

## 고온초전도 선재용 피복합금의 열전도도 측정 및 특성평가

### Thermal conductivity and properties of sheath alloys for High- $T_c$ superconductor tape

박형상\*, 지봉기\*, 김종석\*, 임준형\*, 오승진\*, 주진호\*, 나완수\*\*, 유재무\*\*\*, 이상현\*\*\*\*  
Hyung Sang Park\*, Bong Ki Ji\*, Joong Seok Kim\*, Jun Hyung Lim\*, Seung Jin Oh\*, Jinho Joo\*, Wansoo Nah\*\*, Jaimoo Yoo\*\*\*, and Sang-Hyun Lee\*\*\*\*

#### Abstract

Effect of alloying element additions to Ag on thermal conductivity, electrical conductivity and mechanical properties of sheath materials for BSCCO tapes has been characterized. The thermal conductivity at low temperature range (10~300 K) of Ag and Ag alloys were evaluated by both direct and indirect measurement techniques and compared with each other.

It was observed that thermal conductivity decreased with increasing the content of alloying elements such as Au, Pd and Mg. Thermal conductivity of pure Ag at 30 K was measured to be 994.0 W/m·K, on the other hand, the corresponding values of  $Ag_{0.9995}Mg_{0.0005}$ ,  $Ag_{0.974}Au_{0.025}Mg_{0.001}$ ,  $Ag_{0.973}Au_{0.025}Mg_{0.002}$ , and  $Ag_{0.92}Pd_{0.06}Mg_{0.02}$  were 342.6, 62.1, 59.2, 28.9 W/m·K, respectively, indicating 3 to 30 times lower than that of pure Ag. In addition, alloying element additions to Ag improved mechanical strength, while reduced elongation probably due to the strengthening mechanisms by the presence of additive atoms.

**Keywords(중요용어)** : alloy, current lead, mechanical strength, strengthening mechanism, superconductor tape, thermal conductivity

#### 1. 서 론

초전도체의 우수한 특성을 이용하여 다양한 전력기기(초전도한류기(이하 '초전도' 생략), 모터, 발전기, 에너지저장장치, 변압기, 송전선 등)에 응용하기 위해서는 초전도체와 전원을 연결시켜주는 전류인입선의 개발이 필수적이다. 일반적으로 사용되고 있는

전류인입선에서 구리나 황동은 초전도 전력기기를 가동하기 위해 필요한 수백에서 수만 Ampere의 대용량 전류를 공급하기 어렵고 높은 열전도도에 의한 열방출로 냉매제 소모의 원인이 된다. 따라서 낮은 열전도도와 높은 전기전도도를 갖는 고온 초전도 재료를 hybrid형 전류 인입선으로 사용하면 Cu-전류 인입선에 비해 열손실을 약 1/5로 줄일 수 있는 것으로 보고되고 있다[1].

초전도 전류인입선은 일반적으로 bulk 형태의 고온 초전도체를 이용하는 방법과 tape 형태의 Bi-base 고온 초전도 선재를 적층하여 사용하는 방법이 있다 [2]. 전자의 방법은 취성의 특성을 가진 초전도체를 이용하기 때문에 기계적 응력이나 충격에 취약하다. 반면에 후자의 경우 연성의 피복재료(Ag) 내부에 초

\* : 성균관대학교 금속재료공학부  
(경기도 수원시 장안구 천천동 300  
Fax : 0331-290-7371,  
E-mail : Jinho@skku.ac.kr)

\*\* : 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학부

\*\*\* : 한국기계연구원

\*\*\*\* : 한국표준과학연구원

2000년 5월 22일 접수, 2000년 8월 9일 심사완료

전도 filament가 존재하므로 기계적인 충격이나 열적인 충격에 대한 내성이 우수하다. 또한 선재의 적층수에 따라 임계전류가 비례하기 때문에 전체 임계전류의 조절이 용이하며, 길이나 모양을 다양하게 제조할 수 있는 잇점이 있다. 그러나 피복재료인 은(Ag)은 열전도도가 높아 냉매제의 소모를 촉진시킬 수 있는 단점이 있다. 그러므로 Bi-base 고온 초전도선재가 효율적으로 전류인입선에 사용되기 위해서는 피복재료의 열전도도가 낮아야 한다. 또한 제조 및 사용 중에 외부 응력에 의해 야기되는 손상을 최소화하기 위해 기계적인 특성이 우수하여야 한다.

