

Effects of Ag-alloy sheath on thermal/electrical conductivity of Bi-2223 superconductor tapes

Seok Hern Jang^a, Bong Ki Ji^a, Jun Hyung Lim^a, Jinho Joo^a, Wansoo Nah^b
John Slavko Volf^c, Hua Kun Liu^c and Miles Apperley^d

^a School of Metallurgical & Materials Engineering, SungKyunKwan University, Suwon, Korea

^b School of Electrical & Computer Engineering, SungKyunKwan University, Suwon, Korea

^c Institute for Superconducting and Electronic Materials, University of Wollongong, Australia.

^d Australian Superconductors, Engineering and Innovation Education Centre, Australia.

Received 20 August 2002

피복합금을 사용한 Bi-2223 선재의 열전도도 및 전기전도도 특성평가

장석현^a, 지봉기^a, 임준형^a, 주진호^a, 나완수^b
John Slavko Volf^c, Hua Kun Liu^c, and Miles Apperley^d

Abstract

We evaluated the effect of alloying-element additions to Ag sheath on thermal conductivity of Bi-2223 superconductor tapes. In order to evaluate the effect of sheath alloys and their configuration on the properties of tape, various combinations of Ag and Ag alloys were selected as inner and outer sheath. Thermal conductivity of the tapes was measured by using thermal integral method at 10~120 K. It is observed that the presence of alloying-elements such as Mg, Sb, and Au in Ag sheath results in decreased thermal conductivity at low temperature. Specifically, the thermal conductivity of AgMg, AgSb, and AgAu at 40 K were 411.4, 142.3, and 109.7 W/(m·K), respectively, which is about 2~9 times lower than that of Ag (1004.6 W/(m·K)). In addition, the thermal conductivity of alloy-sheathed tape was significantly dependent on their values of constituent sheath materials.

Keywords : Alloys, BSCCO tape, Thermal conductivity, Thermal integral method

I. Introduction

고온 초전도체의 우수한 전기적 특성을 모터, 변압기, 전류인입선, 송전선 등의 다양한 초전

도 전력기기에 응용하기 위해서는 PIT(powder-in-tube)법에 의해 제조된 Ag피복 BSCCO 선재의 개발이 필수적이다. 이러한 시스템에는 냉매체인 액체헬륨의 소모를 최소화 시킬 수 있는 우수한 특성의 전류인입선이 요구되며, 특히 최근에는 Ag피복 BSCCO선재를 적층한 형태의 하이브리드(hybrid)형 고온초전도 전류인

*Corresponding author. Phone : +82 31 290 7385,
Fax : +82 31 290 7371, e-mail : jinho@skku.ac.kr

입선이 제안되고 있다.

선재를 적층한 형태의 전류인입선은 높은 임계전류밀도(J_c)와 우수한 내변형률특성을 가지며 길이나 형태를 다양하게 하여 전류인입선에 적용이 가능하다. 그러나 피복재료인 Ag의 높은 열전도도로 인해 냉매제의 소모를 촉진시키는 단점이 있으며, Ag피복재의 높은 전기전도도로 인해 BSCCO 선재의 교류응용에 있어 한계가 있다. 이러한 단점을 극복하기 위한 방안으로 피복재료의 열전도도와 전기전도도를 낮추어 줌으로써 BSCCO 선재의 응용범위를 확대할 수 있는 Ag합금의 개발이 필요하다.

초전도 선재의 피복재료로서 많은 Ag합금이 개발되고, 이에 대한 연구가[1],[2] 최근 보고되고 있으나, 여러 가지 피복합금의 열적, 전기적 특성의 상호관련성에 대한 연구가 체계적으로 이루어지지 않는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 Ag-Au, Ag-Sb, Ag-Mg 등의 Ag합금을 제조하여 10~120 K에서 열전도도를 측정하였고, 다양한 조성의 Ag합금들을 내부와 외부 피복재료 하여 37심 다심선재를 제작하고 열전도도와 전기전도도를 평가하였다.

II. Experimental Procedure

피복합금을 제조하기 위해 Ag(99.99 %)에 소량의 Au, Sb, 그리고 Mg를 첨가하고 고주파유도로를 사용하여 합금을 제조하였다. 합금원소는 Ag의 고용한도[3] 보다 적은 양을 첨가하였으며, Ag합금의 조성은 Ag-Au(7.0 at.%), Ag-Sb(1.1 at.%), 그리고 Ag-Mg(0.3 at.%) (이하, 각각 AgAu, AgSb, 그리고 AgMg라 함)로 제조하였다. 제조된 Ag와 Ag합금은 압출공정을 통해 튜브형태로 가공 후 질소(N_2) 분위기에서 8시간동안 소둔처리 하였다.

