

# 전도냉각형 펠티어 전류도입선의 최적화

정은수<sup>†</sup>

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과

## Optimization of Conduction-cooled Peltier Current Leads

Eun Soo Jeong<sup>†</sup>

Department of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received March 29, 2005; revision received June 10, 2005)

**ABSTRACT:** A theoretical investigation for optimization of conduction-cooled Peltier current leads is undertaken. A Peltier current lead (PCL) is composed of a thermoelectric element (TE), a metallic lead and a high  $T_C$  superconductor (HTS) lead in the order of decreasing temperature. Mathematical expression for the minimum heat flow per unit current crossing the TE-metal interface and that flowing from the metal lead to the joint of the metal and the HTS leads are obtained. It is shown that the temperature at the TE-metal interface possesses a unique optimal value that minimizes the heat flow to the joint and that this optimal value depends on the material properties of the TE and the metallic lead but not the joint temperature nor electric current. It is also shown that there exists a unique optimal value for the joint temperature between the metal and the HTS leads that minimizes the sum of the power dissipated by ohmic heating in current leads and the refrigerator power consumed to cool the lead, for a given length of the HTS.

**Key words:** Current lead(전류도입선), Peltier effect(펠티어 효과), Thermoelectric element(열전요소), Heat leak(열유입)

### 기호 설명

$A$  : 단면적 [ $m^2$ ]  
 $COP$  : 냉동기의 성능계수  
 $I$  : 전류 [A]  
 $J$  : 전류밀도,  $I/A$  [ $A/m^2$ ]  
 $k$  : 열전도율 [ $W/(m \cdot K)$ ]  
 $L$  : 길이 [m]

$P$  : 동력 [W]  
 $Q$  : 열전달률 [W]  
 $q$  : 단위전류당 열전달률,  $Q/I$  [ $W/A$ ]  
 $T$  : 온도 [K]  
 $V$  : 전압 [V]  
 $x$  : 길이방향 좌표 [m]

### 그리스 문자

$\alpha$  : 시백계수(Seebeck coefficient) [ $V/K$ ]  
 $\rho$  : 비저항 [ $\Omega \cdot m$ ]  
 $\tau$  : 적분변수

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-320-1676; fax: +82-2-322-7003

E-mail address: esjeong@hongik.ac.kr

하첨자

- I* : 2단형 냉동기의 제1단
- II* : 2단형 냉동기의 제2단
- C* : 저온
- crit* : 임계
- diss* : 오염발열
- H* : 고온
- HTS* : 고온초전도체
- I* : 열전요소와 금속의 경계면
- J* : 금속과 고온초전도체의 접합부
- m* : 금속
- min* : 최소
- opt* : 최적
- P* : 열전(펠티어) 요소
- ref* : 냉동기
- tot* : 총합

1. 서 론

전류도입선(current lead)은 상온의 전원에서 극저온의 초전도자석으로 전력을 공급하는데, 전류도입선을 통한 열유입은 복사에 의한 열유입과 함께 초전도시스템의 가장 큰 냉각부하 중의 하나이다. 전류도입선 양단의 온도차에 의한 열전도와 전류도입선의 전기적 저항에 의한 발열로 인하여 열이 초전도자석으로 유입된다.<sup>(1,2)</sup>

기존의 금속 전류도입선은 황동이나 구리와 같은 금속으로 제작되는데, 금속의 열전도율은 매우 크므로 이러한 전류도입선을 통한 열유입은 상당하다. 이중 전류도입선(binary or hybrid current lead)은 기존의 금속 전류도입선의 저온부를 고온초전도체로 대체한 형태를 갖고 있는데, 고온초전도체의 열전도율은 금속에 비하여 매우 작고 또 전기저항이 없으므로 전류도입선을 통한 열유입을 크게 감소시킬 수 있다.<sup>(1,3)</sup> 최근에 Yamaguchi et al.<sup>(4)</sup>은 펠티어 효과를 이용하였기 때문에 펠티어 전류도입선으로 부르는 새로운 형태의 전류도입선을 제안하였다. 이 전류도입선은 이중 전류도입선의 고온부에 열전요소를 삽입한 형태를 갖고 있다.<sup>(2,5)</sup>

