

Estimation of Heat Generation in Multi-Contact Connector for Superconducting Magnet Application

M. S. KIM, Y. S. CHOI*, D. L. KIM and Y. A. LEE

Korea Basic Science Institute, Daejeon, Korea

(Received 7 September 2012; accepted 15 October 2012)

초전도자석 시스템 응용을 위한 멀티-컨택 커넥터의 열 발생 특성 평가

김명수, 최연석*, 김동락, 이윤아

Abstract

Current leads are one of the important components for carrying the current to the coil in the superconducting magnet system. Heat leakage through the current lead is the major factor of entire heat load in the cryogenic system because current leads carry the current from room temperature to near 4 K, connecting thermally each other. Therefore, minimization heat load through current lead can reduce the operating temperature of superconducting magnet. The semi-retractable current lead, composed of multi-contact connector and HTS element, is one of good options. Comprehension of Multi-contact connector's structure, contact resistance and heat generation is essential for estimating heat generation in current leads. Multi-contact connector has several louvers inside of socket and the shape, number, size of louvers are different with the size of connector. Therefore contact area, current path and contact resistance are also different. In this study, the contact resistance in multi-contact connector is measured using the electrical power as a function of connector's size and temperature. Also, the unique correlation of electrical contact resistance is derived and heat generation is estimated for superconducting magnet application.

Keywords : Current lead, multi-contact connector, superconducting magnet

I. Introduction

초전도 자석 시스템에서 전류 도입선은 상온

의 전원 공급장치에서 극저온의 초전도 자석까지 전류를 전달해주는 역할을 하는 매우 중요한 구성요소 중 하나이다 [1]. 그러나 상온으로부터 극저온까지 열적으로 연결되어 있기 때문에 전류도입선을 통하여 유입되는 열 침입은 시스템 전체의 열 부하에 매우 큰 비중을 차지한다 [2]. 따라서 전류도입선을 통한 열 침입을 최소화 하

*Corresponding author. Tel : +82 42 865 3913

e-mail : ychoi@kbsi.re.kr

면 초전도 자석의 작동 온도를 낮출 수 있으며 더 높은 고자기장 환경을 만들 수 있는 장점 때문에, 열부하를 최소화하기 위하여 전류도입선을 최적화 하는 연구가 진행되어 왔으며 실제로 제작되어 적용되었다 [3-5].

금속도체와 고온초전도체로 구성되는 개폐형 전류도입선은 초전도 자석을 충전한 후 금속도체 부분을 고온초전도체 부분으로부터 분리시킬 수 있어 열침입을 제거할 수 있기 때문에 초전도 자석 시스템에 사용할 수 있는 좋은 대안이 될 수 있다. 개폐형 전류도입선은 구리와 같은 금속으로 만들어진 고온부, 고온초 전도체로 만들어진 저온부 그리고 이 두 부분을 연결하는 연결부로 이루어져 있다. 초전도체와 금속부 사이의 연결부는 냉동기의 1단부에 의해 냉각되며 고온초전도체와 연결된 초전도 자석은 냉동기의 2단부에 의해 냉각된다. 연결부는 금속으로 만들어진 멀티-컨택 커넥터 (Multi-contact connector, MCC)를 포함하고 있는데 이는 진공을 유지하면서 연결과 분리가 가능한 구조이다.

이러한 개폐식 전류도입선의 개발과 시스템 적용의 적합성을 판단하기 위해서는 다양한 크기와 형태를 갖는 MCC의 구조적인 이해와 온도에 따른 저항 및 발열에 관한 연구가 선행되어야 한다. MCC는 크게 소켓(Socket)과 플러그(Plug)로 나누어지며 소켓 내부에는 여러 개의 주름(Louver)이 있으며 주름의 형태에 따라 크게 리프스프링 타입(Leaf spring type)과 토션스프링타입(Torsion spring type)으로 분류할 수 있다 [6]. 그리고 주름의 수량과 형태는 MCC의 크기에 따라 달라지며, 또한 주름의 수량에 따라 전류가 통과하는 접촉 면적이 달라지기 때문에 접촉저항 및 발열량 역시 달라진다.

본 연구에서는 전도냉각 초전도자석시스템의 전류도입선에 MCC를 적용하여 극저온냉동기와 열적으로 연결하고 MCC의 온도, 크기 및 충전전류의 크기에 따른 접촉저항을 측정하고 그에 따른 전류도입선 연결부에서의 발열량에 관한 연구를 수행하였다.

