

1. 서론

하동우 책임연구원
(한국전기연구원 초전도재료연구그룹)

초전도 자기 에너지저장(Superconducting Magnetic Energy Storage : 이하 SMES로 표기 함.) 시스템은 전기에너지를 초전도 마그네트에 자기 에너지 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 만들면 전류는 영구히 계속 흐르게 된다. 에너지는 영구전류에 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 점을 활용한, 즉 개발방향 및 목적이 고효율을 지향한 것이었다. 납축전지와 같은 2차 전지는 전기에너지를 화학에너지로 저장하며 연료전지도 이와 비슷하다. 양수발전은 물의 낙차를 이용하므로 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 것으로 플라이휠도 마찬가지로 회전하는 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 장치이다. 이에 비해 SMES는 자기 에너지 형태로 에너지를 저장하기 때문에 에너지의 저장·방출이 매우 빠른 장점을 가지고 있으며, 이외에도 유효·무효 전력을 각각 제어할 수 있고, 수명이 반영구적이며, 환경 친화적인 에너지 저장 기술이다.

개발 초기에는 주야간 부하 평준화를 목적으로 기술 개발이 추진되어, 지하 암반을 구조지지에 활용한, 양수발전소 대체 개념의 SMES가 제안되었다. 연구개발 결과, 양수발전과 비교하여 극히 고효율로 부하평준화가 가능하다는 것이 입증되었다. 또한 유효·무효전력을 독립적으로 제어할 수 있으며, 시간 응답성도 매우 우수하였기 때문에 전력계통 제어장치로서 탁월한 기능을 가진 것이 실험적으로 확인되었다. 따라서 이 분야에 대

한 기술개발이 활성화될 수 있는 계기가 되었다.

SMES의 용도는 다음과 같은 2 가지로 나눌 수 있다. 하나는 고속 응답특성을 활용하여 초 단위로 대용량의 저장에너지를 충·방전하는 용도로 이는 공급 측에서는 계통안정화 도모 및 대용량 부하를 보상할 수 있고, 부하 측에서는 순간정전 및 순간전압강하와 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.

최근 전력시장 자유화·규제완화 조치에 따라 전기사업은 서비스의 다양화와 저 비용에 대한 요구가 커질 것이 예상된다. 이 때문에 전력의 안정공급 유지뿐만 아니라 전력 시스템의 효율적인 운용에 대한 노력이 더욱 더 필요하게 되었다. 그리고 태양전지·풍력발전 등의 분산 전원이 증대함에 따라 안정성 저하가 우려되고 있으며 동시에 고속철도 등의 대용량의 변동부하 증대에 따라 공급자 측과 수요자 측 모두에게 이에 대한 적절한 보상대책이 요구되고 있다.

현재 저온 SMES의 경우, 미국과 일본에서 전력품질 보상용과 순간 전압강하 보상용 SMES의 실용화가 추진되고 있다. 한편 고온 초전도 도체 기술이 발

전됨에 따라 저온 SMES가 갖고 있는 문제인 저 자계 운전, 고가의 냉각 비용 및 유지 보수상의 어려움 등을 해결할 수 있을 것으로 예상되는 고온 SMES에 대한 기술개발이 활발하게 추진되고 있다.

2. 고온 SMES 기술 개발 동향

일본에서는 2000년부터 고온 SMES 가능성 검토를 시작으로, 중부전력에서는 도시바와 함께 그림1과 같은 순간 정전 및 순간 전압강하 보상용 1 MJ급의 고온 SMES 실증 기를 개발하였다. 이 시스템은 코일의 크기가 외경 75 cm, 내경 30 cm, 높이 53 cm이며 운전전류는 500 A, 최대자계는 6 T로, 내부에 액체 헬륨을 사용한 전도 냉각방식을 채택하고 있다. 이 시스템은 현재까지 개발된 고온 SMES로는 세계 최고 용량으로, 2004년 중부전력의 전력 기술연구소에서 실증시험을 성공적으로 마쳤다[1].

