

## Analysis of Temperature distribution in a BSCCO-2223 tape stacked current lead

### 고온초전도 선재를 이용한 전류도입선의 열분포 해석

Seyong Choi, Wansoo Nah, Jinho Joo\*, Jaimoo Yoo\*\* and Kyesoo Kim\*\*\*

최세용, 나완수, 주진호\*, 유재무\*\*, 김계수\*\*\*

300 Jangan Suwon, Kyunggi, 440-746 Korea  
School of Electrical and Computer Engineering, University of Sung Kyun Kwan  
\*Department of Metallurgical Engineering  
\*\*Dept. of Materials Processing, KIMM, \*\*\*RaCER.KEMCO

경기도 수원시 장안구 300 성균관대학교 전기전자 컴퓨터공학부,  
\*금속재료공학부, \*\*한국기계연구원 재료연구부, \*\*\*에너지관리공단 R&D 센터

It is well known that HTS current lead minimizes helium vaporizations much less than the conventional current lead. To estimate the helium vaporizations in the design step, we need to compute the exact the temperature distributions on the lead. Unfortunately, the thermal parameters such as thermal conductivity and electrical resistivity depend strongly on the temperature. That is, heat equation itself has a nonlinear characteristics in the current lead. Furthermore, the uncertainties of helium vaporizations make it more difficult to estimate the boundary values. So far, numerical analyses using constant parameters in finite intervals have been used. In this paper, we calculate the temperature distribution in the current lead in considerations of temperature dependent parameters. The results showed self consistencies.

#### 1. 서론

전류도입선은 상온의 전원 발생장치로부터 초전도 마그네트까지 전력을 전달하는데 사용된다. 주지하는바와 같이 초전도 마그네트는 액체 헬륨의 비등점인 4.2[K]에서 동작하며, 전류도입선은 이 온도 범위까지 상온으로부터 전원을 공급한다. 이때 전류도입선의 열전도도와 자체의 저항으로 인해서 저온부로의 열 전달이 있게되고, 이런 열 발생을 최소화함으로써 헬륨의 증발과 냉각에 필요한 에너지 소모를 줄일 수 있다. 초전도체는 특유의 0 저항성과 상대적으로 낮은 열전도도를 갖는다. 그래서 초전도체로 제작된 전류

도입선은 줄 열의 발생이 적어지고 액체 헬륨으로 들어가는 열 유입이 적게 되며, 인입선의 길이도 상대적으로 작게 할 수 있다. 이런 측면에서 초전도체로 만들어진 전류도입선은 기존의 구리로 만들어진 상전도 전류도입선의 좋은 대안이 되고 있다.

설계 단계에서의 전류도입선의 정확한 열분포의 해석을 통해서 헬륨의 증발량을 예측할 수 있고, 이를 통해서 증발량을 최소화 하는 전류도입선을 설계할 수 있는 토대가 된다. 그러나 초전도 전류도입선의 열전도도나 전기저항같은 매개 변수들이 온도에 매우 의존하는 특성을 가지므로 전류도입선의 열전도 방정식 자체가 비선형의 특성을 갖는다. 기존의 연구에서는 매개

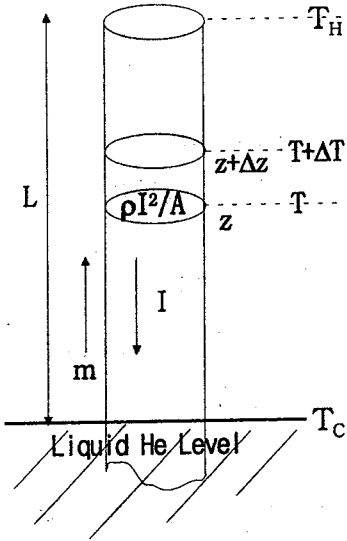


그림 1. 초전도 전류인입선의 열 평형도

변수들의 열적 의존성을 상수화 하거나, 열 방정식 자체를 근사해적인 방법으로 접근하고 있다. 본 논문에서는 보다 실제의 현상에 근접한 열 분포를 얻어내기 위해 완전한 정상 상태에서의 비선형 열 전도 방정식을 계산하였다. 계산에 사용된 초전도 전류인입선은 BSCCO-2223 고온 초전도 선재를 적층하여 만든 전류인입선으로, 계산과정에서 매개 변수들의 온도 의존성을 충분히 고려하였다. 그리고 인입선의 단면적 넓이와 동작 전류를 변화시키면서 해석을 수행했으며, 열 적 매개변수인 열 전도도를 기존의 문헌에 제시된 자료와 직접 측정된 열 전도도의 자료를 이용하였고, 결과를 비교하였다.

