

Bi계 고온초전도 전류 리드의 특성**Characteristics of Bi-based High T_c Superconducting Current Lead**

⁰백승명¹, 이병성¹, 김영석¹, 광민환¹, 김상현¹
 (⁰S.M.Back¹, B.S.Lee¹, Y.S.Kim¹, M.H.Kwak¹, S.H.Kim¹)

* 경상대학교 공과대학 전기공학과
 (Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang Nat'l. Univ.)

Abstract

We have fabricated and tested a Bi-based high temperature superconducting current lead system. Ag sheathed Bi-2223 mono-filament tapes of $I_c=8.4$ A at 77 K under self-field condition were fabricated using powder-in-tube(PIT) method. Multi-layer current leads can be made by stacking of Ag sheathed Bi-2223 mono-filament wires. The critical current of this 10-layer current lead is about 68 A. The contact resistance across the copper-current lead interface has been studied using current-voltage characteristics. At temperature below critical temperature the resistive contribution of the interface to the total contact resistance dominates. We have measured AC transport losses in a current lead at 77 K, 60 Hz by a transport method.

Key Words (중요용어) : High T_c superconductor(고온초전도체), Current lead (전류 리드), AC transport losses(교류 통전 손실), Transport method(통전법)

1. 서론

고온초전도 전류 리드는 비교적 저 자장에서 사용되고, 길이가 길지 않으면서 임계전류밀도가 비교적 작아도 되기 때문에 조기 실용화가 용이하다. 그리고, 기존 전류 리드에 비해 시스템운영의 경제성이 높기때문에[1] 초전도 마그네트, 초전도 발전기 등의 전류 리드 응용에 많은 연구가 진행중이다.[2-3] 하지만, 고온초전도 산화물의 기계적 취약성, 전류 리드에 응용할 경우 일반 금속과 초전도체의 접속부분에 접속저항[5] 그리고 통전 용량 증대 등 응용에 많은 문제점이 있다. 또한, 일반 전력 기기는 보통 교류상태에서 사용됨으로 전류 리드에 교류 손실이 발생 [6-7]됨으로 이에 대한 연구가 필요하다

따라서, 본 연구에서는 고온초전도체의 기계적 취약성 및 열전도율을 고려하여 은 비가 1.6으로 낮은

은 피복 Bi-2223 단심 선재를 이용하여 전류 리드를 제작하였다. 통전 용량의 증대를 고려하여 적절한 선재를 병렬 접속하였다. 임계온도 이하에서의 저항분포는 대부분 구리와 전류 리드의 접합부분에서 발생하므로 전류-전압 특성을 이용하여 접속저항을 구하였다. 또한, 제작한 전류 리드의 열적, 전기적 특성을 조사하여 안정성을 검증하였다.

2. 실험방법 및 장치

전류 리드는 은 피복 Bi-2223 단심 선재를 사용하여 제작하였다. 은 피복 Bi-2223 선재는 PIT법으로 제작하였으며 1차 열처리를 마친 선재는 각 130 mm 씩 절단하여 10층 적층하였다. 적층한 선재는 840 °C, 100 시간 2차 열처리를 행함으로써 임계전류(I_c)가 증가되었고, 각 선재는 일체화되었다. 최종 열처

리를 마친 은 피복 Bi-2223 단심 선재의 평균 I_c 는 8.4 A를 나타내었으며, 전류 리드의 I_c 는 약 68 A를 나타내었다. 임계전류는 DC 4단자법을 사용하여 77 K, 자기자계하에서 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 의 전압이 생길 때의 전류 값으로 정의하였다. 최종 치수는 $3.5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$ 이다. 그림 1에 단심 선재의 단면 사진과 적층 후의 단면 사진을 나타낸다.

