

Bi계 고온초전도 전류 리드의 특성

논문
12-10-20

Characteristics of Bi-based High T_c Superconducting Current Lead

백승명*, 이병성*, 김영석*, 김천오*, 광민환*, 김상현*

(Seung-Myeong Baek*, Byeong-Sung Lee*, Young-Seok Kim*, Cheon-Oh Kim*, Min-Hawn Kwak*, Sang-Hyun Kim*)

Abstract

We have fabricated and tested a Bi-based high temperature superconducting current lead. Multi-layer current lead was made by stacking of Ag sheathed Bi-2223 mono-filament wires. Ag sheathed Bi-2223 mono-filament wires of critical current (I_c)=8.4 A at 77 K under self-field condition were fabricated using the powder-in-tube (PIT) method. The critical current of the 10-layer current lead, is about 68 A at 77 K. At temperatures below the critical temperature, main contribution to total resistance resulted from contact resistance between copper and HTSC leads. The stability of the lead during thermal cycles was investigated in the range of 77~300 K. Also ac transport loss in the lead was measured at 77 K and 60 Hz using a transport method.

Key Words(중요용어) : High T_c Superconducting Current Lead(고온초전도 전류 리드), Contact Resistance(접속저항), ac Transport Loss(교류 통전 손실), Transport Method(통전법)

1. 서 론

고온초전도 산화물을 이용한 전류 리드는 비교적 저 자장에서 사용되고, 길이가 길지 않으면서 임계전류밀도가 비교적 작아도 되기 때문에 조기 실용화가 용이하다. 특히, 임계온도 이하에서는 전기저항이 0 이고, 열전도율이 매우 낮으므로 냉동기를 사용하여 20 K부근에서 운전하는 마그네트나 액체 헬륨을 냉매로 사용하는 SMES, MRI용 전류 리드에 고온초전도체를 사용할 경우 기존 전류 리드에 비해 냉매의 소비를 줄이고 냉동 부하를 감소시켜 시스템운영에 있어서 경제성이 매우 높다¹⁾. 일본의 Sumitomo와 Kansai 전력회사는 은 피복 Bi계 초전도 선재를 사용하여 SMES magnet용 전류 리드를 제작하여 실험하였으며, 미국 휴스턴 대학에서는 μ -SMES 시

스텝용 헬륨증기냉각 방식의 봉형 YBCO와 튜브형 BSCCO-2212 전류 리드를 제작하여 전기적, 열적 안정도 실험결과를 보고하였다. 또한 Westinghouse Science의 J. L Wu는 실린드형 BSCCO-2212 전류 리드를 제작하여 전기적 안정도를 실험하였다. 프랑스에서는 MCP법을 이용하여 다양한 치수의 튜브형 BSCCO-2212 10 kA급 전류 리드를 제작하고 특성을 평가하여 보고하는 등 여러 나라의 연구단체에서 고온초전도체를 이용한 전류 리드에 대한 연구가 활발히 진행중이다²⁻⁵⁾.

은 피복 Bi계 초전도 선재를 이용하여 전류 리드를 제작한 경우 일반 금속 전류 리드와 쉽게 접속이 가능하므로 접속에 따른 접속저항을 줄여 접속부분의 발열에 의한 손실을 줄일 수 있으나 전류 리드를 통한 외부로부터의 열침입이 크다. 반면, YBCO, BSCCO 등의 초전도 산화물을 벌크 형태로 이용하면 외부로부터의 열침입을 크게 줄일 수 있으나 일반 금속 전류 리드와 접속이 용이하지 않다. 따라서, 고온초전도체를 전류 리드에 응용할 경우 산화물 자체의 기계적 취약성, 일반 전류 리드와 접속에 따른 접속저항⁶⁾, 외부로부터의 열침입, 외부자장에 따른 I_c의 열화 그리고 통전 용량 증대 등 응용에 많은 문제

* : 경상대학교 공과대학 전기공학과
(전주시 가좌동 900, Fax : 0591-759-2723 E-mail : shkim@nongae.gsnu.ac.kr)

1999년 7월 23일 접수, 1999년 10월 5일 심사완료
<'99 춘계 학술대회에서 추천된 논문임>

점이 고려되어야 된다. 또한, 일반 전력기기는 보통 교류상태에서 사용됨으로 전류 리드에 발생하는 교류 손실"에 대한 연구가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 고온초전도 산화물의 기계적 취약성 및 열전도율을 고려하여 PIT법을 이용하여 은 비가 1.6으로 낮은 은 피복 Bi-2223 단심 선재를 이용하여 전류 리드를 제작하였다. 전류 리드를 통한 외부로부터의 열침입을 줄이기 위해 저온측로 갈수록 선재의 적층 매수를 순차적으로 줄이는 단차적층 형태로 전류 리드를 제작하여 실제 응용을 위해 열적, 전기적 특성을 조사하여 안정성을 검증하였다.