펠티어 전류도입선을 사용하면 전류도입선을 통한 열유입과 전류도입선을 냉각하는데 필요한 냉

동기의 소요동력을 크게 감소시킬 수 있다는 것이 여러 연구에 의하여 밝혀졌다.<sup>(2,5,7)</sup> Xuan et al.<sup>(6)</sup>은 전도냉각되는 펠티어 전류도입선의 열전요소와 금속부의 최적 기하학적 형상, 즉 길이와 단면적의 비를 수치적으로 구하였다. Sato et al.<sup>(5)</sup>은 증발되는 헬륨가스에 의하여 냉각되는 펠티어 전류도입선의 열유입을 최소화하기 위하여 요구되는 열전요소와 금속의 경계면에서의 온도와 열전달률의 관계를 제시하였다. 그러나, 이 연구들<sup>(5,6)</sup>은 펠티어 전류도입선의 열적 거동을 수치적인 방법으로 해석하였거나 금속-고온초전도체의 접합부 온도를 77 K로 고정하였기 때문에 펠티어 전류도입선의 열유입을 감소시키는 기구에 대한 이해나 최적 설계조건에 대한 정보를 충분히 제공하지 못한다.

본 연구에서는 전도냉각되는 펠티어 전류도입선의 열전요소와 금속부의 최적 조건을 해석적으로 규명하였고, 2단형 냉동기로 전도냉각되는 펠티어 전류도입선의 소요동력을 최소화하는 최적 중간냉각온도를 구하는 방법을 제시하였다. 또한, 펠티어 전류도입선의 효율성을 보이기 위하여 금속 전류도입선, 이중 전류도입선, 그리고 펠티어 전류도입선의 이론적인 최소동력을 비교하였다.

2. 해석모델

Fig. 1은 펠티어 전류도입선을 사용하는 초전도자석시스템의 개략적인 구조를 보여준다. 펠티어

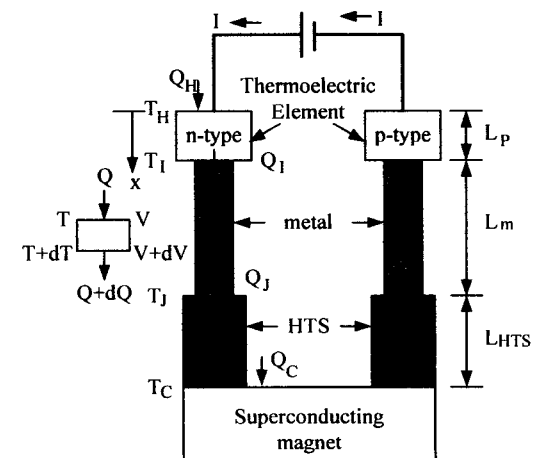


Fig. 1 Schematic diagram of a superconducting magnet system with PCLs.

전류도입선은 열전요소, 금속부, 그리고 고온초전도체로 구성된다. 냉동기를 이용하여 초전도체를 냉각하는 시스템에서 금속과 고온초전도체 사이의 접합부는 2단형 냉동기의 제1단에 의하여 냉각되고, 고온초전도체의 저온부는 제2단에 의하여 냉각된다. 고온부의 온도  $T_H$ 는 상온으로 일정하다고 가정할 수 있으나, 금속과 초전도체의 접합부 온도  $T_J$ 와 초전도체의 저온부 온도  $T_C$ 는 전류도입선을 통한 열유입량과 2단형 냉동기의 제1단과 제2단의 냉동용량에 의하여 결정된다. 열전요소와 금속부의 경계면의 온도  $T_I$ 는 전류도입선을 통한 열유입을 최소화하기 위하여 결정되어야 할 변수이다. 고온부에서 저온부로 이동하는 열전달을 (+) 방향으로 가정하였다.

전류도입선을 통하여 전달되는 열전달률과 전류는 다음과 같이 표현된다.<sup>(6)</sup>

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \pm \alpha IT \quad (1)$$

$$I = -\frac{A}{\rho} \left( \frac{dV}{dx} \pm \alpha \frac{dT}{dx} \right) \quad (2)$$

금속과 고온초전도체의 경우 시벡계수  $\alpha$ 는 0이다.  $\alpha$  앞의 부호는 전류에 의한 열이동의 방향이 전류의 방향과 같은 p-형(p-type) 열전요소의 경우(+)이고, 전류에 의한 열이동이 전류와 반대 방향인 n-형(n-type) 열전요소의 경우(-)이다.