$Bi_{1.8}Pb_{0.4}Sr_2Ca_{2.2}Cu_3O_x$ (BSCCO) 조성을 가지는 초전도 분말을 고상소결법으로 제조하여 PIT [4]공정에 의해 37심 다심선재를 제작하였다. Ag와 Ag합금을 내부와 외부 피복재료로 달리 조합하여 여러 종류의 다심선재를 제조하고, 각각의 Ag합금과 다심선재의 특성을 평가하였다. 본 실험에서는 7종의 시편을 서로 다른 피복재료를 사용하여 내부와 외부 피복재료가 각

각, Ag와 Ag, AgAu와 AgAu, Ag와 AgSb, AgSb와 Ag, AgSb와 AgAu, AgAu와 AgSb, 그리고 AgAu와 AgMg (이하, Ag-Ag, Ag-AgAu, ...라 함)로 하여 제조하였다. 선재는 최종두께 0.3 mm, 폭 2.8 mm로 제조하여 대기분위기, 840°C에서 50시간 소결처리 하였다. Ag와 Ag합금, 그리고 BSCCO 선재의 열전도도 측정은 thermal integral법을 사용하였으며 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$Q = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} k dT \quad (1)$$

Q는 시편에 가해진 열량(W), A는 시편의 단면적 (m^2), L은 시편의 길이 (m), k는 시편의 열전도도 ($W/(m \cdot K)$)를 나타낸다.

시편의 열전도도는 냉동기 (CTI Model 350)를

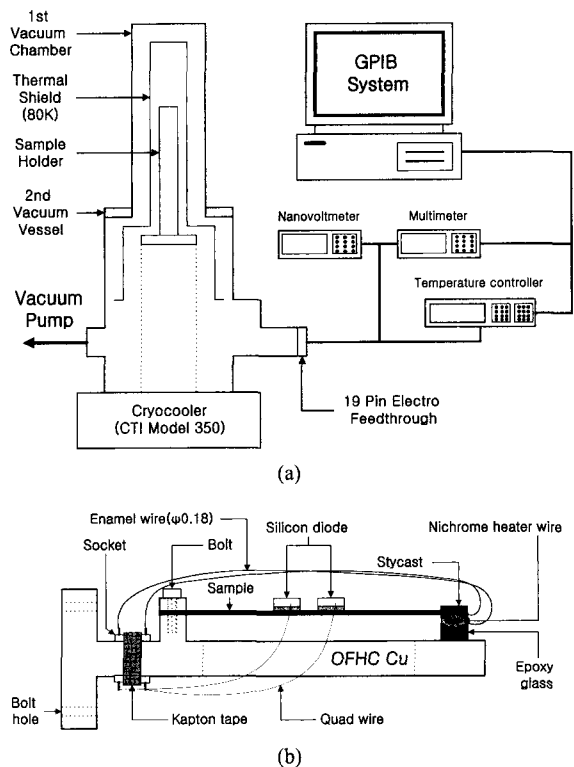


Fig. 1. Schematics of (a) thermal conductivity measurement system and (b) sample holder, sample, diode, heater, and their connections

사용하여 Fig. 1과 같이 챔버내 무산소동(OHFC) 홀더에 시편을 부착시켜 10~120 K에서 측정하였으며, 시편에 가해주는 열이 전량 시편에 전달되도록 10^{-6} torr의 진공도를 유지하고, 히터와 시편홀더 사이에 에폭시 글라스를 설치하여 홀더쪽에서의 열 출입을 최소화 하였다. 냉동기를 이용하여 챔버내 홀더를 약 10 K까지 냉각시킨 후 시편의 온도구배 (ΔT)가 1 K이하로 유지되도록 하고 10~120 K범위에서 약 20개의 온도구간으로 세분하여 측정하였으며, Ag와 Ag합금의 전기전도도 측정은 상온(300 K)과 10~120 K에서 4단자법을 사용하였다.

III. Results and Discussion

Ag와 Ag합금의 10~120 K에서 측정된 열전도도를 Fig. 2에 나타내었다. Ag의 경우 열전도도는 120 K에서 80 K까지는 온도 감소에 따라 거의 일정한 값을 가지다가 온도가 더 낮아짐에 따라 그 값이 증가하기 시작하여 대략 15 K부근에서 4942.0 W/(m·K)의 최고값을 보이며, 이후 온도가 더 낮아짐에 따라 10 K에서는 약간 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 일반적인 순수한 금속의 저온에서의 거동과 일치하며, 저온에서 열전도도가 증가하는 현상은 시편의 비열, 자유전자의 평균자유행로와 격자진

동에 기인한 것으로 사료된다[5].

