

Fabrication and properties of 500A class multistrand conductor for HTS power cable

고온초전도 전력케이블용 500A급 코어 도체 제조 및 특성실험

Jai-moo Yoo, Sung-Chang Park, Jae-Woong Ko, Hai-Doo Kim,
and Hyung-sik Chung

유재무, 박성창, 고재웅, 김해두, 정형식

66, Sangnam-dong, Changwon, Kyungnam, Korea 641-010,
Korea Institute of Machinery & Materials

경남 창원시 상남동 66번지 한국기계연구원

High J_c ($\sim 21,500$ A/cm², at 77K) of 100m length of BSCCO 2223 tapes have been achieved using optimized precursor powders with carefully controlling variables in heat treatment. Prototype 500A class multistrand conductor for HTS power cable was fabricated using these tapes. Also discussed are the transportation properties of prototype 500A class multistrand conductor.

1. 서론

우리나라의 전력 수요는 1997년 7월 35 GW에 달했으며, 경제 성장률의 둔화에도 매년 10%의 증가가 예상되고 있으며, 2011년경에는 69 GW, 2021년경에는 80 GW로 증가할 것으로 예상됨에 따라 현재의 한국전력공사의 최대전력공급 능력이 38 GW에 불과하여 전기공급 측면에서 살펴보면 계통용량의 비약적 증가가 요구되어지고 있어 이로 인해 공급과 전송, 이용 측면에서 에너지 손실 또한 비약적으로 증가될 것이다. 이러한 대용량 송전의 필요성과 전기에너지 손실문제를 최소한으로 줄여 고효율화 하기 위해 초전도 송전이 제안되고 있다.

초전도 송전방식은 저전압 대전류 방식으로 현재의 2배이상 송전이 가능할 뿐만 아니라, 저 손실에 의한 고전류 송전이 가능하여 변전소의 생략, 케이블 절연비를 감소시킬수 있다. 또한 종래의 고전압 송전방식에 의해 야기되는 대도시 주

변에서의 전자장(EMF) 발생문제, 전파장애문제 등 환경저해 요소를 최소화 할 수 있다. 이와같은 장점 때문에 선진국의 경우 고온초전도 전력케이블 개발에 장기적인 연구 계획과 막대한 연구개발투자를 하고 있으며[1,2] 1999년 9월 고온초전도 BSCCO 2223 다심선재를 사용한 세계 최초의 고온초전도 전력케이블이 Detroit Edison의 Frisbie 변전소 실계통 line에 설치될 것이다[3].

본 연구에서는 고온초전도 전력케이블 개발에 필수적인 BSCCO 2223 선재의 임계전류향상 및 100급 선재의 길이별 임계전류 특성평가가 수행되어 졌으며 제조된 선재를 이용하여 prototype 길이 50cm, 500A급 multistrand conductor를 제작하여 액체질소 온도(77K) 하에서 500A 통전 실험을 하였다.

2. 실험방법

최적의 BSCCO 2223 초전도 분말을 제조하기

위하여 $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 의 질산염의 양이온 비가 $\text{Bi}:\text{Pb}:\text{Sr}:\text{Ca}:\text{Cu} = 1.8:0.4:2.2:2.3$ 이 되도록 칭량하고 증류수에 녹여 분무건조하였다. 이렇게 제조된 분말은 각 단계별 열처리를 거쳐 Ag tube속에 충전되어지고 Swaging, 인발등의 반복적 공정을 거쳐 지름 2mm의 61심다심선재로 만들어 졌으며, 다시 압연공정을 거쳐 최종 100m의 61심 tape형 선재로 제조되어졌다. 선재의 열처리는 대형 box로에서 온도, 유지시간, 분위기등의 변수를 조절하여 최대의 임계전류값을 가지도록 행하여졌으며 이 선재를 이용하여 길이 50cm, 500A급 multistrand conductor를 제조하여 통전실험을 하였다. 개략적인 실험공정도를 그림 1에 나타내었다.

