

2단 냉동기의 냉각시간 단축을 위한 기체-간극 열스위치 설계

김형진*, 장호명**

*홍익대학교 대학원, **홍익대학교 기계공학과

Design of gas-gap thermal switch for reducing cooldown time of 2-stage cryocooler

H.J.Kim*, H.M.Chang**

Hong Ik University, Department of Mechanical Engineering

hmchang@hongik.ac.kr

Abstract - A preliminary design of gas-gap thermal switch is presented to reduce the cooldown time of superconducting system conduction-cooled by a two-stage refrigerator without liquid cryogenes. The switch connects thermally the first and the second stages (ON) to take advantage of the larger refrigeration capacity at the first stage during the beginning period. After the cryogenic temperature is reached, the switch should isolate thermally the two stages (OFF) in order to reduce the heat leak to the cold end. In this paper, a new concept for the performance index is introduced to evaluate the reduction of the cooldown time and the increase of the cooling load at the same time. In addition, the design of a gas-gap switch is discussed as a closed container of several staggered concentric tubes filled with gas, which is frozen at low temperatures for the shut-off of heat without any mechanical actuation. Some of the detailed features in the design is quantitative investigated by the gas convection model in the continuum or the rarefied gas region.

1. 서 론

초전도시스템의 냉각은 액체 헬륨이나 액체 질소등의 저온액체를 이용한 액체냉각방식이 표준화되어 있다. 그러나 1990년대에 들어서 4 K에 도달할 수 있는 2단 냉동기의 개발로 인하여 액체를 사용하지 않고 냉동기로 직접 전도냉각하는 초전도시스템의 개발이 본격화되고 있다. 이러한 초전도시스템은 저온액체를 이용하여 냉각하는 방식에 비하여 시스템 구성이 용이하고 그

냉동온도 범위가 매우 폭넓다. 또한 2단 냉동기를 이용하면 저온액체의 저장이나 수송에 따른 불필요한 손실이 줄어 경제적인 이익을 극대화할 수 있다. 반면에 저온액체를 사용할 때보다 낮은 열적안정성과 전류도입선의 냉각문제를 단점으로 볼 수 있다. 또한 냉동기를 최종정상상태의 냉동 부하를 기준으로 선정하면, 작동초기에 냉각시간이 매우 길 수 있다. 냉동기 전도냉각 시스템의 실제 예를 보면 짧아도 5~10시간, 긴 경우 1주일 이상이 소요되기도 한다.

이러한 긴 냉각시간을 단축시키기 위한 방법 중, 2단 냉동기의 1단과 2단 사이에 기체-간극 열스วิต치를 연결하여 냉각하는 방법이 있다. 기

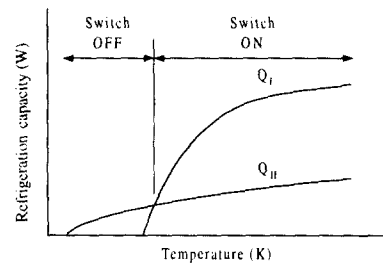
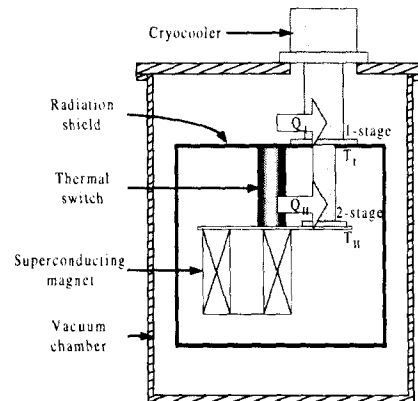


Fig.1. (a) Thermal switch utilized in a superconducting magnet conduction-cooled by a 2-stage cryocooler (b) Schematic representation of refrigeration capacities of a 2-stage cryocooler as a function of temperature

체-간극 열스위치는 작동초기에 1단의 큰 냉동용량을 이용하여 2단을 냉각하고, 일정온도이하에서는 열전달을 차단하여 냉각시간을 단축시키는 역할을 한다. Chandratilleke등은 초전도코일의 냉각시간을 열스위치가 없이 냉각할 때보다 1/4로 단축시키는데 성공한 바 있다.[1]