피복재료의 열전도도를 감소시키고 동시에 기계적인 특성을 향상시키기 위한 방안으로는 Ag를 사용하지 않는 피복재료를 개발하는 방법과 Ag에 소량의 이종 금속을 첨가하여 합금(alloy)을 개발하는 방법이 있다. 그러나 초전도상과의 낮은 반응성, 화학적 안정성, 높은 산소투과율 및 가공성[3] 등의 사항을 고려해야 하므로 새로운 Ag-base 피복합금을 개발하는 방법이 활발히 연구중이다. 새로운 합금을 제조할 때 중요한 요소로서는 합금을 제조하기 용이해야 하고 초전도체와 반응성이 적으며 초전도체의 전류밀도를 감소시키지 않아야 한다. 현재 개발되고 연구 중인 Ag 합금으로는 Ag-Mg[4-6], Ag-Au[7-9], Ag-Cu[10,11], Ag-Ni[12], Ag-Al[13] 등의 2원계 합금과 Ag-Mg-Ni[14,15], Ag-Pd-Mg[16], Ag-Au-Mg[4,7] 등의 3원계 합금이 유망한 피복재료로 보고되고 있다. 그러나 이들 합금의 전기적, 기계적 특성과 함께 특히 저온에서 열전도도 특성은 총체적으로 연구되지 않고 있다. 그러므로 본 실험에서는 Mg, Au, Pd 등의 원소를 선택하여 Ag-Mg, Ag-Au-Mg, Ag-Pd-Mg의 조성을 가진 합금을 제조하고 이 합금의 저온영역에서의 열전도도와 기계적인 특성을 평가하였다. 특히 제조된 Ag 합금의 극저온 부분에서 열전도도값을 정확하게 측정하기 위하여 thermal integral 방법으로 10~100 K까지의 열전도도를 측정하고 이 실험값의 정확도를 평가하기 위해 밀도, 비열, 열확산도를 이용하여 77~300 K까지의 열전도도를 간접적으로 측정하여 비교하였다.

2. 실험 방법

순도 99.99%의 Ag에 Au, Pd, Mg를 소량 첨가하여  $Ag_{0.9995}Mg_{0.0005}$ ,  $Ag_{0.974}Au_{0.025}Mg_{0.001}$ ,  $Ag_{0.973}Au_{0.025}Mg_{0.002}$ ,  $Ag_{0.92}Pd_{0.06}Mg_{0.02}$ 의 조성(at.%)을 가진 4종류의 합금을 고주파 유도로를 이용하여 시편을 제조하였다. 제조된 disc 형태(직경 = 10 mm, 두께 = 2 mm)의 Ag 합금을 tape 형태로 제조하기 위해 press와

압연기를 이용하여 길이 80 mm, 폭 6 mm, 두께 0.2 mm인 tape으로 제조하였다. Ag의 합금은 BSCCO-2223 초전도체의 소결조건 (840°C 50 hr, in air)과 동일하게 열처리를 하였다.

Ag 합금의 열전도도는 thermal integral 방법을 이용한 직접측정법과 밀도, 비열, 열확산도를 측정하고 이를 이용하여 계산한 간접측정법을 이용하였다. 직접측정법에서는 강제형 냉각 방식을 이용하였으며 냉동기(CTI Model 350)에서 heater를 이용하여 온도를 가변시키면서 10~100 K 범위에서 열전도도를 측정하였다(그림 1 참조). 시편은 무산소동(OFHC) holder에 부착시키고 다른 반대쪽 끝에 heater(Lake Shore사의 Nichrome Heater wire-NC-32)를 부착시켜 온도구배( $\Delta T$ )를 유도하였다(그림 2 참조). Heater에서 발생된 열이 전량 시편에 전달되도록  $10^{-6}$  torr 정도의 진공도를 유지시켰으며, heater와 무산소동 holder사이에 epoxy glass를 설치하여 holder 쪽으로 열출입을 차단하고자 하였다.

