

고온초전도케이블 단말 저온조의 열유동해석

김도형, 조승연, 양형석, 김동락, 김승현
한국기초과학지원연구원

Numerical Analysis of Thermal Flow in HTS Cable Termination

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

kimdh@kbsi.re.kr

Abstract - Maintaining low temperature is very important in operating HTS cable termination in which Joule heat is generated at current lead. In this study, numerical analysis using FLUENT is performed to find an optimized flow conditions for effective cooling of HTS cable terminal system using subcooled liquid nitrogen(LN₂) as refrigerant. The variables considered here are mass flow rate of LN₂, location of inlet and diameter of inlet and outlet. Simplified models are investigated under these variables. Based on maximum temperatures in the cryostat, the configuration for effective cooling of HTS cable was determined.

1. 서 론

고온초전도 전력케이블 단말을 저온 상태로 유지하는 것은 단말의 정상적인 운전상태를 유지하는데 있어서 대단히 중요하다. 단말의 구조는 전류도입부(current lead)와 고온초전도케이블과 전류도입부를 연결하기 위한 모선(bus bar)을 연결하기 위한 구조로 되어 있고, Fig. 1에서는 본 연구에서 열유동해석을 적용할 단말 저온조의 단면 형상을 보여주고 있다. 단말 내부로의 열침입은

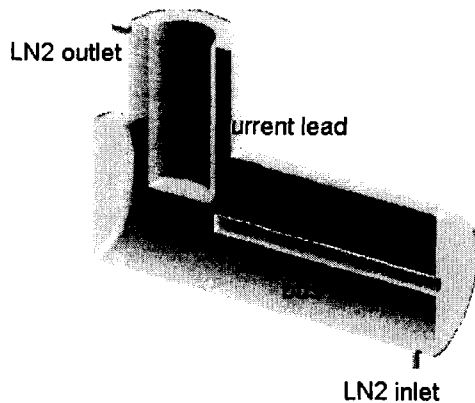


Fig. 1. Physical configuration of LN₂ vessel in HTS cable Termination.

전류도입부에 의한 것이 대부분을 차지하는데, 열침입에 대한 온도상승을 억제하기 위하여 과냉각 LN₂(subcooled LN₂)를 강제 순환시키게 된다. 그러므로, 저온조 내부의 압력과 질량유량, 입구에서의 온도등에 따라 냉각성능에 차이를 보이게 될 것을 예상할 수 있으며, LN₂ 입·출구의 위치는 저온조 내에서의 유선에 크게 영향을 미치게 될 것이므로 역시 효율적냉각과 관련해서 반드시 고려해 보아야만 할 사항이 될 것이다.

본 연구에서는 상기한 냉각관련 요소들 중에서 LN₂의 입·출구 포트의 위치와 직경, 저온조내의 압력, 공급되는 LN₂의 질량속도에 따른 여러 조건들에 대하여 FLUENT를 이용한 해석을 통하여 효과적인 냉각을 위한 단말 저온조의 형상을 구한다.

2. 본 론

2.1 경계조건

2.1.1 유동조건

단말 저온조의 설계를 위한 기초자료를 제공하기 위하여 전류도입부와 모선부의 형상을 단순화 하였다. 해석을 수행한 단말 저온조를 Fig. 2에서 보인다. 유동 파라미터로 선택한 LN₂ 입·출구 포트의 직경을 D1과 D2로, 그 위치를 L1과 L2로 정의하고, 이를 Fig. 3에 나타내었다..

열유동해석을 위하여 LN₂의 입·출구 포트의 직경과 위치, 저온조 내부의 압력 등의 각 유동 조건들에 의해 구분되어진 4가지 경우들을 Table

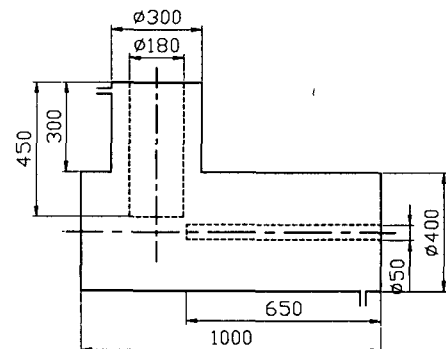


Fig. 2. Dimension of LN₂ vessel.(unit:mm)

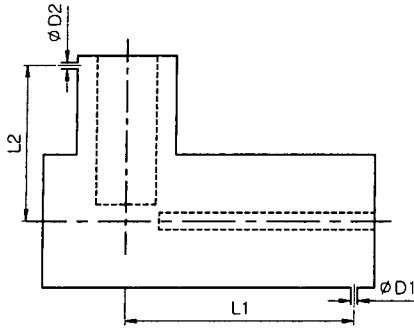


Fig. 3. Definition of the parameters

1에 정리하였다. 여기서, 압력은 단말 저온조의 설계 압력과 최저 상태의 압력을 고려하여 적용하였으며, 입구로는 70K의 과냉각 LN₂가 공급되는 것으로 하였다.

