

극저온냉동기로 전도냉각되는 초전도시스템의 열적 안정성

Thermal stability of superconducting systems conduction-cooled by cryocooler

권기범*, 장호명**

K. B. Kwon*, H. M. Chang**

Abstract : The thermal stability conditions are investigated for superconducting magnet systems cooled conductively by cryocooler without liquid cryogenes. The worst scenario in the systems is that the heat generation in the resistive state exceeds the refrigeration, causing a rise in the temperature of the magnet winding and leading to the burnout. It is shown by an analytical solution that in the continuous resistive state, the temperature may increase indefinitely or a stable steady-state may be reached, depending upon the relative size of the magnet with respect to the refrigeration capacity of the cryocooler. The stability criteria include the temperature-dependent properties of the magnet materials and the refrigeration characteristics of the cryocooler. A useful graphical scheme is presented and discussed to demonstrate the physical importance of the results.

Key Words : thermal stability, conduction-cooling, cryocooler, superconducting magnet.

1. 서 론

1990년대 중반까지 초전도 시스템의 냉각은 액체 헬륨이나 액체 질소 등을 이용하는 액체냉각(liquid-cooled) 방식이 표준화되어 있었다. 그러나 고온초전도체 제작기술과 극저온 냉동기술의 발전으로 인해 액체 없이 냉동기로 직접 전도냉각하는(conduction-cooled) 초전도 시스템이 등장하게 되었으며, 그 후 이 새로운 냉각방식에 대해 많은 연구가 진행되고 있다.[1-6] 그림 1은 전형적인 전도냉각 시스템의 구성을 도식적으로 나타내고 있다. 밀폐사이클로 운전되는 극저온 냉동기는 보통 2단(two-stage)형이며, 상대적으로 높은 온도의 제1단(first-stage)은 복사 쉴드(shield), 기계적 지지대(support), 전류도입선(current lead) 등을 중간냉각하고, 온도가 낮은 제2단(second stage)이 금속을 통해 초전도 마그네트를 전도 냉각하는 구성이다. 전도냉각 시스템은 기존의 액체냉각 시스템에 비하여

여러 가지의 장점을 가지고 있다.[4] 우선 어느 곳에서도 전원만 연결하면 초전도 시스템을 운전할 수 있다는 간편한 점과 저온액체나 고압가스 등에 대한 전문인력이 필요 없어서 편리하다는 점을 들 수 있다. 또 액체의 저장이나 이송에 따른 열손실을 줄일 수 있고, 저온액체 용기에 대한 냉동부하가 없으므로 에너지 소비 면에서 매우 경제적인 장점이 있다. 그 뿐 아니라, 시스템의 소형화 및 경량화가 가능하고 설치 위치나 각도에 있어서도 매우 유연한 구성을 할 수 있다.

반면에 액체냉각에 비하여 전도냉각의 단점도 몇 가지를 생각할 수 있는데, 그 중에서도 결정적인 단점으로 열적 안정성(thermal stability) 문제를 들 수 있다. 열적 안정성이란 초전도 상태의 시스템에 열적 교란(disturbance)에 의한 발열이 있을 때, 온도가 계속해서 증가하느냐 혹은 일정한 온도 이하로 유지되거나 초전도 상태로 복귀될 수 있느냐를 의미한다. 액체 냉각의 경우, 초전도체의 표면에서 저온 액체의 비등(boiling)을 동반한 열전달이 이루어지므로, 단위면적 당 열전달이 매우 크고 일정한 압력 하에서는 액체의 온도도 일정하게 유지된다. 이러한 액체냉각의 열적 안정성에 대해서는 이미 많은 연구가 진행되었고, 그 현상도 잘 알려져 있다.[7,8]

전도냉각의 경우, 열적 안정성은 적어도 두 가지 면에서 액체냉각의 경우와 크게 다르다고 할 수 있다. 우선 액체로 냉각되는 초전도체의 주위온도는 기본적으로 액체의 포화온도로 일정한 반면에, 극저온냉동기의 온도는 그 부하에 따라 크게 변화할 수 있다는 점이다. 또 다른 차이점은 액체냉각의 안정성은 소위 핵비등(nucleate boiling)-막비등(film boiling)의 천이특성과 마그네트의 발열특성이 결정하는 반면, 전도냉각의 안정성은 냉동기의 냉동특성과 마그네트의 발열특성이 결정한다. 이런 의미에서 전도냉각 시스템의 열적 안정성은 전형적인 초전도체-냉동기의 조합(integration)에 관한 문제라고 할 수 있다.

이 연구는 극저온냉동기로 전도냉각되는 초전도 시스템의 열적 안정성을 밝히기 위한 목적으로 수행되고 있다. 이 논문은 그 첫 단계로, 초전도체가 계속하여 상전도 상태로 유지되는 최악의 상황에서, 마그네트의 온도가 계속하여 증가하여 번아웃(burnout)에 이르는가 혹은 일정한 온도의 정상상태(steady-state)에 도달하는가의 문제를 다루고 있다. 이 해석은 초전도 마그네트의 발열 특성과 동시에 극저온냉동기의 냉동 특성을 고려해야 하며, 온도에 따라 크게 변화하는 저온 재료의 상태량[9,10]을 포함하여 기존의 액체냉각의 안정성에서 다루지 않는 중요한 내용을 포함하고 있다. 이 논문에서는 일반적인 안정성 이론을 유도한 후, 합리적인 단순화 과정을 통하여 전도냉각의 안정성 판별에 대한 수학적 엄밀해를 제시하고 안정적인 초전도-냉동기 조합에 대한 새로운 개념을 정립하고자 시도하였다.