온도측정에 사용된 Si-diode(LakeShore사의 DT-470, 471)는 정확도가  $\pm 0.05$  K인 CU type의 diode 2개(calibrated)와 정확도가  $\pm 0.5$  K인 SD type의 diode 1개를 사용하여 측정하였으며, temperature controller(LakeShore사의 Temperature-330)로 온도구배를 일정하게 조절하였다. 시편과 diode는 GE7031 Varnish를 이용하여 부착시켰고, diode 사이의 간격을 4, 6, 10 mm로 달리하여 동시에 시편의 3구간으로부터 온도구배를 각각 측정할 수 있게 하였다. 먼저 냉동기를 이용하여 시편 전체를 약 10 K까지 냉

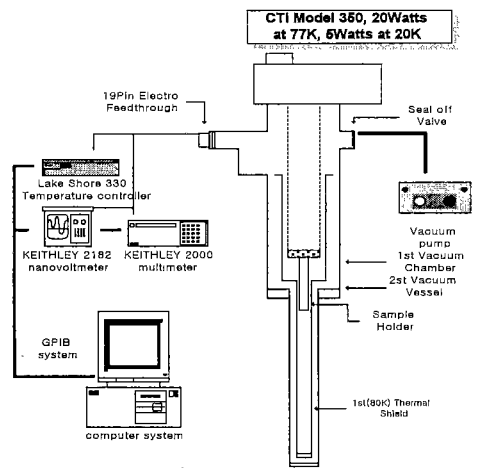


그림 1. 열전도도 측정장치의 개략도  
Fig. 1. The schematic illustration of thermal conductivity measurement system

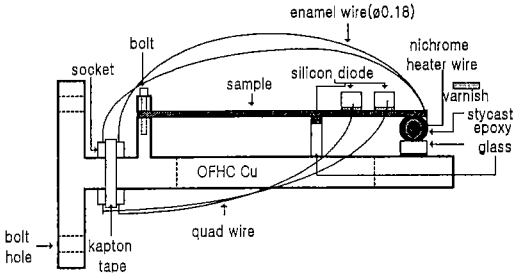


그림 2. 무산소동 지지대, 시편, 다이오드 및 열선의 연결부 개략도

Fig. 2. Schematic diagram of OFHC holder, sample, diodes, heater and their connections

각시킨 후 heater에 전류를 가하여 온도구배를 측정하였다. 온도구배는 정상상태(steady state)가 되도록 일정한 온도차가 100초동안 유지되도록 하였으며 10~100 K 온도범위에서 약 20개의 온도구간으로 세분하여 측정하였다. 저온 영역에서의 온도구배는 0.5~4 K 미만이 되도록 조절하였으며 이때 heater에 인가된 열량은 nanovoltmeter(Keithly사의 2182)와 multimeter(Keithly사의 2000)를 이용하여 20회 측정하여 평균값으로 계산하였다.

Thermal integral 방법으로 측정한 열전도도값의 정확도를 평가하기 위해 밀도, 비열, 열확산도(그림 3 참조)를 측정하여 77~300 K 범위에서 계산한 열전도도값들과 비교하였다. 밀도는 Archimedes 방법을 이용하여 상온에서 측정하였고 온도에 따른 밀도의 변화가 없다고 가정하였다. 비열은 Perkin-Elmer사의 시차 열량 분석기(Differential Scanning Calorimeter)를 이용하여 77~300 K까지 측정하였고 열확산도는 Laser Flash 방법[17-19]을 통하여 측정하였다(그림 3).

항복강도, 최대인장강도 및 연신율은 Instron-5655를 이용하여 측정하였다. 측정된 시편은 선재형태(폭 1.8 mm, 두께 0.2 mm, gauge length 30 mm)이며 만능시험기의 cross-head 속도는 5 mm/min이었다. 선재의 항복강도, 최대인장강도, 연신율은 시편당 3개의 시편으로부터 측정하여 평균값을 나타냈다. 또한 4 단자법을 이용하여 전기전도도를 측정하였다.

### 3. 결과 및 토의

시편의 열전도도는 thermal integral 방법으로 식(1)에 대입하여 10~100 K 온도 범위에서 측정하였다.

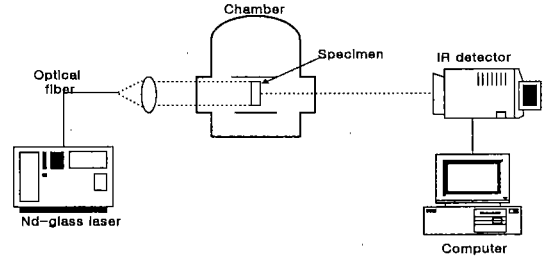


그림 3. 열확산도 측정을 위한 laser-flash 측정장치의 개략도

Fig. 3. The schematic illustration of laser-flash measurement system for thermal diffusivity

$$Q = \frac{A}{L} \int_{T_0}^{T_1} k dT \quad (1)$$

식(1)에서  $Q$ 는 시편에 가해진 열량(W),  $A$ 는 시편의 단면적( $m^2$ ),  $L$ 은 시편의길이(m),  $k$ 는 시편의 열전도도( $W/m \cdot K$ )를 나타낸다.

