

자연대류를 고려한 초전도 전류도입선의 최적 설계

손봉준, 설승윤

전남대학교 대학원, 전남대학교 기계·시스템공학부

Optimal design of HTS current lead considering natural convection

Bong Jun Son, Seoung Yun Seol

Graduate school Chon-nam National University, Department of mechanical and system engineering Chon-nam National University

kgenine@korea.com

Abstract - In this paper, the HTS current lead for superconducting device is studied numerical method. The current lead is cooled by surrounded He gas by natural convection. To find wall heat flux, the linearization method is adopted. Numerical results using natural convection cooling are compared with conventional cooling methods such as conduction cooling and vapor cooling. The results shows that the minimum heat dissipation is much smaller than conduction cooling. Also, the minimum heat dissipation is obtained for the non-zero gradient of temperature at warm end. HTS current lead operating current sharing mode is reduce heat flow to superconducting system.

1. 서 론

초전도 기기를 운용하는 대부분의 비용은 전류도입선에 의해 초전도 시스템으로 유입되는 열량에 의해 발생된다. 이에 따라 초전도 전류도입선을 이용하여 열유입을 최소화 하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.[1] 한편, 초전도 시스템의 냉각 방법은 통상 전도 냉각과 가스냉각으로 구별 할 수 있고, 최근에는 헬륨 가스를 강제로 전류도입선 주위로 공급시켜 냉각시키는 강제대류 냉각 방식에 대한 연구 결과도 보고되고 있다.[2] 전도냉각은 냉동기의 소요 동력이 큰 단점이 있고, 가스냉각은 냉매로 사용되는 헬륨가스의 지속적인 보충이 필요하여 운용비용이 증가하는 단점이 있다. 이러한 단점들을 보완하기 위해 저온 용기의 내부를 액체 헬륨의 포화압력 이하로 유지시켜 저온 기체의 자연대류 효과를 이용하여 냉각시키는 자연대류 냉각 방법이 제안되었다. 이러한 자연대류 냉각방법을 이용하면

액체의 사용량 감소로 인한 경제적 효과와 전도 냉각에 비해 냉동기의 소요 동력이 줄어드는 효과가 있을 것으로 생각된다. 그러나 기존의 연구들은 모두 가스냉각이나 전도냉각에 한하여 수행되었다. 따라서 본 연구에서는 자연대류 냉각을 이용한 초전도 전류도입선의 해석을 수행하고, 이를 전도 냉각이나 가스 냉각 방식과 비교하여 자연대류 냉각의 효율성을 고찰하고자 한다. 또한 최근의 연구에서는 초전도 전류도입선이 일부 전류분류 상태에서 최소 열손실을 갖는다고 보고되고 있다.[3] 이에 따라 전류분류에 따른 자연대류 냉각의 효과를 살펴보고자 한다.

2. 본 론

2.1 해석모델 및 지배방정식

Fig.1은 본 연구에 사용된 해석 모델을 보여주고 있다.

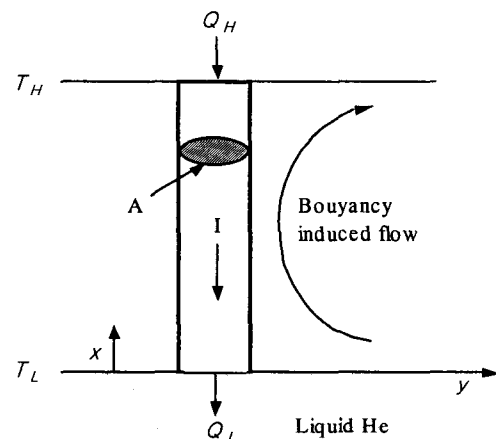


Fig.1 Schematic of analysis model

전류도입선의 하부는 냉동기에 의해 일정한 온도(4.2K)로 유지되는 액체 헬륨에 잠겨 있다. 전류도입선의 상단부는 65(K)로 고정된다고 가

정하였다. 저온 용기의 내부는 액체의 포화압력보다 낮아 헬륨가스로 가득 차있고, 전류가 흐르면 헬륨가스와 전류 도입선의 온도차에 의해 부력에 의한 유동이 생기게된다.

