

2단냉동기로 전도냉각되는 HTS전류도입선의 열역학 설계

장 후 명

홍익대학교 기계공학과

Thermodynamic Design of HTS Current Leads Conduction-Cooled by 2-Stage Cryocooler

Ho-Myung Chang

Hong Ik University, Department of Mechanical Engineering

hmchang@wow.hongik.ac.kr

Abstract An optimal cooling method for HTS(high T_c superconductor) current leads has been analytically sought to minimize the required refrigerator power. The binary current lead is a series combination of a normal metal conductor at the warmer part and an HTS at the colder part. The lead is cooled by direct contacts with a two-stage cryocooler at the joint and at the cold end. It is clearly proven that there exists unique optimal values for the joint temperature and the current density to minimize the refrigerator power per unit current. The actual power input to the cryocooler in the optimal conditions is compared with its thermodynamic limit, and some significant issues in practical design are presented with a useful graphical method.

1. 서 론

전류도입선(current lead)은 모든 초전도시스템에 사용되는 중요한 부품으로, 상온의 전원으로부터 극저온 상태의 초전도자석에 전류를 공급하는 역할을 한다. 전류도입선의 재료는 전기전도도가 매우 커야 발열을 줄일 수 있고, 열전도도가 매우 낮아야 상온에서 극저온으로의 열유입을 줄일 수 있다. 금속재료의 경우, 열전도도와 전기전도도는 기본적으로 Wiedemann-Franz법칙을 따르므로 극저온에서의 냉동부하를 줄이는데 그 한계가 있게 된다.

고온초전도체(HTS: High T_c Superconductor)는 초전도상태에서 전기적으로 완벽한 도체이며, 매우 낮은 열전도도를 가지고 있기 때문에 초전도시스템에서 냉동부하를 줄일 수 있는 가장 우수한 재료이다. 현재 가장 널리 사용되는 고온초전도체로는 BSCCO 및 YBCO를 수 있다. 이중(binary)전류도입선 또는 복합(hybrid)전류도입선은 고온부에 금속과 저온부에 고온초전도체를 직렬로 연결한 구성으로 이루어진다. 현재까지 실용화된 대부분의 초전도시스템은 액체헬륨의 증

발잠열을 이용하므로 여기에서 생성되는 헬륨증기에 의하여 전류도입선을 냉각하는 증기냉각(vapor-cooled)방식이며, 따라서 증발된 헬륨의 액화에 필요한 부하를 최소로 하는 점에 초점이 맞추어져 있었다. [1-3]

최근에 4 K에 직접 도달할 수 있는 소형 Gifford-McMahon(GM) 냉동기의 개발은 액체헬륨을 사용하지 않고 냉동기가 직접 전도냉각하는(conduction-cooled) 초전도시스템의 개발을 가속화하였다. 전도냉각방식의 경우, 전류도입선은 냉동기에 연결되어 단열용 진공공간에 위치하게 되며, Fig. 1과 같이 냉동기의 제2단은 전류도입선의 저온부를 냉각하고, 제1단은 중간 집합부를 냉각하는 구성을 하게 된다.

본 연구는 HTS전류도입선을 2단 전도냉각하는데 소요되는 냉동일을 최소로 하는 방법을 제시할 목적으로 수행되었다. 최근 Chang과 Van Sciver [4,5]는 가역냉동기로 이중전류도입선을 전도냉각할 때의 최적화 이론을 열역학적 극한의 개념으로 발표하였다. 본 논문에서는 이 이론에 실제 극저온냉동기의 성능과 초전도체의 임계특성을 포함한 2단냉각의 열역학 설계방법을 하고자 한다.

