

## 합금원소 첨가에 따른 Ag 피복 Bi-2223 초전도 선재의 열전도도 측정 및 특성평가

### The Effects of Alloying-Element Additions to Ag Sheath on Thermal Conductivity and Properties of Bi-2223 Superconductor Tapes

장석현\*, 김정호\*, 임준형\*, 김규태\*, 주진호\*, 지봉기\*\*, John Slavko Volf\*\*\*, Hua Kun Liu\*\*\*, Miles Apperley\*\*\*\*  
(Seok Hern Jang\*, Jung Ho Kim\*, Jun Hyung Lim\*, Kyu Tae Kim\*, Jin Ho Joo\*, Bong Ki Ji\*\*, John Slavko Volf\*\*\*, Hua Kun Liu\*\*\*, and Miles Apperley\*\*\*\*)

#### Abstract

The effects of alloying-element additions to Ag sheath on thermal conductivity and mechanical properties of Bi-2223 superconductor tapes have been evaluated. In order to evaluate the effects of sheath alloys and their configuration on the properties of tape, various combinations of Ag and Ag alloys were selected as the inner and outer sheath. Thermal conductivity of the tapes was evaluated by using thermal integral method at 10~120 K.

It was observed that the addition of Mg, Sb, and Au to Ag sheath significantly decreased the thermal conductivity at low temperature probably due to the alloying effect. 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 thermal conductivities of constituent sheath materials. The mechanical properties of alloy-sheathed tapes were also evaluated. Yield strength and tensile strength were improved but workability decreased for alloy-sheathed tapes.

**Key Words** : Alloys, BSCCO tape, Mechanical strength, Thermal conductivity, Thermal integral method

#### 1. 서론

초전도 재료가 모터, 발전기, 변압기, 환류기, 송전선 등과 같은 다양한 전력기기에 응용되기 위해서는 우수한 특성의 초전도 선재가 개발되어야 하

며, 또한 초전도체와 초전도체, 초전도체와 전류인입선과의 연결기술이 확립되어야 한다. 이러한 초전도 시스템에는 냉매제인 액체헬륨의 소모가 최소화된 우수한 특성을 갖는 전류인입선이 요구되고 있다[1]. 최근에 Ag 피복 BSCCO 선재를 적용한 형태의 hybrid형 고온초전도 전류인입선이 제안되고 있으며 Cu-전류인입선에 비해 열손실을 약 1/5로 줄일 수 있는 것으로 보고되고 있다[2].

BSCCO 초전도 선재를 적용한 형태의 전류인입선은 벌크형태의 초전도 전류인입선에 비해 높은 임계전류밀도( $J_c$ )와 우수한 응력내구성(strain tolerance)을 갖는 장점이 있다. 뿐만 아니라 길이나 형태를 다양하게 제조할 수 있으므로 전류인입선으로의 응용에 적합한 것으로 보고되고 있다[3].

\* : 성균관대학교 금속재료공학부  
(경기도 수원시 장안구 천천동 300,  
Fax : 031-290-7371  
Corresponding Author : jinho@skku.edu)  
\*\* : 한국원자력연구소 원자력재료기술 개발부  
\*\*\* : Institute for Superconducting and Electronic Materials, University of Wollongong, Australia  
\*\*\*\* : Australian Superconductors, Engineering & Innovation Education Centre, Australia  
2003년 1월 13일 접수, 2003년 2월 3일 1차 심사완료,  
2003년 4월 2일 2차 심사완료

그러나 피복재료인 Ag는 높은 열전도도로 인해 냉매체인 액체헬륨의 소모를 촉진시키는 단점이 있으며, 또한 높은 전기전도도에 의한 와전류 손실을 야기할 수 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 피복재료의 열전도도와 전기전도도를 낮추어 주어야 하며 이는 Ag 기지에 소량의 합금원소를 첨가하여 줌으로써 해결할 수 있다. 또한, 피복재료를 합금화하면 선재의 기계적 강도도 향상될 것으로 기대된다[4,5].

