

전도냉각형 초전도시스템의 전류도입선 냉각을 위한 열커패시터의 열적해석

권기범, 양형석*, 정은수, 장호명
 홍익대학교 기계공학과, 홍익대학교 과학기술연구소*

Thermal analysis of a thermal capacitor for the current lead cooling in conduction-cooled superconducting systems

Ki Beom Kwon, Hyung Suk Yang*, Eun Soo Jeong, Ho-Myung Chang
 Department of Mechanical Engineering Hong Ik University
 Research Institute for Science & technology, Hong Ik University*

kwon2100@dreamwiz.com

Abstract - In this study, thermal analysis of a thermal capacitor, which is used to cool the current lead in conduction-cooled superconducting systems, was done. The temperature difference across a thermal capacitor was calculated by using heat conduction equation. Effect of heat load, total thickness, height and length of a thermal capacitor on the temperature difference were show. Using the results in this work, total thickness and heat height of a thermal capacitor can be determined for given heat load and given temperature difference. This work can be used practically in design for every superconduction system using a current lead.

1. 서 론

지금까지 초전도 시스템의 냉각에 있어서 많은 경우 헬륨이나 질소와 같은 극저온 유체를 이용한 액체냉각방식이나 기체냉각방식을 사용하여 왔다. 그러나 이러한 액체냉각방식이나 기체냉각방식은 초전도체에 대한 열적 안정성이 우수하기는 하지만, 극저온 유체를 지속적으로 공급해야 한다는 점과 유체를 사용함으로써 시스템의 구성이 매우 복잡해지는 단점을 가지고 있다. 이에 비해 전도냉각방식은 시스템의 구성이 용이하다는 점과 단지 전력만으로 시스템의 운전이 가능하다는 장점 그리고 폭넓은 냉각 온도범위를 갖을 수 있다는 장점 때문에 전도냉각방식으로 초전도 시스템을 냉각하는 데에 관심이 높아지고 있다.[1][2]

Fig.1은 초전도 자석을 2단형 냉동기를 이용하여 전도 냉각하는 초전도 시스템의 대표적인 개략도이다. 초전도 자석은 냉동기에 직접 접촉하여 전도 냉각되고 있다. 저온용기 내는 진공으로 대류에 의한 열손실을 막고 있으며, 초전도 자석은 기계적 지지대로 지탱하여 외부와의 전도

열전달 면적을 최소화하고, 초전도 자석에 대한 전류공급은 전류도입선을 통하여 이루어지고 있다. 전류도입선(current lead)은 모든 초전도 시스템에서 사용되는 주요 부품으로써 상온의 전류에서 극저온상태의 초전도자석(superconducting magnet)에 전류를 공급하는 역할을 한다. 전류도입선은 전기저항에 의한 발열이 적어야 하고 동시에 극저온으로의 열유입이 적어야 하므로, 높은 전기전도도와 낮은 열전도도를 가진 물질을 사용 제작하여야 한다. 또한 기존의 전류도입선에 사용되는 구리와 같은 금속재료의 전기저항과 열전도도는 Wiedemann-Franz 법칙에 따르므로 극저온으로의 열유입을 최소화하는데에는 그 한계가 있다.[3]

실제적으로 초전도 시스템에서의 가장 큰 부하는 금속 전류도입선에 의한 부하이다. 따라서 지금은 이중(binary)전류도입선 혹은 복합(hybrid)전류도입선의 형태로, 고온부는 금속재료, 저온부는 고온초전도체를 직렬로 연결한 형태로 제작되고 있다. 최적의 중간냉각온도가 결정되고 고온초전도부의 형상이 일정할 때, 금속부의 최적의 직경-길이의 관계가 존재한다는 것

