

고온초전도 케이블 냉각길이 장척화를 위한 최적 냉각방안

An Optimal Cooling Method for Long HTS Power Transmission Cable

이창호*, 김도형*, 김춘동**, 김균석*, 김익생**

Chang-Ho Lee*, Do-Hyung Kim*, Chun-Dong Kim**, Kyun-Seok Kim*, Ig-Saeng Kim**

Abstract: An optimal cooling method for a long HTS power transmission cable was scrutinized by using theoretical models. Cooling length of HTS cable is determined by pressure range and temperature range of LN2 in the HTS cable. Results showed limitation from temperature range is stricter than that from pressure range. The well-known one-side cooling was modified to two-side cooling. It was shown that cooling length can be nearly doubled by adopting two-side cooling of the same capacity.

Key Words: HTS cable, power transmission, pressure, cooling method.

1. 서 론

고온 초전도 케이블은 저손실 대용량을 그 특성으로 하는 미래형 전력수송 케이블이다. 고온초전도 케이블에서는 고온 초전도 선재를 통하여 전력을 수송하게 되는데 이 선재의 초전도 현상을 유지하기 위하여 80K 미만의 온도를 유지하는 것이 중요하다. 이를 위하여 과냉 상태의 LN2(액체질소)를 초전도 케이블의 내부에 순환시켜 초전도 선재에서 발생하는 교류손실 및 초전도 케이블 외부로부터의 열 침입량을 제거하게 되고 이 LN2는 다시 극저온 냉동기와 열교환을 통하여 과냉 상태로 복귀하는 과정을 반복하게 된다.

현재 초전도 케이블 개발은 장척화 추세에 있다고 할 수 있는데, 이는 경제성을 확보하기 위한 선택이다. 케이블의 장척화는 곧 케이블 냉각길이의 장척화인데 냉각길이가 짧은 경우 그만큼 짧은 길이마다 극저온 냉동기를 포함한 냉각시스템을 배치해야 하고 초전도 케이블의 중간접속을 해야 하는 등 시스템이 매우 복잡하게 되어 경제성이 떨어지게 된다.

초전도 케이블의 냉각길이의 장척화에 가장 중요한 요소는 순환하는 LN2의 압력손실과 LN2의 온도의 분포이다. 케이블이 장척화 될수록 LN2의 입출구 압력차와 온도차가 커지고 케이블 내부의 LN2의 온도가 상승한다. 케이블 내부의 압력 범위와 온도 범위가 한정되어 있으므로 이는 초전도 케이블의 장척화를 막는 제한요소로 작용하게 된다.

본 연구에서는 케이블 내부의 온도, 압력을 Fuchino 등[1]의 해석모델을 이용하여 예측해보고 최적 냉각을

통한 케이블 냉각길이의 장척화 방안에 대해서 고찰해 보았다

2. 모 델

본 연구에서는 Fig. 1에 나타나있는 것과 같이 삼심 일괄형 초전도 케이블을 모델로 하였다. 그 구조를 살펴보면 각각의 초전도 케이블의 코어는 가장 내측으로부터 포머, 초전도 선재로 이루어진 통전층, PPLP 재질의 절연층, 초전도 선재로 이루어진 차폐층으로 구성되어 있다. 3개의 초전도 케이블 코어가 내측 Cryostat에 삽입되고 내측 Cryostat은 외측 Cryostat에 삽입되어 3심 초전도 케이블이 구성된다. 초전도 케이블 냉각은 각각의 초전도 케이블 코어의 포머 내측으로 LN2가 주입(Go)되고 케이블 냉각길이를 통과한 LN2는 케이블 코어와 내측 Cryostat 사이의 공간으로 돌아오는(Return) 형태로 순환하게 된다.

초전도 케이블 내부의 LN2 온도분포 및 차압손실을 예측해보기 위한 모델이 될 전형적인 삼심일괄형 초전도 케이블의 주요척도, 운전조건 및 열 부하량을 Table 1에 표시하였다. 이 모델에 대하여 케이블 냉각시 발생하는 LN2의 압력손실과 LN2의 온도분포를 예측해보고 적절한 제한조건에 대한 최적 냉각 방안을 도출해 보겠다.

