

안전율이 일정한 초전도 전류도입선의 안정성해석

Stability Analysis of HTS Current Lead with Constant Safety Factor

설승윤*

Seung-Yun Seol

Abstract : The stability of variable cross-sectional area HTS current lead is considered. The cross-sectional area is varied to have a constant safety factor which is defined as the ratio of operating current and critical current of superconductor. As the constant area HTS lead, the variable cross-sectional area HTS lead also has three steady states above the bifurcation point and only one steady state below the bifurcation point. The temperature profiles and current sharing ratios for each steady state are calculated. The heat dissipation into cryogenic system for superconducting, intermediate, and upper states are compared. For Bi-2223 sheathed with silver-gold alloy lead, the bifurcation point appears above 2m length of current lead, and the maximum temperature of upper state seems to be burn-out free below 5m length.

Key Words : superconductor, current lead, safety factor, stability

1. 서 론

단면적이 일정한 초전도 전류도입선은 초전도체의 특성인 저온에서의 높은 임계전류 밀도를 효율적으로 이용하지 못하여 저온부로의 열손실이 과다하다는 단점이 있다. 이러한 점에 착안하여 초전도 도입선의 단면적을 저온부로 갈수록 적게 하여 도입선 어느 곳에서나 임계전류와 작동전류의 비율인 안전율이 일정하도록 설계하면 저온부 열손실을 획기적으로 줄일 수 있다. [1, 2]

단면적인 일정한 초전도 전류도입선은 세 가지 정상상태가 존재함이 알려져 있다. 초전도 전류도입선이 임계길이 이상이면 불안정해져서 도입선 일부가 전류분할상태(partly normal state)로 변한다. 임계길이 이하에서는 오직 초전도 정상상태(fully superconducting state)만이 존재하고, 임계길이 이상에서는 초전도 정상상태에 더하여 두개의 일부 전류분할상태(partly normal state or partly current-sharing state)들이 존재한다. 임계길이 이상에서 추가되는 두가지 정상상태 중 하나는 안정-정상상태(stable steady state)이나 다른 하나는 불안정 정상상태

(unstable steady state)이다. [3, 4, 5]

초전도 전류도입선에 대한 Dresner [5]의 해석에서는 전류분할 상태를 고려하지 않고 임계온도 이상에서 전류가 모두 안정화재료로 흐르고 임계온도 이하에서는 모든 전류가 초전도체로만 흐르는 경우를 가정하였다. 본 논문에서는 초전도체의 온도에 따라 완전초전상태, 전류분할상태, 그리고 모든 전류가 안정화재료로만 흐르는 상태로 세분하여 해석하였다.

안전율이 일정한 초전도 전류도입선은 도입선이 초전도 상태를 유지할 경우에 단면적이 일정한 도입선에 비하여 열손실을 줄일 수는 있으나 초전도체 일부의 온도가 상승하여 Joule 열을 발생하는 경우 국부적인 최고온도가 일반 일정단면적 도입선에 비하여 높을 것이 예상된다

본 논문에서는 초전도 상태에서 안전율이 일정하도록 단면적을 설계한 고온 초전도 전류도입선의 안정성에 대한 해석을 수행하고자 한다. 일정 안전율을 가지는 도입선에도 분지점 이하에서는 초전도 정상상태만이 존재하고, 분지점 이상에서는 초전도상태, 중간상태 및 상위상태가 존재함을 보이고 각각의 온도 분포에 따른 안전율변화 및 전류분할 정도를 해석하고자 한다.

2. 일정안전율 초전도 전류도입선

초전도 전류도입선이 초전도 상태일 때 임계전류와 작동전류의 비를 일정하도록 단면적을 변화시키면 저온부 유입 열량의 감소 및 초전도 재료 절감의 효과를 기대할 수 있다. 안전율 S 는 초전도체의 임계전류밀도와 초전도체 단면적의 곱인 임계전류와 작동전류의 비로서 다음과 같이 정의된다.

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

A 는 전류도입선의 단면적이고, 초전도체의 점적율(volumetric proportion)은 $\lambda = A_s/A$ 로 정의된다. A_s 는 초전도체만의 단면적이다.

