

극저온에서 금속표면의 열 접촉 저항 측정

Thermal Contact Resistance Measurement of Metal Interface at Cryogenic Temperature

김명수(Myung Su Kim), 최연석(Yeon Suk Choi)[†]

한국기초과학지원연구원

Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-333, Republic of Korea

(Received August 14, 2013; revision received November 15, 2013; Accepted: November 19, 2013)

Abstract The thermal contact resistance (TCR) is one of the important resistance components in cryogenic systems. Cryogenic measurement devices using a cryocooler can be affected by TCR because the device has to consist of several metal components that are in contact with each other for heat transfer to the specimen without a cryogen. Therefore, accurate measurement and understanding of TCR is necessary for the design of cryogenic measurement devices using a cryocooler. The TCR occurs at the interface between metals and it can be affected by variable factors, such as the roughness of the metal surface, the contact area and the contact pressure. In this study, we designed a TCR measurement system at variable temperature using a cryocooler as a heat sink. Copper was selected as a specimen in the experiment because it is widely used as a heat transfer medium in cryogenic measurement devices. We measured the TCR between Cu and Cu for various temperatures and contact pressures. The effect of the interfacial materials on the TCR was also investigated.

Key words Thermal contact resistance(열 접촉저항), Interfacial material(계면재료), Cryogenic(극저온)

[†] Corresponding author, E-mail: ychoi@kbsi.re.kr

기호설명

D : 시편의 직경 [mm]
 Q : 열량 [W]
 TCR : 열 접촉저항 [m^2K/W]
 T_L : 저온부의 온도 [K]
 T_H : 고온부의 온도 [K]

1. 서 론

열 접촉 저항(Thermal contact resistance)의 발생은 다양한 극저온 장비의 개발과 응용에 있어 매우 큰 영향을 미치는 요소 중 하나이다. 열 접촉저항은 금속과 금속이 서로 맞닿은 접촉면에서 발생되며 금속표면의 거칠기, 접촉면적, 그리고 결합되는 힘의 크기 등 다양한 요소들에 의해 그 크기가 달라질 수 있다. 특히 냉매를 대신해 극저온 냉동기를 사용하는 극저온 측정 장치는 열전달을 위해 많은 금속 부품들로 구성되고 서로 연결되어 있기 때문에 많은 접촉면이 존재하며 열 접촉저항의 발생에 큰 영향을 받는다. 따라서 다양한 금속재료들의 정확한 열 접촉저항의 측정과 평가는 극저온 측정 장치의 개발과 최적화를 위해서 반드시 필요하다.

일반적으로 열 접촉저항을 측정하는 방법은 크게 정상상태법(Steady state method)⁽¹⁾과 과도상태법(Transient state method)⁽²⁾으로 나눌 수 있다. Dongmei Bi 등의 연구⁽³⁾에서는 스테인리스강, 구리 그리고 AlN(Aluminum Nitride)를 시편으로 과도상태법의 하나인 LPM(Laser Photothermal method)방법을 이용하여 열 접촉저항을 측정하였으며 Tetsuya Baba et al.⁽⁴⁾은 유리 탄소(Glass carbon)의 열 접촉 저항을 레이저 플래시 방법으로 측정하였다. 과도상태법을 사용한 열 접촉저항 측정실험은 정상상태법과 비교하여 비교적 짧은 시간에 실험할 수 있다는 장점이 있지만 열 공급을 위한 발열부가 시편과 직접적으로 접촉되어 있지 않기 때문에 정확한 열 부하의 조절이 어려우며 측정값의 정확성과 신뢰도가 정상상태법에 비해 비교적 낮다는 단점이 있다. June Yu 등의 연구⁽⁵⁾에서는 구리와 구리 사이 그리고 구리와 실리콘 사이의 열 접촉저항을 액체질소를 냉매로 사용하여 85~300 K의 온도 범위에서 측정하였다. 또한 Ruiping Xu et al.⁽⁶⁾ 역시 액체질소를 냉매로 사용하여 알루미늄과 스테인리스강의 열 접촉저항을 155~210 K 온도 범위에서 측정하였다. 이처럼 많은 열 접촉저항의 연구들이 액체질소와 상온 사이의 온도범위에서 수행되었다.⁽⁴⁻⁹⁾