새로운 합금을 제조할 때 고려하여야 할 중요한 요소로는 합금 제조가 용이해야 하고 초전도체와의 반응성이 적으며 초전도체의 전류밀도를 감소시키지 않아야 한다. 초전도 선재의 피복재료로서 많은 Ag 합금이 개발되고 있으나[6-8], 여러 가지 피복합금의 열적, 전기적 그리고 기계적 특성과 미세구조와의 상관관계에 대한 연구가 체계적으로 이루어지지 않는 상황이다.

본 연구에서는 Ag-Au, Ag-Sb, Ag-Mg 등의 Ag 합금을 제조하여 10~120 K에서의 열전도도를 평가하였고, Ag 합금들을 내부와 외부 피복재료 사용하여 다양한 피복합금의 구조를 갖는 37심 다심선재를 제작하고 열전도도와 전기전도도를 측정하였다. 또한 합금원소 첨가에 따른 미세조직의 변화와 기계적 강도를 평가하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 Ag 피복합금 BSCCO 다심선재 제조

피복합금을 제조하기 위하여 Ag(일본 고순도화학연구소, 99.99% chip)에 소량의 Au, Sb, 그리고 Mg 분말을 첨가하고 고주파유도로를 사용하여 합금을 제조하였다. 합금원소는 Ag의 고용한도[9] 보다 적은 양을 첨가하였으며, Ag 합금의 조성은 Ag-Au(7.0 at.%), Ag-Sb(1.1 at.%), 그리고 Ag-Mg(0.3 at.%) (이하, 각각 AgAu, AgSb, 그리고 AgMg라 함)이 되도록 제조하였다. 제조된 Ag와 Ag 합금은 압출공정으로 튜브형태로 가공 후 질소(N<sub>2</sub>) 분위기에서 8시간동안 소둔처리 하였다.

초전도 분말은 조성이 Bi<sub>1.8</sub>Pb<sub>0.4</sub>Sr<sub>2.0</sub>Ca<sub>2.2</sub>Cu<sub>3.0</sub>O<sub>10+δ</sub>가 되도록 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbO, SrCO<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub>, CuO 분말을 적당량 혼합하고 메탄올, ZrO<sub>2</sub> 불과 함께 혼합한 후 24 시간 ball mill 처리를 하였다. 분말을 건조, 미분쇄한 후 700~855℃, 대기 분위기에서 24 시간, 3 회 하소 처리를 하였으며 하소가 끝난 분말을 다시 대기 분위기에서 24 시간, 800℃로 탈기

처리를 하였다. 이 분말을 제조된 Ag와 Ag 합금 튜브(O.D.=10 mm, I.D.=8.5 mm)에 장입하여 충전시킨 후 스웨이징과 인발공정을 반복하여 최종직경이 1.7 mm가 되도록 하였다. 인발공정시 단면적 감소율은 10%이하로 유지하였다. 제조된 단심 BSCCO 초전도 wire를 육각형 다이를 사용하여 육각형의 단면을 가지는 선재로 가공하고 다시 Ag와 Ag 합금 튜브(O.D.=14 mm, I.D.=12 mm)에 37개의 육각형 선재를 삽입한 다음, 단면 감소율 10% 이하로 최종 직경 2.01 mm까지 인발한 후 압연하였다[10,11].

Ag와 Ag 합금을 내부와 외부 피복재료로 달리 조합하여 내부와 외부 피복재료가 각각, Ag와 Ag, AgAu와 AgAu, Ag와 AgSb, AgSb와 Ag, AgSb와 AgAu, AgAu와 AgSb, 그리고 AgAu와 AgMg로 달리하여 7종의 다심선재를 제조하였다(이하, 시편의 내부 피복재를 AgSb, 외부 피복재를 AgAu로 사용한 경우 AgSb-AgAu로 표기함). 선재는 최종두께 0.3 mm, 폭 2.8 mm의 다심선재로 제조하여 대기분위기, 840° C에서 50 시간 소결처리 하였다. 그림 1은 실험의 개략도이다.