전류 리드를 실제 계통에 사용할 경우 초전도체와 동 단자 사이에 접속부분이 발생한다. 초전도체는 임계온도 이하에서는 전기저항이 0 이 됨으로 접속 부분에서 발생하는 Joule 발열을 고려할 필요가 있다. 접속저항은 전류 리드를 통전 시켜 접속 부위에 발생하는 전압을 측정하여 인가한 전류를 나누어 계산하였다. 그리고, 전류 리드와 동 단자 사이의 접속 길이를 10 mm에서 100 mm까지 변화시키면서 접속 저항의 변화를 고찰하였다.

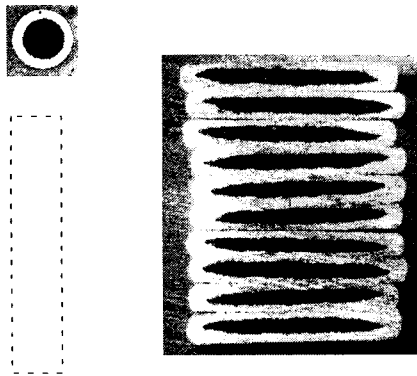


그림 1. 단심 선재와 적층 후의 단면 사진
Fig 1. Cross sectional photograph of mono-filament wire and 10-layer current lead

그림 2에 교류 손실 측정 개략도를 나타낸다. 본 연구에서 교류 손실 측정은 시료를 통전시켜 시료에 발생하는 전압을 측정하여 유도전압을 제거하고 저항성 전압을 구하여 손실을 측정하는 통전법을 사용하였다. 시료를 액체 질소에 함침한 후 최대값 I_m , 주파수 $\omega/2\pi=60 \text{ Hz}$ 인 교류 전류 $I(t)=I_m \sin(\omega t)$ 를 인가시켜 Lock-in-amp를 사용하여 전압 탭 양단의 전압을 측정하였다. Oscilloscope를 사용하여 Rogowski coil 양단에서 측정된 유도전압을 제거하고 저항성 전압과 인가 전류를 한 주기 적분하여 산술적으로 손실을 구하였다.

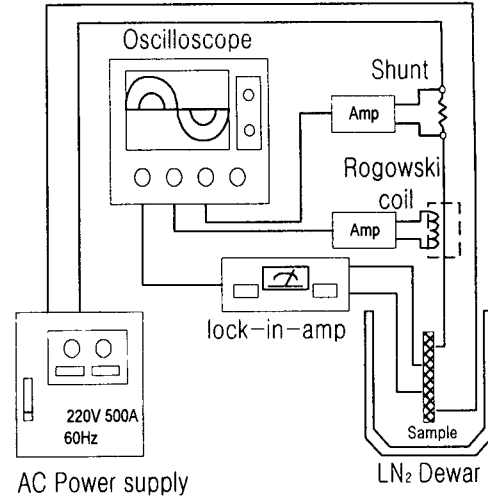


그림 2. 교류 손실 측정 개략도
Fig 2. Schematic diagram of AC transport losses measurement system

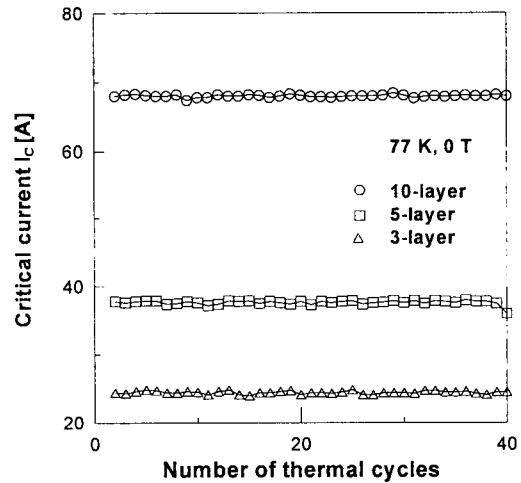


그림 3. 다층 전류 리드의 열 cycle 회수에 따른 임계전류 특성
Fig 3. Properties of critical current vs. number of thermal cycles in the temperature range from 300 K to 77 K for the multi-layer current leads

그리고, 온도를 주기적으로 변화시켜 3층, 5층, 10층 전류 리드의 임계전류의 변화를 관찰하였다. 즉, 시료를 300 K와 77 K사이의 온도변화를 각각 60초 동안 주면서 매회 임계전류를 측정하였다.