Fig. 1의 좌우에 나타낸 p-형 열전요소와 n-형 열전요소를 사용하는 전류도입선들의 온도분포와 열유입량은 같으므로 본 연구에서는 n-형 열전요소를 사용하는 전류도입선만 고려한다. 또, 열전요소의  $\alpha$ 는 온도에 따라 변하지 않고 일정하다고 가정한다. Fig. 1에 표시된 전류도입선의 아주 작은 길이에 대한 1차원 에너지보존식은 다음과 같다.

$$dQ + IdV = 0 \quad (3)$$

식(2)와 식(3)에서 다음과 같은 표현을 얻을 수 있다.

$$d(Q + \alpha IT) = \frac{\rho I^2}{A} dx \quad (4)$$

식(1)을 식(4)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$(Q + \alpha IT)d(Q + \alpha IT) = -\rho k l^2 dT \quad (5)$$

$\alpha=0$ 일 때 식(5)는 Chang and Sciver<sup>(3)</sup>의 식(18)과 같게 된다.

## 2.1 열전요소의 최적화

식(5)를 열전요소 전체에 대하여 적분하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{2} [(Q_I + \alpha_P IT_I)^2 - (Q_H + \alpha_P IT_H)^2] = -I^2 \int_{T_H}^{T_I} \rho_P k_P dT \quad (6)$$

식(6)에서 열전요소에서 금속부로 흐르는 열전달률  $Q_I$ 를 구하면 다음과 같다.

$$Q_I = \sqrt{(Q_H + \alpha_P IT_H)^2 + 2I^2 \int_{T_I}^{T_H} \rho_P k_P dT} - \alpha_P IT_I \quad (7)$$

식(7)은  $T_H$ 와  $T_I$ 가 정해진 경우  $Q_H + \alpha_P IT_H = 0$ 일 때  $Q_I$ 가 최소가 되는 것을 보여준다. 또한, 식(1)에서  $Q_I$ 가 최소가 되기 위해서는 열전요소의 고온부에서 축방향 온도구배가 0이 되어야 한다는 것을 알 수 있다. 열전요소와 금속부의 경계를 이동하는 단위전류당 최소 열전달률은 다음과 같이 표현된다.

$$(q_I)_{\min} = \left( \frac{Q_I}{I} \right)_{\min} = \sqrt{2 \int_{T_I}^{T_H} \rho_P k_P dT} - \alpha_P T_I \quad (8)$$

열전요소 내부의 한 축방향 지점의 온도를  $T$ 라 하면, 이 지점의 최적 열전달률은 식(5)를 열전요소의 고온부에서 이 지점까지 적분하고  $Q_H + \alpha_P IT_H = 0$ 을 적용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(Q_P)_{opt} = I \sqrt{2 \int_T^{T_H} \rho_P(\tau) k_P(\tau) d\tau} - \alpha_P IT \quad (9)$$

식(9)를 식(1)에 대입한 후 열전요소 전체에 대하

여 적분하여 열전요소와 최적 기하학적 조건을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\left(\frac{L_p I}{A_p}\right)_{opt} = \int_{T_i}^{T_n} \frac{k_p(T)}{\sqrt{2 \int_T^{T_n} \rho_p(\tau) k_p(\tau) d\tau}} dT \quad (10)$$

## 2.2 금속부의 최적화

식(5)를 금속부 전체에 대하여 적분하면 다음과 같이 표현된다. 일반적인 금속에서  $\alpha=0$ 이므로  $\alpha$ 를 포함하는 항들은 사라진다.

$$\frac{1}{2}(Q_J^2 - Q_I^2) = -I^2 \int_{T_i}^{T_j} \rho_m k_m dT \quad (11)$$

식(11)에서 금속부에서 금속부-고온초전도체의 접합부로 흐르는 열전달률  $Q_J$ 를 구할 수 있다.

$$Q_J = \sqrt{Q_I^2 + 2I^2 \int_{T_i}^{T_j} \rho_m k_m dT} \quad (12)$$

식(12)는  $T_i$ 와  $T_j$ 가 정해진 경우  $Q_I$ 가 최소일 때  $Q_J$ 가 최소가 되는 것을 보여준다. 식(8)을 식(12)에 대입하여 금속부에서 금속부-고온초전도체의 접합부로 흐르는 단위전류당 최소 열전달률을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(q_J)_{min} \equiv \left(\frac{Q_J}{I}\right)_{min} = \sqrt{\left(\sqrt{2 \int_{T_i}^{T_n} \rho_p k_p dT - \alpha_P T_i}\right)^2 + 2 \int_{T_i}^{T_j} \rho_m k_m dT} \quad (13)$$