II. Structure of multi-contact connector

Fig. 1은 본 연구에 사용된 MCC의 주름형상

을 나타낸 그림이다. a)는 리프스프링 타입, b)는 토션스프링 타입의 형상을 나타낸다. 두 타입 모두 형상은 다르지만 양쪽에 소켓과 접촉되는 다리 부분이 있으며 다리 사이에는 플러그의 몸통과 접촉하게 되는 주름들이 있다. MCC의 크기에 따라 주름의 수가 달라지며 주름의 수에 따라 전류가 통과하는 면적이 달라져 접촉저항 및 발열량이 달라지게 된다.

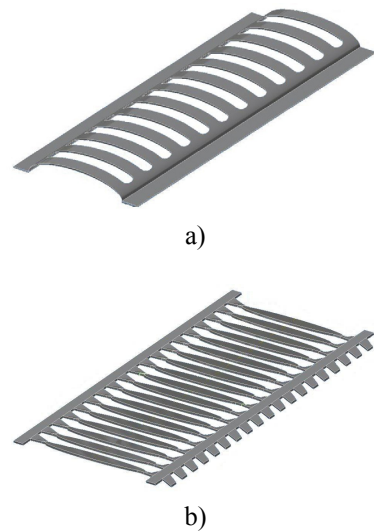


Fig. 1. Structure of multi-contact connector a) leaf spring type b) torsion spring type.

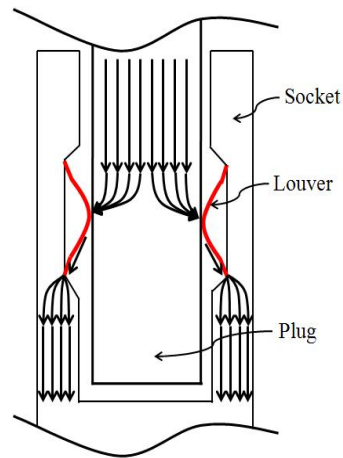


Fig. 2. Current flow through multi-contact connector.

Fig. 2는 MCC의 내부 구조 및 전류의 흐름을 보여준다. MCC는 내부에 주름을 갖는 소켓과 소켓에 삽입되는 플러그로 구성되어 있다. Fig. 2와 같이 전류는 금속도체를 지나 플러그를 통과한 후 주름을 통과하여 소켓으로 전달된 후 고온초전도체로 전달된다.

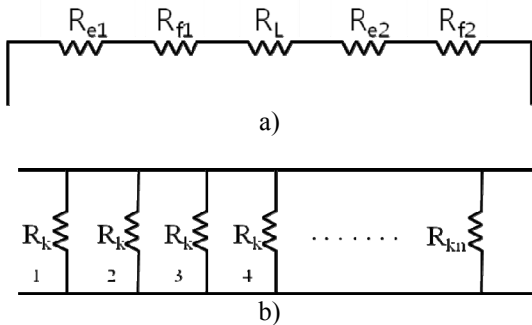


Fig. 3. Diagram of louver's contact resistance a) contact resistance of single louver b) total contact resistance of multi-contact connector.

Fig. 3은 소켓 내부 주름의 저항을 표현한 그림이다. a)는 한 개의 주름이 갖는 접촉저항을 표현한 것으로 R_L 은 주름이 갖는 자체 저항으로 주름의 길이에 따라 달라진다. R_e 는 주름의 수축저항 그리고 R_f 는 주름 표면의 얇은 코팅막이 갖는 저항이다. 소켓과 플러그가 접촉되는 점이 두 점이므로 R_e 와 R_f 는 각각 두 개가 된다. 따라서 하나의 주름에서 발생하는 접촉저항 R_k 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_k = R_L + 2(R_e + R_f) \quad (1)$$

b)는 MCC전체의 접촉저항을 표현한 것으로 R_k 는 한 개의 주름에서 발생하는 접촉저항을 나타내며 그림과 같이 각각의 주름들은 서로 병렬로 연결되어 있기 때문에 MCC 전체의 접촉저항은 한 개의 주름에서 발생하는 접촉저항보다 작은 값을 가지며, 발열량 또한 작다. MCC 전체의 접촉저항 R_c 는 식 (2)로 표현할 수 있으며, 따라서 주름의 수가 많을수록 작은 접촉저항을 갖게 된다.