* 학생회원 : 홍익대학교 대학원 석사과정

** 정 회원 : 홍익대학교 기계공학과 부교수

원고접수 : 2001년 04월 17일

심사완료 : 2001년 05월 09일

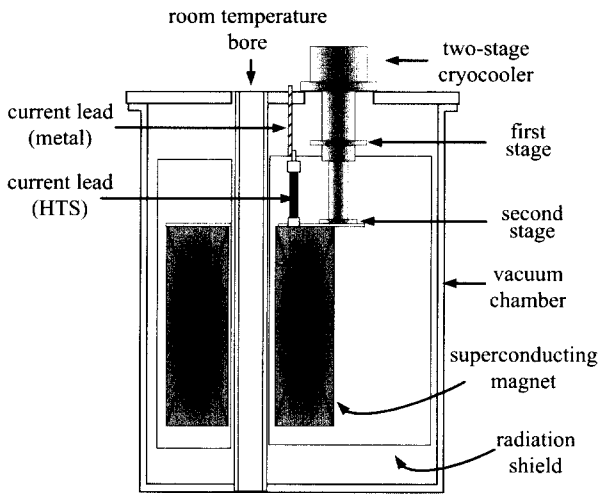


그림 1. 2단 극저온냉동기로 전도냉각되는 초전도 마그네트의 구조.
 Fig. 1. Structure of a superconducting magnet conduction-cooled by two-stage cryocooler.

2. 해석

2.1 시스템

이 논문에서의 안정성 해석은 그림 1과 같이, 극저온냉동기가 축방향으로 전도냉각하는 팬케이크형 또는 솔레노이드형 초전도 마그네트를 대상으로 하고 있다. 마그네트 내부의 온도는 반경 방향과 원주 방향으로의 구배(gradient)가 축방향에 비해 매우 작으므로, 이 해석은 1차원(축방향) 열전도 문제로 간주할 수 있다. 좌표 z 는 냉동기에 접하는 부분에서부터의 축방향 거리로 정의한다.

팬케이크 마그네트는 금속(하첨자 A)과 초전도체(하첨자 B)의 복합선재 또는 코일을 보빈(하첨자 G)에 권선하여 제작하는데[11-13], 열전도 측면에서 그 단면을 도식적으로 나타내면 그림 2와 같다. A+B의 복합단면은 실제로는 선재나 코일을 반경 방향과 축방향으로 여러 번 권선하더라도, 일정한 면적비 f (금속-초전도 복합선재에서 금속이 차지하는 단면적의 비)를 가진 하나의 전도체로 간주할 수 있다. 또 g 는 초전

도 복합선재(A+B)와 보빈(G)의 조합에서 초전도 복합선재가 차지하는 축방향 길이의 비를 나타내고 있다. 매우 미량의 집합재료 또는 절연재료의 열저항에 대한 영향은 무시하였다.

이 해석은 최근에 많은 연구개발이 진행되고 있는 전도냉각형 고온초전도 시스템에 초점이 맞추어져 있으나, 동일한 방법을 저온초전도 시스템에도 적용할 수 있다.

2.2 정상상태 온도 및 발열

그림 2와 같은 전도냉각 시스템에서, 복사에 의한 미량의 열전달을 무시하면 마그네트의 정상상태 온도는 다음과 같은 1차원 열전도 방정식으로 결정된다.[10]

$$\frac{d}{dz} \left(k(T) \frac{dT}{dz} \right) + \frac{g}{f} \cdot \rho_A(T) \cdot J^2 \cdot G(T) = 0 \quad (1)$$

여기서 k 는 축방향으로의 평균 열전도도를 나타내며, 일반적으로 온도의 함수이다. 그림 2와 같은 단면에 대한 평균열전도도 k 는 각 재료의 열전도도와 단면적비의 함수로 표현할 수 있고, 자세한 유도과정은 부록에 첨부하였다. 금속의 전기저항률 ρ_A 도 온도의 함수이며, 전류밀도 J 는 단위 면적의 복합선재(A+B)당 전류밀도를 나타내고, $G(T)$ 는 복합선재에서의 전류가 분할되는 함수(current-sharing function)이다.[8] 이 논문에서는 최악의 상황에서 안정성을 고려하므로, 이 함수 값을 1로 두어 모든 전류가 금속으로 흐른다고 가정한다.[10]

식(1)에 대한 온도 경계조건은 다음과 같다.

$$T(0) = T_0, \quad \frac{dT(H)}{dz} = 0 \quad (2)$$

T_0 은 $z=0$ 에서의 온도를 나타내지만 상수가 아니며 극저온냉동기의 냉동능력에 따라 결정된다. 그러나 일단 T_0 을 알고 있다면 축방향 온도분포를 구할 수 있고, 이를 이용하여 $z=0$ 에서의 열유속(heat flux) q_0 을 계산하면 이것이 곧 마그네트 전체의 축방향 단면적당 발열량 q_{heat} 과 같게 된다.

