

Design and manufacture of Bi-2223 HTS current leads for SMES magnet

H.M.Jang*, S.S.Oh*, J.W.Cho*, H.S.Ha*, K.D.Sim*, D.W.Ha*, K.C.Seong*,
Y.K.Kwon*, K.S.Ryu* and S.H.Kim*

* Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, Korea

* Gyeongsang National University, Chinju, Korea

Abstract

Bi-2223 HTS current leads for a superconducting magnetic energy storage(SMES) magnet were designed and manufactured. The HTS leads composed of Bi-2223/AgAu tapes and stainless steel former were connected to conventional vapor-cooled copper leads. The heat input to the liquid helium through the HTS lead was 0.39 W/lead when the warm end part's temperature is 65 K. And, the critical current of the HTS leads was about 1.6 kA when the warm end part's temperature is 80 K. The measured those values are well consistent with computed values.

Keywords : Bi-2223, Current lead

I. 서론

현재 초전도 마그네트용 전류리드로 사용되고 있는 구리, 황동과 같은 금속재질은 전기 전도도와 비례하는 열전도도와 전기저항에 의해서 발생하는 주울열이 많은 냉매의 손실을 초래한다. 그러나, 구리 대신 고온초전도체를 전류리드로 이용하면 세라믹 초전도체의 열전도도가 낮고 임계온도 이하에서 어떠한 주울열도 발생하지 않기 때문에 냉매의 손실을 감소시킬 수 있다[1].

실제로 미국, 일본 등의 선진국에서는 일반적인 가스 냉각 전류리드보다 약 3 배 가량 냉각손실이 적은 고온초전도 전류리드가 실용화되어 있는 실정이다[2][3].

본 연구에서는 향후 SMES 마그네트용으로 사용하기 위한 1.5 kA급 고온초전도 전류리드를 설계 제작하였다. 고온초전도 전류리드는

SMES 마그네트의 펄스운전시 발생하는 전자력에 대한 안정성과 신뢰성을 충족시키기 위해 Bi-2223/Ag-1 at%Au 고온초전도 테이프를 적층하는 방식을 검토하였다. 고온초전도 전류리드의 2차원 전자계해석과 1차원 열평형 방정식을 선형적으로 해석하여 전류리드 최적설계의 기초를 확립하고자 하였으며, 설계를 바탕으로 제작된 전류리드의 통전특성과 열침입을 평가하여 설계결과와 비교하였다.

II. 설 계

2.1 전자계 해석을 이용한 형상설계

고온초전도 전류리드는 Bi-2223/AgAu 테이프를 적층한 구조로서, 그림 1에서 나타난 것과 같이 적층된 도체를 16개로 분할하여 원통형태로 배치하였다. 이때 적층된 도체 16개를 각각 단위도체라 하며, 서로 대칭이 되는 단위도체간의 최소 거리를 편의상 내경(element I.D.)이라 명명하기로 한다. 이러한 구조를 가지는 고온초전도 전류리드의 임계전류를 계산하기 위해서

¹*Corresponding author. Fax: +82 55 280 1696

e-mail: hmjang@cecc-1.gnsu.ac.kr

Biot-Savart의 수식을 이용하여 2차원 전자계 해석을 하였다. 전자계 해석은 단위도체의 적층수와 내경을 변수로 하였는데, 계산에 사용된 고온초전도 테이프의 제원을 표 1에 나타내었다. 각 단위도체의 폭을 4 mm로 할 경우에 내경을 20.2 mm로 하면 단위도체간의 최소 간격이 0이 되는데 실제 제작을 고려하여 내경을 22 mm ~ 30 mm 까지만 계산하였으며, 단위도체의 테이프 적층수는 5에서 9까지로 하였다.

