

## 적층형 고온초전도 전류도입선의 열 특성 해석

### Heat Characteristic Analysis of Stacking Type HTS Current Lead

두호익\*, 임성우\*, 홍세은\*, 윤기웅\*, 한병성\*

(Ho-Ik Du, Seong-Woo Yim, Se-Eun Hong, Ki-Woong Yoon, Byoung-Sung Han\*)

#### Abstract

Current lead is one of the first proposed devices for the application of High Temperature-Superconductor(HTSC). The current lead provides high current for electrical machine using superconductor from room temperature. Its characteristics that is zero resistance and low heat transfer rate under critical temperature lead to research for the replacement of existing current lead with HTSC. In this paper, we investigated the temperature distributions of stacking type and rod type current lead with each cross-section area and length using Nastran program and compared each temperature distribution. It is obtained from this paper that stacking type current lead has flat temperature gradient and than rod type one and more stable operation as current lead is closely related with its cross-section area and length.

**Key Words** : stacking type current lead, temperature gradient, heat flux, cross-section area, cross-section length

#### 1. 서론

고온 초전도 전류도입선은 초전도체의 응용으로써 가장 먼저 제안된 기기라 할 수 있다. 이것은 상온에 위치한 전원으로 부터 극저온 하에서 동작하는 초전도 기기에 전류를 공급하기 위해 사용된다. 고온 초전도체를 전류도입선으로 이용할 경우, 액체질소 온도 이하에서 주울열 발생을 억제할 수 있으므로 기존의 상전도체 도입선에 비해 월등한 장점을 갖는다. 뿐만 아니라 고온 초전도체의 낮은 열전도율로 인하여 열손실 또한 줄일 수 있다는 특성을 지닌다. 이와 더불어 고온 초전도 전류도입선은 상온과

액체헬륨 사이를 연결하므로 도입선을 통한 열전도가 존재하고 켄치 시 발생할 수 있는 전류도입선 자체의 주울열 발생이 일어날 수 있으므로 헬륨 손실 또는 냉동 장치에 소요되는 에너지 비용을 줄이기 위해서는 열적인 특성 해석이 매우 중요하다 할 수 있다.

따라서 고온 초전도 전류도입선의 안정적인 동작을 이룩하기 위하여 단면적 변화형 전류도입선을 개념적으로 도시하고 열 특성 해석을 행하였다. 이를 위해 유한요소법을 기반으로 구축된 상용 프로그램인 Nastran을 사용해 도입선의 단면적 변화에 따른 열 분포를 명확히 해석하여 도입선 동작 시 열에 대한 도입선의 안정성을 추구하고자 하였다.

\* 전북대학교 전기공학과  
(전주시 덕진구 덕진동 664-14 전북대학교,  
Fax: 063-277-0918  
E-mail : heute777@hanmail.net )

#### 2. 이론적 배경

##### 2.1 도입선의 열평형 방정식

도입선의 설계와 해석은 상온으로부터의 열 전달, 통전전류에 의한 주열열 그리고 액체헬륨에 의한 냉각이 열평형을 이루어 안정적으로 동작하도록 하는 것을 말한다. 따라서 이들 세가지 사항을 열평형 방정식으로 나타내면 다음과 같이 유입하는 열량과 유출 열량으로 구분하여 생각할 수 있다<sup>[2]</sup>.

$$Q_i = [Ak(t) \frac{dT}{dz}]_{(z+\Delta z)} + m_i C_p(T) T + \rho(T) \frac{I_i^2}{A} \Delta z$$

$$Q_o = [Ak(t) \frac{dT}{dz}]_z + m_i C_p(T) T(T+\Delta T)$$

도입선이 열평형 상태일 경우는  $Q_i = Q_o$  인 상태이므로 아래와 같은 열평형 기본 방정식이 성립된다.

$$[Ak(t) \frac{dT}{dz}]_{(z+\Delta z)} - [Ak(t) \frac{dT}{dz}]_z - m_i C_p(T) T + \rho(T) \frac{I_i^2}{A} \Delta z = 0$$

$$\frac{d}{dz} [Ak(t) \frac{dT}{dz}] - m_i C_p(T) \frac{dT}{dz} + \rho(T) \frac{I_i^2}{A} \Delta z = 0$$

## 2.2 해석 조건

도입선 분석 시 설정된 물성값과 경계온도 값은 다음과 같다.

