

## 단면적 변화를 가지는 고온초전도체 전류도입선 해석

문정수, 설승윤  
전남대학교 자동차공학부

### Analysis of HTS Current Lead with Variable Area

J. S. Moon, S. Y. Seol  
School of Automotive Engineering, Chonnam National University

syseol@chonnam.chonnam.ac.kr

**Abstract** - To improve the performance of high temperature superconducting current leads, variable cross-sectional area is considered. The cross-sectional area is varied as a function of current density to fix the safety factor along lead length. New integration method is devised to find optimum cross-sectional area distribution. New design of current lead has low heat leak into cryostat and less material than constant cross-sectional area leads. Conduction cooled lead is considered. The developed method is applied to Bi2223 current leads sheathed Ag-Au alloy.

### 1. 서 론

초전도체 전류도입선(HTS current leads)은 초전도체 마그네트에 전류를 공급해주는 장치이며 일반적으로 고온 초전도체와 상전도체를 혼합하여 제작하고 있다. HTS 전류도입선은 저온부는 액체 헬륨에 접하고 고온부는 액체 질소에 의하여 온도가 고정된다. 이용되는 초전도 전류도입선은 대부분 일정 단면적을 가지고 있다.

도입선의 단면적을 저온부로 갈수록 줄인다면 유입되는 열손실을 줄일 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 이루어졌다[1-3]. 즉 초전도체의 임계전류는 저온에서 크고 고온에서 적기 때문에 저온부에서는 고온부 보다 적은 단면적으로 작동전류를 손실없이 통과시킬 수 있다. 저온부의 단면적이 줄어들면 이에 따라 고온부에서 유입되는 전 열량도 줄어들게 된다.

상전도체 전류도입선의 경우, 최소 열손실을 갖도록 단면적을 변화시키는 것은, 열전도율과 전기비저항이 Wiedemann-Franz 법칙에 따라 변화하므로 비효과적이라는 연구가 있다[1]. Seol[2] 등은 테이프 형태의 HTS 도입선을 검토하였다. Ag 또는 Ag-Au 합금을 튜브 재료로 사용하는 PIT(Powder In Tube) 방식의 복합 HTS 전류도입선에 대한 소손 해석을 수행하였다. Zeimetz[3] 등은 HTS 테이프를 이용하여 단을 가지는 경우에 대한 고찰을 하였다. 서로 다른 길이를 가진 HTS 테이프를 연결하여 전체적으로 테이프 형태의 도입선을 만들 때 각 테이프의 길이를 최적화 시키는 방법을 해석적으로 구하고 있다.

일정 단면적을 가진 HTS 전류도입선을 사용하면 고온부에서 저온부로 내려갈수록 임계전류밀도( $J_c$ )는 커지지만

작동전류밀도( $I/A$ )는 일정하다. 임계전류밀도에 단면적을 곱한 값이 임계전류(critical current)로서 일정단면적 전류도입선의 경우 고온부의 온도( $T_2$ )에 대응하는 임계전류가 가장 적게 된다. 따라서 고온부의 온도에 대응하는 임계전류(최소 임계전류)보다 적은 작동전류를 통과시킨다면 저온부에서는 임계전류와 작동전류의 차이가 불필요하게 커진다. 임계전류( $J_c A$ )와 작동전류( $I$ )의 비를 안전율  $S$ 로 정의한다.

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

즉 안전율은 작동전류에 비하여 임계전류가 얼마나 큰가를 나타낸다. 당연히 안전율은 1보다 큰 값이어야 한다. 일정단면적을 가진 HTS 전류도입선의 안전율은 초전도성을 유지하고 있을 경우 고온부에서 최소 값을 가지고 저온부에서 최대 값을 가진다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 초전도체 전류도입선의 단면적을 저온부로 갈수록 작게 설계하여 많은 양의 재료절감과 저온부로 유입되는 열량을 줄일 수 있음을 보이고자 한다. 도입선 각 위치의 안전율이 일정하도록 단면적을 변화시키면 저온부로 갈수록 단면적은 줄어들게 된다. 작동전류와 도입선의 체적이 일정하다면 일정단면적 도입선과 일정안전율 도입선을 비교할 때 일정안전율 도입선이 초전도 상태에서는 보다 적은 열손실을 실현할 수 있다. 또한 동일한 체적이라면 일정단면적 도입선이 가지는 최소 임계전류보다 일정안전율 도입선이 가지는 임계전류가 크기 때문에 소손위험에 있어서도 보다 안전한 설계가 이루어진다.

