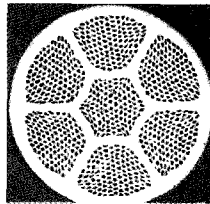
최근 고온초전도 SMES 개발과제가 국가 전략 과제로 선정되어, 한국전기연구원(KERI) 주관 하에 SMES 시스템과 Bi-2212 러더포드 케이블 개발을 함께 추진 중에 있다. 전력산업 개발사업으로 2005년부터 넥상스코리아와 함께 3년 간 Bi-2212 소선 개발 및 러더포드 케이블을 개발하는 것이 주요 목표이다. 1, 2 차 년도에는 Bi-2212 다심 초전도 선을 개발하는 연구를 하였는데, 그림 8에서는 2차 적층한 Bi-2212/Ag 초전도 다



(a) 55 x 7 필라멘트



(b) 85 x 7 필라멘트



(c) 121 x 7 필라멘트

그림 9 한국전기연구원에서 제조한 Bi-2212 초전도 다심선의 단면

심선 제조 공정을 나타내고 있다. 먼저 초전도 전구체 분말을 충전하여 단심선을 제조한 다음 이를 55심 ~ 121심의 1차 적층한 소선을 만들어 이를 다시 은 합금 튜브에 7가닥을 넣어 2차 적층을 하여 다심선으로 제조하였다. Bi-2212 초전도 선은 필라멘트의 수를 늘리기 위해 2차 적층 가공을 하게 되는데, 적층을 많이 할수록 필라멘트 직경은 가늘어지고 필라멘트의 수도 늘어날 수 있지만 균일한 가공은 매우 어려워지게 된다.

그림 9는 한국전기연구원 에서 제조한 3 가지 종류의 필라멘트 수를 가지는 Bi-2212/Ag 고온초전도 선의 단면을 나타내고 있다. (a)의 385심의 도체는 초기 연구 수행에서 얻은 결과로서 가운데 부분에서 필라멘트의 단선과 브릿징 현상이 관찰되었다. 이후 가공 조건과 중간 열처리 공정의 개선을 통해 그보다 필라멘트 수가 많은 초전도 선에서도 균일하게 가공하는 조건을 확립하였다. 즉, (b)의 595심, (c)의 847심의 초전도 선에서도 필라멘트가 균일하게 가공되었다는 것을 보이고 있다.

그림 10에서는 한국전기연구원과 넥상스코리아에서 공동으로 개발한 러더포드 케이블링 장치를 보이고 있다. 이 장비는 국내에서 최초로 개발한 장치로서 고온 초전도선 뿐만 아니라 Nb-Ti 금속계 초전도선의 러더포드 케이블도 제작할 수 있다. 최대 소선 수는 32가닥 까지 제조가 가능하며 최대 케이블 길이는 2 km 이상 까지 가공이 가능하다. 현재 이 장비는 넥상스코리아에 설치되어 Bi-2212 고온초전도 러더포드 케이블을 제조하기 위해 연구가 수행 중에 있다. 그림 11에서는

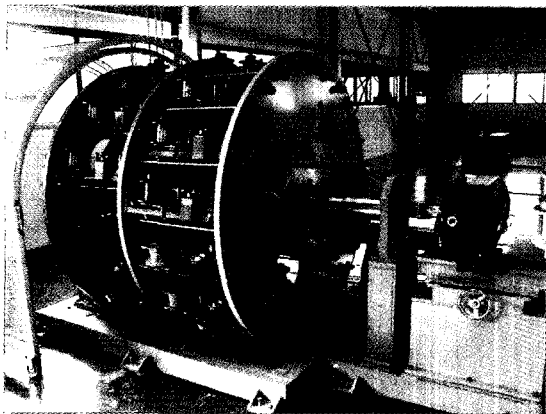
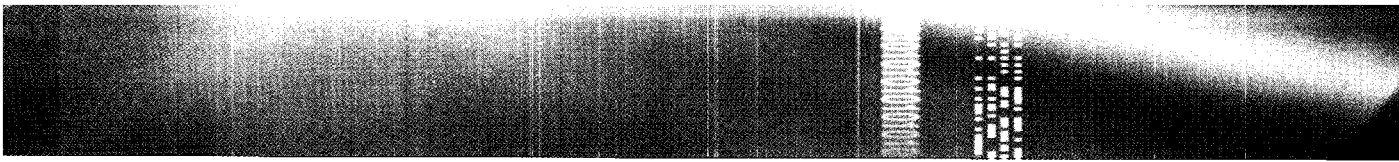


