

Fabrication and the transportation properties of 1000A class multistrand conductor for HTS power cable

S. C. Park^{*,a}, J. M. Yoo^a, J. W. Ko^a, H. D. Kim^a, S. C. Kang^a, H. S. Chung^b

^aKorea Institute of Machinery & Materials, Changwon, Korea

^bAjou University, Suwon, Korea

Received 20 August 2001

고온초전도 전력케이블용 1000A급 multistrand conductor의 제조 및 특성분석

박성창^{*,a}, 유재무^a, 고재웅^a, 김해두^a, 강신철^a, 정형식^b

Abstract

For the fabrication of HTS power cable, multifilamentary Bi-2223/Ag tapes have been prepared using the powder-in-tube (PIT) process. After final heat treatment, these tapes have I_c value of 43A, and J_c value of 28,000A/cm²(77K, 0T). Prototype 1000A class multistrand conductor(length ~1m) was fabricated using these tapes(length ~300m). This multistrand conductor was impregnated with low-temperature epoxy. The transportation properties of prototype 1000A class multistrand conductor has been evaluated at 77K, and yielding a current capacity up to 1200A.

Keywords : Bi-2223, multistrand conductor

I. 서론

고온초전도 전력케이블 시스템은 저손실, 저전압 대전류 방식에 의한 대용량 송전이 가능하기 때문에 기존의 송전방식에 비해 2배이상의 송전이 가능하다. 또한 저전압 송전에 의한 변전소의 생략이나 절연비등의 감소가 이루어진다. 현재 발전소는 345kV로 송전이 이뤄지고 있으나 앞으로 발전소의 한계용량(765kV)의 고전압화에 의해 송전용량에 한계가 따른다.

저전압 방식인 고온초전도 전력케이블의 경우 고전압방식에 의해 발생하는 대도시 주변에서의 전자장(EMF)발생문제, 전파장애문제, 그리고 기존의 냉각제인 절연유대신 액체질소를

사용하기 때문에 환경오염문제등도 최소화 할 수 있다.

고온초전도 선재 및 이를 이용한 고온초전도 전력케이블등의 전력응용기기 개발에 미국, 일본, 중국, 유럽 등지에서는 막대한 연구개발 노력을 하고 있다[1,2,3]. 특히, 동경전력(TEPCO)의 경우 100m급의 3상 66kV/1000A의 고온초전도 전력케이블 연구를 진행중에 있으며, 향후 동경등의 대도시 전력수요 증대시 신규 전력케이블의 증설대신, 기존 지하관로에 용량이 배가된 고온초전도 케이블을 설치할 예정이다.

또한 미국 Detroit Edison Project의 경우 도심부 배전망의 9개의 구리 송전선을 3개의 고온

초전도 송전선으로 대체하기 위해 120m 3상, 24kV/2400A급의 전력케이블 실험을 진행중에 있다[3].

전력 송전분야의 고효율화, 고밀도화 및 미래 대도시 전력수요 폭증에 대처하기 위해서는 차세대 대용량 송전선을 포함한 전력응용기기 개발을 위한 전력케이블용 BSCCO 선재 및 1000A급 multistrand conductor 제조기술을 개발할 필요가 있다. 특히 높은 임계전류밀도값을 갖는 BSCCO 2223 다심선재 및 수십개의 다심선재를 꼬아 다층으로 적층시켜 대용량의 전류를 통전시킬 수 있는 송전케이블 시스템에서 가장 핵심적인 multistrand conductor를 연구개발할 필요가 있다.

본 연구에서는 고온초전도 선재를 이용한 1000A급 multistrand conductor를 제작하기 위해 최종 열처리가 끝난 길이 300m급의 BSCCO 2223 선재를 액체질소 온도(77K) 하에서 임계전류 특성분석을 행하고, 이를 이용하여 길이 1m의 multistrand conductor를 제작한 후 전류통전실험을 하였다.

II. 실험방법

고온초전도 multistrand conductor를 제작하는데 기본이 되는 BSCCO 2223 선재는 최적화된 BSCCO 2223 전구체 분말을 사용하여 제조되어진다. Spray dry된 초기 분말을 몇단계의 하소공정을 거치면서 선재제작을 위한 은 피복재에 장입한다. 특히 초기분말 특성이 열처리 후의 전체적인 임계전류값을 좌우하기 때문에 여러 변수를 고려하여 분말을 제조하였고 PIT법을 사용하여 61심 300m급 선재로 가공하였다[4]. 350 μ m로 최종 압연된 선재는 몇 단계의 열처리공정을 거치면서 입자배열이 향상되어 열처리시 강한 texturing을 가진다. 또한 300m급의 장선재 열처리를 위해서는 코일형태의 열처리가 필요하며, 이를 위해 은피복재에 열적 절연코팅을 행한다음 대형로에서 열처리를 하였다.

