

액체/전도냉각형 초전도 시스템에서 전류도입선의 열적 해석

권기범, 김형진*, 정은수, 장호명
 홍익대학교 기계 시스템·디자인공학과, 홍익대학교 과학기술 연구소*

Thermal analysis of Current lead for Liquid/Conduction cooling on Superconducting system

Ki Beom Kwon, Hyung Jin Kim*, Eun Soo Jeong, Ho-Myung Chang
 Department of Mechanical and System Design Engineering Hong Ik University
 Research Institute of Science & Technology, Hong Ik University*

kwon2100@dreamwiz.com

Abstract - Intermediate cooling for current lead is used of thermal link in conduction cooling and cooled of itself in liquid cooling because it is put in liquid. If a existing formula for cooling load and optimal diameter-length of current lead is applied, it generate some more cooling load. Therefore, variation of thermal link height and holding depth in liquid is considered. This result is used of reducing cooling load of current lead occupying most of superconducting system load and applying liquid/conduction cooling systems.

1. 서 론

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 최소화 하는데에는 그 한계가 있다. 또한, 금속부의 최적의 직경-길이의 관계가 존재하는 것 잘 알려져 있다.[1]

전도 냉각의 경우는 전류도입선의 중간냉각을 위해 서멀링크(Thermal Link)를 사용할 수 있고, 액체 냉각의 경우는 액체에 전류도입선이 담기게 되므로 자연적인 중간냉각의 효과를 얻을 수 있다. 하지만 여기서 간과하지 말아야 할 것은 전도냉각시 전류도입선과 닿는 서멀링크의 높이가 냉동부하에 미치는 영향과 액체 냉각시 냉각매체인 액체에 담겨지는 전류도입선의 높이가 냉동부하에 미치는 영향을 반드시

고려해야 한다는 것이다. 액체/전도냉각시 전류도입선의 냉동부하를 최소화하는 최적 설계를 위해 본 연구를 수행하였다.[2]

2. 본 론

2.1 해석모델

본 연구에서는 액체냉각과 전도냉각의 경우로 구분하여 액체질소에 담기는 전류도입선의 높이와 서멀링크의 높이가 전류도입선의 냉동부하에 미치는 영향을 알아보려고 한다. Fig.1에서와 보는것과 같이 두가지경우로 나누어 1차원 열전달 문제로 간주하여 해석하였다.

금속부의 열전도도 k 와 비저항 ρ 가 일정하다고 가정하여 금속부 온도의 해석적인 해를 구하고, 서멀링크의 단위높이당 열저항 R_{th} 와 높이 H , 액체질소에 담긴 전류도입선의 높이 H 가 금속부의 최적길이와 중간냉각부하 Q_j 에 미치는 영향을 알아보았다.

서멀링크와 접하고 있지 않은 영역 (1)의 온도 T_1 과 경우1의 영역 (2)의 온도 T_{21} 와 경우2의

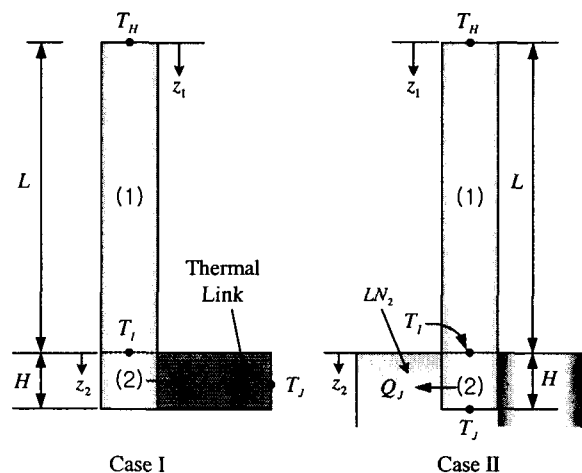


Fig. 1. Schematic diagram of current leads.

