

HTS 선재에 따른 초전도 핵융합 마그네틱용 고온초전도 전류도입선의 개념설계

Conceptual Design of High-Tc Superconducting Current leads for Superconducting Nuclear Fusion Magnets with respect to various HTS tapes

장재영¹, 장기성¹, 김영재¹, 최석진¹, 조현철¹, 주승열², 고태국^{3,*}

J.Y. Jang¹, K.S. Chang¹, Y.J. Kim¹, S.J. Choi¹, H.C. Jo¹, S.Y. Chu², T.K. Ko^{3,*}

Abstract: Superconducting current leads are indispensable for reducing power loss when subjecting current into superconducting magnets. HTS(High-Tc superconducting) current leads are divided into two types; one is bulk type and the other is tape type. In this paper, conceptual design on the HTS current leads which adopts tape type for nuclear fusion magnets is carried out using magnetic field analysis and thermal analysis. When large current flows through superconducting current leads, strong self magnetic field is generated and applied to the superconducting tapes. This phenomenon leads to the critical current decrease of the superconducting tape. Therefore, we analyzed magnetic field distribution of current leads and found the proper arrangement with respect to the various HTS tapes. In addition to the magnetic field analysis, heat leak through the current leads was also calculated to know which HTS tape is superior than others in thermal aspect. Magnetical field analysis and calculation of heat leak are performed to design 2 kA class HTS current leads.

Key Words: critical current, heat leak, magnetic field analysis, superconducting current lead.

1. 서 론

초전도 선재는 운전상태가 임계전류, 임계온도, 임계 자기장 하에 있을 시에는 저항이 0으로 손실 없이 전류를 통전시킬 수 있다. 하지만, 위의 세 가지 조건 중 한 가지라도 만족시키지 못할 경우 전기적 손실이 발생하고, 초전도 선재는 불안정한 운전을 하게 된다. 이러한 초전도 선재의 임계조건은 독립적이지 않고, 서로 영향을 받는데, 초전도 선재에 자기장이 가해지면, 임계 전류가 감소해 퀘치가 발생할 확률이 높아진

다 [1]. 따라서 다양한 초전도 기기를 설계할 때 기기에 미치는 자기장 특히, 선재에 인가되는 수직자기장의 값을 분석해 원하지 않는 퀘치를 막는 것이 중요하다. 핵융합 발전에 사용되는 초전도 코일과 발전기 사이를 연결하는 전류도입선을 초전도 선재로 구성할 경우 전기적 손실과 냉각량이 급격히 줄어들어, 고온초전도 전류도입선에 대한 연구가 활발히 진행 중이다 [2]. 하지만 수 kA에서 수십 kA이상의 전류를 통전시키는 핵융합발전용 고온초전도 전류도입선에서도 자기장에 따른 임계전류 감소현상이 발생하고 이를 고려해서 운전을 해야 한다. 고온초전도 전류도입선에 사용될 수 있는 초전도 선재로 AMSC사의 1세대 선재인 BSCCO Bi-2223 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$), 2세대 선재인 344S, Cryoblock2등이 있는데, 본 논문에서는 선재의 종류 및 적층개수를 다양화하면서 각 경우의 임계전류 감소폭을 결정하였다. 핵융합 발전을 위한 초전도 코일에 사용될 전류도입선은 수직자기장에 의한 임계전류 감소 뿐 아니라 극저온부로의 열침입 또한 고려해야 한다. 이를 위해 각 선재에 따른 열침입을 계산해 열적으로 우수한 선재를 결정하였다. 이러한 내용들을 토대로 실제 핵융합 발전용 전류도입선 설계에 앞서 소용량(2 kA) 고온초전도 전류도입선을 설계했다.