본 연구에서는 100 K 이하의 온도 범위에서 정확한 열 접촉저항을 측정하기 위하여 정상상태법을 이용한 열 접촉저항 측정 장비를 개발하였다. 액체헬륨, 액체 질소와 같은 특정한 냉매를 대신하여 극저온 냉동기(모델 : CTI 350)를 냉매로 사용하여 보다 넓은 온도 범위에서 측정할 수 있도록 하였고, 또한 접촉 압력을 조절하여 시편의 접촉 압력이 열 접촉저항에 미치는 영향을 알아 볼 수 있도록 하였다. 열 접촉저항 측정 장치의 구조 및 설계 그리고 온도, 접촉압력, 그리고 계면재료에 의한 열 접촉저항의 변화를 살펴보았다.

2. 실험장치의 구성

Fig. 1은 열 접촉저항의 측정을 위한 실험장치의 전체적인 개략도이다. 극저온 냉동기를 흡열원(Heat Sink)으로 사용하였으며 냉동기의 1단 냉동부는 구리로 만

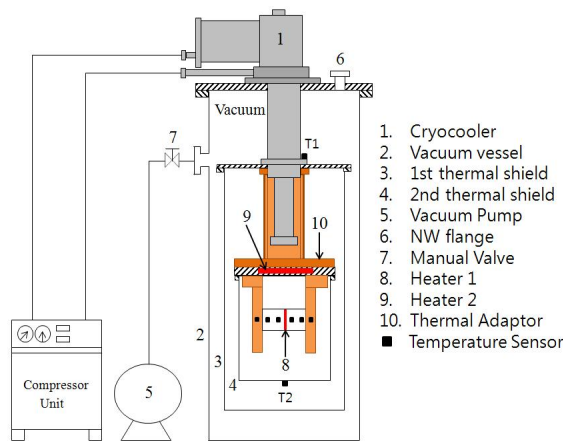


Fig. 1 Schematic of thermal contact resistance measurement system.

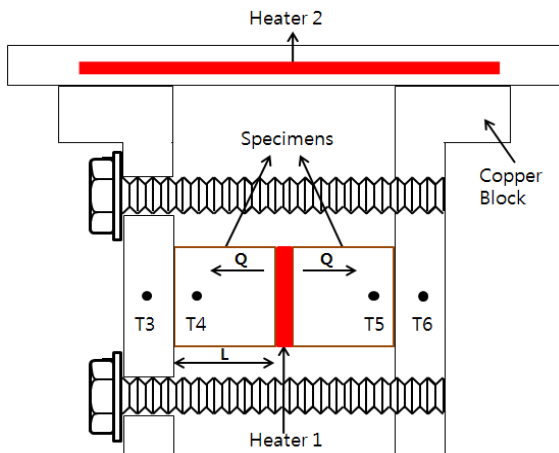


Fig. 2 Drawing of copper block and specimens.

들어진 연결부를 통해 시편 고정용 구리블록 및 시편과 열적으로 연결하였다. 그리고 두 개의 열 차폐층을 설치하고 1단 열 차폐층에는 20장의 MLI(Multiple layer insulation)를 설치하여 외부로부터의 복사열침입을 최소화하여 보다 낮은 온도에서 실험이 가능하도록 하였다. 진공용기의 옆면에는 진공펌프 연결을 위한 포트를 달았고 상판에는 온도측정 및 히터의 전류공급을 위한 진공 커넥터를 설치하였다. Fig. 1에 표시한 바와 같이 시스템 전체에 8개의 온도센서를 설치하였다. T1과 T2는 냉동기의 1단 냉동부와 2단 열 차폐층 하단부에 각각 위치한다. T3에서 T6은 온도 분포 측정을 위해 구리 블록과 시편에 위치하며 Fig. 2에 자세히 표시하였다. 히터를 중심으로 두 개의 시편이 대칭을 이루고 있어 히터가 외부로 노출 부분이 적기 때문에 시편 한쪽에 히터를 사용할 때보다 외부로의 열손실을 최소화하여 시편으로의 열전달량의 정확성을 높였다.

