

일부 전류분류영역을 가짐으로서 최소 열손실을 갖는 초전도 전류도입선

설승윤* · 허광수**

Minimum Heat Dissipation of HTS Current Lead Having Partial Current Sharing Region

S. Y. Seol, K. S. Her

Key Words: superconducting current lead(초전도 전류도입선), current sharing(전류분류), optimum area(최적 단면적), minimum heat dissipation(최소 열손실)

Abstract

In this paper, a high-temperature superconductor(HTS) current lead operating in current sharing mode is described. The minimum heat dissipation and the optimum safety factor(cross-sectional area) is obtained analytically for partial current sharing HTS leads. It is assumed that the current lead is in conduction cooled state, and the sheath material is the alloy of silver and gold. The reduced cross-sectional area results partial current sharing state, and consequently reduces conduction heat transfer, but the Joule heat generation is increased. The optimized HTS current lead is different from the conventional copper leads. In the copper leads, the minimum heat dissipation is obtained for the zero gradient of temperature at warm end. However, the temperature gradient at warm end is not zero when the HTS lead operates at minimum dissipation state.

기호설명

<i>A</i>	cross-sectional area, m^2
<i>B</i>	Wiedemann-Franz-Lorentz constant, $2.45 \times 10^{-8} W \Omega K^{-2}$
<i>g</i>	current sharing function, dimensionless
<i>I</i>	current, A
<i>J</i>	current density, Am^{-2}
<i>k</i>	thermal conductivity, $Wm^{-1}K^{-1}$
<i>L</i>	length of current lead, m
<i>Q</i>	heat flow, W
<i>V</i>	heat flow per current, Q/I , W/A
<i>S</i>	safety factor, dimensionless
<i>T</i>	temperature, K
<i>x</i>	coordinate, m
<i>λ</i>	filling factor, dimensionless, A_s/A
<i>ξ</i>	dimensionless length

Subscripts

<i>C</i>	critical
<i>H</i>	warm end of current lead
<i>L</i>	cold end of current lead
<i>N</i>	stabilizer
<i>S</i>	superconductor
<i>cs</i>	current sharing state
<i>O</i>	zero temperature gradient at $x=L$
<i>OPT</i>	optimum

1. 서론

초전도 기기를 운용하기 위한 비용의 대부분은 전류 도입선에 의한 저온 용기로의 열유입에 의해 일어난다. 이에 따라 초전도 전류도입선을 사용하여 열손실을 최소화 하고자 하는 연구가 활발하게 진행되고 있다[1]. 그러나 전류 도입선의 안정성 확보를 위해 전체 도입선이 초전도 상태

* 전남대학교 자동차 공학부 부교수

** 전남대학교 자동차 공학부 대학원

로 작동하게 설계하는 경우 안정화 재료의 높은 열전달율로 인해 열손실이 과다하게 될 우려가 있다. 이에 따라 도입선의 일부를 전류분류 상태로 동작하게 하여 열손실을 줄이는 방안이 연구되고 있다[2]. 상전도 전류도입선에서는 상단 열유입이 없는 상태에서 열손실이 최소가 된다. 초전도 도입선에 대한 기존 연구[2]에서는 상단 열유입이 없는 상태에서 최소 열손실이 발생할 것으로 간주하였다. 그러나 최근의 수치해석에 의한 연구 결과 도입선 상단의 열유입이 제로가 아닌 상태에서 최소의 열손실이 발생한다는 결과가 제시되었다[3].

본 논문에서는 전류분류 상태의 에너지평형 방정식의 해석적인 해를 구하여 고온단 열유입이 제로가 아닌 상태에서 최소의 열손실이 발생함을 보이고자 한다.