T_{2II} 의 지배방정식들은 다음과 같다. 영역(1)의 경우에는 경우1과 경우2가 동일한 지배방정식을 가진다.[3]

$$k \frac{d^2 T_1}{dz_1^2} + \frac{\rho I^2}{A^2} = 0 \quad (1)$$

$$k \frac{d^2 T_{2I}}{dz_2^2} + \frac{\rho I^2}{A^2} - \frac{T_{2I} - T_I}{AR_{th}} = 0 \quad (2)$$

$$k \frac{d^2 T_{2II}}{dz_2^2} + \frac{\rho I^2}{A^2} - \bar{h}(T_{2II} - T_\infty) = 0 \quad (3)$$

여기서 T_I 는 냉동기 1단의 온도이다. 경계조건들은 경우1과 경우2 동일하게 $z_1=0$ 에서 $T_1 = T_H$, $z_1 = L$ 에서 $T_1 = T_I$ 이고, $z_2=0$ 에서 $T_2 = T_I$, $z_1 = H$ 에서 $dT_2/dz_2=0$ 이다. 영역 (1)과 (2) 사이의 경계에서의 온도 T_I 는 아직 정하여지지 않은 값이다.

영역(1)과 (2)의 온도 분포를 구하면 다음과 같다

$$T_1 = T_H - \frac{T_H - T_I}{L} z_1 + \frac{\rho I^2}{2kA^2} (Lz_1^2 - z_1^2)$$

$$T_{2I} = T_I + \left(T_I - T_I - \frac{\rho I^2 R'_{th}}{A} \right) \times \frac{\cosh \left[\frac{H - z_2}{\sqrt{kAR'_{th}}} \right]}{\cosh \left[\frac{H}{\sqrt{kAR'_{th}}} \right]} + \frac{\rho I^2 R'_{th}}{A} \quad (4)$$

$$T_{2II} = T_\infty + \left(T_I - T_\infty - \frac{\rho I^2}{hA^2} \right) \times \frac{\cosh \left[\sqrt{\frac{h}{k}} (H - z_2) \right]}{\cosh \left[\sqrt{\frac{h}{k}} H \right]} + \frac{\rho I^2}{hA^2} \quad (5)$$

전류도입선의 중간냉각부하를 구하기 위하여 식 (2)와 (3)을 $z_2=0$ 에서 H 까지 적분하면 다음과 같다.

$$\left(kA \frac{dT_2}{dz_2} \right)_{z_2=H} - \left(kA \frac{dT_2}{dz_2} \right)_{z_2=0} + \frac{\rho I^2}{A} H - \int_0^H Q' A dz_2 = 0 \quad (6)$$

식 (6)의 좌변의 첫 번째 항은 0이고, 두 번째 항은 $Q_1(z_1=L)$ 과 같으며, 마지막 항은 경우1에서는 냉동기 1단으로 전달되는 중간냉각부하 Q_J 이며, 경우2에서는 액체질소에 전달되는 냉각

부하 Q_J 이다.

금속의 열전도도 k 와 비저항 ρ 가 일정하고, $R'_{th}=0$, $\bar{h}=\infty$, $H=0$ 인 이상적인 경우의 최소중간냉각부하와 최적길이는 다음과 같다

$$Q_0 = \sqrt{2\rho k(T_H - T')} \quad (7)$$

$$L_0 = \frac{A}{I} \sqrt{\frac{2k}{\rho}(T_H - T')} \quad (8)$$

여기서 I 는 전류도입선에 인입되는 전류이며, T' 는 경우1에서는 T_I , 경우2에서는 T_∞ 를 의미한다.

2.2 무차원변수

Q_J 를 Q_0 로 무차원하면 다음과 같다.

$$\frac{Q_J}{Q_0} = \frac{\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{B^2} \right) B \tanh \left[B \frac{H}{L_0} \right] - \frac{1}{2} \frac{L}{L_0}}{1 + \frac{L}{L_0} B \tanh \left[B \frac{H}{L_0} \right]} + \frac{1}{2} \frac{L}{L_0} + \frac{H}{L_0} \quad (8)$$

여기서 B 는 다음과 같이 정의된다.

$$B_{CaseI} = \frac{L_0}{\sqrt{kAR'_{th}}}, \quad B_{CaseII} = L_0 \sqrt{\frac{\bar{h}}{k}} \quad (9)$$