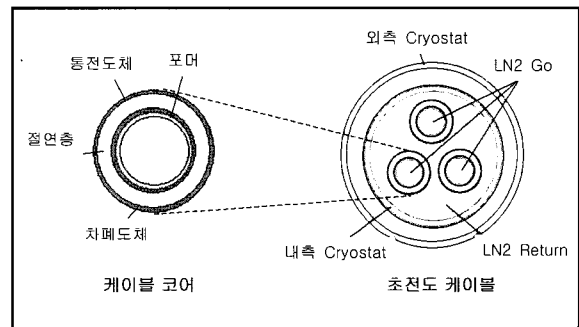


Fig. 1. Structure of HTS cable.

3. 압력범위에 의한 냉각길이 제한

먼저 초전도 케이블 내부의 LN2 압력범위에 의한 냉각길이의 제한에 대해 생각해 보았다. 초전도 케이블 내의 LN2 차압은 리턴유로(케이블 코어와 내측 Cryostat 사이의 공간)의 형상 및 크기, 그리고 유량에 따라 결정된다. 차압손실 Δp 를 계산하는 공식

* 비 회 원: LG전선 기계연구소

** 정 회 원: LG전선 기계연구소

원고접수: 2004년 8월 13일

심사완료: 2004년 9월 13일

Table 1. Dimensional parameters of 3-core HTS cable.

포머 내측 반경, r_1 (m)	1.06×10^{-2}
케이블 코어 외측 반경, r_2 (m)	2.17×10^{-2}
내측 Cryostat 내경 (m)	9.47×10^{-2}
외부 열침입, Q'_0 (W/m)	2.5
교류손실, Q' (W/m)	3.0
LN2 입구온도, T_0 (K)	70
LN2 입구압력 (MPa)	1.0
LN2 유량, M' (kg/s)	0.3

은 아래와 같다.

$$\Delta p = \sum f \frac{L}{D_e} \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

위의 공식에서 f 는 유로의 마찰계수, L 은 유로의 길이, D_e 는 유로단면의 수력직경, ρ 는 밀도, v 는 유로내의 평균속도를 나타낸다.

포머 내측 유로의 마찰계수는 그 형상에 따라 속도에 거의 무관한 형태로 0.1~1.0 사이의 값을 가진다[2]. 리턴유로의 경우는 포머 내측 유로에 비해 유로의 면적이 크므로 차압손실에 미치는 영향이 매우 작다. 리턴 유로의 마찰계수는 Fuchino et al. [3]의 결과로부터 아래의 식에서 구할 수 있다.

$$f = 0.096 Re^{-0.2} \quad (2)$$

위의 식에서 Re 는 Reynolds수로써 $\rho v D_e / \mu$ 정의되고 Table 2의 LN2 물성치를 이용하여 리턴유로의 마찰계수를 계산해보면 0.015정도의 작은 값을 가진다. 포머의 마찰계수는 그 형상에 따라서 크게 될 수도 있으나 포머의 형상을 조정하는 것은 크게 어려운 일이 아니므로 임의로 작은 값인 0.2로 둘 수 있다.

초전도 케이블 내부의 LN2 압력은 전기절연강도를 확보하기 위해 최소 0.4MPa 이상으로 유지되어야 하므로 이 수치가 케이블 내부 LN2의 최저압력이 된다. 입구압력을 1MPa로 주는 경우 출구압력을 0.4MPa로 두면 아래와 같이 압력차 0.6MPa에 대한 최대 냉각길이 결정되게 된다.

$$L_{max} = \frac{\Delta p}{\sum f \frac{1}{D_e} \frac{\rho v^2}{2}} = 1282 \text{ m} \quad (3)$$

위의 계산으로부터 압력손실에 의해 제한받는 초전도 케이블의 냉각길이는 1km이상임을 알 수 있다. 그리고 다음에 논의될 케이블내의 LN2 온도상승에 의한 냉각길이 제한의 결과와 비교하면 압력손실에 의한 냉각길이 제한은 상대적으로 약한 제한요소임을 알 수 있다.

4. 온도범위에 의한 냉각길이 제한

케이블 LN2의 온도가 높아지면 초전도 선재의 I_c 가 줄어들고 궁극적으로는 초전도 현상이 파괴되므로 케

이블 내부의 LN2 온도범위는 80K미만을 유지하여야 한다. 케이블 LN2 입구온도인 70K를 사용하면 70K~80K의 온도범위를 케이블 내부 LN2의 온도범위로 둘 수 있다. 이 온도범위를 제한조건으로 케이블 냉각 길이의 제한에 대해 고찰해 보겠다.