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_{k1}} + \frac{1}{R_{k2}} + \dots + \frac{1}{R_{kn}} \quad (2)$$

III. Conduction-cooled superconducting magnet

Fig. 4는 전도냉각형 초전도 자석시스템의 개략도이며 [7], Fig. 5는 3D모델링으로 구현한 전도냉각형 초전도자석시스템이다. 초전도 자석시스템의 제원은 테이블 1에 정리하였다. 극저온 냉동기는 진공용기의 상판에 직접 설치하였으며 냉동기의 1단 냉동부는 열 차폐층, 전류도입선 연결부와 열적으로 연결된다. 2단 냉동부는 열전도체로 초전도 자석과 연결되어 초전도 자석을 냉각하게 되며 고온초전도체를 이용하여 초전도 자석에 전류를 공급하게 된다. 이때 반드시 전류공급을 위한 부품들과 냉각을 위한 부품들은 서로 전기적으로 절연이 되어야 한다.

본 연구에서는 소켓의 내경이 각각 14 mm, 30 mm이며 토션스프링 타입의 주름을 갖는 MCC와 소켓의 내경이 6 mm이며 리프스프링 타입의 주름을 갖는 MCC가 사용되었다. 냉동기의 1단부와 연결된 구리블럭에 MCC를 설치하기 위한 홈을 파고 납땀을 이용하여 부착하였으며, 전압 측정을 위한 단자를 소켓과 플러그에 각각 한 개씩 부착하여 전류를 공급할 때 전압차이를 측정하여 접촉저항을 계측하였다. 그리고 극저온 냉동기에 히터를 부착하여 전류도입선 연결부의 온도를 조절하고 사단자법을 이용하여 전류에 따른 전압차를 측정하였다.

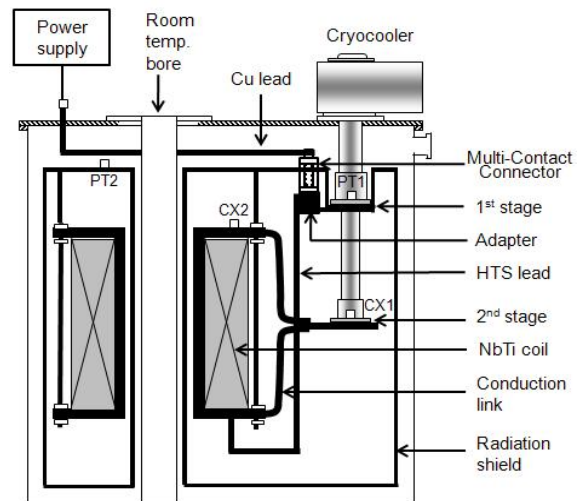


Fig. 4. Schematic of conduction-cooled superconducting magnet system with multi-contact connector.

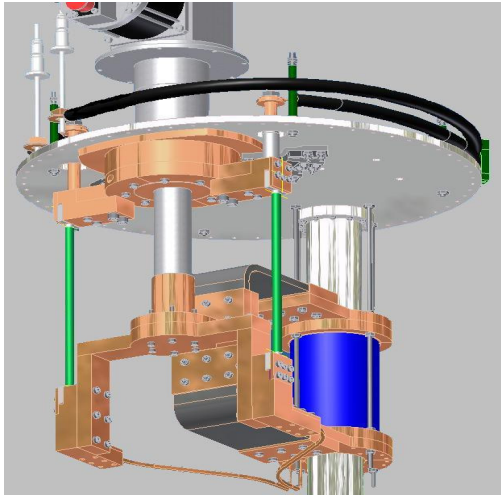


Fig. 5. 3D-modeling of conduction-cooled superconducting magnet system.

Table.1 Parameter of conduction-cooled superconducting magnet.