단면적이 일정한 전류도입선의 경우 안전율 S 는 임계전류밀도 변화와 동일하다. 즉 전류도입선의 고온단에서 최소의 안전율을 가지고 저온단에서 최대의 안전율을 가질 것이다. 저온단의 온도가 액체헬륨의 온도 $T_L = 4.2K$ 이고 고온단의 온도가 액체질소의 온도 $T_H = 77K$ 라면, $S_{max}/S_{min} = J_c(T_L)/J_c(T_H)$ 이다. 즉 일정단면적 전류도입선은 저온단 부근에서 필요이상의 안전율을 가지는 비효율적인 전류도입선이다. 또한 저온단 부근의 필요 이상의 단면적은 저온부로 유입되는 과도한 열량의 원인이 된다. 일정단면적 HTS 도입선의 저온단 유입 열량은 다음 식으로 구할 수 있다.

* 정 회 원 : 전남대학교 자동차공학부

원고접수 : 2000년 09월 25일

심사완료 : 2000년 11월 15일

$$Q_a = \frac{S_{\min} I}{\lambda L J_c(T_H)} \int_{T_L}^{T_H} k(T) dT \quad (2)$$

도입선의 열전도도 k 는 초전도체와 안정화 재료의 열전도도를 가중 평균하여 얻는다.

$$k = \lambda k_s + (1 - \lambda) k_n \quad (3)$$

위 식에서 하첨자 s 는 초전도체, n 은 안정화 재료를 의미한다. 고온초전도체 전류도입선의 안정화재료로 사용하는 Ag-Au 합금의 열전도도는 초전도체의 열전도도에 비하여 매우 크기 때문에 도입선의 열전도도 $k = (1 - \lambda) k_n$ 으로 본다.

식 (1)에서 안전율 S 를 S_s 로 일정하게 만들려면 온도 변화에 따라 $J_c(T)A$ 가 일정하도록 단면적 A 를 변화시켜야 한다. 초전도체 임계전류밀도 $J_c(T)$ 는 온도 감소에 따라 증가하므로 단면적 A 는 저온부로 갈수록 줄어든다. 전류도입선이 초전도상태에 있고 전도냉각만을 고려한다면 전류도입선의 에너지 방정식은 $d(kAdT/dx)dx = 0$ 이다. 이 방정식에 단면적 A 를 식 (1)에서 정의한 바와 같이 대입하여 적분하면 다음과 같은 온도 분포식을 얻을 수 있다.

$$\frac{x}{L} = \int_{T_L}^{T_s(x)} \frac{k(T)}{J_c(T)} dT \Bigg| \int_{T_L}^{T_H} \frac{k(T)}{J_c(T)} dT \quad (4)$$

저온단으로 유입되는 열량은 다음 식과 같다.

$$Q_s = \frac{S_s I}{\lambda L} \int_{T_L}^{T_H} \frac{k(T)}{J_c(T)} dT \quad (5)$$

일정안전율 S_s 와 식 (2)의 최소 안전율 S_{\min} 이 같다면, 즉 일정 단면적 도입선의 최소 안전율과 일정 안전율 도입선의 안전율이 같다면, 두 도입선은 고온단에서 단면적이 같을 것이고 저온단에 유입되는 열량의 비는 다음과 같다.

$$\frac{Q_s}{Q_a} = \int_{T_L}^{T_H} \frac{k(T)}{J_c(T)/J_c(T_H)} dT \Bigg| \int_{T_L}^{T_H} k(T) dT \quad (6)$$

위 식에서 $J_c(T_H)$ 는 $T_L < T < T_H$ 에서 최소값이므로 $Q_s/Q_a < 1$ 임을 알 수 있다. 즉 안전율이 일정하도록 단면적을 변화시킨 전류도입선의 열손실이 단면적이 일정한 전류도입선의 열손실에 비하여 적다.