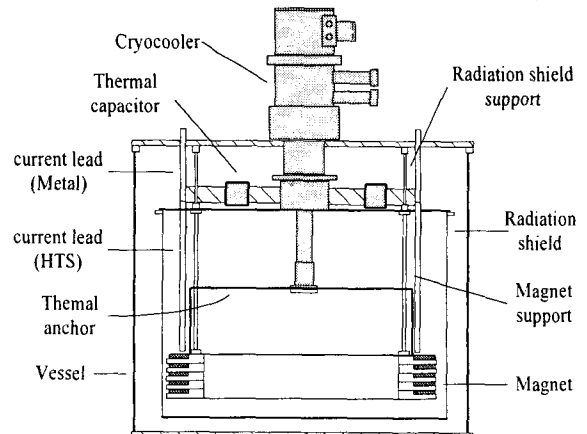


Fig. 1. Schematic diagram of a conduction-cooled superconducting system with intermediate cooling

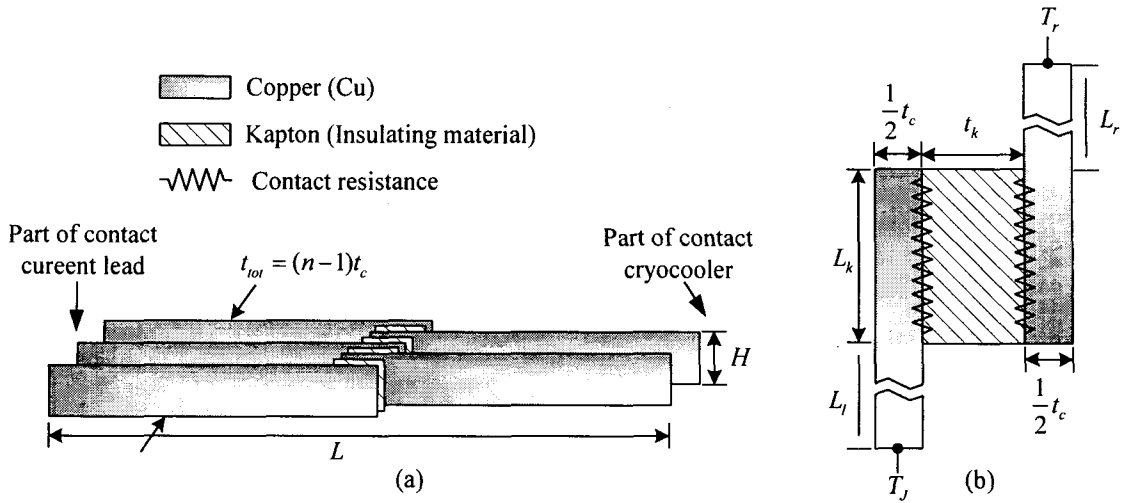


Fig. 2. Schematic diagram of thermal capacitor.

은 잘 알려진 사실이다.[4]

전류도입선을 중간냉각을 해야 하는데, 그 이유는 금속부전류도입선에서의 발열을 저감시켜 주어야 하기 때문이다. 또한, 전기적으로 절연을 시켜야하므로 열커패시터를 사용하는데, 여기서 열커패시터는 전류도입선을 냉각하는 역할을 하는 동시에 전기적 절연을 목적으로 제작되는 일종의 차단기역할을 하는 것을 말한다. 실제로 2단 냉동기(Two-stage cryocooler)에서 냉동기 1단의 온도를 중간냉각온도로 생각하는 경우가 많지만 일반적으로 전류도입선의 끝단에서의 온도는 이곳의 온도보다 높을 것으로 보아진다. 그러므로 열커패시터를 적절히 설계하여 온도차이를 줄이는 것은 매우 중요한 것이다. 본 연구는 열커패시터의 형상과 재료에 따른 중간냉각온도의 변화를 분석하여 실제 설계에 응용하는데 그 목적이 있다.