순수한 Ag와  $Ag_{0.9995}Mg_{0.0005}$ ,  $Ag_{0.974}Au_{0.025}Mg_{0.001}$ ,  $Ag_{0.973}Au_{0.025}Mg_{0.002}$ ,  $Ag_{0.92}Pd_{0.06}Mg_{0.02}$  합금의 열전도도를 diode 거리 10mm로부터 thermal integral 방법으로 측정하여 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 나타난 바와 같이 순수한 Ag의 열전도도값은 77 K에서 363.8  $W/m \cdot K$ 로 측정되었으며, 상온에서 이 재료의 표준 열전도도값(TPRC 권장값)인 427.0  $W/m \cdot K$ [20]과 비교하면 온도가 낮아짐에 따라 감소한 것을 알 수 있다. 그러나 극저온 영역으로 온도가 낮아짐에 따라 열전도도는 서서히 증가하여 ~10 K 부근에서 2037.0  $W/m \cdot K$ 로 최대값을 보이며, 이후 다시 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 일반적인 순수한 금속에서 관찰되는 거동과 일치하며, 극저온 온도에서 포물선형으로 열전도도가 높아지는 현상은 phonon의 효과에 기인하는 것으로 판단된다 [21].

$Ag_{0.9995}Mg_{0.0005}$ ,  $Ag_{0.974}Au_{0.025}Mg_{0.001}$ ,  $Ag_{0.973}Au_{0.025}Mg_{0.002}$ ,  $Ag_{0.92}Pd_{0.06}Mg_{0.02}$  합금에서는 77 K에서 열전도도가 각각 266.5, 118.1, 112.6, 82.5  $W/m \cdot K$ 로 측정되어 Ag의 몰분율이 감소함에 따라 열전도도가 감소되는 것을 알 수 있었다. 또한 이종 원소의 첨가량이 많아짐에 따라 극저온 영역에서 phonon의 효과에 의한 열전도도의 증가 현상도 둔화되는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 Mg, Au, Pd의 이종 원

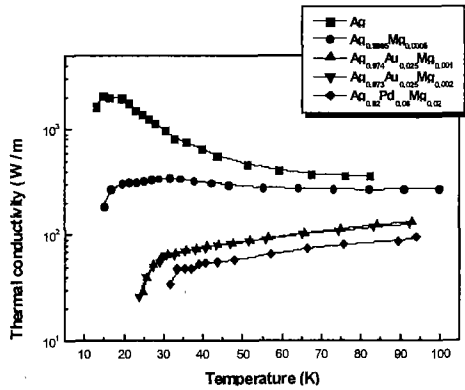


그림 4. Ag와 Ag 합금의 열처리 후의 직접측정에 의한 열전도도값 (10~90 K, L=10 mm)  
 Fig. 4. Thermal conductivity of the heat treated Ag and Ag-alloys from 10 to 90 K measured by direct method(L=10 mm)

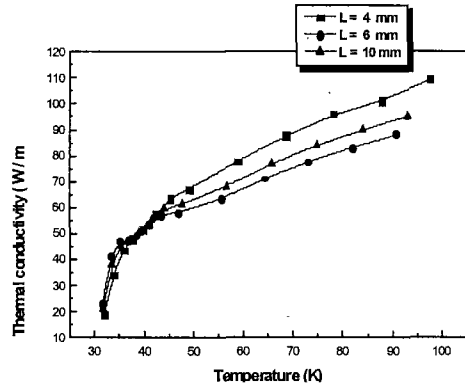


그림 5. Ag<sub>0.92</sub>Pd<sub>0.06</sub>Mg<sub>0.02</sub> 시편의 다이오드 거리에 따른 열전도도값 (L=4, 8, 10 mm)  
 Fig. 5. Thermal conductivity of Ag<sub>0.92</sub>Pd<sub>0.06</sub>Mg<sub>0.02</sub> for various diode distances of 4, 8, and 10 mm