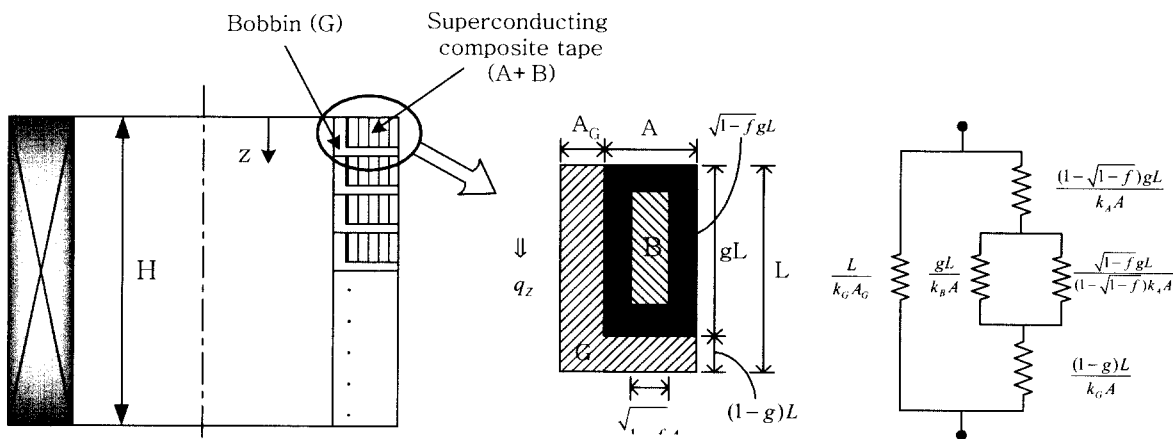


그림 2. 복합 열전도체로 나타낸 팬케이크 마그네트의 도식적 단면 및 열저항 회로.
 Fig. 2. Schematic cross-section of pancake magnet and thermal resistance circuit for composite conductor.

$$q_0 = k(T_0) \frac{dT(0)}{dz} \quad (3)$$

식(1)에서 k 는 일반적으로 온도의 함수이므로, 임의의 z 에서의 축방향 열유속 q 를 이용하여 식을 정리한다.

$$q \frac{dq}{dT} = k(T) \frac{dT}{dz} \cdot \frac{d}{dT} \left(k(T) \frac{dT}{dz} \right) \quad (4)$$

$$= -\frac{g}{f} k(T) \cdot \rho_A(T) \cdot J^2$$

이 식은 곧 바로 임의의 z 에서 $z=H$ 까지 적분할 수 있다. 식(2)의 경계조건으로부터 $z=H$ 에서 $q=0$ 이므로 다음의 관계가 성립된다.

$$\frac{1}{2} \left[k(T) \frac{dT}{dz} \right]^2 = \frac{g}{f} J^2 \int_T^{T_H} k(\tau) \rho_A(\tau) d\tau \quad (5)$$

이 식을 변수분리의 방법으로 $z=0$ 에서 H 까지 적분하면 $z=0$ 에서의 온도 T_0 와 $z=H$ 에서의 온도 T_H 의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\int_{T_0}^{T_H} \frac{k(T)dT}{\sqrt{\int_T^{T_H} k(\tau)\rho_A(\tau)d\tau}} = J \sqrt{\frac{2g}{f}} \cdot H \quad (6)$$

한편 마그네트 전체의 발열량 Q_{heat} 는 식(5)에 T_0 를 대입하고 축방향 단면적 A 를 곱하여 계산한다.

$$Q_{heat} = k(T_0)A \frac{dT(0)}{dz} \quad (7)$$

$$= J \cdot A \sqrt{\frac{2g}{f}} \int_{T_0}^{T_H} k(\tau)\rho_A(\tau) d\tau$$

마그네트의 형상, 재료의 물성, 전류밀도 등이 주어지면, 식(6)에서 T_H 를 T_0 의 함수로 구하여 식(7)에 대입하면 발열량 Q_{heat} 를 T_0 의 함수로 표현할 수 있다. 결론적으로 식(6)과 (7)이 전도냉각 마그네트의 정상상태 발열량을 계산하는 일반식이라고 할 수 있다. 이 논문에서는 좀 더 정량적인 토론을 위하여, 다음과 같은 간단하면서도 현실에 가까운 경우를 우선적으로 고려한다.

은(Ag)과 같은 우수한 전도체에서 열전도는 전자의 운동이 가장 지배적인 역할을 하므로 소위 Wiedemann-Franz법칙[8]이 잘 적용된다.

$$k_A(T) \rho_A(T) = L_0 T \quad (8)$$

여기서 Lorentz상수 L_0 은 $2.45 \times 10^{-8} W \cdot \Omega / K^2$ 이다. 그리고 전기저항률 ρ_A 는 근사적으로 온도의 역수(power)에 비례하므로

$$\rho_A(T) = \rho_{LN} \left(\frac{T}{T_{LN}} \right)^n \quad (9)$$

의 관계가 있는데, 은의 경우 70-200 K의 범위에서 n 은 1~1.5에 가까운 거동을 한다. [10,14] 따라서

$n=1$ 일 경우, k_A 는 온도에 따라 크게 변화하지 않는다. 또 G-10과 같은 보빈의 재료들의 열전도도 k_G 도 이 온도 범위에서는 대체로 일정한 상수로 간주할 수 있다.

이러한 물성의 온도함수를 식(6)에 대입하면,

$$\frac{T_0}{T_H} = \cos \left(\sqrt{\frac{g \cdot L_0}{f \cdot k \cdot k_A}} J \cdot H \right) \quad (10)$$

을 얻고, 식(7)에 대입하면 발열량은

$$Q_{heat} = \sqrt{\frac{g \cdot k \cdot L_0}{f \cdot k_A}} J \cdot A \cdot T_0 \quad (11)$$

$$\times \tan \left(\sqrt{\frac{g \cdot L_0}{f \cdot k \cdot k_A}} J \cdot H \right)$$

로 간단하게 나타낼 수 있다. 즉, 모든 전류가 금속으로 흐르는 정상상태에서 마그네트에서의 발열량은 기본적으로 T_0 에 비례하며, 그 비례상수는 마그네트의 크기(A 와 H), 전류밀도(J), 재료의 구성비 및 물성(f, g, k_A, k_G)에 따라 결정된다. 여기에서 특히 주의할 사항은 식(11)에서 \tan 함수가 유한한 값을 가지기 위해서는

$$\sqrt{\frac{g \cdot L_0}{f \cdot k \cdot k_A}} J \cdot H < \frac{\pi}{2} \quad (12)$$