2. 설 계 이 론

2.1 냉각부하

설계를 위해서는 Fig. 1과 같이 저온끝단에서의 냉동부하와 중간집합부에서의 냉동부하를 각각 계산해야 한다. 초전도상태를 유지하고 있는 고온초전도체부(하첨자 1)에서 열이 발생하지 않

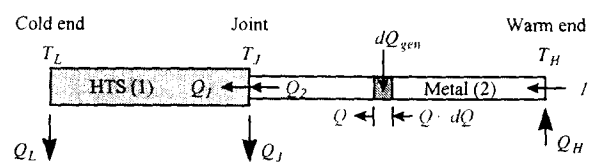


Fig. 1 Binary HTS current lead cooled at cold and at joint by a two-stage cryocooler

으므로 단면적이 A_1 , 길이가 L_1 인 고온초전도체의 냉동부하 Q_L 은

$$Q_L = \frac{A_1}{L_1} \int_{T_c}^{T_h} k_1(T) dT \quad (1)$$

와 같이 열전도도 k_1 을 온도(T)의 함수로 직접 적분을 수행하여 계산된다.

금속부(하첨자 2)에서는 Fig.1과 같은 미소 검사체적에 대하여 Fourier전도법칙과 Ohm의 법칙을 적용하고 접합부에서 고온부까지 적분하여 접합부에서 냉동부하 Q_J 의 최소값을 계산할 수 있다. [4]

$$(Q_J)_{\min} = (Q_2)_{\min} - Q_1 \\ = I \cdot \sqrt{2 \int_{T_c}^{T_h} \rho_2 k_2 \cdot dT} - \frac{A_1}{L_1} \int_{T_c}^{T_h} k_1 \cdot dT \quad (2)$$

여기에서 I 는 전류이고 ρ_2 는 금속의 전기저항율이다.

이러한 최소값을 제공하는 금속부의 최적형상은 고온초전도체의 형상과는 상관없이 금속부 양단의 온도에 따라 결정된다.

$$\left(\frac{L_2}{A_2}\right)_{opt} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot I} \int_{T_c}^{T_h} \frac{k_2}{\int_{T_c}^{T_h} \rho_2(\tau) k_2(\tau) \cdot d\tau} dT \quad (3)$$

2.2 냉동기 소요동력

서로 다른 두 온도에서의 냉동을 수행하는데 소요되는 동력은, 냉동온도 및 냉동부하에 추가하여 냉동기의 성능에 따라 결정된다. 일반적으로

$$W_{ref} = \frac{Q_L}{COP_L} + \frac{Q_J}{COP_J} \quad (4)$$

와 같이 표현할 수 있는데, 여기서 COP 는 냉동기의 성능계수(coefficient of performance)로 입력동력에 대한 냉동능력의 비로 정의된다.

본 논문에서는 현실적인 냉동기모델을 결정하기 위해 시중에 판매되고 있는 10개사 18종의 냉동기들을 조사하여, 냉동기의 성능을 나타내는 COP 를 Fig. 2에 나타내었다. 이들을 바탕으로

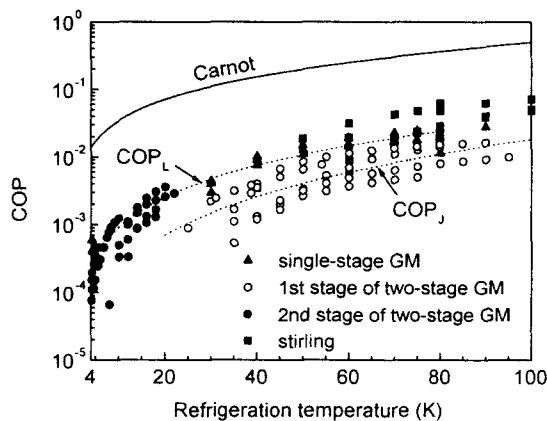


Fig. 2 COP(coefficient of performance) of some commercial cryocoolers and the 2-stage model (dotted curves) in this study

실제 소요동력을 계산할 수 있는 냉동기 성능모델을 두 개의 점선곡선으로 나타내었다. 실선은 열역학적으로 이상적인 가역냉동기의 COP 를 나타내고 있다. 2단 냉각방식에서 단위 전류당 소요되는 전체동력은 식(1)과 식(2)을 식(4)에 대입함으로써 유도된다.

$$\left(\frac{W_{ref}}{I}\right)_{\min} = \frac{1}{COP_L} \cdot \frac{1}{J_1 L_1} \int_{T_c}^{T_h} k_1 \cdot dT \\ + \frac{1}{COP_J} \cdot \left(\sqrt{2 \int_{T_c}^{T_h} \rho_2 k_2 \cdot dT} - \frac{1}{J_1 L_1} \int_{T_c}^{T_h} k_1 \cdot dT \right) \quad (5)$$

여기에서 J_1 은 초전도체의 전류밀도이다.