### 2. 해석

#### 2.1 일정단면적을 가지는 전류도입선

초전도체의 임계전류밀도는 온도에 따라 단조 감소하며 임계온도  $T_c$ 에서 제로가 된다. 이 관계를 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{J_c}{J_{cl}} = \left(1 - \frac{T - T_1}{T_c - T_1}\right)^n = (1 - \theta)^n \quad (2)$$

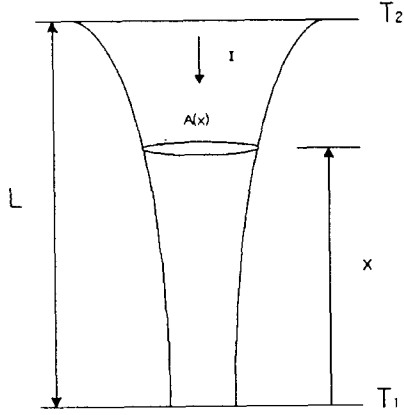


Fig. 1 Schematic of a current lead with variable area.

위 식에서  $\theta$ 는 무차원온도이고 지수  $n$ 은 실험에 의해서 결정되는 값이다. Zeimetz[3]의 연구에서는 Bi2223 테이프의 경우  $n=1.4$ 를 사용하였다.  $J_{c1}$ 은 저온부의 온도  $T_1$ 에서의 임계전류밀도이다. 온도  $T_2$ 에서의 임계전류밀도는  $J_{c1}(1-\theta_2)$ 가 된다.  $\theta_2$ 는 온도  $T_2$ 에 대응하는 무차원 온도이다. 최소 안전율이  $S$ 이고 전류  $I$ 를 전송해야 할 일정단면적을 가진 HTS 전류도입선은 다음의 무차원 단면적을 가져야 한다.

$$a_a = \frac{A}{(SI/J_{c1})} = \frac{1}{(1-\theta_2)^n} \quad (3)$$

하첨자  $a$ 는 일정단면적(constant area)을 의미한다. 일정단면적을 가진 전류도입선은 고온부의 온도  $T_2$ 를 기준으로 설계된 것이다. 하지만 HTS 전류도입선의 나머지 부분은 도입선이 초전도 상태로 정상작동 중에는 모두 온도가  $T_1 < T < T_2$  이기 때문에 저온부로 갈수록 안전율은 더 커지게 된다. 무차원 체적  $v_a$  그리고 저온부로 유입되는 무차원 열량  $q_a$ 는 다음 식으로 계산된다.

$$v_a = \frac{V}{(LSI/J_{c1})} = \frac{1}{(1-\theta_2)^n} \quad (4)$$

$$q_a = \frac{Q}{[k_o(SI/J_{c1})(T_c - T_1)/L]} = \frac{\lambda}{(1-\theta_2)^n} \frac{d\theta}{d\eta} \Big|_{\eta=0} \quad (5)$$

$k_o$ 는  $T_2$ 에서의 열전도도이고  $\lambda (=k/k_o)$ 는 무차원 열전도도이다.  $\eta$ 는  $x/L$ 로 무차원 길이,  $Q$ 는 저온부로 유입되는 전열량이다. 전류도입선이 전도에 의해서만 냉각된다면(conduction-cooled), 열전도식  $d/dx(kAdT/dx)=0$ 에서 온도 분포는 다음과 같다.

$$\eta = \int_0^\theta \lambda d\theta \Big/ \int_0^{\theta_2} \lambda d\theta \quad (6)$$

Leibniz's rule을 적용하면 저온부로 유입되는 열량은 다음 식으로 계산된다.

$$q_a = \frac{1}{(1-\theta_2)^n} \int_0^{\theta_2} \lambda d\theta \quad (7)$$

저온부로 유입되는 열량은 HTS 재료의 열전도도가 적을수록, 고온부의 온도가 낮을수록 적어짐을 알 수 있다.

