

초전도케이블 냉각유로의 열 및 유동 특성 해석

홍용주, 염한길, 김효봉, 고득용
한국기계연구원

The thermal & hydraulic analysis of the cooling passage for HTS power cable

Yong-Ju Hong, Han-Kil Yeom, Hyo-Bong Kim, Deuk-Yong Koh
Korea Institute of Machinery & Materials

yjhong@kimm.re.kr

Abstract - The thermal and hydraulic characteristics of the cooling passage for HTS power cable should be carefully investigated to get the highly reliable and economic operation. In this study, the pressure drop and temperature change of the coolant flowing the corrugated passage was estimated using the simple one-dimensional approach, and the temperature distribution in the radial direction was calculated. The results show the dependency of the mass flow rate, thermal conductivities on the cooling performance of the HTS cable.

1. 서 론

고온 초전도 케이블 냉각 시스템은 케이블의 냉각을 위한 냉각유로와 냉각유로의 한계 (cryogen)의 공급 및 순환을 위한 단말 저온조 (terminal cryostat), 냉매 강제 순환계로 구성된다.

초전도 케이블은 선재가 초전도상태가 유지될 수 있도록, 극저온으로 유지되어야 할 뿐만 아니라, 안정성 및 경제성을 도모하기 위해 외부로부터의 열침입을 최소화할 수 있도록 하여야 한다. 이를 위해 진공단열 및 적절히 가압된 과냉각 상태의 액체질소가 사용된다.

본 연구에서는 초전도 케이블 냉각유로에서 발생하는 액체질소의 압력강하 및 열 특성의 변화를 고찰하고, 운전변수의 변화에 의한 영향을 고찰하기 위해, 열유동 해석을 수행하였다.

2. 본 론

해석대상인 초전도 케이블내의 냉각유로는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 길이 250 m, 케이블 외경 80 mm이다. 이와 같이 중횡비가 매우 큰 유로 내에서 발생하는 유동은 그 유로의 기하학적인 특성으로 인해 반경방향의 유동이 케이블 길이방향 즉 축방향의 유동에 비해 매우 미약하

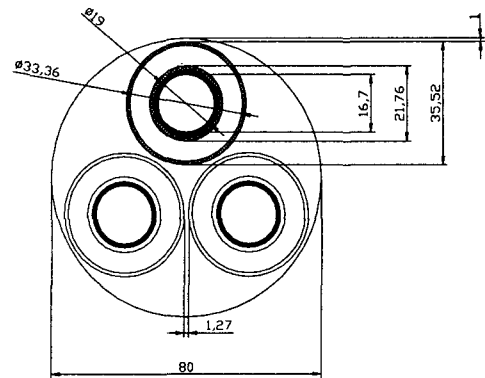


Fig. 1. Cross section of the HTS power cable

고, 길이가 유동의 발달에 충분한 길이이기 때문에, 주로 1차원적인 유동특성을 나타낸다. 케이블 내의 냉각유로의 구조는 원주방향 120도에 대해 대칭적인 구조를 지니고 있다. 또한 냉각유로를 통한 액체질소의 공급은 케이블내의 core를 통해 공급된 과냉각된 액체질소가 케이블에 의해 발생된 열부하를 대류열전달을 통해 냉각하고, 외부 순환유로를 통해 순환되면서 주위로부터의 열침입을 차단하는 구조를 채택하고 있어, 해석은 원주방향 120도에 대해 1차원 해석을 수행하였다. 또한 본 연구에서는 1차원 해석을 통해서 구할 수 없는 케이블 단면 내의 온도분포를 구하기 위해, 3차원 열유동해석을 수행하였다.

