

분지 특성을 고려한 초전도 전류도입선 설계

Design of Superconducting Current Leads Considering Bifurcation Characteristic

설 승 윤*

S. Y. Seol*

Abstract: The stability of high-temperature superconducting current leads for cryogenic devices are investigated. By assuming full transition from superconducting state to normal state at a transition temperature, the HTS current lead shows bifurcation phenomenon. There is a bifurcation shape-factor below which only superconducting steady state exists. Above the bifurcation shape-factor, HTS leads have three steady states: i.e., two stable steady-states and one unstable steady-state. Below the bifurcation shape-factor, the superconducting current lead is unconditionally stable, because there exists only one steady state. However, above the bifurcation shape-factor HTS current lead is conditionally stable depending on the shape and intensity of disturbance.

Key Words: Superconducting Current Lead(초전도 전류도입선), Stability(안정성), Bifurcation(분지), Shape Factor(형상계수), Optimization(최적화)

1. 서 론

상온에 위치한 전원에서부터 초전도체 마그네트에 전류를 공급하기 위해 전류도입선이 사용된다. 전류도입선은 상온과 액체 헬륨 사이를 연결하므로 이를 통한 열전도와 전류도입선 자체의 Joule 열 발생을 최소로 해야 헬륨 손실 또는 냉동 장치에 소요되는 에너지 비용을 줄일 수 있다.

고온 초전도체(High Temperature Superconductor, HTS)를 전류도입선으로 이용하면 일반적으로 액체 질소 온도 이하에서 Joule 열 발생을 억제할 수 있고 HTS의 낮은 열전도율로 열 손실을 줄일 수 있다 [1].

고온초전도체 Y-123이나 Bi-2212 벌크(bulk) 또는 Au/Ag 합금을 씌운 Bi-2223 테이프가 향후 HTS 전류도입선으로 경쟁할 것으로 보인다[2].

HTS를 전류도입선으로 이용할 때 가장 중요한 점은 초전도체의 열적 불안정성이다. 열적 교란으로 인해 초전도체 전류도입선이 초전도성을 잃어버리면 리드는 많은 열 발생으로 소손(burnout)될 위험이 있어 이를 방지하기 위한 초전도체 안정성(stability) 연구가 이루어지고 있다[3, 4, 5, 6].

고온 초전도체 전류도입선의 하단은 항상 액체 헬륨과 접촉하고, 상단은 액체질소와의 접촉 또는 냉동기 부착 등으로 강제 냉각되고 있으므로 작동전류가 과도하게 높지 않는 이상 초전도체 전류도입선 전체가 상전도체로 전이될 위험은 없으나 상단 부근이 초전도성을 잃을 위험이 있다. Hull[1]은 전이온도 변화에 따른 HTS 리드 특성을 고찰하면서 전이온도가 높고, 형상계수가 클 때 리드가 초전도-정상상태, 불안정-정상상태, 그리고 상위-정상상태의 3가지 온도 분포를 가짐을 설명하고 외부교란 에너지가 크면 초전도 정상상태에서 상위 정상상태로 전이될 가능성을 언급하고 있다.

Maehata[5] 등은 3가지 정상상태 중 불안정-정상상태의 온도분포를 계산하고 이 온도 분포가 가지는 에너지를 기준으로 외부교란 에너지의 허용범위를 구할 수 있음을 보였다.

Dresner[6]도 부분적으로 정상상태가 되는 초전도 전류도입선을 연구하였다. 이 연구에서는 액체헬륨 온도와 액체질소 온도사이의 전류도입선의 열전도도를 일정한 것으로 보아 해석적인 온도분포를 구하였다. 특히 초전도 전류도입선이 임계길이 이상인 경우 상위 정상상태의 최고온도가 지나치게 높아 소손의 위험성이 있음을 지적하였다.

본 연구에서는 증발되는 헬륨 가스에 의해 전류도입선을 냉각 시키는 경우를 다루었다. 먼저 가스 냉각에 의한 상전도체 전류도입선에 대해 간략히 살펴보고 고온 초전도체 전류도입선의 안정성을 다룬다. 즉 전이온도 이하에서는 초전도성을 보여 열발생이 없고 전이온도 이상에서는 일반 도체와 같이 Joule 열을 발생하는 모델을 해석하여 형상계수에 따른 HTS 리드의 정상상태 변화를 살펴보고자 한다. HTS 리드의 분지형상계수 존재를 고찰하고 이를 설계기준으로 활용할 수 있음을 논의할 것이다.