2.3 구속조건

식(5)는 금속부가 최적설계되고 초전도체가 열열이 없다는 가정하에 해석적으로 유도된 단위 전류당 소요동력이다. 열역학 설계의 마지막 단계는 초전도체가 초전도상태를 유지하기 위한 구속조건하에서 식(5)를 최소로 하는 작업이다. 벌크형 고온초전도체의 경우, 초전도임계전류밀도는 온도에 따라 선형적으로 변하므로, 최적화의 구속조건은

$$J_1 \leq J_C = J_{C0} \cdot \left(1 - \frac{T_c}{T_C}\right) \quad (6)$$

으로 표현될 수 있다. 여기서 J_{C0} 는 0 K에서 전류밀도로 초전도체의 형상, 크기, 제작방법 등에 따라 변화한다.

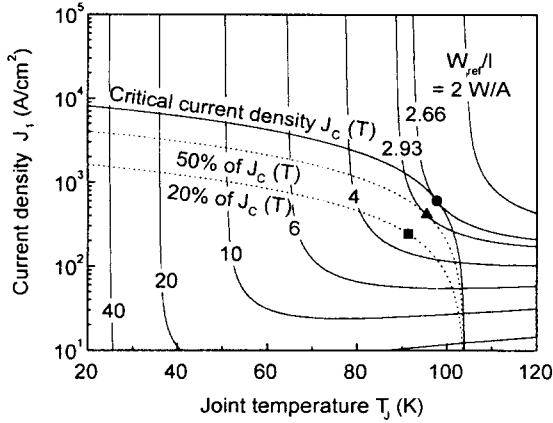
3. 결과 및 고찰

3.1 열역학 설계

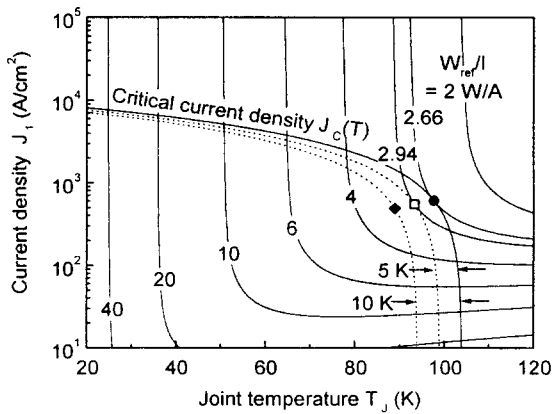
본 논문의 열역학 설계 이론은 임의의 온도범위와 임의의 재료에 대하여 적용이 가능하다. 본 논문에서는 정량적인 토의를 위하여, 양 끝단 온도를 각각 300 K 및 4 K인 경우와 전류도입선의 재료가 BSCCO-2223와 구리인 경우에 대한 결과만을 제시한다. 계산에 사용된 BSCCO-2223의 열전도도는 Balachandran등 [2]에 의해 측정된 자료를 이용하였고, 초전도 임계온도는 104 K로 가정하였다. 그리고 구리의 열전도도 및 전기저항율은 Meahata등 [6]에 의해 제안된 온도의 함수를 이용하였다.

전류도입선의 양단의 온도, 재료, 그리고 냉동기의 성능계수들이 온도의 함수로 주어지면, 식(5)는 초전도체의 길이(L_1), 전류밀도(J_1), 접합부 온도(T_J)인 세 변수의 함수이다. $L_1=20$ cm일 경우에 대해, J_1-T_J 선도상에 식(5)에 의한 단위 전류당 소요동력의 궤적을 나타내면 Fig. 3과 같다.