소를 첨가하여 연구한 결과[4,7,8]와도 유사하며, 극저온에서 순수한 Ag에 비하여 이종 원소를 첨가한 합금의 열전도도를 현저하게 감소시키고 있다. 30 K에서 열전도도를 비교하면 Ag에서는 994.0 W/m·K 인 반면에 Ag<sub>0.9995</sub>Mg<sub>0.0005</sub>, Ag<sub>0.974</sub>Au<sub>0.025</sub>Mg<sub>0.001</sub>, Ag<sub>0.973</sub>Au<sub>0.025</sub>Mg<sub>0.002</sub>, Ag<sub>0.92</sub>Pd<sub>0.06</sub>Mg<sub>0.02</sub> 합금에서는 각각 342.6, 62.1, 59.2, 28.9 W/m·K로 측정되어 약 3~30 배나 감소하였다. Hybrid형 전류인입선은 4.2~77 K 온도영역에서 사용되므로 은합금을 피복재료로 하여 제조된 선계 적층형의 전류인입선을 이용하면 효과적으로 냉매제의 손실을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

실험의 신뢰도를 평가하기 위하여 Ag<sub>0.92</sub>Pd<sub>0.06</sub>Mg<sub>0.02</sub>의 조성을 가진 합금에 diode 거리(L)를 각각 4, 6, 10 mm로 설치한 후 heater를 가동하여 온도를 유지시키면서 동시에 3개의 실험값을 측정하여 그림 5에 나타내었다. 30 K부터 45 K까지는 diode 거리에 따른 열전도도값이 거의 차이가 없이 유사한 값으로 측정되었다. 45 K 이후부터는 거리에 따라 열전도도값이 차이를 보이기 시작하였으며, 77 K에서 diode 거리가 4, 6, 10 mm일 때 열전도도값이 각각 94.6, 80.2, 85.3 W/m·K로 측정되어 약 9~10%의 오차를 보였다. 이는 온도가 높아짐에 따라 온도구배의 크기가 증가하는 현상과 일부 연관이 있는 것으로 판단되며, 이 차이는 다른 열전도도 실험에서 나타

난 오차보다 작게 나타난 것으로 다소 정확한 신뢰도를 얻을 수 있었다. 특히 10 K에서 100 K 극저온 온도범위에서의 열전도도 측정은 국내에서 처음 시도 되었으며 3회 이상 반복하여 측정하였을 때의 결과가 3% 내의 차이를 보임으로써 측정결과의 재현성이 높은 편이다.

Thermal integral 방법으로 측정된 열전도도값의 정확도를 파악하기 위해 70~300 K까지 식 (2)를 이용하여 비열과 열확산도 및 밀도를 측정하여 간접적으로 평가한 열전도도를 그림 6에 나타내었다.

$$k = \rho C_p \alpha \quad (2)$$

$\rho$ 는 밀도,  $C_p$ 는 비열,  $\alpha$ 는 열확산도를 나타낸다. 간접적으로 측정된 Ag의 열전도도는 상온(300 K)에서 392.5 W/m·K로 나타났으며 이 값은 TPRC [21]의 권장값인 427 W/m·K보다 약 8% 작은 값이다. 이런 차이는 열확산도, 비열 측정으로부터 계산된 간접적인 열전도도 측정방법에 기인한 것으로 오차범위 내에 있다고 판단된다. 이 방법은 장비에 부착된 냉동기의 한계로 인해 70 K 이하에서는 측정이 불가능한 단점이 있으나 70~300 K 범위 내에서는 정확한 열전도도를 측정할 수 있는 것으로 사료된다.

간접적인 방법(밀도, 비열, 열확산도)과 직접적인

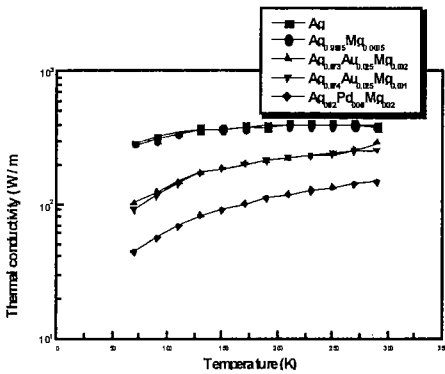


그림 6. Ag와 Ag 합금의 간접적인 측정방법에 의한 열전도도값 (77~300 K)

Fig. 6. Thermal conductivity of the heat treated Ag and Ag-alloys from 77 to 300 K measured by indirect method

