

극저온 냉동기로 냉각되는 이중전류도입선의 최적설계

Optimal design of binary current leads cooled by cryogenic refrigerator

송 성 재*, 장 호 명**
S. J. Song, H. M. Chang

Key words : Cryogenic refrigerator(극저온냉동기), Current lead(전류도입선), COP(성능계수), Optimal design(최적설계), Superconducting magnet(초전도자석)

Abstract

Analysis is performed to determine the optimal lengths or cross-sectional areas of refrigerator-cooled current leads that can be applied to the conduction-cooled superconducting systems. The binary current lead is composed of the series combination of a normal metal at the upper(warm) part and a high T_c superconductor(HTS) at the lower(cold) part. The heat conduction toward the cold end of HTS part constitutes a major refrigeration load. In addition, the joint between the parts should be cooled by a refrigerator in order to reduce the load at the low end and maintain the HTS part in a superconducting state. The sum of the work inputs required for the two refrigeration loads needs to be minimized for an optimal operation. In this design, three simple models that depict the refrigeration performance as functions of cooling temperature are developed based on some of the existing refrigerators. By solving one-dimensional conduction equation that take into account the temperature-dependent properties of the materials, the refrigeration works are numerically calculated for various values of the joint temperature and the sizes of two parts. The results show that for given size of HTS, there exist the optimal values for the joint temperature and the size of the normal metal. It is also found that the refrigeration work decreases as the length of HTS increases and that the optimal size of normal metal is quite independent of the size of HTS. For a given length of HTS, there is an optimal cross-sectional area and it increases as the length increases. The dependence of the optimal sizes on the refrigerator models employed are presented for 1kA leads.

*홍익대학교 대학원

**정회원, 홍익대학교 기계공학과

기 호 설 명

- A : 단면적
 COP : 냉동기 성능계수
 d : 직경
 FOM : 냉동기 유효도 (figure of merit)

$$= \frac{COP}{COP_{rev}} = COP \left(\frac{T_H}{T_L} - 1 \right)$$

 I : 전류
 J : 전류밀도 ($= I/A$)
 k : 열전도도
 L : 길이
 Q : 열전달(율)
 T : 온도
 W_{ref} : 냉동일(동력)
 x : 저온부에서의 축방향거리

그리스문자

- ρ : 전기저항율

하 첨 자

- 1 : 고온초전도체 (BSCCO-2212)
 2 : 금속(구리)
 c : 초전도임계상태
 H : 상온(300K)
 I : 중간냉각부
 L : 저온(4.2K)

1. 서 론

전류도입선(current lead)은 모든 초전도시스템에 사용되는 주요 부품으로, 상온의 전원에서 극저온 상태의 초전도자석에 전류를 공급하는 역할을 한다. 전류도입선은 전기저항에 의한 발열이 적어야 하고 동시에 극저온으로의 열유입도 또한 적어야 하므로, 높은 전기전도도와 낮은 열전도도를 가진 물질로 제작되어야 한다. 기존의 전류도입선^{(1), (2)}에 사용되던 구리와 같은 금속재료의 전기저항율과 열

전도도는 기본적으로 Wiedemann-Franz 법칙에 따르므로 극저온으로의 열유입을 줄이는데 그 한계가 있다. 실제로 사용되는 대부분의 초전도시스템의 냉동부하 중 가장 큰 부하는 금속전류도입선에 의한 부하이다.

1980년대 후반에 고온초전도체(HTS: High T_c Superconductor)가 발견된 후, 가장 먼저 응용이 가능한 분야가 바로 전류도입선의 저온부이다. 산화물이며 세라믹재료인 고온초전도체는 열전도도가 매우 낮고 초전도상태가 유지되는 한 전기저항이 없으며, 가장 대표적인 고온초전도체로는 BSCCO (Bi-Sr-Ca-Cu-O) 및 YBCO (Y-Ba-Cu-O)를 들 수 있다. 이중(binary)전류도입선 또는 복합(hybrid)전류도입선^(3~10)은 고온부의 금속과 저온부의 고온초전도체를 직렬로 연결한 구성을 갖고 있다. 지난 수년간 이러한 이중전류도입선의 실용화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