주어진 초전도 전류도입선 재료의 열전도도 $k(T)$ 와 임계전류밀도 $J_c(T)$ 를 식 (4)에 대입하여 초전도 상태의 온도분포 $T_s(x)$ 를 구했다면 이 온도분포를 이용하여 단면적 분포를 식 (1)에 의하여 구할 수 있다.

$$A(x) = \frac{S_s I}{\lambda J_c[T_s(x)]} \quad (7)$$

안전율 S_s , 점적을 λ 인 도입선의 최대 단면적은 온도 T_H 에서 $A_{\max} = S_s I / [\lambda J_c(T_H)]$ 이고, 최소 단면적은 T_L 에서 $A_{\min} = S_s I / [\lambda J_c(T_L)]$ 로서 최소 최대 단면적의 비는 $A_{\max}/A_{\min} = J_c(T_L)/J_c(T_H)$ 이다.

3. 안정성 해석

초전도 전류도입선은 항상 초전도 상태에서 작동하

여 도입선 내에서 Joule 열 발생이 없을 것이 요망되나 내부 혹은 외부의 열교란에 의하여 도입선 일부가 상전도 상태로 전이되면 온도가 전류분할온도(T_{sh}) 이상인 곳에서 Joule 열이 발생한다. 초전도 상태에서 전류도입선의 안전율이 모든 위치 x 에서 일정하도록 전류도입선의 단면적을 식 (7)과 같이 결정하면 단면적은 좌표 x 의 함수가 된다.

전도냉각만을 고려한 초전도 전류도입선의 에너지 식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dx} \left(kA \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\rho I^2}{A(1-\lambda)} g(T, x) = 0 \quad (8)$$

ρ 는 안정화 금속의 비저항이고 $g(T, x)$ 는 위치 x 의 초전도체 단면이 초전도 상태, 전류 분할 상태, 상전도상태 인지를 나타내는 함수로서 다음과 같이 정의된다.

$$g(T, x) = \begin{cases} 0 & 1 < S \\ 1 - S & 0 < S \leq 1 \\ 1 & S = 0 \end{cases} \quad (9)$$

안전율 S 는 식 (1)과 같이 정의되어 온도 T 와 위치에 따른 단면적 $A(x)$ 의 함수이다. S 가 1 이상인 경우는 그 단면의 온도에 해당하는 임계전류밀도와 단면적의 곱이 작동 전류 이상임을 의미하여 전류분할이 발생하지 않고 모든 전류가 초전도체로만 흐름을 의미한다. $0 < S < 1$ 인 경우는 전류분할이 발생하여 SI 만큼의 전류가 초전도체로 흐르고 $(1-S)I$ 의 전류가 안정화 재료로 흐른다. 단면의 온도가 초전도체의 임계온도 이상이면 임계전류밀도는 제로가 되므로 안전율 $S = 0$ 이다. 이 경우는 모든 전류가 안정화 재료로만 흘러 안정화 재료 단위 체적당 $\rho [I/(1-\lambda)A]^2$ 의 Joule 열이 발생하고, 이를 도입선 전체 면적으로 평균하면 도입선 단위 길이에서 $\rho I^2/A(1-\lambda)$ 의 열이 발생한다.

단면적이 일정한 도입선에서는 함수 g 가 오직 온도만의 함수이나 단면적이 변화하는 도입선의 경우는 위치에 따른 단면적이 안전율을 결정하는 인자이므로 함수 g 는 온도 T 와 위치 x 의 함수가 된다.

전류분할 온도(current sharing temperature) T_{sh} 는 작동전류 I 가 단면의 임계전류 $\lambda A(x)J_c(T)$ 와 같을 때 결정된다. 즉 안전율 $S = 1$ 인 경우의 온도이다. 본 연구에서와 같이 단면적이 변화하는 도입선에서는 전류분할 온도가 온도만의 함수가 되지 않고 단면적의 변화에 따라 변화한다.

$$\lambda A(x)J_c(T_{sh}) = I \quad (10)$$

식 (8)을 보다 간략히 나타내기 위해 다음 변수들을 정의한다.

$$a = \frac{A}{I}, \quad \xi = \frac{x}{L} \quad (11)$$

또한 Wiedemann-Franz Law에 의하여 $kn\rho = BT$ 를 적용하면 식 (8)은 다음과 같다.

$$ka \frac{d}{d\xi} \left(ka \frac{dT}{d\xi} \right) + BL^2 T g(T, \xi) = 0 \quad (12)$$

이 식에서 Wiedemann-Franz Law는 안정화 금속에 대해서만 적용한 것이다. 또한 안정화 금속의 열전도도가 초전도체의 열전도도 보다 월등히 크므로 도입선 전체의 열전도도는 $k=(1-\lambda)k_n$ 으로 보았다. Lorentz 수 B는 $2.45 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega\text{K}^{-2}$ 이다.