미세조직의 균일화를 위해 온도, 유지시간, 분위기등의 변수를 조절하여 최대의 임계전류값을 가지도록 하였으며 각 구간별 임계전류 특성분석을 행하여 전체적으로 균일한 선재를 얻고자 하였다. 이렇게 제조된 61심 BSCCO

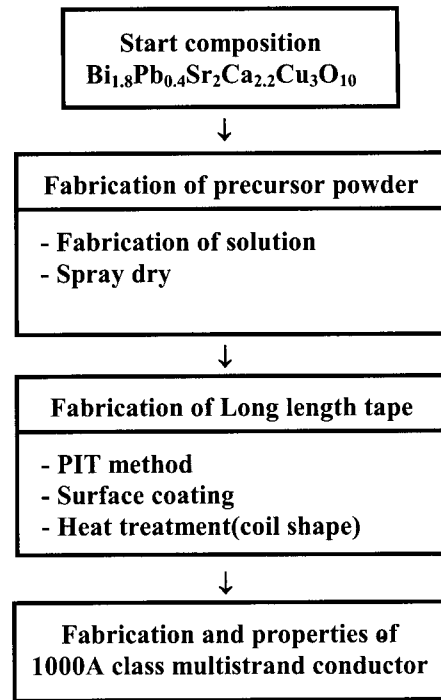


Fig. 1. Schematic flow chart for the experiment

2223 선재를 길이 1m씩 잘라서 1000A급 multistrand conductor를 제작한 후 통전실험을 행하였다. 개략적인 실험공정도를 Fig. 1에 나타내었다.

III. 결과 및 고찰

전력 케이블에 사용되는 고온초전도체는 액체질소 온도하에서 적용되며, 임계온도 이하에서 직류통전 및 교류통전이 가능하다. 또한 낮은 열전도도를 갖기 때문에 열에너지 손실을 최소화하여, 냉동기안의 냉매증발을 감소시켜 초전도 응용기기의 효율을 올려줄 수 있다. 이러한 고온초전도 전력케이블은 열충격, 상온과 초저온사이의 열적순환 및 고전류 통전에 의한 응력에 약하다. 이를 극복하기 위해서는 임계전류의 향상, AC 손실감소, 기계적 강도향상, 절연체의 성능향상등이 뒤따라야 한다.

전력케이블에 사용되는 HTS multistrand conductor의 임계전류값을 향상시키기 위해서는 반복적인 열·기계적 공정에 의해 초전도 성질

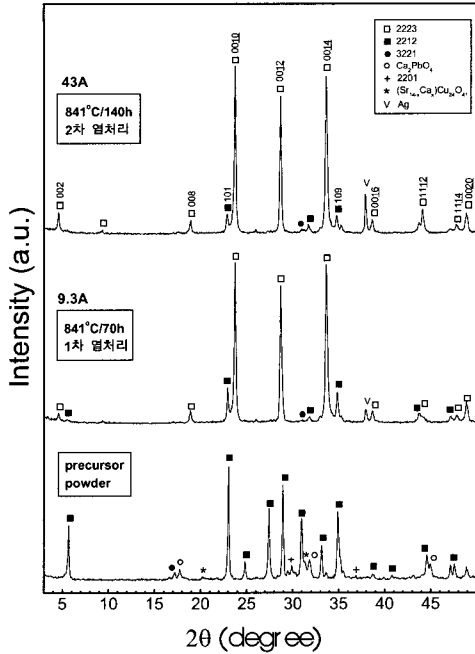


Fig. 2. XRD patterns of the final heat-treatment

을 지배하는 texturing과 입자배열을 향상시킴으로서 가능하다. 특히 BSCCO 초전도선재의 경우 기계적 변형이 BSCCO double Bi-O층을 따라 전단 변형되어 (001) plane으로 잘 분리된다. 따라서 열처리 시간동안 강한 (001) texture를 갖는 입자들이 잘 배열된다.

Fig. 2는 초기분말 및 잘 발달된 texture를 가지는 최종 열처리 후의 XRD pattern을 보여주고 있다.