독일 FZK(Forschungszentrum Karlsruhe)에서는 그림2와 같이 10개의 코일로 구성된 토로이달형 고온 초전도 코일 시스템을 제작 평가하였다. 하나의 솔레노이드 코일은 외경이 360 mm, 인덕턴스는 4.37 H이다. 저장용량은 운전전류 300A에서 200 kJ이었으며, 최대 253 kJ을 달성하였다[2].

프랑스의 Nexans사에서는 그레노블 연구소와 공동으로 펄스에너지 원으로 사용하기 위한 용도로 고

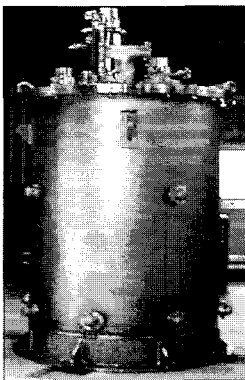


그림 1. 중부전력의 1 MJ 고온 SMES.

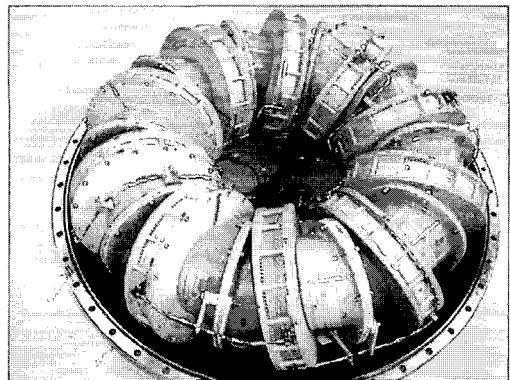


그림 2. FZK의 200 kJ 고온SMES.

림3과 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 있지만, 군사적 사용 이유로 상세한 것은 발표되지 않고 있다[3].

국내에서는 기초전력연구원에서 “21세기 다품질 전력공급시스템 개발”의 일환으로, 그림4에서와 같은 100 kJ 규모의 고온 SMES에 대한 연구개발을 4년간 진행하였다. 이 시스템의 에너지 저장부는 16개의 모듈코일로 구성된 토로이달 코일이며, 2대의 GM 냉동기를 사용한 전도냉각 구조이다[4].

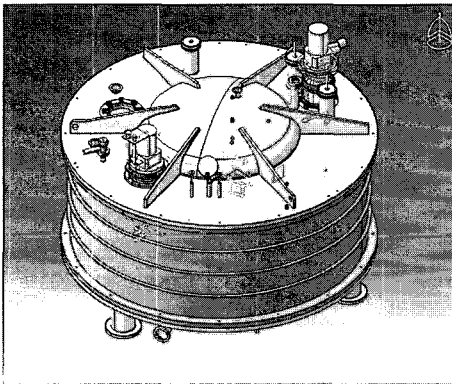


그림 3. Nexans사의 800 kJ 고온 SMES.

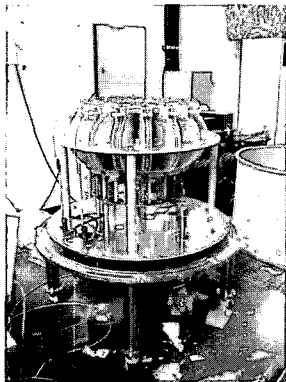


그림 4. 기초전력연구원의 100 kJ 고온 SMES.

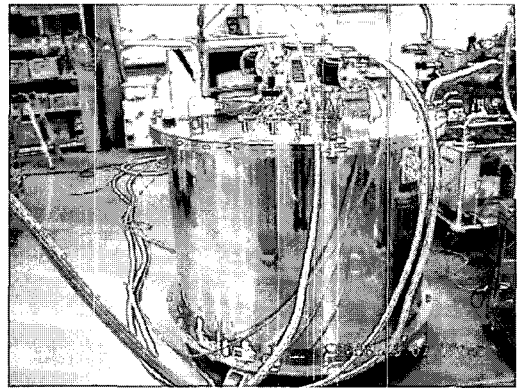


그림 5. 한국전기연구원의 600 kJ SMES용 모듈코일 특성 시험.