경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T &= T_L \text{ at } \xi=0 \\ T &= T_H \text{ at } \xi=1 \end{aligned} \quad (13)$$

비선형 2차 미분방정식 (12)을 해석하기 위하여 $y_1=T$, $y_2=ka(dT/d\xi)$ 로 정의하면 다음과 같은 2개의 1차 미분방정식으로 분해된다.

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{d\xi} &= \frac{y_2}{k(y_1) a(\xi)} \\ \frac{dy_2}{d\xi} &= -\frac{BL^2 y_1 g(y_1, \xi)}{k(y_1) a(\xi)} \end{aligned} \quad (14)$$

Runge-Kutta 방법에 의하여 위 식을 풀 때 $\xi=0$ 에서의 초기값 y_{10} 과 y_{20} 값이 필요하다. $y_{10}=T_L$ 로서 주어지지만 y_{20} 는 $\xi=1$ 에서의 y_1 이 T_H 가 되도록 조정하여야 한다. $\xi=0$ 에서의 y_{20} 는 저온단으로 유입되는 열손실(Q_L)을 대표하는데 그 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{Q_L L}{I} = y_{20} &= \left[ka \frac{dT}{d\xi} \right]_{\xi=0} \\ &= \left[\frac{kAL}{I} \frac{dT}{dx} \right]_{x=0} \end{aligned} \quad (15)$$

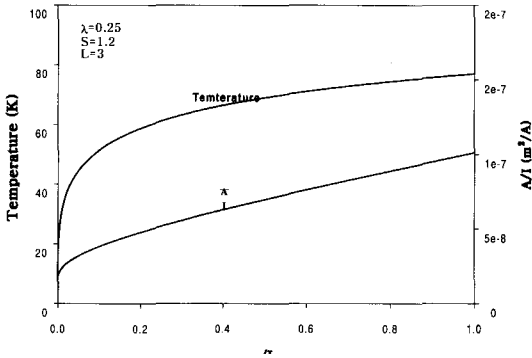


그림 1. 초전도상태의 온도분포와 단위전류당 단면적 분포
Fig. 1. Profiles of Temperature and cross-sectional area per current at superconducting state.

4. 계산결과 및 고찰

계산 대상은 Bi-2223 초전도체와 Ag-Au 합금으로 이루어진 전류도입선이다. Bi-2223의 임계전류밀도는 제로 필드에서 측정된 데이터를 커브 피팅한 다음 공식을 이용하였다. [1]

$$J_c(T) = 352.4 \times 10^6 (1 - T/107.1)^{1.58} \text{ A/m}^2 \quad (16)$$

Ag-Au 합금의 열전도도는 성분비에 따라 달라지나 본 연구에서는 다음의 값을 사용하였다. [6, 7]

$$\begin{aligned} k_n &= 0.00377 - 0.0186 T + 0.000194 T^2 \\ &+ 0.00951 T^3 \text{ W/mK} \end{aligned} \quad (17)$$

하첨자 n은 열전도도가 Ag-Au에 대한 값을 의미하며 전체 도입선의 열전도도 k는 $(1-\lambda)k_n$ 으로 구한다. 식 (16)과 (17)에서 온도 T는 Kelvin 단위를 사용해야 한다.

계산을 위하여 안전율 $S_s=1.2$, 초전도체의 점적을 $\lambda=0.25$ 경우에 대한 해석을 수행하였다. 단면적 함수 $A(x)$ 를 얻기 위해서는 초전도상태의 온도분포를 얻어야 한다. 식 (4)에 식 (16)과 (17)의 임계전류밀도와 열전도도를 대입하여 적분하면 온도분포 $T_s(x)$ 를 얻을 수 있다. 그림 1에 초전도상태의 온도분포 $T_s(x)$ 를 도시하였다.

