

SMES 마그네트용 고온초전도 전류도입선 설계

Design of HTS Current Lead for SMES Magnet

장현만*, 오상수***, 조전욱***, 조영식**, 하홍수***, 하동우***, 성기철***, 권영길***, 류강식#, 김상현##

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

Abstract : 1.5 kA class HTS current leads for a SMES magnet, which are connected to a conventional vapor cooled copper leads, were designed. The HTS leads are composed of Bi-2223/Ag-Au tapes and a stainless steel tube. The estimated critical current of the lead is about 1.6 kA at 77.3 K and in a self magnetic field, and the heat input to the liquid helium from the cold end of the 35 cm lead is 0.4 W/lead. It has been made clear that the heat input decreases with increase of the lead length and decrease of the warm end temperature and Ag-Au/SC ratio.

Key Words : Bi-2223, HTS current lead, heat input

1. 서 론

초전도 마그네트의 경제적 운영을 위해서는 극저온 상태의 안정적 유지 및 냉매 손실의 최소화가 중요하다고 할 수 있는데, 이를 위해서는 단열특성이 우수한 극저온 용기(cryostat) 이외에도 초전도 마그네트와 외부의 전원장치 연결을 위한 저 손실 전류도입선의 설계, 제작에 대한 연구가 선행되어야 한다.

현재 전류도입선으로 사용되고 있는 구리, 황동과 같은 금속재질은 열 전도가 좋기 때문에 외부로부터의 열침입이 용이하고, 이 침입열과 전기저항에 의해서 발생하는 주열이 많은 냉매의 손실을 초래한다. 그러나, 구리 대신 열 전도도가 낮은 고온초전도체를 전류도입선으로 이용하면 침입열을 줄일 수 있고 임계 온도 이하에서 어떠한 주열도 발생하지 않기 때문에 냉매의 손실을 감소시킬 수 있다[1]. 실제로 미국, 일본 등의 선진국에서는 일반적인 가스 냉각 전류도입선에 비해 냉각손실이 약 1/3인 고온초전도 전류도입선이 실용화되어 있는 실정이다 [2][3].

전류도입선에 의한 열손실 측면에서 볼 때 고온초전도 벌크를 사용한 전류도입선이 테이프 방식의 전류도입선보다 효과적이지만 켄치에 대한 안정성 측면에서는 고

온초전도 테이프 적층방식이 더 유리하다 [3].

본 연구에서는 향후 제작될 SMES 시스템에서 요구되어지는 안정성과 신뢰성을 충족시키기 위해서 벌크 재료보다 안정성이 높은 Bi-2223/Ag-Au 테이프 적층방식의 1.5 kA급 고온초전도 전류도입선을 설계하였다. 전류도입선의 설계에서는 2차원 전자계해석을 통하여 최적의 테이프 적층 수와 단면형상을 결정하였고, 길이방향으로의 1차원 모델[1]에 의한 열해석을 통하여 전류도입선의 길이를 결정하였다.

2. 전류도입선 설계

SMES 마그네트용으로 사용될 1.5 kA급 고온초전도 전류도입선을 설계하고자 한다. 이때 전류도입선을 통해 액체헬륨으로 침입되는 열은 0.5 W/lead 미만이 되도록 한다.

2.1 전자계 해석을 이용한 형상설계

고온초전도 전류도입선은 Bi-2223 /Ag-Au 테이프를 적층한 구조로서 그림 1에 고온초전도 전류도입선의 개략적인 구조를 나타내고있으며, 표 1에 전류도입선 제작에 사용될 고온초전도 테이프의 사양을 나타내었다.

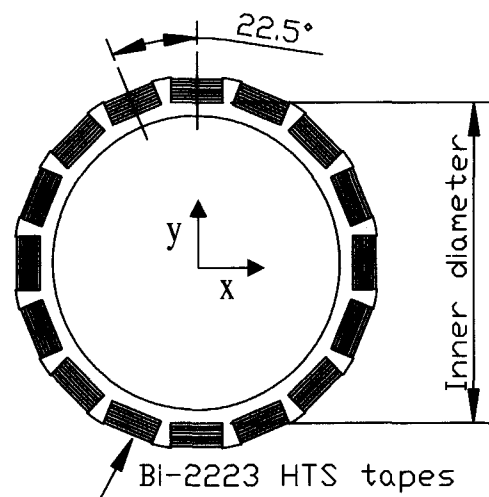


그림 1. 고온초전도 전류도입선의 단면형상.
Fig. 1. Cross-sectional view of a HTS current lead.