금속부 내부의 한 축방향 지점의 온도를  $T$ 라 하면, 식(5)를 열전요소와 금속부의 경계에서 이 지점까지 적분하고  $Q_I = (Q_I)_{min}$ 과  $\alpha=0$ 을 적용하여 이 지점의 최적 열전달률을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(Q_m)_{opt} = I \sqrt{\left(\sqrt{2 \int_{T_i}^{T_n} \rho_p k_p dT - \alpha_P T_i}\right)^2 + 2 \int_T^{T_j} \rho_m k_m dT} \quad (14)$$

식(14)를 식(1)에 대입한 후 금속부 전체에 대하여 적분하면 금속부의 최적 기하학적 조건은 다음과 같이 표현된다.

$$\left(\frac{L_m I}{A_m}\right)_{opt} = \int_{T_i}^{T_j} \frac{k_m(T)}{\sqrt{\left(\sqrt{2 \int_{T_i}^{T_n} \rho_p k_p dT - \alpha_P T_i}\right)^2 + 2 \int_T^{T_j} \rho_m k_m dT}} dT \quad (15)$$

## 2.3 열전요소와 금속부 경계면의 최적온도

$T_H$ ,  $T_i$ , 그리고  $T_j$ 가 주어진 경우 열전요소와 금속부는 2.1절과 2.2절에 제시된 방법에 의하여 최적화할 수 있다. 고온부 온도  $T_H$ 는 보통 상온이고, 금속부와 고온초전도체 사이의 접합부 온도  $T_j$ 는 전류도입선을 통하여 흐르는 열전달률과 냉동기의 냉동용량에 의하여 결정된다. 그러나, 열전요소와 금속부 경계의 온도  $T_i$ 는 열전요소와 금속부의 기하학적 조건(길이와 단면적의 비)을 변화시키면 쉽게 조절할 수 있다. 그러므로, 펠티어 전류도입선을 최적화하기 위한 다음 단계는 금속과 고온초전도체의 접합부로 이동하는 열전달률  $Q_J$ 를 최소화하는  $T_i$ 를 결정하는 것이다.

식(13)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(q_J)_{min}^2 = \left(\sqrt{2 \int_{T_i}^{T_n} \rho_p k_p dT - \alpha_P T_i}\right)^2 + 2 \int_{AK}^{T_j} \rho_m k_m dT - 2 \int_{AK}^{T_j} \rho_m k_m dT \quad (16)$$

식(16)의 우변의 마지막 항은  $T_j$ 가 주어진 경우 상수가 되므로  $(q_J)_{min}$ 을 최소화하는 것은 식(16)의 우변의 첫번째 항과 두번째 항의 합을 최소화하는 것과 같다. 따라서,  $(q_J)_{min}$ 을 최소화하는  $T_i$ , 즉  $(T_i)_{opt}$ 이  $T_j$ 와 전류도입선을 흐르는 전류의 세기  $I$ 에 영향을 받지 않고, 열전요소와 금속부의 열전도율과 비저항에만 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 그러나,  $T_j$ 가 낮아지면  $(q_J)_{min}$ 은 증가한다.  $(T_i)_{opt}$ 이 열전요소와 금속부의 열전도율과 비저항에 의하여 결정되므로, 식(10)에서 열전요소의 길이와 단면적의 최적비율은  $T_j$ 에 영향을 받지 않고 전류도입선을 흐르는 전류의 세기  $I$ 에 반비례하는 것을 알 수 있다.