방법(thermal integral)으로 70~90 K 구간에서 측정 한 열전도도값을 표 1에 비교하였다. 표 1에 나타난 바와 같이 77 K에서 간접측정법에 의한 열전도도값은 Ag와  $Ag_{0.9995}Mg_{0.0005}$ ,  $Ag_{0.974}Au_{0.025}Mg_{0.001}$ ,  $Ag_{0.973}Au_{0.025}Mg_{0.002}$ ,  $Ag_{0.92}Pd_{0.06}Mg_{0.02}$  합금에서 각각 303.2, 287.1, 109.5, 99.7, 47.9 W/m·K으로써, 두 실험 방법에 의한 오차가 약 10~20%로 아주 작게 나타났다. 이러한 오차범위는 다른 극저온 열전도도 측정 실험 결과에서 발생하는 오차가 최대한으로 약 1500%[20]임을 감안하면 정확한 측정값이라고 사료된다. 표 1에서 나타난 두 측정방법에 따른 오차는 직접적인 측정법에서 온도가 올라감에 따라 온도구배가 커지는 현상과 stycast, epoxy glass, varnish 등의 접착 및 절연물질에 의한 미세한 열전달, 그리고 간접적인 측정방법에 의한 오차 등에 기인하는 것으로 판단된다.

순수한 Ag와 Ag-alloys의 전기전도도를 4 단자법을 이용하여 상온과 77 K에서 측정 한 실험값을 표 2에 나타내었다. 순수한 Ag와 Ag 합금의 전기전도도는 300K에서  $0.66 \sim 0.25 \mu\Omega^{-1}cm^{-1}$ 로, 77 K에서는  $3.40 \sim 0.35 \mu\Omega^{-1}cm^{-1}$ 로 측정되었으며, 온도가 감소함에 따라 전기전도도는 증가함을 알 수 있다. 또한 일반적으로 Nordheim Rule로 예측할 수 있듯이, Ag에 비하여 합금에서는 이종 원소의 첨가량이 많아질

표 1. Ag와 Ag 합금의 70, 77, 80, 90 K 온도에서 간접측정법과 직접측정법에 의한 열전도도값

Table 1. Thermal conductivity of Ag and Ag-alloys by indirect method (density, specific heat, thermal diffusivity) and direct method(thermal integral) at 70, 77, 80 and 90 K

	Ag		$Ag_{0.9995}Mg_{0.0005}$		$Ag_{0.974}Au_{0.025}Mg_{0.001}$		$Ag_{0.973}Au_{0.025}Mg_{0.002}$		$Ag_{0.92}Pd_{0.06}Mg_{0.02}$	
	indirect	direct	indirect	direct	indirect	direct	indirect	direct	indirect	direct
70K	292.7	377.0	275.8	248.5	101.8	110.1	91.3	105.9	43.6	76.3
77K	303.2	363.8	287.1	266.5	109.5	118.1	99.7	112.6	47.9	82.5
80K	307.9	361.5	291.0	249.9	113.2	120.0	103.8	114.4	49.9	83.3
90K	322.6		308.0	254.2	124.7	129.9	116.3	124.2	55.5	89.0

수록 전기전도도는 감소하였다.

표 2에서 전기전도도로부터 Wiedemann-Franz Law의 공식을 이용하여 열전도도를 비교해본 결과 thermal integral 방법으로 측정 한 열전도도 값과 크게 차이가 남을 알 수 있다. 이는 Wiedemann-Franz Law 식에서 열전도도는 전기전도도에 비례한다는 경향에는 부합하나 전기전도도로부터 열전도도를 직접 산출하는 데는 정확도에 있어 큰 오차가 있음을 나타낸다.

순수한 Ag와 Ag-alloys의 강도와 연신율 등의 기계적인 성질을 만능시험기를 이용하여 측정하여 표 3에 나타내었다. 표에서 보듯이 순수한 Ag의 항복강도, 최대인장강도, 연신율은 각각 20, 135 MPa, 42%로 측정되었다. Ag-alloys에서는  $Ag_{0.9995}Mg_{0.0005}$ ,  $Ag_{0.974}Au_{0.025}Mg_{0.001}$ ,  $Ag_{0.973}Au_{0.025}Mg_{0.002}$ ,  $Ag_{0.92}Pd_{0.06}Mg_{0.02}$  항복강도가 102.3, 143.7, 147.5, 326.8 MPa로 측정되어 Ag에 비해 상당히 증가되었음을 알 수 있었다. 또한 최대인장강도값은 이들 합금에서 각각 206.6, 228.3, 234.6, 362.1 MPa로 증가하였으며, 특히 Mg의 첨가량이 많을수록 강도값이 향상되는 것으로 나타났다. 반면에 Ag-alloys의 연신율은 각각 30.7, 27.5, 27.1, 9.0%로 순수한 Ag의 연신율에 비해 감소하는 것으로 나타나 가공성이 현저히 떨어지는 것을 알 수 있었다.

