

고온초전도 전력케이블 단말 저온조의 개념 설계

김 승현, 김 동락, 조 승연
한국기초과학지원연구원

Conceptual Design of Terminal Cryostat for HTS Power Cable

Seung-Hyun Kim, Dong-Lak Kim, Seungyon Cho
Korea Basic Science Institute

hyun0224@comp.kbsi.re.kr

Abstract - The model of terminal cryostat for HTS power cable is conceptually designed. In this paper we defined that heat loads of the terminal cryostat was only cooled by the liquid nitrogen without cooling gas. Total heat loss calculated by analytical and numerical methods are 46.4W at 0A and 69W at 1260A for the 3-phase HTS power cable system of 50MW, 22.9kV.

1. 서 론

최근 도심지역의 전력수요량이 증가함에 따라 필요 전력량이 1997년 35.8GW에서 향후 2010년에는 67.4GW로 약 2배정도 증가할 것으로 예상되고 있어 전력수송용량의 증가는 불가피한 실정이다. 고온초전도 전력케이블은 현재의 동케이블에 비해 기존의 선로를 이용할 수 있는 소형화된 크기의 케이블로 다가오는 미래의 전력수요를 만족시킬 수 있는 충분한 대용량의 전력수송을 가능하게 해주는 최적의 수단으로 기대되고 있다.

고온초전도 시스템을 유지하고 대전류를 가능하게 하기 위해서는 무엇보다 저온을 유지시킬 수 있는 냉각시스템이 반드시 필요하다.

고온초전도 전력케이블 냉각시스템은 케이블을 위한 극저온 관로(cable cryostat)와 단말 저온조(terminal cryostat), 냉매강제순환계로 구성이 된다.

단말 저온조는 고온초전도 시스템을 위해 전류도입선을 통하여 초전도케이블에 전력을 공급해 주는 연결부이다.

본 연구에서는 단말 저온조의 상세설계를 위한 모델의 설계와 열부하를 계산하였으며 그 결과를 보고한다.

2. 단말 저온조의 구조

단말 저온조 설계에 있어 해석적으로 고려해야 될 부분은 크게 전기적인 부분과 열적인 부분

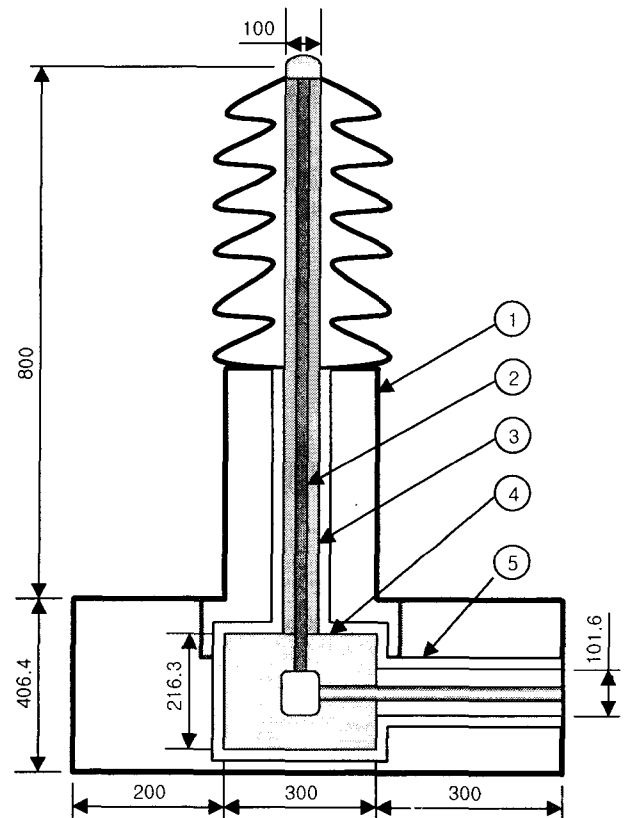


Fig. 1. Structure of the HTSC terminal cryostat ①Vacuum vessel ②Current lead ③Current lead insulator ④LN2 vessel ⑤ MLI

Table. 1. Materials of the terminal cryostat

번호	구성 요소	재질
①	단열 진공용기	SUS304
②	전류도입선	Cu
③	전류도입선 절연재	SUS304
④	액체질소용기	GFRP
⑤	다층단열재	DAM

이다. 전기적인 부분은 전류가 흐르는 고온초전도체와 전류도입선이 있고, 이를 감싸는 절연재가 있다. 열적인 부분으로는 단열 진공용기와 복사열을 막기 위한 다층단열재, 그리고 질소용기를 지지하는 지지대가 있다. 해석에 사용한 계산모델은 Fig. 1.과 같이 나타내었다. 각각의 구성요소에 대한 재질은 Table. 1.에 나타내었다. 본 연구의 목표는 50MW급의 22.9kV, 3상 케이블에서 전류를 공급하게 되므로 단상케이블의 경우 약 1260A의 전류가 흐르게 되어 이를 기준으로 하여 계산을 수행하였다.

3. 단말 열해석

3.1 전류도입선

상온부에서부터 저온부로 전류를 공급하는 전류도입선은 외부로부터 재질을 통한 전도열과 저항에 의한 주울열을 모두 포함하고 있다.