2. 실험방법 및 장치

전류 리드는 은 피복 Bi-2223 단심 선재를 사용하여 제작하였고, 선재는 PIT법으로 제작하였다. 선재 제작을 위해 은 봉에 Bi-2223 분말을 충전하여 직경 1.8 mm까지 인발한 후 롤링 공정을 거쳐 두께 0.4 mm, 폭 2.8 mm 테이프 형태의 선재를 제작하여 840 °C, 100 h 동안 1차 열처리를 행하였다. 1차 열처리를 마친 선재는 길이 방향으로 적층 매수를 변화시키는 단차적층 형태로 선재를 적층하여 840 °C, 100 h 동안 2차 열처리를 행하였다. 2차 열처리를 행함으로써 전류 리드의 임계전류(I_c) 증가되었고, 각 선재는 일체화되었다. 최종 열처리를 마친 은 피복 Bi-2223 단심 선재의 평균 I_c 는 8.4 A를 나타내었으며, 10층 적층 전류 리드의 I_c 는 약 68 A를 나타내었다. 임계전류는 DC 4단자법을 사용하여 77 K, 자기 자

계 하에서 $1 \mu\text{W}/\text{cm}$ 의 전압이 생길 때의 전류 값으로 정의하였다. 그림 1에 단심 선재의 단면 사진과 적층 후의 단면 사진을 나타낸다. 고온초전도 전류 리드를 SMES, MRI에 사용할 경우 고온초전도 전류 리드는 4.2 K에서 77 K 사이에서 사용된다. 따라서 은 피복 Bi-2223 선재를 사용하여 단차적층 형태의 전류 리드 제작을 위해 온도 변화에 따른 선재의 임계전류 의존성을 조사하였다. 선재에 3 cm 간격의 전압탭을 내고, 선재 양단에 전류탭을 내어 냉동기에 장착하여 온도를 선형적으로 내리면서 선재의 임계전류를 측정하였다.

전류 리드를 실제 계통에 사용할 경우 초전도체와 일반 금속 사이에 접속부분이 발생한다. 초전도체는 임계온도 이하에서는 전기저항이 0이 됨으로 접속부분에서 발생하는 Joule 발열을 고려할 필요가 있다. 접속저항은 전류 리드를 통전시켜 접속부분에 발생하는 전압을 측정하여 인가한 전류를 나누어 계산하였다. 전류 리드와 동 단자 사이의 접속길이를 10 mm에서 100 mm까지 변화시키면서 접속저항의 변화를 고찰하였다. 그리고 접속길이 30 mm일 때 온도 변화에 따른 접속저항을 측정하였다. 구리 전류 리드와 고온초전도 전류 리드를 30 mm 납땜으로 접속하여 접속부분에 DC 4단자 측정을 위해 탭을 내어 냉동기에 장착하였다. 냉동기로 온도를 선형적으로 내리면서 위와 같은 방법으로 탭간 발생전압에 인가전류를 나누어 접속저항을 계산하였다.

그림 2에 교류 손실 측정 개략도를 나타낸다. 본

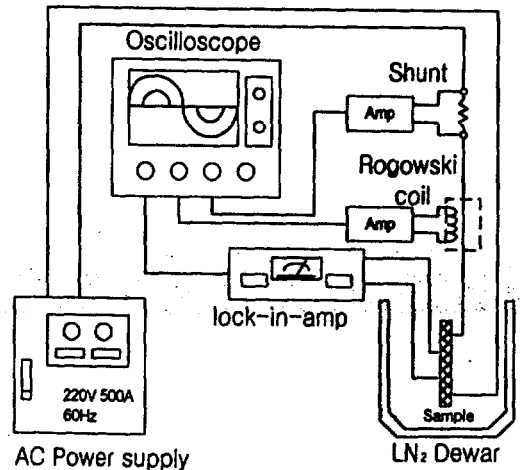


그림 1. 단심 선재와 다층 선재의 단면 사진.

Fig. 1. Cross sectional photograph of mono-filament wire and multi-layer wire.

그림 2. 교류 손실 측정 개략도.

Fig. 2. Schematic diagram of ac transport loss measurement system.