Parameter		Value	Unit
Central field		3	T
Conductor		NbTi	-
Main field coil	Inner diameter	80	mm
	Outer diameter	130	mm
	Length	175	mm
Warm bore diameter		52	mm
Coil turn		184 X 28	-
Current lead		HTS + Cu	-
Operating current		165	A
Thermal shield	Diameter	540	mm
	Height	500	mm
Vacuum vessel	Diameter	600	mm
	Height	800	mm

IV. Result and Discussion

Fig. 6 은 소켓 내경 14 mm 의 MCC 가 전류 도입선의 연결부에 설치된 초전도자석 시스템의 초기 냉각 곡선이다. 극저온냉동기의 1 단 냉동부와 열차폐층의 상단에는 PT (Platinum resistance thermometer) 센서를 사용하였으며, 2 단 냉동부와 초전도 자석 상단에는 극저온에서

높은 안정성과 정확성을 갖는 Cernox™ 센서를 사용하였다 [8]. 냉동기의 1 단 냉동부의 최저온도는 약 37 K, 열 차폐층 상단은 약 46 K 이었으며 2 단 냉동부의 최저온도는 약 3.6 K, 초전도자석 상단의 온도는 약 4.0 K 이었다. 최저온도에 도달하기까지 약 24 시간이 소요되었다.

Fig. 7 은 상온과 35 K 범위의 온도에서 토션스프링 타입 MCC 의 전류에 따른 전압값을 측정 한 그래프이다. 전류의 범위는 1-50 A 이며 상온에서 전위차는 공급하는 전류에 비례한다. 초전도 자석에 공급한 전류와 전위차를 이용하여 MCC 의 접촉저항을 구할 수 있으며 소켓 내부 주름의 수량을 알면 단위 주름당 발생하는 접촉 저항을 알 수 있다.

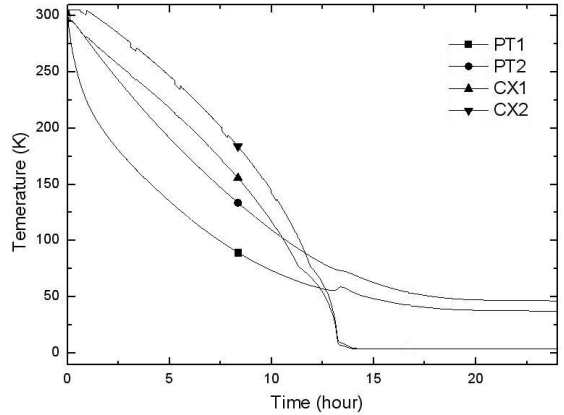


Fig. 6. Initial cooldown curves of superconducting magnet system.

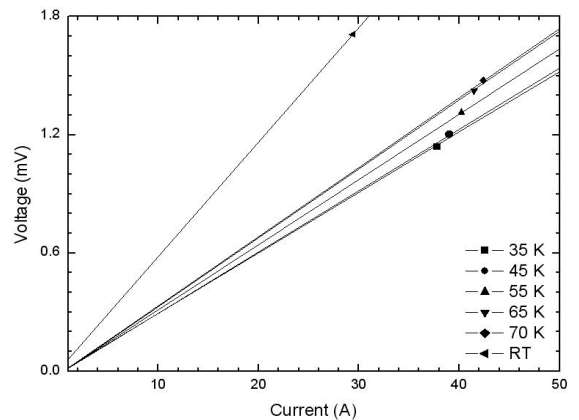


Fig. 7. Current-voltage characteristics of multi-contact connector with respect to supplied current for various temperature (inner diameter of MCC: 14 mm).

Fig. 8 은 리프스프링 타입 주름에서 온도에 따라 한 개의 주름에서 발생하는 접촉저항을 그린 그래프이다. 최저온도인 48 K 에서 커넥터 전체의 저항은 91.1-106.9 $\mu\Omega$ 이었으며 상온에서는 약 136.5-137.1 $\mu\Omega$ 이었다. 내경 6 mm 의 커넥터는 소켓 내부에 19 개의 주름이 있으므로 식 (2)를 이용하여 한 개의 주름에서 발생하는 접촉저항이 48 K 에서 1.73-2.03 m Ω , 상온에서 2.59-2.60 m Ω 이라는 것을 알 수 있다. 48 K 에서 상온까지의 실험결과를 이용하여 리프스프링 타입의 주름을 갖는 커넥터의 온도에 따른 접촉저항의 고유관계식을 얻었으며 Fig. 8 에 관계식 및 계수를 제시하였다.