여기에 추가하여 4K에 직접 도달할 수 있는 소형 Gifford-McMahon(GM) 냉동기의 개발⁽¹¹⁾은 액체헬륨을 사용하지 않고 직접 냉동기가 냉각하는 초전도자석의 개발^{(12), (13)}을 가속화하였다. 액체헬륨이 없는 초전도시스템의 경우, 가장 중요하고 불가피한 문제점은 전류도입선의 냉각이라고 할 수 있다. 액체헬륨으로 냉각하는 시스템에서는 증발되는 헬륨 증기가 배출되면서 전류도입선을 냉각하지만, 냉동기 직접 냉각방식에서 전류도입선은 단열용 진공공간에 위치하게 된다. Fig.1은 이러한 초전도시스템의 구성을 도식적으로 나타내고 있다. 2단식 GM 냉동기의 제3단은 약 4K의 온도에서 초전도자석과 전류도입선의 저온부를 냉각하고, 제1단은 이중전류도입선의 중간 접합부와 복사원드를 냉각한다. 냉동기로 직접 냉각되는 이중전류도입선은 두 곳의 서로 다른 온도에서 냉각을 하여야 하며 두 곳의 냉동일을 합한 전체 냉동일이 최소가 되어야 한다.

지금까지의 냉동기로 냉각되는 초전도체 전류도입선에 대한 연구는 개발 가능성에 초점이 맞추어져 있었으며,^{(12), (13)} 그 가능성은 여러면에서 입증되었다고 할 수 있다. 실용화를 위한 다음단계로는 에너지효율 면에서의 설계가 필요하나 여기에 대한 연구는 이제 시작하는 단계로 판단된다. 본 논문에는

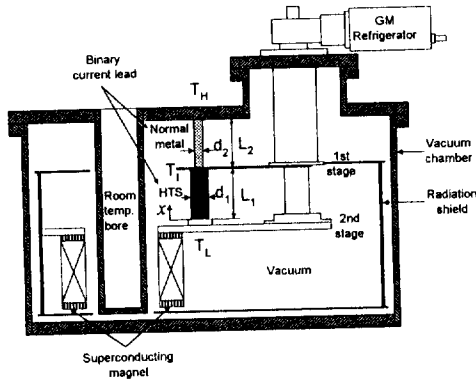


Fig.1 Schematic representation of refrigerator-cooled superconducting systems with binary(high-temperature metal and lower-temperature HTS) current lead

서는 현재 실용화의 우선 대상인 1kA급의 이중전류도입선을 냉각할 수 있는 적당한 냉동기모형을 선정하여 중간냉각온도, 금속부와 고온초전도체부의 직경(단면적) 및 길이를 고려하여 전체냉동에 필요한 일을 최소화하는 최적의 설계 조건을 제시하고자 한다.

2. 해석 모델

2.1 전류도입선

Fig.1과 같이 금속부와 고온초전도체부가 직렬로 연결된 이중전류도입선의 온도분포는 축방향 1차원 전도방정식인

$$\frac{d}{dx} \left(k(T) \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\rho(T) I^2}{A} = 0 \tag{1}$$

로 표현되며, (3), (4), (6), (8-9), (15) 열전도도(k)와 전기저항(ρ)는 상온과 극저온 사이에서 온도에 따라 크게 변화한다. 식(1)에서 x는 전류도입선의 저온말단에서 고온측으로의 축방향거리를 나타낸다. 금속부는 전기저항으로 발열이 있고, 고온초전도체부는 초전도상태에서 전기저항이 없으므로 발열이 없다. Fig.1에서와 같이 금속부의 고온말단(x=L1+L2)은 상온(TH)으로 일정하며 고온초전도체부의 저온말단(x=0) 온도(T1) 역시 일정하다. 그리고

접합부에서(x=L1)의 온도(T1)는 서로 같다.

실제 전류도입선의 제작시 금속부와 고온초전도체부의 접합부에서 접촉저항에 의한 발열이 있을 수 있으나, 전류도입선을 통한 열유입량보다 매우 작다고 가정하고 복사열에 의한 부하도 무시하면 접합부에서의 냉각부하는 간단히

$$Q_1 = k_2(T_1) A_2 \frac{dT_2(L_1)}{dx} - \left[k_1(T_1) A_1 \frac{dT_1(L_1)}{dx} \right] \tag{2}$$

으로 표현되며, 하첨자 1, 2는 각각 고온초전도체부와 금속부를 나타낸다. 그리고 고온초전도체의 저온말단에서의 냉각부하는

$$Q_L = k_1(T_1) A_1 \frac{dT_1(0)}{dx} \tag{3}$$

으로 표현된다.