2. 해석

2.1 열전도 방정식

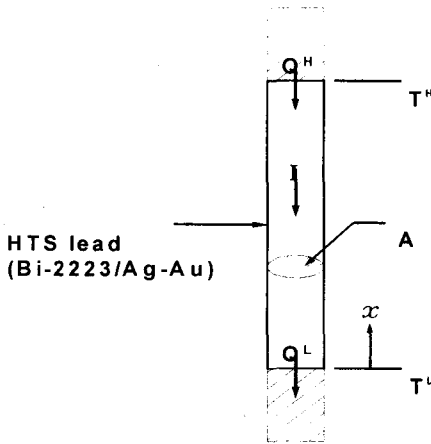


Fig 1. Sketch of the HTS current lead

초전도 전류 도입선의 안전율은 임계전류와 작동전류의 비로서 다음과 같이 정의된다.

$$S(T) = \frac{J_c(T)\lambda A}{I} \quad (1)$$

주어진 초전도체에서 점적율(λ)이 일정하다면 안전율은 도입선의 단면적(A)과 작동전류(I)의 함수이다. 고온단 온도 T_H 에서의 상단안전율 S_H 를 이용하여 안전율을 표현하면 다음과 같다.

$$S(T) = S_H \frac{J_c(T)}{J_c(T_H)} \quad (2)$$

도입선 상단안전율이 1보다 낮다면($S_H < 1$) 도입선의 일부에 전류분류 상태가 존재하여 전류분류 온도 T_{cs} 보다 온도가 높은 부분에서 일부 전류가 안정체로 흐르며 Joule열이 발생한다.

전류분류 온도는 식(1)의 안전율 S 를 1로 취함으로써 다음의 식(3)과 같이 얻어진다.

$$\lambda L J_c(T_{cs}) = \frac{IL}{A} \quad (3)$$

전류분류 온도와 안전율 사이의 관계는 다음과 같다.

$$S_H = \frac{J_c(T_H)}{J_c(T_{cs})} \quad (4)$$

전도냉각만을 고려하고 전류분류 상태가 존재하는 경우 에너지 평형식은 다음과 같다.[4]

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\rho I^2}{A^2(1-\lambda)} g(T) = 0 \quad (5)$$

위 식에서 도입선 전체의 열전도도 k 는 초전도체와 안정체의 부피에 따른 가중평균값을 사용한다. 함수 $g(T)$ 는 복합초전도체의 전류분류 상태 여부를 나타낸다.

$$g(T) = \begin{cases} 0 & 1 < S(T) \\ 1-S & 0 < S(T) \leq 1 \\ 1 & S(T) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

금속인 안정체는 Widemann-Franz의 법칙을 따르므로 $\rho k_N = BT$ 의 관계를 가진다. 세라믹 재료인 고온초전도체는 열전도도가 금속인 안정체에 비해 매우 낮으므로 $k \cong (1-\lambda)k_N$ 로 근사할 수 있다. 여기에 무차원 좌표 $\xi = x/L$ 를 정의하여 식(5)을 정리하면 다음과 같다.

$$k \frac{d}{d\xi} \left(k \frac{dT}{d\xi} \right) + \left(\frac{IL}{A} \right)^2 BT g(T) = 0 \quad (7)$$

2.2 초전도 영역 ($0 < \xi < \xi_{cs}$)

도입선의 온도가 전류분류 온도(T_{cs})보다 작은 영역($0 < \xi < \xi_{cs}$)에서는 HTS 도입선은 초전도 상태에서 동작한다. 초전도 영역에서는 Joule 열 발생이 없으므로 식(7)에서 $g(T) = 0$ 이 되고 그 결과식을 변수분리 후 적분하면 다음과 같은 온도 분포 식을 얻을 수 있다.

$$\int_{T_L}^T k dT \Big| \int_{T_L}^{T_{cs}} k dT = \xi / \xi_{cs} \quad (8)$$

전류분류 시작지점(ξ_{cs})은 다음과 같다.

$$\xi_{cs} = \frac{1}{\frac{Q_L}{I} \frac{IL}{A}} \int_{T_L}^{T_{cs}} k dT \quad (9)$$

2.3 전류 분류 영역 ($\xi_{cs} < \xi < 1$)

전류분류영역에서는 Joule열 발생을 포함한 식 (7)을 해석해야 한다. 새로운 변수 V 를 다음과 같이 도입하여

$$V = \frac{Q}{I} = \frac{1}{IL/A} k \frac{dT}{d\xi} \quad (10)$$

$$\frac{dV}{d\xi} = \frac{(IL/A)}{k} V \frac{dV}{dT} \quad (11)$$

식(7)를 정리하면 다음과 같다.

$$V \frac{dV}{dT} + BTg(T) = 0 \quad (12)$$

이 식을 변수분리 후 T_{cs} 부터 T 까지 적분하면

$$V^2 = V_{cs}^2 - f(T) \quad (13)$$

이고 여기서 식 $f(T)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$f(T) = 2B \int_{T_{cs}}^T Tg(T) dT \quad (14)$$