Table 1. The parameters of four simulation cases.

| | D1 | L1 | D2 | L2 | 압력 (bar) |
|--------|----|-----|----|-----|----------|
| CASE 1 | 30 | 685 | 30 | 465 | 10 |
| CASE 2 | 20 | 690 | 20 | 470 | 10 |
| CASE 3 | 20 | 690 | 20 | 470 | 3 |
| CASE 4 | 20 | 150 | 20 | 470 | 3 |

2.1.2 열침입 조건

저온조 내부로의 열침입은 아래의 식으로 나타낼 수가 있다.

$$\Delta Q_{in} = \Delta Q_{current\ lead} + \Delta Q_{bus\ bar} + \Delta Q_{surface} \quad (1)$$

실제 단말에서는 전류도입부가 상온의 대기에 노출되고, 그 외에도 저온조를 지지하기 위하여 진공단열부 내에 설치한 지지대나 LN₂ 파이프등 상온의 열원부로의 연결구조물들에 의해 저온조의 표면을 통하여서도 열침입이 있으나, 본 해석에서는 이러한 열침입량을 예상하여 전류도입부 발열량에 추가하므로써 열침입에 대한 경계조건을 단순화하였다. 즉, $\Delta Q_{surface} = 0$. Table 2는 전류도입부와 모선부에서의 예상되는 발열량을 나타내고 있다. 여기서, 모선부에서의 발열량은 아래식으로부터 계산될 수 있다.

$$\Delta Q_{bus\ bar} = I^2 R = I^2 \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

여기서, I =current, R =resistance, ρ =resistivity of Copper, L =length of bus bar, A =sectional area of bus bar이다. 실제 통전시에 흐르게 될 전류를 1260A로 가정하고, 모선부의 재료로서 구리(RRR-100)을 사용하였을 경우에 대하여, 1기압에서의 LN₂의 포화온도인 77K에서의 비저항값을 이용하여 발열량을 계산하였다.

Table 2. Heat load.

| | current lead | bus bar |
|--------------|--------------|---------|
| Heat load(W) | 200 | 1.1 |

2.2 결과 및 고찰

2.2.1 유동장

단말 저온조의 유동구조를 알아보기 위하여 입구속도가 2m/s인 경우들에서의 유선을 Fig. 4에 나타내었다. 그림으로부터 CASE 1에서는 큰 유량으로 인하여 LN₂가 저온조의 벽면에 부딪혀서 되돌아 나와 전류도입부의 아래의 구역으로 흐름이 형성되는 것을 알 수 있는데, 상대적으로 직경이 작은 CASE 2, 3은 CASE 1에 비해 유동장내에서의 흐름이 원활하지 못한 것을 알 수 있다. 전류도입부 상부에서의 냉각과 관련한 흐름을 고려해 보면 CASE 1, 2, 3 모두, 출구의 반대쪽에서의 흐름이 미약함을 알 수 있고, 그로인해 고온인 구역이 형성되는 것을 예상할 수 있다. CASE 4의 경우는 입구의 위치로 인하여 저온조 내부에 고르게 흐름이 형성되는 것을 볼 수 있고, 특히, 주된 발열부인 전류도입부 면을 따라 다른 경우들에 비해 매우 활발한 흐름이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 이로부터, 단말 저온조의 냉각에 있어서 다른 경우들에 비해 보다 나은 효과를 기대할 수 있다.

2.2.2 저온조 내부의 온도

저온조 내의 일정한 열하중에 대하여 각 유동조건에서의 열유동해석의 결과를 비교해보기 위해 저온조 내부에서의 최고온도를 기준으로 삼았다. Table 3은 각 경우들에 대한 결과를 보여주고 있는데, 모든 경우에서 입구속도가 증가할수록, 즉, 질량유량이 증가할수록 최고온도가 낮아지는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 한편, CASE 1은 CASE 2보다 입구 직경이 더 크기 때문에 같은 입구속도일 때, 질량유량도 더 커지게 된다. 그렇지만, 최고온도는 CASE 2에 비해 약간 높은 것을 알 수 있다. 이를 구별해서 보이기 위해 최고온도의 입구속도와 질량유량에 대한 변화를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 입구의 위치가 CASE 1이나 CASE 2와 같은 형상에서는 질량유량의 증가가 저온조의 냉각효과를 개선시키지 못하는 것을 확인할 수가 있다. CASE 3은 CASE 2와 압력을 제외하고는 모든 유동조건이 동일한 경우로서, 압력의 변화는 냉각효과에는 크게 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다. CASE 4는 입구의 위치가 모선부와 전류도입부가 연결되는 지점과 가까운 곳에 위치하는 경우로서 입구로 유입되는 액체질소가 강한 모멘텀에 의해 단말 저온조의 윗면까지 강한 흐름을 이루고, 전류도입부 전체를 감싸는 유동을 이루게 되어 다른 경우보다 큰 냉각효과를 기대할 수가 있게 된다. 그러므로, 저온조 내의 발열부를 효과적으로 냉각할 수 있는 적절한 입구의 위치를 선정하는 것이 효과적이고 경제적

