

21T 초전도자석을 위한 전류도입선 예비설계

Preliminary Design of Current Lead for 21 T Superconducting Magnet

최연석^{1,*}, 김동락¹, 양형석¹, 이병섭¹, T.A.Painter²

Y. S. Choi^{1,*}, D. L. Kim¹, H. S. Yang¹, B. S. Lee¹, T.A.Painter²

Abstract: Design of current lead for 21 T superconducting magnets is presented. The current lead is composed of a normal metal element, conducting the current from room temperature to intermediate temperature, and an HTS element, conducting the current down to liquid helium temperature. The metal element is disengaged from the HTS element without breaking vacuum after excitation. The optimization of the lead is performed to minimize the thermal heat load when carrying operational current with some margin. In order to confirm the feasibility of our new design, the intermediate joint between a normal metal and HTS element is fabricated and the reliability is tested during engage and disengage performance. The effects of vacuum level and performance cycle on the electrical contact resistance are also investigated.

Key Words: current lead, optimization, heat load, superconducting magnets.

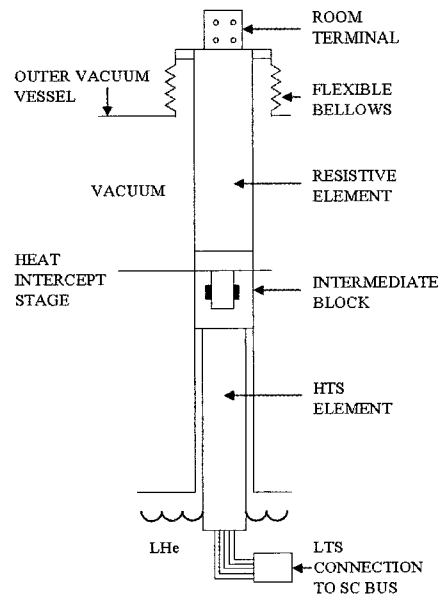


Fig. 1. Schematic of a current lead showing principal components (engaged state).

1. 서 론

전류도입선은 상온에 위치한 전류공급 장치로부터 극저온에서 동작하는 초전도자석에 전원을 공급하는 중요한 요소이다. 고자기장용 초전도자석 시스템에서 전류도입선을 통한 열손실이 전체 열손실중 상당한 부분을 차지하고 있으므로 지금까지 열손실량을 줄이기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다[1-4]. 본 연구에서는 21 T 초전도자석에 적용될 HTS 전류도입선의 개념을 소개한다. 기존의 고자기장 초전도자석용 전류도입선이 가지고 있는 많은 열손실 및 상온부 하단에서 발생하는 결빙 문제 등을 해결하고, 초전도자석 통전후에는 전류도입선을 통한 열손실량을 제로화시킬 수 있는 새로운 개념의 전류도입선이다.

21 T 초전도자석용 전류도입선은 그림 1에서 보는 바와 같이 금속으로 만들어진 고온부, 고온초전도체로 만들어진 저온부, 그리고 이 두부분을 연결하는 연결부로 이루어져 있다. 초전도체의 일부는 액체헬륨에 잠겨있고 초전도체와 금속부 사이의 연결부는 냉동기

의 1단부에 의해 냉각된다. 본 연구에서는 금속부와 저온부에서 열침입량을 최소화하기 위한 최적화 설계를 수행하였고, 이들을 연결하는 연결부의 개념설계를 진행하였다. 또한 고자기장용 초전도자석 시스템에 적용 가능성을 검증하기 위한 성능평가 실험을 수행하였다.

2. 전류도입선 최적화

Fig. 1에서 보는 바와 같이 전류도입선의 금속부는 상온과 냉동기 1단 냉동부 온도사이에서 작동하며 냉동기 1단 냉동부에 의해 전도냉각된다. 전도냉각되는 전류도입선 금속부의 수직방향 온도구배는 다음의 관계식을 이용하면 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dz} \left(k(T) A \frac{dT}{dz} \right) + \frac{\rho(T) \cdot I^2}{A} = 0 \quad (1)$$

여기서 T는 금속부의 수직방향 온도, A는 단면적, I는 통전류, z는 수직방향 거리, 그리고 k(T)와 ρ(T)는 각각 열전도도와 전기비저항을 의미한다. 주어진 전류에 대하여 열손실량을 최소화시키기 위하여 최적의 금속부 크기비를 구하였고, 이 때 발생하는 열손실을 각각의 온도조건과 전류도입선의 물성을 이용하여 구하였다.