2.1 냉각유로의 압력강하 및 열 특성

초전도 케이블을 통과하는 액체질소의 열 및 유동에 대한 1차원 정상상태에 대한 지배방정식들은 다음과 같은 연속방정식, 운동량방정식 및 에너지방정식으로 나타낼 수 있다. [1]

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(P + \rho U^2) + \frac{f}{D} \frac{1}{2} \rho U |U| = 0 \quad (2)$$

$$\rho U \frac{\partial}{\partial x} \left(H + \frac{1}{2} U^2 \right) = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

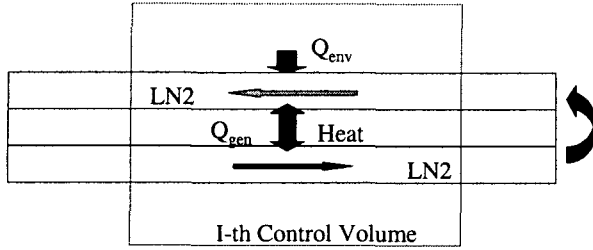


Fig. 2. Schematic diagram of cooling mechanism in the cable

한편 케이블에 대해서는 다음과 같은 에너지 방정식이 적용된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{eff,ax} \frac{\partial T}{\partial x} \right) = Q + q_{gen} \quad (4)$$

Fig. 2는 케이블 열전달 기구에 대한 개념도이다. 냉각부하는 주위로부터의 열침입 및 cable에서 발생하는 AC Loss 등으로 나눌 수 있으며, 케이블에 의해 발생한 열은 전도열전달을 통해 공급유로와 순환유로의 액체질소로 전달된다. 이때 케이블 내의 열전도도는 케이블이 former(BI2223), PPLP(Poly Propylene Laminated Paper), SUS, PPLP의 3개의 재질이 4개의 층으로 적층되어 있으므로, 열저항의 개념을 사용하면 각각의 재질의 열전도도 및 단면적의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{eff,ax} = \frac{(k_1 A_1 + k_2 A_2 + k_3 A_3 + k_4 A_4)}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4} \quad (5)$$

또한 케이블 내부의 액체질소 공급 유로 및 순환유로는 굴곡이 있는 매우 복잡한 형태의 유로로, 유동저항 및 열전달 특성은 유로 내부에서 발생하는 와류 및 재순환, 유동 재부착 등으로 인해 굴곡이 없는 경우보다 크게 증가되는 것으로 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는 유동저항 및 열전달 특성으로 실험결과[2] 및 Dittus-Boelter 관계식[3]을 사용하였다. 여기서 요철(rib)의 높이는 1.2 mm, 피치는 8 mm이다. 이때 공급유로와 순환유로를 연결하는 순환부에서 발생하는 압력강하는 케이블의 길이가 매우 길기 때문에 상대적으로 발생하는 압력강하가 작을 것으로 판단되어 무시하였다.

- 공급유로

$$f = 2.596 \left(\frac{e}{d_h} \right)^{1.08} \left(\frac{p}{d_h} \right)^{-0.57} \quad (6)$$

$$Nu = 0.2642 \left(\frac{e}{d_h} \right)^{0.57} \left(\frac{p}{d_h} \right)^{-0.54} Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (7)$$

- 순환유로

$$f = 2 \left(\frac{0.046}{Re^{0.8}} \right) \quad (8)$$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (9)$$

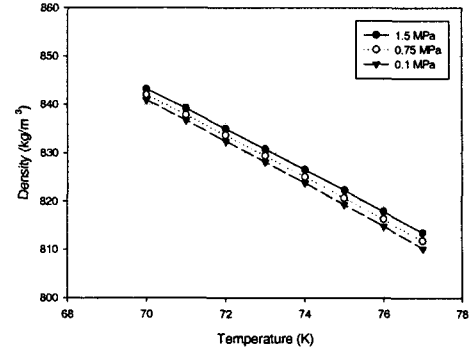


Fig. 3. Density of the subcooled nitrogen

액체질소(LN2)는 공급유로를 통해 cable 내로 공급되면서 케이블과의 열전달 및 외부로부터의 열부하로 인해 그 온도가 상승하게 된다. 이와 같은 대류열전달 과정을 통해 발생하는 액체질소의 온도상승은 액체질소의 물성치(밀도, 점성계수, 열전도도, 등)의 변화를 수반하게 된다. Fig. 3은 일정한 압력조건에서 온도변화에 따른 액체질소의 밀도를 나타낸 그림이다. 공급유로로 공급된 액체질소는 열전달 과정을 통해 온도의 상승 및 압력강하를 수반하게 된다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 일반적으로 액체는 비압축성이기 때문에 압력의 변화에 따른 밀도의 변화는 온도변화에 비해 매우 작다. 따라서 본 연구에서는 액체질소의 밀도를 온도만의 함수로써 고려하였다.