2. 자기장 해석을 통한 통전전류 결정

고온초전도 전류도입선에 수 kA이상의 전류를 통전시키기 위해서는 병렬로 연결된 수십 가닥의 초전도 선재들이 필요하다. 그림 1은 고온초전도 전류도입선의 단면을 나타내는데, 원통형의 보빈을 병렬 연결된 초전도 선재들이 둘러싸는 형상을 띠고 있다. 적층된 초전도 선재들로 1개의 모듈을 구성하고, 이 모듈들이 모여 전체 전류도입선을 구성하는데, 사용된 선재의 총 개수는 모듈과 적층 수의 곱으로 이루어진다.

해석에 사용된 선재는 AMSC사의 Bi-2223, 344S, Cryoblock2이며 선재의 사양은 표 1과 같고 이 사양들은 선재회사에서 제공한 사양을 근거로 했다. AMSC사의 Cryoblock2는 344S와 기본적인 구조는 동일하나 은(Ag)층을 열적으로 강화한 선재로 다른 특성은 거의 동일하다. 따라서 자기장 해석 시에 두 선재는 같은 선재로 취급했다. 선재와 적층수를 바꿔가면서 각각의 경우에 대한 2D 자기장해석을 수행해 선재에 수직으로 인가되는 자기장 값을 Infolytica사의 MagNet으로 계산했다. 그 후에 인가자기장 대 임계전류 그래프를 통해 임계전류 감소를 고려한 실제 임계전류를 계산했다. 전류도입선 시스템으로 대전류가 통전되면 적층된 초전도 선재의 저항차이에 의해 전류분배가 일어나는

¹학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정

²학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 석사과정

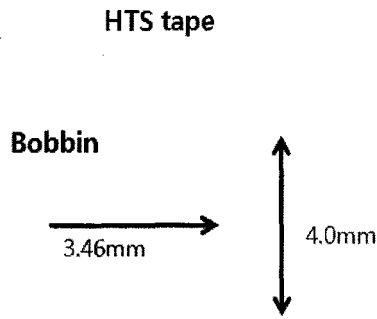
³정 회원 : 연세대 전기전자공학과 정교수

*교신저자 : tkko@yonsei.ac.kr

원고접수 : 2009년 09월 24일

심사완료 : 2010년 02월 20일

게재확정 : 2010년 02월 20일



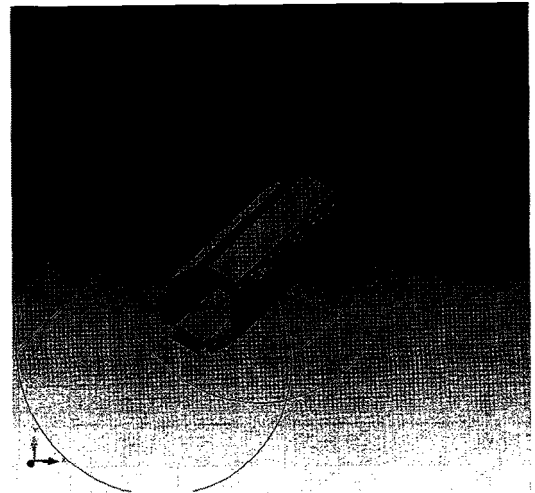
$$B = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_0 I_i}{4\pi} \oint \frac{dl_i \times a_{Ri}}{(R_i)^2} \quad (1)$$

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

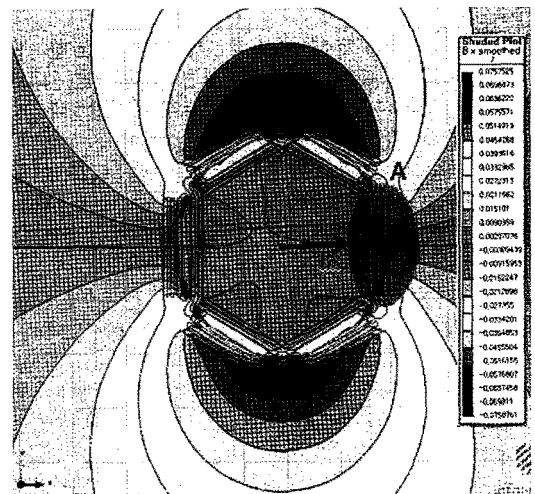
Table 1. Specifications of HTS tapes.