## 2.2 단면적 변화를 가진 전류도입선

앞에서 살펴본 바와 같이 일정 단면적을 가진 HTS 전류도입선이 초전도상태를 유지하는 경우 저온부로 갈수록 안전율이 필요 이상으로 커진다. 불필요한 낭비를 제거하기 위하여 Fig. 1과 같이 온도가 낮은 곳의 단면적을 줄여 안전율이 일정한 HTS 전류도입선을 고려하였다. 전류도입선의 단면적을 안전율이 일정하도록 조절하면, 같은 안전율을 가진 일정 단면적 도입선에 비해 적은 재료 사용과 낮은 열손실을 실현할 수 있다. 위치  $x$ 에서의 단면적은 임계전류밀도의 함수가 되고 임계전류밀도는 온도의 함수이므로 결국 단면적은 초전도상태의 온도분포에 따라 결정된다.

전류도입선 주위로의 대류 열전달을 무시하면 무차원화된 열전도식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{d\eta} \left( \lambda a \frac{d\theta}{d\eta} \right) = 0 \quad (8)$$

단면적  $a$ 는 초전도체의 임계전류밀도의 함수이고 임계전류밀도가 온도에 따라 단조 감소한다는 식 (2)을 이용하면 일정안전율을 가지는 단면적은 식 (9)와 같다.

$$a_s = \frac{1}{(1-\theta)^n} \quad (9)$$

이를 식 (8)에 대입하고 정리하면 온도분포  $\theta$ 는 다음과 같다.

$$\int_0^\theta \frac{\lambda}{(1-\theta)^n} d\theta = \eta \int_0^{\theta_2} \frac{\lambda}{(1-\theta)^n} d\theta \quad (10)$$

식 (10)을  $\eta$ 로 미분하면 온도구배를 구할 수 있다.

$$\frac{d\theta}{d\eta} = \frac{(1-\theta)^n}{\lambda} \int_0^{\theta_2} \frac{\lambda}{(1-\theta)^n} d\theta \quad (11)$$

체적  $v_s$ , 열손실  $q_s$ 를 다음 식들로 구할 수 있다. 하첨자  $s$ 는 일정안전율(constant safety factor)을 의미한다.

$$v_s = \int_0^{\theta_2} \frac{\lambda}{(1-\theta)^{2n}} d\theta \Big/ \int_0^{\theta_2} \frac{\lambda}{(1-\theta)^n} d\theta \quad (12)$$

$$q_s = \int_0^{\theta_2} \frac{\lambda}{(1-\theta)^n} d\theta \quad (13)$$

식 (7)과 비교할 때 일정안전율을 가진 도입선에서 저온부로 유입되는 열량은 열전도도 만이 아니라 온도에 따른 임계전류 밀도에도 영향을 받는다.

### 2.3 HTS 도입선의 적분식

HTS 재료의 임계전류밀도는 온도에 따라 비선형적으로 감소한다. 이를 일반화하면  $J_c/J_{c1}=f(\theta)$ ,  $f(0)=1$  과 같이 표시할 수 있다. 식 (10), (12), (13)에서  $(1-\theta)^n$  대신  $f(\theta)$ 를 사용하여 도입선의 온도분포, 부피, 그리고 열손실 계산에 사용된 적분들을 다음과 같이 정리하였다.

$$g_0(\theta) = \int_0^\theta \lambda(\theta) d\theta \quad g_1(\theta) = \int_0^\theta \frac{\lambda(\theta)}{f(\theta)} d\theta \quad (14)$$

$$g_2(\theta) = \int_0^\theta \frac{\lambda(\theta)}{f(\theta)^2} d\theta$$

위 적분 값을 이용하면 이제까지 유도된 온도분포, 열손실, 그리고 도입선의 체적 공식들은 다음과 같이 정리된다. 즉 일정단면적 도입선의 경우는 다음과 같다.