2.2 재료의 상태량

금속의 열전도도 및 전기저항율은 상온과 극저온 사이에서 온도에 따라 크게 변화한다. 구리와 같은 금속재료의 경우 열전도도와 전기저항율의 곱은 근사적으로 Wiedemann-Franz법칙에 따라 온도에 비례하는 거동을 한다. 그러나 좀 더 정확한 계산을 위해 본 논문에서는 White⁽²⁾와 Jone 등⁽⁴⁾에 의해 제안된 두 물성의 온도함수를 사용하였다.

초전도체부에서는 주어진 전류밀도에서 초전도체가 초전도 상태를 유지할 수 있도록 하기 위해 임계특성을 고려해야 한다. 초전도체의 임계특성은 재료, 제작방법, 형상, 방향성등에 의하여 크게 달라지는데 외부에서 자기장이 없을 때 임계특성은 온도(T)와 전류밀도(J)만의 관계로 나타낼수 있다.⁽⁴⁾ 본 논문에서는 전류밀도와 온도사이의 임계특성을 Fig.2와 같이 선형적으로 가정을 하여 해석하였으며, 고온초전도체의 열전도도는 Herrmann에 의해 제안⁽⁵⁾된 온도함수를 사용하였다. 초전도상태에서 전기저항이 없으므로 일정한 단면적을 가진 고온초전도체의 저온말단에서의 냉각부하는

$$Q_L = \frac{A_1}{L_1} \int_{T_L}^{T_1} k_1(T) dT \tag{4}$$

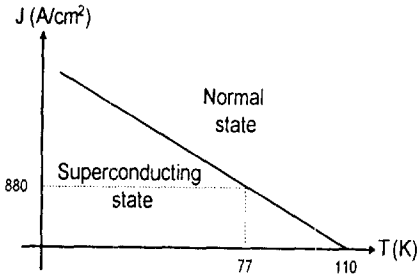


Fig.2 Model for critical property of high T_c superconductor(BSCCO-2212)

과 같이 직접 적분을 수행하여 계산된다.

2.3 냉동기

전류도입선을 냉각하기 위한 냉동부하를 충족시키기 위해 냉동기가 필요하며 냉동기에서 소요되는 일은 냉동기의 성능에 따라 결정된다. 본 논문에서 우선 실제 냉동기의 성능을 고려한 적절한 냉동기 모델이 필요하게 되었다. 이중전류도입선의 냉각에 사용되는 열재생형 냉동기로는 Stirling냉동기와 GM냉동기가 있으며, 일반적으로 Stirling냉동기의 성능이 GM냉동기의 성능보다 우수하다. 이중전류도입선에서 서로 다른 두 곳의 온도에서 냉각이 이루어지므로 중간냉각부(냉동기 1단)로의 열유입량과 저온부(냉동기 2단)로의 열유입량의 합은 큰 의미가 없으며 중간냉각부에서 소요되는 냉동일과 저온부에서 소요되는 냉동일의 합이 최소화가 최적의 설계가 된다. 따라서 이중전류도입선을 냉각하는데 소요되는 전체 냉동일은

$$W_{tot} = W_1 + W_2$$

$$= \frac{Q_1}{FOM_1} \left(\frac{T_{H1}}{T_1} - 1 \right) + \frac{Q_2}{FOM_2} \left(\frac{T_{H2}}{T_2} - 1 \right) \quad (5)$$

로 표현된다. 식(5)에서 냉동기의 성능을 나타내는 FOM은 실제냉동기의 COP와 같은 온도에서 작동하는 가역냉동기의 COP_{rev}의 비로 정의된다. 전류도입선의 중간냉각에는 2단 냉동기(two-stage refrigerator)의 제1단(first stage)이 사용되는데, 이는 일반적인 1단 냉동기(single-stage refrigerator)의 거동과 매우 유사하므로 1단 냉동기의 냉동

