HTS 단말 전류도입선 형상에 대한 온도분포 및 열부하 계산

조승연, 사정우, 김도형, 김동락, 김승현, 양형석,
한국기초과학지원연구원

Calculation of Heat Loads and Temperature Distribution for the HTS Termination Current Lead

Seungyon Cho, Jeong-Woo Sa, Do-Hyeong Kim, Dong-Lak Kim, Seung-Hyun Kim,
HyungSuk Yang
Korea Basic Science Institute

sycho@kbsi.re.kr

Abstract - HTS (High Temperature Superconducting) cable termination current lead has been designed based on simplified boundary conditions such as fixed temperature at both end and adiabatic/convection in the side wall. However, in the real situation the current lead is enclosed with insulators and exposed to insulation oil and LN_2. Therefore it is necessary to consider them for the proper current lead design. In this paper, several important design parameters were chosen and their effect on the temperature distribution and heat loads on the current lead has been investigated. It was found that current lead has to be 2 stage to reach the minimum temperature requirement of insulation oil and insulator is required to reduce the cooling capacity of cryogenic system.

1. 서 론

고온초전도 전력케이블의 단말에 사용되는 전류도입선은 상온의 전원공급 케이블로부터 액체질소에 잠겨있는 고온초전도 케이블에 전력을 공급하기 위해 사용된다. 이러한 전류도입선을 설계하기 위해 액체질소에 잠겨있는 저온부와 상온에 노출되어있는 고온부사이의 온도조건을 경계조건으로 하는 열전달 방정식을 수립하여 최적의 열부하와 크기를 결정하는 방식을 적용하고 있다. 이 경우 전류도입선 외부는 포화액체질소 증발가스에 의한 증류냉각조건 혹은 진공 단열조건을 적용한다. [1-4]

그러나 현재 고려되고 있는 고온초전도 케이블 전류도입선의 상단부에는 전기절연유가 채워져 있으며 하단부는 액체질소에 잠겨있어 위와 같은 조건을 적용할 수 없으며 각각의 조건에 맞는 열전달 계수를 적용하여야 한다. 또한 실제 전류도입선에는 전기절연재가 감겨있어 전기절연유 및 액체질소와의 접촉 표면적이 증가하여 열교환 양이 증가하게 된다. 특히 전기절연유 하단부과 연결되어 있는 전류도입선의 온도가 통전하지 않을 경우 절연유 응고온도보다 높아야 하는 구속조건을 만족시켜야 한다. 이는 전류도입선을 여러 개의 단면적을 가지는 형상을 적용함으로서 해결될 수 있다. [5]

따라서 본 논문에서는 전류도입선 형상 변경을 포함하여 전기절연재 및 액체질소가 전류도입선 설계에 미치는 영향을 전류도입선 내부의 온도분포 및 열부하 계산을 통해 살펴보았다. 기본 조건은 참고문헌 [6]에 언급되어 있는 형상 및 전류조건을 선택하였다.

2. 해석 모델 및 조건

2.1 이론적 해석 모델

이론적 해석에 사용된 전류도입선은 직경 50 mm, 길이 1.5 m의 구리 원형 봉으로 경계조건은 양 끝을 300 K, 77 K로 고정하였고 옆면은 단열로 가정하였다. 해석에 사용된 열 발생률은 전류도입선에 전류가 흐를 때 발생되는 줄열을 나타내며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$G(T) = \rho(T)\frac{I^2}{A^2} \quad [\mathrm{W/m^3}] \tag{1}$$

여기에서 전기저항 ρ(T)는 온도의 함수로서 다음의 관계식을 가지며 온도가 증가함에 따라 선형적으로 증가한다.

$$\rho(T) = (-3.04078+0.06837\ T)\times10^{-9}\ [\mathrm{ohm\text{-}m}] \tag{2}$$

또한 A [m^2]는 전류도입선의 구리부분의 단면적이고, 전류 I는 1260 ampere가 흐르는 것으로 하였다.

2.2 절연유 및 액체질소 영향 고찰 모델

전류도입선 양 끝단 및 상하부에 접하는 절연

유 및 액체질소의 영향을 고찰하기 위해 사용된 모델을 Fig. 1에 나타내었다. 굵은 선으로 나타낸 부분에 적합한 열전달계수를 경계조건으로 사용한 부분이다.