*정 회 원 : 전남대학교 자동차공학부 부교수
원고접수 : 1999년 4월 14일
심사완료 : 1999년 9월 15일

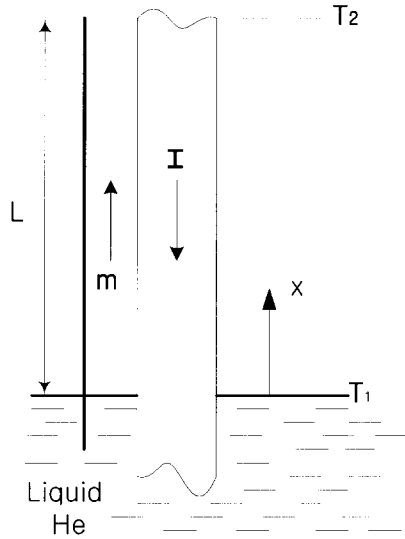


그림 1. 전류도입선 개략도
Figure 1 Schematic representation of current lead

2. 해 석

2.1 에너지 균형식

전류도입선은 300K에서 4.2K 사이를 연결하고 있으므로 온도에 따른 재료상수를 고려해야 한다. 일반적인 전기 도체는 열전도도(k)와 전기 비저항(ρ)이 Wiedemann-Franz-Lorentz(WFL) 법칙에 따른다.

$$k(T)\rho(T) = BT \quad (1)$$

B 는 Lorentz 상수로 $2.45 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega/\text{K}^2$ 이다.

그림 1과 같이 액체질소 온도(T_2)와 액체헬륨 온도(T_1) 사이에 놓인 길이 L 인 전류도입선이 해석 대상이다. 전류도입선 주위로는 증발한 헬륨가스가 질량유량 \dot{m} (kg/s)으로 흐르면서 리드의 열을 제거한다. 질량유량 \dot{m} 은 전류도입선 하단에서 열유입으로 인해 증발한 헬륨량이다. 전류도입선과 증발한 헬륨 가스의 에너지 밸런스를 구하면 다음 미분 방정식으로 표시된다 [7].

$$\frac{d}{dx} \left(k(T)A \frac{dT}{dx} \right) - f\dot{m}C_p \frac{dT}{dx} + \frac{I^2\rho(T)}{A} = 0 \quad (2)$$

A 는 전류도입선의 단면적, I 는 흐르는 전류, C_p 는 헬륨 가스의 비열, f 는 전류도입선과 헬륨 가스 사이의 열교환 효율이다. 해석적 해를 구하기 위해 다음의 식 (3)과 같이 좌표변환을 하고 간략한 표현을 위해 식 (4)와 (5)를 정의한다.

$$dz = \frac{Idx}{k(T)A} \quad (3)$$

$$w = \dot{m}C_L \quad (4)$$

$$C_p/C_L = u \quad (5)$$

C_L 은 헬륨의 증발 잠열이다. 위 변수들과 WFL 법칙을 사용하면 식 (2)는 다음과 같다[7].

$$\frac{d^2T}{dz^2} - \frac{fwu}{I} \frac{dT}{dz} + BTg(T) = 0 \quad (6)$$

위 식에서 함수 $g(T)$ 는 재료의 초전도성을 고려하여 도입한 함수다. 즉 전이온도(Transition Temperature) T_t 보다 작은 온도에서 $g(T)=0$ 이고, T_t 보다 큰 온도에서는 $g(T)=1$ 이다. 일반 상전도체 리드인 경우 $g(T)$ 는 항상 1 이다.

전이온도란 리드가 초전도성을 잃어버리는 온도로서 온도에 따른 임계 전류밀도 변화선에서 작동 전류밀도 $J(I=I/A)$ 에 해당하는 온도이다. HTS 임계전류밀도는 온도 증가에 따라 감소하므로 작동전류밀도가 커지면 전이온도는 감소한다. 전이온도 T_t 가 리드 상단의 온도 T_2 보다 작으면 리드의 $T_t < T < T_2$ 구간에서 Joule 열을 발생하게 된다. 따라서 전이온도 T_t 는 HTS 리드 상단의 온도 T_2 보다 높아야만 리드 전체를 초전도 상태에서 운전할 수 있다. 본 연구에서는 T_t 를 리드 상단 온도 T_2 로 하여 계산하였다.