시편의 양쪽에는 시편의 고정을 위한 구리블록이 위치하고 두 개의 볼트와 토크렌치에 의해 시편의 접촉압력을 조절할 수 있다. 시편과 구리 블록에는 온도센서 설치를 위한 직경 1.8 mm, 깊이 6 mm의 6개의 홈이 있다. 보다 정확한 온도측정을 위해서 Varnish(GE-7031)를 이용해 PT 센서(Platinum thermometer sensor)를 홈에 삽입하여 설치하였다. 구리블록과 시편 및 볼트는 조립하기에 앞서 불순물 제거를 위해 에탄올 이용하여 깨끗하게 세척하였다. 시편 사이에는 히터 1을 설치하여 히터의 열량에 따른 시편의 온도 변화를 측정하였다. 또한 구리블록 상단에는 온도조절용 히터 2를 설치하여 보다 넓은 온도 범위에서 측정할 수 있도록 하였으며 시스템의 온도는 구리블록과 시편의 온도를 의미한다. 시편, 히터 및 온도센서의 제원 및 사양을 Table 1에 정리하였다.

히터는 비교적 높은 저항값을 갖는 니크롬선을 이용하여 제작하였다. 히터 1은 소형 직류 전원공급기(Ex-

Table 1 Specification of test sample, heater, and temperature sensor

Part	Parameter	Unit	Value
Test specimen	material	-	copper
	diameter	mm	10
	length	mm	10
Heater 1	contact area	m ²	7.85×10 ⁻⁵
	material	-	nichrome
Heater 1	length	mm	70
	resistance	Ω	2.4
Temperature Sensor	model	-	PT100
	current	A	0.001

tech instruments 382202)를 이용하여 열량을 조절하였으며, 0 W부터 1 W까지 0.2 W의 간격으로 시편에 열을 공급하였다. 히터 2 역시 소형 직류 전원 공급기(Agilent Technologies N5772A)를 이용하여 열량을 조절하였으며 시스템 온도를 35~100 K으로 조절하였다. Fig. 3은 열 접촉저항 측정을 위한 시편과 구리블록 히터 그리고 온도 센서가 조립된 사진이다. 온도 측정과 데이터 획득을 위한 계측선으로 낮은 열전도도를 갖는 망가닌선을 사용하였다. 비록 망가닌선의 열전도도가 낮지만 그 수가 많고 히터는 구리선으로 연결되어 있기 때문에 구리블록의 상판에 중간 냉각을 위한 앵커를 설치하여 계측선에 의한 열 침입을 최소화 하였다.

Fig. 4는 열 접촉저항 측정실험을 위한 시스템의 사진이다. 온도센서의 온도측정 및 데이터 수집을 위해서 온도모니터(Lakeshore 218 temperature monitor)를 사용하였다. 실험을 통해 측정된 값은 Labview™의 GPIB

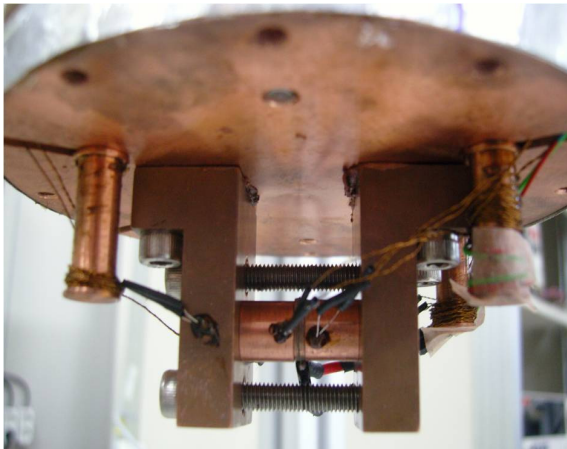


Fig. 3 Fabricated specimens and copper block.

