

6.6kV-200A급 초전도 한류기 DC Reactor용 전류도입선의 비정상상태 해석

김형진, 권기범*, 정은수**, 장호명**
홍익대학교 부설 과학기술연구소, 홍익대학교 대학원*, 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과**

Unsteady-state analysis of current lead for DC Reactor of 6.6kV-200A superconductor current limiter

H.J. Kim, K.B. Kwon, E.S. Jeong, H.M. Chang
Research Institute for Science & Technology in Hong-ik University, Graduate
school Hong-ik University*, Department of mechanical and system design
engineering Hong-ik University**

esjeong@wow.hongik.ac.kr

Abstract - Temperature distribution and cooling load in binary current lead are analyzed, occurring fault current at DC Reactor type superconductor fault current limiter. It is assumed that Normal operating current is 300 A and fault current is 3000 A. Unsteady-state temperature distribution and cooling load of brass current lead optimized for 300 A and 1000 A are calculated by numerical method with TDMA. In the result of calculation, temperature increase in the brass current lead optimized for 300 A is higher than that in the brass current lead optimized for 1000 A, but the temperature increase in the brass current lead optimized for 300 A is not serious. Moreover, increase of cooling load in the brass current lead optimized for 300 A is higher than that in the brass current lead optimized for 1000 A, but normal cooling load in the brass current lead optimized for 300 A is lower than that in the brass current lead optimized for 1000 A. Therefore, designing current lead in superconductor fault current limiter had better to optimize for normal operating current.

1. 서 론

초전도시스템의 전류도입선에 있어서 상온으로부터 극저온 상태의 초전도체로 유입되는 열부하를 최소한으로 줄이면서 효율적으로 전류를 공급하는 것은 가장 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 많은 연구를 통해서 온도와 전류에 따른 최적화된 형상의 전류도입선의 설계방법이 제시되어 왔다.[1-2] DC Reactor형 초전도한류기에 사용하는 전류도입선의 경우, 평상시 운전 전류와 사고시 운전 전류의 값이 큰 차이를 나타낸다. 일반적으로 전류도입선의 설계는 일정한 온도와

전류에 대하여 최적 설계되기 때문에, 사고전류와 설계전류의 차이가 클 경우, 평상시 운전전류에 최적화된 전류도입선을 통한 냉각부하가 크게 증가한다. 그러므로 사고전류로 인한 발열로부터 전류도입선과 초전도체를 보호하고, 열유입을 최소화하기 위한 설계가 필요하다.

본 연구에서는 그림 1.과 같이 1단과 2단이 각각 80 K과 20 K으로 운전되는 2단형 극저온 냉동기를 이용하여 중간냉각하는 금속과 고온초전도체로 이루어진 이중전류도입선을 모델로, 평상시 운전 전류와 사고시 운전 전류에 따른 최적설계된 전류도입선의 정상상태 온도분포와 냉각부하를 해석하고, 사고전류가 발생할 때의 전류도입선의 비정상상태 온도분포 및 냉각부하를 해석한다.

2. 본 론

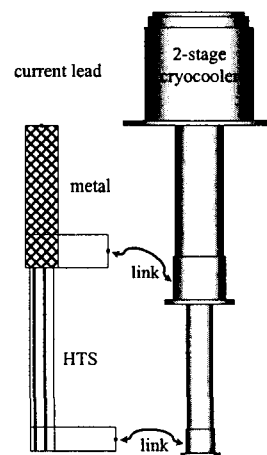


Fig. 1. Schematic of binary current lead and 2-stage cryocooler

2.1 전류도입선의 최적화

이중전류도입선의 금속부와 초전도체의 접합부

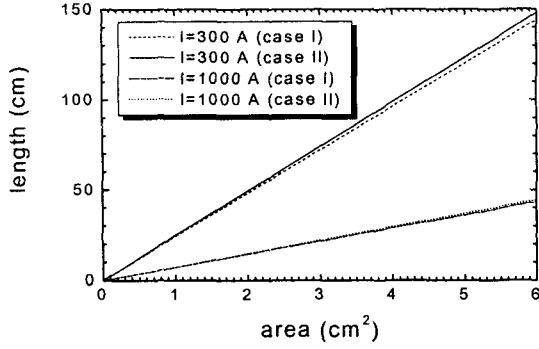


Fig. 2. length-cross section area optimal ratio of metal current lead (brass)