포머로 주입되는 LN2와 케이블을 통과하여 케이블 코어와 내측 Cryostat과의 사이공간으로 돌아오는 LN2 사이의 상당 열전달계수 K 는 아래와 같이 정의할 수 있다[1].

$$K^{-1} = 1/h_1 r_1 + \ln(r_2/r_1)/\lambda + 1/h_2 r_2 \quad (4)$$

위에서 h_1, h_2 는 각각 포머 내측과 케이블 코어 외측의 대류열전달 계수로서 난류영역의 관유동에 대한 Dittus-Boelter 관계식에 의해 계산 될 수 있다.

$$Nu = h D_e / k = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (5)$$

위에서 Pr 은 Prandtl수로써 $Pr = \frac{\mu C_p}{k}$ 로 정의되고

n 은 유체가 가열되는 경우와 냉각되는 경우에 각각 0.4와 0.3이다. 그러나 대류열전달의 경우이므로 h 값이 매우 커서 식 (4)의 상당열전달 계수 값을 구하는데 있어서 h 값의 영향은 매우 작고 또한 h 값에 있어서 n 에 의한 차이도 미미하므로 해석의 편의상 n 을 0.4로 고정하여 계산하였다. μ 는 PPLP 절연층의 열전도 계수로서 정확한 값은 알려져 있지 않고 문헌에 따라 0.2W/m/K 또는 0.05W/m/K로 보고되고 있다[4, 5]. LN2의 물성치에 대한 대표값으로 Table 2에 나와 있는 77K, 0.5MPa의 물성치를 적용하여 이 상당 열전달계수 K 를 식(4), (5)로부터 계산하면 PPLP의 열전도계수에 따라서 아래와 같이 계산된다.

$$K = 0.266 \text{ W/m/K } (\mu = 0.2 \text{ W/m/K})$$

$$K = 0.069 \text{ W/m/K } (\mu = 0.05 \text{ W/m/K})$$

Table 2. Liquid Nitrogen properties at 77K, 0.5MP.

Specific heat, C_p (kJ/kg/K)	2.04
Thermal conductivity, k (W/m/K)	0.147
Density, ρ (kg/m ³)	809
Prandtl number, Pr	2.28
Viscosity, m (Pa · s)	1.64×10^{-4}

Fuchino등[1]의 해석적 모델을 사용하기 위하여 3 core의 케이블을 1-core의 케이블로 모델링하여 생각하기로 하였다. 1-core에 대한 상등 외부 열침입량 Q_0 , 전기발열량 Q , 냉각유량 M 은 각각

$$Q_0 = Q'_0/3, Q = Q'/3, M = M'/3 \quad (6)$$

의 관계를 가진다. Fig. 2에 Fuchino 등[1]의 1 core의 케이블의 모델에 대한 에너지 밸런스가 도식으로 표시되었다. 그림에 표시된 것과 같이 교류손실에 의한 발열량은 포머 내측과 케이블 리턴유로에 균등하게 전달되는 것으로 가정하였다. 절연층을 사이에 두고 위치하는 통전도체와 차폐도체의 교류손실이 거의 같은 값을 가지기 때문에 이러한 가정이 가능하다.

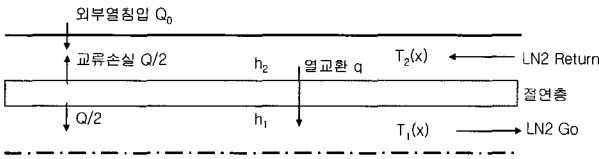


Fig. 2. Energy balance in 1-core HTS cable.

1-core의 모델에 대하여 지배방정식은 아래와 같다 [1].

$$MC_p \frac{dT_1}{dx} = q(x) + \frac{Q}{2} \quad (7)$$

$$-MC_p \frac{dT_2}{dx} = -q(x) + \frac{Q}{2} + Q_0 \quad (8)$$

$$q = 2\pi K(T_2 - T_1) \quad (9)$$

또한 편단에 냉각시스템이 배치되어 있는 기존의 냉각방식의 경우 경계조건은 아래와 같다.

$$T_1 = T_0 \quad \text{at } x=0 \quad (10)$$

$$T_2 = T_0 + \Delta T \quad \text{at } x=0$$

$$T_1 = T_2 \quad \text{at } x=L$$

기존의 냉각방식은 한쪽(x=0)에서만 냉각을 하게 되므로 에너지 밸런스를 생각하면 필요한 총 냉각용량은 발열량과 열침입량의 총합으로

$$(\text{총 냉각용량}) = (Q + Q_0) \cdot L \quad (11)$$

이고 x=0에서 T₁과 T₂의 온도차 ΔT는 아래와 같다.