일반적으로 접합부의 온도 또는 고온초전도체의 임계전류밀도가 증가함에 따라 단위 전류당 소요 냉동일은 감소한다. 그러나 접합부의 온도가 매우 낮거나 임계전류밀도가 매우 높을 때는 고온초전도체의 냉동부하가 무시할 정도로 작아져 임계전류밀도와는 거의 무관하다. 반대로 접합부의 온도가 상대적으로 매우 높거나 임계전류밀도가 매우 낮을 때는 전류밀도는 접합부온도보다 더 중요한 변수가 된다.



(a) 50% & 20% of critical current density



(b) 5K & 10K below of critical temperature

Fig. 3 Contours of refrigerator power per unit current and critical current density of HTS on J_1 - T_j diagrams ($L_1 = 20$ cm, $J_{c0} = 10,000$ A/cm²)

식(6)에 의한 구속조건($J_{c0} = 10,000$ A/cm²)은 Fig.3의 J_1 - T_j 선도상에 실선으로 나타난다. 이 조건을 만족하면서 소요동력이 최소가 되는 이론적 최적점은 유일하게 존재하며 Fig.3에 ●로 나타내었다. 즉 초전도체의 전류밀도와 접합부 온도는 동시에 유일한 최적값들을 갖게 되는 것이다.

접합부 온도가 최적 접합부온도보다 더 높게 되면 저온부하의 증가로 더 많은 냉동일이 소요되며, 더 낮게되면 저온부하는 줄어드나 접합부에서 냉동부하가 크게되어 더 많은 냉동일이 소요된다. 이 경우, 이중전류도입선의 냉각에 소요되는 단위 전류당 냉동일은 약 2.66 W/A이다. 이 값은 동일조건하에서 계산한 2단 가역냉각방식의 경우 [4]와 비교해 보면 약 29배 더 많은 수치이며, 소요 냉동일의 열역학적 최소극한값을 제시하는 연속분포 냉각방식 [4]과 비교하면 약 47배 더 많다. 이론상의 최적의 접합부온도와 전류밀도의 값들은 각각 97.7 K와 610 A/cm²이다.

이론적인 최적값들은 항상 Fig. 3과 같이 항상 초전도임계상태에서 존재하게 된다. 열적 교란의 범위에서 안정되기 위하여 이론적인 최적값보다 접합부의 온도나 전류밀도를 약간 낮게 결정해야 한다. 본 연구에서는 얼마간의 안정 범위를 고려하여 실제의 최적값을 결정하는 방법을 두 가지로 구분하였다.

첫번째 방법은 고온초전도체의 임계전류밀도에 임의의 인자를 곱하여 최적값을 찾는 방법이다. Fig. 3(a)에 점선으로 표시된 것처럼, 임계전류밀도의 50%나 20%로 고온초전도체가 수용할 수 있는 전류밀도를 낮추면 항상 초전도 상태를 유지할 수 있다. 이 때에도 단위 전류당 최소 냉동일은 각각 2.93 W/A과 3.48 W/A로 유일한 값을 가진다. 첫 번째 방법은 수용 전류밀도에 2나 5로 안전계수를 주는 것에 근거한다. 임계전류밀도의 50% 경우에 최적 접합부 온도와 전류밀도는 각각 95.4 K와 415 A/cm²이며, 20% 경우는 91.3 K와 244 A/cm²이다.

두번째 방법은 임의의 전류밀도에서 임계온도보다 어느 정도 낮게 설계하는 방법이다. Fig. 5에서 점선은 초전도 임계온도보다 각각 5 K나 10 K 낮게 설계하는 경우를 나타낸다. 이렇게 설계를 하였을 경우, 역시 최적상태가 결정된다. 최적상태, 즉 단위 전류당 소요 냉동일의 최소값은 5 K 낮게 설계하였을 경우가 2.94 W/A이며 10 K 낮게 설계한 경우는 3.27 W/A이다. 그리고 최적 접합부온도와 전류밀도를 살펴보면 각각 93.3 K와 551 A/cm²이며, 5 K 낮게 설계한 경우는 88.9 K와 490 A/cm²이다.