한편 에너지 사용량의 양적인 증가에 따른 수급의 문제, 산업의 고도화, 정보·통신 분야의 급속한 발달 및 지구 환경보전을 위한 Green Round 협정 등, 전력의 질적 고도화에 대한 요구가 높아지고 있다. 따라서 이를 해결하기 위한 노력의 하나로 “전력 품질 개선용 고온 SMES 시스템 개발” 사업이 2004년부터 진행되고 있다. 이 사업은 총 10년간 상용화 수준의 MJ급 고온 SMES 개발을 목표로 하고 있으며, 현재는 이를 위한 첫 단계로 한국전기연구원서 “600 kJ 고온 SMES 개발”을 목표로 산·학·연 공동으로 연구개발을 진행하고 있다. 사용된 초전도 선재는 운전전류를 높이기 위해 Bi-2223 테이프 선재를 적층한 Multi-ply 구조를 채택하였으며, 초전도 코일은 더블 팬케이크 코일을 20개 적층한 구조로 설계되었다[5]. 또한 전도 냉각인 점을 고려하여 모듈 코일 간 냉각특성을 높이기 위하여 전도냉각 판을 배치하는 등, 냉각효율을 개선하기 위한 방안이 강구되고 있다. 최근, 아래의 그림5에서와 같이 모듈코일을 제작하여, 실 운전을 고려한 운전특성 시험을 진행하고 있다.

3. 고온 SMES용 고온 초전도선

고온초전도 도체를 이용하는 전력기기가 대형화

표 1. 현재까지 개발된 고온초전도 선의 특성.

	Bi-2212	Bi-2223	YBCO	MgB2
T _c (K)	90	110	92	39
Bc2(B//c축)	~89	39(Ag clad)	145(film)	34
Bc2(B⊥c축)	?	198(Ag clad)	72(film)	49
Cu@77 K 대비 J _c (A/mm ²)@3T	11.7	←	17	7.8
제조 길이(m)	>1,000	>1,000	100	500

될수록 가장 핵심적으로 개발하여야 하는 것이 바로 여러 가닥의 소선을 케이블 형태로 가공한 대용량 고온초전도 도체이다. SMES에서도 마찬가지로 초전도 코일의 에너지 밀도를 높이기 위해서는 kA급 이상의 대전류를 통전하는 것이 필수적이다. 고온초전도체 (HTS 선재)는 금속계 초전도체에 비해 임계온도가 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 100 A 정도만을 흘릴 수 있다. 따라서 SMES코일의 대형화를 위해서는 선재를 적층하거나 케이블링하는 방법이 필요하다.

표1에는 현재까지 개발된 고온초전도 선의 특성을 나타내고 있다. YBCO 초전도 선은 박막 코팅 기술을 이용하는 2세대 초전도선이며, 이를 Coated Conductor라고도 한다. Y-계 2세대 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-계가 자장 변화에 대한 우수한 임계전류밀도 특성을 가지고 있기도 하다. 하지만 현재로서는 짧은 시료에서만 성공적인 결과를 얻고 있으며, 실제 초전도기에 응용하기 위한 길이가 긴 장선은 연구 단계에 있다. 또한 고가의 제조 장비를 사용하기 때문에 아직까지는 수 m의 짧은 초전도선도 Bi-계 초전도선에 비해 지나치게 비싸기 때문에 실제 시스템에 응용하기에는 더 기다려야 하는 형편이다. 그리고 최근의 연구성과로