액체질소와 절연유 혹은 공기와 접해있는 부분의 열전달계수는 수직 실린더 및 수직 평판에 적용되는 자연대류 식으로부터 여러 환경에서 사용될 수 있는 일반적인 식으로 다음과 같이 표현된다. [7]

$$h = C\,(Gr_f\,Pr_f)^m\,k/L \qquad (3)$$

여기에서 h [W/m^2 K]는 열전달계수이고, Gr은 Grashof number로서 자연대류 유동에서 점성력에 대한 부력의 비를 나타내는 무차원수이다. 또한 Pr은 Prandtl number로서 열 경계층에 대한 유동경계층에 대한 비를 나타내는 무차원수이다. 하첨자 f는 film temperature를 의미하는 것으로 벽면의 온도와 경계층 외부온도의 평균온도이다. 상수 C와 계수 m은 유동 조건에 따라서 각각 다른 값이 주어진다. 즉,

$$C = 0.59,\ m = 1/4 \text{ for laminar flow} \quad (10^4 \le Gr_f\,Pr_f \le 10^9) \qquad (4)$$

$$C = 0.1,\ m = 1/3 \text{ for turbulent flow} \quad (10^9 \le Gr_f\,Pr_f \le 10^{13})$$

위의 관계식을 사용하여 본 연구에 적용될 재료의 열전달 계수를 Table 1에 정리하였다.

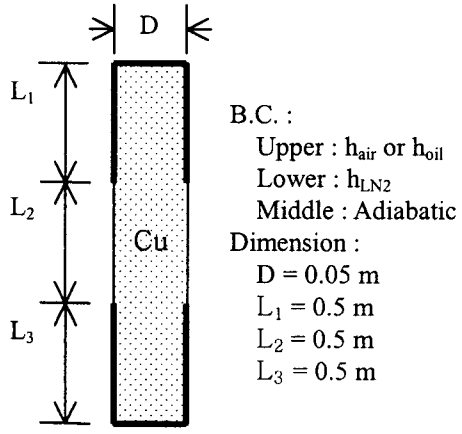

Fig. 1. Dimension of bare current lead and boundary condition for the calculation of temperature distribution and heat load

Table 1. Heat transfer coefficient of insulation oil and LN_2

	Air	Oil	LN_2
Film Temp. [K]	305	305	78.5
Viscosity [m^2/s]	1.57×10^{-5}	8.24×10^{-6}	1.94×10^{-7}
Conduct. [W/m K]	0.0264	0.1328	0.135
Pr	0.69	96.39	2.38
$Gr_f\,Pr_f$	1.18×10^{8}	5.71×10^{10}	2.96×10^{12}
h [W/m^2 K]	3.21	102.26	387.82

2.3 전기절연재 영향 고찰 모델

전류도입선을 통해 흐르는 전류의 영향을 흡수하기 위해 GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic)와 같은 전기절연재가 필요하며 이것이 온도분포에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보기 위해 Fig. 2와 같은 모델을 수립하였다. 상부 굵은 선 부분이 절연유가 채워져 있는 부분이고 하부는 LN_2에 잠겨있는 부분이다. 이 부분에 열전달계수를 적용하여 온도분포 및 열부하를 계산하였으며, 절연재 두께에 대한 영향도 살펴보았다.

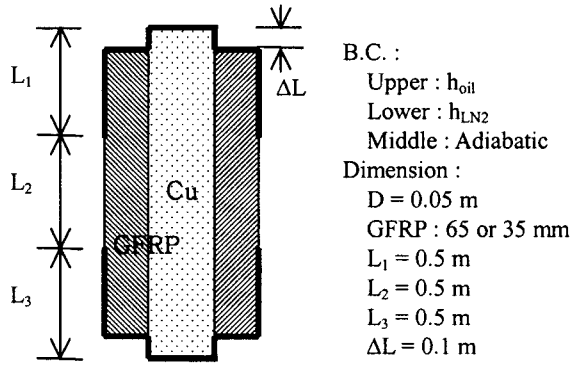

Fig. 2. Dimension of current lead with GFRP and boundary condition for the calculation of temperature distribution and heat load