실제 고온 초전도체는 저온 초전도체와는 달리 플럭스-플로우(flux-flow) 영역이 넓어 전이온도에서 바로 상전도체로 바뀌는 것은 아니다[8]. 본 연구에서는 계산의 간편을 기하기 위해 점프(jump)모델을 채택하였다. 또한 고온초전도체가 임계전류밀도 이상에서 상전도상태(normal state)로 되었을때 전기저항은 금속도체와 같이 WFL 법칙을 따르는 것은 아니다. Hull[1]은 YBCO의 경우 $T=95 \text{ K}$ 일 때의 $k\rho$ 값이 $3 \times 10^{-6} \text{ W}\Omega/\text{K}$ 로서 WFL 법칙을 적용하였을 경우인 $2.33 \times 10^{-6} \text{ W}\Omega/\text{K}$ 보다 1.3배 정도이고 YBCO의 경우 $k\rho$ 가 온도에 따라 증가한다는 점을 주목하여 WFL 법칙을 YBCO 리드 해석에 이용한 바 있다. 본 연구에서는 초전도체의 상전도상태 비저항이 WFL 법칙에 따르는 것으로 보았으나 이러한 가정이 타당할 지에 대해서는 향후 보다 엄밀한 논의가 필요할 것이다. 초전도체의 상전도상태 전기저항을 측정된 데이터가 있으면 이를 이용해야 하겠지만 보통 과도한 Joule열 발생으로 인해 측정하기가 용이하지 않다.

초전도체의 불안정을 완화하기 위해 초전도체와 함께 안정화 도체를 병렬로 연결하는 경우가 있다. 이 경우에는 전이온도와 임계온도 사이에서 초전도체와 안정화 도체에 동시에 전류가 흐르는 전류분할(current sharing) 현상이 발생한다[9]. 본 연구는 순수 초전도체 전류도입선을 대상으로 하므로 이 경우는 제외한다.

식 (4)에서 액체헬륨 증발량 \dot{m} 은 저온조(cryostat)에 들어오는 모든 열량에 의한 증발량이지만 열손실(heat loss)의 대부분이 전류도입선을 통한 것으로 보았다. 따라서 $x=0$ 에서의 에너지 균형으로 부터 다음 식이 유도된다.

$$\dot{m}C_L = kA \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} \quad (7)$$

이 식을 좌표 z 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dT}{dz} \Big|_{z=0} = \frac{w}{I} \quad (8)$$

미분방정식 (6)의 경계조건은 $z=0$ ($x=0$)에서 $T=T_1$ 과 $z=Z$ ($x=L$)에서 $T=T_2$ 이다. 식 (6)에 포함된 w/I 는 식 (8)의 조건을 이용하여 구한다.

2.2 상전도체 전류도입선

식 (6)에서 $g(T)$ 가 온도에 무관하게 항상 1이라면 초전도체 리드가 아닌 상전도체 리드를 해석하는 공식을 유도할 수 있다. 재료의 열전도도 $k(T)$ 가 좌표 z 에 포함되어 있으므로 재료에 무관한 해석이 가능하다. 이러한 해석적인 해는 Wilson[7]의 책에 설명되어 있다. Wilson은 해석의 편의를 위하여 리드 하단의 온도 T_1 을 재료로 보았으나 보다 엄밀한 해석을 위해 T_1 이 재료가 아닌 경우의 해는 다음과 같다.

$$T = e^{\alpha z} \left\{ \left(\frac{T_2}{e^{\alpha Z}} - T_1 \cos \beta Z \right) \frac{\sin \beta z}{\sin \beta Z} + T_1 \cos \beta z \right\} \quad (9)$$

$$\frac{w}{I} = \alpha T_1 + \left(\frac{T_2}{e^{\alpha Z}} - T_1 \cos \beta Z \right) \frac{\beta}{\sin \beta Z} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{fuw}{2I} \quad \beta = \sqrt{B - \alpha^2} \quad (11)$$