초전도 영역($T_L < T < T_{cs}$)에서는 열유량의 변화가 없으므로 $V_{cs} = Q_L/I$ 가 되고, 이를 식 (13)에 대입한 후 $T = T_H$ 를 대입하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{Q_L}{I}\right)^2 = \left(\frac{Q_H}{I}\right)^2 + f(T_H) \quad (15)$$

위 식에 의해 고온단의 온도구배가 제로가 되어 상단유입열량이 제로인 경우 저온단으로의 열손실은 다음과 같다.

$$\left(\frac{Q_L}{I}\right)_0 = f(T_H)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

식 (13)의 V 에 식(10)의 정의를 적용하고 T 와 ξ 에 대해 변수 분리 후 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{IL/A} \frac{k}{\left[\left(\frac{Q_L}{I}\right)^2 - f(T)\right]^{1/2}} dT = d\xi \quad (17)$$

식 (17)을 각 온도 구간별로 적분하면 최소열손실과 최적상단안전율의 관계를 구할 수 있다.

2.3.1 도입선의 최고 온도가 T_H 인 경우

이 경우 도입선의 온도는 단조증가 한다. 식 (17)을 T_{cs} 부터 T_H 까지 적분한 후 식(3)과 식(9)를 대입하여 정리하면 도입선의 최고 온도가 T_H 인 경우의 $Q_L/I \sim T_{cs}$ 관계식이 얻어진다.

$$\frac{1}{Q_L/I} \int_{T_L}^{T_{cs}} k dT + \int_{T_{cs}}^{T_H} \frac{k dT}{\left[\left(\frac{Q_L}{I}\right)^2 - f(T)\right]^{1/2}} - \lambda L J_c(T_{cs}) = 0 \quad (18)$$

온도 분포는 다음과 같다.

$$\xi = \xi_{cs} + \int_{T_{cs}}^T \frac{k dT}{\left[\left(\frac{Q_L}{I}\right)^2 - f(T)\right]^{1/2}} \quad (19)$$

2.3.2 도입선의 최고 온도가 T_H 보다 큰 경우

전류분류가 일어나는 영역($\xi_{cs} < \xi < 1$)에서 최고온도 T_{max} 가 상단온도 T_H 보다 높은 경우, T_{max} 인 지점(ξ_{max})의 온도구배는 제로가 된다. 이를 이용하여 식(12)를 변수 분리 후, T_{cs} 부터 T_{max} 까지 적분하여 정리하면 다음과 같이 하부 열유입량이 구해진다.

$$\frac{Q_L}{I} = f(T_{max})^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

즉 도입선의 열손실은 T_{max} 에 의해 결정된다.

식(17)을 온도구배의 부호에 따라 $\xi_{cs} \sim \xi_{max}$, $\xi_{max} \sim \xi_H (=1)$ 의 두 구간으로 나누어 적분한 후 정리하면 전류분류온도 T_{cs} 에 따른 T_{max} 를 구할 수 있는 식이 얻어진다.

$$\lambda L J_c(T_{cs})(\xi_{cs} - 1) + \int_{T_{cs}}^{T_{max}} \frac{k dT}{[f(T_{max}) - f(T)]^{1/2}} + \int_{T_H}^{T_{max}} \frac{k dT}{[f(T_{max}) - f(T)]^{1/2}} = 0 \quad (21)$$

따라서 구해진 T_{max} 를 식 (20)에 대입하면 열손실을 구할 수 있다.

최대온도 발생지점(ξ_{max})은 다음과 같다.

$$\xi_{max} = 1 - \frac{1}{\lambda L J_c(T_{cs})} \int_{T_H}^{T_{max}} \frac{k dT}{[f(T_{max}) - f(T)]^{1/2}} \quad (22)$$

ξ 에 따른 온도 분포는 $\xi_{cs} < \xi < \xi_{max}$ 인 영역과 $\xi_{max} < \xi < 1$ 인 영역으로 나누어 고려해야 하며 그 결과는 다음과 같다.