## 2.4 고온초전도체를 통한 열유입

고온초전도체에서는 전기저항에 의한 발열이 없으므로 열전달률이 축방향으로 일정하다. 고온초전도체의  $\alpha=0$ 이므로 식(1)을 고온초전도체 전체에 걸쳐서 적분하면 고온초전도체를 통하여 흐르는 열전달률을 다음과 같이 구할 수 있고

$$Q_C = \frac{A_{HTS}}{L_{HTS}} \int_{T_C}^{T_J} k_{HTS} dT \quad (17)$$

단위전류당 열전달률은 다음과 표현할 수 있다.<sup>(3)</sup>

$$q_C \equiv \frac{Q_C}{I} = \frac{1}{J_{HTS} L_{HTS}} \int_{T_C}^{T_J} k_{HTS} dT \quad (18)$$

식(18)에서 전류밀도  $J_{HTS}$ 가 클수록  $q_C$ 가 감소하는 것을 알 수 있는데,  $J_{HTS}$ 가 임계전류밀도  $J_{crit}$ 보다 더 커지면 고온초전도체가 초전도 성질을 잃게 되므로 고온초전도체가 초전도 성질을 유지하며 열유입을 최소화하기 위해서는 전류밀도  $J_{HTS}$ 가 임계전류밀도  $J_{crit}$ 과 같아야 한다. 본 연구의 계산에 사용한 고온초전도체 Bi-2223의 임계전류밀도는 다음과 같이 근사할 수 있는데

$$J_{crit} = J_{C0} \left( 1 - \frac{T}{T_{crit}} \right) \quad (19)$$

여기서  $J_{C0}=10,000 \text{ A/cm}^2$ 이고,  $T_{crit}=104 \text{ K}$ 이다.<sup>(3)</sup>

## 2.5 소요동력

초전도시스템의 전류도입선에서 소모되는 전기적 동력은 열전요소와 금속부에서 발생하는 오음발열(ohmic heating)에 의한 전력소모율과 전류도입선을 냉각하는 냉동기가 소비하는 동력의 합으로 정의할 수 있다. 고온초전도체를 포함하는 이중 전류도입선이나 펠티어 전류도입선의 경우에는 고온초전도체의 저온부뿐만 아니라 금속부-고온초전도체의 접합부를 중간냉각해야 하므로 보통 2단형 냉동기를 사용한다.

오음발열에 의한 전력소모율은 식(3)을 열전요소와 금속부 전체에 대하여 적분하여 구한다.

$$P_{diss} = - \int_H^J IdV = \int_H^J dQ = Q_J - Q_H \quad (20)$$

2.1절에서 보인 바와 같이 최적설계된 펠티어 전류도입선의 경우  $Q_H = -\alpha p I T_H$ 이고, 최적설계된 이중 전류도입선의 경우  $Q_H=0$ 이다.<sup>(3)</sup>  $Q_J$ 의 최소값은 식(13)의  $T_J$ 에  $(T_J)_{opt}$ 을 대입하여 구한다.

2단형 냉동기의 제2단은 고온초전도체를 통한 열유입량  $Q_C$ 를 제거하고, 제1단은 금속과 고온초전도체의 접합부로 이동하는 열유입량  $Q_J$ 에서  $Q_C$ 를 제외한 나머지 열유입량을 제거하므로 냉동기 1단과 2단의 소요동력을 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{ref, I} = \frac{(Q_J - Q_C)}{COP_I} \quad (21)$$

$$P_{ref, II} = \frac{Q_C}{COP_{II}} \quad (22)$$

냉동기의 제1단과 제2단의 성능계수는 Chang and Sciver<sup>(8)</sup>가 제시한 관계식을 사용하였다.

$$\frac{1}{COP_I} = \frac{(T_H - T_J)(T_J + 1115)}{T_J(0.4198 T_J + 2.740)} \quad (23)$$

$$\frac{1}{COP_{II}} = \frac{(T_H - T_C)(T_C + 84.81)}{T_C(0.1202 T_C + 1.316)} \quad (24)$$

## 3. 결과 및 고찰

본 논문의 계산에 사용된 열전요소의 물리적 성질은  $\alpha p = 0.19 \times 10^{-3} \text{ V/K}$ ,  $\rho_P = 0.85 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ ,  $k_P = 1.90 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 이다.<sup>(9)</sup> 금속부로는 RRR=100인 순수한 구리를 사용하였는데, 온도에 따른 전기적 비저항과 열전도율은 Maehata et al.<sup>(10)</sup>과 NIST<sup>(11)</sup>가 제시한 관계식을 사용하여 구하였다. 고온초전도체의 길이는 0.2m이고, 열전도율은 Herrmann et al.<sup>(12)</sup>에서 취하였다.  $T_H=300 \text{ K}$ ,  $T_C=4.2 \text{ K}$ 로 고정하여 계산하였다.