2. 해석 모델

2.1 열커패시터의 중간냉각온도

본 연구에서의 중간냉각온도의 계산은 Fig.2 (a)과 같이 극저온냉동기가 축방향으로 전도냉각하는 열커패시터를 대상으로 삼고 있다. 열커패시터 내부의 온도는 길이방향에 비해 두께방향의 온도 구배가 매우 작으므로 1차원(길이 방향) 열전도 문제로 간주 할 수 있다.[5] 열전도 방정식에 따라 중간냉각온도 T_J 는

$$T_J = T_r + \frac{Q \cdot \sum_i R_i}{n} \quad (1)$$

$$\sum_i R_i = \frac{L_l}{k_c H \cdot 1/2 t_c} + \frac{R''_{t,c}}{HL_k} + \frac{t_k}{k_k HL_k} + \frac{R''_{t,c}}{HL_k} + \frac{L_l}{k_c H \cdot 1/2 t_c} \quad (2)$$

이다. 여기서 T_r 은 2단 극저온냉동기의 1단의 온도를 의미하며 n 은 열저항을 합한 것의 개수를 말한다. 두께 t_{tot} , 열커패시터의 높이 H , 길이 L 을 변화 시켜 중간냉각온도를 계산할 수가 있다.

2.2 전류도입선(HTS)

HTS전류도입선은 상온부에는 금속을, 저온부에는 고온초전도체를 이용한 이중 전류도입선 금속부 전류도입선의 발열에 의해 열손실부하가 결정된다. 부하의 계산식은

$$Q_J = \sqrt{2 \int_{T_J}^{T_H} \rho_c \cdot k_c dT} - \frac{A_{HTS}}{L_{HTS}} \int_{T_L}^{T_J} k_{HTS} dT \quad (3)$$

이다.[] 금속부 전류도입선의 발열량에 관한 관계식은 식(1)과 같다.[4][6] 여기서 T_H , T_J , T_L 는 상온부, 중간냉각온도, 그리고 극저온 냉동기 2단에서의 온도를 의미한다. 금속의 전기적

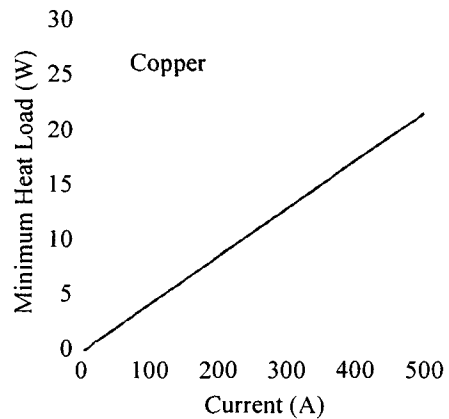


Fig.3. Minmun heat load of metal current lead for copper.

Table 1. Specification of a capacitor in the sample calculation

material	Thermal conductivity of copper	k_c	642 W/m · K
	Thermal conductivity of kapton	k_k	0.06 W/m · K
	Contact resistance	$R_{i,c}^*$	$5 \times 10^{-4} m^2 \cdot K/W$
operation	Temperature of first stage	T_L	80 K
shape	Thickness of copper	t_c	0.1 mm
	Thickness of kapton	t_k	0.2 mm
	Total thickness	t_{tot}	3 cm
	Total length	L	15 cm
	Height of capacitor	H	5 cm

비저항 ρ_c , 열전도도 k_c , 초전도자석으로 공급되는 전류 I 로 구성된다.[7] Fig.3.은 식(3)을 이용한 계산 결과로 500A의 전류가 흐를 경우 22W의 열손실 부하가 발생한다.

3. 결과 및 토론

열커패시터의 중간냉각온도를 계산하기 위하여 사용한 각종 제원은 Table.1에 나타나있다. 실제의 열커패시터는 본 제원에 나타난 것보다 복잡하고 다른 열손실이 발생할 수가 있지만 전도에 의한 것만 고려하여 중간냉각온도를 계산하는데 중점을 두었다.

Fig.4는 $L=15cm$, $H=5cm$ 일 때 열커패시터의 전체 두께를 변화시키며 열손실 부하가 중간냉각온도에 미치는 영향을 보여준다. 두께가 일정할 때 열손실 부하가 증가하면 중간냉각온도는 증가하는 것을 볼 수 있다. 두께가 두꺼워질수록 냉동기와 중간냉각온도의 온도차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어 500A의 전류가 흐를 경우 열손실 부하가 대략 20W 정도