반면에 Ag합금의 경우는 Ag에 비해 낮은 열전도도를 가지며, 이것은 Ag기지내에 부분적으로 합금원소가 고용되어 있거나, 또는 하나의 독립된 상으로 존재하여 자유전자의 평균자유행로와 격자진동을 감소시키는 것과 관련이 있다. 온도가 낮아짐에 따라 Ag합금은 저온에서 순수한 Ag와는 달리 포물선 형태가 아닌 단조감소의 경향을 보이며 열전도도는 더욱 감소하는 것으로 나타났다. 40 K에서 AgMg, AgSb, 그리고 AgAu의 열전도도는 각각 411.4, 142.3, 그리고 109.7 W/(m·K)로 측정되었고, 이는 Ag (1004.6 W/(m·K))에 비하여 대략 2~9배 낮은 값이다. 일반적으로, 합금원소의 첨가량 증가에 따라 열전도도는 감소하지만, AgSb와 AgAu의 경우 Sb (1.1 at.%)는 Au (7.0 at.%)에 비해 매우 작은 양을 포함함에도 불구하고 열전도도는 서로 비슷한 값을 나타낸다. 그러므로 Ag합금에 있어서 Au보다 Sb합금원소가 열전도도를 효과적으로 감소시킴을 알 수 있다.

Ag와 Ag합금의 10~120 K사이에서 측정된 전기전도도를 Fig. 3에 나타내었다. Ag의 상온과 40 K에서 측정된 전기전도도는 각각 0.62와 $8.13 \mu\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 이고, 이는 문헌상의 값($0.63 \mu\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ at 300 K)[6]과 거의 일치한다. Ag합금의 300 K와 40 K에서 측정치는 각각 0.21~0.41 과 $0.40\sim 3.25 \mu\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 을 나타내었으며, Ag와 Ag합

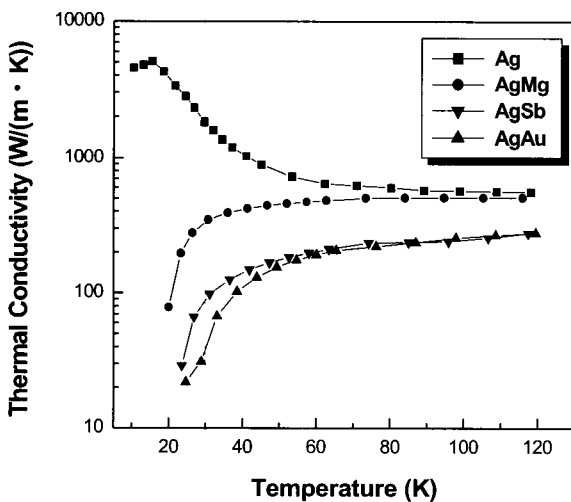


Fig. 2. Thermal conductivity of Ag and Ag alloys from 10 to 120 K measured by direct method.

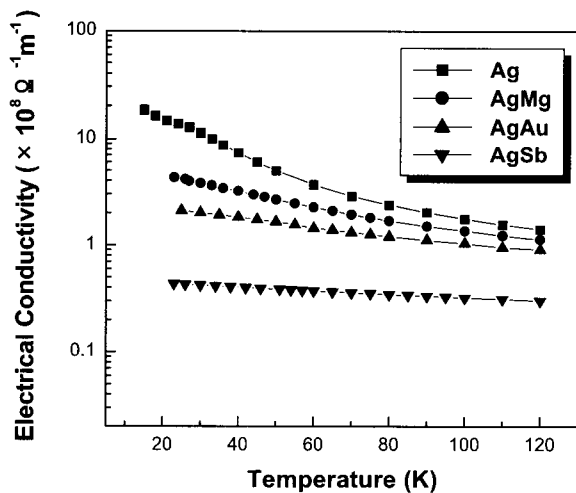


Fig. 3. Electrical conductivity of Ag and Ag alloys from 10 to 120 K measured by four-probe method.

금 모두 온도가 낮아짐에 따라 전기전도도가 증가함을 알 수 있다. 또한, Ag합금의 전기전도도는 Ag에 대해 수 배 낮은 값을 가지며 이러한 결과는 Wiedemann-Franz 법칙과 마찬가지로 전기전도도와 열전도도가 상호간에 관계가 있음을 보여준다.