## 2. 해석 이론

### 2-1. 축방향 1차원 열 방정식의 유도

길이가  $L$  [m], 단면적이  $A$  [ $m^2$ ]이며 윗면으로부터 침입하는 열을  $\dot{m}$  [kg/s]의 비율로 헬륨이 증발하며 냉각시키는 초전도 전류인입선을 가정하여 간단한 개념도를 그림 1에 나타내었다. 에너지의 평형의 측면에서 고려한 인입선의 열 전도식은 다음과 같다.

$$-\nabla \cdot (-k \nabla T) + \rho j^2 = C_{Lead} \frac{\partial T}{\partial t} - C_{Helium} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

표 1. 지배 방정식에 사용된 매개 변수

$T$	인입선의 온도	[K]
$A$	인입선의 단면적	[ $m^2$ ]
$k(T)$	인입선의 열전도도	[W/mK]
$\dot{m}$	액체헬륨의 증발량	[Kg/s]
$C_{He}$	헬륨의 비열	[J/Kg K]
$\rho(T)$	전기 저항	[ $\Omega m$ ]
$I$	동작전류	[A]

위의 에너지 식을 체적 적분하여 Divergence theorem을 적용하면 식(2)와 같다.

$$\oint_S k \nabla T \cdot dS + \int_{vol} \rho j^2 dV = C_{He} \oint_S (T v_{He}) \cdot dS \quad (2)$$

이제 축방향의 1차원 방정식으로 가정하면, 식(2)의 좌변과 우변을 각각 축방향으로의 함수로 나타낼 수 있다.

좌변 :

$$Ak(T) \left[ \frac{dT}{dz} \hat{a}_z \right]_{z=z} \cdot (-\hat{a}_z) + Ak(T) \left[ \frac{dT}{dz} \hat{a}_z \right]_{z=z+\Delta z} \cdot (\hat{a}_z) + \rho j^2 A \Delta z$$

우변 :

$$C_{He} (T v_{He} \hat{a}_z) \Big|_{z=z} \cdot (-\hat{a}_z) A + C_{He} (T v_{He} \hat{a}_z) \Big|_{z=z+\Delta z} \cdot (\hat{a}_z) A \dots \dots \dots (3)$$

정리된 식들을 테일러 전개하여 정리하면 온도 분포 해석을 위한 정상상태의 축방향 비선형 열 전달 지배 방정식을 식(4)와 같이 보일 수 있고, 이에 사용되는 매개 변수들을 표 1에 나타내었다.

$$\frac{d}{dz} (Ak(T) \frac{dT}{dz}) - \dot{m} C_{He} \frac{dT}{dz} = - \frac{\rho(T) I^2}{A} \quad (4)$$

헬륨과 전류인입선 사이의 열 전달이 이상적으로 완벽하게 이루어지며, 침입하여 헬륨을 증발시키는 열은 모두 인입선을 통해 들어온 것으로 가정하여 식(4)의 지배방정식을 열 교환의 측면에서 살펴보면 다음과 같다. 인입선의 임의의 단면적을 통해서 유입되는 열과 냉각되는 양을 각각

식(5), 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[Ak(T)\frac{dT}{dz}]_{z+\Delta z} + \dot{m}C_{He} + \frac{\rho(T)I^2}{A} \Delta z \quad (5)$$

$$[Ak(T)\frac{dT}{dz}]_z + \dot{m}C_{He}(T + \Delta T) \quad (6)$$

정상상태에서 식(5)와 식(6)이 같아지는 조건이 되면 열 평형 지배방정식인 식(4)가 성립된다.

## 2-2. 온도의존성을 가지는 매개변수

앞에서도 언급한 바와 같이 열 전도 지배방정식은 매개변수들이 온도에 의존하는 비선형성을 갖는다.