Fig. 3의 a)는 제조된 300m급 BSCCO 2223 61심 다심 장선재가 원형으로 감겨져있는 모습이고, b)는 300m 장선재를 대형 액체질소 bath에 넣어 임계전류를 측정하기 전의 전체적 모습이며, c)는 77K, 0T에서 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 를 기준으로 임계전류를 측정한 결과값을 나타낸 그림이다 ($I_c \sim 43\text{A}$, $J_c \sim 28,000 \text{ A}/\text{cm}^2$).

최종열처리 된 61심 다심 장선재는 Fig. 3의 d)와 같이 c축으로 잘 발달된 texture를 가진 BSCCO 2223 입자를 관찰할수 있으며, 넓은 온도범위에 걸쳐 존재하며 pinning효과를 나타내는 이차상인 Ca_2PbO_4 나 최종 열처리에 상분해되어 2223상 형성에 기여하는 square-shaped

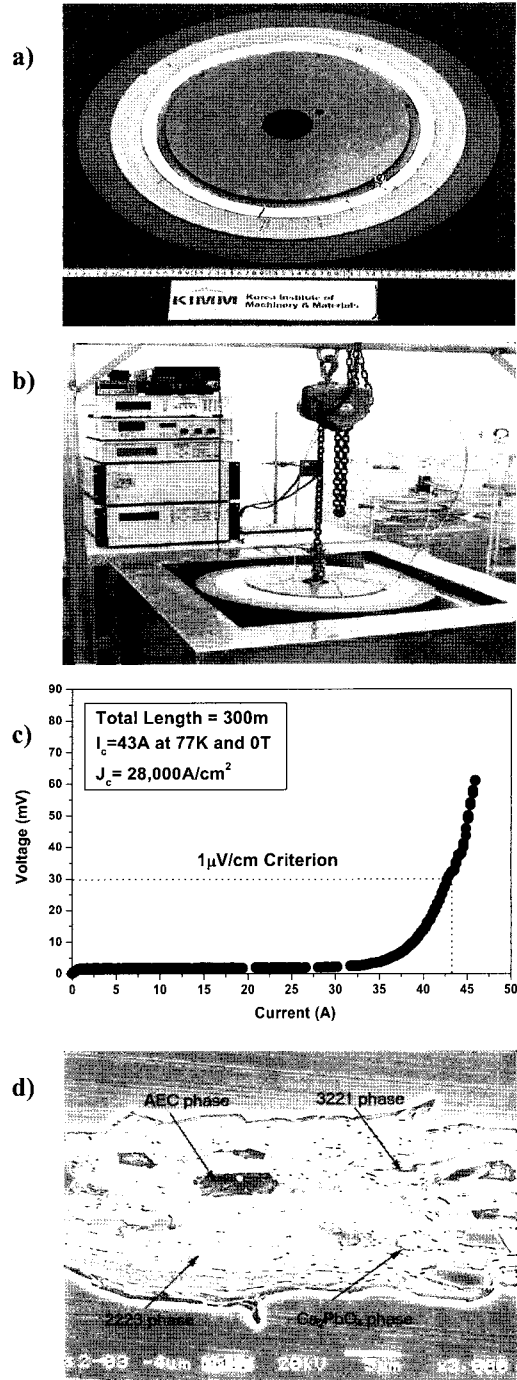


Fig. 3. Photo of (a) 300m length of 61 filament BSCCO tapes, b) View of critical current measurement system, c) Result of I-V curve, $I_c \sim 43\text{A}$ and $J_c \sim 28,000 \text{ A}/\text{cm}^2$, d) SEM micrographs of 61 filaments(length $\sim 300\text{m}$).

Table 1. Specification of the multistrand conductor

multistrand conductor	
Total length	1m
Mandrel	Al pipe
Mandrel Diameter	$\phi 35\text{mm}$
Insulation	epoxy
Layer	2
Number of tapes	50
Conductor diameter	$\phi 40\text{mm}$

Pb 451상이라고 불리는 3221상 등도 관찰되어진다.

본 실험에서는 제조된 $I_c \sim 43\text{A}$, $J_c \sim 28,000\text{A/cm}^2$ 인 300m급의 BSCCO 61심 장선재를 길이 1m 단위로 잘라 알루미늄 파이프 (길이 1m, 직경 35mm)에 꼬으면서 절연특성이 우수한 극저온용 epoxy를 이용하여 고정시키고, 두개의 층으로 적층시켜 길이 1m, 1000A급 multistrand conductor를 제작하였다(Table 1).