Fig.1.(a)는 열스위치를 사용한 2단 냉동기로 전도냉각하는 전형적인 초전도시스템의 개략도이다. 작동초기에는 1단의 냉동용량 Q_{I1} 이 2단의 냉동용량 Q_{II} 보다 크기 때문에 1단온도 T_{I1} 이 2단온도 T_{II} 보다 낮아지게 된다. Fig.1.(b)에는 열스위치가 ON/OFF하는 범위를 나타내고 있다. ON상태에서 열스위치는 1단의 냉동용량을 이용하여 2단의 냉각을 가속하는 역할을 한다. 그러나 1단의 냉동용량은 온도가 낮아짐에 따라 감소하다가 일정온도가 되면 2단의 냉동용량보다 낮아지게 된다. 이때가 되면 열스위치는 OFF상태가 되고 열스위치로 인하여 2단에서 1단으로 냉동용량이 소모되는 열전달을 막는다.

열스위치를 이용하면 초전도시스템의 냉각시간이 단축되는 반면에 열스위치 자체가 부하로 작용하여 냉각온도의 상승을 가져 올 수 있다. 그래서 열스위치의 성능지표로 냉각온도의 상승과 냉각시간의 단축에 따른 상관관계로 나타낸 열스위치의 유용도를 도입할 수 있다.

본 논문은 2단 냉동기의 냉각시간을 단축하기 위하여 사용하는 열스위치 개발을 위한 체계적인 연구의 첫단계로, 성능을 나타내는 일반적인 성능지표를 제시하고 기체-간극 열스위치 설계에 관한 기본자료를 제시하고자 한다.

2. 열스위치 성능지표

열스위치를 사용한 2단 냉동기로 초전도자석을 냉각하는 데에 있어서 두 가지 사항을 고려하여야 한다. 첫째는 냉각시간(t_c)을 얼마나 단축할 수 있는냐는 것이고, 둘째는 냉각온도(T_L)를 얼마나 낮게 유지할 수 있는냐는 점이다. 그래서

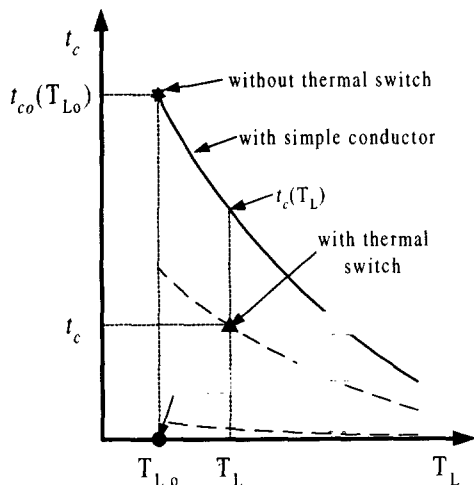


Fig.2. Effectiveness of thermal switch on a cooldown-time vs refrigeration temperature diagram

냉각온도 상승에 따라 냉각시간이 얼마나 효과적으로 단축되었는지를 수치적으로 나타내기 위한 성능지표를 도입하려고 한다. 최종 냉각온도(T_L)와 냉각온도에 도달하는데 소요되는 냉각시간(t_c)의 함수로 나타나는 열스위치의 유용도(ϵ)는

$$\epsilon = f(t_c, T_L) = 1 - \frac{t_c}{t_c(T_L)} \quad (1)$$

이며, 여기서 $t_c(T_L)$ 은 스위치기능이 없는 전도체를 1단과 2단 사이에 위치시켰을 때 나타나는 냉각온도에 대한 냉각시간의 함수이다. 즉, 전도체의 단면적을 증가시키면 Fig.2.의 실선과 같은 냉각시간의 감소와 냉각온도의 상승이 일어난다.

Fig.2.에서 열스위치없이 냉동기를 냉각할 경우 냉각시간은 $t_{co}(T_{L0})$ 소요되고 냉각온도는 T_{L0} 까지 냉각되는 초전도시스템이 있다. 이때 열스위치를 사용하여 냉각한 경우 냉각시간이 t_c 소요되고 냉각온도가 T_L 까지 냉각되었다면, 전도체를 이용하여 냉각한 초전도시스템의 냉각온도가 T_L 인 경우의 냉각시간인 $t_c(T_L)$ 와 비교하여 유용도는 0.5라고 할 수 있다. 냉각시간 t_c 인 경우 냉각온도가 T_{L0} 까지 냉각할 수 있는 열스위치의 유용도는 0.5보다 크다고 할 수 있다. 또한 열스위치를 이용한 시스템의 냉각온도가 같을 경우 냉각시간이 빠를수록 유용도가 높은 열스위치라고 할 수 있다.