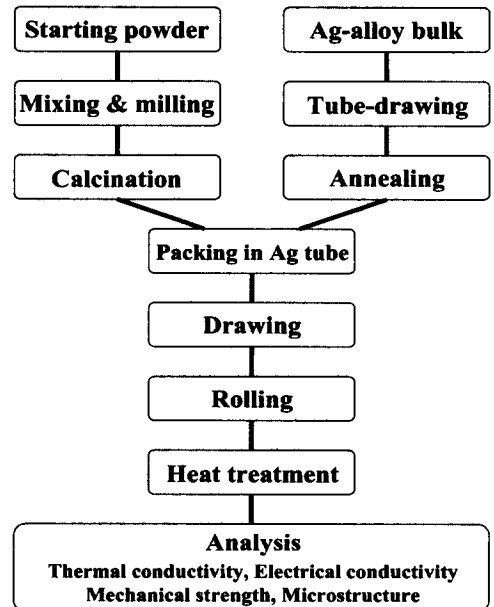


그림 1. 실험개략도.

Fig. 1. Flowchart of experimental procedure.

### 2.2 극저온 열전도도 측정 및 특성평가

Ag와 Ag 합금, 그리고 BSCCO 선재의 열전도

도는 식 (1)의 thermal integral법으로 측정하였다.

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

Q는 시편에 가해진 열량(W), A는 시편의 단면적(m<sup>2</sup>), L은 시편의 길이(m), k는 시편의 열전도도(W/(m·K))이다.

시편의 열전도도는 냉동기(CTI Model 350)를 사용하여 그림 2에서와 같이 chamber내 무산소동(OHFC) 홀더에 시편을 부착시켜 10~120 K의 온도범위에서 측정하였으며, 시편의 한쪽끝에 heater(Lake Shore사의 Nichrome Heater Wire-NC-32)를 stycast내에 함침하여 부착시켜 온도구배(ΔT)를 유도하였다. 또한 시편에 가해주는 열이 전량 시편에 전달되도록 10<sup>-6</sup> torr의 진공

도를 유지시키고, 히터와 시편홀더 사이에 에폭시 글라스(epoxy glass)를 설치하여 홀더 쪽으로의 열출입을 최소화하였다.

먼저 냉동기를 이용하여 chamber 내부를 약 10 K까지 냉각시킨 후 시편의 온도구배(ΔT)가 대략 1 K이내로 유지되도록 하였다. 시편의 온도구배 측정에 사용된 Si-diode(Lake Shore사의 DT-470)는 정확도가 0.05 K인 CU type의 diode (calibrated) 2개를 사용하여 측정하였으며, temperature controller(Lake Shore사의 Temperature-330)로 온도구배를 일정하게 조절하였다. 시편과 Si-diode는 GE-7031 저온용 접착제를 이용하여 시편에 부착시켰으며 10~120 K 범위에서 대략 20개의 온도구간으로 세분하여 열전도도를 측정하였다.

기계적특성 평가를 위해 인장시험기(Instron-5655)를 사용하였다. Ag와 Ag 합금의 전기전도도 측정은 상온(300 K)과 10~120 K에서 4단자법을 사용하였다. 미세구조 관찰은 OM(Optical Microscopy)과 SEM(Scanning Electron Microscopy)을 사용하였다.

### 3. 결과 및 토의

순수한 Ag와 Ag 합금을 10~120 K에서 측정된 열전도도를 그림 3에 나타내었다. 순수한 Ag의 경우 열전도도는 120 K에서 80 K까지는 온도가 감소함에 따라 거의 일정한 값을 가지다가 온도가 더 낮아짐에 따라 그 값이 증가하기 시작하여 대략 15 K 부근에서 4942.0 W/(m·K)의 최고값을 보이며, 이후 온도가 더 낮아짐에 따라 10 K에서는 약간 감소하는 경향을 보인다.