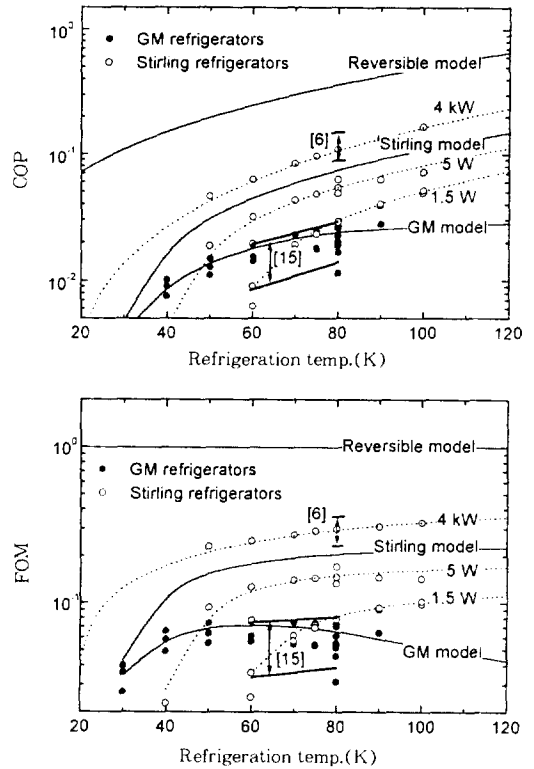


Fig.3 Coefficient of performance(COP) and figure of merit(FOM) for three different refrigerator models as functions of refrigeration temperature

량-온도특성을 이용하였다.

본 논문에서 중간냉각부의 FOM₁에 대한 모델을 채택하기 위해서 현재 시중에 판매되고 있는 세계 각지의 9개사(Balzers, CVI, Cryomech, Hymatic, Leybold, Philips, Signaal Usfa, Sunpower)에서 제작된 14종의 냉동기들의 성능을 광범위하게 조사하여 이들의 COP와 FOM을 Fig.3에 각각 나타내었다.

Stirling 냉동기(○)의 COP와 FOM은 냉동온도뿐만 아니라 냉동용량의 크기에 의해 많은 변화를 보이며, 100K 이상에서도 FOM이 증가하는 경향이 보인다. 그러나 극저온진공펌프(cryopump)용으로 시중에 판매되고 있는 가장 대표적인 냉동기인 GM냉동기(●)의 경우는 냉동용량이나 냉동기의 크기보다 냉동온도에 지배적이며, 80K 이상에서는

FOM이 현저하게 감소하는 경향을 보인다.

본 논문에서는 세 가지 다른 모델(Reversible, Stirling, GM)을 고려하여 해석하였으며, Fig.3에 실선으로 나타내었다. 열역학적으로 이상적인 가역 냉동기 모델은 주어진 온도에서 최대 COP를 나타내며 $T_H/(T_H - T_L)$ 과 같이 표현된다. 또한 FOM은 1이므로 최소의 냉동일이 소요된다.

Stirling 모델은 80K에서 약 40W의 냉동용량을 갖는 모델을 선정하였다. 1kA급 이중전류도입선의 중간냉각부의 열유입량은 기존의 발표된 연구결과^{(6), (15)}가 약 41~45W였으며, 본 논문의 뒤에 기술하는 조건하에서의 계산결과 역시 약 44W이었기 때문에 Stirling 모델의 선정은 적절하다고 판단된다. Stirling 모델은 FOM은 상대적으로 높은 온도에서는 GM 모델보다 더 큰 값을 갖지만 약 30K 이하에서는 거의 같은 값을 갖는다. Fig.3에 나타난 바와같이 Herrmann 등⁽⁶⁾은 실제 냉동기의 성능보다 다소 높은 FOM을 사용하였으며, Yang과 Pfothenhauser⁽¹⁵⁾는 실제의 GM 냉동기의 FOM과 유사한 모델을 사용하였다. 이들 모델은 전류의 크기가 1kA급의 이중전류도입선에 대략적으로 적합한 냉동용량을 나타낸다고 볼 수 있다.

이중 전류도입선의 저온부에 접하고 있는 2단 냉동기의 FOM₁은 대부분의 초전도시스템이 4.2K에서 작동되므로, 현재 일본에서 개발중인 2단부의 재생기의 성능을 향상시킨 4K GM 냉동기의 대략적인 FOM인 1/15이 계산에 사용되었다.^{(16), (17)} 실제로 2단 냉동기의 제1단과 제2단의 성능은 서로 복잡하게 영향을 미칠 수 있으나, 본 해석에서는 편의상 서로 독립적이라고 가정하였다.