그림 10 한국전기연구원과 넥상스코리아에서 공동 개발한 러더포드 케이블링 장치

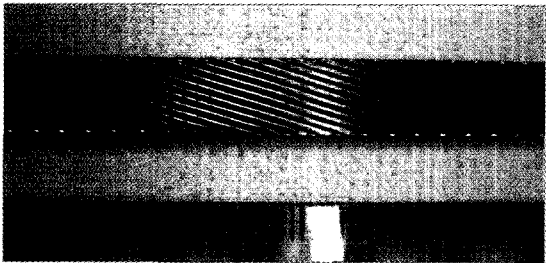


그림 11 상기 러더포드 케이블링 장치를 이용하여 제조한 20본의 구리선 러더포드 케이블

상기 장비를 사용하여 구리선으로 제작한 20본의 러더포드 케이블 시작품을 보이고 있다. 이러한 성과는 미국, 일본, 유럽에 이어 독자적인 기술로 러더포드 케이블링 생산이 가능하게 할 것이다.

## 6. 결 론

대전류 통전을 위한 러더포드 케이블과 같은 집합도체를 제조할 수 있다는 장점과 고자장 하에서의 특성 저하가 낮다는 장점을 지닌 Bi-2212 고온초전도선의 연구 동향에 대해 살펴보았다. Bi-2212 고온초전도선의 응용분야로서는 에너지저장장치 (SMES)와 같은 대전류 통전이 필요한 전력기와 초고자장 NMR과 같은 고자장 마그네트 분야가 유망하며, 이 분야에서 세계적으로 향후 지속적인 발전이 기대된다.

비록 국내에서의 고온초전도 SMES 시스템 및 이를 위한 대용량 고온초전도 러더포드 케이블 개발이 선진

국에 비해서는 늦었지만 실용화 연구를 적극적으로 추진하고 있다. 머지않아 국내의 기술 수준이 다른 선진국의 수준에 도달하게 될 것으로 여기며, 향후 몇 년 내에 고온초전도 SMES의 상용화를 기대해 본다.

### 참고문헌

- [1] T. Hasegawa et al., "Improvement of superconducting properties of Bi-2212 round wire and primary test results of large capacity Rutherford cable", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 11, 2001, pp. 3034-3037.
- [2] S. Nagaya et al., "Development and performance of 5 MVA SMES for Bridging Instantaneous Voltage Dips", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 14, No. 2, 2004, 699-704.
- [3] [Http://hikwww4.fzk.de/energietechnik/SMES/energietechnik\\_komp\\_e.html](http://hikwww4.fzk.de/energietechnik/SMES/energietechnik_komp_e.html)
- [4] P. Tixador et al., "Design of 800 kJ HTS SMES", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 15, No. 2, 2005, pp. 1907-1910.
- [5] J.H. Kim et al., "Design of 200 kJ HTS SMES System" IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 12, No. 1, 2005, pp. 774-777.
- [6] W.S. Kim et al., "Design of HTS Magnet for 600 kJ SMES" IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 16, No. 2, 2006, pp. 620-623.
- [7] H.W. Weijers et. al., "Development of 3T Class Bi-2212 Insert Coils for High Field NMR", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 9, No. 2, 1999, pp. 563-5667.
- [8] H. Miao et. al., "Development of Round Multifilament Bi-2212/Ag Wires for High Field Magnet Applications", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 15, No. 2, 2005, pp. 2554-2557.
- [9] M. Sugano et. al., "Strain Dependence of Critical Current in Bi2212 W & R wires Under Magnetic Field Up to 30 T" IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 16, No. 2, 2006, pp. 1039-1042.