초전도 전류도입선의 안전율은 임계전류와 작동전류의 비를 나타내며 식(1)과 같이 정의된다.

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

초전도체에서 점적율(λ)이 일정하다면 안전율(S)는 단면적(A)과 작동전류(I)의 함수이고, 고온부에서의 상단안전율(S_H)을 이용하면 식(2)와 같이 표현된다.

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

식(2)에서 J_c 는 임계전류 밀도를 나타낸다. 만일 상단 안전율이 1보다 작다면 전류 도입선이 일부에 전류 분류 상태가 존재하여 전류분류 온도(T_{cs})보다 높은 부분에서는 줄열이 발생하게 된다. 전류분류 온도는 식(1)의 안전율을 1로 두어 식(3)과 같이 정의된다.

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

전류분류 온도와 안전율 사이의 관계는 식(4)와 같다.

$$S_I = \frac{J_c(T_I)}{J_c(T_{cs})} \quad (4)$$

전류 도입선 내부의 온도는 반경방향과 원주방향의 온도 구배(gradient)가 축 방향에 비해 매우 작으므로 1차원 열전도 문제로 간주하였다. 전류 도입선 전체의 열전도도는 세라믹 재료의 고온초전도체의 열전도도가 금속인 안정체에 비해 매우 적으므로 $k \approx (1-\lambda)k_n$ 로 근사하였다. 여기서 k_n 은 안정체의 열전도 계수이며, 이를 적용한 일차원 열전도 방정식은 식(5)와 같다.

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

식(5)에서 $g(T)$ 는 초전도 도입선의 전류 분류를 나타내는 함수로서 식(6)과 같고, $q_w(x)$ 는 자연대류에 의해 빠져나가는 열유속(heat flux)을 나타내고 있다.

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

한편, 저온 용기내의 헬륨가스에 대한 지배 방정

식은 2차원 정상상태, 층류 유동이라고 가정하고, 운동량 방정식의 밀도를 제외한 모든 물성치가 상수라는 Boussinesq approximation을 적용하면 식(7)~(9)과 같고 이때의 경계조건은 식(10)와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + g\beta T \quad (8)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (9)$$

식(8)과 (9)의 T 는 헬륨가스와 전류 도입선의 온도 차이로 정의된다.

$$\begin{cases} y=0 & u=v=0, T=T_w(x) \\ y \rightarrow \infty & u \rightarrow 0, T \rightarrow 0 \\ x=0 & u=0, T=0 \end{cases} \quad (10)$$

2.2 선형화 방법

식(5)에서 전류도입선의 온도분포를 구하기 위해서는 식(7)~(9)의 해를 구하여 도입선 표면의 열유속 $q_w(x)$ 를 구하여야한다. 그러나 식(8)과 (9)는 서로 결합(coupled)되어 동시에 풀어야 하므로 어려움이 있다. 벽면에서의 열유속을 구하는 가장 간단한 방법은 평균온도를 구하여 취한 Nu를 구하여 열전달 계수를 구하는 것이다. 그러나 본 연구에서는 반복적인 방법으로 온도 분포가 구해지고, 과도한 전류가 흐르는 경우에는 전류도입선의 온도가 고온단의 온도보다 높게되는 부분이 존재하므로 평균온도를 통한 열전달계수의 정의는 합리적이지 못하다. 따라서, 본 연구에서는 벽면의 온도가 임의의 분포를 가지는 경우에 유효속도(effective velocity)의 정의를 통해 식(8)과 (9)의 대류항을 선형화 시켜 자연대류 열전달을 근사 시키는 S. Lee와 M. M. Yovanovich의 선형화 방법을 이용하여 유체영역의 온도와 속도 분포를 구하였다.[4] 이때의 벽면의 열유속은 온도 분포에 Fourier의 열전도 법칙을 적용시키면 식(11)과 같이 나타나고, 상수 C의 값은 식(12)와 같다.

$$q_w = C \frac{k}{x} Gr^{1/4} \sum_{i=0}^x \Delta T_w \left[1 - \left(\frac{x_i}{x} \right)^{9/8} \right]^{-(1/3+1/8)} \quad (11)$$

$$C = \frac{0.503 Pr^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (12)$$

2.3 수치해석

본 연구는 고온초전도체로 이루어진 전류도입선을 일차원 FDM을 이용하여 해석하였다. Fig.2는 해석에 사용된 i 번째 격자의 에너지 평형을 나타내고 있으며 이때의 이산화 방정식은 식(13)과 같이 나타낼 수 있다. 이때 상첨자 n 은 계산 단계를 하첨자는 격자의 번호를 나타낸다.