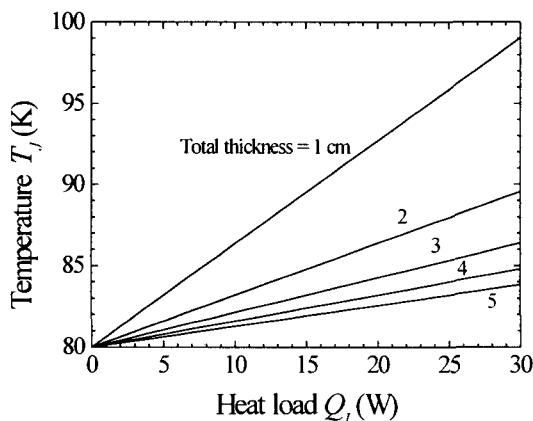


Fig. 4. Effect of heat load and total thickness on joint temperature.

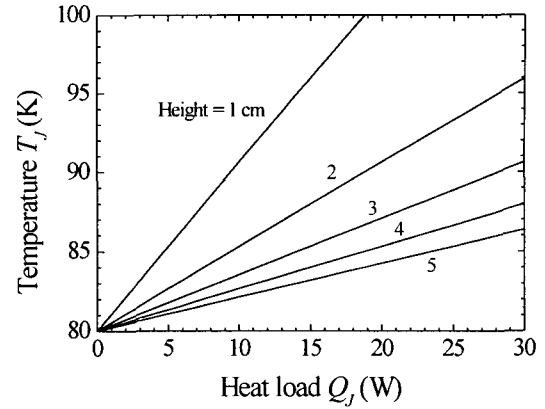


Fig. 5. Effect of heat load and height on joint temperature.

이고 온도차이가 5K이하가 되도록 하기 위해서는 전체 두께를 3cm이상 되도록 열커패시터를 설계하는 것이 적당하다.

Fig.5는 $L=15cm$, $t_{tot}=3cm$ 일 때 열커패시터의 높이를 변화시키며 열손실 부하가 중간냉각온도에 미치는 영향을 보여준다. 이 경우도 마찬가지로 열손실 부하가 증가할수록 중간냉각온도는 증가하는 것을 볼 수 있다. 또, 열커패시터의 높이가 길어지면 중간냉각온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 예를 들어 500A의 전류가 흐를 경우 열손실 부하가 대략 20W 정도이고 온도차이가 5K이하가 되도록 하기 위해서는 높이를 4cm이상 되도록 열커패시터를 설계해야 할 것이다. 또한 극저온냉동기의 2단 콜드헤드의 높이도 동시에 고려해야 하며, 즉 열커패시터의 설계시 온도차를 최소화하고 냉동기의 형상을 고려한 설계가 요구된다.

Fig.6은 $t_{tot}=3cm$, $H=5cm$ 일 때 열커패시터의 전체 길이를 변화시키며 열손실 부하가 중간냉각온도에 미치는 영향을 보여준다. 길이가

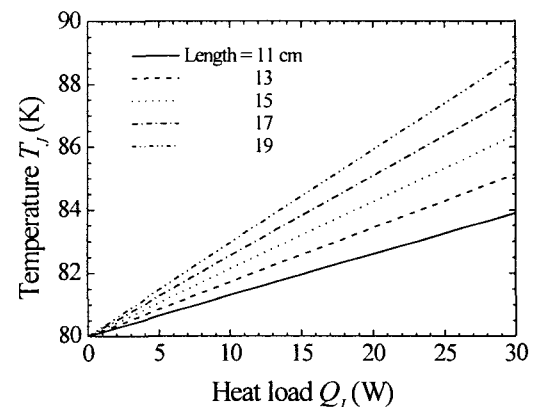


Fig. 6. Effect of heat load and length on joint temperature.

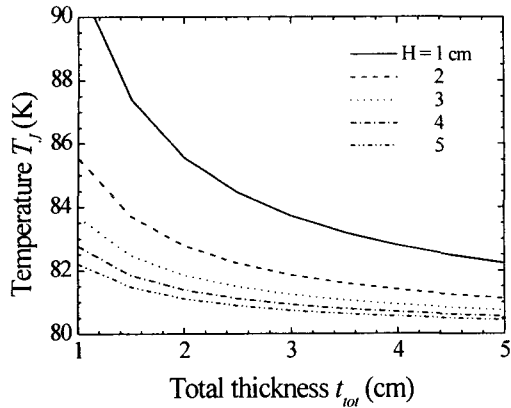


Fig. 7. Effect of total thickness and height on joint temperature.