Fig. 9 는 토션스프링 타입 주름에서 온도에 따라 한 개의 주름에서 발생하는 접촉저항을 그린 그래프이다. 내경 30 mm 와 14 mm 의 MCC 의 경우 서로 같은 타입의 주름을 가지며 주름의 수만 서로 다르다. 따라서 하나의 주름이 갖는 접촉저항은 같다 [6]. 지름 30 mm 의 MCC 는 소켓 내부에 76 개의 주름을 가지며 최저온도 35 K 에서 커넥터 전체의 저항은 7.2-8.3 $\mu\Omega$ 이었으며 상온에서 17.8-17.9 $\mu\Omega$ 이었다. 식 (2)를 이용하여 한 개의 주름에서 발생하는 접촉저항을 구하였으며, 35 K 에서 0.54-0.63 m Ω 이며 상온에서 1.35-1.36 m Ω 이었다. 내경 14 mm 의 MCC 의 경우 소켓 내부에 18 개의 주름을 가지며 커넥터 전체의 저항은 35 K 에서 23.6-30.3 $\mu\Omega$, 상온에서 58.17-58.2 $\mu\Omega$ 이었다. 한 개의 주름에서 발생하는 접촉저항은 35 K 에서

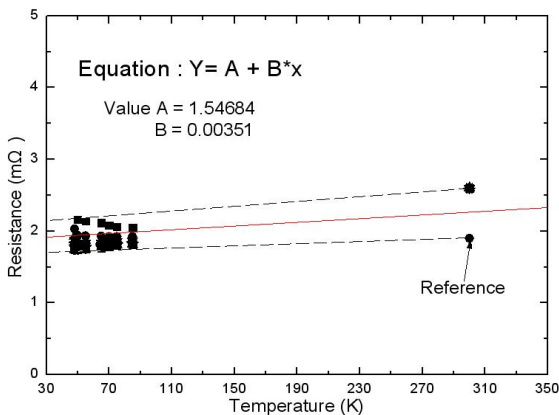


Fig. 8. Electrical contact resistance with respect to temperature (leaf spring single louver).

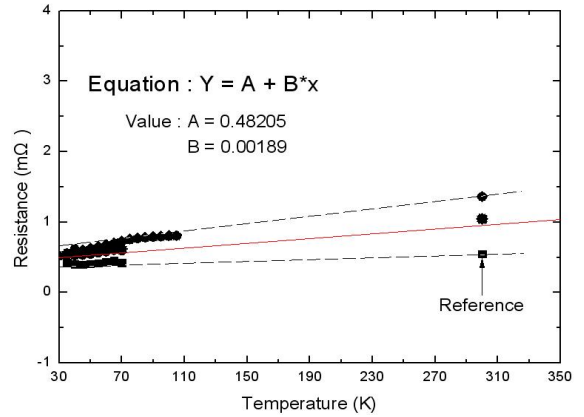


Fig. 9. Electrical contact resistance with respect to temperature (torsion spring single louver).

0.42-0.54 m Ω 이며 상온에서 1.046-1.047 m Ω 이다. 실험을 통해 측정된 값을 이용하여 35 K 에서 상온의 온도 범위에서 한 개의 토션스프링 타입 주름이 갖는 온도에 따른 접촉저항에 관한 고유 관계식 및 계수를 Fig. 9 에 나타내었다.

Fig. 10 은 두 타입의 MCC 에서 공급한 전류에 따른 단위 주름당 발열량을 그린 그림이다. 앞에서 구한 고유관계식을 이용하여 200 A 까지 전류를 공급하였을 때 전류도입선 연결부에서의 발열량을 예측하였다. 전도냉각형 초전도 자석 시스템에서 1 단부의 온도 범위는 30-60 K 이며 3 T 를 발생하기 위해 필요한 전류 165 A 를 공급할 때 하나의 주름에서 발열량은 리프스프링타입은 약 45 W, 토션스프링타입은 약 15 W 이다. 1 단부의 온도가 30 K 에서 60 K 으로 증가할 때 단위 주름당 발열량은 리프스프링타입은 44.97 W 에서 47.84 W 로, 토션스프링타입은 14.66 W 에서 16.21 W 로 증가한다.

Fig. 11 은 전도냉각형 초전도 자석 시스템의 1 단부 온도가 30 K 이고 165 A 의 전류를 공급할 때, 주름의 수량에 따른 발열량을 나타낸 그림이다. 리프스프링 타입은 주름이 1 개 일 때 약 44.97 W 의 발열량을 가지며 주름의 수가 증가함에 따라 발열량은 감소하여 60 개일 때 0.74 mW 의 발열량을 갖는다. 토션스프링 타입 주름은 1 개일 때 약 14.66 W, 60 개 일 때 약 0.24 W 의 발열량을 갖는다. 하지만 두 타입 모두 주름의 개수가 20 개 이상이 되면 발열량의 감소폭이 작아진다.