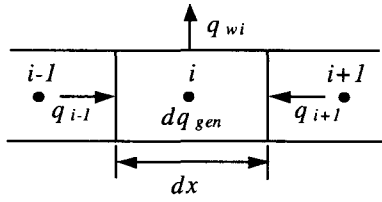


Fig.2 Schematic of i th grid

$$\begin{aligned}
 & k(T_{i-1}^n)A \frac{T_{i-1}^n - T_i^n}{dx} \\
 & + k(T_{i+1}^{n-1})A \frac{T_{i+1}^{n-1} - T_i^n}{dx} \\
 & + g_i^n \frac{B}{k(T_i^n)} T_i^n \frac{I^2}{A} dx - q_{wi}^{n-1} P dx = 0
 \end{aligned} \quad (13)$$

일반적으로 유체와 고체의 경계면에서의 열전달 문제는 유체영역의 대류 열전달 문제와 고체영역의 확산방정식을 반복적인 방법으로 풀어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 먼저 전류 도입선의 온도 분포를 가정하고, 선형화 기법을 적용하여 가정된 온도분포를 가진 전류 도입선 표면에서의 열유속을 계산하고, 이를 다시 일차원 열평형 방정식의 경계조건으로 대입하여 전류 도입선의 온도를 구하는 반복적 방법을 사용하였다. 이 과정에 사용된 열평형 방정식은 식(12)와 같이 표현되는 Gauss-siedel iteration method를 이용하였으며 전 단계와의 오차의 총합이 수렴 조건인 $1e-5$ 이하가 되었을 때 계산을 종료하였다. 한편 초전도 도입선의 열전도계수는 온도에 따라 비선형 분포를 보인다. 이러한 비선형문제의 경우에는 수렴조건과 격자의 크기가 격자의존성(grid dependence)을 보이는데 본 해석에서는 격자수에 따른 해석결과들 사이의 오차를 계산하여 오차의 총합이 0.01%이하가 되는 200개의 격자를 사용하였다. 또한 초전도 도입선의 열전도 계수는 저온 영역에서 차이가 미미하여 균등한 크기의 격자를 사용하면 격자의존성이 더욱 커지게 된다. 따라서 본 연구에서는 공비가 1.05인 등비수열을 이용하여 생성된 격자를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구의 해석 대상은 Bi-2223와 Ag-Au 합금의 복합 고온초전도 전류도입선이다. Bi-2223의 임계전류밀도는 제로 필드에서 측정한 데이터를 커브 피팅한 공식을 사용하였다.[5]

$$J_c(T) = 352.4 \times 10^6 (1 - T/107.1)^{1.58} \quad (14)$$

Ag-Au합금의 열전도도는 식(15)을 사용하였다.[6]

$$\begin{aligned}
 k(T) = & 0.00377 - 0.0186T \\
 & + 0.000194 T^2 + 0.00951 T^3 \quad (W/mK) \quad (15)
 \end{aligned}$$