$$\xi_{cs} < \xi < \xi_{max}$$

$$\xi = \xi_{cs} + \frac{1}{\lambda L J_c(T_{cs})} \int_{T_{cs}}^T \frac{k dT}{[f(T_{max}) - f(T)]^{1/2}} \quad (23)$$

$$\xi_{max} < \xi < 1$$

$$\xi = \xi_{max} + \frac{1}{\lambda L J_c(T_{cs})} \int_T^{T_{max}} \frac{k dT}{[f(T_{max}) - f(T)]^{1/2}} \quad (24)$$

상부 열유입량은 식(12)을 변수 분리 후 T_H 부터 T_{max} 까지 적분하여 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\frac{Q_H}{I} = [f(T_{max}) - f(T_H)]^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

3. 해석 결과 및 고찰

본 논문에서 개발된 해석방법을 Bi-2223와 Ag-10%Au 합금으로 이루어진 HTS 테이프를 전류도입선으로 이용하는 경우에 적용하였다. Bi-2223의 임계전류밀도는 제로 필드에서 측정한 데이터를 커브피팅하여 사용하였다.[5]

$$J_c(T) = 352.4 \times 10^6 (1 - T/107.1)^{1.58} \text{ (A/m}^2\text{)}$$

Ag-Au합금의 열전도도(W/mK)는 다음의 식을 사용하였다.[6]

$$k = 0.00377 - 0.0186T + 0.000194T^2 + 0.000951T^3$$

도입선 양단의 온도는 각각 액화헬륨과 액화질소로 4.2K와 77K로 고정된다고 가정하였다. 또한 전류 도입선의 초전도 필라멘트 점적율(λ)은 25%로 가정하였다.

식(18), (19)의 경우 적분의 하부경계에서 특이점(singular point)이 발생하며 식(21), (22), (24)는 적분영역의 상부경계에서 특이점이 발생한다. 위의 식들을 적분하기 위해 중앙점공식(midpoint formula)을 사용하였다.[7] Q_L/I 와 T_{max} 등의 근을 구하는 방법으로는 inverse quadratic interpolation 방법을 사용하였다.[7]

하첨자 O 는 도입선 상단에서의 열유입이 없는 상태를 의미하며, 하첨자 S 는 전체 도입선이 초전도 상태임을 의미한다.

길이 1m, $\lambda=0.25$ 인 경우의 상단안전율(S_H)에 따른 상단과 하단의 열 유입량을 Fig. 2에 도시하였다.

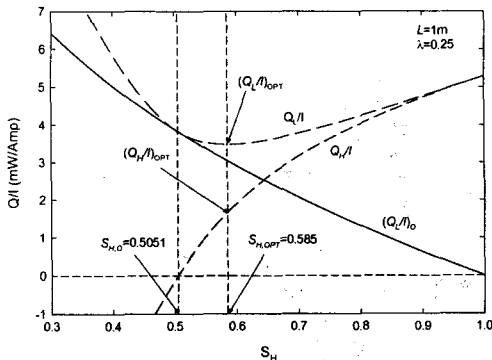


Fig. 2 Q_L/I , Q_H/I , $(Q_L/I)_0$ as a function of S_H for $L=1m$, and $\lambda=0.25$

$(Q_L/I)_0$ 은 식(16)으로부터 다음의 식으로 구한다.

$$\left(\frac{Q_L}{I}\right)_0 = \left(2B \int_{T_L}^{T_H} Tg(T)dT\right)^{1/2} \quad (26)$$

상전도 도입선 즉 $g(T)=1$ 인 경우에는 $S_{H,0}$ 에서 최소의 열손실이 일어남은 이미 알려진 사실이다. 그러나 전류 분류 상태의 초전도 전류 도입선의 경우에는 다른 양상이 나타난다.

상단안전율(S_H)이 1인 경우에는 전체 도입선이 초전도 상태이므로 Joule 열발생이 없어서 도입선 상단의 열유량과 하단의 열유량이 일치함을 볼 수 있다. 작동전류 (I)가 증가하거나 도입선의 면적(A)이 감소되는 경우(S_H 가 감소하는 경우) Q_L/I , Q_H/I 값은 점차 감소한다. Q_H/I 의 감소가 Q_L/I 의 감소 추세보다 급함을 볼 수 있는데 이는 단면적 감소에 따른 전도열전달량의 감소가 급속히 이루어짐을 의미한다.