2.4 수치해법

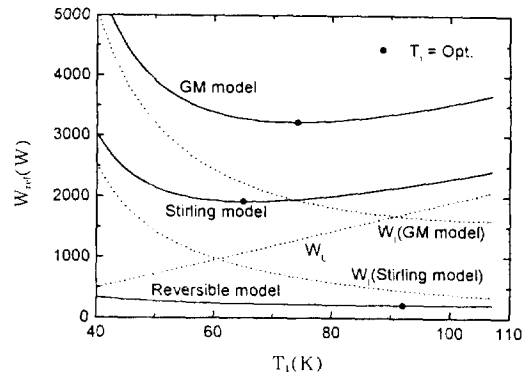
전류의 크기 및 금속부와 고온초전도체부 각각의 형상(길이 및 단면적), 중간냉각온도가 주어지면 이중전류도입선의 고온말단과 저온말단의 온도를 알고 있으므로, 식(1)의 미분방정식을 Wilson⁽¹¹⁾에 의해 제시된 방법과 4차 Runge-Kutta방법으로 수치적분하여 축방향 온도분포를 계산한다. 온도분포가 계산되면 중간냉각부에서의 온도구배를 이용하여 식(2),(3)으로 냉동부하를 계산하고 Fig.3에 실선으로 표시된 냉동기모델과 식(5)를 이용하여 이

중전류도입선의 냉각에 소요되는 냉동일을 계산한다.

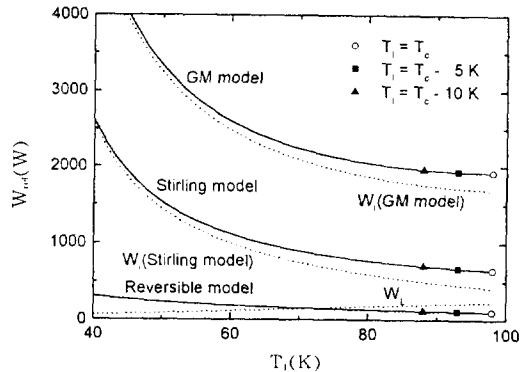
3. 결과 및 토의

3.1 중간 냉각온도

이중전류도입선의 설계에서 금속과 고온초전도체의 접합부에서의 중간냉각온도(T_1)를 결정하는 것은 매우 중요한 문제이다. 중간냉각온도의 결정은 곧 냉동기의 전체 냉동일에 영향을 주는 변수이기 때문이다. 본 논문에서는 금속부와 고온초전도체부의 재료로 각각 구리와 BSCCO-2212를 사용하였으며 이중전류도입선의 고온말단(T_H)는 300K, 저



(a) $d_1 = 4\text{cm}$, $L_1 = 10\text{cm}$, $d_2 = 0.5\text{cm}$, $L_2 = 12\text{cm}$



(b) $d_1 = 2\text{cm}$, $L_1 = 20\text{cm}$, $d_2 = 0.5\text{cm}$, $L_2 = 10.5\text{cm}$

Fig.4 Refrigeration work as a function of intermediate cooling temperature

온달단(T_L)은 4.2K, 그리고 전류의 크기는 1kA로 계산하였다.

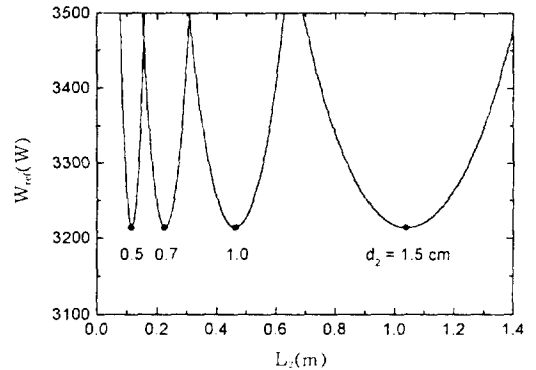
Fig.4는 금속부와 고온초전도체부의 형상을 모두 일정하게 두고, 중간냉각온도를 변화시키면서 세가지 냉동기 모델에 관한 전체 냉동일의 변화를 나타내었다. GM 모델의 경우가 가장 많은 냉동일이 소요되며, 가역모델은 가장 적은 냉동일을 나타낸다. 냉동일이 중간냉각온도에 따라 변화하는 형태는 크게 나누어 두가지의 함수모양으로 분류할 수 있는데, 이를 예시하기 위하여 Fig.4(a), (b)에 표현하였다.