2.4 형상변경 영향 고찰 모델

전류도입선의 하단부가 LN_2에 잠겨있어 열을 빼앗겨 상단부 전기 절연유의 응고점에 도달될 수 있으므로 이를 방지하기 위해서는 무통전시에도 항상 최소 -15 °C 이상은 되어야 한다. 따라서 고온부에서 줄열이 적게 발생하고 전도열이 많이 발생하고 저온부에서는 고온부에서 발생한 열이 조금 전도되고 줄열이 많이 발생될 수 있도록 저온부 단면적을 줄여야 한다. 이에 대한 해결책으로 Fig. 3과 같은 2단 전류도입선을 적용하였으며 온도분포 및 열부하 계산을 통해 영향을 살펴보았다. 또한 2단 전류도입선에 GFRP가 있는 경우 미치는 영향도 살펴보았다.

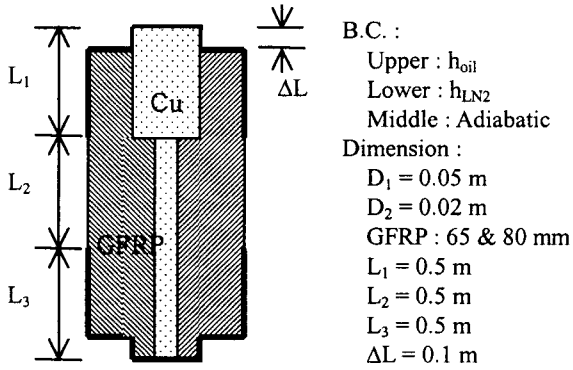

Fig. 3. Dimension of 2 stage current lead with GFRP and boundary condition for the calculation of temperature distribution and heat load

3. 해석 결과 고찰

3.1 절연유 및 액체질소 영향 고찰

전류가 흐를 때와 흐르지 않을 때 Fig. 1의 모델을 사용하여 전류도입선 주위의 여러 경계조건에 대해 온도분포를 계산하였다. 양 끝을 고정온도로 하였을 경우와 비교해보면 하단부에 LN_2와 상단부에 절연유를 고려할 경우 대류열전달 효과로 인해 하단부의 온도는 LN_2온도로 인해 낮아지고 상단부 상온의 절연유와 접하는 부분은 온도가 상승하였다. 그러나 상단부에 공기가 접해있는 경우 열전달계수가 절연유에 비해 30배가량 낮기 때문에 공기와의 열전달이 잘 일어나지 않고 LN_2에 잠겨있는 저온부로부터 열을 빼앗겨 상단부 온도가 120 K까지 강하하게 된다. 지름이 50 mm인 전류도입선에 전류가 흐를 경우 발생되는 줄열은 온도차에 의한 전도열에 비해 미미하여 전류가 흐르지 않을 경우와 비교하면 점선과 실선에 나타나 있듯이 온도차이가 별로 없다.

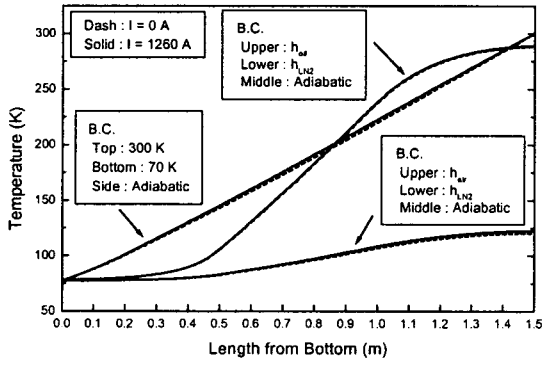

Fig. 4. Temperature distribution in the bare current lead for various boundary conditions considering oil, air and LN_2

3.2 전기절연재 영향 고찰

전류도입선을 GFRP 절연재로 감싸 절연유 및 LN_2 환경에 Fig. 2와 같이 설치할 경우 온도분포 변화를 Fig. 5에 나타내었다. GFRP가 있는 경우 저온부 및 고온부에서 단연효과로 인해 전류도입선 내부의 온도차가 상대적으로 줄었다. 즉 고온부의 온도는 GFRP가 없는 경우보다 낮았으며, 저온부의 온도는 높았다. 그러나 GFRP 두께의 변화에 의한 영향은 크지 않음을 알 수 있었다. GFRP 외부 표면온도 또한 Fig. 5에 나타내었다. LN_2와 접한 저온부 온도는 77 K로 유지되었고, 절연유와 접한 고온부의 온도는 300 K로 유지되었으며 단열조건이 적용된 중간부에서 온도가 급격히 변화되는 것을 알 수 있었다.