¹정 회 원 : 한국기초과학지원연구원

²비 회 원 : National High Magnetic Field Laboratory

*교신저자 : ychoi@kbsi.re.kr

원고접수 : 2008년 02월 05일

심사완료 : 2008년 08월 28일

게재확정 : 2008년 08월 28일

$$\left(\frac{Q}{I}\right)_{opt} = \sqrt{2 \int_T^{T_H} \rho(T) k(T) dT} \quad (2)$$

$$\left(\frac{LL}{A}\right)_{opt} = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_T^{T_H} \frac{k(T)}{\sqrt{\int_T^{T_H} \rho(\tau) k(\tau) d\tau}} dT \quad (3)$$

여기서 T_H 는 상온을 의미하며, L 은 금속부의 길이를 의미한다.

전류도입선의 초전도부는 냉동기 1단 냉동부와 액체 헬륨 사이의 온도에서 작동한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 초전도부는 액체헬륨에 의한 전도 및 파이프 내 헬륨증기의 자연대류에 의해 냉각된다. 초전도부와 지지 파이프 벽의 수직방향 온도구배는 다음의 관계식을 이용하면 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dz} \left(kA \frac{dT}{dz} \right)_l + \frac{\rho_l \cdot I^2}{A_l} - hP(T_l - T_w) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d}{dz} \left(kA \frac{dT}{dz} \right)_w + hP(T_l - T_w) = 0 \quad (5)$$

여기서 h 는 표면과 표면사이의 열전달계수이고 P 는 축방향 둘레길이이다. 하첨자 l 과 w 는 각각 도입선 (lead)과 파이프 벽 (wall)을 의미한다. 충분히 효율적인 열전달 상황에서는 초전도부와 파이프 벽의 온도는 같다고 간주할 수 있고[5], 에너지 평형 방정식은 전도냉각방식의 전류도입선 온도분포와 유사하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d}{dz} \left(k_l A_l (1 + \epsilon) \frac{dT}{dz} \right) + \frac{\rho_l \cdot I^2}{A_l} = 0 \quad (6)$$

여기서 $\epsilon \equiv k_w A_w / k_l A_l$ 을 의미한다. 따라서 최소열 손실과 최적의 전류도입선 크기비는 $1 + \epsilon$ 만큼 증가함을 알 수 있다.

3. 연결부 (Intermediate Joint)

금속부와 초전도부 사이의 연결부는 멀티램 (MultilamTM)을 통하여 전류를 흘려보낸다. 멀티램은

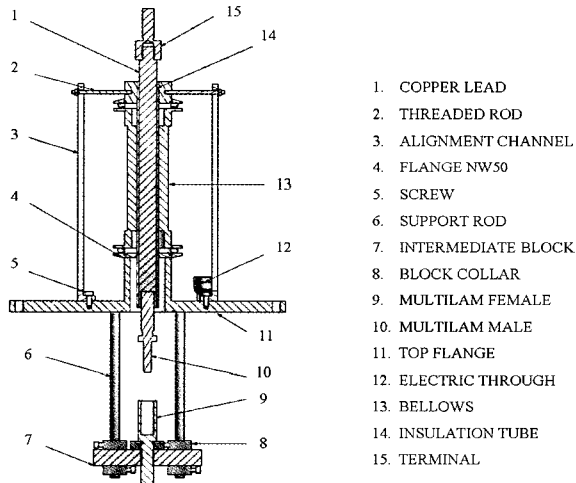


Fig. 2. Cross-sectional view of the intermediate joint (disengaged state).

전기적으로 연결시키기 위해 많은 루버 (Louver)가 설치된 상품화된 부품이다. 각각의 루버는 독립된 통전부를 가지므로 총 전류량은 전류가 흐르는 루버의 수 및 단면적으로 결정할 수 있다. Fig. 2는 성능평가를 위하여 설계된 전류도입선 연결부의 단면도이다. 한쌍의 멀티램 중 플러그 (Plug)는 금속부에 설치되고 소켓 (Socket)은 4개의 금속에 의해 지지되는 금속연결부에 설치되며, 이 연결부는 냉동기의 1단 냉동부에 의해 냉각된다. 멀티램을 이용하면 전기적으로 착탈이 가능한데, 착탈시 저온용기의 진공을 유지하기 위하여 Fig. 2에서 보는 바와 같이 벨로우즈안에 금속부를 설치하였다. G10 관을 이용하면 금속부를 전기절연시킬 수 있고, 진공을 유지하기 위하여 G10 관 상단을 중심에 구멍이 있는 NW50 Bored Stud에 에폭시를 이용하여 접합하고, O-ring과 클램프를 이용하여 진공을 유지한다.