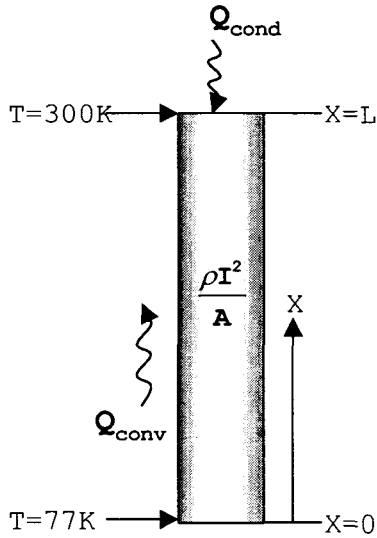


Fig. 2. Schematic diagram of the current lead
전류도입선에 대한 기본모델을 Fig. 2.에 나타내었다. 정상상태에서 고려해야할 전류도입선에 대한 식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dx} \left(k(T) A \frac{dT}{dx} \right) - f \dot{m} C_p \frac{dT}{dx} + \frac{\rho(T) I^2}{A} = 0 \quad (1)$$

- k : Thermal conductivity
- A : cross sectional area of current lead
- x : length along the current lead
- f : cooling efficiency
- \dot{m} : mass flow of the nitrogen gas
- C_p : specific heat under const. pressure
- ρ : electrical resistivity of current lead
- I : current

식 (1)에서 좌측의 첫 번째항은 전류도입선을 통한 전도열을 나타내며 두 번째항은 전류도입선의 주위로부터 얻어지는 대류열을 나타낸다. 그리

고 마지막항은 저항에 의한 주울열을 나타내며 액체질소용기에서 전도만을 고려하게 되면 간단히 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

위 식을 해석적으로 계산하여 전류도입선에 필요한 최소 냉동부하(Q_{ORT})와 전류도입선의 면적에 대한 길이의 비 즉, 최적형상을 온도의 함수로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$Q_{ORT} = I \sqrt{2 \int_{T_c}^{T_h} \rho(T) k(T) dT}$$

$$\left(\frac{L}{A} \right)_{ORT} = \int_{T_c}^{T_h} \frac{k(T)}{I \sqrt{2 \int_{T_c}^{T_h} \rho(\tau) k(\tau) d\tau}} dT \quad (3)$$

전류도입선을 설계하기 위하여 수치적인 계산에 사용된 열전도도와 전기저항은 모두 온도의 함수로 순동(RRR=100)을 적용하였다. 위의 식(3)과 같이 전도열과 저항열을 고려한 경우 (Conduction Cooling)와 식 (1)과 같이 대류를 포함한 경우(Vapor Cooling)에 대한 계산 결과를 Table. 2.에 나타내었다.

Table. 2. Optimal cooling load and optimal shape of the current lead

	(Q/I) _{OPT} [W/kA]	(IL/A) _{OPT} [A/m]
Conduction Cooling	42.4	3.5E6
Vapor Cooling	22.1	4.8E6

3.2 열부하 계산

진공용기 안에서 생각해야할 열부하로는 진공이 유지되고 있으므로 대류열전달을 무시하고 복사열전달과 전도열전달을 고려하였다. 단말 저온조의 진공용기 안에서 복사열을 차단하기 위하여 단열재를 사용하는 경우 외부로부터 침입하는 복사열은 식 (4)와 같다.

$$Q_{RAD} = \sigma F_e F_{1-2} A_1 (T_2^4 - T_1^4) \quad (4)$$

- σ : Stefan-Boltzmann constant
- F_e : emissivity factor
- F_{1-2} : shape factor
- A : vessel area
- subscript 1 and 2 : inside and outside

또한 단열재를 통한 벽면으로의 전도열과 단말 저온조의 진공용기로부터 들어오는 전도열에 의한 열유입은 식 (5)로 계산하였다.

$$Q_{CO,VD} = \frac{A}{L} \int_T^{T_i} kdT \quad (5)$$

액체질소용기안에 들어있는 전류도입선 중에서 액체질소의 표면으로부터 내부에 잠겨있는 부분은 온도차에 의한 전도열은 받지 않으나 전류에 의한 저항열이 발생한다. 여기서 액체질소에 잠겨있는 길이를 $L=0.1m$ 라 가정하였다.

마지막으로 전류도입선과 고온초전도체와의 접합저항을 측정하여 접합열을 계산하여야 한다.

4. 결과 및 토의

고온초전도 전력케이블 시스템을 위하여 주어진 조건에 대한 단말 저온조의 기본모델에서 발생할 수 있는 주요 열부하는 Table. 3.과 같다.

Table. 3. Heat load of the terminal cryostat

Heat Load	Values [W]	
	0A	1260A
Conduction heat from the current lead	33.8	53.4
Radiation and conduction heat from the thermal insulation	1.1	
Conduction heat from the vacuum vessel	11.5	
Joule heat of the n.c.-s.c. joint and n.c. in LN ₂	0	3
Total	46.4	69

열부하의 주요요인은 Table. 3.에서 보면 알 수 있듯이 전류도입선을 통한 열유입이 지배적으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 단열재를 통한 열부하는 총합 열부하에 비해 매우 작음을 알 수 있으며 진공용기로부터 들어오는 전도열은 상온부에서 액체질소용기까지의 온도차를 통한 열부하로 11.5W의 큰 값을 나타내고 있다. 이는 단말 저온조를 최적화하기 위한 목적으로 총합 열부하를 줄일 수 있는 가장 중요한 요소가 된다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] T.Shimonosono, S.Nagaya, T.Masuda, S.Isojima, "Development of a Termination for the 77kV-Class High Tc Superconducting Power Cable", IEEE, Vol.12, No.1, pp.33-38, 1997
- [2] Claus Nygaard Rasmussen, Carsten Rasmussen, "Optimization of Termination for a High-Temperature Superconducting Cable with a Room Temperature Dielectric Design", IEEE, Vol.9, No.1, pp.45-49, 1999
- [3] 장호명, "2단냉동기로 전도냉각되는 HTS전류도입선의 열역학 설계", 한국초전도·저온공학회, pp.198-201, 1999