극저온으로 온도가 감소함에 따라 Ag의 열전도도가 증가하는 이러한 경향은 일반적인 순수한 금속에서 관찰되는 거동과 일치하며, 이는 시편의 비열, 자유전자의 평균자유행로와 격자진동에 기인한다[12]. 반면에, Ag 합금의 경우는 순수한 Ag에 비해 낮은 열전도도를 가지며, Ag 기지내에 부분적으로 합금원소가 고용되어 있거나, 또는 하나의 독립된 상으로 존재하여 자유전자의 평균자유행로와 격자진동을 감소시키는 것과 관련이 있는 것으로 사료된다. 온도가 감소함에 따라 열전도도는 더욱 감소하여 Ag 합금은 저온에서 순수한 Ag와는 달리 포물선 형태가 아닌 단조감소의 경향을 보인다. 40 K에서 AgMg, AgSb, AgAu의 열전도도는

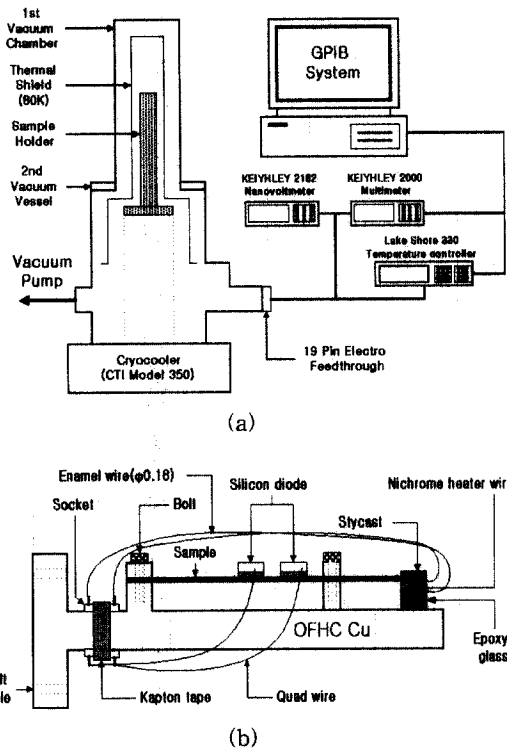


그림 2. (a) 열전도도 측정장치와 (b) 시편홀더, 시편, 다이오드, 히터의 연결부 개략도.

Fig. 2. Schematics of (a) thermal conductivity measurement system and (b) sample holder, sample, diode, heater and their connections.

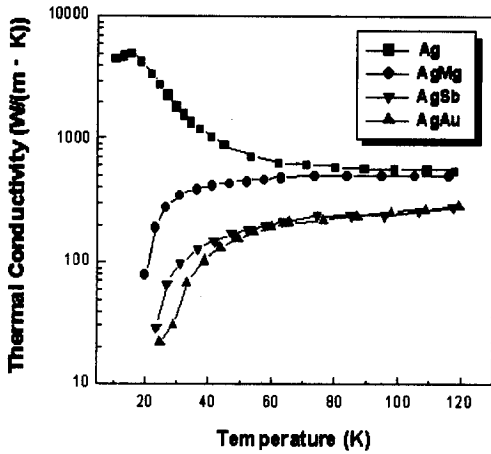


그림 3. 10~120 K에서의 Ag와 Ag 합금의 열전도도값.

Fig. 3. Thermal conductivity of Ag and Ag alloys from 10 to 120 K.

각각 411.4, 142.3, 그리고 109.7 W/(m·K)로 측정되었고, 이는 Ag의 열전도도값 (1004.6 W/(m·K))에 비하여 대략 2~9배 낮은 값이다.

일반적으로 합금원소의 양이 증가됨에 따라 열전도도가 감소할 것으로 예상되나 AgSb와 AgAu 합금의 경우 Sb (1.1 at.%)는 Au (7.0 at.%)에 비해 매우 적은 양을 포함함에도 불구하고 열전도도는 서로 비슷한 값을 나타낸다. 그러므로 Ag 합금에 있어 Au보다 Sb의 합금원소가 열전도도를 감소시키는데 더 효과적으로 작용함을 알 수 있었다.

Ag와 Ag 합금의 전기전도도를 상온(300 K)과 10~120 K의 온도범위에서 측정하였으며 그림 4에 나타내었다. 순수한 Ag에서 상온(300 K)과 40 K에서 측정된 전기전도도는  $0.62$ 와  $8.13 \mu\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  이고, 이는 문헌상의 값( $0.63 \mu\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  at 300 K) [13]과 거의 일치한다.