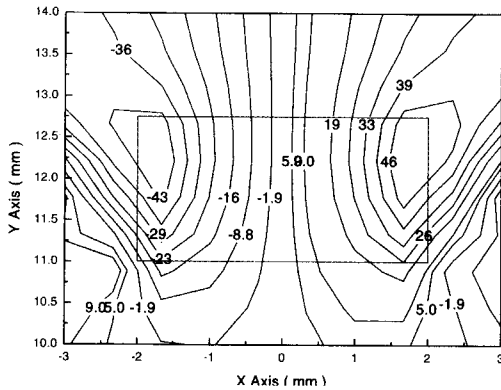
그림 1에서 나타낸 것처럼 고온초전도 전류도입선은 Bi-2223/Ag-Au 테이프가 적층된 16개의 단위도체를 포머(former)에 원통형태로 배치하였다. 이때 서

* 학생회원:경상대학교 대학원 전기전자공학과 박사과정 수료
** 학생회원:창원대학교 대학원 전기전자제어공학과 박사과정
*** 정 회 원:한국전기연구소 초전도응용연구그룹
정 회 원:한국전기연구소 전략기술연구단
정 회 원:경상대학교 전기공학과 교수
원고접수:2000년 05월 02일
심사완료:2000년 10월 09일

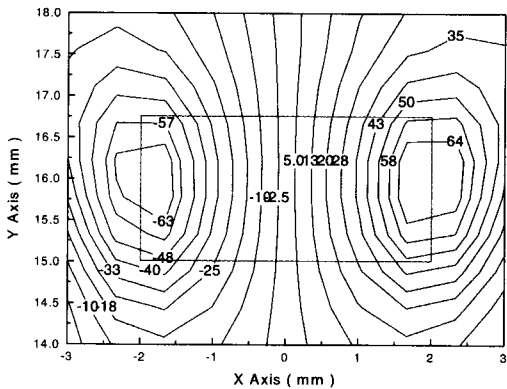
표 1. 고온초전도 테이프의 사양.

Table 1. Specifications of the HTS tape.

SC material	Bi-2223
Sheath material	Ag-1at%Au
Ag-Au/SC ratio	2.4
Width	3.5 ~ 4 mm
Thickness	0.24 mm
I_c @ 77.3 K, Self field	21.5 A



a) I.D. : 22 mm (unit : Gauss)



b) I.D. : 30 mm (unit Gauss)

그림 2. 단위도체 부분의 수직성분 자속밀도.

Fig. 2. Contour lines of B_{\perp} in one segment.

로 대칭이 되는 단위도체간의 최소 거리를 편의상 내경이라 명명하기로 한다. 이러한 구조를 가지는 고온초전도 전류도입선의 임계전류를 계산하기 위해서 Biot-Savart의 수식 (1)을 이용하여 2차원 전자계 해석을 하였다.

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left(\frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{R}}{R^3} \right) \quad (1)$$

여기서 \mathbf{B} 는 자속밀도, μ_0 는 공기중의 투자율, $I d\mathbf{l}$ 은 미소 전류소 벡터, \mathbf{R} , R 은 각각 전류점에서 필드점으로 향하는 벡터와 전류점과 필드점 사이의 거리이다. 전자계 해석은 단위도체의 적층 수와 내경을 변수로 하였다. 각 단위도체의 폭을 4 mm로 할 경우에 내경을 20.2 mm로 하면 단위도체간의 최소 간격이 0이 되는데 실제 제작을 고려하여 내경을 22 ~ 30

mm 까지만 계산하였으며, 단위도체의 테이프 적층 수는 5에서 9까지로 하였다.