- 열전도율 : 421.1kW/(m · °C)
- 비열 : 0.234(kW · h)/(kg · °C)
- 밀도 : 10524kg/m<sup>3</sup>

도입선은 세가지 경계조건을 갖는 주변 상태에 맞아야 있다. 경계조건에 따라 아래 그림의 우측 하부 즉 액체헬륨과 맞닿는 부분의 온도를 4K로 설정하였고 중간 부분인 액체질소로 냉각되는 부분의 온도를 77K, 끝으로 좌측 상단 상온부와 맞닿는 부분의 온도를 300K로 각각 설정하였다.

## 3. 해석

도입선의 열 분포 해석을 위해 모델링 전용프로그램인 Patran을 사용하여 모델링을 실행하였고 그 해석은 유한요소법을 기초로 하는 상용 프로그램인 Nastran을 사용해 여러가지 형태 중에서 제안한 단면 변화형 도입선과 막대형 도입선을 비교 제시하였다. 열역학적 측면만을 고려하기 위해 두 모델의 경

계조건 및 기타의 물성값을 비롯한 모든 조건들을 같은 값으로 설정하였다. 두 모델을 비교 분석하여 단면 변화형 도입선이 막대형 도입선에 비해 액체헬륨의 증발을 감소시킬 수 있는지 열전달 분포를 통해 확인하고자 한다.

### 3.1 막대형 도입선

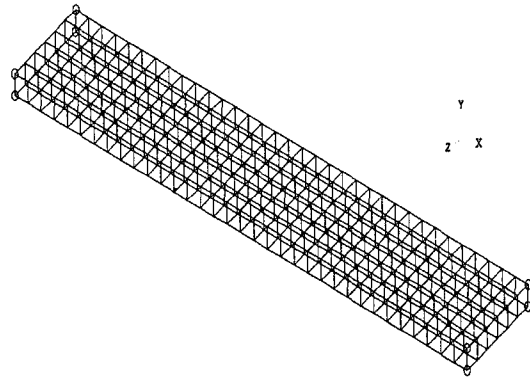


그림 1 막대형 도입선의 요소 분할

Fig. 1 Finite element meshes of bar type current lead

제시된 그림 1에서 보여지는 막대형 도입선의 크기는 36mm × 6mm × 500mm이고 2.1kA 전류가 +X 방향으로 흐르고 기체헬륨의 -X 방향으로 증발하도록 좌표를 설정하였다.

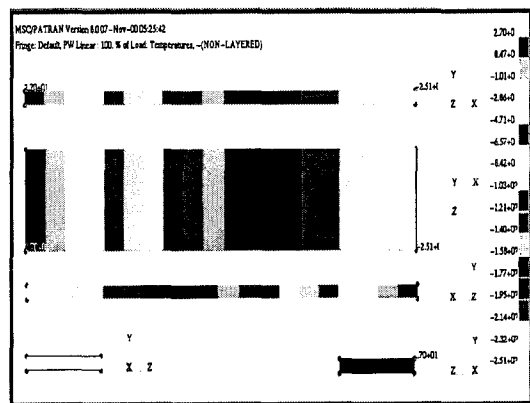


그림 2 막대형 도입선의 온도 분포

Fig. 2 Temperature profile of bar type CL (side view)

그림 2는 막대형 도입선의 상하좌우 단면도를 각각 나타낸 것이다. 그림 상에서 온도 분포도를 해석해 볼 때 온도분포에 있어 특별한 변화는 없으며 초기 값으로 지정한 값에 의해 전체적인 분포도가 선형적으로 표시되어 나타나고 있다.

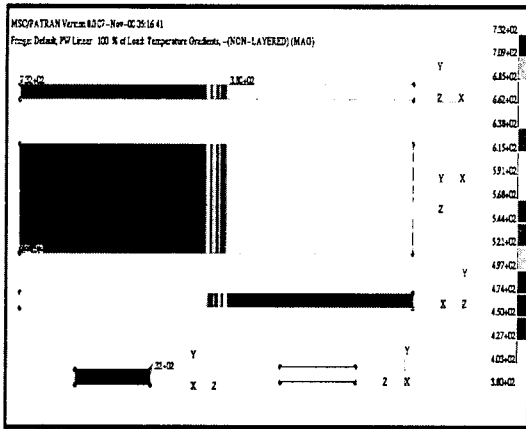


그림 3 막대형 도입선의 온도 구배  
Fig. 3 Temperature gradient of bar type CL (side view)

그림 3은 막대형 도입선에 대한 온도 구배를 해석 결과로 나타낸 것이다. 그림 2의 온도 분포와 달리 해석결과가 중간층의 작은 부분을 제외하고는 극단적으로 양단되어 있다. 따라서 도입선은 초전도 상태를 유지하고 있으나 안정적으로 전류를 통전하기 위한 액체헬륨의 소비가 많다는 것을 예측할 수 있다.