$$\Delta T = \frac{(Q + Q_0) \cdot L}{MC_p} \quad (12)$$

(1), (2), (3)의 방정식과 경계조건 (4), (5)로부터

$$T_1 = -\frac{\pi K(Q + Q_0)}{(MC_p)^2} x^2 + \frac{1}{MC_p} \left[\frac{2\pi K(Q + Q_0)}{MC_p} L + \frac{Q}{2} \right] x + T_0 \quad (13)$$

$$T_2 = -\frac{\pi K(Q + Q_0)}{(MC_p)^2} x^2 + \frac{1}{MC_p} \left[\frac{2\pi K(Q + Q_0)}{MC_p} L - \frac{Q + 2Q_0}{2} \right] x + T_0 + \frac{Q + Q_0}{MC_p} L \quad (14)$$

Table 1과 2의 수치를 대입하여 케이블 내부의 온도 분포를 계산한 예를 Fig. 3에 나타내었다. 이때, 더욱 큰 온도차를 보이게 되는 경우로서 μ = 0.2 W/m/K를 가정하였다. Fig. 3에서 케이블의 길이가 짧은 경우 케이블 내부 LN2의 최고온도는 케이블 리턴의 출구(x=0)에서 발생하지만 케이블의 길이가 긴 경우는 최고온도가 포머내부의 LN2가 리턴되어서 돌아오는

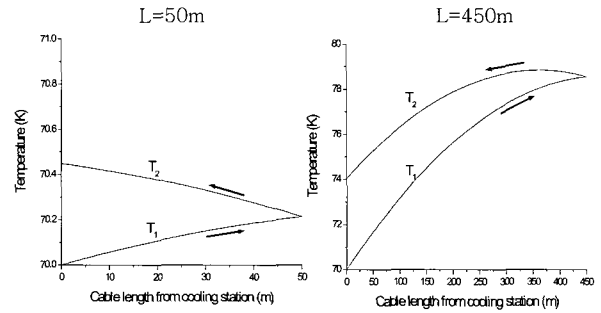


Fig. 3. LN2 temperature distributions in the cable of one-side cooling.

x=L 근처에서 발생함을 알 수 있다. 이러한 이유로 장척의 케이블의 경우 길이에 비례하여 케이블 내부 LN2 온도가 상승하리라고 생각하면 치명적인 실수를 할 수 있다.

최장 냉각 길이를 온도범위로부터 도출해 내기 위하여 케이블 내부의 온도의 최대값을 구해보면 케이블의 길이 L에 따라서 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$T_{\max} = (T_2)_{x=0} = \frac{(Q + Q_0) \cdot L}{MC_p} + T_0 \quad 0 < L < 88.7\text{m}$$

$$= T_{2\max} = \frac{\pi K(Q + Q_0)}{(MC_p)^2} L^2 + \frac{QL}{2MC_p} + \frac{(Q + 2Q_0)^2}{16\pi K(Q + Q_0)} + T_0 \quad L > 88.7\text{m} \quad (15)$$

위에서 초전도 케이블 내부 LN2 최고 온도는 단척(L < 88.7m)의 경우에는 길이에 비례하는 형태로 장척(L > 88.7m)의 경우에는 길이에 제곱에 비례하는 형태로 상승하게 되는 것을 알 수 있다.

케이블 내부 LN2의 최고온도와 온도제한범위 70K < T < 80K에서 최장 냉각 길이를 구해보면 아래와 같다.

$$L_{\max} = 482\text{m}$$

이 값은 앞장의 압력범위 제한에 의해 구해진 최장 냉각 길이에 비하여 절반에도 못 미치는 값으로 초전도 케이블의 장척화를 위해서는 온도범위에 의한 냉각 길이의 제한값을 높일 수 있는 방안을 강구하는 것이 매우 중요하다.

5. 냉각방식의 개선

기존 편단 냉각방식의 경우, 계산 결과에서 볼 수 있듯이 장척의 초전도 케이블 내에서의 LN2 최고온도는 모든 물성치와 유량, 열침입량, 발열량 등의 조건이 고정되었을 때 냉각 길이의 제곱에 비례하게 된다. 그러므로 장척의 케이블 냉각에 있어서는 케이블 입출구의 LN2 온도가 아니라 케이블 내부의 LN2 온도 상승에 의하여 냉각 길이가 제한되게 된다. 이러한 현상은 포머 내를 흐르는 LN2와 리턴유로를 흐르는 LN2의

열교환에 기인하는데 이러한 열교환을 줄이는 것이 냉각 길이 장치화를 위해 생각해볼 수 있는 한 방법이다. 열교환을 줄이기 위해서 단열성능이 좋은 물질을 삽입하는 것도 한 방법이 되겠지만 이는 전기적인 관점에서 고찰이 필요하므로 본 연구에서는 물성치에 대해서는 생각하지 않겠다. 또 다른 방법은 케이블 전체 길이에서 LN2 유로사이의 (Go와 Return) 열교환의 총합을 줄이는 방안을 생각해 볼 수 있겠다. 본 연구에서는 이러한 방안에 대해서 고찰해 보겠다.