서, 미국 Super Power 사에서 최고 300 m까지 제조한 실적이 보고되고 있다. 따라서 수백 m 이상의 장선재가 필요한 SMES에 당장 사용하기는 현실적으로 불가능하다. 그리고 MgB₂ 선재의 가격은 가장 저렴한 것으로 평가되고 있으나, 임계자장 특성과 임계전류밀도가 20 K 온도에서 다른 초전도체들에 비하여 크게 떨어져 SMES용 도체로 사용하기는 어려운 것으로 판단된다. 특히 이 온도에서 2T 이상의 자장을 발생시키는 마그네트를 제조하기에 어려운 실정이다. 따라서 현실적으로는 Bi-2212와 Bi-2223 초전도 선이 SMES용 도체로 사용할 수밖에 없다고 보이며, YBCO CC 선재가 SMES용 도체로 사용되기 위해서는 길이와 가격 면에서 큰 진보가 있어야 할 것이다.

현재 개발되고 있는 고온초전도체들 중에서 Bi-2212와 Bi-2223계가 PIT법에 의하여 테이프 형태의 장선재로 개발되어 연구용 초전도코일이나 초전도 전력케이블 시제품으로 사용되고 있다. PIT공정에서 판상의 초전도체 결정이 c축으로 배향되는 것에 의하여 전류밀도가 향상된다. 일반적인 PIT공정에서는 압연에 의하여 산화물 조직을 치밀하게 하고 소성변형에 의한 집합조직을 유도하여 전구체 결정의 배향성을 높게 하는 DIT(Deformation Induced Texturing) 공정과 소결열처리에 의하여 전구체상이 초전도상(Bi-2212 또는 Bi-2223)으로 변화할 때 결정입자의 배향성 향상인 RIT(Reaction Induced Texturing)이 초전도결정들이 전류방향으로의 연결성이 향상되어 전류밀도가 증가하게 된다. 그러나 케이블용 소선으로 BSCCO 선재를 적용하기 위해서는 압연공정을 생략하고 원형 단면의 세선으로 가공

되어진 후에 소결 열처리과정을 거쳐야 된다.

Bi-2223초전도체는 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(Jc)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. 첫째로 20 K이하의 온도에서는 Bi-2223에 비해 비슷하거나 더 우수한 특성을 나타낸다. 둘째로 Bi-2212 선의 열처리는 1단계로 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[6]. 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.

4. Bi-2212 초전도 선의 국외 개발 동향

Bi-2212 고온초전도체를 선재화하는 방법으로서 PIT(Powder-In-Tube)법과 Dip-Coating법이 주로 사용되고 있다. Showa전선, Nexans, OST, IGC AS, Hitachi, Sukegawa전기, Mitsubishi 등이 현재 연구하고 있거나 연구한 경험을 가지고 있으며 NIMS, NHMFL, ISTEK, LBNL, BNL, CRIEPI 등 연구소에서 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 Showa전선의 연구 실적은 다음과 같다. 소와전선은 1998년부터 Bi-2212 원형선재를 개발해 왔으며 4.2 K, 0T에서 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 mm의 원형선재를 사용하여 30본 러더포드 케이블을 제조하여 65 K에서 650-750 A의 임계전류를 나타내었는데 이것은 4.2 K에서 11-13 kA에 해당한다. 고온초전도 외부시스로 AgMgSb 합금튜브를 사용하였고 평균 필라멘트 직경은 15 μm 이었다. 소선은 Showa전선에서 제조되고 러더포드 케이블은 LBNL에서 제조되었다

그림6은 LBNL의 러더포드 케이블링 장치의 외형을 보이고 있다. 이 장비는 입자가속기용 금속계 초전도 선의 러더포드 케이블링뿐만 아니라 고온초전도 선의 가공도 가능한 장치이다.