Fig. 2는  $T_J=77 \text{ K}$ 일 때 열전요소와 금속의 경계면 온도  $T_I$ 가 금속과 고온초전도체의 접합부로 이동하는 단위전류당 최소 열유입량  $(Q_J/I)_{min}$ 에 미치는 영향을 보여준다.  $T_I$ 가 증가하면 식(16)의 우변의 첫번째 항은 감소하나, 두번째 항은 증가

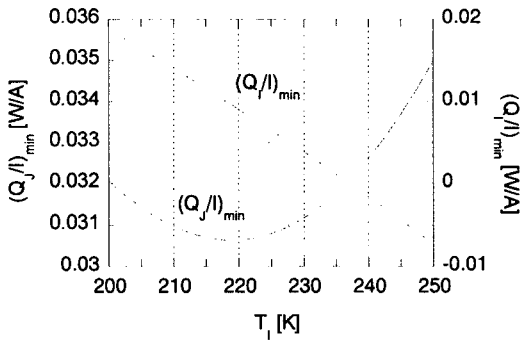


Fig. 2 Effect of the TE-metal interface temperature on the minimum heat flow to the joint ( $T_J=77$  K).

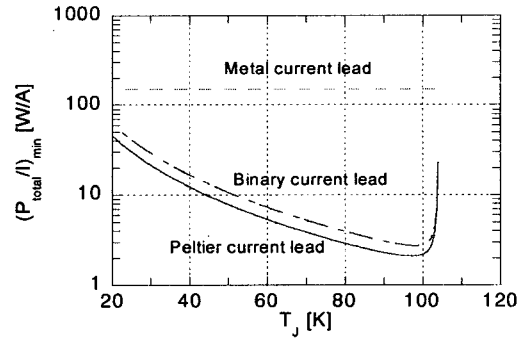


Fig. 4 Comparison of minimum total power of metal, hybrid and Peltier current leads.

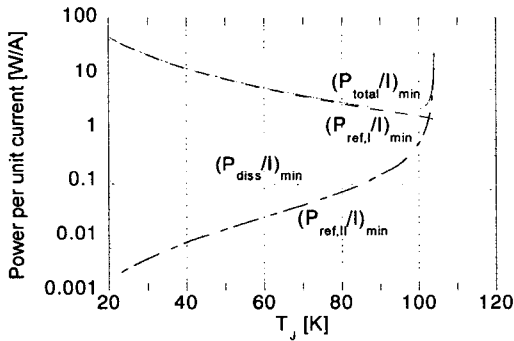


Fig. 3 Minimum power per unit current of Peltier current leads.

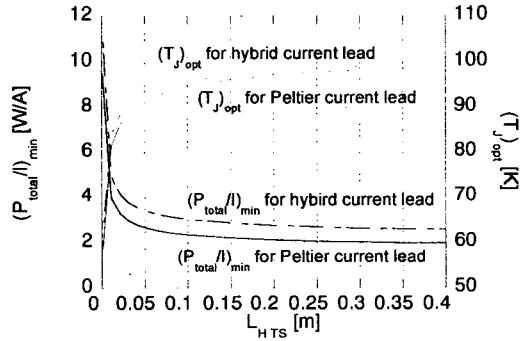


Fig. 5 Effect of the HTS length on the minimum total power and the optimum junction temperature.

하므로  $(Q_j/I)_{min}$ 이 최소가 되는  $T_j$ 가 존재한다. Fig. 2에서  $(T_j)_{opt}$ 은 약 219 K인 것을 볼 수 있는데, 2,3절에 기술한 바와 같이  $T_j$ 가 변해도 이 값은 변하지 않고 일정하다. Fig. 2에서  $T_j$ 가 약 237 K일 때 열전요소-금속부 경계면에서의 단위 전류당 최소 열전달률  $(Q_j/I)_{min}$ 이 0이므로 열전요소와 금속부는 열적으로 분리된 것을 알 수 있는데,  $T_j=237$  K일 때의  $(Q_j/I)_{min}$ 이  $T_j=219$  K일 때의  $(Q_j/I)_{min}$ 보다 더 큰 것을 볼 수 있다. 따라서, 열전요소의 최적조건은 Gehring et al.<sup>(7)</sup>이 제시한 열전요소와 금속부가 열적으로 분리되는 조건이 아니라 식(13)이나 식(16)을 최소화시키는 조건이다.