식 (9), (10), (11)에서 온도분포 $T(z)$ 를 구하는 절차를 보면, w/I 가 주어지면 식 (11)에서 α 와 β 를 알 수 있고 (f 와 u 는 주어진 것으로 본다.) 식 (10)에서 Z 를 구할 수 있다. 따라서 식 (9)에 의하여 z 에 따른 온도 분포를 구한다. 주의할 점은 식 (11)에서 β 가 실수이어야 하므로 α^2 은 B 보다 작아야 한다. 식 (10)에서 w/I 는 단위 전류당 액체헬륨에 유입되는 열량을 의미하는데 이 값을 최소화시키는 최적 Z 값이 존재한다. 이를 구하기 위해 식 (10)을 Z 에 대해 미분하여 재로 하면 다음과 같다.

$$\frac{T_1}{T_2} = e^{-\alpha Z} \left(\cos \beta Z + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta Z \right) \quad (12)$$

식 (10)과 (12)를 Z 와 w/I 에 대해서 풀면 최소값 $(w/I)_0$ 과 최적 Z_0 가 구해진다.

2.3 초전도 전류도입선

리드 전체가 초전도 상태에 있다면 $g(T)$ 는 제로가 되고 이 경우의 해는 다음과 같다.

$$\frac{z}{Z} = \frac{\ln[1 + fu(T - T_1)]}{\ln[1 + fu(T_2 - T_1)]} \quad (13)$$

헬륨 증발량은 식 (8)에 의하여 다음 식과 같다.

$$\frac{w}{I} = \frac{\ln[1 + fu(T_2 - T_1)]}{fuZ} \quad (14)$$

2.4 형상계수

식 (6)을 풀어 $T(z)$ 를 구했다면 실제 길이 x 에 따른 온도분포는 리드 재료의 온도에 따른 열전도도 $k(T)$ 를 이용하여 식 (3)을 다음과 같이 적분하여 구한다.

$$\frac{x}{L} = \int_0^z k(T) dz \Big| \int_0^Z k(T) dz \quad (15)$$

리드의 물리적 길이 L 에 대응하는 변환좌표에서의 길이 Z 는 다음 식으로 결정된다.

$$\frac{IL}{A} = \int_0^Z k(T) dz \quad (16)$$

IL/A 를 형상계수(shape factor)라 부른다. 형상계수

는 $T(z)$ 가 구해지고 Z 가 결정되면 식(16)에 의하여 구할 수 있다. 따라서 변환 좌표에서의 Z 값은 형상계수를 나타내므로 본 연구에서는 IL/A 또는 Z 를 형상계수라 호칭하겠다.

3. 전류도입선의 설계

3.1 상전도 전류도입선 설계

실제 리드를 설계하는 경우 헬륨가스와 리드와의 열교환을 최대화 하여 마그네틱으로 열유입을 줄이기 위한 여러 가지 방법이 동원된다. 즉 열 교환 효율 f 를 1에 접근시키는 것이 설계목표이다. 이와 더불어 상전도체 리드인 경우 최적 형상계수를 갖도록 설계하는 것이 중요하다. 초전도 마그네틱의 특성상 작동전류 I 와 리드의 길이 L 은 미리 정해지는 경우가 많으므로 리드의 단면적 A 를 최적 형상계수에 맞추어 결정해야 한다. 즉 최적 단면적보다 적으면 Joule 열 발생이 많아지고 최적 단면적보다 크면 전도에 의한 열전달량이 많아진다. 이들의 합이 전체 열전달량을 결정하므로 최적 형상계수가 아니면 헬륨 증발량은 최소 값을 가질 수 없다.

