

## 대전류 통전용 Bi-2212/Ag 러더포드 케이블링 공정 연구

하동우, 김상철\*, 한일용\*, 오상수, 오재근, 이정훈, 송규정, 이남진  
한국전기연구원 초전도재료연구그룹, 넥상스코리아 기술연구소\*

### Study on Bi-2212/Ag HTS Rutherford cabling process for high current capacity

Dong-Woo Ha, Sang-Chul Kim\*, Il-Yong Han\*, Sang-Soo Oh, Jae-Gn Oh, Jeong-Hun Lee,  
Gyung-Jung Song, and Nam-Jin Lee  
Korea Electrotechnology Research Institute, Nexans Korea\*

**Abstract** : The important merit of Bi-2212/Ag wire is to apply cable as round wire state. Bi-2212 high Tc superconducting wires were fabricated in order to apply Rutherford cable near the future. Various Ag ratio from 0.22 to 0.42 of Ag tubes for PID (powder-In-Tube) process were used to investigate the workability and to prevent breakage of filaments during drawing. KERI and Nexans Korea manufactured Rutherford cabling machine by ourselves. Rutherford cables with 20 - 30 strands could be fabricated by this machine. The shape of Rutherford cables were satisfied. The critical current of Bi2212/Ag round wire with 847 filaments showed 400 A at 4.2K and self field.

**Key Words** : Rutherford cable, Bi-2212, HTS wire, critical current, SMES

### 1. 서 론

고온초전도 도체를 이용하는 전력기기가 대형화될수록 가장 핵심적으로 개발하여야 하는 것이 바로 여러 가닥의 소선을 케이블 형태로 가공한 대용량 고온초전도 도체이다. 즉 대전류 통전을 위해서는 여러 가닥으로 연속한 집합도체가 필요한데, 테이프 형상으로 생긴 도체는 적층을 하는데 한계가 있다. 마그네트 권선 작업처럼 도체에 굽힘 변형이 인가될 때 도체의 안쪽에는 압축응력이 작용하고 바깥쪽에는 인장응력이 작용하는데, 적층에 의한 두께가 증가할수록 이러한 비대칭 응력이 증가하게 되어 도체의 특성의 저하를 가져오게 된다. 또한 마그네트의 펄스 운전 시 테이프 간의 접촉 면적이 넓어 교류손실이 증가하게 된다[1]. 이러한 점을 고려할 때 도체의 집합연선을 위해서는 소선이 원형을 유지하여야 하고, 원형을 유지하는 상태에서 초전도 특성의 감소가 가장 적은 고온초전도선은 Bi-2212 초전도선이 유일하다고 할 수 있다. 그리고 Bi-2212 고온초전도선은 20 K 이하의 온도에서는 Bi-2223에 비해 비슷하거나 더 우수한 임계전류 특성을 나타낸다. 둘째로 Bi-2212 선의 열처리 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[2]. 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 고온초전도선은 유일하게 원형 상태에서의 응용이 가능하므로 이 선의 개발 및 케이블 공정 개발은 매우 중요하다.

본 연구에서는 Bi-2212 고온초전도 소선을 사용하여 Rutherford 케이블링을 할 수 있는 장치를 개발하였으며, 복합 다심의 Bi-2212 초전도 소선을 가공하여 열처리에 따른 초전도 선의 미세 조직을 관찰하고자 하였다.

### 2. 실험

Nexans SuperConductor의 Bi-2212 조성의 전구체 분말을 이용하여 선재를 제조하였다. 전구체 분말의 결정립 크기는 0.2 ~ 1.0 mm 정도 였다. 전구체 분말을 순은(Ag) 튜브에 충전하고 인발한 후 55 - 212개의 단심선재를 은 튜브에 적층하여 다심선을 적층하였다. 이 선재를 다시 인발한 후 7개를 적층하여 다심선을 제조한 후 이것을 최종 직경 까지 인발하였다. 선재들은 포정반응 온도, Tp아래에서 전열처리를 실시한 후 10 °C/h로 등은 어닐링 온도까지 냉각하였다.