포머 내측 LN2와 리턴유로 사이의 열교환량은 식 (9)과 (13), (14)에 의해 표현되고 총 길이 L에 대해서 이 량을 적분해보면 아래와 같이 L²에 비례하는 식으로 표현된다.

$$\int_0^L q dx = \int_0^L 2\pi K(T_2 - T_1) dx = \frac{\pi K(Q + Q_0)}{MC_p} L^2 \quad (16)$$

T₁과 T₂ 사이의 온도차가 항상 존재하므로 이러한 열교환 q를 전혀 없게 할 수는 없으나 냉각을 양쪽에서 함으로써 총 길이에서의 적분량을 0으로 만들 수는 있다. 양단에 냉각시스템을 배치하고 포머 내측을 통과하여 나온 LN2를 냉각시스템에서 냉각시킨 다음 케이블 리턴 유로로 주입하는 방식이다. 비교를 위하여 양단 냉각의 냉각용량의 총합은 편단 냉각의 냉각용량과 같다고 가정한다. 편단 냉각과 양단냉각의 개념도를 Fig. 4에 나타내었다.

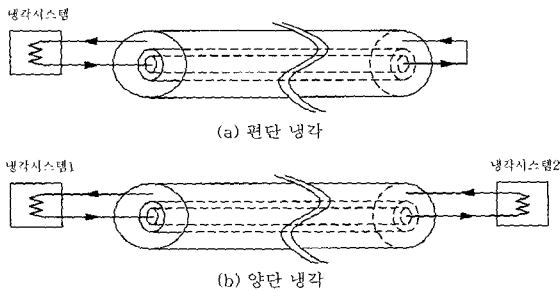


Fig. 4. Concepts of cooling methods.

5.1. 이분할 양단 냉각

식 (5)에서 표현된 총 냉각용량을

$$(x=0\text{에서의 냉각용량}) = (x=L\text{에서의 냉각용량}) = \frac{1}{2}(Q + Q_0) \cdot L \quad (17)$$

로 절반씩 나누어 양쪽 끝단에서 냉각하게 되면

$$(T_2 - T_1)_{x=0} = \frac{(Q + Q_0) \cdot L}{2MC_p}, \quad (T_1 - T_2)_{x=L} = \frac{(Q + Q_0) \cdot L}{2MC_p}, \quad (T_1)_{x=0} = T_0 \quad (18)$$

의 경계조건이 성립된다. 이 경계조건과 지배방정식 (1), (2), (3)에서 온도를 구하면

$$T_1 = -\frac{\pi K(Q + Q_0)}{(MC_p)^2} x^2 + \frac{1}{MC_p} \left[\frac{\pi K(Q + Q_0)}{MC_p} L + \frac{Q}{2} \right] x + T_0 \quad (19)$$

$$T_2 = -\frac{\pi K(Q + Q_0)}{(MC_p)^2} x^2 + \frac{1}{MC_p} \left[\frac{\pi K(Q + Q_0)}{MC_p} L - \frac{Q + 2Q_0}{2} \right] x + T_0 + \frac{Q + Q_0}{2MC_p} L \quad (20)$$

그리고 전 구간에서 열교환량을 적분해보면 다음과 같이 0이다.

$$\int_0^L q dx = \int_0^L 2\pi K(T_2 - T_1) dx = 0 \quad (21)$$

식(7)과 (8)를 더하면 (T₁-T₂)에 관한 1차 상미분 방정식이 나오는데 식 (21)의 결과는 식(18)의 경계조건을 구성할 때 이미 예견된 결과이다.

이분할 양단 냉각의 경우 케이블 내부의 온도분포의 예로서 총길이 L=800m의 경우의 온도분포를 Fig.5에 나타내었다. L=800m의 경우는 편단 냉각의 경우는 불가능한 냉각길이로서 L=450m의 편단 냉각의 경우보다 오히려 최고온도가 낮게 발생함을 알 수 있으나 x=L에서 T₂에서 발생하는 최저온도가 입구온도보다 떨어진 것을 유의할 필요가 있다.