	Bi-2223	344S	Cryoblock2
HTS	BSCCO	YBCO	YBCO
width	4.0 [mm]	4.0 [mm]	4.0 [mm]
thickness	0.3 [mm]	0.2 [mm]	0.2 [mm]
Critical current (@ 77.3 K, self field)	135 [A]	110 [A]	110 [A]

데, 적층 수가 늘어날수록 동일한 전류분배가 일어나기 힘들어진다. 따라서 적층에 의한 전류 불균형과 관련된 연구가 활발히 진행 중이며, 실제 통전전류를 임계전류보다 낮게 설정함으로써 적층에 의한 전류 불균형 문제를 해결하고 있다. 적층을 사용하지 않은 고온초전도 전류도입선에서는 동작전류를 임계전류의 70%로 설정하였고 [3], 적층을 사용한 다른 고온초전도 전류도입선에서는 동작전류를 임계전류의 50%로 설정하였다 [4]. 본 논문에서는 적층을 사용한 기존의 논문을 참고해 운전전류를 임계전류의 50%로 설정했다. 경우의 수를 제한하기 위해 모듈 수는 6개로 고정시켜, 전류리드는 6각형의 단면을 갖는다. 기존의 논문을 통해 보빈의 반경이 작을수록 자기장 측면에서 유리하다는 사실을 확인했다 [4]. 또한 반경이 작을수록 부피도 줄어들고, 열침입도 줄어들어 열적으로 안정하기 때문에 고온초전도 전류도입선의 중심부터 선재까지의 거리는 최소로 설정했다. 적층수를 5개부터 8개까지 변화시키면서, 수직자기장에 의한 임계전류 변화를 계산하여, 2 kA를 통전시키기 위해 필요한 선재의 개수 및 선재 1개당 통전전류를 계산했다. BSCCO 계열의 선재와 YBCO 계열의 선재는 수직자기장이 인가될 때 임계전류가 감소하는 비율이 다른데, BSCCO 계열의 임계전류가 YBCO 계열의 임계전류보다 수직자기장에 대해 더욱 크게 감소한다. 따라서 자기장해석을 통한 임계전류 감소비율도 선재에 따라 다를 것으로 기대된다. 선재에 영향을 미치는 자기장의 세기는 다음 식 (1)과 같다.



(a)



(b)

Fig. 2. (a) FEM model of stacked current lead (b) magnetic flux density distribution(x-direction).

식 (1)의 I_i 는 i 번째 도체에 통전되는 전류값, μ_0 는 진공에서의 투자율, R_i 는 i 번째 도체와의 거리를 의미한다. 유한요소법 시뮬레이션 모델과 자기장 분포도는 그림 2에 나타내었는데, 그림 2의 (a)는 적층된 전류도입선의 외관을 유한요소법으로 모델링 한 그림이고, (b)는 x방향의 자기장분포도이다. 그림 2에서 가로방향이 x방향, 세로방향이 y방향이다. 그림 2의 A도체에 가해지는 수직자기장 방향은 x방향이므로, A에 가해지는 B_x 를 계산하면 그것이 수직자기장이 된다. 표 2는 적층 수, 선재의 종류에 따른 임계전류 및 도체 1개당통전전류 값을 계산한 표이고, 표 3은 해당경우에서의 전체통전전류를 나타낸 표이다. 표 2의 위에 있는 값이 통전전류값이고, 그 바로 아래에 있는 괄호안의 값이 각 적층에서의 임계전류값이다. 인가되는 외부자기장이 없고, 온도가 77 K일 때 YBCO 계열 선재와 BSCCO 계열 선재의 임계전류는 약 20 A정도 차이가 났으나, 수직자기장에 의한 임계전류 감소를 고려할 경우 그 차이가 많이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 위에서 언급한 것과 같이 두 계열 선재의

Table 2. Simulation results of operating current and critical current with respect to various conditions.