Fig.4 (a)는 고온초전도체의 직경이 크고 길이가 짧아 저온부하가 상대적으로 큰 경우를 나타낸다. 점선은 중간냉각부 및 저온부의 냉동일을 각각 나타내며, 이들의 합인 전체냉동일을 실선으로 표시하였다. 세가지 모델 모두 중간냉각온도의 증가에 따라 냉동일은 감소하다가 증가하여 전체냉동일을 최소화하는 최적의 중간냉각온도가 존재한다. 중간냉각온도가 최적의 중간냉각온도보다 작아지면 중간냉각부의 냉동일이 더 많이 소요되고 최적중간냉각온도보다 커지면 저온부하의 증가로 더 많은 냉동일이 소요된다.

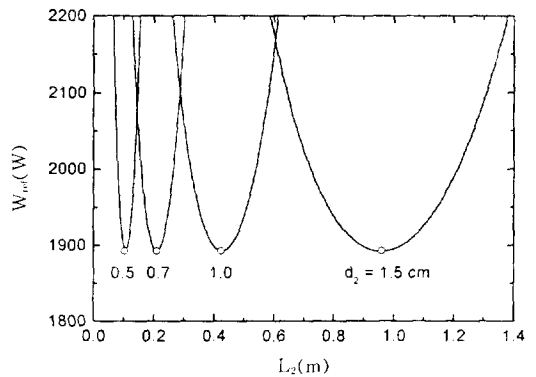
Fig.4 (b)는 고온초전도체의 직경이 작아 상대적으로 저온부하가 작은 경우로 중간냉각부의 냉동일의 영향이 지배적이다. 이 때 중간냉각온도가 증가함에 따라 전체냉동일은 계속 감소하게 된다. 중간냉각온도의 증가는 초전도임계온도에 따라서 상한값이 결정된다. 에너지관점에서는 최고온도인 초전도임계온도가 최적의 냉각온도가 되지만, 초전도안정성을 고려하면 초전도임계온도보다 조금 낮은 온도에서 중간냉각온도를 결정해야 한다. ■와 ▲ 표시는 각각 중간냉각온도를 초전도임계온도보다 5K, 10K 낮게 채택한 경우로 전체 소요되는 냉동일은 약간 크지만 고온초전도체부의 열적안정성이 더 크다고 할 수 있다.

3.2 금속부의 형상

Fig.5는 GM 모델에 대해 앞절과 같은 방법으로 중간냉각온도를 최적으로 설계하고 고온초전도체부의 형상이 일정할 때, 금속부의 몇가지 직경에 대해 길이의 변화에 따라 냉동일이 어떻게 변화하는 가



(a) $d_1 = 4\text{cm}$, $L_1 = 10\text{cm}$, Optimal T_1



(b) $d_1 = 2\text{cm}$, $L_1 = 20\text{cm}$, Optimal $T_1 = T_c$

Fig.5 Refrigeration work as a function of length of normal metal for various values of diameter of normal metal(GM model)

를 보여주고 있다.

Fig.5 (a)는 Fig.4 (a)와 같이 최적중간냉각온도가 초전도임계온도보다 낮은 영역에서 생기는 경우로, 일정한 직경에 대해 길이가 증가함에 따라 냉동일이 감소하다 증가하여 최적의 길이가 존재함을 나타낸다. Fig.5 (b)는 Fig.4 (b)와 같이 냉동일을 최소화하는 중간냉각온도가 초전도임계온도인 경우로 Fig.5 (a)와 마찬가지로 최적의 길이가 존재함을 나타낸다. 두 가지 경우 모두에 대해 직경이 증가하면 직경에 대한 최적의 길이는 증가하게 되지만 최소의 냉동일은 크게 변화하지 않는다. 이는 기존의 금속전류도입선을 사용했을 때의 결과와 같은 경향을 보이고 있다.¹⁹⁾

일반적으로 금속부에서는 전기저항에 의한 발열과 전도에 의한 열전달이 존재하므로 이들의 영향으로 최적의 길이가 존재하게 된다. 일정한 직경에 대해 길이가 최적길이보다 길어지면 전기저항에 의한 발열의 증가로 더 많은 냉동일이 소요되며 최적길이보다 짧아지면 전도에 의한 열전달이 증가하여 역시 냉동일이 증가하게 된다. 그러나 실제 설계에 있어서는 길고 두꺼운 형상이 짧고 가는 형상보다 최적값에서 벗어나더라도 냉동부하가 크게 변화하지 않아 안정적이라 할 수 있다.