3.2 차원해석 및 설계자료

앞절의 예는 $L_1 = 20$ cm 및 $J_{c0} = 10,000$ A/cm²인 경우를 설명하고 있다. 유사한 계산을 여러 값의 초전도체의 길이와 임계전류밀도에 대해 계산을 반복하기에 앞서, 간단한 차원해석(dimensional analysis)를 수행할 수 있다. 식(5)와 구속조건 식(6)을 고온초전도체의 임계온도와 임계온도에서의 재료의 상태량을 이용하여 무차원화하면 그 결과는 다음과 같다.

$$\frac{(W_{ref}/D)_{min}}{\sqrt{T_c \rho_2 k_2}} \equiv F \left[\frac{J_{c0} L_1}{k_1} \sqrt{\frac{\rho_2 k_2}{T_c}} \right] \quad (7)$$

즉, 전류도입선의 양단의 온도와 재료가 주어지면 2단냉동을 위한 최적화는 고온초전도체의 길이와 0 K에서 고온초전도체의 임계전류밀도의 곱($L_1 \times J_{c0}$)으로 수행될 수 있다.

Fig. 4는 전류도입선의 냉각에 소요되는 단위 전류당 최소 냉동일의 변화를 $L_1 \times J_{c0}$ 의 함수로 나타내었다. $L_1 \times J_{c0}$ 의 값이 증가함에 따라 단위 전류당 최소 냉동일은 점차 감소함을 보인다. J_{c0} 는 초전도재료의 임계특성이고 L_1 은 전류도입선의 길이이므로, 냉각에 소요되는 동력을 줄이기 위해서는 우수한 임계특성의 초전도체를 개발하거나 길이가 긴 전류도입선으로 제작하여야