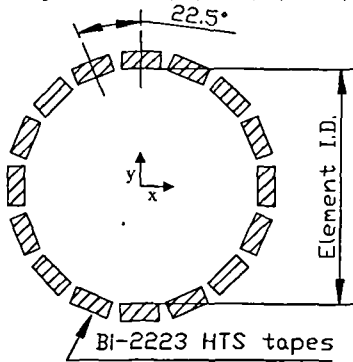


Fig.1. Cross-sectional view of HTS current lead

Table I. The parameters of HTS tape

SC material	Bi-2223
Sheath material	Ag-1at%Au
AgAu/SC ratio	2.4
Tape width	3.5 ~ 4 mm
Tape thickness	0.24 mm
Ic @ 77.3 K, self field	21.5 A

고온초전도 전류리드 단면에서 전류에 의해서 발생하는 자계의 세기는 전류에 비례하여 선형적으로 증가하게 되는데, 전류와 자속밀도의 관계(로드라인)를 고온초전도 테이프의 Ic-B 곡선에 함께 도식화하게 되면 두 곡선의 교차점을 이용하여 전류리드의 임계전류를 계산할 수 있게 된다. 그림 2는 전류리드용으로 제조한 Bi-2223/ Ag-1at%Au 테이프를 77.3 K에서 측정된 Ic-B 곡선과 전자계 해석을 통하여 계산된 로드라인을 함께 도식화한 것이다. 그림 2의 로드라인은 단위도체 부분의 수직성분 및 수평성분 자속밀도의 평균값이며 내경이 22 mm부터 30 mm 까지 1 mm 씩 증가시키면서 계산한 것이며 이때 단위도체의 적층수는 7로 하였다. 그림 2의 결

과로서 알 수 있듯이 내경이 감소하게 되면 단위도체간의 간격이 줄게 되어서 임계전류에 큰 영향을 미치는 자속밀도의 수직성분이 감소하였으며, 반대로 수평성분 자속밀도는 수직성분에 비해 큰 폭으로 증가 하지만 임계전류에 끼치는 영향은 비교적 적다는 것을 알 수 있다[4]. 그림 2에서 두곡선의 교차점을 테이프 하나의 임계전류라고 본다면 여기에 적층수를 곱하게 되면 전체의 임계전류를 계산할 수 있게 된다.

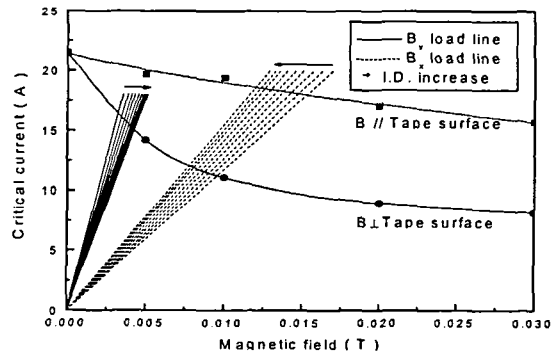


Fig.2. Critical current in a magnetic field and load lines of the HTS tape in a current lead

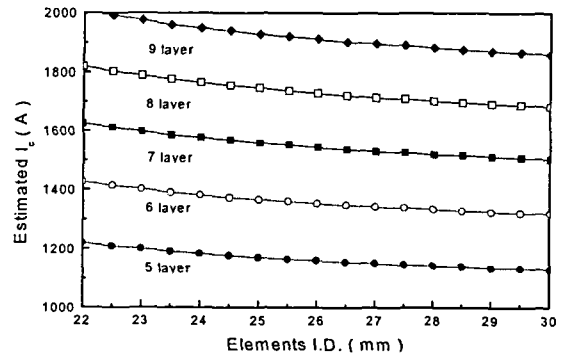


Fig.3. Estimated critical current vs elements I.D.

그림 3에 그림 2에서 나타낸 Bi-2223 테이프의 77.3 K때 Ic-B 곡선과 전류리드의 2차원 전자계해석을 이용하여 계산된 전류리드의 임계전류이다. 계산된 임계전류는 전자계해석 시에 발생할 수 있는 오차와 계산에 사용된 모델과 실제 제작치수와의 오차를 감안하여 계산된 값에 10%의 마진을 주었다. 그림 3에서 알 수 있듯이 같은 수의 도체를 사용하더라도 단위도체 내경을 줄임으로서 임계전류를 다소 증가시킬 수 있을 것으로 보인다. 그림 4에 나타낸 결과

를 바탕으로 1.5 kA 급 고온초전도 전류리드를 제작하기 위해서는 단위도체의 적층 수를 7로 하며, 단위도체의 내경은 구조재의 가공성을 고려해서 23 mm로 한다.