### 3.2 단면 변화형 전류도입선

그림 4는 단면 변화형 도입선의 절점 및 요소분할을 나타내고 있다. 역시 절점과 요소를 막대형과 같은 조건으로 분할하였다. 그림 5의 온도 분포는 각 부분별로 일정간격을 유지하며 분포하고 있다. 그러나 그림 6에 보여지는 온도 구배를 통해 각 지점에서 열적인 변화가 심하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 막대형에 비해 액체헬륨과 맞닿아 있는 하단부에서 매우 안정적으로 온도가 분포하고 있으며 액체질소, 기체헬륨, 그리고 상온으로부터의 열전달이 만나는 중간지점의 경우 완벽한 열평형 상태가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 온도 구배가 가장 심한 지점은 최상단부와 바로 아래 하단부가 맞닿는 지점으로써

상온으로부터 열전달이 최고점에 이르는 부분이다. 통전전류가 늘어나 임계 상태에 이를 경우, 이 지점으로부터 켄치 상태에 이르게 될 것이며 이러한 점을 보완하기 위해 액체질소나 액체헬륨 용기를 도입선 중간부에 설치하는 방법이 적합할 것으로 사료된다.

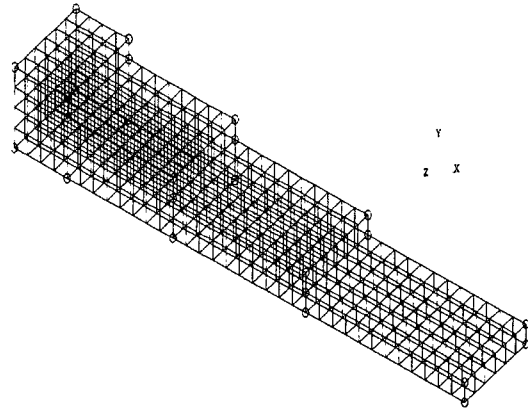


그림 4 단면 변화형 도입선의 절점 및 요소 분할  
Fig. 4 Finite element meshes of cross sectional area variable type CL

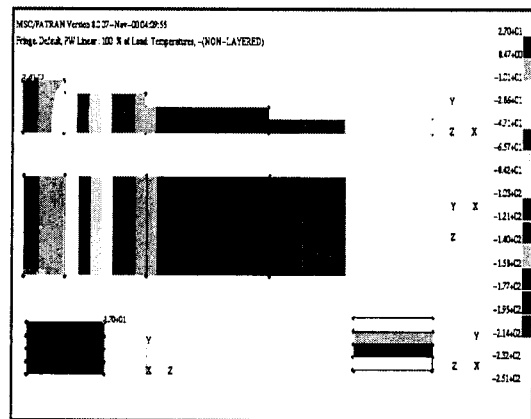


그림 5 단면 변화형 도입선의 온도 분포  
Fig. 5 Temperature profile of cross sectional area variable type CL (side view)

그림 7은 열속분포를 나타낸 것이다. 역시 앞의 온도구배를 나타낸 그림과 결과치가 거의 동일한 형태로 나타나고 있다. 열유동이 많이 일어나는 부분은 상단부와 바로 아래 하단부의 경계지점이며 이 지점

은 도입선이 액체 헬륨에서 증발되는 가스로 생각되고 있는 지점으로써 기체로 된 헬륨이 상당히 줄어든 상태이며 또한 상온으로부터의 열전달이 최고점 인지점이다.