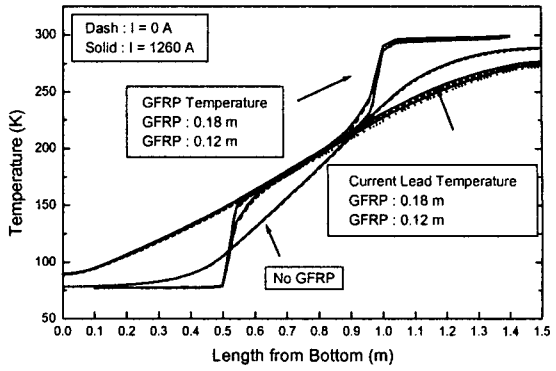

Fig. 5. Temperature distribution in the current lead with GFRP considering oil at the upper and LN_2 at the lower section

3.3 전류도입선 및 절연재 형상 영향 고찰

전류도입선의 상부에 접해있는 절연유는 통전시뿐만 아니라 비통전시에도 최소온도를 초과해야 하는데 이를 위한 방법으로 Fig. 3과 같은 2단 전류도입선을 적용하여 절연유 및 LN_2 경계조건을 사용하여 온도분포를 계산하였으며 1단인 경우와 GFRP가 추가된 경우에 대한 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었다.

식 (1)로부터 알 수 있듯이 지름이 작은 부분에서 줄열은 지름의 제곱배로 증가하기 때문에 전도열에 비해 영향이 크며, 절연유에 접해있는 큰 지름의 1단부 하단에서는 작은 지름의 2단부로 전도열이 잘 전달되지 않고 축적되어 온도가 무통전시 282 K, 통전시 289 K로 상당히 증가함을 알 수 있다. 전류도입선의 양 끝단의 온도를 고정하였을 경우 전류가 흐를 때 최대 온도 310 K는 2단부의 상단지역에서 발생하였다. 또한 무통전시 절연유 접촉부분의 하단부에서의 온도도 281 K까지 증가하였다. GFRP가 있는 경우 1단부에서의 온도는 약간 증가하였지만 2단부 LN_2에 잠겨있는 부분은 GFRP의 높은 단열성으로 인해 상당히 증가하였다.

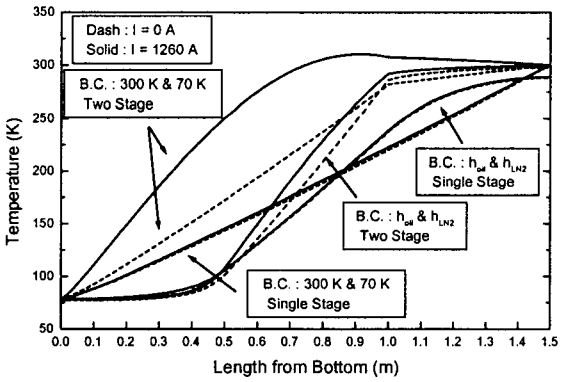

Fig. 6. Temperature distribution in the 1 and 2 stage bare current lead considering oil at the upper and LN_2 at the lower section

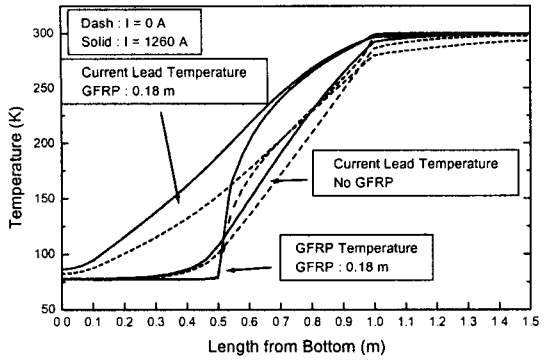

Fig. 7. Temperature distribution in the 2 stage current lead with GFRP considering oil at the upper and LN_2 at the lower section

4. 결 론

전류도입선 설계에 필요한 여러 변수들을 결정하였고 각 변수들이 전류도입선의 온도분포에 미치는 영향을 살펴보았다. 이 온도분포를 기준으로 여러 경계조건 및 전류도입선 형상 변경에 대하여 전류도입선 표면을 통해 유입 및 유출되는 열전달량을 계산하여 Table 2에 정리하였다.