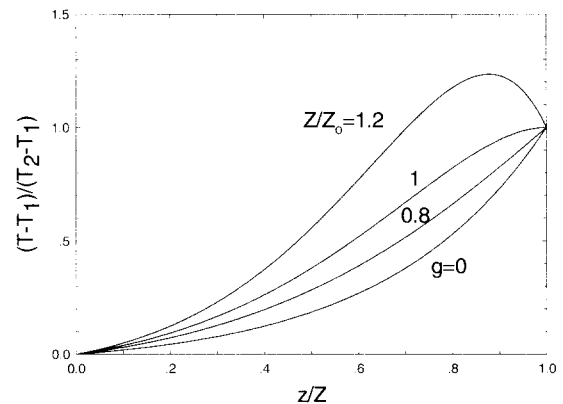


그림 2. 매개변수 z 에 따른 온도 분포
Figure 2 Variation of temperature with parameter z

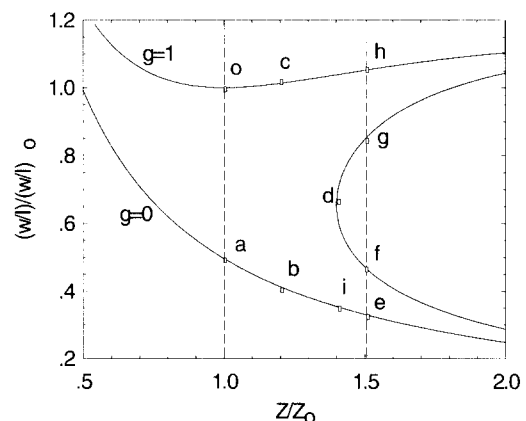


그림 3. 형상계수 Z 에 따른 단위전류당 열손실 (w/I)
Figure 3 Heat dissipation (w/I) as a function of shape factor Z

3.2 초전도 전류도입선 설계

초전도 전류도입선의 경우 최소 헬륨 증발량이란 개념은 없다. 초전도성이 유지된다면 리드의 길이가 길수록 리드의 단면적이 적을 수록 헬륨 증발량은 줄어들 것이다. 하지만 초전도 리드의 일부가 초전도성질을 잃어버리면 리드의 소손으로 이어질 위험이 있으므로 이에 대한 정확한 해석이 필요하다. 작동 전류에 따른 전이온도 T_1 가 액체질소 온도에 가까우면 리드의 상단부 부근이 초전도성을 잃어버리고 Joule 열을 발생할 수 있다.

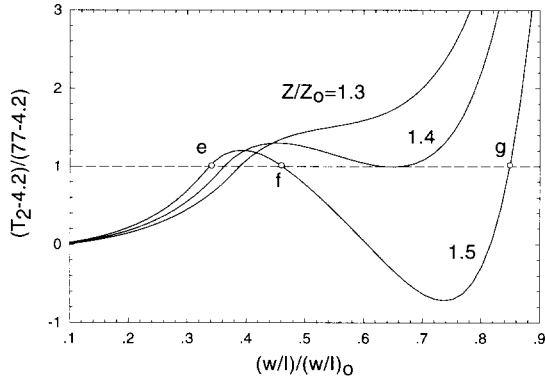


그림 4. 단위전류당 열손실(w/I)에 따른 고온단의 온도 T_2 의 변화

Figure 4 Variation of temperature T_2 as a function of heat dissipation w/I

그림 2는 $f=1, u=0.25$ 인 경우의 온도분포를 구한 그림이다. $f=1$ 인 조건은 이상 가스냉각(ideal gas-cooled) 전류도입선을 가정 한 결과이고, 1기압에서 헬륨의 증발잠열은 $C_L=2.09 \times 10^4$ J/kg, 0~300K 사이에서 헬륨증기의 비열 C_p 는 평균 5.21×10^3 J/kg-K 이다. 따라서 $u=C_p/C_L=0.25$ 이다.

$g=0$ 에 해당하는 온도분포가 리드가 초전도상태인 경우이고, 그 위의 온도분포 세 개는 리드 전체를 상전도 상태로 가정 한 경우의 온도분포들이다. 앞에서 설명한 대로 HTS 리드 전체가 상전도상태로 되는 경우란 존재 하지 않지만 비교를 위해 제시하였다. $Z/Z_0=1$ 로 표시 된 온도분포는 상전도 리드의 최적 형상계수에 대해 단위 전류당 최소 열손실 $(w/I)_0$ 을 가지는 온도 분포로서 상단에서의 온도구배가 제로인 특성을 갖는다. Z/Z_0 이면 리드 중간의 온도가 상단 온도 T_2 보다 커지게 되는데 이때 최대온도가 너무 크면 리드의 소손 위험이 있다. Z/Z_0 인 경우 열은 리드의 하단으로 흐르면서 동시에 상단으로도 흐르게 된다. Z/Z_0 이면 리드의 온도는 모두 T_2 보다 작아진다.