이구에서 교류 손실 측정은 lock-in technique을 사용하여 시료를 통전시켜 전압탭에 실제 발생한 전압을 측정하여 유도전압을 제거하고 저항성 전압을 사용하여 손실을 측정하는 통전법을 사용하였다. 시료는 액체 질소에 함침한 후 최대값 I_m , 주파수 $\omega/2\pi = 60$ Hz인 교류 전류 $i(t) = I_m \sin(\omega t)$ 을 인가시켜 lock-in-amp를 사용하여 전압탭 양단의 전압을 측정하였다. Oscilloscope를 사용하여 Rogowski coil 양단에서 측정한 유도전압을 제거하고 저항성 전압과 인가전류를 한 주기 적분하여 산술적으로 손실을 구하였다.

그리고, 온도를 주기적으로 변화시켜 단차적층한 전류 리드 각 부분의 임계전류의 변화를 관찰하였다. 즉, 시료는 77 K-300 K-77 K를 한 주기로 하여 각 온도에서 60초 동안 유지하였다. 40회 동안 매회 77 K, 0 T에서 DC 4단자법을 이용하여 임계전류를 측정하였다.

3. 결과 및 검토

그림 3에 은 피복 Bi-2223 단심 선재의 온도 변화에 따른 임계전류 의존성을 나타낸다. 선재의 임계전류는 77 K일 때 8.4 A를 나타냈으며, 60 K일 때 14 A, 50 K일 때 16.5 A로 각각 나타났다. 온도 변화에 따른 임계전류 측정결과를 일반식으로 식 (1)에 나타내었다.

$$I_c = 46.12(1 - (T/105))^{1.35} \quad (1)$$

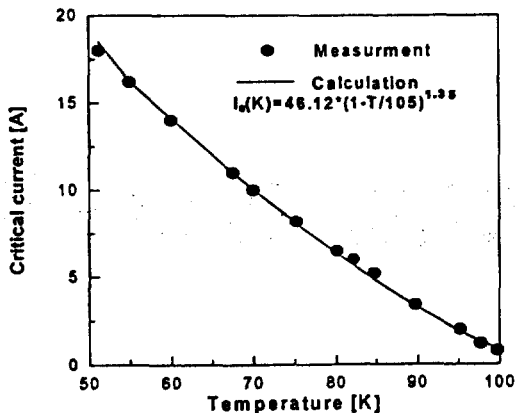


그림 3. Bi-2223 단심 선재의 온도 변화에 따른 임계전류 변화

Fig. 3. Critical current vs. temperature of Bi 2223 mono-filament wire

선재의 I_c 는 온도가 낮아질수록 증가하므로 선재를 적층하여 전류 리드를 제작할 경우 전류 리드 각 부분의 임계전류를 균일하게 유지하면서 저온측 일수록 적층 선재 수를 줄일 수 있다. 고온측에서 열전달은 단면적에 비례한다. 따라서 적층 선재를 감소시켜 단면적을 줄여 전류 리드를 통한 외부로부터 열침입을 크게 줄일 수 있다.

그림 4에 전류 리드 각 부분의 열 사이클 회수에 따른 임계전류 값을 나타낸다. 온도는 77 K-300 K-77 K를 한 주기로 40회 동안 매회 전류 리드의 I_c 를 측정된 결과 I_c 의 열화 없이 일정하게 나타났다. 따라서, 은 피복 Bi-2223 선재를 적층하여 만든 전류 리드는 thermal cycling에 대해 안정함을 알 수 있다.

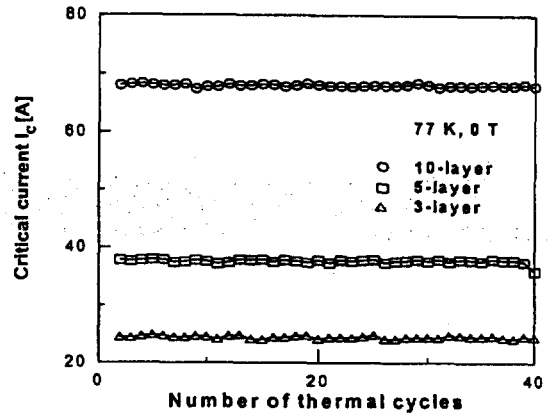


그림 4. 열 사이클 회수에 따른 임계전류
Fig. 4. Critical current vs. number of thermal cycles

고온초전도체와 구리와 같은 일반 전류 리드와의 접속은 극저온 시스템에서는 매우 중요한 요소이다. 따라서, 접속에 따른 영향을 고찰할 필요가 있다. 그림 5에 접속길이의 변화에 따른 접속저항 값을 나타낸다. 고온초전도 전류 리드와 동 단자와 접속길이를 변화시키면서 접속저항을 측정된 결과, 30 mm 까지 접속저항이 급속하게 감소하고 30 mm 이상에서는 완만하게 포화하여 약 $2 \times 10^{-7} \Omega$ 으로 나타났다. 접속은 납땜으로 하였다. 은 피복 선재를 사용함으로써 전류 리드와 동 단자의 접속이 용이하고, 접속길이를 변화시켜 쉽게 저 접속저항을 얻을 수 있다.