2.2 열 해석

고온초전도 전류리드는 액체헬륨에서 증발되는 가스로 냉각되며, 전 구간에서 임계전류 이하로 동작하는 고온초전도 전류리드의 열 평형 방정식은 다음과 같이 표현되어진다[1].

$$A_m \frac{d}{dz} \left[k_m(T) \frac{dT}{dz} \right] - \dot{m}_{He} C_p(T) \frac{dT}{dz} = 0 \quad (1)$$

여기서 A_m , \dot{m}_{He} 는 각각 전류리드의 단면적(cm^2)과 헬륨의 증발량(g/s)을 나타내며, $k_m(T)$, $C_p(T)$ 는 각각 온도에 대한 전류리드의 열전도율(W/cmK)과 헬륨의 비열(J/g)을 나타낸다. 식(1)을 선형 미분방정식으로 고치기 위해 열전도율과 헬륨의 비열은 고온초전도 전류리드의 모든 온도 범위에서 평균값으로 표현하고 $T(z=0) = T_0$ 그리고 $T(z=l) = T_l$ 의 경계조건을 주면 식(1)을 다음과 같이 $T(z)$ 에 대해서 정리할 수 있다.

$$T(z) = \left(\frac{T_l - T_0}{e^{\alpha_l} - 1} \right) \left[e^{\alpha_l(z/l)} + \frac{e^{\alpha_l} T_0 - T_l}{T_l - T_0} \right] \quad (2)$$

$$\alpha_l = \frac{\dot{m}_{He} C_p l}{k_m A_m} \quad (3)$$

$z=0$ 에서 액체헬륨 속으로 침입하는 열 Q_{in} 은 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{in} = \dot{m}_{He} h_L \equiv k_m A_m \left. \frac{dT}{dz} \right|_0 = \dot{m}_{He} C_p \left(\frac{T_l - T_0}{e^{\alpha_l} - 1} \right) \quad (4)$$

$$\alpha_l = \ln \left[\frac{C_p(T_l - T_0)}{h_L} + 1 \right] \quad (5)$$

여기서 h_L 은 액체헬륨의 증발열(J/g)이며, 식(3), (4), (5)를 이용하면 전류리드에 의한 Q_{in} 을 계산할 수 있다.

고온초전도 전류리드 전자계해석으로 결정된 단면형상에서 길이를 변수로 계산된 Q_{in} 을 그림 4에 나타내고있다. 이때 전류리드 저온단부의 온도는 4.2 K로 하였으며, 계산에 사용된 각 재료의 물리적 특성들은 문헌[1], [5], [6]에서 인용하였다. 그림 4에서 나타난 것 처럼 전류리드의 길이가 길고 고온단부의 온도가 낮을수록 전류리드에 의한 Q_{in} 이 감소하게 된다. 그리고 stainless steel의 열전도율이 낮기 때문에 구조재에 의한 Q_{in} 은 고온초전도 테이프에 의한 Q_{in} 의 5~6%에 불과하다. 이 결과를 바탕으로 길이 35 cm인 1.5 kA 급 고온초전도 전류리드를 제작하였을 경우 전류리드에 의한 침입열은 약 0.34 W/lead이다. 이 수치는 같은 전류용량의 구리리드에 의한 침입열의 1/4~1/5에 불과하다.