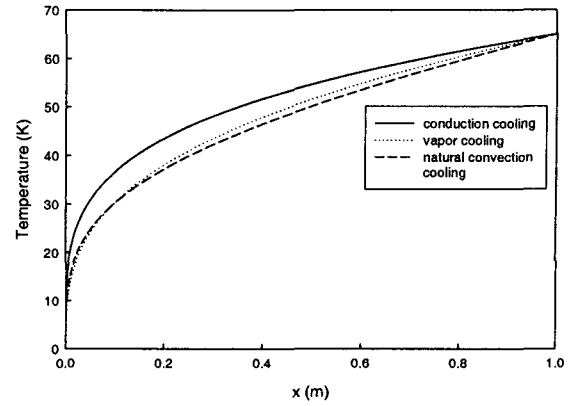


Fig.3 Temperature profile with various cooling method for $L=1m$, $\lambda=0.25$

Fig.3은 길이가 1m, 점적율이 0.25, 직경이 0.02m이고 안전율이 1보다 커서 전류분류에 의한 열발생이 없는 경우에 냉각 방식별 온도 분포를 보여주고 있다. 온도 분포를 살펴보면 전도 냉각의 경우 전체적으로 높은 온도 분포를 보임을 알 수 있다. 자연대류 냉각과 가스냉각을 비교해보면 전류도입선의 하부에서 온도의 역전현상이 일어남을 알 수 있다. 그 이유로는 초전도 도입선의 열전전도는 온도가 낮을수록 매우 작아지는 비선형 분포를 보이기 때문에 가스냉각과 큰 차이가 발생하지 않기 때문이다. 또한 안전율이 1보다 커서 열발생이 없으므로 도입선이 하부에서는 열전달 효과가 크지 않다. Fig.3과 같은 온도분포를 가지는 경우에 단위 전류당 하부로의 열유입량은 Table 1과 같다. 자연대류 냉각의 경우와 가스냉각의 경우 온도분포의 차이는 크지 않지만 하부의 열 유입량(Q_L/I)은 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 또한 자연대류 냉각을 이용하면 전도 냉각에 비해 열손실을 약 61.9% 줄일 수 있다.

Table 1 Cooling method and Q_L/I

냉각 방식	Q_L/I (mW/A)
전도 냉각	6.3154
가스 냉각	0.1296
자연대류 냉각	2.406

따라서, 자연대류 냉각 방식을 이용하면 냉동기의 소요동력 감소에 효과가 있을 것이다.

자연대류 냉각을 이용한 초전도 도입선의 최적 설계를 위해 Fig.3과 같은 조건에서 안전율의 변화에 따른 Q_L/I 와 Q_H/I 의 변화를 Fig.4에 나타내었다. 안전율이 1인 경우 Q_L/I 와 Q_H/I 가 일치하지 않는 이유는 도입선 표면의 열유속 때문이라 생각된다. Fig.4에서는 안전율에 따라 Q_L/I 의 최소값이 존재함을 알 수 있는데, 최 안전율이 상부의 열유입이 제로가 되는 경우 보적 Q_L/I 의 값은 2.0722로서 안전율이 1인 경우와 비교하

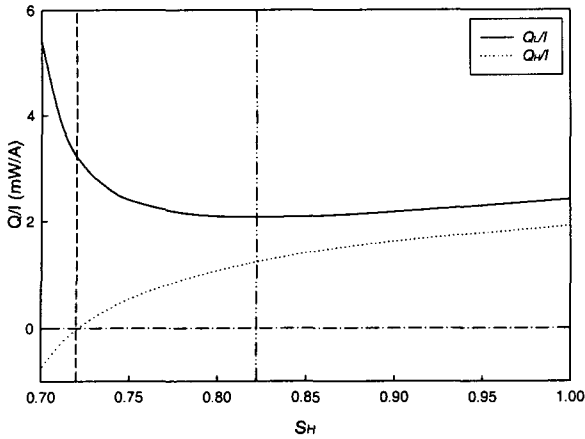


Fig.4 Q_L/I , Q_H/I as a function of S_H

여 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이때의 최적 안전율의 값은 0.822이다. 상부의 열유입이 없는 상태의 안전율은 0.72이고 이때의 Q_L/I 값은 3.2216

이며, 최적 상태에 비해 약 55%정도 증가함을 알 수 있다. 따라서 자연대류 냉각의 경우도 전도 냉각의 연구결과[3]에서와 같이 일부 영역을 전류분류 상태로 만듦으로써 열손실을 줄일 수 있음이 확인되었다.

Fig.5는 안전율에 따른 전류 도입선의 온도 분포를 보여주고 있다.