의 조건이 만족되어야 한다. 식(12)는 액체 시스템에서 전도체 일부가 액체로 냉각되지 못할 때, 안정성을 유지하기 위한 조건으로 Dresner가 제시한 안정성 조건($f=g=1, k=k_A$)과 정확하게 일치한다.[10]

2.3 극저온냉동기 특성

전도냉각 시스템에 사용될 수 있는 소형 또는 중형 극저온냉동기는 재생형(regenerative) 밀폐사이클로 구성되는데, 그 중에서도 Stirling냉동기, GM(Gifford-McMahon)냉동기, 맥동관(pulse tube)냉동기가 가능하다. 이들은 냉동효율, 내구성, 소음 및 진동, 크기, 가격 등에서 서로 상반된 장단점들을 가지고 있으나, 이 안정성에 가장 중요한 영향을 주는 특성에 있어서는 대체로 유사한 거동을 한다. 냉동기의 냉동능력(refrigeration capacity)은 일반적으로 냉동온도 T_0 의 함수로 표현된다.

$$Q_{ref} = F(T_0) \quad (13)$$

일반적으로 냉동온도가 증가하면 냉동용량도 따라서 증가하지만, 그 증가율은 점차 감소하는 경향이 있다.[14] 여기에서는 간단하면서 그 특징을 잘 나타내는 곡선적합(curve-fitting)한 함수로 다음의 식을 채택한다.

$$Q_{ref} = Q_{LN} \frac{\ln T_0 / T_b}{\ln T_{LN} / T_b} \quad (14)$$

이 점함 함수는 두 개의 데이터를 이용하였는데, 이는

극저온냉동기를 대표하는 두 개의 특성인 부하가 없는 상태에서의 최저 도달온도 (T_b)와 액체질소 온도 (T_{LN})에서의 냉동용량 (Q_{LN})으로

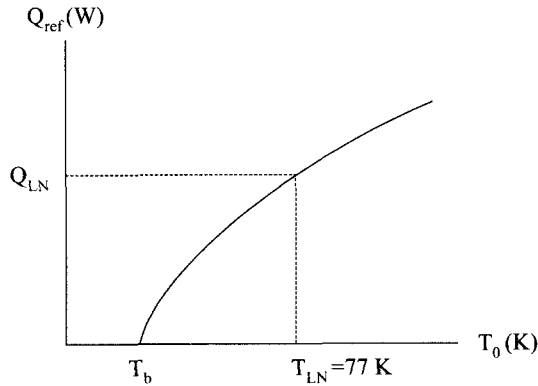


그림 3. 전형적인 극저온냉동기에 대한 냉동용량-냉동 온도 곡선.
Fig. 3. Refrigeration capacity as a function of temperature for typical cryocooler.

나타낸다. 실제로 매우 잘 설계 및 제작된 초전도 시스템의 경우, 초전도 운전상태에서의 냉동부하는 매우 작으므로 T_b 는 초전도 마그네트의 운전온도에 가깝다고 할 수 있다.

3. 결과 및 토론

3.1 안정성 판별

식(7)은 임의의 재료와 크기에 대한 발열량을 냉동온도의 함수로 나타낸 식이고, 식(13)은 임의의 극저온냉동기의 냉동용량을 냉동온도의 함수로 나타낸 식이다. 이 논문에서는 정량적인 토론을 위해 식(11)와 식(14)의 경우를 취급한다.

그림 4는 냉동온도의 함수로 마그네트에서의 발열량과 극저온냉동기의 냉동용량을 하나의 선도에 나타낸 것이다. 이 계산에 사용된 마그네트의 제원은 표 1에 나타내었는데, 이들은 최근에 개발 중인 소형 고온초전도 마그네트들과 유사하게 채택하였다. [11-13] 세 개의 그래프 I, II, III에서는 다른 조건은 동일하고 각각 마그네트의 축방향 높이 H 가 13 cm, 14.3 cm, 16 cm인 세 경우를 나타내고 있다. 발열과 냉동의 크기를 나타내는 함수는 모두 온도에 따라 단조 증가하지만 그 형상이 서로 다르기 때문에 정상상태가 서로 다른 양상으로 결정된다.

첫 번째 경우(I)은 마그네트의 높이가 냉동용량에 비해 상대적으로 작아서 그림 4에 나타낸 바와 같이 두 함수가 두 점(S와 U)에서 교차한다. 이 경우에는 이론상으로 두 개의 정상상태가 가능하지만, 더 낮은 온도인 점 S는 안정적(stable) 정상상태이고 높은 온도인 점 U는 불안정적(unstable) 정상상태이다.

S보다 낮은 온도의 상태에서는 발열이 냉동보다 크므로 온도가 증가하여 S를 향하여 변화하게 되고, 반대로 S보다 높은 온도의 상태에서

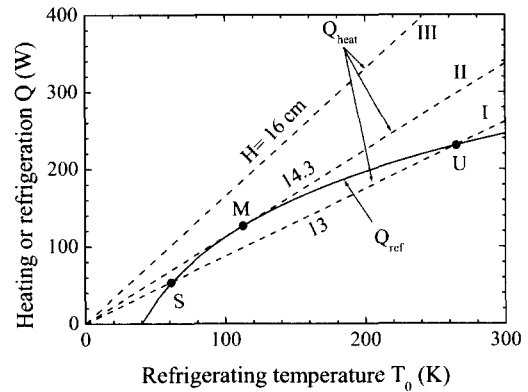


그림 4. 냉동온도의 함수로 나타낸 발열량과 냉동량 곡선.

Fig. 4. Heat generation and refrigeration capacity as functions of the refrigerating temperature.

표. 1 계산에 사용된 마그네트의 제원.

