

전도냉각형 저온용기에서 중간냉각의 최적화

장호명, 박정수, 김성래*, 김형진**, 진홍범**, 이봉근**
 홍익대학교 기계공학과, (주)CVE*, (주)덕성**

Optimization of intermediate cooling in conduction-cooled cryostat

H.M. Chang, J.S. Park, S.R. Kim*, H.J. Kim**, H.B. Jin**, B.G. Lee**
 Hong Ik University, Cryogenics & Vacuum Engineering*, Duksung Inc.**

hmchang@hongik.ac.kr

Abstract - An intermediate cooling is indispensable to reduce the refrigeration power at superconducting system that is cooled conductively by a cryocooler without liquid cryogenes. The cooling load at the intermediate stage is caused by the mechanical supports, the radiation shield and the current lead. From the cooling load calculation, a thermodynamic analysis that take into account the temperature-dependent properties of the materials and the actual performance of the cryocooler is developed. For any given physical dimensions of the various components, it is shown that there exist a unique optimum for the intermediate temperature to minimize the overall refrigeration power. The results of this study can be usefully applied to the selection of the cryocooler as well as the design of the conduction-cooled cryostat.

1. 서 론

초전도 시스템의 냉각을 위해서는 액체헬륨이나 액체질소를 이용하는 방식이 가장 널리 사용되고 있다. 이러한 액체냉각 방식은 초전도체를 안정적으로 일정한 온도로 유지할 수 있는 장점이 있지만, 극저온 액체를 주기적으로 공급해야만 하고 시스템의 구성이 매우 복잡하고 제한적이라는 단점을 가지고 있다. 최근에는 액체를 전혀 사용하지 않고 밀폐사이클로 운전되는 극저온 냉동기로 직접 전도냉각하는 시스템에 많은 관심을 갖게 되었다.

전도냉각 방식의 초전도 시스템은 액체냉각 방식에 비해 매우 여러 가지의 장점을 가지고 있다. 극저온 액체를 취급하기 위한 전문가가 필요 없이 단순히 스위치만을 켜서 작동하므로 운전이 용이하고, 시스템의 구성도 간단하여 소형화, 경

량화가 가능하다. 뿐만 아니라, 저온액체의 저장과 이송에 따른 열손실을 줄일 수 있고, 시스템의 냉동부하도 줄어들어 에너지 면에서 훨씬 경제적이라고 할 수 있다. 또 액체냉각의 경우 냉동온도가 액체의 포화온도로 제한적인 반면, 전도냉각방식에서는 넓은 범위에서 임의의 냉동온도의 설정이 가능하다.

전도냉각 방식의 초전도시스템에서는 4 K까지 도달하는 2단형 GM(Gifford-McMahon) 사이클의 극저온 냉동기를 가장 널리 사용하고 있다. Fig.1은 초전도 자석을 2단형 냉동기를 이용하여 전도냉각하는 초전도 시스템을 도식적으로 나타내고 있다. 초전도 자석은 냉동기의 제2단(second stage)에 금속을 통하여 전도냉각되고 있다. 시스템은 단열을 위해 진공용기로 구성되며, 초전도 자석은 자체의 무게와 진동에 대비하여 기계적 지지대(mechanical support)로

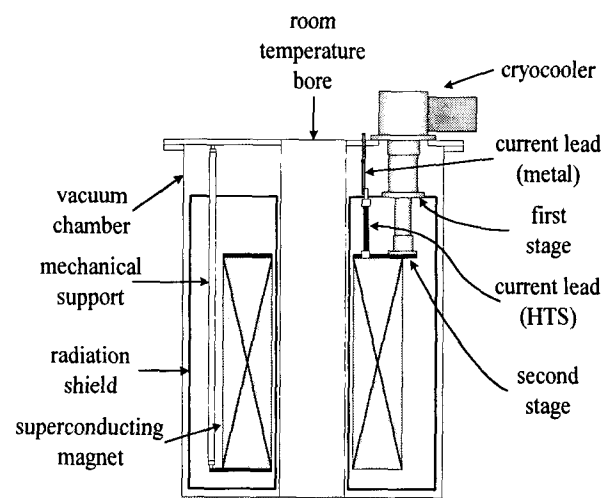


Fig.1. Schematic representation of a superconducting system conduction-cooled by two-stage cryocooler

유지된다. 또한 상온의 전원으로부터 극저온의

초전도 자석에 대한 전류공급은 전류도입선 (current lead)을 통하여 이루어지고 있다. 따라서 극저온으로 초전도 자석을 유지하려면, 기계적 지지대와 전류도입선을 통한 열전도, 그리고 진공공간을 통한 복사열이 가장 중요한 열유입의 원인이 된다. 복사에 의한 극저온으로의 열유입을 줄이기 위해서 복사차폐판(radiation shield)을 설치한다.