3. 기체-간극 열스위치 설계

3.1 구성

기체-간극 열스위치는 Fig.3.에서 보는 바와 같이 밀폐된 실린더 내부에 상부와 하부에서 엇갈린(staggered) 핀(Fin)역할을 하는 동심의 실린더들이 일정한 간극을 가지고 나열되어있다. 열스위치 내부에는 상부와 하부에서 나온 핀사이에서 열교환을 하기 위한 기체를 충전한다. Fig.1.(a)의 열교환기처럼 상부와 하부가 2단 냉동기의 1단과 2단사이에 위치하여 각각의 핀들을 전도냉각하게 된다. 핀의 재료로는 구리를 사용한다. 구리는 상온에서 다른 금속에 비해 열

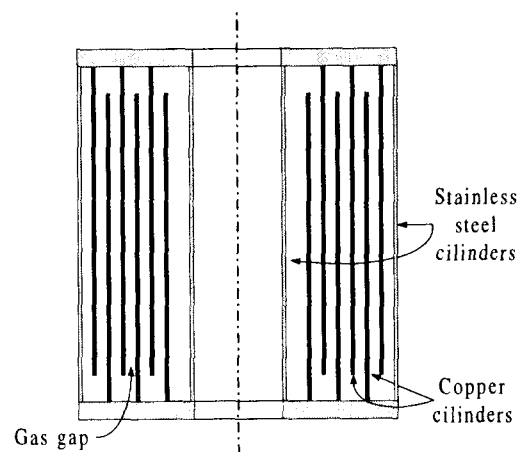


Fig.3. Construction of gas-gap thermal switch

전도도가 높음과 동시에 저온으로 갈수록 더 높은 열전도도를 보이므로 핀의 재료로서 적합하다. 밀폐용기는 1단과 2단을 직접 연결하므로 열전도도가 낮아야한다. 또한 밀폐용기는 진공을 유지할 수 있는 재료로 제작해야 한다. 스테인리스 스틸은 가장 대표적인 진공용기의 재료이며, 열전도도가 다른 금속에 비해 낮고 저온을 갈수록 열전도도가 더 낮아져 기체-간극 열스위치의 밀폐용기 재료로 가장 적합하다.[2]

열스위치를 통한 축방향으로의 열전달은 밀폐용기내의 충전기체와 용기벽을 통해서 이루어진다. 내부가 진공이 되면 OFF상태가 되고 이때는 용기벽을 통한 열전달만이 남게 된다.

3.2 기체의 열전달

기체의 열전달은 압력과 온도에 밀접한 관계를 갖는다. 밀폐된 용기에서 기체는 온도가 낮아지면 분자운동에너지가 감소하여 압력이 낮아지게 된다. 온도가 끓는점 아래로 내려가게 되면 기체는 액화되고 그 양이 줄어들게 된다. 이때의 압력은 기체와 액체가 상평형을 이루는 압력이 된다. 또한 온도가 삼중점이하로 내려가게 되면 압력은 기체와 고체가 상평형을 이루는 압력이 된다. 이때의 압력은 거의 진공에 가깝다. 기체가 상변화하기전까지 압력은 이상기체상태방정식이나 상용화되어 있는 실제 열물리상태량 프로그램[3]에서 온도와 비체적의 함수로 구한다. 기체가 상변화를 시작하는 온도이하에서 압력은

$$p = p_{sat}(T) \quad (2)$$

이다.

기체의 열전달은 연속체영역(Contium region)에서와 희박기체영역(Rarefied gas region)에서 각각 다르다. 연속체영역은 평균자유행정(mean free path)이 무척 짧은 영역으로 기체 분자가 전체적으로 열전달에 관여하는 반면에 희박기체영역은 분자가 개별적으로 표면을 오가며 열전달을 하게 된다.[4] 두 영역사이의 천이는 Kn수(Knudsen number)에 의해서 결정된다. Kn수는 평균자유행정 λ 와 열교환이 일어

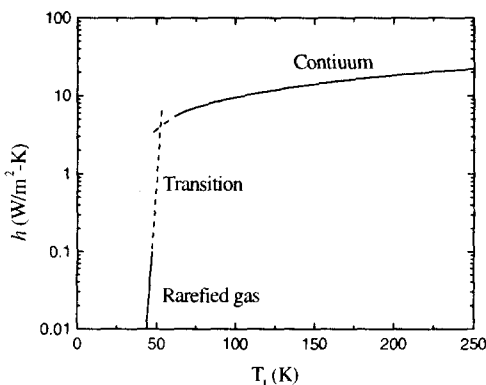


Fig.4. Convective heat transfer coefficient as a function of temperature at constant volume for nitrogen