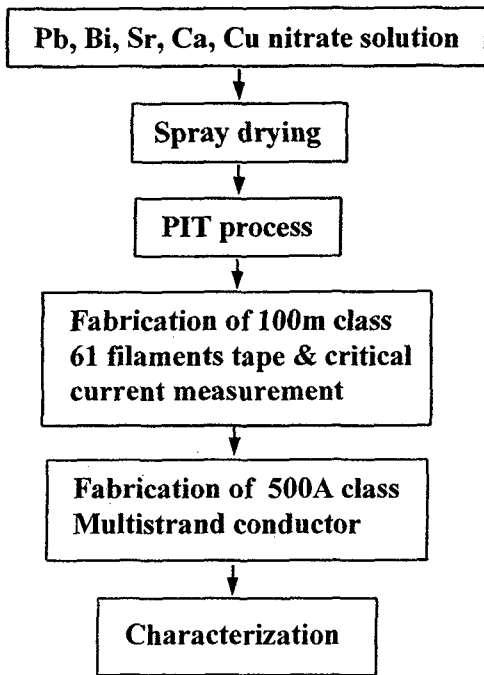


그림 1. 개략적인 실험공정도

3. 결과 및 고찰

BSCCO 2223 초전도체는 다성분계 화합물의 특수성, 출발물질의 불균일한 혼합으로 인한 이차상등의 변수에 의해 많은 영향을 받으며, 비중차에 의해 균일한 혼합이 어려운 산화물 출발물질이나, 분해온도가 높고 미분해된 탄화물과

CuO 가 반응하여 불순물상을 형성하는 탄화물 출발물질보다는 균일한 혼합이 가능한 액상법으로 BSCCO 2223전구체 분말을 제조하는 것이 좋다.

특히 수 백 m 또는 수 km급의 초전도 장선재의 제조시에는 한번에 장입되는 BSCCO 2223 precursor분말이 수 백 그램에서 수 킬로그램까지 들어가므로 precursor powder의 순도 및 조성의 균일성이 매우 중요하며 우수한 초전도특성을 갖는 장선재를 제조하기 위해서는 precursor powder의 제조공정 최적화가 요구된다.

Spray dry법은 용액상태의 원료를 고온 건조매체에 분무시키는 분무건조기를 이용하기 때문에 공정 자체가 다른 건조방법에 비해 매우 간단하며 연속 대량생산에 적합하다[4-6]. 액상법과 분무건조법을 사용하여 입자크기를 $7\mu\text{m}$ 이하로 줄일수 있었고, 잔류 탄소량을 고상법에 비해 1/10 수준으로 떨어뜨릴수 있었다.

효율적인 Billet의 형상과 충전밀도를 높이기 위한 방안으로 초전도 선재를 육각형으로 인발하여 Ag tube내에 충전시 honey comb(벌집구조형)으로 장입하여 초전도 core들이 균일하게 분포되도록 하였다. 이를 바탕으로 기계적 공정중의 인발(drawing)작업시 reduction ratio를 각 단계마다 10% 이내로 두어 가공을 하였으며, 압연공정시 최적의 조건을 잡기위해 reduction ratio를 조절하면서 실험을 하였다.

그림 2 a)는 길이 100m 이상으로 제조된 61심다심선재를 직경 55cm의 알루미늄 mandrel에 감아 소결온도, 로내 온도구배 및 분위기조절등 최적의 열처리 조건을 만족시켜 얻은 장선재를 길이별로 임계전류 및 균일도를 측정하기 위하여 6개의 전류단자와 전압단자를 설치한 모습이다. 그림 2의 b)는 길이 100m, 61심 다심장선재의 1개 filament의 횡단면 SEM 미세조직 사진으로 전류 통전방향과 일치하게 판상형의 BSCCO 2223 입자성장이 잘 되어 있으며 강한 c-축 texture를 보여주고 있으며 열처리중 냉각시 생성된 것으로 보이는 3221 phase도 소량 존재한다. 그림 2의 c)~g)는 길이별로 측정된 전류-전압 곡선 결과로 임계전류(I_c)는 20.9A~22.4A이고 임계전류밀도(J_c)는 $20,900\text{A}/\text{cm}^2 \sim 22,400\text{A}/\text{cm}^2$ 로 상당히 균일한 결과를 보여준다.