은 극저온 냉동기의 1단에 의하여 중간냉각되고, 초전도체의 하단은 냉동기 2단에 의하여 냉각된다. 전류도입선의 금속부의 경우 중간냉각부하를 최소로 할 수 있는 길이와 단면적의 비가 존재하는데, 최소열유입량과 길이와 단면적의 최적비는 다음과 같다.[1-2]

$$(Q_2)_{\min} = \sqrt{2 \int_{T_I}^{T_H} \rho(T) \cdot k(T) dT} \quad (1)$$

$$\left(\frac{L_2}{A_2}\right)_{\text{opt}} = \int_{T_I}^{T_H} \frac{k}{\sqrt{2 \int_T^{T_H} \rho(\tau) \cdot k(\tau) d\tau}} dT \quad (2)$$

여기서 k 는 금속의 열전도도, ρ 는 전기적인 비저항, I 는 전류, 그리고 A 는 단면적이다.

T_H 와 T_I 는 상온과 중간냉각온도를 나타낸다.

식 (1)에서 최소중간냉각부하를 구하는 것은 큰 어려움이 없으나, 식 (2)를 수치적으로 적분할 경우에는 큰 오차가 발생할 수 있다. 왜냐하면, $T \rightarrow T_H$ 로 접근할 경우 적분 안의 분모가 0으로 가기 때문이다. 이러한 오차를 피하기 위하여 다음 식과 같이 수치적분을 하였다.

$$\left(\frac{L_2}{A_2}\right)_{\text{opt}} = \left[\int_{T_I}^{T_H} \frac{k}{\sqrt{2 \int_T^{T_H} \rho(\tau) \cdot k(\tau) d\tau}} dT + \frac{k_I}{N L_0} \left\{ \frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left(\frac{T_I}{T_H} \right) \right\} \right] \quad (3)$$

즉, T_I 부터 T_H 와 근접한 T_I 까지는 수치적분을 하고, T_I 에서 T_H 까지는 Wiedemann-Franz 법칙을 적용하여 해석적으로 적분하였다.[3] T_I 는 T_H 와 매우 근접하므로 T_I 에서 T_H 까지의 온도범위에서 열전도도 k 는 일정하다고 가정한다.

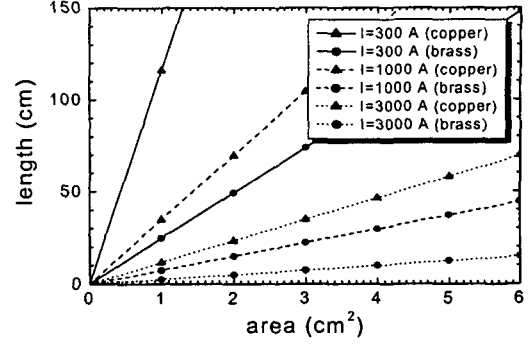


Fig. 3. length-cross section area optimal ratio of metal current lead as function of current

그림 2.은 $T_H=300K$, $T_I=80K$ 일 때 금속부로 황동을 사용한 전류도입선의 길이와 단면적의 최적형상을 나타낸다. case I은 299.999K까지 수치적분한 결과이고, case II는 식 (3)을 이용하여 얻은 결과이다.

그림 3.은 전류에 따른 구리와 황동을 이용한 전류도입선의 길이-단면적의 최적비로써 같은 단면적에서 구리 전류도입선이 황동 전류도입선보다 길이가 길어지는 것을 알 수 있다. 또한 그림 4.에서는 구리, 황동 전류도입선의 최소냉각부하를 나타내고 있으며, 같은 전류에서 구리 전류도입선의 최소냉각부하는 황동 전류도입선의 최소냉각부하 보다 더 높은 것을 알 수 있다. 구리와 황동에서 길이-단면적의 최적비와 최소냉각부하를 고려하였을 때, 황동을 전류도입선의 재료로 사용하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