비고	Bi-2223	344(Cryoblock2)
5적층	55.64 [A] (111.28 [A])	53.04 [A] (106.08 [A])
6적층	55.08 [A] (110.17 [A])	52.79 [A] (105.59 [A])
7적층	54.68 [A] (109.35 [A])	52.42 [A] (104.85 [A])
8적층	54.39 [A] (108.78 [A])	52.59 [A] (105.19 [A])

Table 3. Simulation results of total operating current.

비고	Bi-2223	344(Cryoblock2)
5적층	1.66 [kA]	1.59 [kA]
6적층	1.98 [kA]	1.90 [kA]
7적층	2.29 [kA]	2.20 [kA]
8적층	2.61 [kA]	2.52 [kA]

임계곡선의 차이에 의한 것으로 생각된다. 또한 적층 수를 늘릴수록 선재 1개당 임계전류는 약간씩 감소하는 것을 확인할 수 있는데 이는 적층의 증가에 따른 자기장 세기의 증가에 기인한다. 2 kA 이상의 전류를 얻기 위해 Bi-2223, 344S 모두 7적층 총 42개 이상의 선재를 병렬로 연결시켜야 함을 결과를 통해 확인할 수 있다.

3. 열침입 계산을 통한 전류도입선 설계

고온초전도 전류도입선의 저온부(4.2 K)로부터 액체 헬륨으로의 열침입은 극저온을 유지시키는 액체헬륨과 같은 냉매의 증발로 이어지기 때문에, 이 값을 최소화 하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 HTS 부분의 선재를 달리하면서 각 경우의 열침입을 계산해 비교분석했다. 저온부로의 열침입은 그 밑에 존재하는 액체헬륨의 증발량과 같다는 것이 열해석의 기본 전제이고 이를 식으로 표현한 것이 식 (2)이다.

$$\frac{d}{dz} \left[A_m K_m (T) \frac{dT}{dz} \right] - m_{he} C_p (T) \frac{dT}{dz} = 0 \quad (2)$$

식 (2)의 A_m 은 단면적, K_m 은 열전도도, C_p 는 비열, T 는 온도가 된다. HTS 부분의 길이방향에 대한 2차 미분방정식인 식 (2)를 풀기 위해 열전도도 K_m , 비열 C_p 는 HTS 부분의 동작온도인 4.2 K에서 80 K 사이의 평균값으로 정한 후 $T(z=0) = T_0(4.2 \text{ K})$, $T(z=l) = T_l(80 \text{ K})$ 로 설정한다. 그 후 식 (2)를 풀어 $T(z)$ 를 구하면 식 (3)을 얻을 수 있고, $z=0$ 에서의 열전달 값인 Q 를 구하면 식 (4)가된다.

$$T(z) = \left(\frac{T_l - T_0}{e^a - 1} \right) \left[e^{a(z/l)} + \frac{e^a(T_0 - T_l)}{T_l - T_0} \right], a = \frac{m_{he} C_p l}{K_m A_m} \quad (3)$$

$$Q = K_m A_m \left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=0} \quad (4)$$

위의 식들을 정리하면 열침입의 최종공식인 식 (5)를 얻을 수 있다 [4,5].

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

Table 4. Specification of thermal characteristics and size of various material.