4. 결과 및 토의

Fig. 3은 최적화된 전류도입선 금속부를 통한 열손실량을 사용가능한 여러 금속에 대해 연결부 온도의 함수로 나타낸 그림이다. 금속부와 초전도부 사이의 연결부는 냉동기 1단 냉동부에 의해 냉각되므로 가능한 온도범위는 냉동기의 성능에 따라 다르다. 구리의 최소 열손실량은 다른 금속보다 작으며 온도범위 30

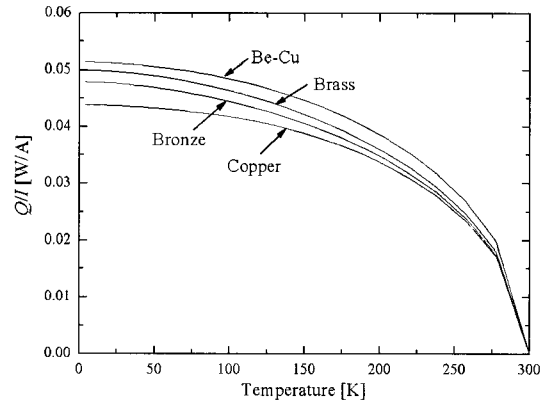


Fig. 3. Minimum heat load per unit current of normal metal element with respect to the thermal intercept temperature.

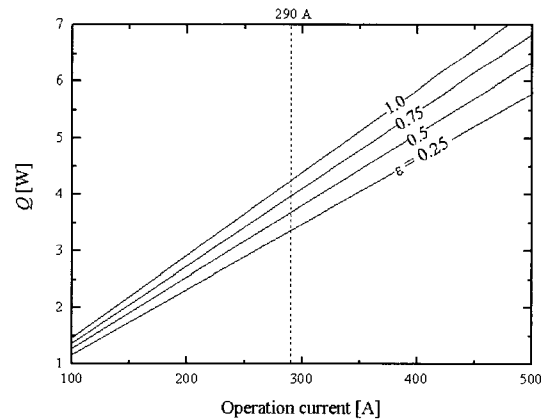


Fig. 4. Minimum heat load of HTS element with respect to the operating current.

Table 1. Design summary of current lead for 21 T superconducting magnet.

| Parameter | | Description | |
|---------------------|------------------|----------------------|----------------------|
| Design current | | 290 A | |
| Resistive element | Material | Copper RRR-10 | |
| | Effective area | 28.6 mm ² | |
| | Effective length | 256 mm | |
| | Current density | 10 A/mm ² | |
| Heat load (engaged) | | 12.5 W/pole | |
| HTS element | HTS tape | Material | Bi-2223/Ag-Au tape |
| | | Size | 0.21 mm × 3.3 mm |
| | Shunt | Material | Stainless steel |
| | | Size | 0.3 mm × 300 mm |
| | Current density | | 30 A/mm ² |
| | Effective length | | 300 mm |
| Heat load (engaged) | | 3.4 W/pole | |
| Intermediate Joint | Block | Material | Copper |
| | | Diameter | 25 mm |
| | | Stroke | 21 mm |
| | Multilam louver | Height | 17.5 mm |
| | | Width | 2.5 mm |
| | | Current | 16.7 A/louver |

~ 80 K에서 구리의 최소열손실량은 거의 일정하였으며 그 값은 0.043 W/A 이다. 전류도입선 초전도부의 주요소는 고온초전도 테잎과 스테인레스 강판 이다. 고온초전도 테잎을 강판의 양 끝단에 연납땜을 이용하여 접합하는데 강판은 초전도테잎을 지지하며, 동시에 퀀치시 전류를 분산시키는 역할을 한다. 초전도부를 둘러싼 파이프는 헬륨용기와 전류도입선 초전도부를 일체화시켜 주며 초전도자석 통전후 전류도입선 금속부가 이탈하더라도 전기적, 기계적으로 영향을 받지 않는다. 강판의 재질은 허용가능한 국소 고온점 (Hot-spot) 온도를 기준으로 결정하였다. 본 설계에 사용된 초전도테잎은 Bi-2223 (Ag-11at%Au) 이다. 그림 4는 냉동기 1단 냉동부가 60 K 일때 작동전류에 대해 초전도부에서 발생하는 최소 열손실량이다. ϵ 이 증가함에 따라 최소 열손실량이 증가하는데 이는 열전도 손실이 추가되기 때문이다. 본 설계에서 ϵ 는 0.25이고 통전시 초전도부를 통해 헬륨용기로 침입하는 열량은 3.4 W 이며, 파이프 재질을 변경하면 열침입량을 감소할 수 있다.