2단형 냉동기를 사용하는 전도냉각 방식의 경우, 냉동기의 제2단으로는 초전도 자석을 냉각시키고, 제1단으로는 기계적 지지대, 복사차폐판 및 전류도입선에 대한 중간냉각(intermediate cooling)을 수행할 수 있다. 중간냉각은 추가적인 냉동부하이기 하나, 냉동이 훨씬 어려운 극저온으로의 열유입을 줄임으로써 종합적인 냉동이 더욱 효율적일 수 있다.

중간냉각을 가장 효과적으로 수행하기 위해서는 열역학 관점에서 냉동에 필요한 소요동력을 최소화해야 한다. Bejan과 Smith[1]는 기계적 지지대에 대한 중간냉각의 최적화를 수행한 바 있고, Chang과 Van Sciver[2][3]는 초전도 전류도입선에 대한 중간냉각의 최적화 방법을 제시하였다. 그러나 실제 저온용기의 설계에 있어서는 여러 부품에 대한 중간냉각이 동시에 이루어지므로, 각 부품에 대한 최적화보다는 종합적인 최적화가 필요하다.

본 연구에서는 2단형 냉동기를 이용한 전도냉각형 저온용기에서 기계적 지지대, 복사 차폐판, 전류도입선을 모두 포함하는 중간냉각에 연구를 목표로 하고 있다. 이를 위하여, 실온과 초전도 자석의 온도가 주어졌을 때, 중간냉각온도에 따른 제1단과 제2단에서의 냉동부하를 계산하고, 실제 냉동기를 이용할 때 두 단에서의 소요되는 동력의 합을 최소로 하는 최적의 중간냉각온도를 제시하고자 한다.

2. 냉동부하 및 소요동력

전도냉각형 저온용기의 냉동부하는 Fig.2에서 처럼 상온에서 초전도 자석으로의 열유입에 의하여 발생하게 되는데, 기계적 지지대와 전류도입선으로의 전도열전달과 진공공간을 통한 복사열전달로 이루어지고 있으며, 냉동기의 제1단에서 중간냉각을 수행하고 초전도 자석이 위치하고 있는 극저온에서 냉동기의 제2단으로 냉각한다. 중간냉각으로 인해 제1단에서의 냉동부하는 증가하지만, 훨씬 낮은 온도인 제2단에서 수행해야 하는 냉동부하는 감소한다.

2.1 기계적 지지대

기계적 지지대를 통한 전도 열손실은 지지대의 기하학적 형상과 재질에 의해 결정된다. 단면적이 일정한 경우 열전도 손실은 1차원 열전도 방정식에 의해 표현된다. 먼저 중간냉각을 하지 않는 경우에 열유입은

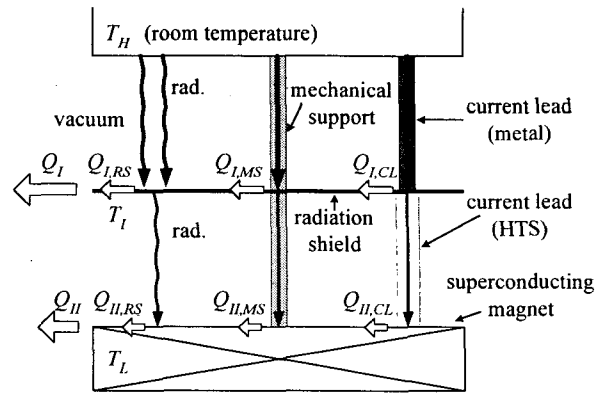


Fig.2. Energy balance at conduction-cooled superconducting system with intermediate cooling