일정할 때 열손실 부하가 증가하면 중간냉각온도는 증가하는 것을 볼 수 있으며, 길이가 길어질수록 냉동기와 중간냉각온도의 온도차이가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어 500A의 전류가 흐를 경우 열손실 부하가 대략 20W 정도이고 온도차이가 5K 이하가 되도록 하기 위해서는 전체길이를 15cm 이하로 열커패시터를 설계하는 것이 좋으며, 또한 냉동기와 전류도입선 사이의 거리도 함께 고려해서 설계해야 할 것이다.

마지막으로 Fig.7은 전류도입선으로 공급되는 전류가 80A 일 경우로 $Q=3.5 W$, $L=15cm$ 일 때 열커패시터의 높이를 변화시키며 열커패시터의 전체 두께가 중간냉각온도에 미치는 영향을 보여준다. 중간냉각온도를 열커패시터의 두께로 계산한 것이다. 높이가 늘어남에 따라 중간냉각온도와 극저온냉동기의 2단의 온도차가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 또, 열커패시터의 높이가 일정할 경우 두께가 증가할수록 온도차이가 줄어드는데 $t_{tot}=3cm$ 이상에서는 온도차이의 감소율이 매우 작은 것을 볼 수 있다. 이것은 전류도입선으로 공급되는 전류의 크기가 결정되고 길이가 결정되었다면 열커패시터의 두께를 무한히 증가시킬 필요가 없다는 것을 의미한다.

4. 결 론

이 연구에서는 전도 냉각되는 초전도시스템에서 전류도입선의 냉각을 위한 열커패시터의 열적 해석을 수행하였다. 열전도 방정식을 이용 전도에 의한 열손실 부하를 통해 열커패시터의 중간냉각온도를 계산하였다. 열커패시터의 길이, 전체 두께 그리고 높이의 변화가 중간냉각온도에 미치는 영향을 보였다. 열커패시터의 전체두께와 높이가 증가할수록 온도차가 감소하는 것을 볼 수 있는데, 하지만 온도차의 감소율이 매우 작은 것을 보였다. 이는 열커패시터의 전체두께와 높이를 무한히 증가시킬 필요가 없다는 것을 보여

준다. 이를 통해 전류도입선의 냉각을 위한 열커패시터의 설계에 있어 중요한 형상치를 얻어낼 수 있었다. 이 결과는 전류도입선을 사용하는 모든 초전도 시스템의 설계에 직접 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

(참 고 문 헌)

- [1] 권기범, 장호명, "극저온냉동기로 전도냉각되는 초전도 시스템의 열적 안정성", 한국초전도저온공학회 논문지, 3권 1호, pp. 56-63, 2001
- [2] 송성제, 장호명, "극저온냉동기로 냉각되는 이중전류도입선의 최적설계", 공기조화냉동공학회, 제9권 제4호, pp.552-560, 1997
- [3] 장호명, 박정수, 김성래, 김형진, 진홍범, 이봉근, "전도냉각형 저온용기에서 중간냉각의 최적화", 한국초전도저온공학회 학술대회 논문집, pp. 155-158, 2001
- [4] H.M. Chang, S.W. Van Sciver, "Thermodynamic optimization of conduction-cooled HTS current leads", Cryogenics, vol.38, no.7, pp.729-736, 1998
- [5] F.P. Incropera, "Introduction to Heat Transfer", John Wiley & Sons, Inc., 1996
- [6] R.F. Barron, "Cryogenic Systems", Oxford, 1985
- [7] K. Maehata, K. Ishibashi and Y. Wakuta, "Design chart of gas-cooled current leads made of copper of different RRR values" Cryogenics, vol34, no11, pp. 935-940, 1994