영역 (1)의 온도 T_1 , 영역 (2)의 온도 T_2 , 그리고 영역 (1)과 (2)의 경계의 온도 T_I 를 무차원하면 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\theta_1(z_1^*) = \frac{T_1 - T'}{T_H - T'} = 1 - (1 - \theta_I) z_1^* + \left(\frac{L}{L_0} z_1^* - z_1^{*2} \right) \quad (10)$$

$$\theta_2(z_2^*) = \frac{T_2 - T'}{T_H - T'} = \left(\theta_I - \frac{2}{B^2} \right) \frac{\cosh \left[B \left(\frac{H}{L_0} - z_2^* \right) \right]}{\cosh \left[\frac{BH}{L_0} \right]} + \frac{2}{B^2} \quad (11)$$

$$\theta_I = \frac{T_I - T'}{T_H - T'} = 1 - \frac{\left(1 - \frac{2}{B^2} \right) B \frac{L}{L_0} \tanh \left[B \frac{H}{L_0} \right] - \left(\frac{L}{L_0} \right)^2}{1 + B \frac{L}{L_0} \tanh \left[B \frac{H}{L_0} \right]} \quad (12)$$

여기서 $z_1^* = z_1/L_0$, $z_2^* = z_2/L_0$ 이다.

Table 1. Specification of current leads in the sample calculation

Common	I	300 A
	k	40.5 W/m-K at 100K
	ρ	$4.15 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ at 100K
	T_H	300K
	R'_{th}	0.02 m-K/W
Case I	T_J	80K
	\bar{h}	464 W/m ² K
Case II	T_∞	77K

식 (8)과 (10)-(12)에서 전류도입선의 중간 냉각부하 Q_J 와 온도분포는 3개의 무차원변수 B , L/L_0 , H/L_0 에 의하여 결정되는 것을 알 수 있다. 식 (9)에서 알 수 있는 바와 같이 B (Case I)는 서멀링크의 열저항의 무차원변수로 열저항이 작을수록 B 는 증가하고, B (Case II)는 대류에 의한 무차원변수로 열전달계수가 클수록 B 값은 증가한다. L/L_0 와 H/L_0 는 각각 전류도입선 금속부의 길이와 thermal link의 높이, 액체질소에 담긴 높이를 무차원한 변수들이다.

3. 결과 및 토론

높이 H 가 중간냉각부하 Q_J 에 미치는 영향을 알아보기 위해 사용한 제원은 표.1에 나타so었다. (4.5)

Fig. 2은 B 가 매우 클 때, 즉 thermal link의 열저항 R'_{th} 이 매우 작고 열전달계수가 매우 클 경우에 대하여 L/L_0 와 H/L_0 가 중간냉각부하 Q_J 에 미치는 영향을 보여준다. $H/L_0 = 0.0005$ 일 때 $L/L_0 = 1$ 에서 가 1로 접근하는

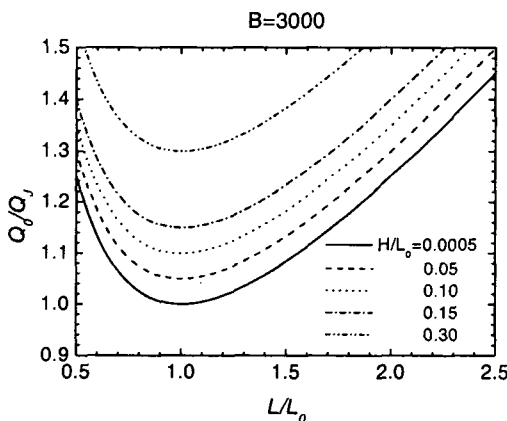


Fig. 2. Effect of L and H on cooling load (B=3000)