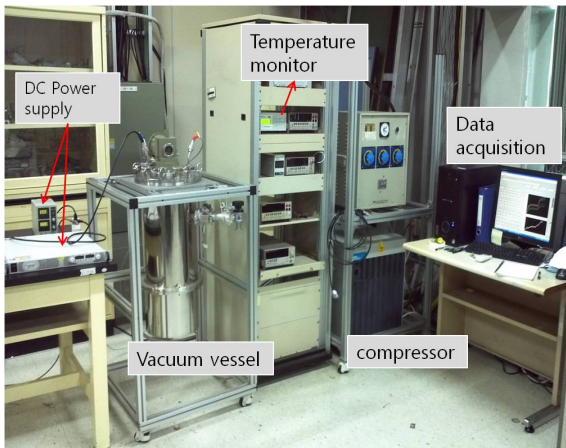


Fig. 4 Photo of experimental set-up and data acquisition system.

통신 모듈을 통해 매 30초 마다 자동적으로 컴퓨터에 저장하였다.

3. 실험결과

진공용기 내부의 잔류 가스에 의한 열 침입을 방지하기 위해서 실험동안에 진공용기는 10^{-6} Torr의 진공 상태를 유지하였다. Fig. 5는 시편의 접촉압력이 7 MPa 일 때, 열 접촉저항 측정장치 내부의 T1-T6 온도센서의 초기 냉각곡선이다. 시편의 접촉압력은 토크값을 변환식을 이용하여 압력으로 변환하였다⁽¹⁰⁾. T1은 극저

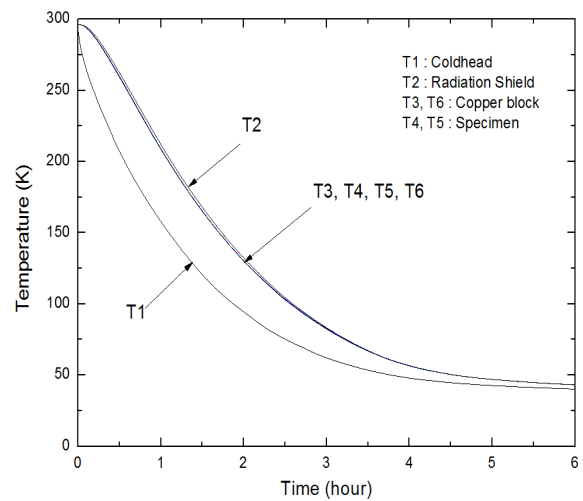


Fig. 5 Initial cooldown curve of thermal contact resistance measurement system(contact pressure : 7 MPa).

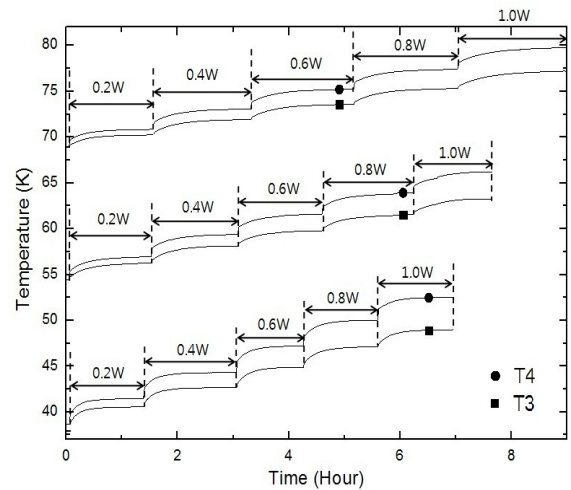


Fig. 6 Temperature profile of specimens and copper block.

온냉동기의 1단 냉동부, T2는 2단 열 차폐층 하단부의 온도를 나타낸다. 그리고 T3, T6은 구리 블록의 온도, T4, T5는 시편의 온도를 나타낸다. 시편이 최저 온도에 도달하는데 약 6시간이 소요되었으며 각 센서의 최저온도는 각각 T1은 37.20 K, T2는 38.47 K, T3은 38.41 K, T6은 38.43, T4는 38.48 그리고 T5는 38.58 K이었다.