Bobbin	GFRP
$A_m(\text{Bobbin})$	0.414 [cm ²]
$A_m(\text{Bi-2223})$	0.504 [cm ²]
$A_m(\text{344S})$	0.336 [cm ²]
$A_m(\text{Cryoblock2})$	0.336 [cm ²]
$K_m(\text{Bobbin})$	0.00267 [W/cm*K]
$K_m(\text{Bi-2223})$	0.327 [W/cm*K]
$K_m(\text{344S})$	0.192 [W/cm*K]
$K_m(\text{Cryoblock2})$	0.0987 [W/cm*K]
$C_p(\text{He})$	5.29 [J/g*K]
h_L	20.4 [J/g]

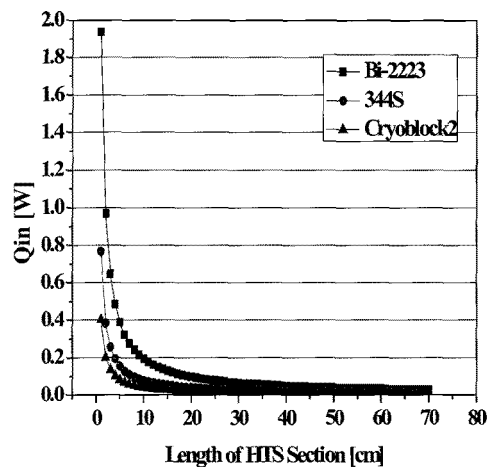


Fig. 3. Calculation result of heat penetration with respect to various HTS tape.

h_L 은 액체헬륨의 증발열이다. 식 (5)를 이용해서 2 kA를 통전시키기 위한 고온초전도 전류도입선의 열침입을 선재별로 계산할 수 있다. 앞에서 제안한 세 가지 선재(344S, Cryoblock2, Bi-2223)는 열전도도와 단면적이 다르므로, 2 kA급 전류도입선을 설계할 때 각 경우에서의 저온부로의 열침입을 계산할 경우 다른 값을 가질 것이며, 이를 통해 선재끼리의 열적특성을 비교할 수 있다. 열침입 계산을 위해 필요한 각 선재와 보빈 및 액체헬륨의 열적 사양은 표 4와 같다 [5,6]. 각 선재의 단면적은 선재 1개의 면적에 2절에서 계산한 초전도 선재의 개수를 곱하면 구할 수 있다. 열전도도는 4.2 K과 80 K사이의 온도대의 열전도도를 구한 후 이 값들의 평균값을 취해서 얻었다. 또한 전체 열침입은 선재를 통한 열침입과 보빈을 통한 열침입을 더해

서 얻을 수 있다. 식 (5)와 표 4를 통해 얻은 선재에 따른 열침입 그래프는 그림 3과 같다. 그림 3의 가로축은 HTS 부분의 길이, 세로축은 저온부로의 열침입이다. 그림 3을 통해 HTS 선재의 길이가 길어질수록 열침입이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 따라서 원하는 열침입에 맞춰 HTS 부분의 길이를 설계하여야 한다. 약 2 kA급 전류도입선을 Bi-2223로 제작할 경우 열침입이 제일 크고 그 값은 Cryoblock2로 제작할 경우의 약 4.84 배, 344S로 제작할 경우의 약 2.52 배이다. 설계결과를 바탕으로 상용화되어있는 Nexans사의 Bi-2212 벌크로 제작된 초전도 전류도입선과 성능을 비교했다. 동작전류를 임계전류의 50%로 설정할 경우 2 kA급 초전도 전류도입선의 임계전류는 약 4 kA이다. Nexans사에서 제공하는 임계전류가 약 4 kA인 벌크용 초전도 전류도입선의 열침입이 1개당 약 0.14 W이다 [7]. 이 값보다 적은 열침입을 갖기 위해 Bi-2223는 길이가 약 15 cm 이상이 되어야 하고, 344S는 약 6 cm 이상, Cryoblock2는 약 2 cm 이상이 되어야 한다. 이 결과를 통해 Cryoblock2는 2 cm 이상의 길이만 되어도 Nexans의 벌크형 초전도 전류도입선보다 좋은 열특성을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 따라서 Cryoblock2가 짧은 길이로도 열침입을 줄일 수 있음을 정량적으로 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 고온초전도 전류도입선에 사용될 수 있는 세 가지 선재 Bi-2223, 344S, Cryoblock2의 자기적, 열적 특성에 대해 알아보았다. 각 선재별로 수직자기장 하에서의 임계전류감소 특성을 고려해 2 kA급에서의 동작전류와 필요 병렬수를 계산하였다. 인가되는 자기장이 없을 때 선재간의 임계전류차이는 존재하지만, 수직자기장이 인가될 경우는 임계전류가 거의 비슷했음을 확인했고, 필요한 초전도 선재의 개수도 42개로 동일했다. 열해석을 수행한 결과로 볼 때, 같은 조건에서는 cryoblock2의 열침입이 가장 작고, HTS 부분의 길이를 늘일수록 열침입은 줄어드는 것을 정량적으로 살펴보았다. Cryoblock2의 경우 전류도입선의 설계에 있어서 중요한 요소인 열침입이 적기 때문에 냉각에 드는 에너지를 줄일 수 있어 유리하다는 결론을 얻을 수 있다. 하지만 Cryoblock2가 다른 선재에 비해 상대적으로 고가이기 때문에, 선재에 드는 비용과 냉각에 드는 비용을 잘 고려해야 한다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국책 연구 사업임(No. 2009 - 0082742)