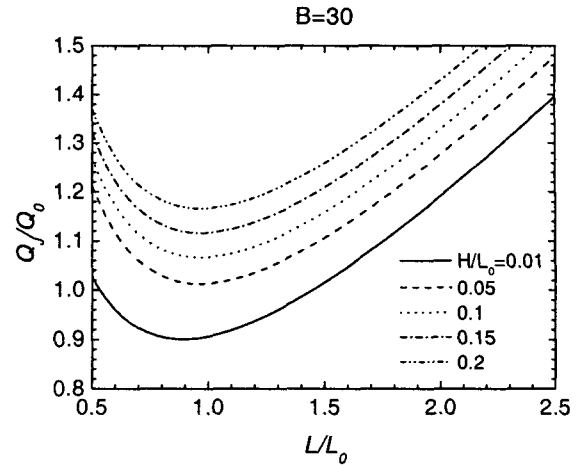


Fig. 3. Effect of L and H on cooling load (B=30)

것을 볼 수 있는데, 이것은 R'_{th} 과 H 가 무시할 수 있을 정도로 작고 열전달계수가 매우 클 경우 Q_J 는 이상적인 경우의 최소중간냉각부하 Q_0 가 된다는 것을 나타낸다.

Fig. 3과 4에 $B=30$ 인 경우에 H/L_0 과 L/L_0 의 변화가 Q_J 와 금속부의 최저온도(금속부와 초전도체의 접합부)에 미치는 영향을 나타내었다. H/L_0 가 정해졌을 경우 Q_J 가 최소가 되고 금속부와 초전도체 접합부에서 발생하는 금속부의 최저온도가 가장 낮아지는 L/L_0 가 존재하는 것을 볼 수 있다. $H/L_0 = 0.01$ 인 경우 Q_J 의 최소값은 이상적인 경우의 최소중간냉각부하 Q_0 보다 작아지나 최저온도가 너무 높아서 초전도체가 초전도특성을 유지할 수 없다는 것을 Fig. 4에서 볼 수 있다. H/L_0 가 커질수록 금속부의 최저온도에 미치는 L/L_0 의 영향은 감소

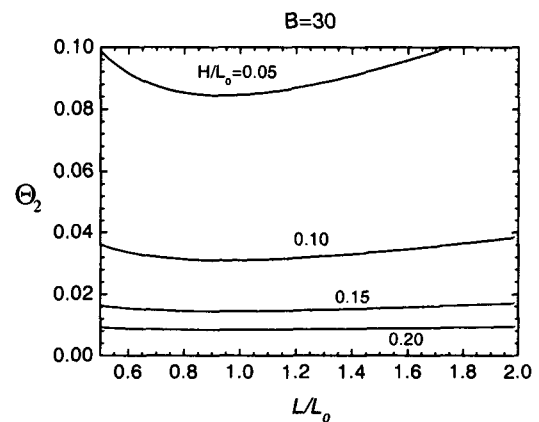


Fig. 4. Effect of L and H on temperature distribution of current lead end (B=30)

하는 것을 볼 수 있다. $H/L_0 = 0.15, 0.2$ 인 경

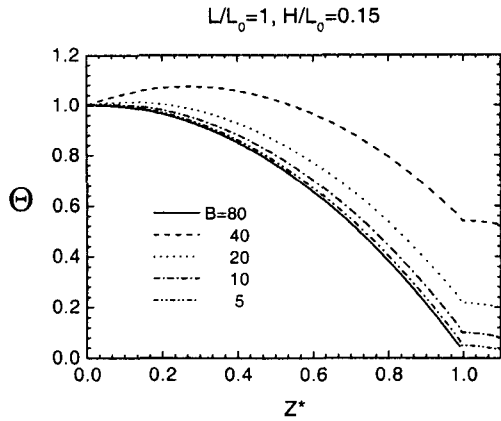


Fig. 5. Effect of B on temperature distribution

우 금속부의 최저온도는 각각 83K, 82K인 것을 추정된다.