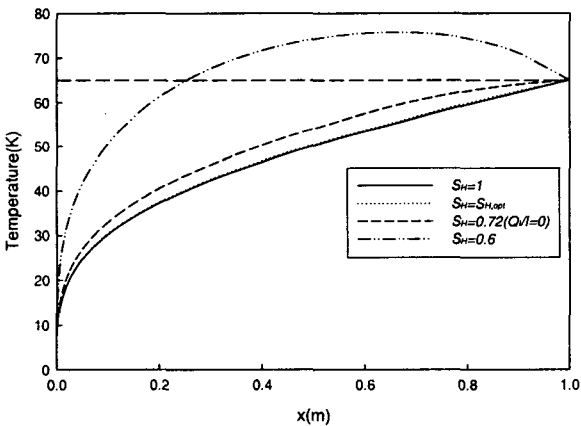


Fig.5 Temperature profile of HTS current lead for different safety factor

다 큰 0.6의 경우에는 온도 구배가 음의 값을 지니는 부분이 존재하며, 이 경우 전류 도입선의 상단으로 열이 빠져나가며 이는 이중 전류 도입선의 경우에 중간 냉각단계의 냉동기의 요구 동력을 증가시킨다.

Fig.6은 전류 도입선의 길이에 따른 최소 열 손실과 그에 따른 최적 안전율의 값을 보여 주고 있다. 전류 도입선의 길이가 0.5m일 때를 살펴보면 Q_L/I 의 최적값은 안전율이 1인 경우에 비해 약 20.43% 감소함을 알 수 있다. 또한, 길이가

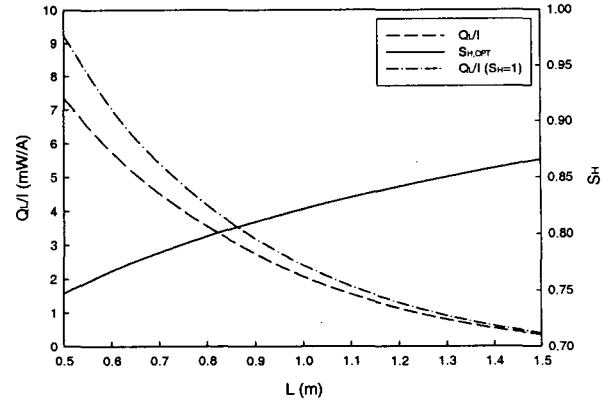


Fig.6 Q_L/I , and optimum safety factor as a function of L for $\lambda=0.25$

감소함에 따라 최적 안전율의 값은 감소하고, Q_L/I 의 값은 증가한다. 길이가 0.5m에서 1.5m까지 증가할 때 안전율의 증가는 9.91%에 불과하지만 Q_L/I 의 감소는 약 95.3%로 매우 큰 값을 가진다. 그러나 전류도입선의 길이가 증가하면 전도에 의한 열유입은 감소하나 길이의 증가에 따른 줄열의 발생이 커지므로 길이의 증가에는 한계가 있다. 도입선 전체가 초전도 상태인 경우의 Q_L/I 값과 최적 안전율일 때의 Q_L/I 값은 길이의 증가에 따라 감소하여 1.5m인 경우에는 약 4.6%의 감소만을 나타낸다.

3. 결 론

초전도 전류 도입선에 자연대류 냉각을 적용하여 해석한 결과는 다음과 같다. 초전도 도입선을 자연대류를 이용하여 냉각하면 전도 냉각에 비해 하부의 열유입량을 줄일 수 있다. 또한, 자연 대류 냉각 방식을 적용한 초전도 도입선은 전도 냉각의 경우와 마찬가지로 일부 전류분류 영역이 존재할 때 열손실이 최소가 되는 최적 안전율이 존재하고, 최소 열손실은 안전율이 1인 경우와 큰 차이가 없다.

(참 고 문 헌)

- [1] R.Heller, G.Friesinger, W.Golddacker, et. al, "Development Program of a 60kA Current Lead Using High Temperature Superconductors" IEEE transaction on applied superconductivity, Vol 7, No. 2, 1997
- [2] R.Heller, S.Fink, et al. "Development of forced convection cooled current leads for fusion magnet", Cryogenics, Vol. 41, No.3, pp.201-211, 2001

- [3] 설승윤, 허광수, "일부 전류 분류 영역을 가짐으로서 최소 열손실을 갖는 초전도 전류입선",
- [4] S.Lee, M.M.Yovanovich, "Linearization Method for Buoyancy Induced Flow over a Nonisothermal Vertical Plate", *Journal of Thermophysics and Heat transfer*, Vol. 7, No. 1, Jan-March 1993
- [5] B.Zeimertz, H.K.Liu, 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