2.2 전류에 따른 전류도입선의 온도분포 및 냉동부하 해석

6.6kV-200A급 한류기용 DC reactor의 경우 정상 운전전류는 300 A 이나, 사고전류가 발생할 경우에는 1000 A에서 3000 A의 전류가 10 ms에서 50 ms에 이르는 짧은 시간 동안 흐른다. 식 (2)에서 볼 수 있는 바와 같이 전류도입선의

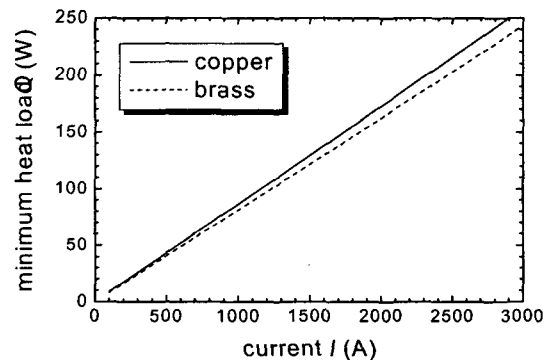


Fig. 4. minimum cooling load of current lead (a pair)

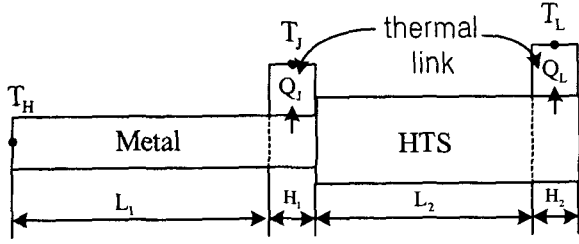


Fig. 5. binary current lead

금속부의 길이와 단면적의 최적비는 전류 I 에 반비례한다. 금속부의 길이를 고정시켰을 경우 300 A로 최적화한 금속부의 단면적은 1000 A로 최적화한 단면적 보다 작다. 따라서, 금속부를 300 A로 최적화하면 1000 A로 최적화한 경우보다 전도에 의한 열유입이 작아지므로 정상상태의 중간냉각부하가 작아지는 장점이 있으나, 전기적인 저항이 크기 때문에 3000 A의 전류가 흐를 경우 온도가 과도하게 상승할 수 있다. 금속부의 단면적을 1000 A로 최적화하면 사고시에 발생하는 열이 크지는 않지만, 정상상태에서는 전도에 의한 열유입이 커지므로 중간냉각부하가 커진다.

그림 5.는 thermal link가 금속부와 초전도체의 하단에 각각 접합된 이중전류도입선을 나타낸다. T_H 는 상온이고, T_J 와 T_L 은 각각 극저온 냉동기의 1단과 2단의 온도이다. 전류도입선의 온도에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\rho^* C_p A \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(kA \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\rho I^2}{A} - q' \quad (4)$$

여기서 ρ^* 와 C_p 는 각각 밀도와 비열을 나타낸다. q' 은 thermal link를 통하여 냉동기로 전달되는 단위길이당 열전달율을 의미하는데, thermal link와 접촉하지 않는 부분에서는 0이다. 중간냉각용 thermal link와 접촉하는 금속부에 대하여 $q' = (T - T_J)/R_{th}$ 로 표현할 수 있는데, 여기서 R_{th} 은 thermal link의 단위길이당 열저항이다.

식 (4)을 그림 6.의 검사체적에 대하여 이산화하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} a_P T_P &= f a_E T_E + f a_W T_W \\ &+ [a_P^0 - (1-f)(a_E + a_W) + (1-f)S_P \Delta z] T_P^0 \\ &+ (1-f)(a_E T_E^0 + a_W T_W^0) + S_C \Delta z^0 \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서

$$a_E = \frac{(kA)_e}{(\delta z)_e} \quad (6)$$

$$a_W = \frac{(kA)_w}{(\delta z)_w} \quad (7)$$

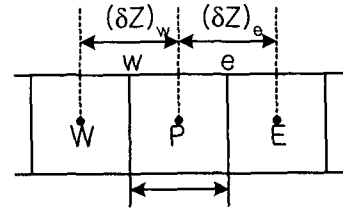


Fig. 6. control volume

$$a_P^0 = \rho^* C_p A \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (8)$$