해석을 위한 경계조건 및 각재질의 열전도도는 다음과 같다. 이때 공급압력 및 액체질소의 입구온도는 각각 일정한 조건에 대해 공급유량을 변화시켜가면서 각각의 경우에 대한 냉각특성 변화를 고찰하였으며, PPLP 재질의 열전도도가 미치는 영향을 고찰하기 위해 PPLP의 열전도도가 각각 0, 0.05, 0.2 W/mK인 경우에 대해 해석을 수행하였다.

- 입구조건

공급압력 : 1.5 MPa

공급온도 : 70K

공급유량 : ① 0.1, ② 0.2, ③ 0.3 kg/s

- 열부하조건

AC Loss : 2.3W/m

Cryostat Loss : 1.5 W/m

기타 : 1.2 W/m

- 열전도도

PPLP : ① 0, ② 0.05, ③ 0.2 W/mK

SUS304 : 7 W/mK

BI2223 : 7 W/mK

Fig. 4는 액체질소 공급유량 0.1, 0.2, 0.3 kg/s일 때 압력강하를 나타낸 그림이다. 해석결과 유량 0.1kg/s의 경우 약 0.05 MPa의 압력

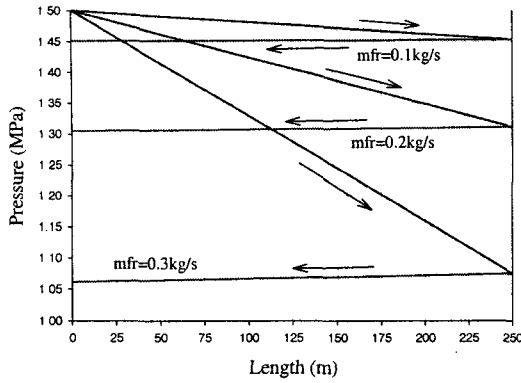


Fig. 4. Pressure distribution of the LN2 with different mass flow rate

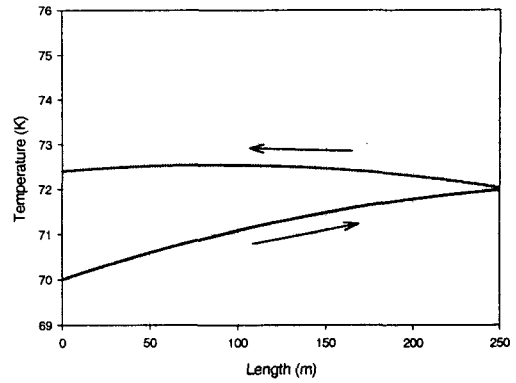


Fig. 5. Temperature distribution of the LN2 ($m = 0.3 \text{ kg/s}$, PPLP $k = 0.05 \text{ W/mK}$)

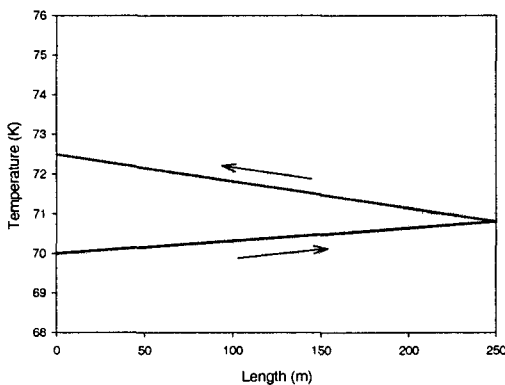


Fig. 5. Temperature distribution of the LN2 ($m = 0.3 \text{ kg/s}$, PPLP $k = 0 \text{ W/mK}$)

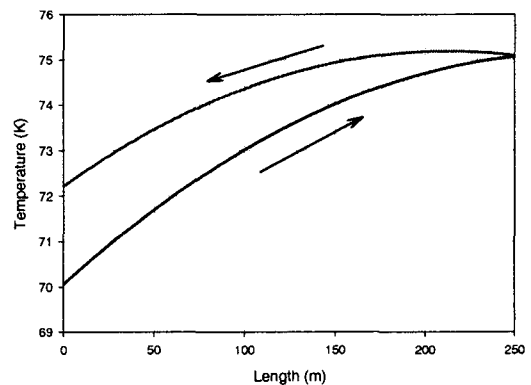


Fig. 7. Temperature distribution of the LN2 ($m = 0.3 \text{ kg/s}$, PPLP $k = 0.2 \text{ W/mK}$)