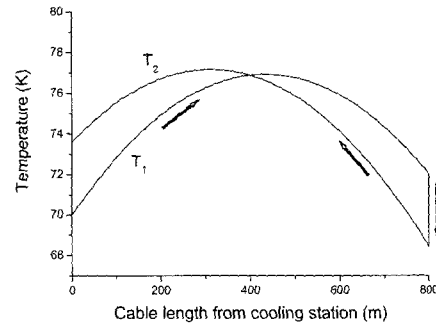


Fig. 5. LN2 temperature distribution in the cable of L=800m. (two-side cooling, even cooling capacities)

최장 냉각 길이를 구하기 위하여 케이블 내부 LN2의 최고 온도와 최저온도를 구해야 한다. 이때 최저온도를 구해야 하는 이유는 (T₂)_{x=L}이 T₀보다 작기 때문에 온도의 최소값을 기준온도로 잡고 입구측 온도 T₀를 조정하는 형식으로 운전조건을 잡아야 하기 때문이다. 온도 최소값이 줄어드는 경우 냉동기의 효율이 감소하게 되기 때문에 온도의 최소값을 기준온도로 잡고 입구측 온도 T₀를 조정하는 형식으로 운전조건을 잡게 된다. 따라서 최장 냉각길이를 구하는 기준은 케이블 내부 LN2의 최고온도와 최저온도의 차이가 10K미만이라는 조건에서 구해지게 된다.

T₁에서의 최대온도는 (T₁)_{x=L} 또는 0 < x < L사이에서 T₁의 극점에서 발생하게 된다.

$$T_{1max} = (T_1)_{x=L} = \frac{QL}{2MC_p} + T_0 \quad L < 67m$$

$$= \frac{\pi K(Q + Q_0)}{4(MC_p)^2} L^2 + \frac{QL}{4MC_p} + \frac{Q^2}{16\pi K(Q + Q_0)} + T_0 \quad L > 67m \quad (22)$$

한편, T₂에서의 최대온도는 (T₂)_{x=0} 또는 0<x<L사이에서 T₂의 극점에서 발생하게 된다.

$$T_{2max} = (T_2)_{x=0} = \frac{Q+Q_0}{2MC_p}L + T_0 \quad L < 177m$$

$$= \frac{\pi K(Q+Q_0)}{4(MC_p)^2}L^2 + \frac{QL}{4MC_p} + \frac{(Q+2Q_0)^2}{16\pi K(Q+Q_0)} + T_0$$

$$L > 177m \quad (23)$$

케이블 내부 LN2의 최소온도는 아래와 같다.

$$T_{min} = (T_2)_{x=L} = -\frac{QL}{2MC_p} + T_0 \quad (24)$$

편단 냉각의 경우와 비교하기 위하여 케이블 내부 온도의 최대값 T_{max}와 최소값 T_{min}의 차이를 10K 미만, 즉, T_{max}-T_{min} < 10K 를 만족하는 최대 냉각가능 길이를 구해보면 아래와 같다.

$$L_{max} = 866m$$

편단 냉각의 경우와 비교하면 최장 냉각길이가 482m에서 847m로 약 2배 증가한 것을 알 수 있다.

5.2 최적 양단 냉각

위에서 설명한 냉동용량을 이분할로 나눈 양측 냉각이 편단 냉각의 경우보다 케이블 내부의 LN2 온도의 최대값을 낮추는데 유리하지만 최적이라고는 단언할 수 없다.

케이블 내부의 LN2 온도의 최대값을 최대로 낮출 수 있는 양측의 냉각용량을 배분비를 찾기 위해서 x=0에서의 냉각용량을 R₁, x=L에서의 냉각용량을 R₂로 두자. 이때 R₁과 R₂의 관계는 총 냉동용량이 케이블 내에서의 총 열침입과 총 발열량의 합으로 일정하므로 아래와 같다.

$$R_1 + R_2 = (Q+Q_0) \cdot L \quad (25)$$

따라서 경계조건은

$$(T_2 - T_1)_{x=0} = \frac{R_1}{MC_p}, \quad (T_1 - T_2)_{x=L} = \frac{R_2}{MC_p}, \quad (T_1)_{x=0} = T_0 \quad (26)$$

으로 주어진다. 위의 경계조건 식 (26)과 지배방정식 (7), (8), (9)로부터 아래의 온도분포를 얻을 수 있다.