Fig. 5는 $H/L_0=0.15$ 이고 $L/L_0=1.0$ 일 때 B 의 크기가 온도분포에 미치는 영향을 나타낸다. $B=40$ 이나 80 인 경우에는 z^* 가 커지는 방향, 즉 전류도입선의 중간냉각부위로 갈수록 온도가 낮아지고, $z^*=0$ 에서의 온도구배는 0인 것을 볼 수 있다. 그러나, B 가 작으면 열저항이 크기 때문에 중간냉각을 통하여 냉동기 1단으로 열이 충분히 전달되지 못하므로 온도가 최고가 되는 지점이 금속부 중간에 위치한다. B 가 증가할수록 온도는 낮아진다. $T_H=300K$ 이고 $T_J=80K$ 라고 가정할 경우 $B=5, 10, 20$ 일 때의 최저온도는 각각 약 190K, 122K, 93K이다. 전도냉각인 경우 금속부의 하단과 연결되는 초전도체의 온도가 약 100K 이하가 되어야 초전도 특성을 나타내므로 B 가 20이상 되어야 한다는 것을 알 수 있다.

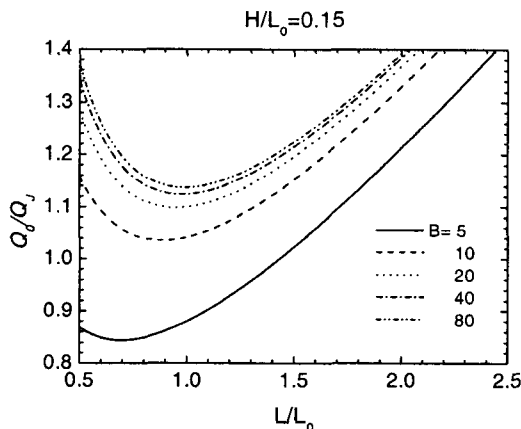


Fig. 6. Effect of B on cooling load

$H/L_0=0.15$ 인 경우에 L/L_0 와 B 가 중간냉각 부하 Q_0 에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다.

B

가 작은 경우에는 Q_0 가 최소가 되는 L/L_0 가 1보다 작으나, B 가 증가할수록 1로 접근해 가는 것을 볼 수 있다. B 가 작아질수록 Q_0 가 감소하나, Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 $B=5$ 와 10일 경우에는 최저온도가 너무 높아서 전류도입선의 역할을 하지 못한다. $B=30$ 일 때 Q_0 의 최소값은 이상적인 중간냉각부하 Q_0 의 1.1배인 것을 볼 수 있고, L/L_0 의 최적값은 약 0.95이다.

4. 결 론

전도냉각의 경우는 전류도입선의 중간냉각을 위해 서멀링크를 사용 중간냉각을 할 수 있고, 액체냉각의 경우는 액체에 전류도입선이 담기게 되므로 자연적인 중간냉각의 효과를 얻을 수 있다. 기존에 알려진 이상적인 전류도입선의 냉각 부하와 최적 직경-길이비를 사용하게 되면 그 보다 많은 부하가 발생하게 된다. 따라서 전도냉각 시에는 서멀링크의 높이와 액체냉각시에는 액체 질소에 담긴 전류도입선의 높이에 따른 냉각부하의 변화와 최적비를 고려해야만 한다. 위의 계산 결과를 사용하게 되면 냉각시스템 구성시 가장 많은 부하를 차지하는 전류도입선의 냉각부하를 최소화 할 수 있으며, 액체/전도냉각 모두에 적용할 수 있다.

감사의 글

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

(참 고 문 헌)

- [2] 송성제, 장호명, "극저온냉동기로 냉각되는 이중전류도입선의 최적설계", 공기조화냉동공학회, 제9권 제4호, pp.552-560, 1997
- [1] H.M. Chang, S.W. Van Sciver, "Thermodynamic optimization of conduction-cooled HTS current leads", Cryogenics, vol.38, no.7, pp.729-736, 1998
- [3] F.P. Incropera, "Introduction to Heat Transfer", John Wiley & Sons, Inc., 1996
- [4] R.F. Barron, "Cryogenic Systems", Oxford, 1985
- [5] K. Maehata, K. Ishibashi and Y. Wakuta, "Design chart of gas-cooled current leads made of copper of different RRR values" Cryogenics, vol.34, no.11, pp. 935-940, 1994