Ag 합금의 상온(300 K)과 40 K에서 측정된 전기전도도는 각각  $0.21\sim 0.41$ 과  $0.40\sim 3.25 \mu\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  을 나타내었으며, 일반적으로 예상할 수 있듯이 Ag와 Ag 합금 모두 온도가 낮아짐에 따라 전기전도도가 증가함을 알 수 있다. 상온(300 K)에서 측정된 Ag 합금의 전기전도도는 Ag에 대해 약 1.5~3배 가량 낮은 값을 가진다. 이러한 결과는 Wiedermann-Franz 법칙에 의해 전기전도도와 열전도도가 상호간에 어느 정도 관계가 있음을 보여준다.

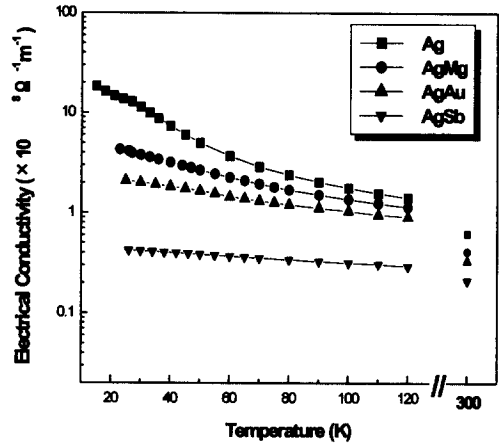


그림 4. 10~120 K에서의 Ag와 Ag 합금의 전기전도도 값.

Fig. 4. Electrical conductivity of Ag and Ag alloys from 10 to 120 K.

초전도 선재의 열전도도에 합금피복재가 미치는 영향을 평가하기 위해 Ag와 Ag 합금을 내부와 외부 피복재로 하여 다양한 조합으로 BSCCO 다심 선재를 제조하였다. 그림 5는 온도에 따른 이들 선재의 열전도도 변화를 보여주며, Ag (inner)-Ag(outer sheath) 시편은 내부와 외부 피복재를 모두 Ag로 하여 제조한 선재로써 Ag 합금 선재의 열전도도와 비교하기 위한 기준 시편으로 사용하였다. Ag-Ag 선재의 경우 전 온도구간에서 가장 높은 열전도도 값을 나타내고 온도감소에 따라 뚜렷하게 증가하는 경향을 보인다. 40 K에서 측정된 Ag-Ag 선재의 열전도도는  $889.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 이다.

반면에, Ag 합금 선재는 전구간에 걸쳐 Ag-Ag 선재에 비하여 상대적으로 낮은 열전도도를 가지며, 온도감소에 따라 저온에서 상승하는 효과가 감소하거나 소멸되는 경향을 보인다. AgSb-Ag, Ag-AgSb, AgAu-AgMg, AgAu-AgSb, AgSb-AgAu, AgAu-AgAu 시편의 순서대로 열전도도가 감소하는 경향을 보인다. 40 K에서 측정된 이들 시편의 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 Ag 합금으로 만들어진 선재가 Ag-Ag 선재보다 낮은(5~18배 낮은) 열전도도를 가지므로

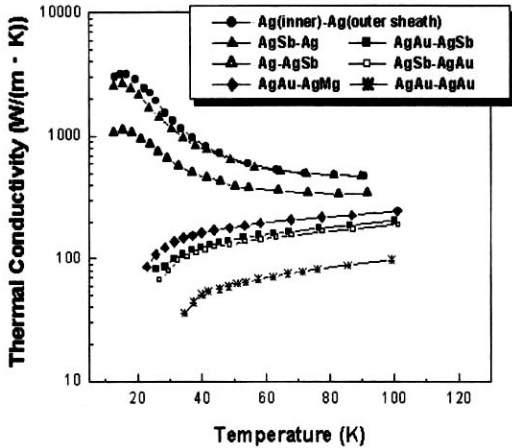


그림 5. 10~120 K에서의 Ag와 Ag 합금 피복선재의 열전도도값.

Fig. 5. Thermal conductivity of Ag and Ag alloyed tapes from 10 to 120 K.