Table 1. Specifications of magnet in the sample calculations.

magnet shape	Volume fraction of metal(A) in tape(A+B)	f	0.7
	Length fraction of tape(A+B) in magnet	g	0.9
	Coil inner diameter	D_i	0.10 m
	Coil outer diameter	D_o	0.15 m
operation	Current density	J	$3.5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$
	Refrigeration capacity at T_{LN}	Q_{LN}	80 W
	Operating temperature	T_b	40 K
material	Electrical resistivity of metal (silver)	ρ_A	$2.09 \times 10^{-9} \Omega m$
	Thermal conductivity of metal (silver)	k_A	902 W/mK
	Thermal conductivity of metal (G-10)	k_G	0.7 W/mK

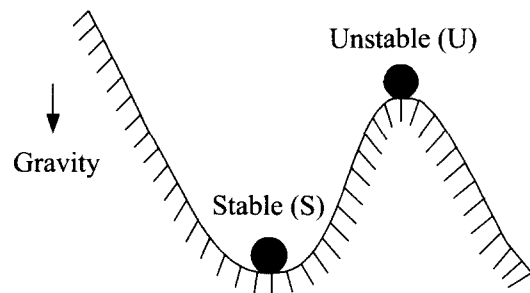


그림 5. 중력장 하에서 곡면의 안정성.

Fig. 5. Stability of curved surface under gravitational field.

는 냉동이 발열보다 크므로 온도가 감소하여 역시 S를 향하여 변화한다. 또한 U보다 낮은 온도에서도 냉동량이 발열량보다 크므로 역시 온도가 감소하여 S를 향해 변화하게 되고 U보다 높은 온도에서는 발열량이 커서 온도가 계속해서 상승하게 된다. 두 점 S와 U의 안정성은 그림 5에 나타난 바와 같이 중력장 하의 곡면에서의 두 점에 비유할 수가 있다.

두 번째 경우(II)에서는 마그네트의 높이가 (I)보다 더욱 커서 그림 4에 나타난 바와 같이 두 함수가 접하여 오직 하나의 실근을 갖는다. 이 접점의 온도보다 더 낮은 온도에서는 온도가 증가하여 이 점에 도달하지만 온도가 조금만 더 높아도 그 온도는 계속해서 증가할 것이다. 따라서 이 접점 M은 준안정적(meta-stable) 정상상태이라고 할 수 있다. 마그네트의 높이가 더욱 큰 경우(III)에서는 발열량이 항상 냉동량을 초과하므로 정상상태에 도달하지 않는다. 이는 시간이 경과함에 따라 온도가 계속해서 증가함을 의미하며 따라서 전류를 차단하지 않는 한 마그네트는 번아웃에 이르게 될 것이다.

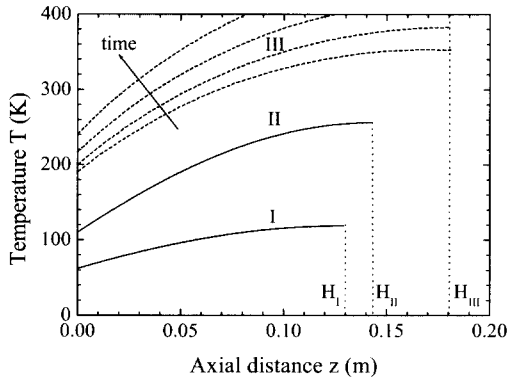


그림 6. 세 가지 마그네트 길이에 대한 정상상태 축방향 온도 분포.
Fig. 6. Axial temperature distribution at steady state for the three cases.

그림 6은 세 가지 경우에 대해 정상상태 축방향 온도분포를 나타내고 있다. 경우(I)에서는 마그네트의 길이가 상대적으로 짧으므로 극저온냉동기와 접하는 z=0에서의 온도도 낮고 마그네트의 최대온도도 낮게 유지된다. 경우(II)와 같이 길이가 증가하면 마그네트의 최대온도도 함께 증가하지만 일정한 온도의 정상상태에 도달하게 된다. 그러나 이 보다 긴 높이의 경우(III)에서는 정상상태에 도달하지 못하고 온도가 계속해서 증가함을 나타내고 있다.

따라서 초전도 마그네트의 선재가 상전도화되어 모든 전류가 금속으로 흐르는 최악의 상황에서도 마그네트가 열적 안정성을 확보하기 위한 조건은 일반적으로

$$Q_{ref}(T_0) \geq Q_{heat}(T_0) \quad (15)$$

인데, 여기에 식(11)과 (14)를 대입하면

$$Q_{LN} \frac{\ln T_0/T_b}{\ln T_{LN}/T_b} \geq \sqrt{\frac{g \cdot k \cdot L_0}{f \cdot k_A}} J \cdot A \cdot T_0 \times \tan \left(\sqrt{\frac{g \cdot L_0}{f \cdot k \cdot k_A}} J \cdot H \right) \quad (16)$$

이 조건을 다시 정리하면, 열적 안정성을 확보하기 위한 마그네트의 축방향 높이인 H에 그 최대값이 존재함을 알 수 있다.

$$H \leq H_{max} = \sqrt{\frac{f \cdot k \cdot k_A}{g \cdot L_0}} \frac{1}{J} \times \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{\frac{f \cdot k_A}{g \cdot L_0 \cdot k}} Q_{LN}}{e \cdot A \cdot J \cdot T_b \ln \left(\frac{T_{LN}}{T_b} \right)} \right] \quad (17)$$

표 1에 나타난 조건들을 식(17)에 대입하면 안정성을 위한 최대 높이가 약 14.3 cm임을 확인할 수 있다. 식(17)에서 마그네트의 최대 높이를 결정하는 인자들은 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 그 첫째는 재료의 특성이다. 특히 금속의 열전도도 k_A (그리고 Wiedemann-Franz법칙에 따라 결정되는 전기저항률 ρ_A)과 보빈의 열전도도 k_G 가 가장 중요한 역할을 한다. 둘째는 마그네트의 특성이다. 여기에는 초전도 복합선재에서의 은비 f , 선재와 보빈의 길이비 g , 축방향 단면적 A , 그리고 전류밀도 J 등이 포함된다. 그리고 마지막으로 극저온냉동기의 특성인데, 이는 냉동용량 Q_{LN} 과 운전온도 T_b 로 정량화 할 수 있다. 현실적인 면에서 재료의 특성은 선택의 여지가 거의 없다고 할 수 있으나, 마그네트와 극저온냉동기의 상대적 특성에 따라 열적 안정성 여부가 판별된다.