$T_H=300$  K이고  $T_L$ 는 최적이 온도 219 K일 때 본 논문의 계산에 사용된 열전요소의 물리적 성질들을 이용하여 열전요소의 최적 기하학적 조건을 식(10)

에서 구하면  $(L\rho I/A\rho)_{opt}=6018$ 이다. 단면적  $A\rho=225\times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>이고 전류도입선을 흐르는 전류의 세기  $I=100$  A일 경우 열전요소의 최적길이는 0.0135 m이고,  $I=500$  A일 경우의 최적길이는 0.0027 m이다.

Fig. 3은 중간냉각온도 즉 금속부와 고온초전도체의 접합부 온도  $T_j$ 가 펠티어 전류도입선이 소모하는 동력에 미치는 영향을 보여준다. 열전요소와 금속부에서 발생하는 오음발열에 의한 전력 소모율은 냉동기 1단의 소요동력에 비하여 매우 작고,  $T_j$ 의 영향을 거의 받지 않는 것을 볼 수 있다. 냉동기 2단의 소요동력은  $T_j$ 가 100 K 이하에서는 1단의 소요동력에 비하여 매우 작으나, 100 K 이상에서 급격히 증가한다. 이것은 식(18)과 식(19)에서 알 수 있는 바와 같이  $T_j$ 가 상승하면 고온초전도체가 초전도 성질을 유지하기 위

한 임계전류밀도  $J_{crit}$ 이 급격히 감소하므로 일정한 전류를 흐르게 하기 위해서는 고온초전도체의 단면적이 증가해야 하고, 따라서 고온초전도체를 통하여 유입되는 단위전류당 열전달률이 증가하기 때문이다.  $T_J$ 가 상승할수록 냉동기 1단의 소요동력은 감소하고 2단의 소요동력은 증가하므로 총소요동력이 최소가 되는 최적 중간냉각온도가 존재한다. 최적 중간냉각온도 97 K에서 단위전류당 총소요동력은 2.10 W/A이다.

중간냉각온도  $T_J$ 가 금속 전류도입선, 이중 전류도입선, 그리고 펄티어 전류도입선의 총소요동력에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 전류도입선의 총소요동력은 2.5절에 기술한 바와 같이 오염발열에 의한 전력소모율과 전류도입선을 냉각하는 냉동기가 소모하는 동력의 합이다. 이 전류도입선들의 열전요소와 금속부는 각각 식(10)과 식(15)의 최적설계조건을 만족한다. 금속 전류도입선 대신에 이중 전류도입선이나 펄티어 전류도입선을 사용하면 전류도입선에서 소모되는 총소요동력을 크게 감소시킬 수 있으며, 펄티어 전류도입선의 총소요동력이 이중 전류도입선의 총소요동력보다 작은 것을 알 수 있다. 펄티어 전류도입선의 단위전류당 최소 총소요동력은  $T_J = 97$  K에서 2.10 W/A이고, 이중 전류도입선은  $T_J = 98$  K에서 2.75 W/A이므로 펄티어 전류도입선이 이중 전류도입선에 비하여 총소요동력을 23.6% 정도 감소시킨다.

Fig. 5는 고온초전도체의 길이가 펄티어 전류도입선과 이중 전류도입선의 최적 중간냉각온도와 총소요동력에 미치는 영향을 보여준다. 식(18)에서 알 수 있는 바와 같이 고온초전도체의 길이  $L_{HTS}$ 가 작아지면 고온초전도체의 축방향 온도구배가 커져서 고온초전도체를 통한 열유입이 증가하므로 전류도입선의 총소요동력이 증가한다. 펄티어 전류도입선의 최적 중간냉각온도는 이중 전류도입선에 비하여 1 K 정도 낮고, 고온초전도체의 길이가 증가할수록 최적 중간냉각온도는 상승하는 것을 볼 수 있다. 또한, Chang and Sciver<sup>(3)</sup>가 이중 전류도입선에 대하여 제시한 바와 같이 펄티어 전류도입선의 경우에도 고온초전도체의 길이가 0.1 m 이상이면 총소요동력이 크게 변하지 않으므로 고온초전도체의 길이를 너무 길게 할 필요가 없다는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 열전요소와 금속부 사이의 전기