그림 3의 $g=1$ 곡선은 상전도체 전류도입선의 Z 에 따른 w/I 의 변화를 그린 것이다. 점 o에서 최적 형상계수 $Z_0(=2.267 \times 10^4$ A-K/W), 최소 열손실 $(w/I)_0(=1.05 \times 10^{-3}$ W/A)을 가진다. Z 가 Z_0 보다 크거나 작으면 w/I 는 $(w/I)_0$ 보다 크다. 초전도성을 유지하는 리드의 경우($g=0$ 곡선) Z 가 커짐에 따라 w/I 는 적어진다. 초전도 전류도입선의 헬륨 증발량은 항상 리드 전체를 상전도체로 보았을 경우의 헬륨 증발량보다 적다.

상전도 리드 설계에서는 당연히 Z_0 를 기준으로 하여야 한다. 초전도 리드 설계에서 Z 값을 Z_0 에 맞추어 그림 3의 점 a에서 작동되도록 하면 강력한 외부 교란으

로 인해 리드 전체가 초전도성을 잃더라도 헬륨 증발량은 상전도 리드의 최소값(점 o)을 유지함과 동시에 리드의 최고온도가 T_2 이상 오르지 않음을 보장할 수 있다. 하지만 초전도 리드 전체가 상전도 상태로 되지는 않기 때문에 이러한 설계는 비효율적이다. Z 값을 Z_0 이상으로 하면 w/I 를 더욱 낮출 수 있다(점 b).

이상의 논의에서는 초전도 전류도입선이 완전 초전도성을 유지하거나 완전 상전도체가 된다는 가정을 사용 하였다. 초전도체 리드가 완전히 상전도체가 되려면 리드의 온도 전체가 전이온도 T_1 이상이 되어야 한다.

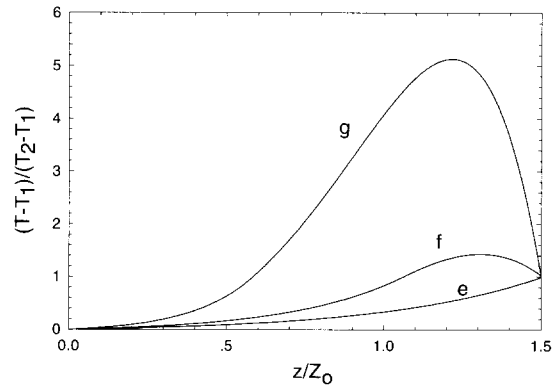


그림 5. 초전도, 불안정, 상위 정상상태에서의 온도분포

Figure 5 Temperature profile of current lead with parameter z for superconducting, unstable, and upper steady-state

하지만 리드 하단이 액체헬륨에 접촉하여 있기 때문에 하단이 T_1 이상이 되는 경우는 존재하지 않는다.

4. 초전도체 전류도입선의 안정성

초전도체 전류도입선의 전이온도를 고려하여 전이온도 이하에서는 초전도체, 이상에서는 상전도체가 되는 경우를 고찰해 보자. 이 경우 리드의 상단부에서는 전기 저항으로 인한 열이 발생하고 하단부는 초전도성을 유지하므로 열 발생이 없다. 식 (6)의 Joule 열 발생항에서 함수 $g(T)$ 는 다음 식과 같다.

$$g(T) = \begin{cases} 0 & \text{for } T < T_t \\ 1 & \text{for } T > T_t \end{cases} \quad (17)$$

그림 4는 w/I 변화에 따른 $z=Z$ 에서의 온도 T_2 를 세 가지 Z 값에 대해서 Runge-Kutta 방법으로 계산한 결과이다. T_2 는 77K이기 때문에 그림 4의 세로축 1과 만나는 w/I 값이 해가 될 수 있다. $Z/Z_0=1.3$ 인 경우는 오직 하나의 해만이 존재한다. 즉 작은 형상계수에 대해서는 하나의 정상상태만이 존재한다. 형상계수가 커져서 $Z/Z_0=1.4$ 에 이르면 또 하나의 해가 추가된다. $Z/Z_0=1.4$ 를 넘어서면 그림 4에서 보듯이 세개의 해가 존재한다. $Z/Z_0=1.5$ 인 경우 $(w/I)/(w/I)_0$ 값이 0.33 (점 e), 0.47 (점 f), 0.85 (점 g)인 경우에 T_2 가 77K에 이르는 볼 수 있다. 이 3개의 정상상태는 각각 초전도-정상상태(점 e), 불안정-정상상태(점 f), 상위-정상상태(점 g)라 부른다 (Hull[1], Maehata[5]).