$$T_1 = -\frac{\pi K(Q+Q_0)}{(MC_p)^2}x^2 + \frac{1}{MC_p} \left[\frac{2\pi K \cdot R_1}{MC_p} + \frac{Q}{2} \right]x + T_0 \quad (27)$$

$$T_2 = -\frac{\pi K(Q+Q_0)}{(MC_p)^2}x^2 + \frac{1}{MC_p} \left[\frac{2\pi K \cdot R_1}{MC_p} - \frac{Q+2Q_0}{2} \right]x$$

$$+ T_0 + \frac{R_1}{MC_p} \quad (28)$$

T₁과 T₂의 온도의 극점을 구할 수 있는데 x=0과 x=L 사이에 위치하는 경우에 각각 T₁과 T₂의 최고온도가 된다.

$$T_{1max} = \frac{\pi K \cdot R_1^2}{(MC_p)^2(Q+Q_0)} + \frac{Q \cdot R_1}{2MC_p(Q+Q_0)} + \frac{Q^2}{16\pi K(Q+Q_0)} + T_0 \quad (29)$$

$$T_{2max} = \frac{\pi K \cdot R_1^2}{(MC_p)^2(Q+Q_0)} + \frac{Q \cdot R_1}{2MC_p(Q+Q_0)} + \frac{(Q+2Q_0)^2}{16\pi K(Q+Q_0)} + T_0 \quad (30)$$

케이블 내에서의 온도의 최대값 T_{max}는 케이블의 길이와 R₁, R₂의 배분비에 따라서 T_{1max}, T_{2max}, 또는 (T₂)_{x=0} 중 최대인 값이 된다. 그리고 케이블 내에서의 온도의 최소값 T_{min}은 케이블의 길이와 R₁, R₂의 배분비에 따라서 (T₁)_{x=0} 와 (T₂)_{x=L}의 최소값이 된다. 최장 냉각길이 근치의 장치의 경우에는 명확히 T_{1max}, T_{2max} 중에 최대값이 발생하고 (T₁)_{x=0} 와 (T₂)_{x=L} 중에 최소값이 발생한다.

T_{max}와 T_{min}의 차이가 최소가 되는 R₁과 R₂가 최적 냉각용량이라고 할 수 있는데 이 값은 모든 경우의 수에 대해서 따져보면 (T₁)_{x=0}=(T₂)_{x=L}이 성립하는 R₁과 R₂가 최적 냉각용량이 된다. 이 과정은 매우 단순한 작업의 반복이므로 생략한다. 이때 R₁과 R₂는 아래와 같이 표현된다.

$$R_1 = \frac{Q+Q_0}{2}L + \frac{Q_0 L}{2 + \frac{4\pi KL}{MC_p}}, \quad R_2 = \frac{Q+Q_0}{2}L - \frac{Q_0 L}{2 + \frac{4\pi KL}{MC_p}} \quad (31)$$

위 식을 살펴보면 최적 냉각용량은 총 냉각용량의 이분할 냉각용량과 그 이외의 항으로 구성됨을 알 수 있다.

이 결과를 이용하여 케이블 내부 온도의 최소값과 최대값의 차이를 10K 미만, 즉, T_{max}-T_{min} < 10K 을 만족하는 최대 냉각가능 길이를 구해보면 아래와 같다.

$$L_{max} = 928m$$

최적 냉각용량을 적용한 경우 케이블 내부의 온도분포를 보기 위해 총길이 L=800m의 경우의 온도분포를 Fig. 6에 나타내었다. 이분할된 냉각용량을 적용한 경우인 Fig. 5와 비교해 보면 최적 냉각의 경우, 최소 온도인 (T₂)_{x=L}이 (T₁)_{x=0}와 같은 값을 가지고 최고온도와 최소온도의 차이가 줄어든다. 이분할 냉각의 경우인 Fig.5의 경우 최고온도와 최소온도의 차이는 8.5K이고 최적냉각의 경우인 Fig.6의 경우는 7.9K정도이다.

지금까지 PPLP의 열전도도가 알려진 두 값 중에 큰 값인 μ = 0.2 W/m/K인 경우 초전도 케이블 냉각 길이 장치화에 대하여 논의하였다. 그러나 μ = 0.05 W/m/K의 경우도 이상의 과정을 동일하게 적용할 수 있으며 양단 냉각의 경우가 편단 냉각의 경우보다 냉각 길이 장치화에 유리함을 알 수 있다.