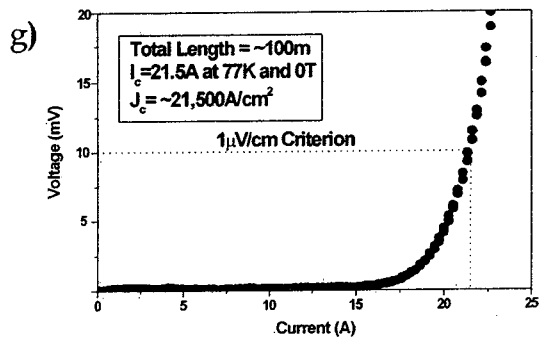
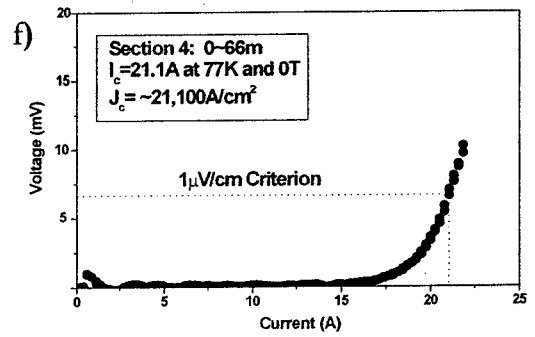
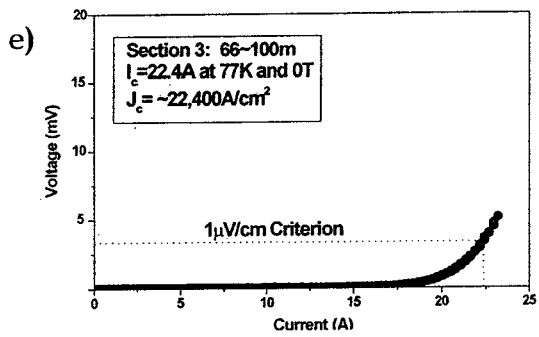
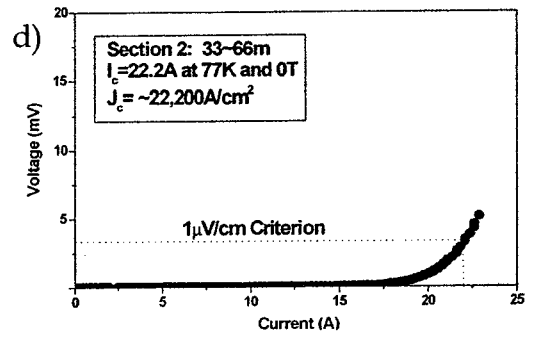
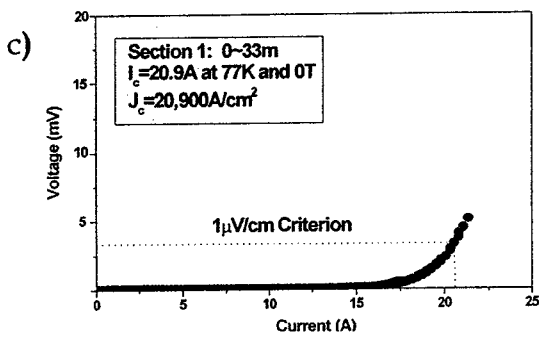
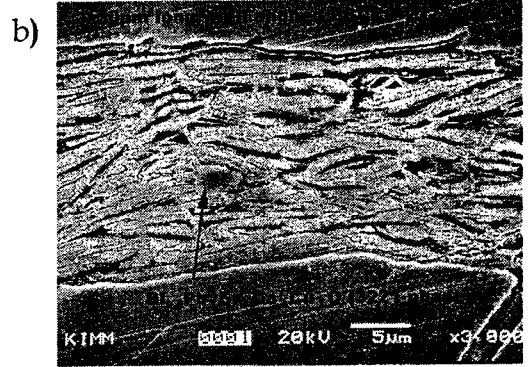
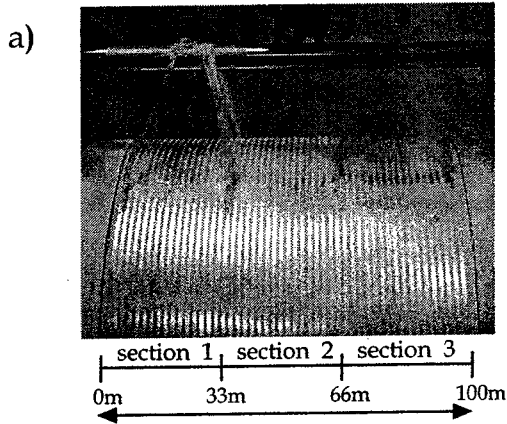


그림 2. a) 제조된 61심 100m 다심선재, b) 61심 다심선재의 1개 filament의 횡단면 SEM 미세조직 사진 c) 100m 다심선재의 길이별 전류-전압곡선: 0~33m, d) 33~66m, e) 66~100m, f) 0~66m, g) 0~100m 전구간

그림 2의 g)에서 볼수있듯이 100m 전구간에서 측정된 임계전류는 21,5A이고 임계전류밀도는 21,500 A/cm²였다. 제조된 100m급 BSCCO 2223 다심 장선재를 적당한 크기로 자르고 copper pipe (길이 50cm, 직경 35mm)에 꼬으면서 절연 특성이 우수한 극저온용 epoxy를 이용해 고정 및 다층으로 적층시켜서 길이 50cm, 500A급의 multistrand conductor를 제작하였다. 그림 3 a)는 길이 50cm, 500A급 multistrand conductor의 외형을 나타내고 있다.