그림 2는 단위도체의 적층 수가 7이고 전류도입선의 단면에서 1.5 kA의 전류가 통전 될 때 발생하는 자속밀도 중에서, 고온초전도 테이프의 임계전류에 크게 영향을 주는 수직성분의 자속밀도(테이프 표면에 수직으로 인가되는 자속밀도, B_y) 분포를 하나의 단위도체에 대해서 나타내고 있다. 그림 2의 a)와 b)는 각각 내경이 22 mm일 때와 30 mm 일 때의 계산 결과이며, 그림 2의 사각형이 단위도체 영역을 표시한 것이다. 일반적으로 단위도체의 내경을 크게 하면 전류가 흐르는 면적이 넓게 분포하게 되므로 자속밀도가 낮아지게 된다. 그렇지만 그림 2에서 알 수 있듯이 단위도체의 내경을 증가시키면 단위도체간의 간격이 늘어나게 되어 수직성분 자속밀도는 증가하게 된다. 또한 내경이 달라짐으로 해서 자속밀도 최대지점의 위치가 단위도체 내에서도 달라짐을 알 수 있다.

전류도입선 단면에서 전류에 의해서 발생하는 자계의 세기는 전류에 비례하여 선형적으로 증가하게 되는데, 전류와 자속밀도의 관계(로드라인)를 고온초전도 테이프의 I_c - B 곡선에 함께 도식화하게 되면 두 곡선의 교차점을 이용하여 전류도입선의 임계전류를 계산할 수 있게 된다. 그림 3은 전류도입선 제작을 위해서 Bi-2223/Ag-Au 테이프를 제조하여 77.3 K에서 측정된 I_c - B 곡선과 로드라인을 도식화한 것이다. 그림 3의 로드라인은 단위도체 부분의 수직성분 및 수평성분 자속밀도의 평균값이며 내경이 22 mm부터 30 mm 까지 1 mm씩 증가시키면서 계산한 것이며 이때 단위도체의 적층 수는 7로 하였다. 앞선 그림 2와 그림 3의 결과로서 알 수 있듯이 내경이 감소하게 되면 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].

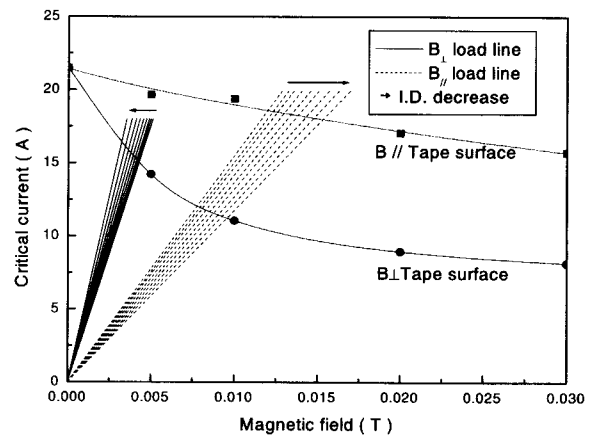


그림 3. 고온초전도 테이프 임계전류의 자장의존성 및 전류도입선에서 로드라인.

Fig. 3. Critical current in a magnetic field and load lines of the HTS tape in a current lead.

그림 4는 그림 3에서 나타낸 Bi-2223 /Ag-Au 테이프의 77.3 K때 I_c - B 곡선과 2차원 전자계해석을 이용하여 계산된 전류도입선의 임계전류이다. 계산된 임계전류는 전자계해석 시에 발생할 수 있는 오차와 계산에 사용된 모델과 실제 제작치수와의 오차를 감안하여 계산된 값에 10 %의 마진을 주었다. 그림 4에서 알 수 있듯이 같은 수의 도체를 사용하더라도 단위

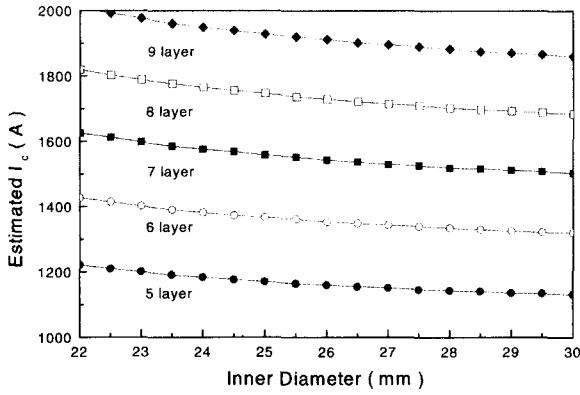


그림 4. 전류도입선에서 내경과 임계전류와의 관계.
Fig. 4. Estimated critical currents of the current leads vs. inner diameter.