전류가 흐르지 않을 경우 생성되는 열량이 없어 상부 고온부 절연유에서 유입되는 양과 하부 저온부 LN_2로 유출되는 양이 같게 되어 총 전달량은 없다. 그러나 전류가 흐를 경우 줄열이 전류도입선 구리부분에서 발생하기 때문에 총 열전달량은 증가한다.

열전달계수 효과를 살펴보면 상부 고온부에 열전달 계수가 높은 절연유를 사용하면 170 W 정도의 열전달이 일어나며 공기를 사용한 경우인 40 W 정도에 비해 많은 열이 전류도입선으로 유입된다. 이로 인해 저온부로 전달되는 열전달량이 많아져 냉동기 냉각부하가 커질 수 있으나 절연유와 접해있는 부분의 온도를 상승시킴으로서 응고를 방지할 수 있다는 장점도 있다.

GFRP를 설치할 경우 열전도도가 상당히 낮으므로 열 유출입량도 30% 정도 줄고 전류도입선 온도도 상승하는 효과를 얻을 수 있다. 그러나 GFRP의 두께로 인한 차이는 그리 크지 않아 전기적 절연이 허용하는 한도 내에서 두께를 최소화하는 것이 유익하다.

2단 전류도입선의 경우 2단부에서 줄열이 증가하지만 하단부로 전도되는 열이 감소하게 되어 LN_2로 유출되는 열량도 93 W로 줄게 된다. GFRP를 사용할 경우 고온부에서 유입되는 열이 40 W정도 감소하게 되어 냉각 부하는 53 W 정도로 상당히 준다.

결론적으로 냉동기 냉각부하를 줄이고 절연유의 응고를 막기 위해 GFRP와 같은 전기절연재로 둘러싸인 2단 전류도입선이 필요하며 이때 GFRP의 두께는 큰 영향을 끼치지 않는다.

Table 2. Heat load through the current lead under several design parameter variations

Condition	I = 0 A			I = 1260 A		
	Inflow	Out flow	Net	Inflow	Out flow	Net
300/77K	-126.0	126.0	0.0	-119.1	130.3	11.2
h_{air}/h_{LN2}	-37.8	37.8	0.0	-39.8	40.9	1.1
h_{oil}/h_{LN2}	-172.7	172.7	0.0	-168.7	173.1	4.4
h_{oil}/h_{LN2}/GFRP(0.18m)	-124.2	124.2	0.0	-117.6	130.5	12.9
h_{oil}/h_{LN2}/GFRP(0.12m)	-119.9	119.9	0.0	-113.1	123.7	10.6
300/77K/2Stage	-28.0	28.0	0.0	0.0	70.5	70.5
h_{oil}/h_{LN2}/2Stage	-79.6	79.6	0.0	-46.1	93.0	46.9
h_{oil}/h_{LN2}/2Stage/GFRP	-34.3	34.3	0.0	-4.7	53.4	48.7

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

[참 고 문 헌]

[1] Yukikazu Iwasa, "Case Studies in Superconducting Magnets, Design and Operational Issues", Plenum Press, 1994.
[2] 김승현, 김동락, 조승연, "고온초전도 전력케이블 단말 저온조의 개념설계", 한국초전도저온공학회, pp. 37-39, 2002.
[3] R. Wesche and A.M. Fuchs, "Design of Superconducting Current Leads", Cryogenics, Vol. 34, No. 2, pp. 145-154, 1994.
[4] P.F. Herrmann, et al., "Cryogenic Load Calculation of High Tc Current Lead", Cryogenics, Vol. 33, No. 5, pp. 565-562, 1993.
[5] T. Shimonosono, S. Nagaya, T. Masuda, S. Isojima, "Development of a Termination for the 77kV-Class High Tc Superconducting Power Cable", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, pp. 33-38, 1999.
[6] 양형석, 김승현, 김동락, 조승연, 김도형, 류희석, 성기철, "고온초전도 케이블 단말용 cryostat 설계", 한국초전도저온공학회, 2003.
[7] J. P. Holman, "Heat Transfer", Tower Press, 1976.