제작된 multistrand conductor에 1000A 이상의 대전류를 통전시키기 위해 양쪽 끝부분에는 무산소동으로 설계된 전극홀더를 연결하여 전기저항을 최소화하였다. Fig. 4의 a)는 제작된 길이 1m, 1000급 multistrand conductor에 전극 및 전압단자가 부착된 측정 전의 외형이며, Fig. 4의 b)는 통전측정을 위해 DC 1500A급 power supply와 nano-voltmeter를 이용한 전체 측정시스템을 나타낸것이다. 또한 Fig. 4의 c)는 액체 질소 저온조에 장입된 후의 전극 부위이며, Fig. 4의 d)는 보온, 보냉특성을 갖도록 자체 제작된 액체질소 저온조안에서 대용량의 전류가 흐를 때 생기는 전기저항을 줄이기 위해 무산소동으로 제작된 전극홀더를 사용하여 전원을 연결하고 액체질소 온도(77K) 하에서 통전실험을 하고 있는 모습을 나타낸 것이다.

전류 통전특성 측정은 4단자법으로 이루어졌으며, 측정장치와 컴퓨터사이의 자동제어 프로그램에 의해 측정데이터를 얻을수 있었다.

Fig. 5의 a)는 1000A급 multistrand conductor의 통전특성 측정결과(mV단위)와 무산소동을 사용한 전극부위의 통전특성을 비교한 것이며,

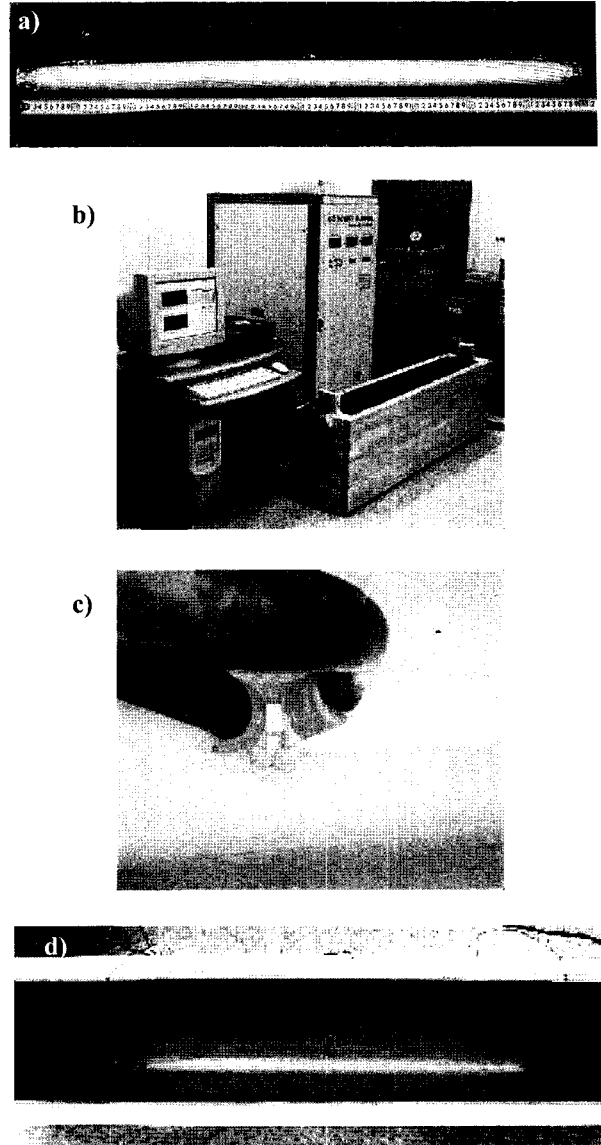


Fig. 4. a) 1000A class HTS multistrand conductor (length ~1m), b) View of measurement system, c) terminal part after immersed into LN_2 bath, d) View of critical current measurement

Fig. 5의 b)는 통전특성 결과를 μV 단위로 나타낸것이다. 측정시 나타나는 초기전압의 증가는 multistrand conductor 양 끝단을 연결하고 있는 무산소동 전극 단자의 저항 성분에 의해 발생한다[5]. Fig. 5의 c)는 통전측정시 인가된 전류에 대한 HTS multistrand conductor와 무산소동