Fig. 2에 나타나는 바와 같이 열손실 Q_L/I 는 최소 값이 존재한다. 최소 열손실 $(Q_L/I)_{OPT}$ 는 3.477(mW/A)이며 $S_{H,OPT}(=0.585)$ 에서 발생하고, 이때의 도입선 상단 열유입량 $(Q_H/I)_{OPT}$ 는 1.668(mW/A)이다.

$S_{H,0}(=0.5051)$ 는 도입선 상단의 온도구배가 제로인 지점으로, 이때의 하부 열유입 $(Q_L/I)_0$ 는 3.8324(mW/A)이다. S_H 가 $S_{H,0}$ 보다 큰 경우에는 도입선 상단으로 열량이 유입되나, 작은 경우에는 도입선의 최고 온도가 T_H 보다 크므로 고온단을 통하여 열이 유출된다.

위의 결과에서 알 수 있듯이 최소의 열손실 $(Q_L/I)_{OPT}$ 은 상단 열유입이 제로가 되는 상단안전율($S_{H,0}$)보다 높은 값에서 발생한다. $(Q_L/I)_{OPT}$ 는 $(Q_L/I)_0$ 값에 비해 9.28%작으며, 전체 도입선이 초전도 상태에서 작동하는 경우보다는 34.2%작다. 즉 도입선을 완전 초전도상태로 작동하는 것 보다 단면적을 줄여서 일부 전류분류상태로 작동하는 것이 열손실을 줄일 수 있다. 또한 최적 단면적은 상단열유입이 제로인 조건에서 구한 단면적보다 약간 큰 값을 가진다.

Fig. 3은 길이 1m인 전류 도입선의 S_H 에 따른 온도 분포를 보여준다. 도입선 상단의 열유입이 제로인 경우($S_{H,0}=0.5051$) 고온단의 온도구배가 제로임을 볼 수 있다. 도입선 상단의 안전율이 $S_{H,0}(=0.5051)$ 보다 작을 때는 $S_H=0.3$ 의 경우에서 알 수 있듯이 온도구배가 음의 값을 가지는 부분이 존재하며, 이 경우 도입선 상단으로 열이 유출된다.

도입선 전체가 초전도체로 동작하는 경우($S_H=1$)와 최적상태($S_{H,OPT}=0.585$)의 열손실은 34.2%와 큰 차이를 보이나, 온도분포의 차이는 Fig. 3에서 보듯이 미미하다. 그러나 최적상태와 상단

온도구배가 제로인상태($S_{H,0}$)의 열손실은 상대적으로 작은 9.28%의 차이임에도 불구하고, 온도분포는 상당한 차이가 있음을 볼 수 있다.

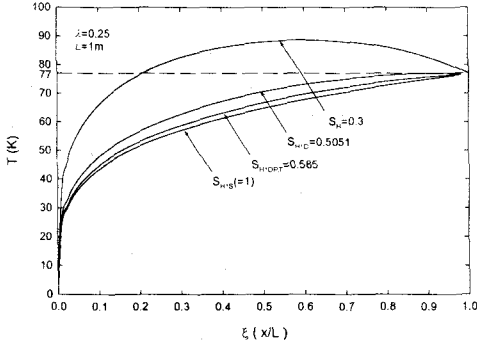


Fig. 3 Temperature distribution of HTS current lead for different safety factor $S_H=0.3, 0.5051, 0.585, 1$ at $L=1m, \lambda=0.25$

Fig. 4는 전류 도입선의 길이(L)에 따른 최소 열손실과, 그에 따른 S_H 값을 도시하고 있다. 도입선의 길이가 0.3m일 때 $(Q_L/I)_0$ 는 전체 도입선이 초전도 상태일 때의 44.4%이며, $(Q_L/I)_{OPT}$ 는 40%에 불과하다. 이는 도입선을 전류 분류 상태로 설계함으로써 최대 60%의 열손실을 감소시킬 수 있음을 의미한다.