$$a_P = a_P^0 + f(a_E + a_W) - f S_P \Delta z \quad (9)$$

$$S_P = -\frac{1}{R_{th}} \quad (10)$$

$$S_C = \frac{\rho I^2}{A} + \frac{T_L}{R_{th}} \quad (11)$$

이다. T_P^0 는 시간 $t = t_0$ 일 때의 온도이고, T_P 는 $t = t_0 + \Delta t$ 일 때의 온도이다. 전류도입선을 여러 개의 검사체적으로 나누고, 각 검사체적에 식 (5)를 적용하여 비정상상태의 온도를 구한다. 수치해는 TDMA (Tri-Diagonal-Matrix Algorithm)을 적용하여 구한다.

2.3 해석 결과

비정상상태의 해를 구하기 위해서는 초기조건으로 정상상태의 온도분포가 필요하다. $f=1$ 이고 $a_P^0=0$ 으로 놓으면 식 (5)는 정상상태의 온도를 구할 수 있는 대수방정식이 된다. 정상상태의 해도 TDMA를 사용하여 구하였는데, 열전도도와 비저항이 온도의 함수이므로 새로 얻은 온도에서 열전도도와 비저항을 구하여 온도를 새로 계산하고, 온도의 변화가 없을 때까지 반복한다.

그림 7.과 8.은 300 A와 1000 A로 최적설계된 이중전류도입선에 전류가 300 A의 정상상태로 흐르다가 각각 $t=0$ 에서 50 ms와 100 ms 동안 3000 A가 흐르고 다시 300 A가 흐를 때의 온도분포의 변화를 보여준다. 300 A로 최적설계된 경우에는 상온 부근에서 온도가 사고지속 시간이 50 ms일 때는 약 2 K, 100 ms일 때는 약 5 K 상승하다가 다시 원래의 온도분포로 돌아가는 것을 볼 수 있으나, 1000 A로 최적설계된 전류도입선의 경우에는 온도변화가 거의 없는 것을 볼 수 있다. 이것은 300 A로 최적설계된 전류도입선의 단면적이 1000 A로 최적설계된 전류도입선의 단면적보다 작기 때문에 전기적인 저항에 의한 열발생이 크기 때문으로 생각된다. 한편, 고온 초전도체 전류도입선 부분에서의 온도분포는 300 A로 최적설계된 전류도입선보다 1000 A로 최적설계된 전류도입선이 3-4 K정도 높게 나타나는 데, 이것은 금속 전류도입선을 통해 들어오는 열전달율이 크기 때문이다.

그림 9.는 각각 300 A와 1000 A로 최적설계

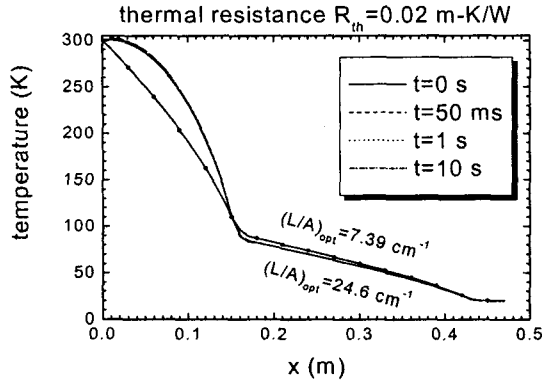


Fig. 7. variation of current lead (3000 A)