첨가 원소의 양이 증가할수록 강도값이 향상되는 것은 전반적으로 이전의 연구결과[4]와 일치되며, 이

표 2. Ag와 Ag 합금에서 300과 77K의 전기전도도와 열전도도 측정값 및 계산값

Table 2. Electrical conductivity and measured and calculated thermal conductivity of Ag and Ag-alloys at 300 and 77 K

specimens	Electrical conductivity ( $\mu \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ )		Measured thermal conductivity ( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ )		Calculated thermal conductivity ( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ )	
	300 K	77 K	300 K	77 K	300 K	77 K
Ag	0.66	3.40	392.5	363.8	444.0	607.4
Ag <sub>0.9995</sub> Mg <sub>0.0005</sub>	0.47	1.85	387.6	266.5	316.2	330.5
Ag <sub>0.974</sub> Au <sub>0.025</sub> Mg <sub>0.001</sub>	0.28	0.43	292.1	118.1	188.4	76.8
Ag <sub>0.973</sub> Au <sub>0.025</sub> Mg <sub>0.002</sub>	0.27	0.41	256.7	112.6	181.7	73.2
Ag <sub>0.92</sub> Pd <sub>0.06</sub> Mg <sub>0.02</sub>	0.25	0.35	149.2	82.5	168.2	62.5

표 3. Ag와 Ag 합금의 열처리 후의 항복강도, 최대인장강도 및 연신율

Table 3. Variations of yield strength, ultimate tensile strength and elongation of Ag and Ag-alloyed tapes after sintering

Specimens	Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (% in 30mm)
Ag	20.0	135.0	42.0
Ag <sub>0.9995</sub> Mg <sub>0.0005</sub>	102.3	206.6	30.7
Ag <sub>0.974</sub> Au <sub>0.025</sub> Mg <sub>0.001</sub>	143.7	228.3	27.5
Ag <sub>0.973</sub> Au <sub>0.025</sub> Mg <sub>0.002</sub>	147.5	234.6	27.1
Ag <sub>0.92</sub> Pd <sub>0.06</sub> Mg <sub>0.02</sub>	326.8	362.1	9.0

는 고용강화(solid solution hardening), 분산강화(dis-persion hardening) 및 입자강화(grain size streng-thening) 등의 강화기구와 연관이 있을 것으로 추측된다. 특히 Mg의 첨가효과에 대한 관련 연구들에 의하면[16], 모상(matrix)에 고용되어 있는 Mg가 열처리 과정에서 MgO 상으로 산화(internal oxidation) 되는 것으로 관찰되었다. 그러므로 MgO 상의 존재로 인해 재결정동안에 결정립 성장(grain growth)을 억제하여 미세한 결정립 조직을 유도함으로써 기계적인 특성이 부분적으로 강화되는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

순수한 Ag에 Mg, Au, Pd 등을 첨가하여 제조된 Ag<sub>0.9995</sub>Mg<sub>0.0005</sub>, Ag<sub>0.974</sub>Au<sub>0.025</sub>Mg<sub>0.001</sub>, Ag<sub>0.973</sub>Au<sub>0.025</sub>-Mg<sub>0.001</sub>, Ag<sub>0.92</sub>Pd<sub>0.06</sub>Mg<sub>0.02</sub> 합금의 10~300 K까지의 열전도도와 기계적 특성을 측정하여 평가하였다.

