

## 다양한 은비의 Bi2212/Ag 고온초전도 선재의 제조

김상철, 하동우\*, 오상수\*, 오재근\*, 송규정\*, 하홍수\*, 손호상\*\*

넥산스코리아(주) 기술연구소, 한국전기연구원 초전도재료연구그룹\*, 경북대학교 금속공학과\*\*

### Fabrication of Bi2212/Ag HTS Wire with Various Ag Raio

Sang-Cheol Kim, Dong-Woo Ha\*, Sang-Soo Oh\*, Jae-Geun Oh\*, Kyu-Jeong Song\*, Hong-Soo Ha\* and Ho-Sang Sohn\*\*

Nexans Korea Ltd., KERI\*, Kyungpook Univ.\*\*

**Abstract :** Round shape Bi2212/Ag is isotropic and can be fabricated Rutherford cable to transport high current. Bi2212/Ag round wires with various Ag ratio were fabricated using powder-in-tube process. Double stacked 385 (55 × 7) filamentary wire of various wire diameter was heat-treated at various melting temperature. Wires which have Ag ratio of 0.3 and 0.42 of Ag tube for monofilament show similar critical current density. As average filament diameter decreases from 33 to 16 μm, critical current density of wires increase, and in case of 16 μm and T<sub>m</sub> 890 °C, critical current density was 2,062 A/mm<sup>2</sup> at 4.2 K, 0 T.

**Key Words :** Bi2212 round wire, Ag Ratio, high temperature superconductors

### 1. 서 론

Bi2212/Ag 선재는 원형, 정사각형, 직사각형, 테잎 등 다양한 형상으로 제조할 수 있고 특히 원형선재는 테잎에서 나타나는 이방성이 없는 장점을 가지고 있다. 한번의 용융-응고 열처리만 필요하기 때문에 Wind & React법으로 코일을 제조할 수 있으며 여러 가닥의 소선을 이용하여 Rutherford Cable, Round Stranding, Cable in Conduit Conductor 등으로 제조할 수 있고 고자장하에서 높은 임계전류밀도를 나타낸다. 극저온 냉동기의 발전으로 Bi2212/Ag 선재를 사용하여 20 K 까지 사용가능한 무냉매 초전도 마그넷에 사용될 수도 있고 SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage), 모터, 발전기 등에도 사용될 수 있다[1]-[3].

선재의 임계전류밀도 특성에 영향을 미치는 인자로서는 전구체 분말 조성, 입자 크기, 불순물의 양, 열처리 전 세라믹 크기와 모양의 균일성, 열처리 최대온도, 유지시간, 냉각속도 등이 있다[4].

### 2. 실험

Nexans SuperConductor에서 제조한 전구체분말을 이용하여 선재를 제조하였다. 전구체 분말의 조성은 X-ray fluorescence에 의해 Bi<sub>2.16</sub>Sr<sub>1.92</sub>Ca<sub>0.90</sub>Cu<sub>2.02</sub>O<sub>x</sub>로 분석되었다. Granulation을 실시하기 전의 입자 크기는 d<sub>10</sub> < 0.7 μm, d<sub>50</sub> < 1.5 μm, d<sub>90</sub> < 3 μm이고 이것은 다시 0.2 ~ 1.0 mm 크기의 granulate로 제조되었다. BSCCO/Ag (50:50 wt.%) 혼합물을 100 %O<sub>2</sub>에서 DTA/TGA를 측정하여 포정 분해 온도 T<sub>p</sub>가 약 881 ± 2 °C임을 알 수 있었다.

전구체 분말을 은비가 다른 3가지 종류의 순은튜브에 충전하고 인발한 후 55개의 단심선재를 순은튜브에 적층하여 1st bundle을 제조하고 이 선재를 다시 인발한 후 7개의 55심 선재를 AgMg합금튜브에 적층하여 2nd bundle을 제조한 후 이것을 최종 1.34 ~ 0.74 mm dia. 까지 인

발하였다. 선재들은 T<sub>p</sub>아래에서 pre-annealing을 실시한 후 최대온도 T<sub>m</sub> = 882 ~ 890 °C에서 30분 동안 유지한 후 10 °C/h로 등온 어닐링 온도까지 냉각하였다.

### 3. 결과 및 고찰

사용된 선재의 은비(은의 면적/초전도체의 면적)는 아래의 표 1과 같다. 단심용 은튜브, 단심, 1차 bundle, 2차 bundle, 그리고 1.0 mm dia. 선재에서의 은비를 나타내고 있는데 각 단계마다 은비가 증가하며 또한 초기 은비가 높은 C선재가 다른 선재보다 모든 단계에서 은비가 높음을 알 수 있다. A선재의 경우 단심 2.36 mm dia.까지는 인발이 되었으나 그 이하의 직경에서는 0.2의 아주 낮은 은비로 인한 단선이 자주 발생하였고 선재표면의 크랙이 발생하였다.

표 1. Bi2212/Ag 선재의 각 공정별 은비.

	A	B	C
단심용 은튜브	0.22	0.3	0.42
단심	0.2	0.3	0.57
1st Bundle	-	1.25	1.41
2nd Bundle	-	1.89	2.35
1.0 mm dia. 선재	-	2.95	3.53

그림 1은 최대온도 890 °C에서 열처리한 B와 C선재의 4.2 K, 0 T에서 측정된 J<sub>c</sub>를 나타낸 것인데 1.12 mm dia.에서는 C선재의 J<sub>c</sub>가 높지만 0.9 mm dia.에서는 오히려 B선재의 J<sub>c</sub>가 높았다. 이것으로 은튜브의 은비를 0.3과 0.42로 달리 했을 때 최종 선재의 특성에 많은 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 0.74 mm dia.의 C선재에서 2,062 A/mm<sup>2</sup>의 J<sub>c</sub>를 나타내었다.