$$g_0(\theta) = \eta g_0(\theta_2) \quad q_a = g_0(\theta_2)/f(\theta_2) \quad (15)$$

$$a_a = v_a = 1/f(\theta_2)$$

일정안전율을 전류도입선의 경우는 다음과 같다.

$$g_1(\theta) = \eta g_1(\theta_2) \quad q_s = g_1(\theta_2) \quad (16)$$

$$a_s = 1/f(\theta) \quad v_s = g_2(\theta_2)/g_1(\theta_2)$$

### 3. 계산결과 및 고찰

초전도체 전류도입선을 일정단면적을 가지는 경우와 단면적을 변화시켜 일정안전율을 가지는 경우를 비교하였다. Bi2223 테이프의 경우 임계전류밀도는 식 (2)에서 지수  $n$ 을 1.4로 볼 수 있다[2]. 지수값  $n$ 이나 함수형태는 재료에 따라 달라질 것이다. 안정체(sheath material)는 Ag-Au 합금을 사용하였을 경우를 기준으로 하였다. 순수 은(Ag)을 안정체로 사용하는 경우는 은의 높은 열전도도로 말미암아 열손실이 크므로 열전도도를 작게하기 위하여 Ag-Au 합금이 이용되고 있다[5]. 순수 은은 100K 이하에서 온도가 낮아질수록 열전도도가 급격히 증가하지만 Au를 첨가함으로써 저온부에서의 열전도도가 낮아진다. Au 첨가비율이 10% 이하에서는 합금의 열전도도 변화가 심하지만 10% 이상에서는 변화가 둔화되는 양상을 보인다. 대략 Au 비율이 1%이상에서 열전도도는 온도 증가에 따라 단조 증가한다. Ag-9at.%Au 합금에 대한 열전도도에 대한 실험식 이 참고문헌[4]에 보고되고 있다.

$$k = 0.00377 - 0.0186 T + 0.000194 T^2 + 0.00951 T^3 \quad (17)$$

위식은 Ag-Au 안정체만의 열전도도이므로 HTS 재료와 복합한 도입선의 열전도도는 안정체 비율을 곱해 주어야 한다. 본 논문에서는 안정체의 비율을 0.75로 보아 계산하였다. 저온부의 온도는 액체헬륨의 온도 4.2 K, 고온부의 온도는 액체질소의 온도인 77 K로 보아 계산하였다.

Fig. 2는 길이방향( $x/L$ )에 따른 전류도입선의 온도 분포를 나타낸 것이다. 식 (6)의하여 구한 일정단면적을 가

지는 전류도입선의 온도분포가 식 (10)에 의하여 구한 일정안전

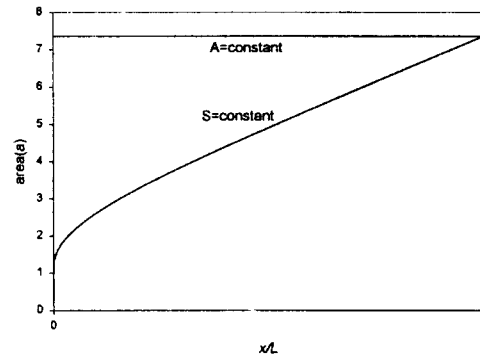
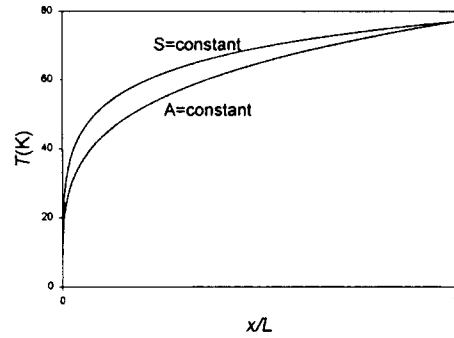


Fig. 2 Temperature profile for constant-area lead(a) and constant-safety-factor lead(s).  
Fig. 3 Variation of Cross-sectional area with  $x/L$ .