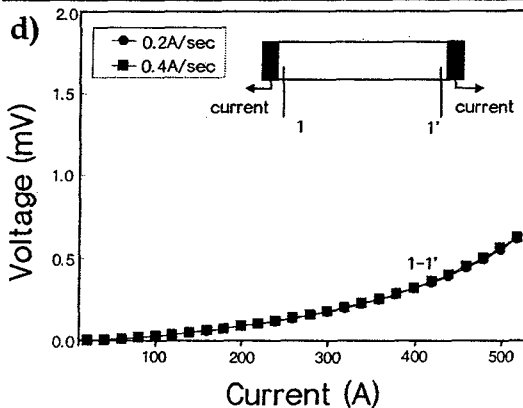
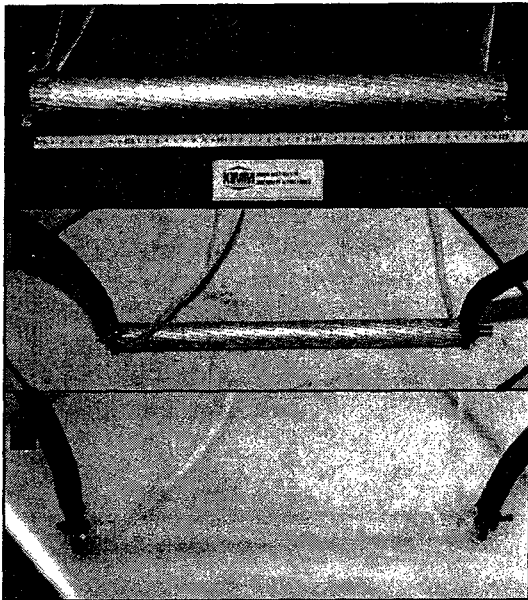


그림 3. a) 제작된 길이 50cm, 500A급 multistrand conductor의 외형 b) 임계전류특성 측정을 위해 대형 액체 질소 bath에 액체질소를 넣기전, c) 넣은 후 모습, d) BSCCO-2223 multistrand conductor의 500A 통전 test

Multistrand conductor의 양쪽 끝부분에는 대전류(500A)가 일반 구리 전선을 통해 통전되기 때문에 전기저항을 최소화 하기 위해 무산소동으로 양끝단을 제작하여 연결하였다. 그림 3의 b)는 최종 열처리된 길이 50cm multistrand conductor의 통전 특성 측정을 위해 측정 voltage선을 부착하여 대형 액체 질소 bath에 장입하기 전 모습과 장입되어 있는 모습을 나타내고 있다.

본 실험에 사용된 multistrand conductor는 $I_c > 20A$ 이상으로 길이 ~50cm, 총 47개의 BSCCO 선재가 사용되어져 총 통전용량은 1000A급 이상이나 적층 및 전류배분에 의한 효과 때문에 실제 통전될 용량은 ~600A 정도로 예측된다.

Multistrand conductor 통전특성 측정실험을 위해 1,500A d.c. power supplier를 이용하여 통전시험을 행하였다. 그림 3의 d)는 측정된 통전 시험 결과로 전류가 100A 이상 증가하였을 때 접촉저항에 의한 ohmic component 때문에 전위가 서서히 증가하지만 ohmic component의 효과를 배제하면 임계전류는 500A 이상이다.

참고문헌

- [1] 1998 Wire Development Workshop Proceedings St. Petersburg Florida USA Jan 29-30 (1998).
- [2] International Workshop on High-Tc Superconducting Power Transmission Cables April (1997).
- [3] NewYork Times 11/2 (1998).
- [4] S.J. Lukasiewicz, "Spray-Drying Ceramic Powder", J. Am. Ceram. Doc., 72(4), 617-624 (1989).
- [5] P.J. Sherrington and R. Oliver, Granulation, Heyden and Sons, London (1981).
- [6] K. Master, Spray Drying, Wiley-Interscience, NY. (1976).