나는 두 표면 사이의 거리 δ 의 비로 나타낸다.

$$Kn = \lambda/\delta \quad (3)$$

$Kn < 0.01$ 이면 연속체영역이고, $Kn > 1$ 이면 희박기체영역이다. 연속체영역에서의 열전달계수는 상용화되어 있는 실제 열물리상태량 프로그램[3]을 이용한 기체의 열전도도 k 와 열교환이 일어나는 두 표면 사이의 거리 δ 로 구하였다.

$$h = k/\delta \quad (4)$$

희박기체영역에서의 열전달계수는 기체동역학으로부터 유도되는 온도(T)와 압력(p)의 함수로 사용하였다.[4]

$$h = \alpha \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \sqrt{\frac{R}{8\pi MT}} p \quad (5)$$

γ 는 기체의 비열비이고, R 은 기체상수, M 은 기체의 분자량, α 는 수정계수로서 열교환이 일어나는 표면상태를 나타낸다.

Fig.4.에서 기체의 열전달계수는 온도가 낮아짐에 따라 낮은 감소율을 보이며 감소하다가 기체가 상변화를 일으키는 온도를 기점으로 열전달계수가 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 해석모델 및 유효열전달

Fig.5.는 두 핀사이의 열전달을 계산하는 과정을 보여준다. T_I 과 T_{II} 는 냉동기의 1단과 2단의 온도로서 작동초기에는 1단의 온도가 낮다. 일정온도이하에서는 2단의 온도가 낮게 된다. $T_1(x)$ 과 $T_2(x)$ 는 각각 1단과 2단이 기부인 핀의 온도분포를 나타낸다. 이 마주보는 두 핀에서 각각의 핀의 온도 분포를 구할 수 있는 식은

$$\begin{aligned} \frac{d^2 T_1}{dx^2} &= \left(\frac{hP}{kA} \right) (T_1 - T_2) \\ \frac{d^2 T_2}{dx^2} &= \left(\frac{hP}{kA} \right) (T_2 - T_1) \end{aligned} \quad (6)$$

이며, 여기서 P 는 핀의 접수길이, A 는 핀의 단면적이다. h 는 충전기체의 열전달계수이고, k 는 핀의 열전도도이다. 이 미분방정식의 경계조건은

$$\begin{aligned} T_1(0) &= T_I, \quad T_2(L) = T_{II}, \\ \frac{dT_1(0)}{dx} &= \frac{h}{k} \{ T_{II} - T_1(L) \}, \\ \frac{dT_2(L)}{dx} &= \frac{h}{k} \{ T_2(0) - T_I \} \end{aligned} \quad (7)$$

이다. 각 핀의 끝과 다른 핀의 기부와의 간격은 고온부와 저온부간의 거리 L 에 비하여 매우 작으므로 핀의 길이를 L 이라고 한다. $T_1(x)$ 과 $T_2(x)$ 는 식(7)을 식(6)에 대입하여 나오는 행렬

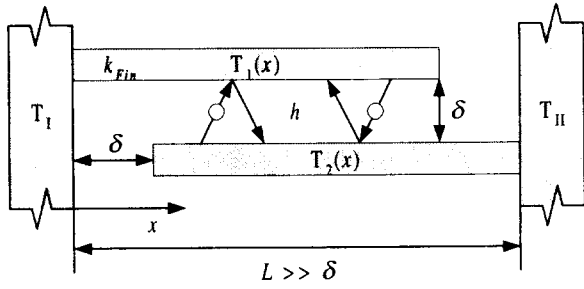


Fig.5. Scheme of heat transfer between two fins

식을 Cramer 공식에 따라 구하였다.

고온부와 저온부사이에서 일어나는 열전달은 한 핀의 기부를 통과하는 열전달과 다른 한 핀의 끝부분을 통과하는 열전달의 합인

$$Q_{Fin} = kA \frac{dT_1(0)}{dx} + hA(T_2(0) - T_I) \quad (8)$$

이 된다. 밀폐용기의 벽전도를 통한 열전달은

$$Q_{wall} = A_{wall} \int_{T_{II}}^{T_I} k_{wall}(T) dT \quad (9)$$

이다. 유효열전달은 핀을 통한 열전달과 벽을 통한 열전달의 합인

$$Q = N \times Q_{Fin} + Q_{wall} \quad (10)$$

이며, 여기서 N은 핀의 쌍수이다.

