

Design and Fabrication of a Conductively Cooled Cryostat by Cryocooler

裴俊漢[†] · 沈基德^{*}

(Joon Han Bae · Ki Deck Sim)

Abstract - In order to measure the superconducting transition temperature, the critical current and the alternating current(AC) loss on short samples of high temperature superconductor, a cryocooler cooled cryostat has been designed and built. Two closed-cycle coolers provide cooling with an ultimate sample temperature below 16K. Temperature regulation is provided by 50W of electrical heater that opposes the cooling power from the cold heads. Temperature control feedback is by means of a cernox temperature sensor co-located with the heaters on the second stage of the cold head. Additional temperature sensors are located on the sample mount(B1), on the CVI cold head(B2) and on the Dakin cold head(B3). AC losses on the sample high temperature superconductor were measured at 30K so that the developed device performance was evaluated. In this paper, the design, fabrication and test results on the cryocooler cooled cryostat are presented.

Key Words : Critical current, AC loss, high temperature superconductor, cryocooler cooled cryostat, temperature control feedback

1. 서 론

냉동기 기술의 발전으로 다양한 온도에서 고온초전도체의 전기적 특성을 평가할 수 있게 되었다[1]. 일반적으로, 고온초전도체의 교류손실은 액체질소조 내에서 측정되기 때문에 77K에서의 결과만이 얻어진다[2],[3]. 결국, 다양한 온도에서 고온초전도체의 교류손실의 측정은 불가능하다. 따라서, 최근 활발하게 연구되고 있는 냉동기를 이용한 전도냉각식 초전도 기기들의 최적의 운전 전류나 온도를 결정하기 위해서는 고온초전도체의 교류손실의 온도의 의존성에 대한 연구가 필수적이다[4]. 이러한 목적에서 다양한 온도에서 고온초전도 tape의 임계전류 및 교류손실을 측정할 수 있는 냉동기 부착형 전도냉각식 cryostat가 설계 제작되었다. 전도냉각식 cryostat 설계시 고려사항은 sample이 냉각된 상태에서 sample에 400A의 전류를 흘릴 수 있어야 한다. 열전도도와 전기전도도는 Wiedemann-Franz 법칙에 의해서 연관되어 있기 때문에 전류가 흐르는 도체의 단면적을 최적화할 필요가 있다. 이러한 이유에서 300K과 70K 및 70K과 20K 사이에 최적화된 황동 도체가 사용되었고, 70K과 20K에서 전류 도입선의 열적 연결을 위하여 대면적 열접촉방식의 thermal capacitor가 사용되었다. 교류손실 측정시 발생하는 교류자장은 전류도입선에서 표피효과와 와전류를 발생시켜서 전류도입선을 가열하여 냉동능력을 저하시키는 원인을

한다. 따라서, 전류도입선은 다발형태의 전기절연된 구리연선을 이용하여 제작되었다.

2. 구성 및 특성

전도냉각형 cryostat는 전도냉각에 일반적으로 사용되는 이론들을 활용하여 설계되었고[5], 밀폐형 냉동기, 착탈식 sample mount, 전류도입선을 갖는 turn key 시스템으로써 아래의 부품들로 구성되며, 내부 구조는 그림 1과 같다.

- (1) 최대 10mm(폭) × 150mm(길이)의 고온초전도 tape를 장착할 수 있는 sample mount
- (2) 20K의 온도를 유지하기 위한 밀폐순환형 GM 냉동기(CVI 냉동기(16W @ 20K), Dakin 냉동기(23W @ 20K))
- (3) sample에 외부 교류자장 인가가 가능한 비도전성 착탈식 FRP tail를 갖는 전도냉각형 cryostat
- (4) sample과 냉동기를 열적으로 연결하기 위해 전류도입선과 냉동기 사이에 설치된 thermal capacitor
- (5) sample의 온도가 35K로 유지된 상태에서 400A 이상의 전류를 흘릴 수 있는 전류도입선
- (6) IEEE 488 이나 RS 232 통신을 이용하여 sample의 운전 온도를 설정 및 유지하는 온도제어기(Lakeshore 331)
- (7) 4개의 cernox 온도센서(CX-1050-CU)
- (8) Digital thermocouple control unit(DTC-531-230BX)
- (9) Lock in Amplifier(SR 830)