식(4)로부터 살펴보면 우선, 열전도도는 온도에 대해서 급격히 변화하는 성질을 가지며, 이를 그림 3에 나타내었다. 초전도 선재의 모체로 쓰이는 은(Ag)은 선재의 코아부분인 BSCCO 에 비해 큰 열 전도도를 갖고 있다. BSCCO의 열 전도도는 4.2~77[K]사이에서 10 [W/mK]이하의 작은 값을 보인다. 이는 축방향으로의 열 전도를 고려했을 때 코아부분이 큰 영향을 미칠 수 없음을 시사한다. 그러므로 초전도 선재의 축방향 열 전도도는 전체 선재의 열 전도도 중 은 비(Ag ratio)가 기여하는 바가 지배적이라 할 수 있다. 즉, 선재 전체의 단면  $A_m$ 적이  $A$ , 선재 중 모체인 은이 차지하는 면적을 이라고 하면 BSCCO 초전도체의 열 전도도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{avg}(T) = \frac{A_m}{A} \times k_m(T) \quad (5)$$

일반적으로 은 비는 단심 초전도 선재의 경우에 60%, 다심 선재의 경우는 70~80% 정도이다. 본 논문에서는 축방향의 열 전도를 가정했으므로 은의 열 전도도를 사용했고, 60%의 은비를 갖는 BSCCO 선재의 열 전도도를 이용했다. 그러므로 계산에 사용된 열 전도도를 나타내면 식(5)와 같다.

$$k_{avg}(T) = 0.6 \times k_{Ag}(T) \quad (6)$$

본 연구에서는 결과에 정확성을 기하기 위해서 기측정된 은의 열 전도도 이외에도 직접 측정된 열 전도도의 자료를 사용하였다. 측정에 사용된 은 은 Alfa AESER 사에서 제작된 것으로 실제로 초전도 선재를 제작하는데 사용되며, 순도가

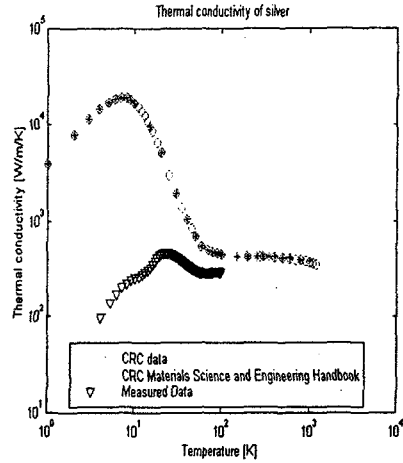


그림 2. 온도에 따른 은의 열 전도도

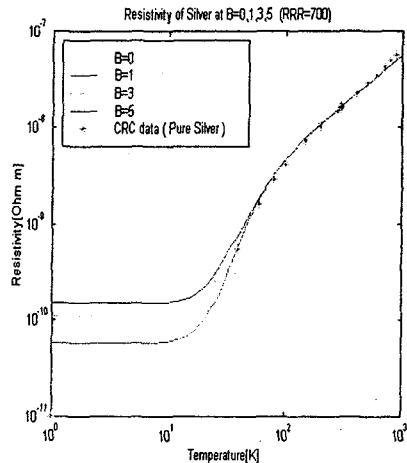


그림 3. 온도에 따른 은의 전기 저항

99.99%이고 외경과 내경이 각각 6.35[mm], 4.35[mm]인 튜브형이다. 열 전도도의 측정은 본 연구실에서 보유하고 있는 CTI 350C 냉동기에서 히터를 통한 온도제어로 10~100 [K]의 온도범위에서 수행된 결과이며 이를 그림 2에 기존의 문헌에 제시된 자료와 함께 나타냈다.

전류인입선에서의 발열성질을 보여주는 전기저항 역시 온도에 변화하는 매개변수이다. 열 전도도와 같은 맥락에서 초전도선재의 전기저항 역시 은에 대한 성질을 이용하였고, 그 특성을 그림3에 나타내었다.