참 고 문 헌

[1] 김석환, 한송엽 "초전도 공학개론". 대영사, 2004년.
 [2] Pierre Bauer, Yanfang Bi, Anyi Cheng, Arnaud Devred, Kaisong Ding, Xiongyi Huang, Kun Lu, Neil Mitchell, Ananta K. Sahu, Guang Shen, Yuntao Song, and Tingzhi Zhou "R&D Towards

HTS Current Leads for ITER", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 19, no. 3, pp. 1500 - 1503, 2009.

[3] Myung-Hwan Sohn, Seokho Kim, Kideok Sim, Joon-Han Bae, Seok-Ju Lee, and Hae-YongPark. "Fabrication and Characteristics of 2G HTS Current Leads", 21st International Conference on Magnet Technology, 2009.
 [4] 장현만, 오상수, 조전욱, 조영식, 하홍수, 하동우, 성기철, 권영길, 류강식, 김상현, "SMES 마그네트용 고온초전도 전류도입선 설계", 한국 초전도 저온공학회, 2권, 2호, pp. 6-10, 2000.
 [5] Yukikazu Iwasa, Haigun Lee, "High-temperature superconducting current lead incorporating operation in the current-sharing mode", Cryogenics, vol. 40, pp. 209-219, 2000.
 [6] C.Hoffmann, N.Strickland, D.Pooke, J.Gannon, B.Carter, A.Otto, "Thermal Conductivity of 2G HTS wires for current lead application". European Conference on Applied Superconductivity, 2009.
 [7] http://www.nexans.fr/eservice/France-fr_FR/navigate_126712/HTS_current_leads.html#op

저 자 소 개



장재영(張宰榮)
 1982년 11월 8일생, 2007년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기전자공학과 박사과정.



장기성(張基盛)
 1981년 9월 23일생, 2005년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기전자공학과 박사과정.



김영재(金永宰)
 1981년 6월 7일생, 2005년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기전자공학과 박사과정.



최석진(崔錫鎭)
 1974년 6월 10일생, 1998년 연세대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기전자공학과 박사과정.



조현철(趙賢哲)
 1979년 11월 30일생, 2007년 동국대 공대 전기공학과 졸업, 2009년 연세대 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기전자공학과 박사과정.



주승열(朱承烈)

1985년 2월 1일생, 2009년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 현재 동대학원 전기전자공학과 석사과정.



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업 (M.Sc). 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업 (Ph.D). 1986년 ~ 1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국 초전도 저온공학회 회장.