그림7은 소와전선에서 소선 직경 0.8 mm, 30개의

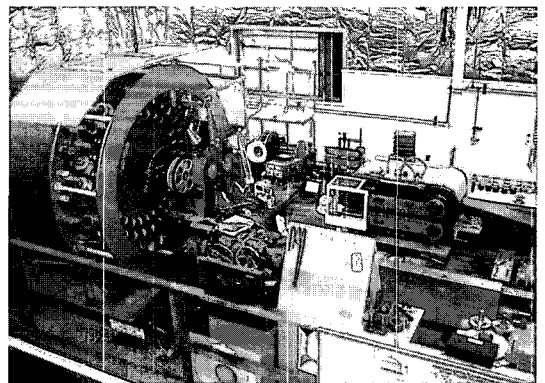
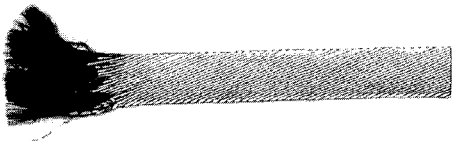


그림 6. LBNL의 러더포드 케이블링 장치.

5. Bi-2212 초전도 선의 국내 개발 동향



(a) 고온초전도 리더포드 케이블의 단면



(b) 리더포드 케이블

그림 7. 소와전선의 Bi-2212 리더포드 케이블.

소선으로 만든 Bi-2212 고온초전도 리더포드 케이블의 단면과 외형을 보이고 있다. 소와전선은 이러한 연구 실적을 바탕으로 현재 리더포드 도체를 제조하여 Toshiba와 함께 고온 SMES용 마그네트를 제작하고 있다.

미국의 OST(Oxford Superconductivity Technology)사에서도 Bi-2212 초전도 선의 상품화에 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 대학과 밀접한 관계를 가지고 연구를 수행하고 있다.

최근 고온초전도 SMES 개발과제가 국가 전략 과제로 선정되어, 한국전기연구원(KERI) 주관 하에 SMES 시스템과 Bi-2212 리더포드 케이블 개발을 함께 추진 중에 있다. 전력산업 개발사업으로 2005년부터 넥상스코리아와 함께 3년 간 Bi-2212 소선 개발 및 리더포드 케이블을 개발하는 것이 주요 목표이다. 1, 2차 년도에는 Bi-2212 다심 초전도 선을 개발하는 연구를 하였는데, 그림8에서는 2차 적층한 Bi-2212/Ag 초전도 다심선 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.

그림9는 한국전기연구원에서 제조한 3가지 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 가

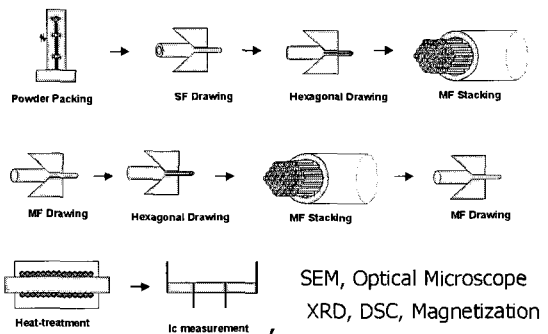
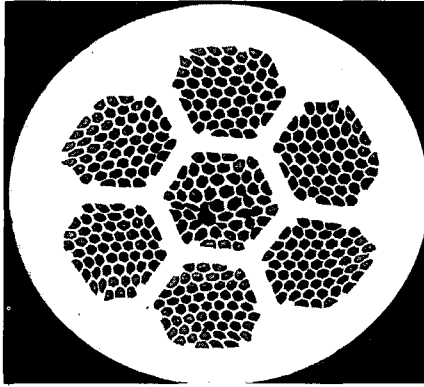
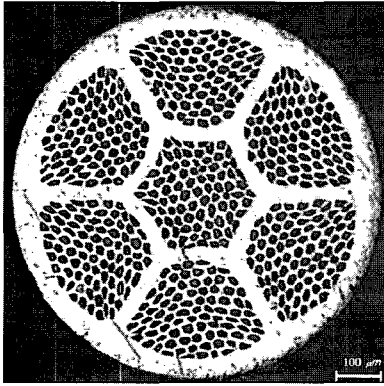


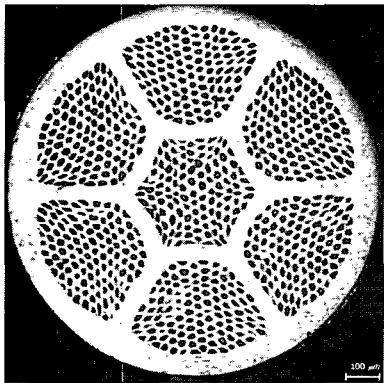
그림 8. Bi-2212 고온 초전도 선의 제조 공정.