구하여진 온도분포 $T_s(x)$ 를 식 (7)에 대입하면 전류도입선의 단위전류당 단면적 분포 $A(x)/I$ 를 그림 1과 같이 구할 수 있다. 주어진 조건에 의해 구한 최대 A_{max}/I 는 $x=L$, 즉 $T=T_H$ 에서 $1.012 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{A}$ 이고 최소 A_{min}/I 는 $x=0$ ($T=T_L$)에서 $1.4509 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{A}$ 이다. 최대 면적과 최소 면적비는 6.974이다. 이 면적비는 온도 T_H 와 T_L 에서의 임계전류밀도의 비율 $J_c(T_L)/J_c(T_H)$ 와 동일하다.

초전도 상태에서의 열손실은 식 (5)로 구하는데 주어진 조건에서 $Q_{sL}/I = 0.003763 \text{ Wm/A}$ 이다. 식 (5)에서 보듯이 S_s 와 λ 가 주어지면 Q_{sL}/I 는 일정한 값을 가진다. 즉 초전도 상태에서의 열손실(Q_s)은 도입선 길이(L)에 반비례한다.

단면적이 일정한 초전도 도입선, 즉 단면적이 최대 단면적인 $A_{max}/I=1.012 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{A}$ 로 일정하다면 온도 T_H 에서의 안전율이 최소 안전율로서 $S_{min}=1.2$ 가 되고 T_H 보다 낮은 온도에서는 안전율이 1.2 보다 커질 것이다. 이렇게 단면적이 일정한 초전도 도입선에 대한 열손실은 식 (2)로서 구할 수 있다. $S_{min}=1.2$, $\lambda=0.25$ 에 대하여 위 식을 계산하면 $Q_{aL}/I = 0.006341 \text{ Wm/A}$ 이다. 즉 초전도상태에서 안전율이 일정한 도입선의 열손실은 단면적이 일정한 도입선 열손실의 59%에 불과하다.

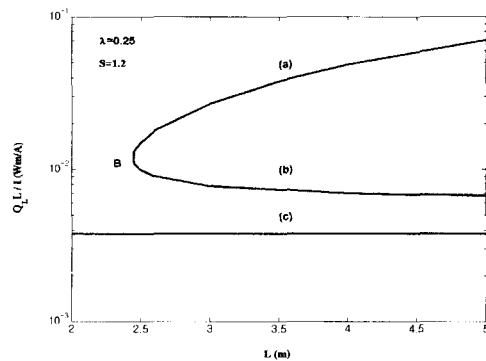


그림 2. 도입선 길이 변화에 따른 초전도 상태(a), 중간상태(b), 상위상태(c)의 열손실
Fig. 2. Heat dissipation of superconducting(a), intermediate(b), and upper(c) states depending on the length of current lead.

그림 2는 초전도상태(a), 중간상태(b), 그리고 상위상태(c)에서의 Q_{LL}/I 를 길이 L의 변화에 따라 나타낸 것이다. Q_L 은 도입선을 통해 저온부로 유입되는 열손실이다.

본 연구에서는 도입선의 길이 L을 변화시키면서 임

계길이(LB, critical length) 이하에서는 초전도 정상상태(superconducting steady state) 만이 존재하고 임계길이 이상에서는 초전도상태와 더불어 중간상태(unstable partly normal steady state)와 상위상태(stable partly steady state)가 나타나는 양상을 조사하였다. 중간상태와 상위상태가 결합된 모습인 분지점(bifurcation point)은 LB=2.45 m에 위치한다. LB 이하에서는 오직 초전도상태만이 존재하고, LB 이상에서는 세 가지 정상상태가 나타난다. 따라서 전류도입선의 길이가 2.45m 이하라면 상위정상상태가 존재하지 않으므로 안전율이 일정하도록 도입선의 단면적을 설계함이 타당 할 것으로 보인다.