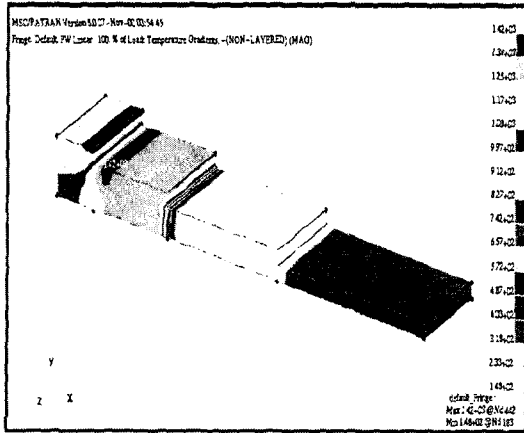


그림 6 단면 변화형 도입선의 온도 구배  
Fig. 6 Temperature gradient of cross sectional area variable type CL

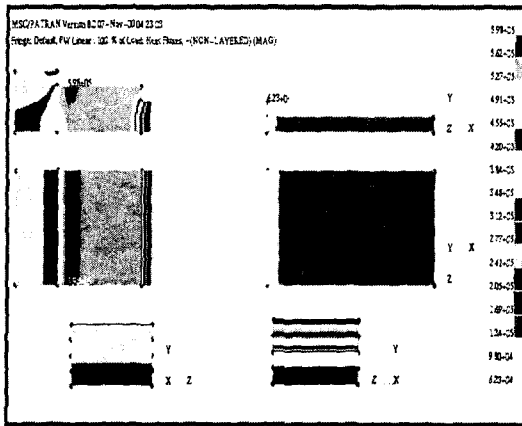


그림 7 단면 변화형 도입선의 열속 분포  
Fig. 7 Heat flux of cross sectional area variable type CL (side view)

Nastran에 의한 해석결과를 고찰해 볼 때 단면 변화형 도입선이 막대형 도입선에 비해 안정적인 열분포를 보이며 열평형 관계에 있어서도 완벽한 열평형 상태를 유지함을 알 수 있다. 또한 적층형 도입선 기기의 동작시 전체적인 헬륨소비를 감소시킨다는 결론을 유추할 수 있다.

#### 4. 결론

전류 도입선은 상온으로부터 극저온 내에 있는 초전도 기기에 전류를 공급하는 역할을 한다. 따라서 전류도입선을 통해 극저온에서 동작하는 초전도 기기가 안정된 상태에 도달할 때까지 전류를 효율적이고 안정적으로 공급함으로써 액체 헬륨의 증발을 줄이고 불필요한 경제적 손실을 막을 수 있게 된다.

현재 고온 초전도 전류도입선 개발은 초전도 재료의 임계특성 향상 그리고 제작 공정의 확립 등 재료적 측면에서 주로 이루어져 왔다. 그러나 도입선 동작 시 통전능력 향상과 더불어 액체헬륨 증발량 감소는 가장 중요한 고려사항이다. 따라서 상온으로부터 도입선을 통한 열유입과 대전류에 의한 주열 등 열부하에 의한 액체헬륨의 증발을 줄이기 위해서는 전류도입선의 길이, 단면적 등의 파라미터를 고려한 설계와 이러한 설계를 검증하기 위한 해석은 매우 중요하다.

본 연구에서는 고온 초전도 전류도입선의 동작 시 헬륨손실의 감소와 안정성에 대한 해석을 목적으로 열전달 평형 방정식을 이용하여 설계 후 유한요소법을 통한 열분포 해석을 행하였다.

Multidimensional Secant Methods와 Nastran에 의한 해석 결과에 의하면 상단부와 하단부의 단면의 변화율이 4.375 : 1 로 계산된 적층형 전류 도입선과 1 : 1 로 계산된 막대형 전류 도입선의 온도에 따른 단면적 변화율, 온도 분포, 온도 구배, 열속 분포 등을 해석하여 본 결과 두 전류도입선 간의 온도 구배는 확실히 차이가 났으며, 이에 따라 같은 조건일 때 막대형에 비하여 단면 변화형의 액체헬륨의 증발율이 훨씬 적은 것으로 나타났다. 이러한 해석 결과로부터 설계 시 예상했던 것처럼 도입선 제작 시 단면적과 길이 등의 파라미터는 도입선의 안정적 동작과 직결된다고 결론지어진다.

#### 참고 문헌

- [1]. Hull, J. R. "High-Temperature Superconducting current leads for cryogenic apparatus" Cryogenics, Vol.29 : pp. 1116~1123, 1989.
- [2]. K. Osamura, "Influence of Oxygen Partial Pressure on Critical Current Density of Ag/Bi-2223 Tapes." ICES16/ICMC Proceeding, pp. 1357~1360, 1994.
- [3]. Y. Iwasa "Case Studies in Superconducting Magnets", Plenum Press, 1994