도체 내경을 줄임으로서 임계전류를 다소 증가시킬 수 있을 것으로 보인다. 그림 4에 나타낸 결과를 바탕으로 1.5 kA급 고온초전도 전류도입선을 제작하기 위해서는 단위도체의 적층 수를 7로 하며, 단위도체의 내경은 구조재의 가공성을 고려해서 23 mm로 한다.

2.2 열 해석

전자계해석을 통해 결정된 고온초전도 전류도입선의 단면형상을 토대로 전류도입선의 길이를 결정하기 위하여 길이방향에 대한 1차원모델 [1]을 이용하여 전류도입선을 통해 액체헬륨으로 침입되는 열을 계산하였다. 고온초전도 전류도입선은 액체 헬륨에서 증발되는 가스로 냉각되며, 전 구간에서 임계전류 이하로 동작한다고 가정할 때 고온초전도 전류도입선의 열 평형 방정식은 다음과 같이 표현되어진다.

$$A_m \frac{d}{dz} \left[k_m(T) \frac{dT}{dz} \right] - \dot{m}_{he} C_p(T) \frac{dT}{dz} = 0 \quad (2)$$

여기서 z , A_m 은 각각 전류도입선 길이방향의 좌표와 전류도입선의 단면적(cm^2)이며, $k_m(T)$, \dot{m}_{he} , $C_p(T)$ 는 각각 온도에 대한 전류도입선의 열전도율(W/cmK)과 헬륨의 증발량(g/s) 그리고 헬륨의 비열(J/gK)을 나타낸다.

식(2)를 선형 미분방정식으로 고치기 위해 열전도율과 헬륨의 비열은 고온초전도 전류도입선의 모든 온도 범위에서의 평균값 ($k_m(T) = k_m$, $C_p(T) = C_p$)으로 표현하고, 경계조건 $T(z=0) = T_0$ 그리고 $T(z=l) = T_l$ 을 주면 식(2)로부터 $T(z)$ 를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$T(z) = \left(\frac{T_l - T_0}{e^{\alpha_l} - 1} \right) \left[e^{\alpha_l(z/l)} + \frac{e^{\alpha_l T_0} - T_l}{T_l - T_0} \right] \quad (3)$$

여기서 $\alpha_l = \frac{\dot{m}_{he} C_p l}{k_m A_m} \quad (4)$

식(4)에서 l 은 전류도입선의 길이를 나타낸다. $z=0$ 에서 액체헬륨 속으로 침입하는 열 Q_{in} 은 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{in} = \dot{m}_{he} h_L \equiv k_m A_m \frac{dT}{dz} \Big|_0 = \dot{m}_{he} C_p \left(\frac{T_l - T_0}{e^{\alpha_l} - 1} \right) \quad (5)$$

여기서 h_L 은 액체 헬륨의 증발열(J/g)이며, 식(5)를 α_l 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\alpha_l = \ln \left[\frac{C_p (T_l - T_0)}{h_L} + 1 \right] \quad (6)$$

식(4)와 식(6)을 조합하면 다음과 같이 액체헬륨의 증발량을 구할 수 있다.

$$\dot{m}_{he} = \frac{k_m A_m}{C_p l} \ln \left[\frac{C_p (T_l - T_0)}{h_L} + 1 \right] \quad (7)$$

식(5)와 (7)을 이용하면 다음과 같이 정리된다.

$$Q_{in} = \frac{k_m A_m h_L}{C_p l} \ln \left[\frac{C_p (T_l - T_0)}{h_L} + 1 \right] \quad (8)$$

고온초전도 전류도입선의 구조재로서는 그림 1에서 나타낸 것처럼 표면에 16개의 사각 홈이 있는 원통형의 스테인레스 튜브(비자성체)를 사용하며, 표 2에 전류도입선에 의한 저온단부의 침입열(Q_{in})을 계산하기 위한 전류도입선의 사양을 나타내고 있다.