강하가, 0.2kg/s의 경우 약 0.2 MPa, 0.3kg/s의 경우 0.45 MPa의 압력강하가 발생하는 것으로 나타나 유량증가에 제곱에 비례하는 압력강하가 발생하는 것으로 나타나, 액체질소의 공급유량의 증가에 따라 유로내에서 발생하는 압력강하는 급격한 증가를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 냉각유로 내에서 발생하는 압력강하는 대부분 공급유로에서 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같은 해석 결과는 공급유로가 굴곡이 있는 유로이고, 공급유로에 대해 적용한 유동저항의 관계식이 유량에 대한 함수가 아닌 기하학적 형상만의 함수로 구성되어 있기 때문으로 판단되며, 유동특성이 높은 Re수 영역에서는 일반적으로 관유동의 경우 유동저항이 Re수의 영향이 없이 벽거칠기만의 함수로 결정되어, 압력강하가 유량의 제곱에 비례하고, 벽면의 거칠기가 커질수록 유동저항이 일정하게 되는 영역이 Re수가 작은 쪽으로 천이되는 점을 고려할 때, 비교적 타당한 해석결과로 판단된다.

Fig. 5는 PPLP의 열전도도가 0, 즉 완전히 단열된 경우 액체질소 공급유량 0.3 kg/s시의 액체질소의 온도변화를 나타낸 그림이다. 단열된 PPLP 층에 의해 cable내의 반경방향 열전달이 차단되기 때문에 온도의 상승은 선형적으로 나타나며, 공급유로에서 1K 미만의 온도상승이 발생하는 것으로 예측되어 순환유로에서의 온도상승

이 더 크게 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 PPLP의 열전도도가 0.05 W/mK, 액체질소 공급유량 0.3 kg/s시의 액체질소의 온도변화를 나타낸 그림이다. 순환유로를 통해 순환되는 액체질소의 온도는 정상상태이기 때문에 Fig. 5의 단열의 경우와 동일하지만, AC loss 및 기타 열부하로 인해 공급유로의 온도분포는 선형적인 분포로부터 다소 벗어나, 입구 주위에서 다소 가파른 온도상승을 나타내고 있다. 한편 순환유로에서는 유로 시작부위에서는 다소의 온도 상승이 수반되나, 공급유로의 입구에 근접할수록 공급유로로 공급되는 저온의 액체질소와의 열전달을 통해 온도의 강하가 발생함을 알 수 있다. 공급유로와 순환유로를 통해 유동하는 액체질소는 단열된 경우 순환유로 출구에서의 온도가 최고온도로 나타난 반면 PPLP 열전도도가 0.05 W/mK의 경우 순환유로에서 최고온도가 발생하는 것으로 예측되었고, 공급유로에서의 승온이 2K정도로 나타나 순환유로에서 보다 더 크게 발생하는 것으로 예측되었다.

Fig. 7은 PLPP의 열전도도가 0.2 W/mK, 액체질소 공급유량 0.3 kg/s시의 액체질소의 온도변화를 나타낸 그림이다. 해석결과는 공급유로에서 약 5K의 온도상승이 나타나, 열전도도가 낮은 Fig. 5 및 6에 비해 공급유로에서 매우 큰 온도상승이 발생하는 것으로 예측되었다. 순환유

로에서는 공급유로와의 열전달을 통해 액체질소의 온도가 크게 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 냉각유로 내의 액체질소의 최고온도는 질소의 NBP(Normal Boiling Point)인 77K 이하로 나타났고, 압력강하가 발생하는 출구의 압력이 1.0 MPa 이상으로 나타나, Cavitation 및 상변화는 발생하지 않는 것으로 예측되었다.