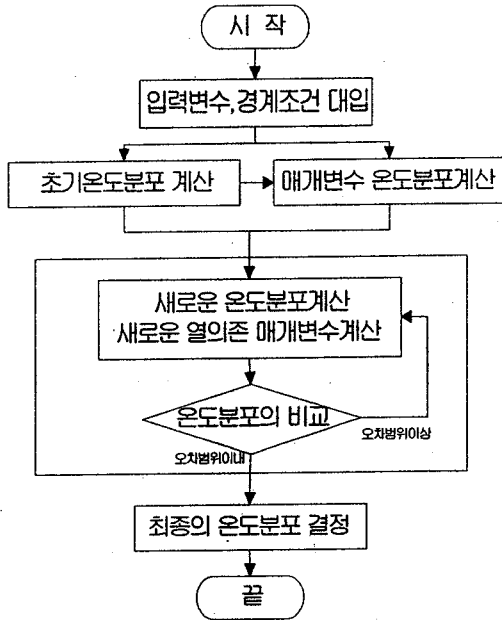


그림 4. 계산흐름도

### 2-3. 계산 과정

앞서 제시한 축방향의 열 전도 지배 방정식으로부터 온도 분포를 계산하게 된다. 기본적인 계산 개념은 식(4)를 축방향으로 유한개의 간격으로 나누어 차분법을 적용하는 것이다. 계산 순서는 우선, 전류인입선의 형상요소인 전류인입선의 길이 ( $L$ ), 면적 ( $A$ ), 동작전류 ( $I$ )와 경계조건 ( $T_C$ ,  $T_H$ )을 입력받아 초기의 온도 분포와 열 의존 매개변수인 열전도도( $k(T)$ ), 전기저항( $\rho(T)$ )을 계산한다. 이를 바탕으로 새로운 온도분포를 계산하고, 기존의 온도분포와의 차이가 오차 범위 내에 포함될 때까지 반복하여 해를 구하였다. 위의 계산과정을 그림 4에 나타내었다.

### 3. 해석 결과

서론에서 언급되었던 것 처럼 구리로 된 전류 도입선과 은 피복으로된 적층된 초전도 전류인입선에 대해서 열분포 해석을 수행하였다. 은 피복된 BSCCO 초전도 선재의 경우 기존에 제시된 것과 직접 측정된 은의 대한 자료를 이용했다. 그림 5에 (a), (b), (c)는 각각의 경우에 대한 해석 결과를 나타냈다.

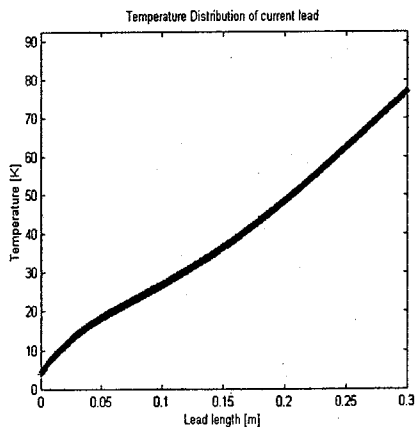
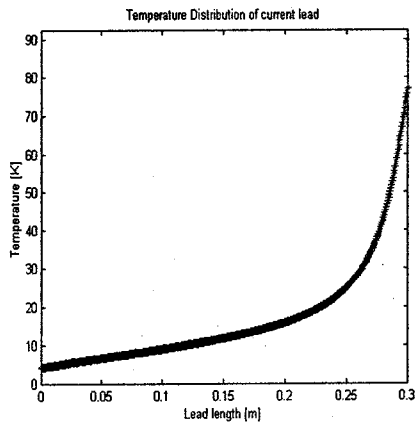
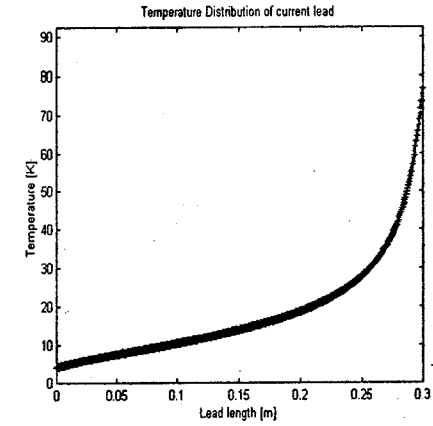


그림 5. (a)구리전류인입선의 온도분포, (b)문헌에 제시된 은 데이터를 이용한 온도분포, (c)직접 측정된 은 데이터를 이용한 온도분포

은의 열 전도도가 구리의 열 전도도보다 훨씬 좋지만 본 연구에서는 전체 전류인입선의 단면적 중에 은의 면적비만을 고려하여 계산했기 때문에 그림 5의 (a), (b)에서 구리를 사용한 결과와 유사한 양상을 보이고 있다. 그림(5)는 실제로 초전도 선재의 제작에 사용되는 피복용 은을 사용함으로써 온도분포를 확인 할 수 있었다.