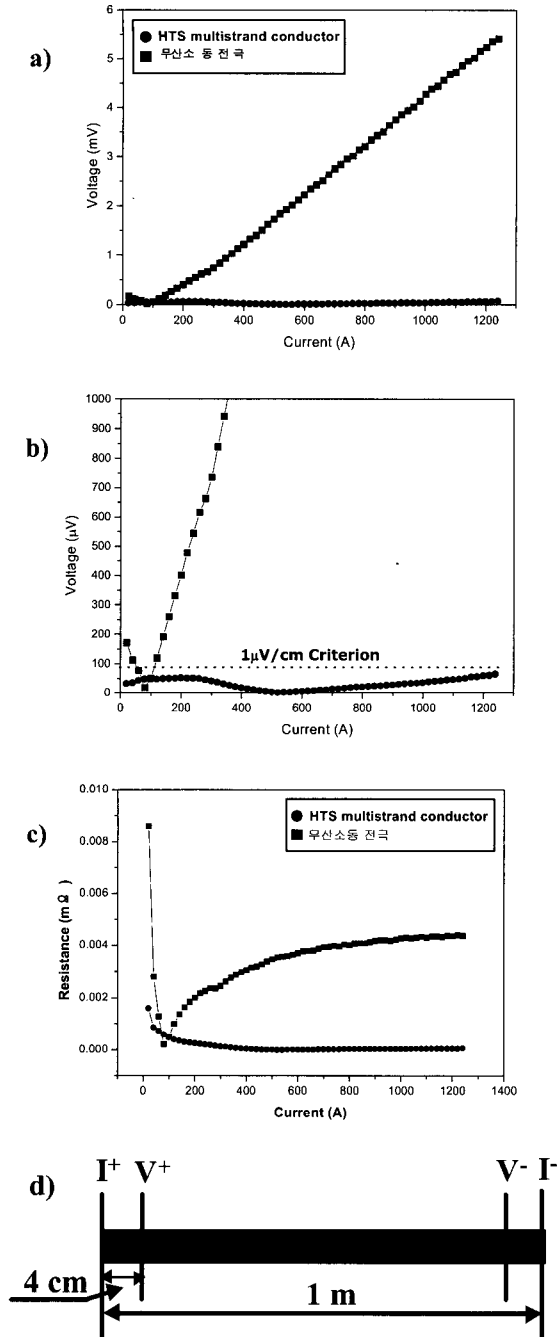


Fig. 5. a) Results of I-V curves of HTS multistrand conductor and non-oxygen copper, b) is the magnified view of (a), c) Comparison to resistance between HTS multistrand conductor and non-oxygen copper, d) Schematic of the multistrand conductor

전극 단자의 저항을 나타낸 것이다. Fig. 5 d)는 통전전류 측정시의 전류 및 전압단자의 위치를 개략적으로 나타낸 그림이다.

위와같이 전극단자에서 발생하는 접촉저항에 의한 저항 성분의 영향 때문에 일어나는 통전손실을 제외하더라도 평균적인 multistrand conductor의 통전 용량이 1200A 이상임을 알 수 있다.

통전특성이 우수한 전력케이블용 multistrand conductor를 제조하기 위해서는 선재의 임계전류밀도값이 향상되어야만 한다. 향후 높은 임계전류 특성을 가지는 장선재를 개발하여 이를 전력케이블용 multistrand conductor 개발에 적용할 예정이다.

IV. 결론

1. 임계전류(I_c) ~43A, 임계전류밀도(J_c) ~28,000 A/cm² (77K, 0T)를 가지는 길이 300m급의 고온초전도 BSCCO 2223 장선재를 제조하였다.
2. 제조된 BSCCO 2223 장선재를 이용하여 1000A급 multistrand conductor를 제작한 후 액체질소 온도하에서 통전특성 분석을 행한 결과 통전용량이 1200A 이상임을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] S. Honjo, T. Mimura, Y. Takahashi, "Present status of the development of superconducting power cable", *Physica C*, 335, 11-14 (2000).
- [2] L. Z. Lin, L. Y. Xiao, "Recent advances in the R&D of high-Tc superconductors for large-scale applications in China", *Physica C*, 337, 331-334 (2000).
- [3] N. Steve, M. Nassi, M. Bechis, P. Ladie, N. Kelley and C. Wakefield, "High temperature superconducting cable field demonstration at Detroit Edison", *Physica C*, 354, 49-54 (2001).
- [4] 유재무, 고재용, 김해두, 정형식, "고온초전도 BSCCO 선재 제조 및 전력응용 기술현황", 한국전자재료학회지, 11, 128-138(1998)
- [5] C. M. Friend, D. M. Spiller, L. Le Lay, S. A. Awan, T. P. Beales, "Using electrical measurements to determine the self-field AC losses of cable models", *Physica C*, 309, 187-196 (1998).