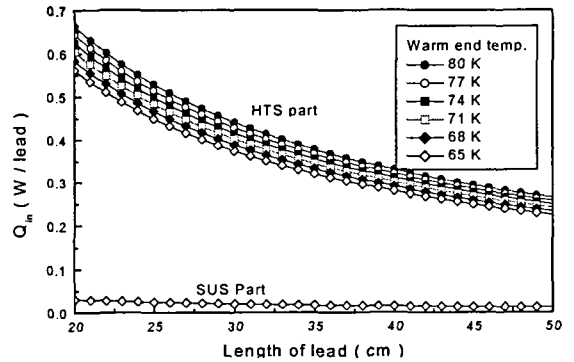


Fig.4. The Q_{in} as a function of T_l and length of lead

III. 전류리드 제작 및 특성평가

2차원 전자계해석 및 1차원 열 평형방정식을 이용해서 1.5 kA급 고온초전도 전류리드를 설계하였다. 전류리드는 16개의 단위도체가 원통형태로 배치되어 있으며, 단위도체의 적층 수는 7, 전류리드의 길이는 35 cm이다. 전류리드의 구조재는 원통형태로 된 stainless steel tube를 사용하였는데 단위도체의 배열을 위해 길이 방향으로 폭 4 mm인 사각형태의 홈을 내었다. 그리고 전류리드의 저온 및 고온단부는 무산소동으로 구성되어있다.

그림 5는 제작된 두개의 고온초전도 전류리드의 통전특성과 침입열을 평가하기 위한 전류

리드의 구조를 나타내고 있다. 고온초전도 전류리드의 고온단부는 일반적인 가스냉각 전류리드와 연결 하였으며, 액체헬륨과 접하는 저온단부는 구리 bar와 저온초전도 케이블로 연결하였다. 고온초전도 전류리드의 길이방향에 7 cm 간격으로 전압단자와 Chormal-CuFe 열전대를 부착하여 임계전류 및 온도분포를 측정하였다. 측정에 사용된 열전대의 기전력은 액체 질소 및 액체헬륨을 이용하여 보정하였으며, cernox 온도센서 2 개를 함께 사용하였다. 그리고 가스헬륨 flow meter를 이용해 헬륨증발량을 측정하여 고온초전도 전류리드에 의한 Q_{in} 을 구할 수 있었다.

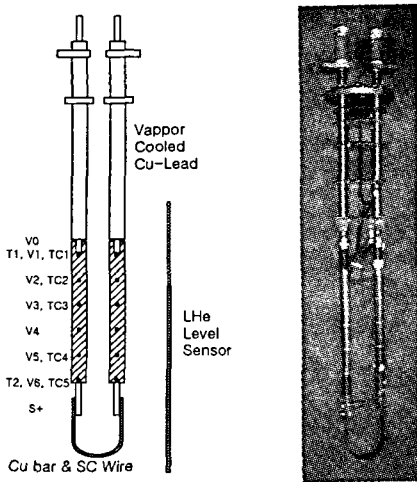


Fig.5. Test set-up for HTS current leads

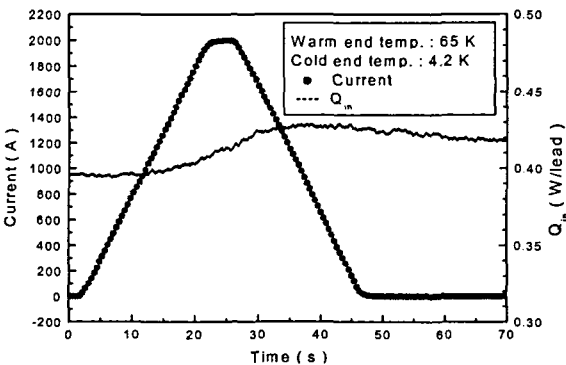


Fig.6. The Q_{in} vs. operating current

그림 6은 고온초전도 전류리드 저온단부가 액체헬륨(4.2 K)과 접하고 있으며 고온단부의

온도가 65 K일때 2 kA까지 통전시험 결과이다. 고온초전도 전류리드 전구간에서 초전도 상태로 운전되었으며, 헬륨 증발량으로 측정된 Q_{in} 은 초기에 0.39 W/lead로서 설계된 수치 0.34 W/lead와는 다소의 차이가 있다. 이것은 특성 평가를 위해 사용된 신호선에 의한 영향과 실험 오차로 사료된다. 또한 저온 및 고온단부 접촉부분의 저항에 의한 주열열 때문에 전류가 증가하면서 서서히 Q_{in} 도 증가하였다. 전류 인가 이전 상태에서 측정된 온도분포를 그림 7에 나타내고 있는데, 식 (2)로 부터의 계산결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