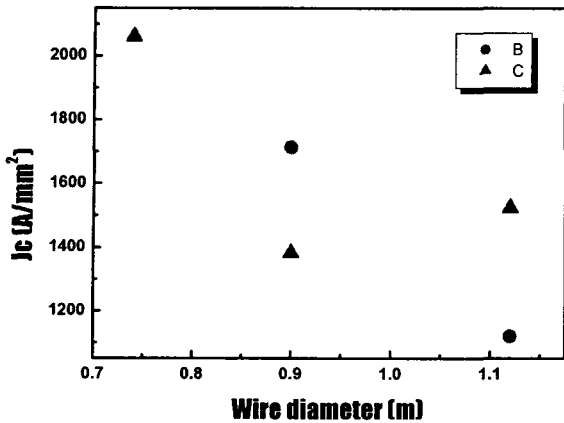


그림 1. B와 C선재의 4.2 K, 0 T에서의 선재 직경별 임계전류밀도.

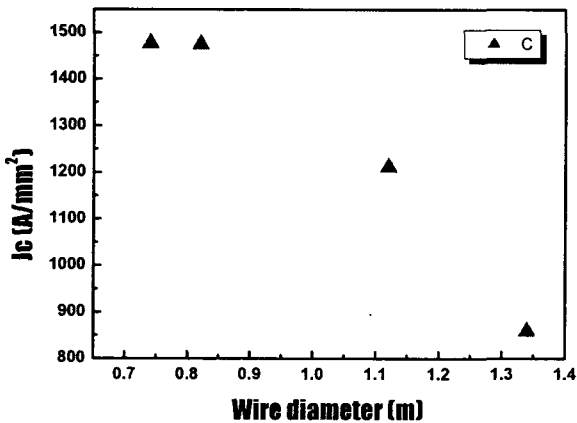


그림 2. C선재의 4.2 K, 0 T에서의 선재 직경별 임계전류밀도.

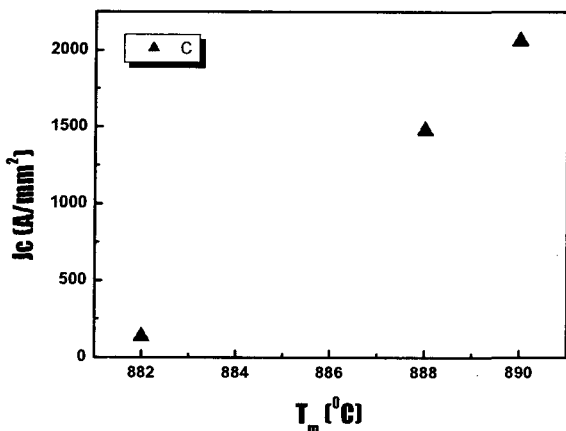


그림 3. C선재의 4.2 K, 0 T에서의 최대온도에 따른 임계전류밀도.

최대온도 888 °C에서 열처리한 C선재의 4.2 K, 0 T에서 측정된 Jc를 그림 2에서 나타내고 있는데 1.34 mm에서

0.74 mm로 선재직경이 줄어들어 따라 Jc가 상승하였고 직경 0.82 mm과 0.74 mm는 비슷한 특성을 보여준다. 평균 필라멘트의 직경이 33, 25, 18, 16 μm로 점차 줄어들어 따라 Jc가 상승하고 평균필라멘트 직경이 16 ~ 18 μm 일 때 비슷한 Jc를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

최대온도를 달리하였을 때 Jc를 그림 3에서 나타내고 있는데 0.74 mm dia.의 C선재에서의 특성이다. 888와 890 °C에서는 1,477과 2,062 A/mm²의 임계전류밀도를 나타내었지만 882 °C에서는 아주 특성이 낮았다. 이것은 최대온도에 따라서 선재의 특성에 아주 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

385쌍의 Bi2212/Ag선재를 PIT법으로 제조하여 4.2 K, 0 T에서 특성을 평가한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 0.3과 0.42로 단상용 은튜브의 은비를 달리 했을 때 최종 열처리된 선재의 Jc는 비슷하였다.
- (2) 필라멘트 직경이 감소함에 따라 Jc가 증가하였고 16 μm 평균필라멘트 직경을 가지는 선재를 최대온도 890 °C에서 열처리 했을 때 2,062 A/mm²의 Jc를 나타내었다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

- [1] Hanping Miao, Kenneth R. Marken, Maarten Meinesz, Boleslaw Czabaj, and Seung Hong, "Development of Round Multifilament Bi-2212/Ag Wires for High Field Magnet Applications", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 15, no. 2, pp. 2554-2557, June 2005
- [2] C.-E. Bruzek, N. Lallouet, E. Flahaut, D. Bourgault, J.-M. Saugrain, A. Allais, S. Arzac, J. Bock, J. Ehrenberg, D. E. Wesolowski, and M. O. Rikel, "High performance Bi2212/Ag tape produced at NEXANS", (presentation at EUCAS 2003)
- [3] Takayo Hasegawa, Junichi Nishioka, Nozomu Ohtani, Yasuo Hikichi, Ronald Scalan, Ramesh Gupta, Naoki Hirano, and Shigeo Nagaya, "12 kA HTS Rutherford Cable", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 14, no. 2, pp. 1066-1069, June 2004
- [4] Kenneth R. Marken, Jr. Hanping Miao, Joseph M. Sowa, Jeffrey A. Parrell, and Seung Hong, "Processing Issues for High Critical Current Density in BSCCO-2212 Composites", (presentation at ASC 2000)