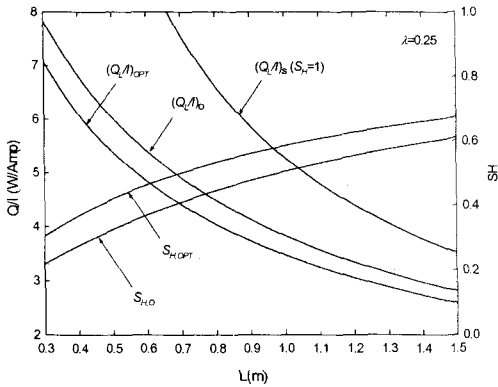


Fig. 4 Q_L/I and Optimum safety factor as a function of L for $\lambda=0.25$

도입선 전체가 초전도 상태인 경우의 열손실 $(Q_L/I)_S$ 와 최소 열손실 $(Q_L/I)_{OPT}$ 의 차이는 길이가 증가함에 따라 점차 감소하여 도입선 길이가 1.5m인 경우 전류분할 상태로 설계함으로써 최대 26.5%를 감소시킬 수 있다. 전류 도입선을 전류 분류상태에서 작동하게 설계하는 것은 도입선의

단면적(A)을 줄임으로서 저온부에 유입되는 전도 열량을 감소시키고자 하는 것이다. 그러나 도입선의 길이가 길어지면 전도에 의해 유입되는 열량은 감소하나, 반대로 Joule열발생은 증가하므로, 도입선을 전류 분할 상태로 설계하는 이점이 줄어든다.

$S_{H,OPT}$ 는 $S_{H,0}$ 에 비해 약간 높은 값을 가진다. 계산결과 길이 1m인 도입선의 상단 안전율이 $S_{H,0}$ 인 경우 전체 도입선의 73%가 전류 분류 상태로 작동하는 반면, 상단안전율이 $S_{H,OPT}$ 인 경우 55.2%만이 전류분류 상태로 작동한다. 이는 도입선 상단 안전율이 $S_{H,OPT}$ 가 되게 설계하는 것이, $S_{H,0}$ 에서 작동하게 설계하는 것보다, 도입선의 안정성측면에서 이점을 가짐을 의미한다.

전류분류 상태에서 동작하는 도입선이 최소 열손실을 가지는 최적 도입선상단안전율($S_{H,OPT}$)은 도입선의 길이가 0.3~1.5m일 때 0.3~0.68의 값을 가진다. $S_{H,OPT}$ 와 $S_{H,0}$ 의 차는 도입선의 길이가 0.3m일 때 0.086이며, 도입선의 길이가 0.5m일 때 0.094까지 증가하며, 이후로 점차 감소하여 길이 1.5m일 때는 0.064까지 감소한다.

위의 결과를 종합하여 점적율(λ)이 0.25인 경우, 도입선의 길이 L 에 따른 최적 상단안전율 $S_{H,OPT}$ 를 계산하여 다음과 같은 근사식을 구하였다.

$$S_{H,OPT} = 0.1371L^3 - 0.5647L^2 + 0.9427L + 0.0709 \quad (27)$$

또한 길이에 따른 최소열손실을 구하는 근사식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{Q_L}{I}\right)_{OPT} = 2.1643 + 8.5477e^{-1.9087L} \quad (28)$$

식(27)과 (28)은 도입선 길이 0.3~1.5m범위에 대해 각기 99%와 97%의 신뢰도를 갖는다.

Fig. 5는 도입선 길이에 따른 전류분류온도와 상단 열유입량을 나타내고 있다. $T_{cs,OPT}$ 는 최소 열손실이 발생하는 전류분류온도이고, $T_{cs,0}$ 는 도입선 상단의 열유입량이 제로가 되는 전류분류온도이다. $(Q_H/I)_{OPT}$ 는 최소 열손실을 가지는 경우의 상단 열유입을 말하고 $(Q_H/I)_S$ 는 도입선 전체가 초전도상태일 경우의 상단 열유입이다.

도입선의 길이가 1m인 경우 최적 전류분류온도는 64.8K이고, 계산에 따르면 이때 도입선 영역의 55.2%가 전류 분할 상태에 있다. 길이가 0.3m인 경우 최적 전류분류온도는 43.2K이고 전체 도입선의 92.5%가 전류분류상태로 동작한다.

$T_{cs,OPT}$ 는 도입선의 길이가 짧아질수록 급격히

감소함을 볼 수 있다. 이는 도입선의 길이가 감소함에 따라 최소 열손실을 가지는 도입선의 전류분류가 일어나는 영역 비율이 빠르게 증가함을 의미한다.