3.4 기초설계자료

기체-간극 열스위치의 제원은 높이가 90 mm 이고, 외경이 60 mm, 내경이 30 mm이다. 바깥쪽과 안쪽 실린더의 두께는 0.5 mm, 구리실린더의 두께를 0.3 mm로 하고 핀간격을 1 mm로 할 경우 열스위치 내부에는 10개의 구리 실린더를 부착할 수 있다. 이 구리실린더는 Fig.3.에서와 같이 상부와 하부에 부착되고 상부와 하부에 붙은 2개의 구리실린더가 1쌍이 되어 총 5쌍이 된다. 식(4)에서 핀간격은 가까울수록 열전달계수가 높다.[5]

식(10)을 이용하여 동일한 밀폐용기 안에서 핀의 쌍수를 변화하여 열스위치의 유효열전달을 계산하다. 이때 1단과 2단의 온도차 (ΔT_{II-I})를 50 K으로 고정하였고 열스위치 내부의 충전기체는 질소로 하였다. 질소의 초기압력은 1기압이며 T_I 과 T_{II} 의 로그평균온도에 의하여 질소의 압력과 열전도도의 변화를 계산하였다.

계산한 결과 핀의 쌍수가 많을수록 높은 온도에서의 유효열전달은 늘어나지만, 1단의 온도가 50 K보다 낮아지면 핀의 쌍수에 관계없이 벽을 통한 열전달만 남는다. 이 기체-간극 열스witch는 핀이 5쌍일 경우 1단의 온도가 50 K이상에서

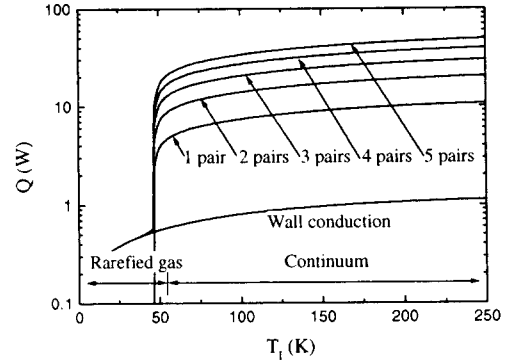


Fig.6. Heat transfer rate of gas-gap thermal switch as a function of T_I for various numbers of fin pairs

약 20~50 W의 열전달을 보이다가 50 K이하에서는 약 0.5 W이하로 열전달이 극격히 떨어진다. 이것은 열스위치가 50 K을 전후로 ON/OFF 기능을 할 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

2단 냉동기로 전도냉각되는 초전도시스템의 냉각시간단축을 위한 방법으로 기체-간극 열스위치를 이용하는데 있어서, 열스위치의 성능을 가리키는 성능지표로써 열스위치의 유용도를 정의하였다. 냉각시간과 냉각온도와의 다소 복잡한 관계를 유용도를 통하여 간결하게 열스위치의 성능을 나타낼 수 있었다. 또한 기체의 상변화 성질을 이용한 기체-간극 열스위치에 기본적인 열전달 모델을 살펴보고 이를 토대로 열스위치 내부의 유효열전달을 구함으로써 ON/OFF상태를 갖는 스위치로써의 설계자료를 제시하였다.

향후 계획으로는 본 논문의 설계자료를 바탕으로 기체-간극 열스위치를 제작하여 2단 냉동기를 사용한 초전도시스템에 적용할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] G. R. Chandratilleke, et. al, "Gas-gap Thermal Switch For Precooling Of Cryocooler-Cooled Superconducting Magnets", Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 41, pp. 139-146, 1996.
- [2] Randall F. Barron, "Cryogenic Systems", 2nd ed., Oxford University, 1985.
- [3] Friend, D. G., "NIST Thermophysical Properties of Pure Fluids", Version 3.0, NIST standard 12, U.S. Department of Commerce, 1992.
- [4] A. Roth, "Vacuum Technology", North-Holland, 1982.
- [5] J.F.Burger, et. al, "Fast gas-gap heat switch for a microcooler", cryocoolers, Vol. 10, pp. 565-574, 1999.