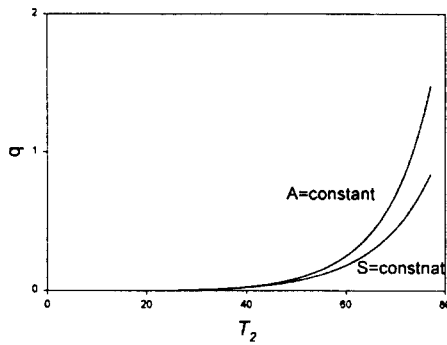
을 가지는 경우에 비해 전구간에서 낮게 분포됨을 알 수 있다. 이는 단면적이 일정한 경우가 일정안전율을 가지는 경우에 비해 단면적이 크므로 전도냉각이 잘 이루어지기 때문이다.

Fig. 3은 길이방향( $x/L$ )에 따른 단면적 변화를 나타낸 것이다. 일정단면적을 가지는 경우와 일정안전율을 가지는 경우의 단면적을 식 (3)과 (9)를 이용하여 구할 수 있다. 일정단면적을 가지는 경우의 무차원단면적은  $a_a = 7.374$ 로서 일정하다. 일정안전율을 가지는 전류도입선의 단면적은 고온단( $x/L=1$ )에서 일정단면적 도입선의 단면적과 동일하고 저온부로 갈수록 작아진다. 식 (10)에 의하여 구한 온도분포를  $1/(1-\theta)^n$ 에 대입하면 일정안전율 도입선의 단면적 분포를 구할 수 있다.

Fig. 4는 일정단면적 도입선의 저온부 유입 열량  $q_a$ 와 일정안전율을 가지는 경우의 유입열량  $q_s$ 를 고온부의 온도  $T_2$ 의 함수로서 계산한 결과를 나타낸 것이다. 각 도입선의 온도 분포를 식 (7)과 (13)에 각각 대입하여 적분을 수행하였다. 고온단의 온도가 77K인 경우 일정단면적 도입선의 열유입은 1.48이고, 일정안전율 도입선에서는 0.84가 된다. 일정단면적 도입선의 최소 안전율과 동일한 안전율을 가진 일정안전율 도입선은 저온부로의 열유입을 43% 줄일 수 있다.

Fig. 4에서 보이듯이 고온단의 온도  $T_2$ 가 커짐에 따라 양 설계의 열유입 차이는 급격히 커지는 것을 알 수 있다. 즉 고온부의 온도가 임계온도에 가까워지면 일정안전율을 가진 도입선이 일정 단면적을 가진 도입선에 비하여 훨씬 적은 열손실을 가짐을 알 수 있다. 그 이

유는 임계온도에 가까울수록 임계전류밀도가 작아지므로 고온부의 단면적이 상대적으로 커져야 하고 이 단면



적이며 Fig. 4 Heat dissipation for constant-area lead constant safety factor lead.

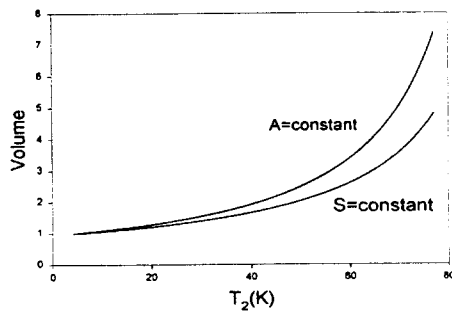


Fig. 5 Volume changes with  $T_2$  between constant and variable area leads.

저온부까지 이어질 때 전도되는 열량이 많기 때문이다. 하지만 일정 안전율을 가지는 도입선은 비록 고온부의 면적이 클지라도 저온부로 갈수록 단면적이 작아지기 때문에 그만큼 열유입을 차단할 수 있다.

Fig. 5는 고온단의 온도  $T_2$ 의 변화에 따른 체적변화를 일정안전율과 일정단면적인 경우에 대하여 도시한 것이다. 이는 식 (4)와 (12)를 이용하여 구할 수 있다. 저온단의 온도와 고온단의 온도차이가 증가함에 따라 체적차이가 커짐을 알 수 있다. 그 이유는 양단의 온도 차이가 클수록 해당온도의 임계전류밀도 차이가 커지고 이에 따라 일정안전율 도입선의 단면적이 저온부로 갈수록 적어지기 때문이다.