Dresner[6]). 각 정상상태에서의 w/I 값을 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서의 점 e, f, g는 그림 4의 기호와 대응된다.

점 e는 전류도입선이 완전 초전도성을 유지하고 있는 상태로서 그림 5의 e와 같은 온도 분포를 가진다. 이 상태의 헬륨 증발량 w/I 는 식 (14)에 의해서도 구할 수 있다. 점 f는 불안정-정상상태인데 그 이유를 보면 그림 4에서 w/I 에 대한 T_2 의 구배가 음수로서 상단의 온도 T_2 가 감소하는데 헬륨 증발량은 커지는 모습을 보이기 때문이다.

이러한 다중 정상상태는 Hull[3]과 Dresner[6]의 논문에서 언급하고 있고 Maehata[5]는 불안정-정상상태의 온도 분포(그림 5의 f)를 이용하여 초전도 전류도입선의 안정성을 논하고 있다.

상위-정상상태 점 g는 안정상태로서 헬륨 증발량이 크고, 그림 5에서 보듯이 전류도입선의 최고온도도 매우 높다. 그림 3의 점 h는 전류도입선 전체를 상전도체로 가정하였을 경우의 헬륨 증발량을 나타낸다. 앞서도 논의하였듯이 초전도 전류도입선은 점 h에 해당하는 정상상태를 가지지 않는다.

초전도 전류도입선의 여러 상태를 조사한 결과 점 d의 Z 값, 즉 Z_d (분지형상계수, bifurcation shape-factor) 이하에서는 오직 하나의 초전도-정상상태만을 가지고, Z_d 이상에서는 초전도-정상상태, 불안정-정상상태, 상위-정상상태가 모두 나타난다. $Z=Z_d$ 인 경우 초전도-정상상태가 있고 불안정-정상상태와 상위-정상상태가 하나로 합해진 모습을 보인다. 이와 같이 형상계수의 변화에 따라 초전도체 전류도입선의 정상상태 양상이 달라짐은 일종의 분지현상(bifurcation phenomenon)으로 파악할 수 있다. Z/Z_d 인 초전도 리드는 외부교란에 의해 온도분포가 초전도 정상상태 온도 분포에서 이탈할 지라도 시간이 경과하면 최종적으로 초전도상태로 돌아온다. 본 연구에서는 $f=1, u=0.25$ 에 대하여 $Z_d/Z_n=1.4$ 인 것으로 계산되었다.

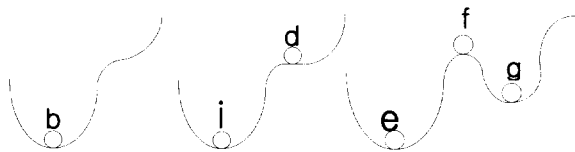


그림 6. 초전도 전류도입선의 안정성 개략도
Figure 6 Schematics for the stability of superconducting current lead

고온 초전도체 전류도입선을 분지 형상계수 Z_d 보다 약간 낮은 형상계수를 갖도록 설계한다면 초전도상태에서의 헬륨 증발량을 낮출 수 있고, 외부 교란에 의하여 리드가 초전도 상태를 이탈 할지라도 결국 초전도 정상상태로 복귀하여 리드의 소손 위험을 줄일 수 있다. 물론 Z/Z_d 일지라도 강력한 외부 교란에 의한 비정상상태에서의 소손 위험성마저 없어지는 것은 아니다.