초전도부와 금속부를 연결하는 연결부는 앞에서 설명한 바와 같이 멀티랩을 통하여 전류가 흐른다. 멀티

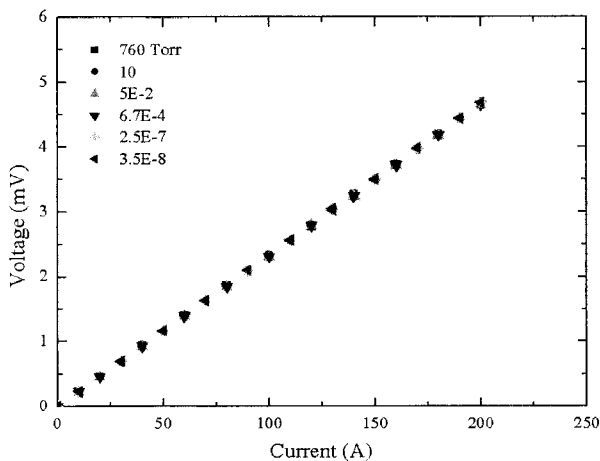


Fig. 5. Current-voltage characteristic through the Multilam with various vacuum level.

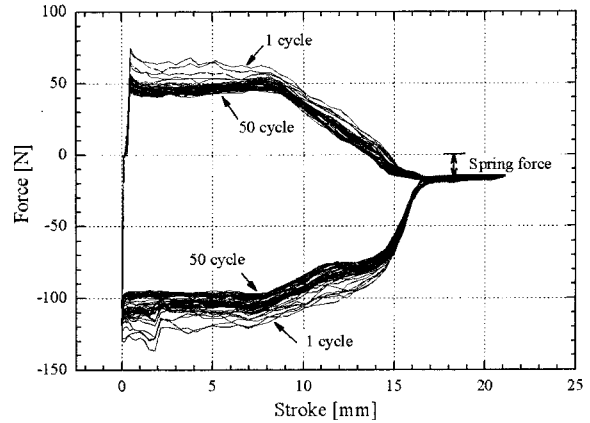


Fig. 6. Required force vs. stroke during engage and disengage performance.

랩내의 루버의 높이는 17.5 mm 이고 멀티랩의 지름은 20 mm 이다. Multi-Contact[6] 사에서 생산하는 LAI/0.25 모델을 본 연구에 사용하였다. 루버와 루버사이의 간격은 2.5 mm 이고 멀티랩은 총 18개의 루버를 가진다. 따라서 한 개의 루버를 통해 흐르는 평균전류량은 16.7 A 이다. 전류도입선 최적화 설계 결과를 Table 1에 정리하였다.

전류도입선의 금속부와 연결부를 제작하여 저온용기에 설치하고 멀티랩을 통한 전압강하와 착탈시 필요한 힘을 측정하였다. Fig. 5는 저온용기의 진공레벨에 따른 전류-전압 특성 이다. 전류를 0 A에서 200 A까지 변화시켰을때 저온용기내의 압력을 3.5×10^{-8} Torr 까지 내린 결과 멀티랩을 통한 전류-전압 특성은 영향을 받지 않는 것을 알 수 있었다. 전류도입선의 금속부를 초전도부로부터 분리시키기 위한 힘의 크기를 MTS 장비를 이용하여 측정하였다. Fig. 6은 50회 착탈시 필요한 힘의 크기를 플러그의 위치에 대하여 그린 그림이다. 플러그가 삽입과 이탈하는데 필요한 힘의 크기는 벨로우즈가 가지고 있는 고유 스프링힘을 포함하여 각각 100 N (압축력), 50 N (인장력) 이었다. 행정거리 (Stroke) 는 금속부가 완전히 삽입과 이탈되도록 21 mm로 고정하였다. 행정거리가 21 mm 일때, 금속부는 완전히 이탈되며 단지 벨로우즈의 스프링힘만이 작용하는데 그 값은 18 N 이었다. 금속부는 $x = 17$ mm부터 삽입되기 시작하였고, $x = 7$ mm에서 완전히 삽입되었다. 행정거리가 $x = 0$ 일때 작용하는 힘의 방향이 바뀌었고, 그 결과 힘도 압축력에서 인장력으로 바뀌었다. 착탈시 필요한 힘의 크기는 반복횟수가 증가함에 따라 미소하게 감소하는 것을 알 수 있었다. 연결부의 전기접촉저항 (ECR, Electrical Contact Resistance [7])은 약 24.2 $\mu\Omega$ 에서 50회 착탈후 약 25.2 $\mu\Omega$ 으로 증가하였다. 본 연구에서 착탈후 멀티랩에서 마찰운동에 의해 플러그 표면이 거칠어져 접촉저항이 약간 증가하였다고 생각된다.