Fig. 6은 시편의 접촉 압력이 7 MPa일 때, 히터 1과 2의 열 부하에 따른 구리블록과 시편의 온도 변화를 보여준다. 측정 방법은 우선 시스템의 온도가 최저 온도에 도달한 후 히터 1에 공급되는 열량을 0 부터 1 W까지 0.2 W의 간격으로 조절하였다. 그 다음에 히터 1의 전원을 차단한 후 히터 2를 이용하여 시스템의 온도를 다음 실험을 위한 온도까지 상승시켜 주었다. 마지막으로 시스템의 온도가 정상상태에 도달한 후에 첫 번째 단계와 같은 방법으로 다시 히터 1을 이용하여 실험하였다. 각 센서들의 온도 변화가 분당 10 mK이하 일 때 시스템의 온도가 정상상태에 도달하였다고 판단하였다. 히터 1과 히터 2에 각각 12 W, 0.2 W의 열량을 공급하여 정상상태에 도달하였을 때 T3과 T6의 온도는 각각 82.39, 82.42 K이었고 T4와 T5는 각각 82.92, 82.99 K으로 히터를 중심으로 시편의 대칭성을 확인하였다. 히터 1의 열량이 커질수록 온도 차이는 증가함을 알 수 있다. 반면 히터 2에 의해 시스템의 온도가 증가할수록 구리블록과 시편 사이의 온도 차이는 줄어드는 것을 알 수 있다. 고체재료의 열전도는 주로 내부의 전자와 포논(Phonon)에 의해서 발생한다. 이 중 금속재료의 경우 전자의 유동에 의해 열전도가 일어나게 되며 시스템의 온도상승에 따라 전자의 유동 속도가 빨라지고 시편과 구리블록 사이의 열전달이 증가하여 온도 차이가 감소한다고 생각된다.⁽¹¹⁾ 열 접촉저항은 아래의 식(1)⁽¹²⁾으로 정의 할 수 있으며 실험을 통해 얻어진 온도 차($\Delta T = T_H - T_L$)를 이용하면 열 접촉저항을 구할 수 있다.

$$TCR = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot (T_H - T_L)}{4 \cdot Q} \quad (1)$$

여기서 D는 시편의 직경, Q는 시편에 가해지는 열량, T_H , T_L 은 각각 고온부(T4)의 온도와 저온부(T3)의 온도이다.

Fig. 7은 온도와 접촉압력에 따른 열 접촉저항을 나타낸 그림이다. 앞에서 언급하였듯이 시스템의 온도가 올라갈수록 열 접촉저항은 감소하는 경향을 나타낸다. Fig. 7의 가장 상단의 점선으로 표시된 데이터들은 June Yu의 실험결과⁽⁵⁾를 바탕으로 접촉압력이 3.8 MPa일 때 외삽법을 사용하여 그린 그림이다. 접촉압력이 7, 14, 21 MPa일 때 35~100 K의 온도에서 평균 열 접촉저항

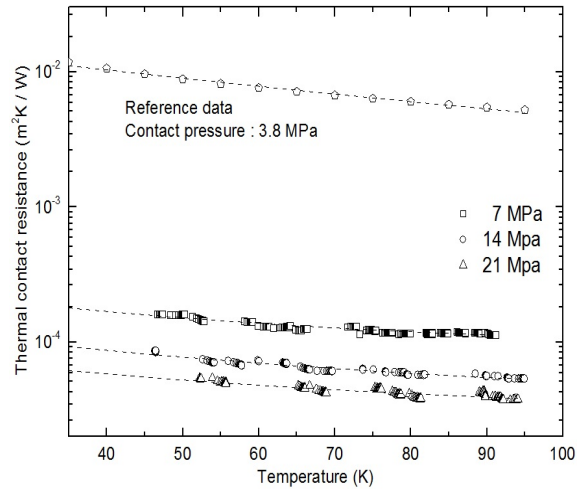


Fig.7 Thermal contact resistance with respect to temperature as a function of contact pressure.