러더포드 케이블링 장치는 국내최초로 제작되었으며 크래들, 텍스헤드, 캐터필러, 권취기 부분으로 구성되어있다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 1에는 한국전기연구원과 넥상스코리아에서 공동으로 개발한 러더포드 케이블링 장치를 보이고 있다. 이 장비는 국내에서 최초로 개발한 장치로서 고온초전도선 뿐만 아니라 Nb-Ti 금속계 초전도선의 러더포드 케이블도 제작할 수 있다. 표 1에는 러더포드 케이블링 장치의 사양을 나타내고 있다. 최대 소선 수는 32가닥 까지 제조가 가능하며 최대 케이블 길이는 2 km 이상까지 가공이 가능하다. 크래들은 2 단으로 제작되어 각각 16 개의 보빈을 장착할 수 있는 구조이다. 각 보빈의 장력은 마그네틱 브레이크로 정밀하게 조절하고 있다. 현재 이 장비는 넥상스코리아에 설치되어 Bi-2212 고온초전도 러더포드 케이블을 제조하기 위해 연구가 수행 중에 있다. 그림 2에는 상기 장비를 사용하여 제조한 20 개의 소선으로 구성된 러더포드 케이블을 보이고 있는데, 여러 번의 실험을 거쳐 균일한 가공 조건을 찾았으며 소선의 재질에 따른 실험을 수행하고 있다. 그림 3에는 847 개의 필라멘트로 구성된 Bi-2212/Ag 고온 초전도선의 단면을 보이고 있다. 인발장력 측정장치를 사용하여 가공 및 열처리 공정을 개선함으로써 필라멘트의 단선 없이 대체적으로 균일하게 가공할 수 있었다. 이 소선의 임계전류는 400 A(@ 4.2K, self field)를 나타내었다.

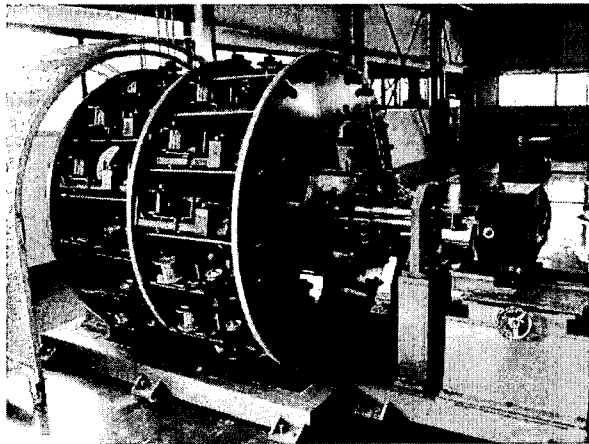


그림 1. 러더포드 케이블링 장치의 크래들 부

표 1. 러더포드 케이블링 장치의 사양

Contents	Specification
Number of strands	Max. 32 ea
Tension control	Magnetic break
Pitch	30 - 10 mm
Fabrication speed	5 m/min
Max. cable length	2 km
Cradle layer	2 layers

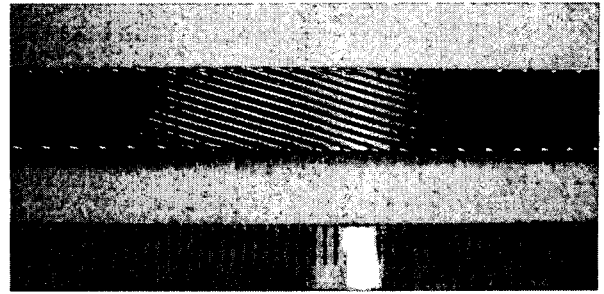


그림 2. 러더포드 케이블링 장치를 사용하여 제조한 20 개의 소선으로 구성된 러더포드 케이블.

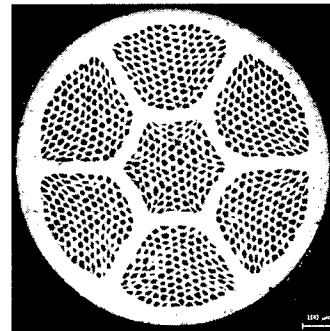


그림 3. 847 개의 필라멘트로 구성된 Bi-2212/Ag 고온 초전도선.

### 4. 결론

순수 국내 기술로 러더포드 케이블링 장치를 국내 최초로 제작하였다. 이 장치를 이용하여 SMES용 Bi2212/Ag 러더포드 케이블의 제조를 할 수 있게 되었으며 금속계 초전도 선의 러더포드 케이블도 가공할 수 있게 되었다.

847개의 필라멘트를 가지는 Bi-2212/Ag 초전도선을 균일하게 가공할 수 있었으며 4.2 K, 자기자기장 하에서 400 A의 임계전류 값을 얻었다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] Mazur L J, Kellers J, Pegrum C M and Cardwell D A, Handbook of Superconducting Materials, vol. 1 (Bristol: IOP)p. 27, 2003.
- [2] Hasegawa T, Koizumi T, Hikichi Y, Nakatsu T, Scanlan R M, Hirano N and Nagaya S, Proc. 17th Conf. on Magnet Technology MT-17, Geneva, 2002.