Ag 합금 피복재로 구성된 초전도 선재를 적층형 전류인입선에 적용하면 낮은 열전도도로 인해 효과적으로 액체헬륨의 손실을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

초전도 선재는 간단한 구조를 가지며, 피복재와 선재의 길이방향으로 평행하게 열유동이 일어난다고 가정하면 각각의 피복재와 초전도심(core)에서 측정된 열전도도와 단면적 비로부터 선재의 열전도도를 계산할 수 있다. 즉, 선재의 열전도도는 혼합규칙에 따른다고 가정하고 다음과 같이 계산할 수 있다[14].

$$k_t = k_{BSCCO} \cdot f_{BSCCO} + k_{is} \cdot f_{is} + k_{os} \cdot f_{os} \quad (2)$$

식 (2)에서  $k_t$ ,  $k_{BSCCO}$ ,  $k_{is}$ ,  $k_{os}$  는 각각 선재전체, BSCCO 코어, 내부 피복재, 그리고 외부 피복재의 열전도도를 나타내고,  $f$ 는 각각의 단면적분율이다. 미세조직 관찰결과 선재의 전체 단면적에서 BSCCO 코어, 내부 피복재, 외부 피복재가 차지하는 단면적 분율은 각각 0.28, 0.36, 그리고 0.36으로 측정되었으며 계산된 선재의 열전도도를 그림 6에 나타내었다. 그림에 Ag와 BSCCO 벌크의 열전도도[15]를 비교용으로 삽입하였고, 내부 피복재와 외부 피복재의 단면적이 같기 때문에 AgSb-Ag와 Ag-AgSb, 그리고 AgAu-AgSb와 AgSb-AgAu는 각각 동일한 열전도도로 계산되었다.

계산된 선재의 열전도도는 실제 측정치와 유사한 경향을 보이고 있으며, 40 K에서의 계산된 Ag-Ag, AgSb-Ag, AgAu-AgMg, AgAu-AgSb, AgAu-AgAu 선재의 열전도도는 각각 707.3, 404.2, 185.7, 89.8, 그리고 78.3 W/(m·K) 를 가진다. 이는 실제 측정된 값과 비교하여 대략 13~58%의 차이 값을 나타내고 있다. 이러한 오차는 sausage 효과에 의한 계면의 불균일성, silicon diode 사이의 온도구배( $\Delta T$ )에 의한 측정방법의 한계, stycast, epoxy glass, vanish 등의 접착 및 절연물질에 따른 미세한 열전달에 의한 것으로 사료된다.

Fujishiro의 연구[14]에 의하면 합금원소의 첨가 분율이 각각 다른 Ag-Au 피복합금 선재에서 피복재와 BSCCO 코어의 열전도도에 혼합규칙을 응용할 수 있다는 것을 보여주었다. 본 실험에서의 결과와 Fujishiro의 결과로부터 다양한 단면적비와 여러 종류의 피복재료의 특성만을 가지고 BSCCO 선재의 열전도도의 추측이 가능하다는 것을 알 수 있다. 그러므로, 단순한 형태를 가지면서 넓은 온도 구배를 보이는 전류인입선이나 송전선의 연결 부등을 설계할 때 선재의 열전도도 계산을 통하여 열유동을 효과적으로 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

Ag와 Ag 합금 피복선재의 항복강도와 인장강

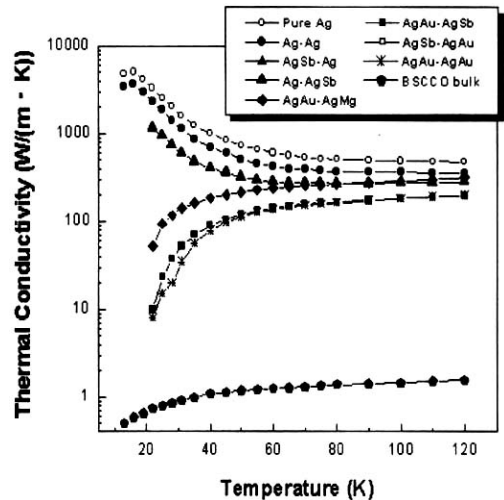


그림 6. 10~120 K에서 Ag와 Ag 합금 피복선재의 계산된 열전도도 값.

Fig. 6. Calculated thermal conductivity of Ag and Ag alloyed tapes from 10 to 120 K.