3. 결과 및 검토

그림 3에 3, 5, 10층 적층한 전류 리드의 열 cycle 회수에 따른 임계전류 값을 나타내고, 그림 4에 통전 회수에 따른 임계전류 값을 나타낸다.

온도를 주기적으로 변화시키면서 매회 전류 리드의 I_c 를 측정된 결과 I_c 의 열화는 보이지 않았다. 따라서, 은 피복 Bi-2223 초전도를 적층하여 만든 전류 리드는 계통 사고 등에 따른 온도 변화에 안정하며 사고 복구 후 I_c 의 열화 없이 초전도 상태로 안정하게 통전 시킬 수 있음을 알 수 있다.

그림 4에 접속길이의 변화에 따른 접속저항 값을 나타낸다. 접속길이를 변화시키면서 접속저항을 측정된 결과 30 mm 이상일 경우에는 완만하게 포화하여 $10^{-7} \Omega$ 정도 나타났다.

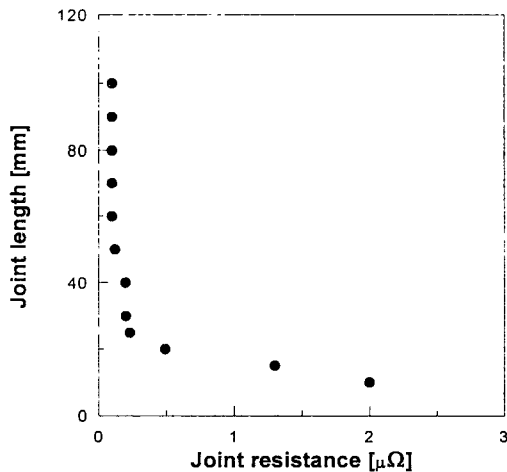


그림 4. 접속길이에 따른 접속저항
Fig 4. Relationships between joint resistance and joint length

따라서, 은 피복 선재를 사용함으로써 전류 리드와 동 단자의 접속이 용이하고, 접속길이를 변화시켜 쉽게 저 접속저항을 얻을 수가 있다.

그림 5에 온도 변화에 따른 접속저항을 나타낸다. 온도가 낮아지면 접속저항도 작아짐을 볼 수 있다. 이는 전류 리드를 4.2 K, 20 K부근에서 사용하면 접속저항에 따른 손실을 더욱 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

그림 6 a)에 전류신호와 탭간 발생 전압 파형을 나타내고 b)에 전류신호와 저항성 전압신호를 나타낸다. 교류 손실은 저항성 전압성분 신호와 shunt에서