3.2 무차원 수

극저온냉동기로 전도냉각되는 초전도 마그네트의 열적 안정성을 결정하는 데에는, 앞 절에서 유도한 바와 같이 많은 변수가 포함된다. 다양한 경우에 대해 이 결과를 적용하기 위해서는 무차원 변수(dimensionless variable)가 매우 유용하다. 이 논문에서는 특히 다음과 같은 두 개의 무차원 변수를 정의한다.

$$\Pi_1 = \sqrt{\frac{L_0}{k \cdot k_A}} J \cdot H \quad (18)$$

$$\Pi_2 = \sqrt{\frac{k_A}{L_0 \cdot k}} \frac{Q_{LN}}{A \cdot J \cdot T_b} \quad (19)$$

식(18)은 마그네트와 재료의 특성만으로 구성된 변수이며, 식(19)는 극저온냉동기와 마그네트의 특성으로 구성된 변수임을 유의해야 한다. 이 무차원 변수들을 이용하면 식(17)로 주어지는 특별한 경우의 안정성 판별조건은 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\Pi_2 \geq \sqrt{\frac{f}{g}} e \cdot \ln \left(\frac{T_{LN}}{T_b} \right) \cdot \tan \left(\sqrt{\frac{g}{f}} \Pi_1 \right) \quad (20)$$

이러한 무차원 해석의 첫째 장점은 한 가지의 수치적 또는 실험적 결과를 이용하여 여러 가지 물리적 변수의 영향을 예측할 수 있다는 점이다. 예를 들어서 극저온냉동기의 냉동용량이 2배가 되고 마그네트의 축방향 단면적이 2배가 되는 경우에도 식(19)로 정의되는 무차원 변수가 같은 값을 가지므로, 안정성을 위한 마그네트의 높이에 대한 조건은 동일함을 알 수 있

다. 두 번째 장점은 안정성 판별을 일반화시킬 수 있다는 점이다. 즉, 재료의 상태량과 극저온냉동기의 냉동특성이 매우 복잡하다고 하더라도, 이 무차원 변수를 이용하면 해석이나 실험을 통한 자료를 유용한 형태로 정리할 수 있다. 냉동기로 전도냉각되는 모든 경우의 열적 안정성을 위한 조건은

$$H_2 \geq F_n(H_1) \quad (21)$$

로 나타내며, 함수 F_n 은 다양하고 자세한 재료, 마그네트, 냉동기의 특성에 따라, 해석적 또는 실험적으로 결정할 수 있을 것이다.

다음의 토론에 앞서 여기에서 취급하는 정상상태를 유지하기 위한 조건은 마그네트의 열적 안정성에 대한 충분조건(sufficient condition)임을 다시 한 번 언급하고자 한다. 즉 식(20) 또는 (21)과 같은 형태의 안정성 조건은 최악의 상태에서도 마그네트의 정상상태 온도를 갖기 위한 조건이며, 혹시 이 조건이 만족되지 않더라도 일정한 시간 동안은 마그네트를 보호할 수는 있다는 점을 유의할 필요가 있다.

3.3 물리적 의미 및 설계자료

식 (17)의 안정성 판별식에 대한 물리적 의미를 살펴보고, 실제 설계에 대한 자료를 제시하기 위하여, 전류밀도 J , 은비 f , 선재와 보빈의 길이비 g 등이 마그네트 최대높이에 미치는 영향을 설명하고자 한다. 이 계산에서 언급되지 않는 모든 변수들은 표 1에 나타난 값들을 사용하였다.

그림 7은 $f=0.7$, $g=0.9$ 일 때, 여러 값들의 전류밀도에 대하여, 최대 높이를 냉동용량의 함수로 계산한 결과이다. 일정한 전류밀도에 대해, 극저온냉동기의 냉동용량이 커짐에 따라 최대 높이가 증가하는 것은 하나, 점차 일정한 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이는 냉동용량의 증가가 어느 정도까지는 마그네트의 안정성 증가에 도움이 되기는 하지만, 그 한계가 있음을 의미한다. 그리고 전류 밀도가 작을수록 최대 높이가 대단히 커지는 것을 확인할 수 있다.

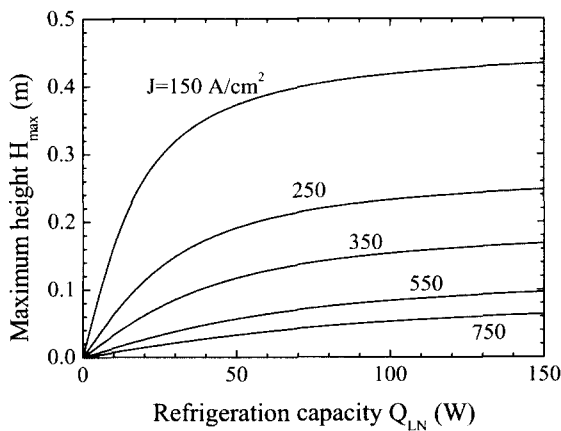


그림 7. 여러 전류밀도에 대해 냉동용량의 함수로 나타낸 마그네트의 최대 높이.
Fig. 7. Maximum height of magnet as a function of refrigeration capacity for various values of current density.