양단 냉각이 온도 범위에 의한 냉각 길이의 제한치를 크게 증가시키는 것은 분명하지만 케이블 양단에 냉각시스템이 위치할 수밖에 없으므로 냉각시스템의 설치비용이 증가한다고 볼 수도 있다. 그러나 양단 냉

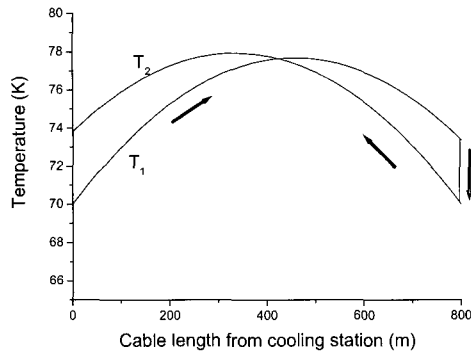


Fig. 6. LN2 temperature distributions in the cable of L=800m. (two-side cooling, optimal cooling capacities)

각의 경우 냉각 길이를 편단 냉각의 경우보다 2배정도 길게 할 수 있으므로 그러한 단점은 보상이 된다. 냉각 길이 장척화에 의해서 케이블 사이에 중간 접속함 없이 장척의 케이블을 설치할 수 있다는 것이 경제성의 관점에서 보았을 때 양단냉각의 장점이 되고, 또한 양단 냉각과 편단 냉각이 모두 가능한 길이의 범위에서는 케이블 내부의 온도를 낮게 유지함으로써 케이블 성능의 안정화를 꾀할 수 있다는 것이 또 하나의 장점이 될 수 있다.

6. 결 론

초전도 케이블에 있어서 케이블 내부 LN2 온도범위에 의한 제한은 압력범위에 의한 제한에 비하여 더욱 엄격하여 초전도 케이블 장척화에 가장 큰 걸림돌이다. 본 연구에서는 온도에 의한 냉각 길이 제한치를 높여 최장 냉각 길이를 늘이기 위하여 초전도 케이블의 양단에서 LN2를 냉동기와 열교환시키는 방법을 시험해 보았다.

최적 양단냉각의 경우 편단 냉각에 비하여 냉각 길이를 거의 2배정도 늘릴 수 있다는 사실을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] S. Fuchino, M. Furuse and N. Higuchi, "Longitudinal temperature distribution in superconducting power cables with counter-flow cooling", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.12, No.1, pp1339-1342, 2002.
 [2] C. H. Lee, C. D. Kim, K. S. Kim, D. H. Kim and I. S. Kim, "Performance of heat transfer and pressure drop in superconducting cable former", Cryogenics, Vol.43, pp.583-588, 2003.
 [3] S. Fuchino, N. Tamada, I. Ishii and N. Higuchi,

"Hydraulic characteristics in superconducting power transmission cables", Physica C, Vol.354, pp.125-128, 2001.

[4] S. Akita, K. Ishihara, J. Ogata and M. Nemoto, "Development of external cooling cryoresistive cable system (Part3)", Komae Research Laboratory Rep. No.T86081, 1987.

[5] T. Masuda et al., "Study of a 66kV 3-core high-Tc superconducting cable (2)", Proc. 11th Annual Conf. Power & Energy Soc. IEE Jpn., pp.592-593, 2000.

저 자 소 개



이창호 (李昶昊)

1972년 6월 20일생. 1994년 한국과학기술원 기계공학과 졸업, 1996년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2001년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 2001년4월~2002년3월 일본 큐슈대 기능물질연구소 연구원, 현재 LG전선(주) 기계연구소 선임연구원.



김도형 (金度亨)

1974년 1월 24일생. 1995년 한국과학기술원 기계공학과 졸업, 1998년 고려대 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 LG전선(주) 기계연구소 주임연구원.



김춘동 (金春東)

1971년 3월 14일생. 1994년 경희대 공대 기계공학과 졸업, 1996년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 LG전선(주) 기계연구소 선임연구원.



김균석 (金均錫)

1971년 00월 00일생. 1995년 한국과학기술원 항공공학과 졸업, 1997년 동 대학원 항공공학과 졸업(공학석사), 현재 LG전선(주) 기계연구소 선임연구원.



김익생 (金益生)

1962년 9월 15일생. 1985년 중앙대 기계공학과 졸업, 1987년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1990~1992년 한국기계연구원 연구원, 1993~1994년 한국전자통신연구원 연구원, 현재 LG전선(주) 기계연구소 선임연구원.