$$Q_{MS} = \frac{A}{L} \int_{T_L}^{T_H} k(T) dT \quad (1)$$

와 같다. 여기서 열전도도 k 는 온도에 대한 함수로써 양단의 온도 T_H 와 T_L 사이에서 적분하여 열손실을 계산한다. A 와 L 은 각각 지지대의 단면적과 길이를 나타낸다. 한편, 중간냉각을 할 경우의 냉동부하는 제1단과 제2단에 대해 각각

$$Q_{I,MS} = \frac{A}{L_I} \int_{T_I}^{T_H} k(T) dT - \frac{A}{L-L_I} \int_{T_L}^{T_I} k(T) dT \quad (2)$$

$$Q_{II,MS} = \frac{A}{L-L_I} \int_{T_L}^{T_I} k(T) dT$$

이 된다. 여기서 L_I 는 상온부에서 중간냉각 지점까지의 길이이고, 중간냉각온도 T_I 를 기준으로 1단과 2단에서의 냉동부하를 구할 수 있다.

2.2 복사 차폐판

진공단열용기에서는 잔류기체를 통한 대류나 전도에 의한 열전달이 매우 작으므로 복사로 인한 열전달이 가장 중요하다. 복사 차폐판을 냉각하지 않고 설치한 경우 복사에 의한 냉동부하는

$$Q_R = \frac{\sigma (T_H^4 - T_L^4)}{\frac{1-\epsilon_c}{\epsilon_c A_c} + \frac{1}{A_c F_{cRS}} + \frac{1-\epsilon_{RS}}{\epsilon_{RS} A_{RS}}} \quad (3)$$

$$= \frac{\sigma (T_I^4 - T_L^4)}{\frac{1-\epsilon_{RS}}{\epsilon_{RS} A_{RS}} + \frac{1}{A_{RS} F_{RSm}} + \frac{1-\epsilon_m}{\epsilon_m A_m}}$$

로 계산할 수 있는데, 여기서 σ 는 Stephan-Boltzman 상수이며, A 는 표면적, F 는 복사형상 계수, ϵ 은 재질과 표면의 연마정도에 의해 결정되는 방사율이다.

극저온으로의 복사열유입을 더욱 효과적으로

줄이기 위해서는 복사 차폐판을 생각해야 한다. 여기서, 차폐판의 온도를 중간냉각온도로 할 때, 복사에 의한 열손실은 제1단과 제2단에서 각각 다음과 같다.[4][5]

$$Q_{I,RS} = \frac{\sigma(T_H^4 - T_I^4)}{\frac{1-\epsilon_c}{\epsilon_c A_c} + \frac{1}{A_c F_{cRS}} + \frac{1-\epsilon_{RS}}{\epsilon_{RS} A_{RS}}} - \frac{\sigma(T_I^4 - T_L^4)}{\frac{1-\epsilon_{RS}}{\epsilon_{RS} A_{RS}} + \frac{1}{A_{RS} F_{RSm}} + \frac{1-\epsilon_m}{\epsilon_m A_m}} \quad (4)$$

$$Q_{II,RS} = \frac{\sigma(T_I^4 - T_L^4)}{\frac{1-\epsilon_{RS}}{\epsilon_{RS} A_{RS}} + \frac{1}{A_{RS} F_{RSm}} + \frac{1-\epsilon_m}{\epsilon_m A_m}}$$

2.3 HTS 전류도입선

HTS 전류도입선은 상온부에서는 금속을, 저온부에서는 고온초전도체를 사용한 이중 전류도입선으로 금속과 고온초전도체의 열전도뿐만 아니라 금속의 발열에 의해 냉동부하가 결정된다.[2]

$$Q_{I,CL} = I \sqrt{2 \int_{T_I}^{T_H} \rho_{cu} k_{cu} dT} - \frac{A_{HTS}}{L_{HTS}} \int_{T_L}^{T_I} k_{HTS} dT \quad (5)$$

$$Q_{II,CL} = \frac{A_{HTS}}{L_{HTS}} \int_{T_L}^{T_I} k_{HTS} dT$$

여기서 I 는 초전도 자석으로 공급되는 전류이고, ρ 는 금속의 전기저항율이다. 전류 I 를 포함한 항은 금속전류도입선의 크기를 최적화한 경우의 최소열유입이다. 또한 HTS를 통한 열유입은 HTS가 초전도상태에서 발열이 없다는 가정 하에 열전도도 k_{HTS} 가 온도에 대한 함수로써 양단의 온도 T_I , T_L 사이에서 적분한 것이다. 이 가정은 중간냉각온도 T_I 를 통하여 검증하여야 한다.