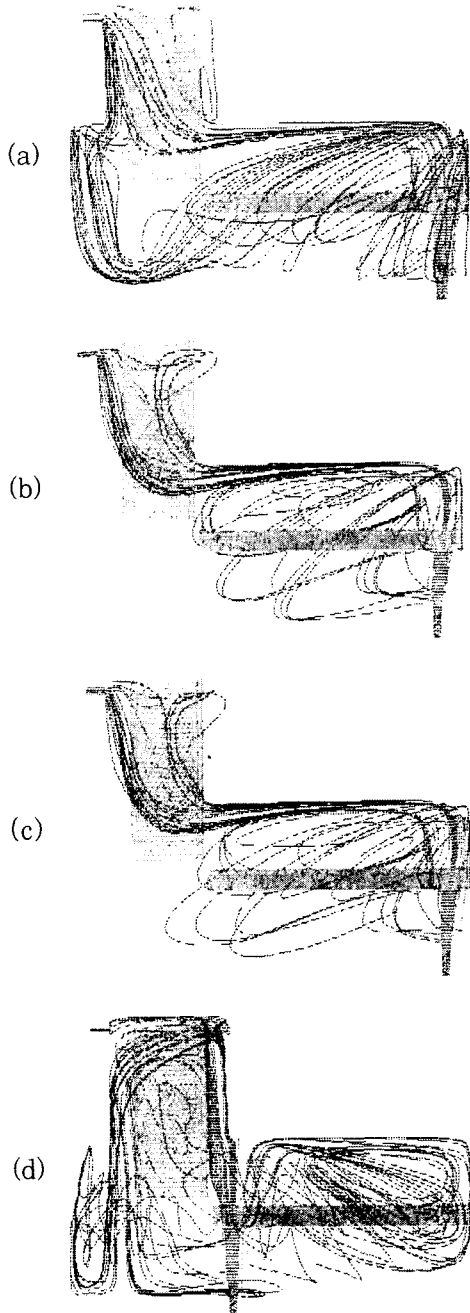


Fig. 4. Pathline plots : (a) CASE 1, (b) CASE 2, (c) CASE 3, (d) CASE 4.

인 냉각을 얻기 위해 중요하다. Fig. 7은 입구속도가 2m/s인 경우에 대하여 저온조의 중심단면, 전류도입부와 모선부의 표면에서의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 그림으로부터 입구의 위치에 따라 저온조 내부의 온도분포가 구별되는 것을 확인할 수 있다. CASE 4의 경우는 Fig. 4에서 보인 바와 같이 입구에서의 강한 모멘텀을 가진 액체질소가 저온조의 상부면으로 이동하여 전류도입부의 주위로 흐름을 만들어 냉각하기 때문에 CASE 1, 2, 3에서 고온으로 나타나는 지점이 없어지고, 그와는 달리 고온인 지점이 전류리드의 앞뒤면으로 중·하부에 걸쳐 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만,

Table 3. Maximum temperatures for each case with respect to inlet velocities.

| $T_{max}(K)$ | inlet velocity(m/s) | | | | |
|--------------|---------------------|------|------|------|------|
| | 0.1 | 1 | 2 | 3 | 5 |
| CASE 1 | 134 | 87.8 | 84.2 | 79.5 | 76.3 |
| CASE 2 | 124 | 86.9 | 81.6 | 78.2 | 75 |
| CASE 3 | - | - | 81 | 77.8 | - |
| CASE 4 | 96.8 | 76.2 | 73.3 | 72.3 | 71.4 |

고온인 지점의 온도도 다른 경우들에 비해서는 매우 낮다. 또한, 전류도입부에서의 원활한 열전달로 인해 입구 왼쪽의 유동영역에서 다른 경우들의 비해 온도가 약간 상승되는 것을 알 수 있다.

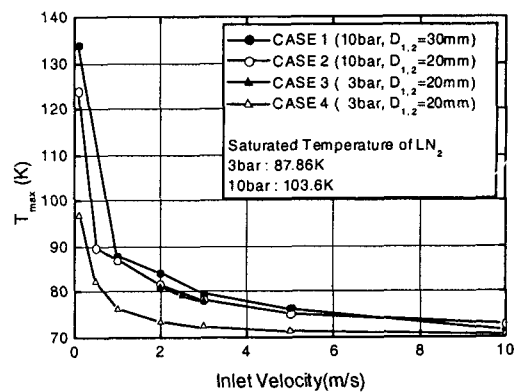


Fig. 5. Maximum temperature plots with respect to inlet velocity.