의 값은 각각 1.39×10^{-4} , 7.29×10^{-5} 그리고 5.88×10^{-5} m²K/W이었다. 실험을 통해 측정된 데이터와 June Yu의 실험 결과 데이터를 함께 비교하였을 때, 접촉압력이 증가함에 따라 열 접촉 저항이 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 90 K 부근의 온도에서 접촉 압력에 따른 열 접촉저항의 변화를 표시한 그림으로, 90 K 부근에서 반복 측정된 값의 평균치를 오차를 이용하여 표시하였다. 접촉압력이 증가함에 따라 열 접촉저항이 작아지는 것을 알 수 있다. 접촉압력의 증가는 구리 판 사이의 실제적인 접촉 면적을 증가시켜주는 역할을 한다. 따라서 열 접촉저항 감소의 원인이 된다. 그러나 접촉압력이 증가함에 따라 열 접촉 저항의 감소율은 점차 작아짐을 알 수 있다.

구리와 구리 사이에 다양한 계면재료를 삽입하였을 때 열 접촉저항에 미치는 영향을 알아보기 위해서 인듐시트, 절연시트, 써멀그리스, 그리고 N 그리스를 삽입하여 열 접촉저항을 측정하였다. Fig. 9는 접촉압력이 7 MPa이고 구리와 구리 사이에 다양한 계면재료를 삽입하였을 때 열 접촉 저항의 변화를 나타낸 그래프이다. 써멀그리스, N 그리스 그리고 인듐시트를 계면재료로 사용하였을 때 계면재료를 사용하지 않았을 경우와 비교하면 40 K에서 열 접촉저항의 감소율은 각각 42, 42 그리고 63%였다. 시스템의 온도가 상승함에 따라 열 접촉저항의 감소율은 점차 증가했다. 액체질소 온도인 77 K에서는 감소율이 각각 51, 56 그리고 86%였다. 모든 금속 재료의 표면은 완벽하게 평면이라고 할 수 없다. 그러므로 빈 공간들이 존재할 수 있다. 우수한 열 전도성을 갖는 계면재료들은 빈 공간들을 채워주는 역할을 함으로서 실제적인 접촉 면적을 넓게 해주는 동시에 실제적인 접촉 압력 또한 증가하게 만

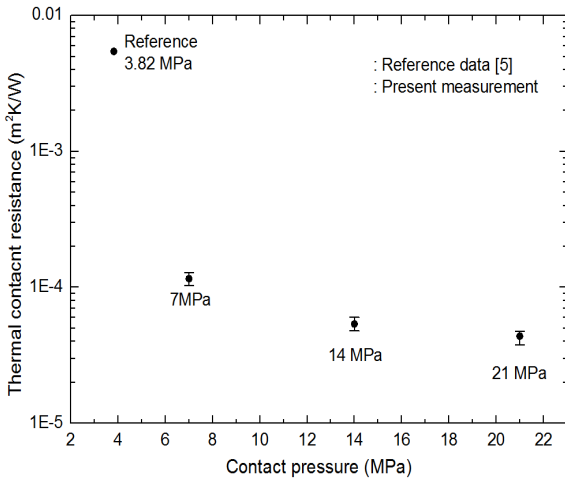


Fig. 8 Variation of thermal contact resistance with respect to the contact pressure.

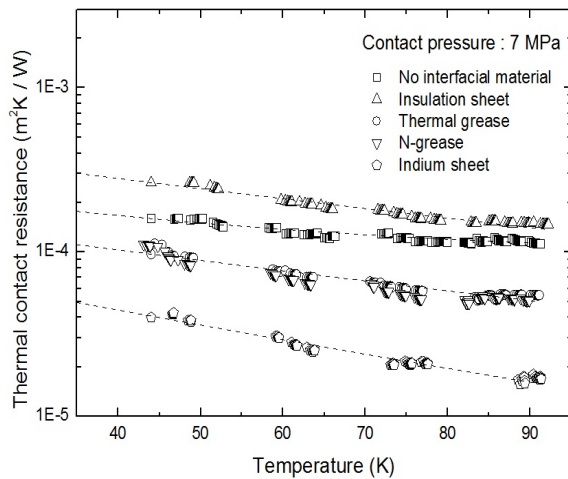


Fig. 9 Variation of thermal contact resistance as a function of interfacial materials at 7 MPa contact pressure.