5. 결 론

21 T 초전도자석 시스템에 적용될 전류도입선의 예비설계가 성공적으로 수행되었다. 초전도자석 통전시 발생하는 열침입량을 최소화하기 위하여 금속부와 초전도부를 최적화 하였다. 초전도자석 통전후 열침입량을 제로화하기 위하여 착탈식 전류도입선을 제안하였

으며, 사용자의 편의성 및 고자기장 초전도자석 시스템에 적용가능성을 확인하기 위하여 금속부와 연결부를 제작하여 성능평가를 실시하였다. 성능평가 결과 멀티랩을 이용한 착탈식 전류도입선을 고자기장용 초전도자석 시스템에 적용 가능할 것으로 판단된다. 착탈식 전류도입선의 온도에 따른 성능평가가 가까운 미래에 수행될 예정이다.

감사의 글

This work was supported by KBSI grant T28051.

참고 문헌

- [1] Maehata K. et al., "Stability of HTS current leads considering unstable equilibrium temperature profile", IEEE Trans Appl Supercond, Vol. 7, 680-683, 1997.
- [2] Chang H.M., et al., "Thermodynamic optimization of conduction-cooled HTS current leads", Cryogenics, Vol. 38, 729-736, 1998.
- [3] Miller J.R., et al., "Design and development of a pair of 10 kA HTS current leads for the NHMFL 45 T hybrid magnet system", IEEE Trans Appl Supercond, Vol. 15, 1492-1495, 2005.
- [4] Yang S. et al., "Optimization of the intercept temperature for high temperature superconducting current lead", Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 41, 567-572, 1996.
- [5] Chang H.M., et al., "Optimization of current leads cooled by natural convection of vapor", Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 49, 944-951, 2004.
- [6] Multilam product documentation, Multi-Contact Co. Santa Rosa, CA [Online]. Available: <http://www.multi-contact-usa.com>.
- [7] Maheshappa H.D., et al., "A facility for electrical contact resistance measurement", Review of Scientific Instruments, Vol. 69, 1534-1536, 1998.

저자 소개



최연석(崔然惜)
1969년 4월 5일생, 1994년 홍익대학교 기계공학과 졸업, 2004년 플로리다주립대 기계공학과 졸업(저온공학, 공학박사), 2000년 ~ 2005년 NHMFL 연구원, 현재 한국기초과학지원연구원 선임연구원.



김동락(金東洛)
1953년 4월 4일생, 1976년 경북대학교 물리학과 졸업, 1993년 일본 오사카시립대학 대학원 학위과정 수료(초전도 물리학, 이학박사), 1993년~현재 한국기초과학지원연구원 책임연구원.



양형석(梁炯皙)
1969년 5월 8일생, 1994년 홍익대학교 기계공학과 졸업, 1998년 Tsukuba 대학 대학원 이공학연구과 졸업(공학석사), 2001년 동대학 대학원 공학연구과 저온공학전공(공학박사), 현재 한국기초과학지원연구원 고자기장개발팀 선임연구원.



이병섭(李炳燮)
1968년 9월 3일생, 1994년 충남대 기계공학과 졸업, 1996년 동 대학원 기계공학과 공학석사, 2001년 8월 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국기초과학지원연구원 고자기장개발팀 선임연구원.



Thomas A. Painter
1964년 11월 8일생, 1988년 MIT 전기공학과 졸업(공학석사), 1989년~1991년 MIT Plasma Fusion Center. 1992년~현재 NHMFL, Associate in Engineering, MS&T Assistant Director.