한편, HTS 전류도입선은 중간냉각이 없이는 사용할 수 없으므로 중간냉각을 하지 않은 경우의 냉각은 금속만으로 이루어진 전류도입선을 사용해야 하며, 최적화된 형상의 경우의 냉동부하는 다음과 같다.

$$Q_{CL} = I \sqrt{2 \int_{T_L}^{T_H} \rho_{cu} k_{cu} dT} \quad (6)$$

2.4 냉동기 소요 동력

중간냉각을 하는 경우, 식 (2), (4), (5)에서 계산한 각각의 냉동부하를 합하여 계산한다. 냉동기의 제1단과 제2단에 대해 각각

$$\begin{aligned} Q_I &= Q_{I,MS} + Q_{I,RS} + Q_{I,CL} \\ Q_{II} &= Q_{II,MS} + Q_{II,RS} + Q_{II,CL} \end{aligned} \quad (7)$$

인데, 이 두 냉동부하는 서로 다른 온도를 가지고 있다. 따라서 열역학 관점에서 이 두 냉동을 동시에 수행하기 위한 냉동기의 소요동력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} W &= W_I + W_{II} \\ &= \frac{Q_I}{COP_I} + \frac{Q_{II}}{COP_{II}} \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서 COP 는 냉동기의 성능계수(coefficient of performance)로 냉동용량에 대한 소요동력의 비로 정의된다. 냉동기의 제1단과 제2단의 성능계수는 다르며, 각 단의 온도의 함수로 나타낼 수 있다. 여기서는 제1단과 제2단의 COP_I , COP_{II} 는 Chang과 Van Sciver[2]에 따라 각각

$$\begin{aligned} \frac{1}{COP_I} &= \frac{(T_H - T_I)(T_I + 1115)}{T_I(0.4198T_I + 2.740)} \\ \frac{1}{COP_{II}} &= \frac{(T_H - T_L)(T_L + 84.81)}{T_L(0.1202T_L + 1.316)} \end{aligned} \quad (9)$$

으로 계산하였다. 실제로 실온과 초전도 자석의 온도가 일정하다면, T_H 와 T_L 은 상수이므로, COP_I 는 T_I 만의 함수이고, COP_{II} 는 상수로 간주할 수 있다.

중간냉각이 없는 경우, 식 (1), (3), (6)의 냉동부하가 모두 T_L 의 온도에 주어지므로, 이 냉동을 수행하기 위한 냉동기 소요동력은 냉동기 제2단의 성능계수인 COP_{II} 으로부터 계산한다.

$$W = \frac{Q_{MS} + Q_R + Q_{CL}}{COP_{II}} \quad (10)$$

Table 1. Specifications of the components for sample calculation

mechanical support (4 each)	material	SUS
	diameter	5 mm
	length	200 mm
intermediate length from warm end	length	100 mm
	length	100 mm
cryostat	material	SUS
	emissivity	0.05
	surface area	2.6 m ²
radiation shield	material	copper
	emissivity	0.02
	surface area	1.2 m ²
superconducting magnet	surface	polished copper
	emissivity	0.02
	surface area	0.6 m ²
metallic current lead	material	copper
	length	100 mm
HTS current lead	material	Bi-2223 (bulk)
	length	100 mm
current		100 A

Table 2. Summary of the optimal cooling condition ($T_H=300$ K, $T_L=4$ K)

	without intermediate cooling		with intermediate cooling					
	Q (W)	W (kW)	T_I (K)	Q_I (W)	W_I (kW)	Q_{II} (W)	W_{II} (kW)	W(kW)
mechanical support	0.79	44.6	86.6	0.71	1.39	0.32	1.83	3.22
radiation	2.61			9.29		0.03		
current lead	8.79*			8.43**		0.16**		