드는 역할을 한다. 절연시트를 계면재료로 사용하였을 때는 열 접촉저항이 77 K에서 약 34% 증가하였다. 이는 절연시트는 비금속 재료이며 또한 매우 낮은 열전도도를 갖기 때문이다. 그러나 절연시트는 다양한 극저온 장치들에서 전기적으로 절연이 필요할 때 유용하게 사용된다.

4. 결론

극저온 냉동기를 흡열원으로 다양한 온도 범위에서 정상상태법을 이용하여 구리와 구리 사이의 접촉면에서 열 접촉저항을 측정하였다. 열 접촉저항은 온도와 접

촉 압력이 증가함에 따라 감소하였다. 그러나 14 MPa 이상의 접촉압력에서는 열 접촉저항의 감소율은 현저하게 감소하였다. 써멀그리스, N 그리스 그리고 인듐시트를 계면재료로 삽입하였을 때 열 접촉저항은 감소하였다. 특히 인듐시트를 사용했을 때 열 접촉저항의 감소율은 계면재료를 사용하지 않았을 때와 비교하여 40 K에서 약 63%로 가장 큰 감소율을 보였다. 또한 온도가 증가함에 따라 열 접촉저항의 감소율 또한 증가하여 액체질소 온도에서는 약 86%의 감소율을 보였다. 이러한 데이터는 극저온 환경에서의 기본적인 열물성측정 연구에 유용할 것이라고 생각하며, 향후 다양한 극저온 장치의 개발에 사용될 예정이다.

후 기

본 연구는 출연연-중소기업 공동기술 개발사업(연구장비활용기술개발사업)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

Reference

1. Fujishiro, H., Okamoto, T., and Hirose, K., 2001, Thermal Contact Resistance between High-Tc Superconductor and Copper, *Physica C*, Vol. 357-360, pp. 785-788.
2. Fieberg, C. and Kneer, R., 2008, Determination of thermal contact resistance from transient temperature measurements, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 1017-1023.
3. Bi, D., Chen, H., and Tian, Y., 2012, Influences of temperature and contact pressure on thermal contact resistance at interfaces at cryogenic temperatures, *Cryogenics*, Vol. 52, pp. 403-409.
4. Baba, T. and Ono, A., 2001, Improvement of laser flash method to reduce uncertainty in thermal diffusivity measurements, *Measurement Science and Technology*, Vol. 12, pp. 2046-2057.
5. Yu, J., Yee, A. L., and Schwall, R. E., 1992, Thermal conductance of Cu/Cu and Cu/Si interfaces from 85 K to 300 K, *Cryogenics*, Vol. 32, pp. 610-615.
6. Xu, R., Feng, H., Zhao, L., and Xu, L., 2006, Experimental investigation of thermal contact conductance at low temperature based on fractal description, *International Communications in Heat and Transfer*, Vol. 33, pp. 811-818.
7. Yeh, C. L., Wen, C. Y., Chens, Y. F., Yeh, S. H., and Wu, C. H., 2001, An experimental investigation

- of thermal contact conductance across bolted joint, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 25, pp. 349-357.
8. Rosochowska, M., Balendra, R., and Chodnikiewicz, K., 2003, Measurements of thermal contact conductance, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 135, pp. 204-210.
 9. Sarte, V. and Lallenmand, M., 2001, Enhancement of thermal contact conductance for electronic systems, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, pp. 221-225.
 10. Juvinall, R. C., 1991, *Fundamentals of Machine Component Design*, John Wiley and Sons, INC., New York, USA.
 11. Gmelin, E., Asen-Palmer, M., Reuther, M., and Villar, R., 1999, Thermal boundary resistance of mechanical contacts between solids at sub-ambient temperature, *J Phys D : Appl. Phys*, Vol. 32, pp. 19-43.
 12. Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 1996, *Fundamentals of Heat and transfer*, John Wiley and Sons, INC., New York, USA.