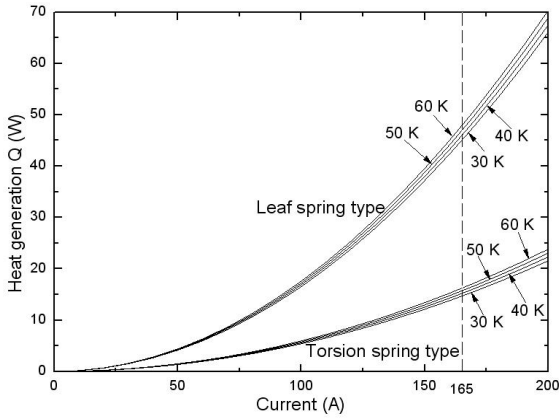


Fig. 10. Heat generation due to contact resistance of leaf and torsion spring type single louver.

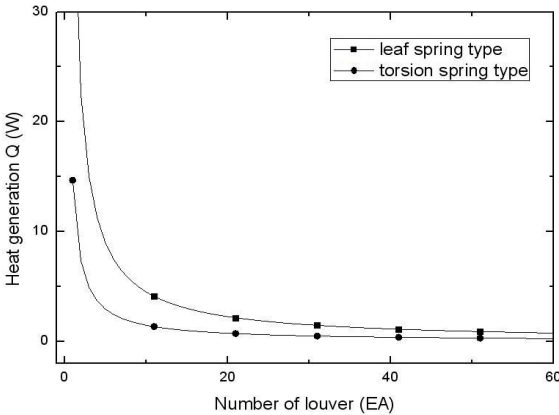


Fig. 11. Heat generation of leaf and torsion spring type with respect to the number of louver (1st stage temperature 30 K, current 165 A).

V. Conclusion

전도냉각형 초전도 자석 시스템의 개폐형 전류도입선으로서 연결부에 MCC의 적용여부를 검증하기 위한 성능실험을 하였다. MCC 주름형상에 따른 접촉저항의 고유관계식을 구하였으며, 초전도 자석 충전조건에서 단위 주름당 발열량과 주름의 수량에 따른 발열량을 구하였다. 토션스프링 타입의 주름을 갖는 MCC가 낮은 접촉저항을 가졌으며, 따라서 연결부에서 발열량도 낮았다. 주름의 수가 증가하면 접촉저항이 감소하여 연결부에서 발열량도 작아진다. 하지만 두 타입 모두 주름의 수가 20개 이

상이 되면 접촉저항 및 발열량의 감소효과는 미비하며 전도 냉각형 초전도 자석의 개폐형 전류도입선에는 20개 내외의 주름을 갖는 토션스프링 타입의 MCC를 사용하는 것이 타당하다.

Acknowledgement

This work is supported by the KBSI under Grant D32803

References

- [1] M.N. Wilson, Superconducting Magnets. Oxford: Clarendon Press, 1986, pp. 256-278.
- [2] A.M. Kadin, R. J. Webber, and D. Gupta, "Current leads and optimized thermal packaging for superconducting systems on multistage cryocooler", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17, no. 2, pp. 975-978, 2007.
- [3] L. Ren, Y.Tang, J. Shi, N. Chen, J. Li, and S. Cheng, "Cryocooler cooled HTS current lead for a 35KJ/7Kw-class high-Tc SMES system", Physica C, vol. 468, pp. 2115-2118, 2008.
- [4] S. Yang and J. M. Pfontenhauer, "Optimization of the intercept temperature for high temperature superconducting current lead", Adv. Cryogenic Eng., vol. 41, pp. 567-572, 1996.
- [5] H. M Chang, Y. S. Choi, S. W. Van Sciver, and J. R. Miller, "Optimization of current leads cooled by natural convection of vapor", Adv. Cryogenic Eng., vol. 49, pp. 944-951, 2004 .
- [6] Multi-Contact Co., "Multilam product documentation", Santa Rosa, CA [Online]. Available: <http://www.multi-contact-usa.com>.
- [7] Y.S. Choi, D. L. Kim, B. S. Lee, H. S. Yang, W. M. Jung, "Development of a conduction-cooled superconducting magnet system for material separation", Progress in superconductivity, vol. 10, no. 1, pp. 50-54, 2008.
- [8] Temperature measurement and control catalog., [Online] <http://www.lakeshore.com>.