고온부의 온도가 액체질소의 온도 77K일 경우 일정단면적 도입선의 무차원 체적은 7.37이고, 일정안전율 도입선은 4.82가 된다. 일정단면적 도입선의 최소 안전율과 동일한 안전율을 가진 일정안전율 도입선은 전체 체적을 34.6% 줄일 수 있다.

이상의 해석은 일정단면적 도입선의 최소 안전율과 일정안전율 도입선의 안전율이 동일한 경우에 대한 저온부로의 열유입과 체적의 비교이다. 만일 동일한 체적의 조건이라면 고온단에서 일정안전율 도입선의 단면적이 일정단면적 도입선의 단면적보다 커지고 이에 따라 일정단면적 도입선의 최소 안전율보다 일정안전율 도입선의 안전율이 커진다. 본 해석에서 사용한 재료에 대해서 계산한 결과 안전율이 2.2배 커짐을 확인할 수 있었다.

본 해석의 목적은 일정안전율을 가진 HTS 도입선이 일

정 단면적을 가진 HTS 도입선에 비하여 보다 적은 열손실을 가지고 또한 재료절감도 기대할 수 있음을 보이고자 하는 것이다. 이러한 해석은 HTS 도입선이 초전도 상태를 유지한다는 가정 하에서 유용하다. 초전도체 전류도입선이 외부 또는 내부 교란에 의하여 부분적으로 상전도 상태로 변할 때 소손(burn-out)과 회복(recovery)을 판정할 수 있어야 한다. 본 논문에서 제시한 최적 형상의 HTS 도입선에 대해서도 교란 에너지의 양과 형태에 따른 소손/회복 해석이 있어야 할 것이다.

또한 본 해석에서 구한 이론적 단면 분포는 곡선 형태이므로 실제 가공에 있어 어려움이 따른다. 테이퍼 또는 다단 형태의 제작이 고려될 수 있다. 본 해석은 가장 최적의 단면 형태를 제시하므로 비교 분석에 유용할 것이다.

#### 4. 결 론

초전도체 전류도입선에 대하여 저온부로 유입되는 열량과 도입선의 체적을 일정단면적을 가진 경우와 일정안전율을 가진 경우에 대하여 해석하였다. 도입선의 각 위치에서 임계전류와 작동전류가 일정비율이 되도록 단면적을 변화시킨다면 일정단면적 도입선에 비하여 저온부로 유입되는 열량을 줄일 수 있고, 사용하는 초전도체 재료의 양을 절감할 수 있다. 유도된 적분식을 사용하여 Bi2223와 Ag-9at.%Au 합금으로 이루어진 HTS 도입선에 대한 해석을 수행하였다. 전도냉각만을 고려하여 일정안전율을 가진 도입선의 온도분포를 구하고 전류도입선의 단면적 변화를 구하였다. 일정안전율을 갖도록 단면적을 변화시킴으로써 일정단면적 도입선에 비하여 저온부로의 열유입은 43.16% 줄일 수 있었고 사용한 재료의 양도 34.6% 줄일 수 있다. 동일체적으로 제작하였을 경우, 일정안전율 도입선이 일정단면적 도입선에 비하여 안전율이 약 2.2배 향상된다.

#### (참 고 문 헌)

- (1) Yu. L. Buyanov, "Current leads for use in cryogenic devices. Principle of design and formulae for design calculation," *Cryogenics*, Vol. 25, pp. 94-110, 1985.
- (2) S.Y. Seol, J.R. Hull, and M.C. Chyu, "Optimization of High-Temperature Superconductor Current Leads," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 5, No. 2, pp. 785-788, 1995.
- (3) 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. Technol.*, Vol. 12, pp. 181-183, 1999.
- (4) 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*, Vol. 37, pp. 409-415, 1997.
- (5) Hiroyuki Fujishiro, Manabu Ikebe, Koshichi Noto and Michiaki Matsukawa, "Low Thermal Conductive Bi-2223 Tapes Sheathed with Ag-Au Alloyes," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 30, pp. 1645-1650, 1994.