계산된 결과는 전류인입선의 길이를 총 500등분하여 구간별로 온도분포를 해석한 것으로, 오차가 1 % 이내일 때까지 반복계산 했다. 그리고 전류인입선의 길이요소는 일정하다고 가정하고 ( $L=0.3[m]$ ) 단면적이 4 [ $cm^2$ ], 9 [ $cm^2$ ] 과 동작전류가 100 [A], 200[A]일 때, 구리(Cu)와 기존의 문헌에 나타난 은의 열 전도도( $Ag^*$ ) 그리고 직접 측정해서 얻은 은의 열 전도도( $Ag^{**}$ ) 결과를 표2에 나타냈다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 전류인입선의 축방향 열 평형 방정식을 유한 차분법을 이용하여 계산함으로써 인입선에서의 온도분포와, 이를 기초로 하여 헬륨 증발량, 냉동에 소요되는 에너지등의 열 적 현상을 예측할 수 있었다. 동일한 조건의 전류인입선에서 초전도 전류인입선은 기존의 구리 전류인입선에 비해 열 적으로 안정하며 헬륨증발량이 적고, 증발하는 헬륨에 의한 냉각 기여분도 적음을 확인할 수 있었다.

본 연구는 통상산업부 산하 에너지관리공단의 지원에 의한 연구결과이며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Yukikazu Iwasa, "Case studies in superconducting magnets design and operational issues", PP 40~61, Plenum Press, 1994
- [2] Martin N. Wilson, "Superconducting Magnets", pp. 125~147, Clarendon Press Oxford 1983.
- [3] R. Wesche, A.M. Fuchs, "Design of superconducting current leads", Cryogenics Vol.34 No.2, pp145~154, 1994
- [4] S.Y. Seol, J.R. Hull, M.C. Chyu, "Optimization of high-temperature superconductor current leads", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.5 No.2, pp785~788, 1995
- [5] J.R. Hull, "High-Temperature superconducting current leads", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.3 No.1, pp869~875, 1993
- [6] J.R. Hull, "High temperature superconducting current leads for cryogenic apparatus", Cryogenics, Vol.29, 1989
- [7] CRC Materials Science and Engineering Handbook" Second edition pp273~274

표 4. 계산결과

I	A		고온부에서의 열유입량 [W]	저온부로의 열유출량 [W]	줄 열 소모량 [W]	헬륨 증발량 [Kg/s]	인입선내의 냉동부하 [W]	헬륨에 의한 냉각량 [W]
100	4	Cu	674.7456	567.9746	0.0017925	2.1845e-004	106.7727	101.0845
		Ag*	250.821	211.8174	0.0040425	8.1468e-005	39.0077	37.6979
		Ag**	20.623	14.9626	0.0040425	5.7549e-006	5.6644	2.663
	9	Cu	1518.1786	1277.9428	0.00079667	4.9152e-004	240.2366	227.4401
		Ag*	564.349	476.5889	0.0017967	0.0001833	87.7619	84.8202
		Ag**	46.4098	33.6645	0.0017967	1.2948e-005	12.747	5.9914
200	4	Cu	674.7439	567.9749	0.00717	2.1845e-004	106.7762	101.0845
		Ag*	250.8181	211.8176	0.01617	8.1468e-005	39.0167	37.6979
		Ag	20.6096	14.965	0.01617	5.7558e-006	5.6608	2.6634
	9	Cu	1518.1778	1277.9429	0.0031867	4.9152e-004	240.2381	227.4401
		Ag*	564.3478	476.589	0.0071867	0.0001833	87.7659	84.8203
		Ag**	46.4038	33.6656	0.0071867	1.2948e-005	12.7454	5.9916