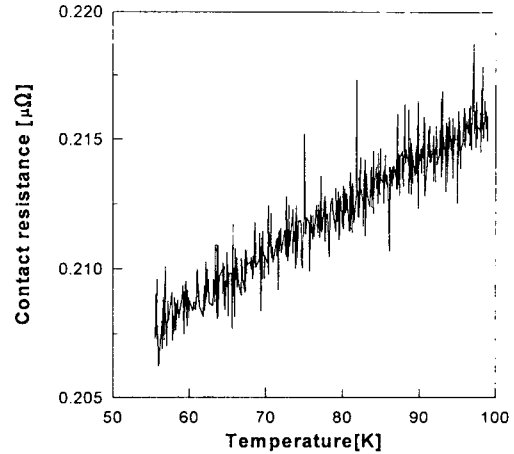


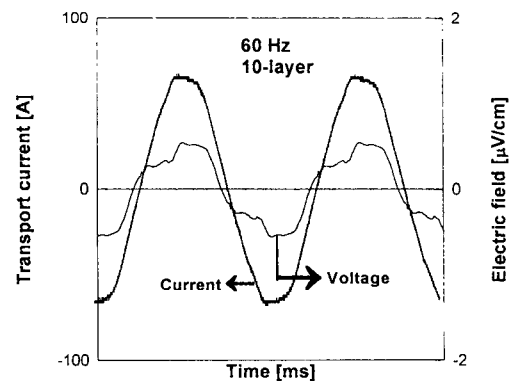
그림 5. 접속길이 30 mm일 때 온도 변화에 따른 접속저항

Fig 5. Variation of Contact resistance vs. temperature with contact length 30 mm

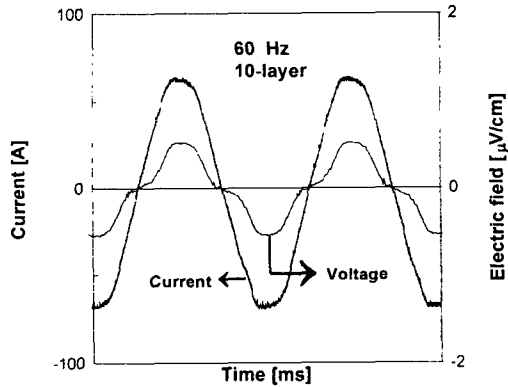
측정한 전류신호를 한 주기동안 적분하여 한 주기 동안 발생한 손실을 측정하였다. 평균 통전 손실은

$$W = \frac{1}{T} \int_0^T V \cdot I dt$$

로 나타낸다. 여기서 V 는 저항성 전압이고 I 는 통전 전류이다. 그림 7은 전류 변화에 따른 교류 손실을 나타낸 것이다. 77 K에서 단심 선재를 10층 적층한 전류 리드의 교류 통전 손실을 측정된 결과 전류의 1.66승에 비례하였다. 단심 선재의 교류 통전 손실은 임계전류 이하에서 히스테리시스손실이 추가 되어 전류의 3승 정도에 비례하지만, 단심 선재를



a) 유도전압 제거 전
a) before erasing inductance voltage



b) 유도전압 제거 후
b) after erasing inductance voltage

그림 6. 교류 손실 파형
Fig 6. Measurement of AC loss signal at 77 K, $I_m=68$ A, $f=60$ Hz

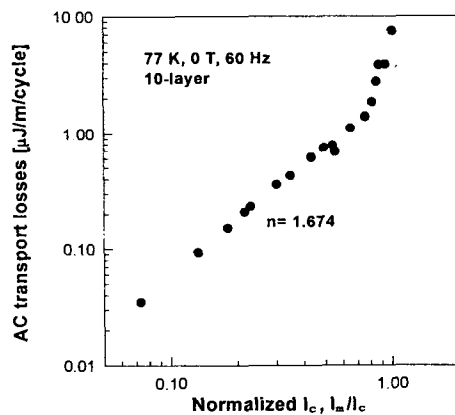


그림 7. 교류 손실 측정
Fig 7. Experimental AC transport losses per cycle at 60 Hz for 10-layer current lead

적층 하였을 경우 은 피복에 의한 와전류손실과 선재간의 결합손실이 더욱 크게 나타나 전류의 1.66에 비례하여 나타나는 것으로 생각된다.

4. 결론

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 안정하였다.

임계온도 이하에서 초전도 선재와 동 단자 사이의 저항 분포는 접촉저항이 대부분이며, 은 피복 Bi-2223 단심 선재와 동 단자 사이의 접촉저항은 77 K에서 $10^7 \Omega$ 정도로 작게 나타났다. 또한, 전류 리드의 교류 손실은 임계전류 이하에서 히스테리시스 손실뿐 아니라 와전류손실 및 결합손실도 크게 나타나는 것으로 생각되며 인가전류의 1.66승에 비례하여 증가하였다.

참고문헌

- [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-kA 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]. 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.
- [6]. Y. Yasukawa, K. Takita, H. Hiue, I. Itoh, "Development of 2 kA High-Temperature-Superconductor Current Lead System for AC Applications," IEEE, vol. 32, no. 4, pp. 2671-2674, 1996.