도를 stress-strain 곡선으로부터 측정하여 표 1에 나타내었다. Ag-Ag 선재의 항복강도와 인장강도는 각각 34.5 와 44.2 MPa로 측정되었고, 연신율은 11.0으로 평가되었다. AgAu-AgAu, AgAu-AgSb, AgAu-AgMg 합금선재에서는 항복강도값이 40.2, 54.3, 91.7 MPa, 인장강도값은 49.9, 68.5, 98.9 MPa로 Ag-Ag 선재에 비하여 강도값이 증가하였다. 반면에 합금선재에서 연신율은 10.8~5.9로 측정되어 피복재료의 합금화로 인해 기계적 강도값은 향상되나 가공성은 감소함을 알 수 있었다. 이는 Ag 합금내의 합금원소에 의해 고용강화(solid solution hardening)나 입자강화(grain size strengthening) 등의 강화기구와 연관이 있을 것으로 사료된다.

여러 가지 합금원소 첨가에 따른 외부 피복재의 입자크기와 미세구조를 그림 7에 나타내었다. 사진에서 보는 바와 같이 Ag와 Ag 합금 모두 소성가공에 의해 변형을 받았음에도 불구하고 결정립의 모양은 거의 등축(equi-axes)상태를 유지하고 있다. Ag의 경우 결정립 크기가 48.0  $\mu\text{m}$ 이고, AgAu, AgSb, AgMg 피복재의 경우는 각각 29.3, 2.6, 그리고 3.9  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. Sb와 Mg의 경우 Au에 비해 상대적으로 적은 양이 첨가되었음에도 불구하고 AgSb와 AgMg 피복재의 결정립 크기가 AgAu에 비해 상당히 작게 관찰되었다. 이것은 Ag 기지내의 Au보다 Sb와 Mg의 합금원소가 더욱 결정립 성장을 제한한다는 것을 나타낸다.

특히 Mg의 첨가효과에 대한 관련 연구[8]에 의하면 AgMg 합금내에서 결정립 크기가 감소한 것은 고용된 Mg 원소가 열처리 과정동안에 내부 확산에 의해 MgO 상으로 형성되어 결정립성장(grain growth)을 억제하는 것으로 보고되고 있다.

표 1. 열처리 된 Ag와 Ag 합금 피복선재의 항복강도, 최대인장강도 및 연신율.

Table 1. Variations of yield strength, ultimate tensile strength and elongation of Ag and Ag alloy sheathed BSCCO tapes after annealing.

Specimens	Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Ag-Ag	34.5	44.2	11.0
AgAu-AgAu	40.2	49.9	10.8
AgAu-AgSb	54.3	68.5	10.7
AgAu-AgMg	91.7	98.9	5.9

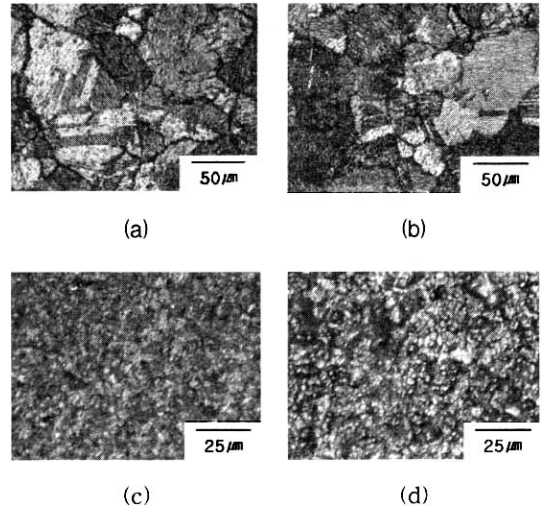


그림 7. 열처리 된 (a) Ag, (b) AgAu, (c) AgSb, (d) AgMg의 미세조직.

Fig. 7. Optical photographs showing the microstructure of (a) Ag, (b) AgAu, (c) AgSb and (d) AgMg after annealing.

그러므로 Ag 합금에서 유도된 작은 결정립 크기는 Ag-Ag 선재보다 Ag 합금 피복선재에서 더욱 높은 강도값을 갖는 강화기구중 하나임을 알 수 있다.