2.2 케이블 내 온도분포 해석

케이블 단면 내의 온도분포를 구하기 위해, 3차원 열유동해석을 수행하였다. 이때 해석은 1차원 해석과는 달리 공급유로가 매끈한 단면을 가지는 것으로 가정하였으며, former(BI2223), PPLP, SUS, PPLP로 구성된 모든 층에 대해 격자를 생성하여 열전도를 고려하였으며, 상용 열유동해석 프로그램인 FLUENT™를 사용하여 해석을 수행하였다. Fig. 8 및 9는 액체질소 공급유량 0.3 kg/s의 경우 각각 PPLP의 열전도도가 0.05 및 0.2 W/mK인 경우에 대해 2차원 열전달 해석을 수행한 결과 구한 결과로, 공급유로 입구로부터 축방향 거리 62.5, 125, 187.5m인 단면에서 반경방향으로의 온도분포를 나타낸 그림이다.

해석 결과, 두 경우 모두 단면 내 각각의 유로에서 액체질소의 온도차는 거의 발생하지 않으며, cable의 온도분포는 공급유로와 순환유로의 액체질소 온도에 의해 결정되며, former 및 내

부의 PPLP 층에서는 PPLP의 낮은 열전도도로 인하여 내부의 공급유로 액체질소와 거의 비슷한 온도를, SUS 층에서는 선형적인 분포를 나타내었다. 또한 SUS 층의 온도구배는 공급유로 입구 측인 62.5m인 단면에서 가장 크게 나타나, 이 단면에서의 순환유로에서 공급유로로의 열유속 즉 열전달이 다른 단면에서 보다 더 활발한 것으로 판단된다.

3. 결 론

초전도 케이블 냉각유로에서 발생하는 액체질소의 압력강하 및 열 특성의 변화를 고찰하고, 운전변수의 변화에 의한 영향을 고찰하기 위해, 열유동 해석을 수행하였다.

해석결과 단열재인 PLPP의 열전도도는 액체질소의 온도에 큰 영향을 미침을 알 수 있으며, 열전도도가 클수록 즉 단열특성이 저하될수록 액체질소의 온도상승이 크게 발생함을 알 수 있다. 또한 액체질소의 공급유량 역시 냉각특성에 큰 영향을 미치며, 정상상태, 일정 부하조건에서 액체질소 입출구의 온도차는 공급유량에 반비례하는 관계를 나타내게 된다.

따라서 액체질소의 공급유량은 순환되는 액체질소의 출구온도를 결정하는 주요인자가 되며, PLPP 층의 열전도도는 냉각유로 내부의 액체질소의 최고온도를 결정하는 인자로 작용함을 알 수 있다.

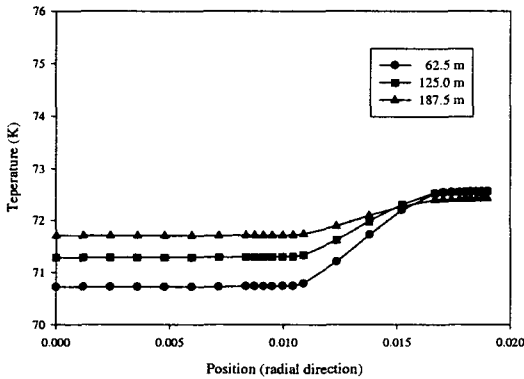


Fig. 8. Temperature distribution in the radial direction (PPLP $k=0.05$ W/mK)

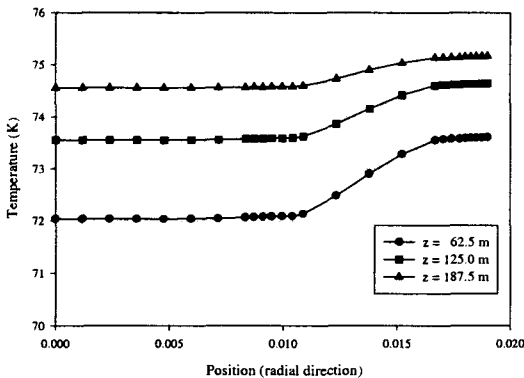


Fig. 9. Temperature distribution in the radial direction (PPLP $k = 0.2$ W/mK)

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

[참 고 문 헌]

- (1) Philip Thomas, Simulation of Industrial Processes for Control Engineers, Butterworth Heinemann, 1999
- (2) 성기철, 배전급 초전도 전력케이블 개발, 2003 DAPAS Program Workshop, 차세대초전도 응용기술개발사업단, 2003
- (3) J. P. Holman, Heat Transfer, McGraw-Hill Book Company, 1986
- (4) FLUENT Inc., FLUENT User's Guide, 2001