그림 3에서 a-b-c 선이 초전도 정상상태로서 HTS 전류도입선은 이 상태에서 동작될 것이 요망된다. d-g 곡선이 상위-정상상태로서 또 하나의 안정-정상상태이긴 하나 헬륨 증발량이 크고, 리드의 최고온도가 높아 소손 위험성이 있다. 전류도입선의 초기상태가 이 두개의 안정 정상상태가 아니라면 시간이 지남에 따라 온도 분포는 안정-정상상태 중 하나로 접근한다. 이 둘 중 어느 쪽으로 갈 것인지를 판단하는 기준으로서 d-f 선

이 활용될 수 있다 (Maehata[5], Dresner[6]).

즉, 그림 5의 불안정-정상상태 f에 해당하는 온도분포보다 약간 높은 온도분포를 가진 전류도입선은 최종적으로 상위-정상상태 g의 온도분포로 이동하고 f보다 낮은 온도분포는 초전도-정상상태 e로 바뀐다. 불안정-정상상태는 마치 정상(頂上)에 있는 공과 같이 정상상태이긴 하나 불안정한 상태이다. 약간의 교란만을 가해도 안정 정상상태 중 하나로 변화한다.

그림 6은 개념적으로 그림 3의 각 상태를 도시한 것이다. 점 b는 초전도-정상상태로 안정적이다. 점 i는 초전도-정상상태, 점 d는 준안정(meta-stable) 상태이고 점 e와는 초전도-정상상태, g는 상위-정상상태, 그리고 점 f는 불안정-정상상태를 나타낸다.

5. 결 론

초전도 전류도입선의 안정성을 해석하여 분지 형상계수 이하에서는 초전도 정상상태만이 존재하고, 분지 형상계수 이상에서는 초전도-정상상태와 불안정-정상상태 그리고 상위-정상상태가 존재함을 보였다. 이러한 정상상태들의 존재를 확인함으로써 분지 형상계수를 초전도 전류도입선 설계의 기준으로 활용할 수 있을 것이다. 즉 분지 형상계수 이하에서는 오직 초전도 정상상태만이 존재하므로 어떤 외부 교란에 대해서도 최종적으로 초전도성을 회복한다. 그러나 분지 형상계수 이상에서는 교란에 따른 온도분포와 불안정-정상상태의 온도 분포를 비교하여 초전도성을 회복할 것인지 아니면 상위-정상상태로 전이할 것인지가 결정된다.

참 고 문 헌

- (1) J.R. Hull, "High temperature superconducting current leads for cryogenic apparatus," *Cryogenics*, 1989, Vol. 29, pp. 1116-1123.
- (2) R. Heller, G. Friesinger, W. Goldacker, H. Kathol, and B. Ullmann, "Development of a 60 kA Current Lead Using High Temperature Superconductors," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, 1997, Vol. 7, No. 2, pp. 692-695.
- (3) S.Y. Seol and J.R. Hull, "Transient analysis and burnout of high TC current leads," *Cryogenics*, Vol. 33, pp. 966-975, 1993.
- (4) S.Y. Seol, Y.S. Cha, R.C. Niemann, and J.R. Hull, "Prediction of Burnout of a Conduction-Cooled BSCCO Current Lead," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, 1997, Vol. 7, No. 2, pp. 696-669
- (5) K. Maehata, Y. Mizokami, K. Ishibashi, and M. Takeo, "Stability of HTS Current Leads Considering Unstable Equilibrium Temperature Profile," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, 1997, Vol. 7, No. 2, pp. 680-683.
- (6) L. Dresner, *Stability of Superconductor* chap. 10, Plenum Press, New York, 1995.
- (7) M.N. Wilson, *Superconducting Magnets* chap. 11, Oxford University Press, 1983.

- (8) Y.S. Cha, S.Y. Seol, D.J. Evans, and J.R. Hull, "Flux-Flow Resistivity of Three High-Temperature Superconductors," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, pp. 2122-2125, 1997.
- (9) S.Y. Seol, Y.S. Cha, and W.J. Minkowycz, "Thermal analysis of composite superconductors subjected to time-dependent disturbance," Heat and Mass Transfer, Vol. 33, No. 3, pp. 177-184, 1997.

저 자 소 개



설승윤(薛勝允)

1960년 4월 21일 생, 1983년 서울대학교 기계설계학과 졸업, 1985년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사), 1993년 Texas Tech University 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 전남대학교 자동차공학부 부교수.