표 2. 침입열을 계산에 사용된 전류도입선의 사양.
Table 2. Specifications of the current lead for calculating heat input.

Warm end Temp. (T_l)	80 K
Cold end Temp. (T_0)	4.2 K
Former	Stainless steel
No. of HTS tapes	7×16
A_m (HTS)	0.9408 cm^2
A_m (Former)	1.5 cm^2
k_m (HTS)	1.2 W/cmK
k_m (Former)	4.47×10^{-2} W/cmK
C_p (He)	5.29 J/gK

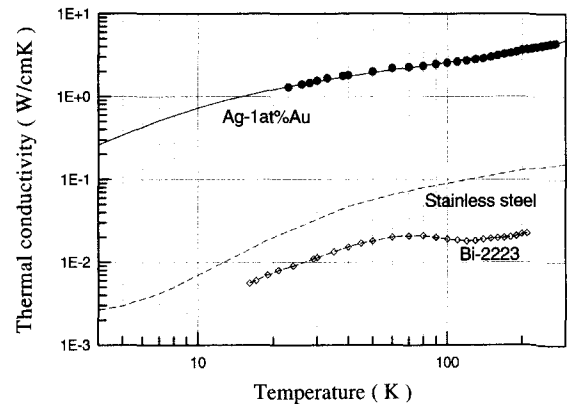


그림 5. Ag-1 at%Au, 스테인레스, Bi-2223의 열전도율.
Fig. 5. The thermal conductivity of Ag-1 at%Au, stainless steel and Bi-2223.

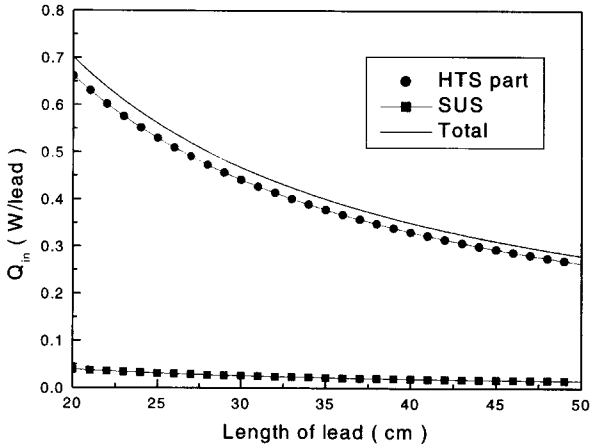


그림 6. 고온단부의 온도가 80 K 일 때 고온초전도 전류도입선의 길이와 침입열과의 관계.
Fig. 6. The heat input vs. length of HTS lead, when the warm end temperature is 80 K.

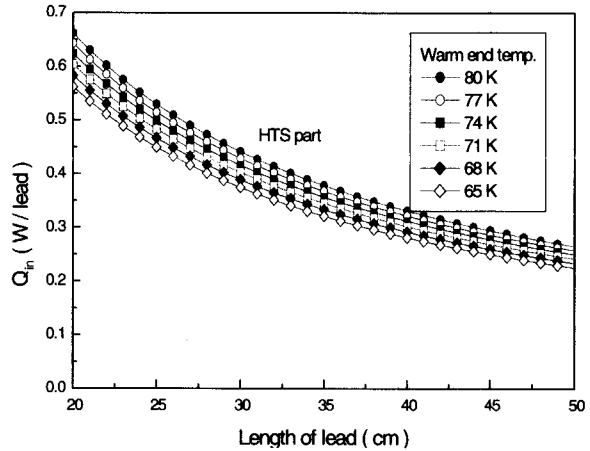


그림 7. 고온초전도 전류도입선에서 고온초전도 도체에 의한 침입열.
Fig. 7. The heat input through HTS part as a function of the warm end temperature and the length of lead.