3.3 고온초전도체부의 형상

고온초전도체는 초전도상태에서 전기저항이 없으므로 전류에 의한 발열이 없다. 따라서 고온초전도체부만을 생각했을 때, 저온부로의 열유입을 최소화하기 위해서는 직경이 작고 길이가 길어야 하나 이중전류도입선에서는 중간냉각부 냉동일의 관계와 초전도 임계성질을 동시에 고려하여 최적의 형상이 결정되어야 한다.

앞절들의 방법으로 중간냉각온도와 금속부의 길이-직경조합이 최적값들로 결정될 때, Fig.6은 몇 가지 고온초전도체의 길이에 대해 직경에 대한 냉동일의 변화를 나타낸다. 길이가 일정할 때 충분히 큰 직경에서는 최적의 중간냉각온도가 임계온도보

다 낮아 초전도상태를 유지하지만 열전달이 많아져 저온부하가 증가하여 저온부에서 소요되는 냉동일이 증가한다. 상대적으로 작은 직경에서는 고온초전도체의 전류밀도가 커서 초전도임계온도가 낮아져 최적의 중간냉각온도는 초전도임계온도에 도달한다. 직경이 작아지면 냉동일은 감소하다가 어느 한계(예를 들어, $L_1=10\text{cm}$ 일때 약 $d_1=1.4\text{cm}$)이하가 되면 다시 증가하는데 이는 저온부하가 작아지는 반면 전류밀도가 증가하여 Fig.2에 나타낸 바와 같이 초전도 임계온도가 감소하여 초전도상태를 유지하기 위해 중간냉각부의 냉동일이 크게 증가하기 때문이다.

고온초전도체의 길이가 길어지면 최적직경이 증가하며, 냉동일은 감소한다. 최적의 중간냉각온도가 임계온도가 되면 이미 앞에서 언급했듯이 최소냉각일이 소요되지만, 초전도안정성의 문제가 발생한다. 따라서 최적중간냉각온도는 임계온도보다 낮아야 하며, 각 경우의 최적상태를 \diamond 로 나타내었다. 고온초전도체는 가능하면 길이가 충분히 길고 초전도안정성 문제를 피할 수 있는 충분히 큰 직경을 선택하거나 중간냉각온도를 임계온도보다 적당히 낮은 온도로 설계해야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 현실성 있는 냉동일을 계산하기 위하여 우선 현재 시중에 판매되고 있는 냉동기들의 성능을 고려한 냉동기 모델을 채택하였다. 그리고 1kA급 이중전류도입선에 대해 중간냉각온도, 금속부와 고온초전도체부의 형상에 따른 냉동일의 변화를 계산하여 다음과 같은 중요한 결론에 도달하였다.

1) 금속부와 고온초전도체부의 접합부의 중간냉각온도는 저온부하가 상대적으로 큰 경우, 냉동일을 최소로 하는 중간냉각온도가 60~100K 사이에 존재하고 저온부하가 상대적으로 작은 경우는 초전도 임계온도에서 최소의 냉동일이 소요된다.

2) 최적의 중간냉각온도가 결정되고 고온초전도체부의 형상이 일정할 때, 금속부는 최적의 직경-길이 관계가 존재한다. 즉 직경이 일정할 때 냉동일을 최소로 하는 길이가 존재한다. 그리고 직경이 증

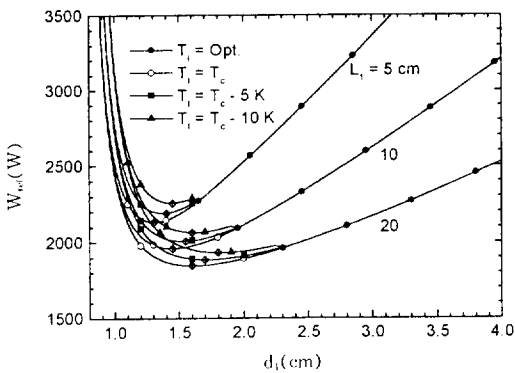


Fig.6 Refrigeration work as a function of HTS diameter for various values of HTS length(Optimal T_i , Optimal d_2 & L_2 , GM model, \diamond : Points of minimum refrigeration work)

가하면 최적의 길이도 증가하나, 최적의 직경-길이 조합들에 대해 냉동일은 크게 변화하지 않는다.