분지점 이상에서 상위상태의 열손실은 길이가 길어질수록 급격히 증가하는 양상이고 중간상태의 열손실은 길이 증가에 따라 초전도상태에 접근함을 알 수 있다. 길이 L=3m의 경우 초전도 상태, 중간상태, 상위상태의 열손실 비는 1:2.06:7.13 이다. 즉 길이 3m인 일정한 전율(S=1.2) 전류도입선이 초전도상태에서 상위 상태로 천이 되면 열손실이 7배 이상 됨을 의미한다.

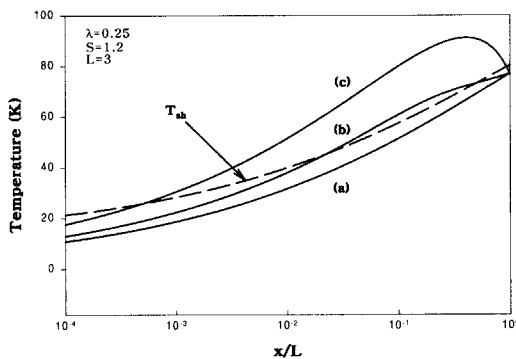


그림 3. 초전도상태(a), 중간상태(b), 상위상태(c)의 온도분포와 전류분할온도 분포.

Fig. 3. Temperature profiles of superconducting(a), intermediate(b), upper(c) states and current sharing temperature.

그림 3은 L=3m인 경우 세 가지 상태에서의 온도 분포를 나타내고 있다. 초전도 상태의 온도분포 (a)는 무차원 길이로 표시할 때 도입선의 길이와 무관하게 항상 일정한 분포를 가진다. 점선으로 나타나는 전류 분할온도 Tsh(x)는 단면적 분포가 결정되면 식 (10)에 의하여 얻을 수 있다. 도입선의 온도가 Tsh보다 높으면 전류분할이 발생한다.

불안정 정상상태인 중간상태 (b)의 온도는 초전도상태의 온도에 가깝고 TH 보다 낮음을 볼 수 있다. 단면적이 일정한 전류도입선에서는 중간상태의 최고온도가 TH 이상인 것과 비교된다.[5] 그림에서 보이듯이 0.232<x/L<0.496 구간에서 중간상태의 온도가 전류 분할온도보다 높아 이 구간에서 전류분할에 의한 Joule 열발생이 있음을 알 수 있다.

상위상태(c)의 최고온도는 x/L=0.39에서 91K를 가진다. 상위상태의 최고온도가 초전도체의 임계온도 117K보다 낮기 때문에 상위상태에서 전류가 모두 안정화 금속으로 통과하는 부분은 발생하지 않았다. 전류분할이 이루어지는 영역은 그림에서 보이듯이 0.005<x/L<0.93 구간으로서 도입선 대부분이 전류 분할상태에 있다.

그림 4는 도입선의 온도(T=y1)를 가로축에 또 그 온도에 해당하는 열유동 y2=(kAL/I)dT/dx=QL/I

를 세로축에 표시한 위상선도(phase diagram)이다. 초전도 상태(a)에서는 도입선 내부에서 발열이 없기 때문에 고온단에서 유입된 열이 그대로 저온단에 유입되므로 TL에서 TH까지 QL/I는 일정하다.

중간상태(b)는 고온단으로부터의 열유입은 오히려 초전도상태에 비하여 적으나 73K 정도부터 전류분할이 발생하고 Joule 열 발생으로 열흐름이 증가한다. 이러한 증가는 45K 정도에서 멈추고 그 이하 온도에서는 일정하게 저온단까지 이어진다. 즉 45K 이하의 온도에서는 전류분할이 발생하지 않았음을 알 수 있다. 중간상태에서는 도입선의 온도가 45K 이상 73K 이하인 영역에서 전류분할로 인해 Joule 열 발생이 있다. 그림 3에서 보듯이 중간상태의 온도 분포는 x에 따라 단조 증가하므로 저온단으로 유입되는 열량 QL은 고온단에서 유입된 열량과 전류분할로 인해 발생한 Joule 열의 합계이다. QLL/I=0.007766, QHL/I=0.001980이고 도입선 길이 L=3m 이므로 도입선 내부에서 발생한 Joule 열은 0.001929 W/A이다.