그림 5는 고온초전도 전류도입선의 침입열을 계산하기 위해서 사용되는 각 재료들의 열전도 계수를 나타내고 있으며, 그림 5에 사용된 계수 값과 액체 및 기체 헬륨의 물리적 특성들은 참고문헌 [1], [5], [6]에서 인용하였다.

그림 6은 1.5 kA급으로 설계된 고온초전도 전류도입선의 고온단부 온도가 80 K일 때 고온초전도 전류도입선의 침입열을 길이에 대한 함수로 계산하여 나타내었다. 전류도입선 단면 중에서 구조재인 스테인레스의 면적은 도체부 면적의 약 1.6배(표 2) 크지만 그림 5에서 나타난 것처럼 스테인레스의 열전도율이 Ag-1at%Au 보다 낮기 때문에 구조재에 의한 침입열은 고온초전도 테이프에 의한 침입열의 5~6 %수준에 해당된다. 그리고, 전류도입선의 길이가 길어질 수록 침입열은 감소함을 알 수 있는데, 전류도입선의 길이를 35 cm로 할 경우 전류도입선 전체의 침입열은 0.4 W/lead가 된다. 현재 일반적인 구리 전류도입선을 사용할 경우에 구리부분의 주열에 의해서 침입열은 1 W/kA로 계산되어지며[1] 1.5 kA급 구리 전류도입선의 침입열은 약 1.5 W/lead가 되므로 본 연구에서 설계된 고온초전도 전류도입선을 사용할 경우 냉매의 손실을 1/3이하로 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

그림 7은 고온초전도 전류도입선의 고온단부 온도를 변화시키면서 계산되어진 고온초전도 테이프 부분의 침입열을 나타내며, 그림 8은 고온단부의 온도를 80 K로 고정했을 때 고온초전도 테이프 부분의 침입열을 고온초전도 테이프 Ag-Au/SC 비율과 도입선의 길이에 대한 함수로 나타낸 것이다. 그림 7에 의하면 고온단부의 온도를 3 K씩 낮출 때마다 침입열이 약 3 %가량 감소하는 것을 알 수 있다. 고온초전도의 테이프 면적과 임계전류가 동일하다는 조건에서 Ag-Au/SC 비율을 낮추게 되면 고온초전도 테이프의 평균 열전도율이 낮아지기 때문에 그림 8에서처럼 전체적으로 침입열이 감소하며, 전류도입선의 길이가 짧을수록 침입열에 대한 Ag-Au/SC 비율의 영향은 더 크게 나타났다. 이 결과를 바탕으로 할 때 고온초전도 테이프의 Ag-Au/SC를 낮춤으로써 침입열을 동일하게 한다면 전류도입선의 길이를 줄일 수 있어서 비용 면에서도 더 경제적이라 할 수 있다.

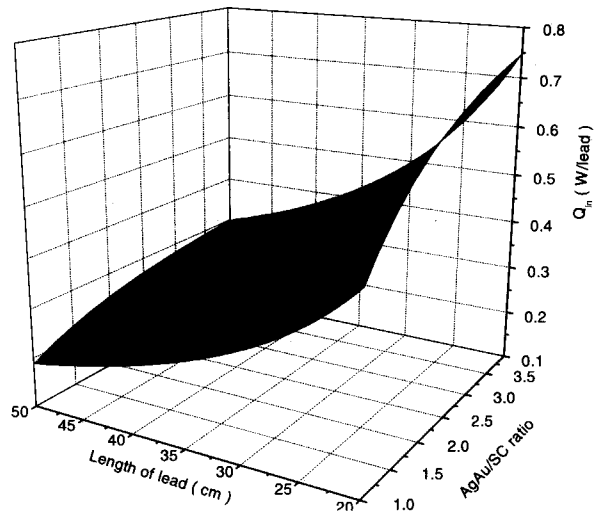


그림 8. 고온단부의 온도가 80 K일 때 Ag-Au/SC 비율과 전류도입선 길이의 함수로서 계산된 고온초전도 도체에 의한 침입열.
Fig. 8. The heat input through HTS part as a function of Ag-Au/SC ratios and length of lead, when the warm end temperature is 80 K.