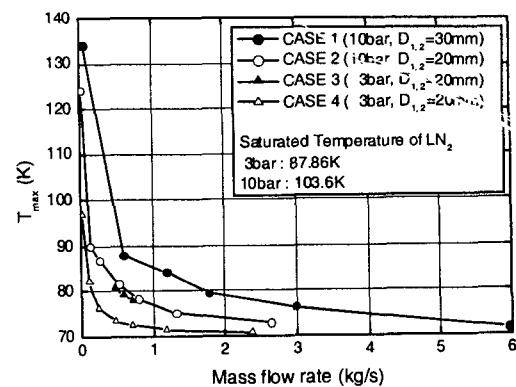
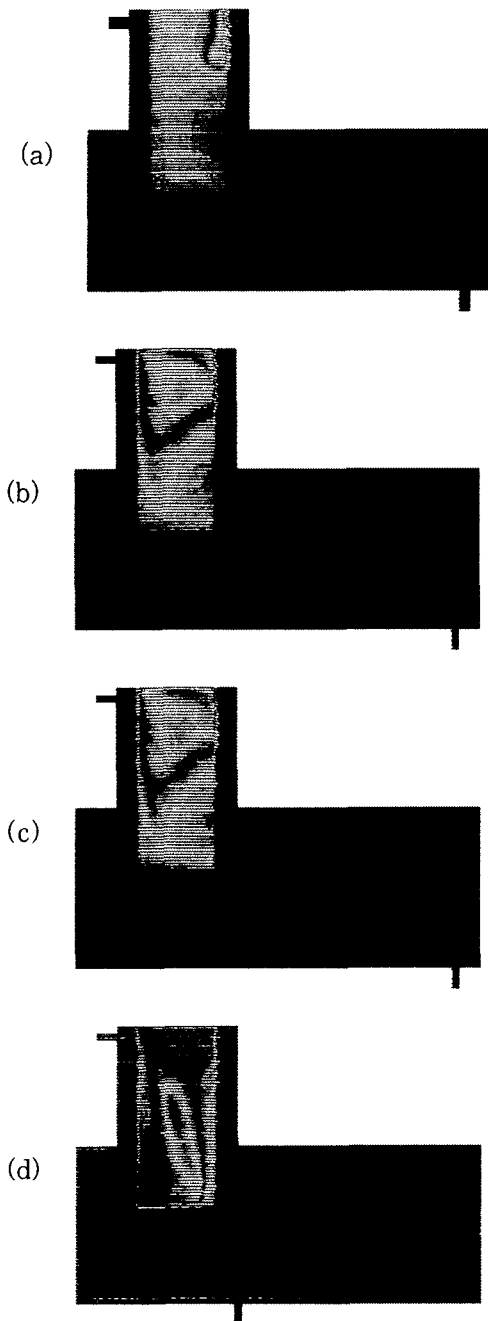


Fig. 6. Maximum temperature plots with respect to mass flow rate.

3. 정 리

단말 저온조 내부에서의 압력과 입·출구 조건 및 입구의 위치에 따른 저온조 내의 최적냉각조건을 FLUENT를 이용하여 해석하였다. 주된 열원은 전류도입부에서 발생한다고 가정하였으며, 전력케이블의 도입부에서도 발열이 있는 것으로 예상하고 계산에 적용이 되었지만, 전류도입부의



발열량에 비해서는 매우 낮았다. CASE 1과 CASE 2에 대한 비교를 통해 이 경우들과서와 같은 입구 위치에서는 질량유량이 전체 냉각효과에 미치는 영향이 크지 않다는 것을 알 수 있었다. CASE 1, 2, 3에서 전류리드의 상부이며 출구의 반대쪽인 영역에서 액체질소의 미약한 흐름으로 인하여 저온조 내부에서 온도가 가장 높은 지점이 형성되는 것을 알 수 있었다. 한편, 입구의 위치를 변경하여 전류리드 주위로 액체질소의 활발한 흐름을 형성해 준 CASE 4의 경우에는 효율적이고 경제적인 냉각효과를 얻을 수 있었다. 이로부터 저온조 내부의 발열부에서의 냉매의 흐름을 활성화할 수 있는 유동조건을 찾는 것이 단말 저온조의 냉각 효과를 개선하기 위해 우선적으로 고려되어야만 하는 사항임을 알 수 있다.

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

Fig. 7. Coutour plots of temperature field on center plane including the surface of current lead and bus bar ; (a) CASE 1, (b) CASE 2, (c) CASE 3, (d) CASE 4.