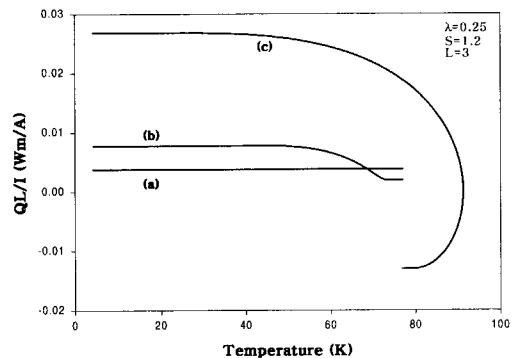


그림 4. 도입선 내의 온도와 열흐름 관계, 초전도상태(a), 중간상태(b), 상위상태(c)

Fig. 4. Relation of temperature and heat flow in current lead, superconducting state(a), intermediate state(b), and upper state(c)

상위상태(c)의 온도분포(그림 3) 및 위상선도(그림 4)를 검토하면 도입선위치 x/L=0.39에서 최고온도 91K이다. x/L<0.39 인 영역에서는 온도구배가 양수이고 x/L>0.39에서는 온도구배가 음수로서 이 경우에는 저온단은 물론 고온단으로도 열이 유출된다. 고온단으로 유출되는 열은 QHL/I=0.012923, 저온단으로는 QLL/I=0.026754 따라서 도입선 내부에서 발생한 Joule 열은 0.013226 W/A이다.

그림 3에서 살펴보았듯이 상위상태에서는 0.005<x/L<0.93 구간에서 전류분할상태에 있고 위상선도 그림 4에서는 이 구간이 곡선으로 나타난다. 그림 4의 (c) 그래프에서 TH<T<79.5K 구간과 TL<T<26K 구간에서 수평선을 이루는 것은 이 온도 범위에서 모든 전류가 초전도체로만 흐르고 있음을 말한다.

그림 5는 세 가지 상태에서의 안전율을 도시한 것이다. 임계전류를 작동전류로 나눈 값인 안전율 S는 0<S<1인 경우 전류분할상태에 있음을 의미한다. 초전도 상태(a)의 안전율은 설계한대로 S=1.2를 전구간에서 유지한다. 중간상태 (b)에서는 0.0232<x/L<0.49 구간에서 S는 1 이하로서 이 구간에서 (1-S)I만큼의 전류가 안정화 금속으로 분할되어 Joule 열을 발생한다. x/L=0.17에서 S는 최소값 0.88이 된다. 즉 x/L=0.17인 곳에서는 전류의 12%가 안정속을 통과한다. 상위상태(c)에서는 S<1 인 영역은 0.005<x/

$L < 0.93$ 이고 최소 안전율은 $x/L = 0.31$ 에서 0.26 이다. 즉, 상위상태에서는 최대 74%의 전류가 안정화 금속으로 흐른다.

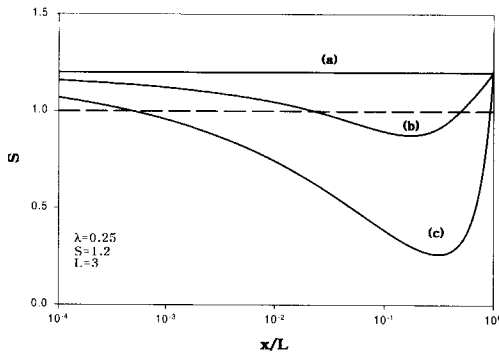


그림 5. 도입선 내의 안전율 변화, 초전도상태(a), 중간상태(b), 상위상태(c)

Fig. 5. Variation of safety factor in current lead, superconducting state(a), intermediate state(b), and upper state(c)

그림 6은 도입선의 길이 L 에 따른 최고온도를 나타내고 있다. 임계길이($L_B = 2.45m$) 이하에서는 초전도상태만이 존재하고 최고온도는 TH로 일정하다. 임계길이 이상에서는 초전도상태와 중간상태의 최고온도는 $x/L = 1$ 에서의 TH이지만 상위상태의 최고온도는 그림 3에서 보이듯이 TH 이상이다. 상위상태의 최고온도는 길이 L 이 증가함에 따라 증가한다.