그림 6에 온도 변화에 따른 접속저항을 나타낸다. 77 K에서 접속길이가 30 mm일 때 접속저항은 약 2×10^{-7}

Ω 인데 온도가 낮아짐에 따라 접촉저항도 점점 작아지고, 100 K 근방까지 온도가 증가하여도 접촉저항의 증가가 크지 않아 quench가 일어나지 않는 단계까지는 접촉에 의한 손실이 크지 않음을 알 수 있다.

그림 7 a)는 전류신호와 텡간 발생 전압신호를 나타내고 b)는 전류신호와 유도전압을 제거한 저항성 전압신호를 나타낸다. 전압텡에서 발생하는 전압은 유도전압과 저항성 전압의 합이며, 임계전류 이하에서는 저항성 전압이 미세하게 발생하지만 임계전류

부근에서는 급격히 발생된다. 유도전압은 인가전류보다 위상이 90° 앞서 발생하며 저항성 전압은 동일한 위상에서 발생한다. 교류 손실은 저항성 전압신호와 shunt에서 측정된 전류신호를 한 주기동안 적분하여 한 주기 동안 발생한 손실을 측정하였다. 평균 통전 손실은 식 (2)과 같이 나타낸다.

$$W = 1/T \int_0^T V \cdot I dt \quad (2)$$

여기서 V 는 저항성 전압이고 I 는 통전 전류이다. 그림 8은 통전 전류에 따른 교류 손실을 나타낸 것이다.

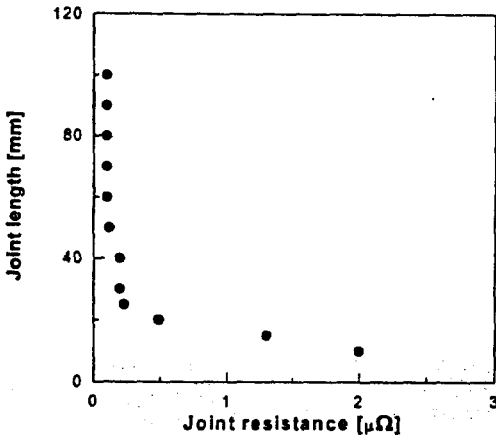


그림 5. 접속길이에 따른 접속저항
Fig. 5. Relationships between joint resistance and joint length

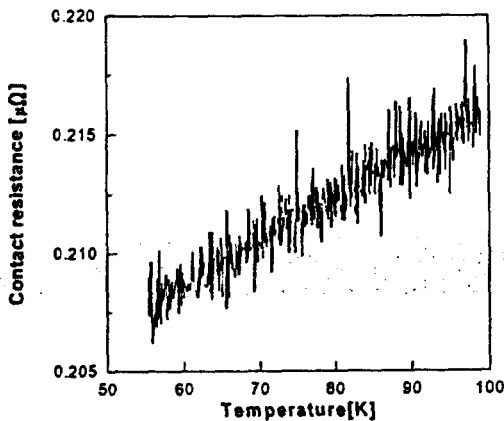
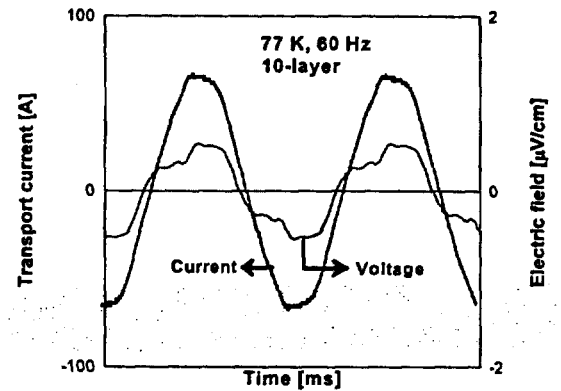
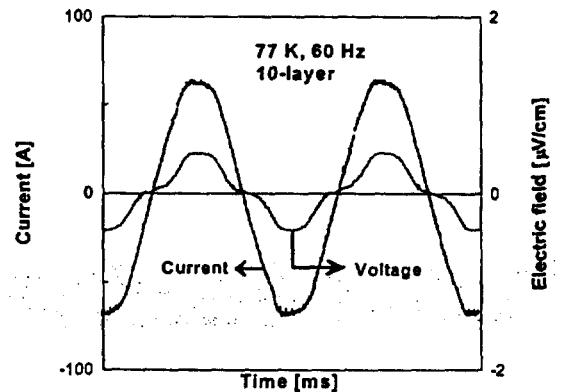