#### 4. 결론

BSCCO 초전도 선재의 열전도도와 기계적 특성에 대한 피복재료의 합금원소 첨가효과를 평가하였다. 합금원소의 첨가로 열전도도가 감소하였으며, 40 K에서 측정된 AgMg, AgSb, AgAu 합금의 열전도도는 각각 411.4, 142.3, 그리고 109.7 W/(m·K)로 측정되었고, 이는 Ag (1004.6 W/(m·K))의 약 2~9배 낮은 값이다.

Ag와 Ag 합금을 내부와 외부 피복재로 하여 다양한 조합으로 제조된 BSCCO 다심선재에서 열전도도는 피복합금 재료의 종류에 상당히 의존하는 것으로 평가되었다. 선재를 구성하는 각각의 피복재와 코어의 측정된 열전도도로부터 선재의 열전도도를 계산할 수 있으며, 계산값과 측정값이 13~58%의 차이를 보였다. Ag 합금 피복선재에서는 첨가원소의 강화 효과에 의하여 기계적 강도가

향상되었으며 반면에 연신율은 감소하는 것으로 평가되었다.

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

- [1] 두호익, 임성우, 홍세은, 윤기웅, 한병성, “적층형 고온초전도 전류도입선의 열 특성 해석”, 한국전기전자재료학회 2001하계학술대회 논문집, p. 628, 2001.
- [2] S. Yang, B. Chen, E. E. Hellstrom, E. Stiers, and J. M. Pfothner, “Thermal conductivity and contact conductance of BSCCO-2212 material”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 5, No. 2, p. 1471, 1999.
- [3] S. Y. Seal, J. R. Hull, and M. -C. Chyu, “Transient analysis and burnout of high temperature superconducting current leads”, Appl. Supercon. Conf., 16-21, 1994.
- [4] 김태우, 주진호, 나완수, 유재무, 이상현, “Bi-(Pb)-Sr-Ca-Cu-O 고온초전도 선재용 피복합금개발 및 특성평가”, 한국전기전자재료학회지, 12권, 8호, p. 724, 1999.
- [5] 박형상, 지봉기, 김중석, 임준형, 오승진, 주진호, 나완수, 유재무, 이상현, “고온초전도 선재용 피복합금의 열전도도 측정 및 특성평가”, 한국전기전자재료학회지, 13권, 8호, p. 711, 2000.
- [6] R. Zeng, Y. C. Guo, Y. Tanaka, J. Horvat, M. Ionescu, T. P. Beales, M. Apperley, H. K. Liu, and S. X. Dou, “Fabrication and properties of some Ag-alloy sheathed Bi-2223 tapes”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 9, No. 2, p. 2710, 1999.
- [7] 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., Vol. 10, No. 1, p. 1186, 2000.
- [8] J. Yoo, H. Chung, J. Ko, and H. Lim, “Effect of Au and Mg addition to Ag sheath on microstructure and superconducting properties of BSCCO-2223 tapes”, Physica C, Vol. 269, p. 109, 1996.
- [9] E. A. Brandes and G. B. Brook, “Smithells Metals Reference Book”, 7th Eds., 11-1 Equilibrium diagrams, 1992.
- [10] 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., Vol. 7, No. 2, p. 1845, 1997.
- [11] J. H. Kim and J. Joo, “Fabrication and characterization of the joining of Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O superconductor tape”, Supercond. Sci. Technol., Vol. 13, p. 237, 2000.
- [12] C. Kittel, “Introduction to Solid State Physics”, 6th Eds., John Wiley & Sons, Inc., p. 121, 1986.
- [13] American Society for Metals, “Metal Handbook”, 8th Eds., I 1982.
- [14] H. Fujishiro, M. Ikebe, K. Noto, and M. Matsukawa, “Low thermal conductive Bi-2223 tapes sheathed with Ag-Au alloys”, IEEE Trans. Magnets, Vol. 30, No. 4, p. 1645, 1994.
- [15] M. Putti, M. R. Cimberle, C. Ferdeghini, G. Grasso, A. Manca, and W. Goldacker, “Study of Bi(2223) tapes with low thermal conductivity”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 11, No. 1, p. 3285, 2001.