된 이중전류도입선에 전류가 300 A의 정상상태로 흐르다가 $t=0$ 에서 50 ms와 100 ms 동안 3000 A가 흐르고 다시 300 A가 흐를 때 중간냉각용 thermal link를 통하여 냉동기 1단으로 전달되는 열전달율을 나타낸다. 전류도입선을 300 A의 정격전류가 흐르는 경우 300 A로 최적설계된 전류도입선과 1000 A로 최적설계된 경우의 냉각부하를 각각 13.4 W와 21.3 W 정도이다. 이것은 300 A로 최적설계된 전류도입선의 단면적이 1000 A로 최적설계된 단면적보다 작기 때문에 전도에 의한 냉동부하가 작아지기 때문으로 생각된다. 그러나, 3000 A의 사고전류가 발생하면 300 A로 최적설계된 전류도입선의 최대부하가 1000 A로 최적설계된 경우보다 더 커지는 것을 알 수 있는데, 이것은 300 A로 최적설계된 전류도입선의 전기저항이 크기 때문이다. 그림 9.에서 300 A로 최적 설계된 전류도입선의 중간 냉각부하가 1000 A로 최적 설계된 전류도입선의 중간 냉각부하 보다 작게 나타나므로, 300 A로 최적 설계된 전류도입선의 고온초전도체 전류도입선의 온도분포가 1000 A로 최적설계된 전류도입선의 고온초전도체 전류도입선의 온도분포보다 3-4 K 정도 낮게 나타난다.

3. 결 론

DC Reactor형 초전도한류기에 사고전류가 발생하였을 때, 2단형 극저온 냉동기를 이용하여 중간냉각하는 금속과 고온초전도체로 이루어진 이중전류도입선에서의 온도분포와 중간냉각부하를 해석하였다. 3000 A의 사고전류가 발생하였을 때, thermal link를 통하여 냉동기 1단으로 전달되는 열전달율이 300 A로 최적설계된 경우가 1000 A로 최적 설계하였을 경우보다 더 크게 증가하지만, 평상시 운전전류에 의하여 발생하는 열전달율은 1000 A로 최적 설계하였을 경우가 약 8 W 더 크다. 따라서, 평상시 운전시간이 사고발생시간보다 매우 길기 때문에 전류도입선의 금속부를 평상시 운전전류인 300 A로 최적 설계하는 것이 바람직하다고 판단된다. 또한

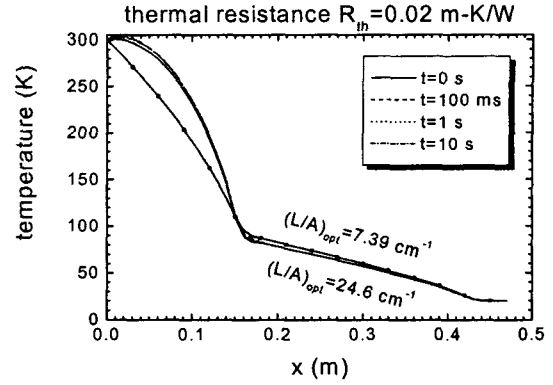


Fig. 8. variation of current lead (3000 A)

사고 발생으로 인한 온도상승이 금속전류도입선은 물론 고온초전도체 전류도입선에 피해를 줄만큼 크지 않기 때문에 높은 전류를 기준으로 한 단면적의 크기가 큰 전류도입선을 사용하는 것보다는 평상시 운전전류에 최적화된 전류도입선을 사용하는 것이 유리하다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] H.M. Chang, S.W. Van Sciver, "Thermodynamic optimization of conduction-cooled HTS current leads", Cryogenics, Vol.38 no.7, pp.729-736, 1998
- [2] 송성제, 장호명, "극저온냉동기로 냉각되는 이중전류도입선의 최적설계", 공기조화냉동공학회, 제9권 제4호, pp.522-560, 1997
- [3] M.N. Wilson, "superconducting magnets", Oxford, 1983

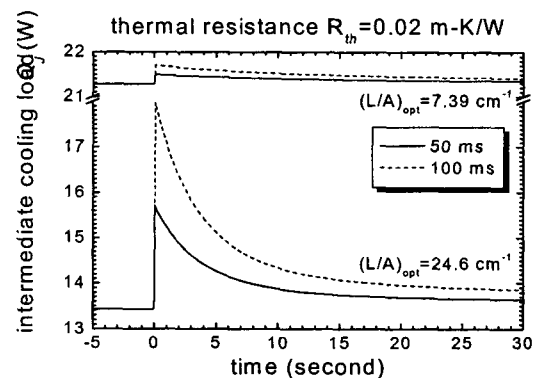


그림. 9. variation of cooling load of current lead as function of fault time