적 접촉저항과 금속부와 고온초전도체 사이의 전기적 접촉저항을 고려하지 않았는데, 실제 전류도입선에서는 이러한 접촉저항들이 존재하므로 전류도입선의 총소요동력과 최적 중간냉각온도에 영향을 미칠 것이다.<sup>(5,7)</sup> 접촉저항에 의하여 발생한 열들은 저온부로 이동하므로 열전요소와 금속부 사이의 전기적 접촉저항에 의한 발열은 냉동기 1단의 소요동력을 증가시키고, 금속부와 고온초전도체 사이의 전기적 접촉저항은 냉동기 2단의 소요동력을 증가시킬 것이다. 냉동기 2단은 고온초전도체를 통한 열유입량  $Q_C$ 를 제거하는데,  $Q_C$ 는 냉동기 1단이 제거하는 열유입량에 비하여 매우 작으므로 접촉저항이 냉동기 2단의 소요동력에 미치는 영향이 냉동기 1단의 소요동력에 미치는 영향보다 매우 클 것이다. 접촉저항에 의하여 냉동기 2단의 소요동력이 증가하면 최적 중간냉각온도가 낮아지리라는 것을 Fig. 3에서 예측할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 2단형 냉동기로 전도냉각되는 펄티어 전류도입선의 총소요동력을 최소화하는 최적화 방법을 제시하였다. 열전요소와 금속부의 길이와 단면적의 최적 비율은 전류도입선을 흐르는 전류의 세기에 반비례하고, 열전요소와 금속부의 열전도율과 비저항에 영향을 받는다. 열전요소와 금속부가 각각 최적조건을 만족하고 고온초전도체의 길이는 정해진 경우 전류도입선의 총소요동력을 최소화하는 최적 중간냉각온도가 존재하는데, 고온초전도체의 길이가 증가할수록 최적 중간냉각온도는 상승한다. 또한, 열전효과를 이용하는 펄티어 전류도입선의 이론적인 최소 총소요동력은 이중 전류도입선에 비하여 23.6% 낮다.

#### 후 기

이 논문은 2004학년도 홍익대학교 교내연구비에 의하여 지원되었음.

#### 참고문헌

1. Romans, J., 1997, The next generation of HTS current leads, Superconductor Indu-

- stry, Summer, pp. 12-15.
2. Okumura, H. and Yamaguchi, S., 1997, One dimensional simulation for Peltier current leads, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 7, pp. 715-718.
  3. Chang, H.M. and Sciver, S.W.V., 1998, Thermodynamic optimization of conduction-cooled HTS current leads, Cryogenics, Vol. 38, pp. 729-736.
  4. Yamaguchi, S., Takita, K. and Motojima, O., 1996, A proposal for a Peltier current lead, Proceedings of the 16th International Cryogenic Engineering Conference, pp. 1159-1162.
  5. Sato, K., Okumura, H. and Yamaguchi, S., 2001, Numerical calculations for Peltier current lead designing, Cryogenics, Vol. 41, pp. 497-503.
  6. Xuan, X.C., Ng, K.C., Yap, C. and Chua, H.T., 2002, Optimization and thermodynamic understanding of conduction-cooled Peltier current leads, Cryogenics, Vol. 42, pp. 141-145.
  7. Gehring, F.K., Huttner, M.E. and Huebener, R.P., 2001, Peltier cooling of superconducting current leads, Cryogenics, Vol. 41, pp. 521-528.
  8. Chang, H.M. and Sciver, S.W.V., 1999, Optimal integration of binary current lead and cryocooler, Cryocoolers 10, pp. 707-716.
  9. Available from <http://www.melcor.com>, homepage of MELCOR, U.S.A.
  10. Maehata, K., Ishibashi, K. and Wakuta, Y., 1994, Design chart of gas-cooled current leads made of copper of different RRR values, Cryogenics, Vol. 34, pp. 935-940.
  11. Available from <http://www.cryogenics.nist.gov>, homepage of NIST, U.S.A.
  12. Herrmann, P.F., Albrecht, C., Bock, J., Cotteville, C., Elschner, S., Herkert, W., Lafon, M-O., Lauvray, H., Leriche, A., Nick, W., Preisler, E., Salzburger, H., Tourre, J-M. and Verhaege, T., 1993, European project for the development of High Tc current leads, IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol. 3, pp. 876-880.