*all-metal current lead, **HTS-metal current lead

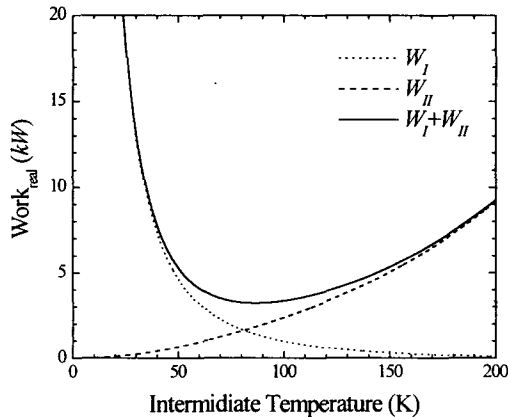


Fig.3. Overall refrigeration power as a function of intermediate temperature

3. 결과 및 토론

전도냉각형 저온용기에서의 중간냉각온도를 계산하기 위하여 전형적인 저온용기의 부품을 선정하여 Table 1에 나타내었다. 실제의 저온용기는 본 재원에 나타난 것보다 복잡하고 예상치 못한 열손실이 발생할 수 있지만, 여기서는 열역학적 에너지균형을 기초로 한 최적화된 중간냉각온도의 예시를 목적을 두고 있다.

Fig.3은 이 경우, 중간냉각온도에 따른 냉동기의 소요동력을 그래프로 나타내고 있다. 중간냉각온도가 증가함에 따라 제2단의 냉동에 소요되는 동력은 증가하지만 제1단의 냉동에 소요되는 동력을 감소한다. 따라서 두 동력의 합인 전체 동력은 감소하다가 다시 증가하여 냉동기 소요동력을 최소로 하는 최적의 중간냉각온도가 존재함을 알 수 있다. 이 경우 최적의 중간냉각온도는 약 86.6 K이며, 이 때의 최소 소요동력은 약 3.22 kW로 계산되었다.

이러한 최적의 중간냉각의 조건을 중간냉각이 없는 경우와 비교하여 Table 2.에 요약하였다. 냉동부하에 있어서는 중간냉각을 하지 않은 경우와 중간냉각을 수행한 경우가 큰 차이를 보이지 않는 듯 하지만, 실제로 중간냉각을 하는 경우의 제1단 냉동은 제2단에 비해 매우 높은 온도에서 냉동을 수행하므로 소요동력에서는 매우 큰 차이를 나타내고 있다. 이 경우에서 최적화된 중간냉

각은 냉동에 필요한 실제 소요동력은 중간냉각이 없는 경우의 약 3.7%에 불과함을 알 수 있다.

이 경우 최적의 중간냉각의 온도인 약 87 K은 액체질소 온도(77.4 K)보다는 약간 높으며 Bi-2223의 초전도 임계온도보다는 낮다. 이 온도는 정상상태를 기준으로 판단할 때, 운전 전류 밀도와 자기장의 크기에 따라 충분히 낮은 것으로 생각할 수 있으나, 더 우수한 열적 안정성을 위해 이 보다 약간 더 낮은 온도에서 운전을 하더라도 Fig.3에서 보는 바와 같이 소요동력의 증가가 그리 많지 않을 것이다.

4. 결 론

전도냉각형 저온용기의 냉동부하를 구성하는 기계적 지지대, 복사 차폐판, 전류도입선 등의 부품은 중간 냉각을 하여 극저온으로의 열유입을 크게 저감할 수 있음을 정량적으로 확인하였다. 특히 냉동기 소요동력을 최소화시킬 수 있는 최적의 중간냉각온도가 존재함을 명백히 증명하였다. 이 온도는 운전조건에 따라 다르나, 일반적으로 액체질소 온도보다 약간 높은 온도에서 결정된다. 이러한 최적화의 방법은 현재 개발 중인 여러 전도냉각형 저온용기의 설계 및 극저온 냉동기의 선정에 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- (1) A. Bejan, J.L. Smith, "Thermodynamic optimization of mechanical supports for cryogenic apparatus", Cryogenics, vol.14, no.3, pp.158-163, 1974
- (2) 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) 송성재, 장호명, "극저온냉동기로 냉각되는 이중전류도입선의 최적설계", 공기조화냉동공학회, 제9권 제4호, pp.552-560, 1997
- (4) R.F. Barron, "Cryogenic Systems", Oxford University Press, 1985
- (5) F.P. Incropera, "Introduction to Heat Transfer", John Wiley & Sons, Inc., 1996