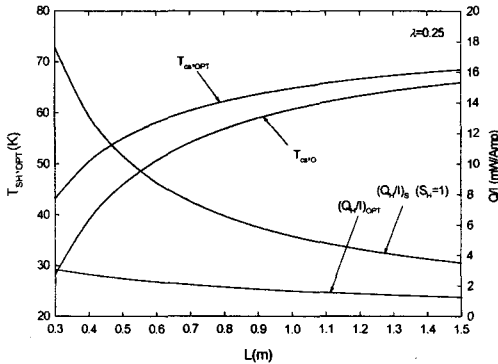


Fig. 5 Q_H/I and T_{cs} as a function of L for $\lambda=0.25$

$T_{cs,0}$ 는 $T_{cs,OPT}$ 보다 낮은 온도임을 알 수 있으며, 두 값의 차이는 도입선의 길이가 짧아질수록 증가한다. 이는 도입선 상단안전율을 $S_{H,0}$ 가 아닌 $S_{H,OPT}$ 로 설계함으로써 전류분할영역을 보다 더 줄일 수 있음을 의미한다.

최소열손실 상태에서 상단에서의 열 흐름인 $(Q_H/I)_{OPT}$ 는 도입선의 길이가 0.3~1.5m일 때 1.26~3.08(mW/A)의 범위로 양(+)의 값을 가짐을 알 수 있으며, 이 값은 도입선 전체가 초전도 상태인 경우의 열유입량 $(Q_H/I)_S$ 보다 적은 값을 가진다. $(Q_H/I)_{OPT}$ 와 $(Q_H/I)_S$ 의 차이는 도입선 길이가 짧을 수록 커진다.

Fig. 5에서 보듯이 최소 열손실 상태에서의 상단 열흐름 $(Q_H/I)_{OPT}$ 는 양의 값을 가진다. 즉 상단을 통하여 열이 도입선으로 들어온다. 구리 전류도입선의 경우 최소 열손실은 상단에서의 열유입이 제로인 상태에서 얻어지지만 초전도 도입선의 경우 상단에서 열이 들어오는 상태에서 하단으로의 열유출이 최소값을 가진다.

4. 결론

복합 HTS 전류 도입선을 전류 분류 상태로 작동하게 함으로서 도입선 하단에 연결된 초전도 기기에 유입되는 열손실을 최소화 할 수 있다. 상전도 도입선의 경우, 최소 열손실을 가지려면 도입선 상단의 열유입이 제로가 되도록 도입선의

길이와 단면적을 설계하여야 한다. HTS 전류 도입선의 경우는 상단 열유입이 제로가 아니라 약간의 열이 도입선으로 들어오는 상태에서 최소 열손실을 가진다. 본 논문에서는 HTS 도입선의 최소열손실과 단면적을 대표하는 상단안전율 사이의 관계를 구할 수 있는 이론식을 완성하였다. 도입선의 길이에 따른 최적 상단 안전율과 최소 열손실을 구하는 근사식을 제시하여 설계에 이용할 수 있도록 하였다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30400-011-3)지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) R.C.Niemann, Y.S.Cha, J.R.Hull, C.M.Rey, K.D.Dixon "Design of a High -Temperature Superconductor Current Lead for Electric Utility SMES" IEEE transaction on applied superconductivity, Vol 5, No. 2, 1995
- (2) Y.Iwasa, H.Lee "High-Temperature superconducting current lead incorporating operation in the current-sharing mode" Cryogenics, Vol 40, pp. 209-219, 2000
- (3) 설승윤, "전류분할 상태에서 최소 열손실을 갖는 초전도 전류도입선"
- (4) M.N.Wilson, "Superconducting Magnets" ,Chapter 11, Clarendon Press. Oxford, 1983
- (5) B.Zeimertz, H.K.Liu, and S.X.Dou "General design formula for taped, conduction cooled current lead utilizing high temperature superconducting tapes", Supercond. Sci. Tech., Vol. 12, pp. 181-183, 1999
- (6) T.Sasaoka, J.Sato, K.Fukushima, M.Okada, M. Endo, Y.yaegashi and M.Nagano "Design and testing of current lead made from Ag-Au sheathed Bi-2223 superconducting wires" Cryogenic. Vol 37, pp. 409-415, 1997
- (7) W.H.Press, B.P.Flannery, S.A.Teukolsky, W.T.-Vetterling "Numerical Recipes in C" Cambridge University Press, 1988.