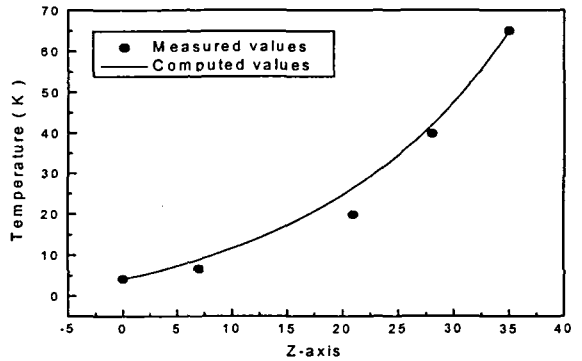


Fig.7. Temperature distribution on z-axis for current lead before current transport.

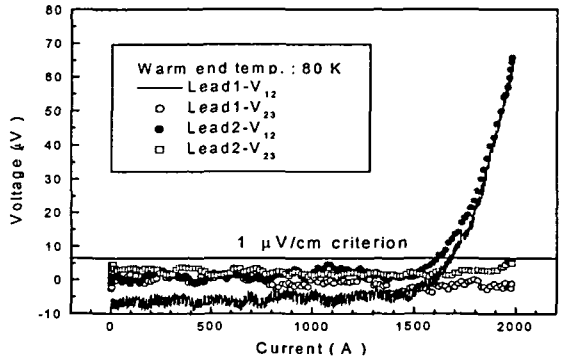


Fig.8. V-I characteristics of HTS leads

그림 8은 고온초전도 전류리드 고온단부의 온도가 80 K일 때 V-I특성을 나타내고 있다. 전류는 2 kA까지 인가하였는데, z축상에서 온도가 비교적 높은 V_{12} 부분에서만 퀵치가 발생하

였으며 그 외 부분에서는 켄치가 일어나지 않았다. 두 전류리드의 임계전류는 모두 1.6 kA 이상이었으며, 설계된 수치와 매우 잘 일치하였다.

IV. 결 론

향후 SMES 마그네트용으로 사용될 Bi-2223 고온초전도 전류리드를 2차원 전자계 해석 및 열평형방정식을 이용하여 설계, 제작하고 통전 특성과 침입열을 평가하였다.

고온초전도 전류리드 고온단부의 온도가 65 K일 때 헬륨의 증발량 측정으로 구한 침입열 (Q_{in})은 0.39 W/lead로서 0.34 W/lead의 설계 수치와 비교적 잘 일치하였다. 그리고 고온초전도 전류리드 고온단부의 온도가 80 K일 때 임계전류는 약 1.6 kA였다.

References

- [1] Y. Iwasa "Case Studies in Superconducting Magnets", Plenum Press (1994)
- [2] John R. Hull "High-Temperature Superconducting Current Leads" IEEE Trans. on Appl. Magnetics, 3, 1 (1993)
- [3] T. Isono et. al. "Test Results of High Temperature Superconductor Current Lead at 14.5 kA Operation", IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, 9, 2, 519-522 (1999)
- [4] W. Nah et. al. "Optimum Reduction of Self Field Effects in a Bi-2223 Stacked Superconducting Bus Bar", IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, 9, 2, 960-963 (1999)
- [5] Hiroyuki Fujishiro et. al. "Low Thermal Conductive Bi-2223 Tapes Sheathed with Ag-Au Alloys", IEEE Trans. on Appl. Magnetics, 30, 4, 1645-1648 (1994)
- [6] J. G. Weisend II "Properties of Cryogenic Fluids", TAYLOR & FRANCIS, 23-32 (1998)