3. 결 론

본 연구에서는 Ag-1at%Au 시스 Bi-2223 고온초전도 테이프 7개 적층한 단위도체를 stainless steel 튜브에 원통형태로 16개 배열하는 1.5 kA급 고온초전도 전류도입선을 설계하였다. 전자계해석에 의한 전류와 자계의 세기에 대한 관계에서 단위도체의 내경을 줄이면 수직성분의 자속밀도가 줄어들게 되어 같은 수의 도체를 사용하더라도 임계전류를 더 증가시킬 수 있음을 알 수 있었다. 77.3 K에서 임계전류가 21.5 A인 Bi-2223/Ag-Au 테이프를 내경 23 mm로 적층하였을 때 계산된 임계전류는 약 1.6 kA이었다.

전류도입선에 의해서 액체헬륨(저온단부)으로 유입되는 열을 계산하기 위해서 열평형방정식을 선형방정식으로 근사화 하여 침입열을 계산하였다. 전자계해석

으로 결정된 전류도입선 단면을 기준으로 할 때 길이 35 cm인 전류도입선 하나의 침입열은 0.4 W로 계산되어졌다. 그리고 전류도입선의 길이를 길게 하고 고온 단부의 온도가 낮을 수록 침입열이 감소하였으며, 고온 초전도 테이프 단면에서 Ag-Au/SC의 비율을 줄임으로써 침입열을 더 줄일 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Y. Iwasa "Case Studies in Superconducting Magnets", Plenum Press, 1994
- [2] John R. Hull "High-Temperature Superconducting Current Leads", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.3, No.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, Vol.9, No.2, pp.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, Vol.9, No.2, pp.960-963, 1999
- [5] Hiroyuki Fujishiro et. al. "Low Thermal Conductive Bi-2223 Tapes Sheathed with Ag-Au Alloys", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 30, No.4, pp.1645-1648, 1994
- [6] J. G. Weisend II "Properties of Cryogenic Fluids", TAYLOR & FRANCIS, pp. 23-32, 1998

저 자 소 개



장현만(張鉉萬)

1971년 5월 21일 생, 1994년 경상대 전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 졸업(공학석사), 1999년 동 대학원 박사과정 수료, 1995년 6월 ~ 현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 위촉연구원



오상수(吳詳秀)

1959년 11월 1일 생, 1982년 경북대 공대 금속공학과 졸업, 1992년 일본 경도대 대학원 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 선임연구원



조전욱(趙全旭)

1960년 3월 2일 생, 1983년 한양대 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 선임연구원



조영식(曹永植)

1970년 7월 9일 생, 1997년 창원대 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기전자제어공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 박사과정 및 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 위촉연구원



하홍수(河洪秀)

1969년 5월 21일 생, 1995년 성균관대 금속공학과 졸업, 1997년 동 대학원 금속공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 연구원



하동우(河東雨)

1962년 7월 12일 생, 1985년 경북대 금속공학과 졸업, 1987년 동 대학원 졸업(공학석사), 현재 연세대 대학원 금속공학과 박사과정, 1987년~현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 선임연구원



성기철(成耆哲)

1956년 2월 20일 생, 1980년 한양대 전기공학과 졸업, 1983년 동 대학원 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 책임연구원



권영길(權永吉)

1959년 7월 28일 생, 1982년 부산대 기계공학과 졸업, 1984년 동 대학원 졸업(공학석사), 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1990 ~ 1991년 한국기계연구원 선임연구원, 현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 그룹장



류강식(柳康植)

1956년 8월 20일 생, 1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1984년 광운대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1987년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구소 전략기술연구단장



김상현(金相賢)

1950년 2월 7일 생, 1974년 인하대 공대 전기공학과 졸업, 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1986년 일본 대판대학 전기공학과 졸업(공학박사), 1989년 2월 한국전기연구소 극저온재료실장, 1998년 현재 경상대 전기공학과 교수 및 공과대학장