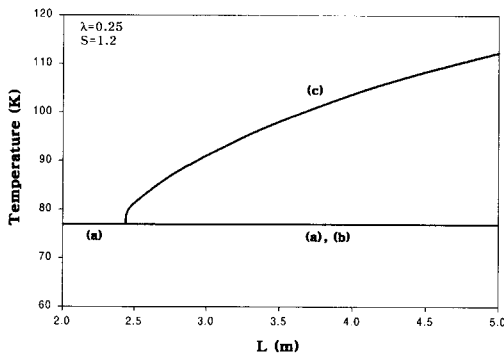


그림 6. 도입선 길이 변화에 따른 최고온도 변화, 초전도상태(a), 중간상태(b), 상위상태(c)

Fig. 6. Variation of maximum temperature depending on the length of current lead, superconducting state(a), intermediate state(b), and upper state(c)

4. 결 론

안전율이 일정하도록 단면적을 변화시킨 고온 초전도체 전류도입선의 안정성 해석을 수행하였다. 단면적이 도입선 위치에 따라 변화하기 때문에 단면적이 일정한 도입선과는 달리 전류분할 온도도 위치에 따라 달라진다. 전도냉각을 고려하여 수치적으로 안정성 해석을 수행한 결과 일정단면적 초전도 전류도입선과 마찬가지로 일정안전율 도입선도 초전도상태, 중간상태, 상위상태가 분지점 이상에서 발견되고 분지점 이하에

서는 초전도상태만이 있음을 알 수 있었다. Bi-2223 초전도체와 Ag-Au 합금을 초전도체 점적율 0.25로 복잡한 일정안전율을 가진 초전도 전류도입선에 대해 계산 한 결과 도입선의 길이가 2m 이하라면 초전도 정상상태만이 존재함을 확인하였다. 분지점 이상에서 중간상태, 상위상태의 온도분포, 전류분할 정도를 계산하였다. 일정안전율 도입선에서는 중간상태 온도분포의 최고온도가 도입선 고온부 TH 이하이고 상위상태의 최고온도도 도입선 길이 5m 이하에서는 소손의 위험성을 우려할 정도는 아닌 것으로 보인다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] B. Zeimetz, H.K.Liu, and S.X.Dou "General design formula for tapered, conduction cooled current lead utilizing high temperature superconducting tapes," Supercond. Sci. Tech., Vol. 12, pp. 181-183, 1999.
- [2] 문정수, 설승윤, "Analysis of HTC Current Lead with Variable Area." 2000년도 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp. 22-25, 2000.
- [3] L.Dresner, "Stability of Superconductor," Plenum Press, 1995.
- [4] J.R.Hull, "High temperature superconducting current leads for cryogenic apparatus," Cryogenics, Vol. 29, pp. 1116-1123, 1989.
- [5] 설승윤, "분지특성을 고려한 초전도 전류도입선의 설계," 한국초전도·저온공학회논문지, 1권 2호, pp. 37-42, 1999.
- [6] T. Sasaoka, J. Sato, K. Fukushima, M. Okada, M. Endo, Y. Yaegashi, and M. Nagano, "Design and testing of current leads made from Ag-Au sheathed Bi-2223 superconducting wires," Cryogenics, Volume 37, pp. 409-415, 1997.
- [7] Hiroyuki Fujishiro, Manabu Ikebe, Koshichi Noto and Michiaki Matsukawa, "Low Thermal Conductive Bi-2223 Tapes Sheathed with Ag-Au Alloys," IEEE Trans. Magn. Volume 30, pp. 1645-1650, 1994.

저 자 소 개

설승윤(薛勝允)

1960년 4월 16일생, 1983년 서울대 기계설계학과 졸업, 1983년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사), 1993년 미국 Texas Tech U. 졸업(공학박사), 현재 전남대학교 자동차공학부 부교수