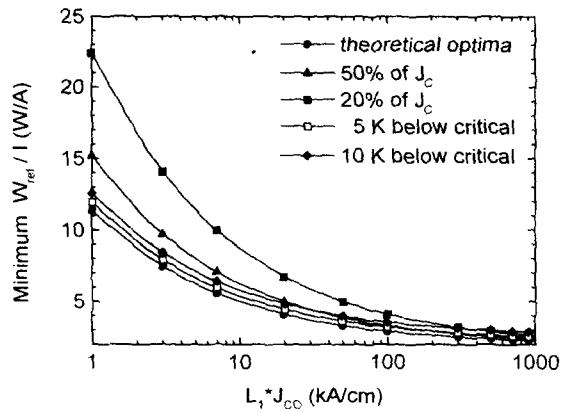


Fig. 4 Minimum refrigerator power per unit current vs. $L_1 \times J_{co}$

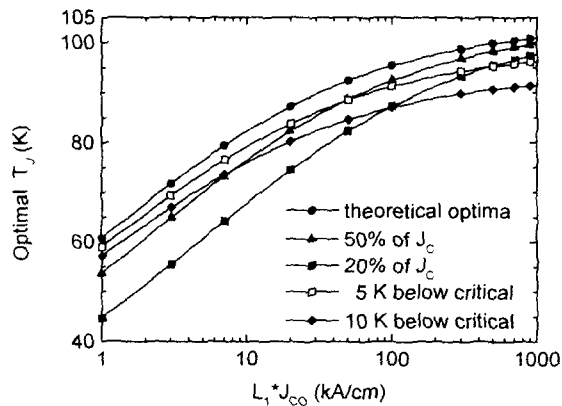


Fig. 5 Optimal joint temperature vs. $L_1 \times J_{co}$

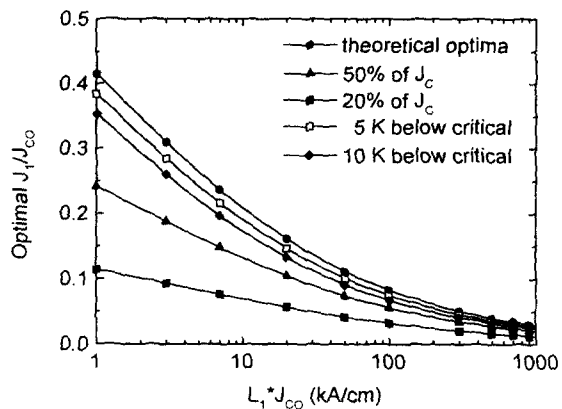


Fig. 6 Optimal current density of HTS vs. $L_1 \times J_{co}$

한다. 이 값은 어느 정도의 값 이상이 되면 소요 동력에 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

Fig. 5는 전류도입선의 최적의 접합부 온도변화를 $L_1 \times J_{co}$ 의 함수로 나타내었다. J_{co} 는 일정한 상수이므로 고온초전도체의 길이가 증가함에 따라 최적 접합부온도도 증가함을 알 수 있다. 이론적인 최적 접합부 온도보다 현실성 있는 최

적 접합부 온도는 다소 낮은 값을 가지게 되며, 실제의 설계에 사용 될 수 있는 최적 접합부온도는 안정성의 범위를 크게 할수록 더욱 낮아지게 된다. 고온초전도체의 길이가 100 cm 이내인 경우 최적의 접합부온도는 약 50 K ~ 100 K 사이에 존재함을 알 수 있다.

Fig. 6은 2단 실제 냉각방식에 대하여 고온초전도체의 0 K에서 임계전류밀도와 최적 전류밀도 비의 변화를 $L_1 \times J_{co}$ 의 함수로 나타내었다. 고온초전도체의 길이가 증가함에 따라 최적의 접합부 온도가 증가하게 되며, Fig. 2에 나타난 것처럼 고온초전도체가 수용할 수 있는 전류밀도는 온도가 증가함에 따라 감소하게 된다. 따라서 고온초전도체의 길이가 증가함에 따라 최적 전류밀도 값은 감소하게 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 2단냉동기로 전도냉각되는 초전도 전류도입선의 실제 설계방법에 관한 연구를 수행하였다. 초전도 안정성 범위를 결정하여 최적상태를 쉽게 나타내는 도식적 방법으로 실제 초전도 시스템에 적용이 가능한 최적 설계값들을 도출하였다. 가장 중요한 결론으로는 초전도전류도입선의 전류밀도와 접합부의 온도가 동시에 최적화되어야 냉각에 소요되는 동력을 최소화할 수 있다는 점이었다. 또한 이러한 열역학 설계에는 초전도재료의 임계전류밀도와 길이의 곱이 가장 중요한 변수임을 알게 되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Wesche, R. and Fuchs, A.M., "Design of superconducting current leads," Cryogenics, Vol.34, No.2, pp.145-154, 1994.
- [2] Herrmann, P.F. et al., "Cryogenic load calculation of high Tc current lead," Cryogenics, Vol.33, No.5, pp.555-562, 1993.
- [3] Balachandran, U. et al., "Application of sinterforged Bi-2223 bars to 1500 A A.C. power utility service as high-frequency current leads in a 77 - 4 K temperature gradient," IEEE Applied Superconductivity, Vol.3, No.6, pp.313-320, 1995.
- [4] Chang, H.-M. and Van Sciver, S.W., "Thermodynamic optimization of conduction-cooled HTS current leads," Cryogenics, Vol.38, No.7, pp.729- 736, 1998.
- [5] Chang, H.-M. and Van Sciver, S.W., "Optimal Integration of Binary Current Lead and Cryocooler", 10th Int. Cryocooler Conference, Monterey, CA, USA, 1998.
- [6] Maehata, K., Ishibasi K. and Wakuta, Y., "Design chart of gas-cooled current leads made of copper of different RRR values," Cryogenics, Vol.34, No.11, pp.935-940, 1994.