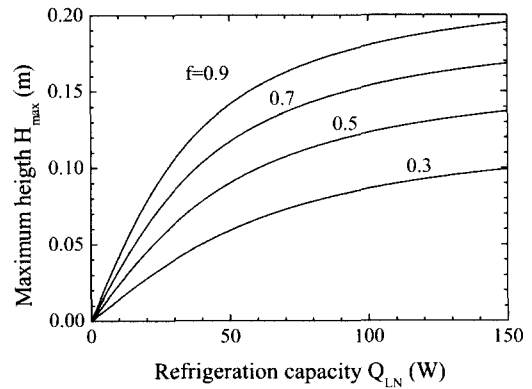


그림 8. 여러 은비에 대해 냉동용량의 함수로 나타낸 마그네트의 최대 높이.
Fig. 8. Maximum height of magnet as a function of refrigeration capacity for various values of volume fraction of Ag.

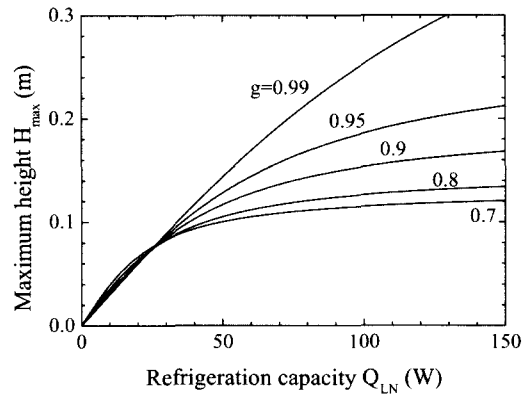


그림 9. 여러 선재-보빈 길이비에 대해 냉동용량의 함수로 나타낸 마그네트의 최대 높이.
Fig. 9. Maximum height of magnet as a function of refrigeration capacity for various values of length fraction of superconducting tape.

전류밀도가 감소하면, 안정성을 확보할 수 있는 마그네트의 최대 높이는 급속히 증가하는 것을 알 수 있다. 이 계산의 조건일 때, 만일 상전도 상태에서의 전류밀도를 $100 A/cm^2$ 이하로 줄일 수 있다면, 대부분의 냉동기에 대해 마그네트의 높이가 50 cm 이상까지도 열적 안정성을 유지할 수 있다. 반면에, 만일 전류밀도가 $1000 A/cm^2$ 이상이라면 안정성을 확보할 수 있는 마그네트의 길이가 5 cm 이하임을 알 수 있다.

그림 8은 $J=350 A/cm^2$, $g=0.9$ 일 때, 여러 값들의 은비에 대해 냉동용량의 함수로 마그네트의 최대 높이를 나타내고 있다. 은비가 커질수록 최대 높이는 커지며 따라서 정상상태의 열적 안정성이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 실제로 은비가 증가하면, 초전도선재의 임계전류밀도가 감소하므로 현실적인 면에

있어서는 작은 열적 교란에 의해서도 쉽게 퀘치가 발생할 수 있다. 따라서 초전도 선재의 상전도화의 가능성을 줄이기 위해서는 일반적으로 낮은 은비가 유리하지만, 일단 상전도화가 진행되면서 번아웃을 방지하기 위해서는 높은 은비가 유리할 것이다.

마지막으로 그림 9는 $J=350 A/cm^2$, $f=0.7$ 일 때, 여러 값들의 선재-보빈 길이비에 대해 냉동용량의 함수로 마그네트의 최대 높이를 나타내고 있다. 일반적으로 보아, 길이비가 커질수록, 즉 보빈의 두께가 얇아질수록, 안정성을 확보하기 위한 마그네트의 높이가 증가한다고 할 수 있다. 이 현상에서 가장 흥미로운 부분은 길이비가 비교적 작은 경우에는 그 안정성이 냉동기의 냉동용량에 큰 영향을 받지 않지만, 길이비가 커질수록 최대길이는 냉동용량에 매우 민감하게 반응하는 점이다. 이 결과는 매우 얇은 두께의 보빈을 사용하고 큰 냉동용량의 극저온냉동기를 채택하는 것이 상전도 상태의 열적 안정성을 위해 가장 효율적인 방법으로 해석할 수 있을 것이다.

4. 결 론

이 연구에서는 극저온냉동기로 전도냉각되는 초전도 마그네트가 상전도 상태로 지속되는 최악의 상황에서 유한한 온도의 정상상태로 유지하기 위한 조건을 해석적인 방법으로 제시하였다. 액체로 냉각되던 기존의 마그네트에서는 이와 유사한 조건을 마그네트의 발열특성만을 고려하였지만, 이 연구에서는 발열특성과 극저온냉동기의 냉동특성을 동시에 고려하여 새롭고 유용한 결론에 도달할 수 있었다.

전도냉각의 열적 안정성을 확보하기 위한 충분조건에는 온도에 따라 변화하는 재료와 냉동기의 특성이 포함되는데, 여기에 대한 일반식을 유도하였고, 특히 단순화된 경우에 대해 엄밀해(exact solution)와 그 물리적 의미를 설명할 수 있었다. 또 안정성 조건에 초전도 선재, 권선의 방법, 전류밀도, 냉동용량 등이 어떻게 영향을 주는지도 정량적으로 제시하였다. 이 연구의 결과는 전도냉각형 초전도 마그네트의 설계와 제작에 직접 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 한국학술진흥재단의 1999년 선도연구자 지원 과제(KRF-1999-041-E00096)의 연구 결과이며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] T. Kobayashi et al., "Manufacturing of Liquid Helium Free Superconducting Magnets for Industrial Use," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.43, pp.157-163, 1998.
 [2] T. Hasebe et al., "Cryocooler Cooled Superconducting Magnets and Their Applications," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.43, pp.291-295, 1998.
 [3] K. Watanabe et al., "11 T liquid

helium-free superconducting magnets," *Cryogenics*, Vol.36, No.12, pp.1019-1025, 1996.