3) 중간냉각온도 및 금속부의 형상이 최적으로 설계되어졌을 때, 고온초전도체부의 길이가 증가하면 냉동일은 감소하며 주어진 길이에 대해 최적의 직경이 존재한다. 그러나 이 최적값은 초전도입계특성에 관한 안정성 범위에 따라 약간씩 변화할 수 있다. 1kA급 이중전류도입선의 경우 고온초전도체의 길이가 5~20cm 일 때, 직경이 1.2~1.8cm 사이에서 서로 다르게 나타난다. 이러한 결과들은 초전도 전류도입선의 형상에 대해 최초로 발표되는 내용으로 냉동기 직접냉각방식에 직접응용이 가능할 것이다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구 조성비(기계공학 : ME96-A-18)에 의하여 연구되었다.

참 고 문 헌

- Wilson., M. N., 1986, Superconducting Magnets, Oxford University Press, New York, pp.256~271.
- White, G. K., 1979, Experimental Techniques in Low-Temperature Physics, Clarendon Press, Oxford, pp.284~305, 319.
- Wesche, R. and Fuchs, A. M., 1994, "Design of superconducting current leads", Cryogenics, Vol.34, No.2, pp.145~154.
- Jones, M. C., Yeroshenko, V. M., Starostin, A. and Yaskin, L. A., 1978, "Transient behaviour of helium-cooled current leads for superconducting power transmission", Cryogenics, Vol.18, No.6, pp.337~343.
- Herrmann, P. F., Albrecht, C., Bock, J., Cottevieille, C., Elschner, S., Herkert, W., Lfon, 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, No.1, pp.876~880.
- Herrmann, P. F., Cottevieille, C., Duperray, G., Leiche, A., Verhaege, T., Albrecht, C. and Bock, J., 1993, "Cryogenic load calculation of high Tc current lead", Cryogenics, Vol.33, No.5, pp.555~562.
- Herrmann, P. F., Beghin, E., Bottini, G., Cottevieille, C., Leriche, A., Verhaege, T. and Bock, J., 1994, "Test results of a 1 kA (2 kA)-20 kV HTSC current lead model", Cryogenics, Vol.34, No.6, pp.543~548.
- Hull, J. R., Unal, A. and Chyu, M. C., 1992, "Analysis of self-cooled binary current leads containing high temperature superconductors", Cryogenics, Vol.32, No.9, pp.822~828.
- Seol, S. Y. and Hull, J. R., 1993, "Transient analysis and burnout of high temperature superconducting current leads", Cryogenics, Vol.33, No.10, pp.966~975.
- Dorri, B., Herd, K., Laskaris, E. T., Tkaczyk, J. E. and Lay, K. W., 1991, "High temperature superconducting current leads for cryogenic application in moderate magnetic fields", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.27, No.2, pp.1858~1860.
- Kuriyama, T., Ohtani, Y., Takahasi, M., Nakagome, H., N., Tsukagoshi, T., and Hashimoto, T., 1996, "Optimization of operational parameters for a 4K-GM refrigerator", Advances in Cryogenic Engineering, Vol.41 pp.1615~1622.
- Hase, T., Shibutani, K., Hayashi, S., Shimada, M., Ogawa, R. and Kawate, Y., 1996, "Generation of 1T, 0.5 Hz alternating magnetic field in room temperature bore of cryocooler-cooled Bi-2212 superconducting magnet", Cryogenics, Vol.36, No.12, pp.971~977.
- Watanabe, K., Awaji, S., Sakuraba, J.,

- Watazawa, K. Hasebe, T., Jikihara, K., Yamada, Y. and Ishihara, M., 1996, "11T liquid helium-free superconducting magnets", *Cryogenics*, Vol.36, No.12, pp.1019~1025.
14. Dresner, L., 1995, *Stability of Superconductors*, Plenum Press, New York, pp.15~34.
 15. Yang, S. and Pfothhauer, J. M., 1996, "Optimization of the intercept temperature for high temperature superconducting current lead", *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.41, pp.567~572.
 16. Li, R., Onishi, A., Satoh, T., 1996, "Influence of valve open timing and interval on performance of 4K Gifford-McMahon cycle cryocooler", *Cryogenics*, Vol.41, pp.1601~1607.
 17. Li, R., Onishi, A., and Kanazawa, Y., 1996, "Development of 1.5W 4K GM-cryocooler with magnetic regenerator material", *Cryogenics*, Vol.41, pp.1631~1637.