Fig. 4는 온도에 따른 다양한 조성의 피복재료로 구성된 선재의 열전도도 변화를 나타내고 있다. Ag-Ag선재의 열전도도는 전 온도구간에서 가장 높은 값을 나타내고 온도감소에 따라 뚜렷하게 증가하는 경향을 보이며, 40 K에서 측정된 열전도도는 889.6 W/(m·K)이다. 반면에, Ag합금 선재는 전구간에 걸쳐 낮은 열전도도를 가지며 AgSb-Ag, Ag-AgSb, AgAu-AgMg, AgAu-AgSb, AgSb-AgAu, 그리고 AgAu-AgAu 시편의 순서대로 열전도도가 감소하는 경향을 보인다. 40 K에서 측정된 열전도도는 각각 783.7, 465.9, 162.7, 125.3, 114.8, 그리고 49.5 W/(m·K)이다. 이와 같은 결과는 선재의 열전도도가 피복재료에 상당히 의존하고 있음을 나타낸다. 또한 내부와 외부 피복재 모두가 Ag합금으로 만들어진 선재가 Ag-Ag선재보다 상당히 낮은(5~18배 낮은) 열전도도를 가지므로 Ag합금 피복재료로 구성된 초전도 선재를 적층형 전류인입선에 적용하면 낮은 열전도도로 인해 효과적으로 액체헬륨의 손실을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

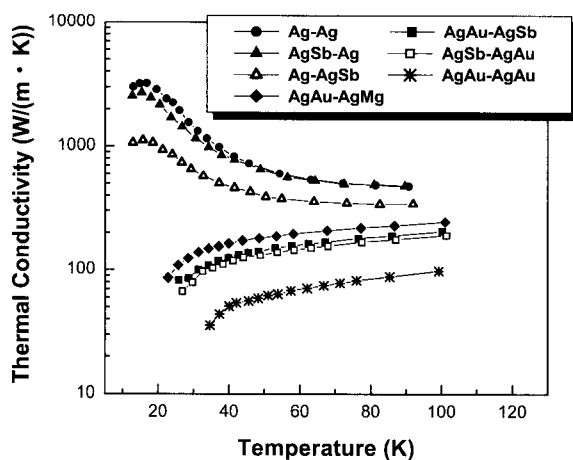


Fig. 4. Thermal conductivity of Ag and Ag alloyed tapes from 10 to 120 K measured by direct method.

IV. Conclusions

Bi-2223 초전도 선재에서 피복재료의 합금원소 첨가에 따른 열전도도와 전기전도도를 평가하였다. 합금원소의 첨가로 열전도도가 감소하였으며, 40 K에서 AgMg, AgSb, 그리고 AgAu 합금의 열전도도는 각각 411.4, 142.3, 그리고 109.7 W/(m·K)로 측정되었고, 이는 Ag(1004.6 W/(m·K))에 비하여 약 2~9배 낮은 값이다. 또한 Ag합금을 내부와 외부 피복재료 하여 제조한 선재는 Ag-Ag선재보다 상당히 낮은(5~18배) 열전도도를 갖는 것으로 나타났다. 그러므로 Ag합금 피복재료로 구성된 초전도 선재를 전류인입선에 적용하면 효과적으로 냉매손실을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgments

본 연구의 열전도도 측정에 많은 조언과 도움을 주신 경원메디칼 박형상 연구원께 감사드립니다.

References

- [1] R. Zeng *et al.*, "Fabrication and properties of some Ag-alloy sheathed Bi-2223 tapes," *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 9, 2710-2713 (1999).
- [2] T. W. Kim, J. Joo, W. Nah, J. Yoo, and S. H. Lee "Development and characterization of sheath alloys for Bi-(Pb)-Sr-Ca-Cu-O superconductor tape," *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 10, 1186-1189 (2000).
- [3] *Smithells Metals Reference Book*, 7th Eds., E. A. Brandes, G. B. Brook, 11-1 Equilibrium diagrams, 1992.
- [4] W. G. Wang, H. K. Liu, and S. X. Dou, "Effect of sintering temperature on phase composition and J_c of Ag-sheathed Bi-2223 single and multifilamentary tapes," *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 7, 1 845-1848 (1997).
- [5] *Introduction to Solid State Physics*, 6th Eds., C. Kittel, John Wiley & Sons, Inc., 121 (1986).
- [6] *Metal Handbook*, 8th Eds., American Society for Metals, I 1982.