[4] 장호명, "액체를 사용하지 않는 초전도시스템의 개발 동향," 한국초전도·저온공학회 1999년 학술대회 초청강연, pp.i-iv, 1999.
 [5] A. Rowe, J.A. Barclay and S. Dost, "Design of an Apparatus for a 5 T Conduction Cooled NbTi Solenoid with a 203 mm Room Temperature Bore," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.45, pp.651-658, 2000.
 [6] T. Hase et al., "Generation of 1 T, 0.5 Hz alternating magnetic field in room temperature bore of cyocooler-cooled Bi-2212 superconducting magnets," *Cryogenics*, Vol.36, No.12, pp.971-977, 1998.
 [7] M.N. Wilson, "Superconducting Magnets," Clarendon Press, Oxford, pp.91-130, 1983.
 [8] L. Dresner, "Stability of Superconductors," Plenum Press, New York, pp.53-127, 1995.
 [9] L. Dresner, "Stability and Protection of Ag/BSCCO magnets operated in the 20-40 K range," *Cryogenics*, Vol.33, No.9, pp.900-909, 1993.
 [10] L. Dresner, "Stability of an Uncooled Segment of a High-Temperature Superconductors," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.39, pp.429-435, 1994.
 [11] M.A. Daugherty et al., "Ramp Rate Testing of an HTS Gradient Magnetic Separation Magnet," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.43, pp.165-171, 1998.
 [12] H. Lim and Y. Iwasa, "Two-dimensional normal zone propagation in BSCCO-2223 pancake coils," *Cryogenics*, Vol.37, No.12, pp.789-797, 1997.
 [13] 이희준 등, "10 kVA 고온초전도 변압기의 특성 해석 및 제작," 한국초전도저온공학회 논문지, 제2권, 제2호, pp.37-43, 2000.
 [14] H.M. Chang and S.W. Van Sciver, "Optimal Integration of Binary Current Lead and Cryocooler," *Cryocoolers*, Vol.10, pp.707-716, 1999.

부 록

이 부록에서는 그림 2와 같은 단면의 복합재료에서 평균 열전도도에 대한 표현식을 유도한다. 복합재료에서의 열전도를 1차원으로 해석할 수 있을 때, 전기회로와의 유사성에 따라 열저항(thermal resistance)은 열전도 방향의 길이를 단면적과 열전도도로 나눈 값으로 정의한다.

그림 2와 같이 축방향으로 전도냉각되는 초전도 마그네트의 경우, 전체 열저항은 다섯 열저항의 직렬 또는 병렬 연결로 간주할 수 있다. 우선 초전도 복합선재(A+B)에 대한 평균 저항을 먼저 유도하고 이를 이용하여 마그네트의 전체 평균저항을 유도한다. 복합선재의 평균 열전도도는 단면적의 형상에 따라 서로 다른 값을 갖게 되지만, 두 재료 A와 B가 동일한

중형비(aspect ratio)를 갖고 있는 경우, 평균 열전도도는

$$\frac{1}{k_{A+B}} = \frac{(1-\sqrt{1-f})}{k_A} + \frac{\sqrt{1-f}}{(1-\sqrt{1-f})k_A + \sqrt{1-f}k_B} \quad (A.1)$$

이며, 여기에서 f 는 A+B의 단면적 중에서 재료 A가 차지하는 면적의 비율을 나타낸다.

일반적으로 재료 A는 매우 우수한 도체인 금속(은, 구리 등)이며 재료 B가 초전도체인데, 금속의 열전도도가 초전도체에 비하여 수십 배 내지 수백 배 정도도 크기 때문에, f 가 아주 작지 않은 경우에 대해 A+B의 평균 열전도도는 근사적으로 다음과 같다.

$$\frac{1}{k_{A+B}} = \left(\frac{2-\sqrt{1-f}-f}{1-\sqrt{1-f}} \right) \frac{1}{k_A} \quad (A.2)$$

초전도 복합선재(A+B)가 보빈에 권선되어 있는 경우, 마그네트 전체에 대한 열저항은 그림 2와 같은 구성을 하므로, 평균 열전도도는 일반적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\frac{g}{k_{A+B}} + \frac{(1-g)}{k_G}} + \frac{A_G}{A} k_G \quad (A.3)$$

일반적으로 보빈의 재료(G)는 저온에서 기계적 강도가 우수한 절연재(G-10 FRP 등)를 주로 사용하는데, 이 재료의 열전도도는 금속(A)에 비해 매우 작다. 따라서 축방향으로 전도되는 대부분의 열은 그림 2의 우측에 해당하는 A+B와 G를 통하여 흐르게 되고, G의 반경방향 단면적은 큰 영향을 주지 못한다. 결과적으로 마그네트의 평균열전도도는 다음과 같이 금속재료(A)와 보빈(G)의 열전도도, 그리고 두 개의 단면적비(f 와 g)가 평균 열전도도로 결정된다.

$$\frac{1}{k} = \left(\frac{2-\sqrt{1-f}-f}{1-\sqrt{1-f}} \right) \frac{g}{k_A} + \frac{(1-g)}{k_G} \quad (A.4)$$

저 자 소 개



권기범(權記範)
 1974년 8월 2일생. 2001년 홍익대학교 기계공학과 졸업, 현재 홍익대학교 기계공학과 석사과정



장호명(張鎬明)
 1960년 9월 21일생. 1983년 서울대학교 기계공학과 졸업, 1984년 University of Michigan 기계공학과 졸업(공학석사), 1988년 M.I.T. 기계공학과 졸업(공학박사), 1990년~현재 홍익대학교 기계공학과 교수.