그림 6. 접속길이 30 mm일 때 온도 변화에 따른 접속저항
Fig. 6. Variation of Contact resistance vs. temperature with contact length 30 mm



a) 유도전압 제거 전
a) before erasing inductance voltage



b) 유도전압 제거 후
b) after erasing inductance voltage

그림 7. 교류 손실 파형
Fig. 7. Measurement of ac loss signal at 77 K, $I_m = 68$ A, $f = 60$ Hz

77 K에서 단심 선재를 10층 적층한 전류 리드의 교류 통전 손실을 측정할 결과 전류의 1.674승에 비례하였다. 단심 선재의 교류 통전 손실은 임계전류 이하에서 히스테리시스손실이 주가 되어 전류의 3승 정도에 비해 하지만, 단심 선재를 적층 하였을 경우 은 피복에 의한 와전류손실과 선재간의 결합손실이 더욱 크게 나타나 전류의 1.674에 비례하여 나타나는 것으로 생각된다.

승에 비례하여 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음(과제번호 : 98-006).

참고 문헌

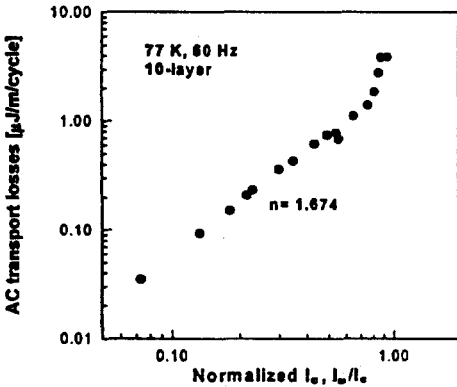


그림 8. 10층 전류 리드의 교류 손실 측정
Fig. 8. Experimental ac transport loss per cycle at 77 K, 60 Hz for the 10-layer current lead

4. 결 론

은 피복 Bi-2223 단심 선재를 이용하여 고온초전도 전류 리드를 제작하여 전기적, 열적 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

은 피복 Bi-2223 단심 선재를 이용하여 제작한 전류 리드의 임계전류는 온도변화에 대하여 안정하였다. 임계온도 이하에서 초전도 선재와 동 단자 사이의 저항 분포는 접속저항이 대부분이며, 은 피복 Bi-2223 단심 선재와 동 단자 사이의 접속저항은 77 K에서 $2 \times 10^{-7} \Omega$ 정도로 작게 나타났다. 그리고 접속저항은 온도가 낮아짐에 따라 점점 감소하므로 저온일수록 접속저항에 따른 손실의 영향이 줄어들었다. 또한, 전류 리드의 교류 손실은 임계전류 이하에서 히스테리시스손실뿐 아니라 와전류손실 및 결합손실도 크게 나타나는 것으로 사료되며 인가전류의 1.674

1. J. R. Hull, "High temperature superconducting current leads", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 3, pp. 869-875, 1995.
2. R. Heller and J. R. Hull, "Conceptual Design of a Forced-Flow-Cooled 20- μA Current Lead Using Ag-Alloy-sheathed Bi-2223 High-Temperature Superconductors", IEEE Trans. on Appl. Supercond. vol. 5 number 2, pp. 797-800, 1995.
3. Yu. L. Buyanov, "Current leads for use in cryogenic devices Principle of design and formulate for design calculations", Cryogenics, vol. 23, pp. 94-110, 1985.
4. K. Ueda, T. Bohno, K. Takita, K. Uede, I. Itoh, M. Mimura, N. Uno, T. Tanakam, "Degisn and Testing of a pair of current leads using Bismuth compound Superconductor", IEEE Tran. on Appl. Supercond., Vol. 3, No. 1, pp. 400-403, March, 1993.
5. J. L. Wu, "TESTING OF A PROTOTYPE HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING CURRENT LEAD", IEEE Tran, Vol. 5, No. 2, pp. 777-781, 1995.
6. M. Polak, I. Hlasnik, S. Fukuni, N. Ikeda, O. Tsukamoto, "Self-field effect and current-voltage characteristics of a.c. superconductors", Cryogenics, Vol. 34, pp. 315-324, 1994.
7. Y. Yasukawa, K. Takita, H. Hiue, I. Itoh, "Development of 2 μA High-Temperature Superconductor Current Lead System for AC Applications", IEEE, vol. 32, no. 4, pp. 2671-2674, 1996.