(a) 55 x 7 필라멘트



(b) 85 x 7 필라멘트



(c) 121 x 7 필라멘트

그림 9. KERI에서 제조한 Bi-2212 초전도 다심선의 단면.

공 조건과 중간 열처리 공정의 개선을 통해 그보다

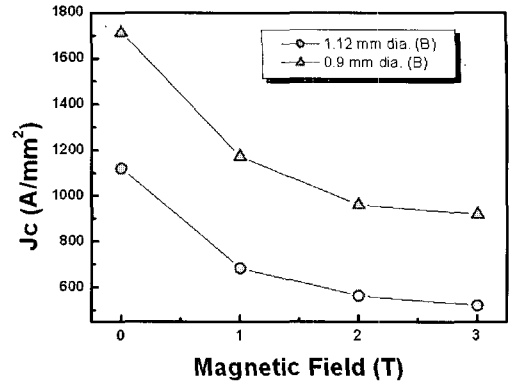


그림 10. Bi-2212 초전도 선의 임계전류밀도 특성.

필라멘트 수가 많은 초전도 선에서도 균일하게 가공하는 조건을 확립하였다. 즉, (b)의 595심, (c)의 847심의 초전도 선에서도 필라멘트가 균일하게 가공되었다는 것을 보이고 있다.

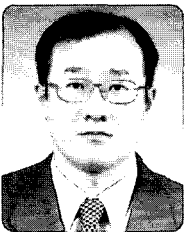
그림10에서는 KERI에서 제조한 Bi-2212 초전도 선의 임계전류밀도(J_c)의 특성을 보이고 있다. 초전도 선의 직경이 작을수록 J_c 값은 향상하였다. 최근에 J_c 값이 20,000 A/mm²이상의 값을 얻고 있으나 선진국의 도체 특성에 비해 아직까지 낮은 수준에 있다. 가공 조건과 더불어 초전도 특성을 향상시킬 수 있는 적절한 열처리 조건을 연구하는데 계속 주력하고 있다. 또한 러더포드 케이블링을 위하여 넥상스코리아와 한국전기연구원이 함께 러더포드 케이블링 장치를 제작하고 있는데, 2007년부터 국내에서 최초로 러더포드 케이블링 장치를 개발하여 러더포드 케이블을 제조하게 될 것이다.

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

참고 문헌

- [1] 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, 699, 2004.
- [2] [Http://hikwww4.fzk.de/energietechnik/SMES/energietechnik_komp_e.html](http://hikwww4.fzk.de/energietechnik/SMES/energietechnik_komp_e.html)
- [3] P. Tixador et al., "Design of 800 kJ HTS SMES", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 15, No. 2, p. 1907-1910, 2005.
- [4] J.H. Kim et al., "Design of 200 kJ HTS SMES System" IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 12, No. 1, p. 774-777, 2005.
- [5] W.S. Kim et al., "Design of HTS Magnet for 600 kJ SMES" IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 16, No. 2, p. 620, 2006.
- [6] 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, p. 3034, 2001.

저자|약력



성명 : 하동우

◆ 학력

- 1985년 경북대 금속공학과 공학사
- 1987년 경북대 대학원 금속공학과 공학석사
- 2001년 연세대 대학원 금속공학과 공학박사

◆ 경력

- 1987년 - 현재 KERI 책임연구원
- 2004년 - 2005년 미국 NHMFL 방문연구원