제조된 Ag 합금의 열전도도는 Ag의 함량이 감소됨에 따라 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 30 K에서 순수한 Ag의 열전도도값이 994.0 W/m·K인 반면에 Ag<sub>0.9995</sub>Mg<sub>0.0005</sub>, Ag<sub>0.974</sub>Au<sub>0.025</sub>Mg<sub>0.001</sub>, Ag<sub>0.973</sub>-Au<sub>0.025</sub>Mg<sub>0.001</sub>, Ag<sub>0.92</sub>Pd<sub>0.06</sub>Mg<sub>0.02</sub> 합금에서는 각각 342.6, 62.1, 59.2, 28.9 W/m·K로써 열전도도값이 약 3~30배 감소하였다. 특히 본 실험에서 직접적인 측정방법과 간접적인 방법으로 열전도도를 각각 측정하여 비교한 결과 오차범위가 10~20%로 작게 나타나 측정값의 정확도를 신뢰할 수 있었다. Ag의 함량이 감소함에 따라 강도값은 증가하고 반면에 연신율은 감소하였다. 그러므로 이종 원소의 첨가에 의해 피복합금의 열전도도는 감소하고 기계적인 특성은 향상되는 효과를 얻을 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 통상산업부 산하 에너지 관리 공단의 지원에 의한 연구 결과이며 이 연구에 많은 조언과 도움을 주신 성균관대학교 기계공학부 김윤제 교수님께 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- [1] S. Yang, B. Chen, E. E. Hellstrom, E. Stiers, and J. M. Pfothenauer, IEEE Trans. supercond., 5, 2, 1471-1474, 1995
- [2] S. Y. Seal, J. R. Hull and M.-C. Chyu, Appl. Supercon. Conf., 16-21, 1994
- [3] Y. Yamada, Bismuth-Based High-Temperature Superconductors, Marcel Dekker, Inc., 14, 289-318, 1996
- [4] 김태우, 주진호, 나완수, 유재무, 이상현, 한국전기전자재료학회지, 12, 8, 724-732, 1999
- [5] W. Goldacker, J. Kebler, B. Ullmann, E. Mossang and M. Rikel, IEEE Trans. Appl. supercond., 5, 2, 1834-1837, 1995
- [6] Y. Yamada, M. Sato, T. Masegi, S. Murase, T. Koizumi and Y. Kamisada, Adv. Supercond., 6, 2, 609-613, 1993
- [7] H. Fujishiro, M. Ikebe, K. Noto and M. Matsukawa, IEEE Trans. Mag., 30, 4, 1645-

- 1650, 1994
- [8] T. Sasaoka, K. Nomura, J. Sato and S. Kuma, *Appl. Phys. Lett.*, 64, 10, 1005, 1994
- [9] R. E. Gladyshevskii, A. Perin, B. Hensel, R. Flukinger, R. Abraham, K. Lebbou, M. Th. Chhen-Adad and J. L. Jordan, *Physica C*, 255, 113-123, 1995
- [10] J. H. Ahn, K. H. Ha, S. Y. Lee, J. W. Ko, H. D. Kim and H. Chung, *Physica C*, 3405, 235-240, 1994
- [11] Y. Tanaka, T. Asano, T. Yanagyi, M. Fukutomi, K. Komori and H. Maeda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 31, 235-238, 1992
- [12] B. N. Hurbert, R. Zhou, T. G. Holesinger, W. L. Hulst, A. Lacerda and A. S. Murray, *J. Elec. Mater.*, 24, 12, 1869-1872, 1995
- [13] Y. Yamada, M. Sato, S. Murase, T. Kitamura and Y. Kamisada, *Adv. Supercond.*, 5, 717-720, 1992
- [14] H. W. Neumuller, M. Wihelm, K. Fischer, A. Jenovelis, M. Schubert and Chr. Rodigs, *Adv. Cryo. Eng.*, 40, 139, 1994
- [15] J. A. Parrell, S. E. Dorris and D. C. Labalestier, *Adv. Cryo. Eng.*, 40, 193-200, 1994
- [16] Jaimoo Yoo, Hyungik Chung, Taewoong Ko and Haidoo Kim, *Physica C*, 269, 109-114, 1996
- [17] W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler and G. L. Abbot, *J. Appl. Phys.*, 32, 1979, 1961
- [18] W. J. Water, *High temp.-High Press.*, 4, 439, 1972
- [19] K. Maglic, *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods*, 2, Plenum Press, 1992
- [20] Y. S. Touloukian, R. W. Powell, C. Y. Ho and P. G. Klemens, *Thermophysical Properties of Matter, TPRC Data Series 1*, IFI/Plenum, 340, 1970
- [21] M. Matsukawa, K. Iwasaki, K. Noto, T. Sasaki, N. Kobayashi, K. Youshida, K. Zikihara and M. Ishihara, *Cryogenics*, 37, 255-262, 1997