[†] 교신저자, 正會員 : 한국전기연구원 선임연구원

^{*} 正會員 : 한국전기연구원 선임연구원

E-mail : baejh@keri.re.kr

接受日字 : 2007年 6月 18日

最終完了 : 2007年 9月 12日

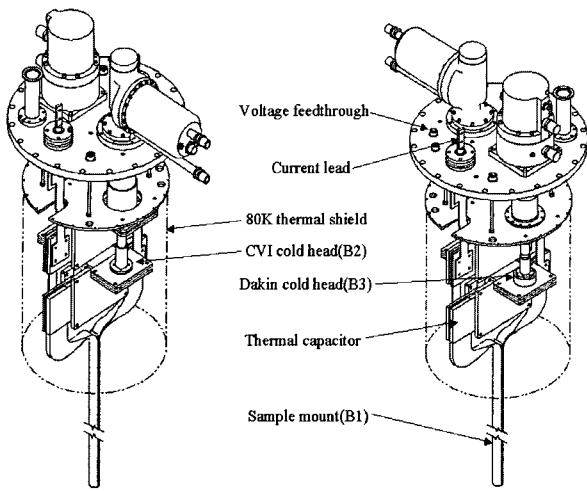


그림 1 냉동기 냉각형 cryostat의 3차원 모델
Fig. 1 3D models of the cryocooler cooled cryostat

2.1 Cryostat

FRP tail를 갖는 전도냉각형 cryostat는 다음과 같은 부품들로 구성된다.

- (1) sample 전압측정용 10 pin hermetic electrical feedthrough
- (2) sample의 온도측정 및 히터공급용 10 pin hermetic electrical feedthrough
- (3) 진공 배기구
- (4) sample 장착용 비도전성 착탈식 FRP tail
- (5) 전류공급용 전류도입선
- (6) 냉동기와 sample를 전기적으로 절연하면서 sample를 냉각하기 위한 thermal capacitor
- (7) 2대의 밀폐순환형 냉동기와 2대의 수냉압축기 (5kW/220V/3상/60Hz)

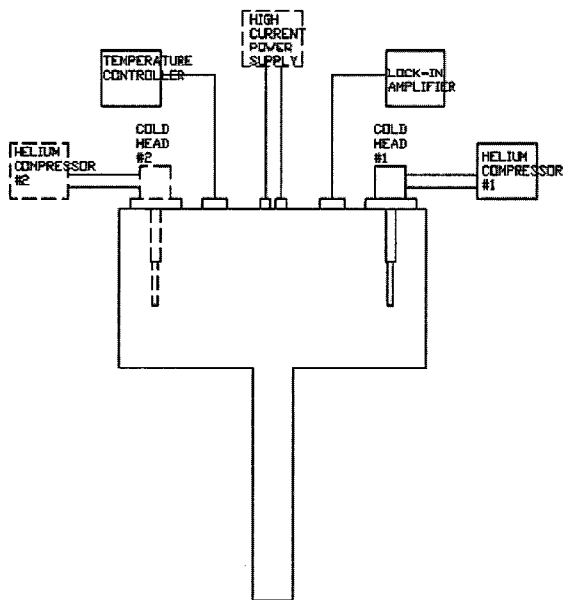


그림 2 냉동기 냉각형 cryostat의 구성도
Fig. 2 Instrumentation block diagram for the cryostat

2.2 Sample mount

전류도입선에 의해 발생된 교류자장이 sample에 미치는 효과를 차단하기 위해서 2개의 전류도입선은 평행하게 배열된다. 또한, 냉동기와 sample mount 사이에 우수한 열전달을 제공하고 전류도입선내의 와전류 손실을 최소화하기 위해서 다발의 구리연선들이 사용되었다.

sample의 온도는 sample mount에 부착된 온도센서에 의해 제어된다. sample mount에 장착할 수 있는 sample의 최대 허용 크기는 10mm(폭) × 150mm(길이)이고, 최대 전압 탭간 거리는 100mm이다. 그림 3은 FRP tail의 단면도이고, cryostat 내외의 전기회로 구성은 그림 4, 5와 같다.

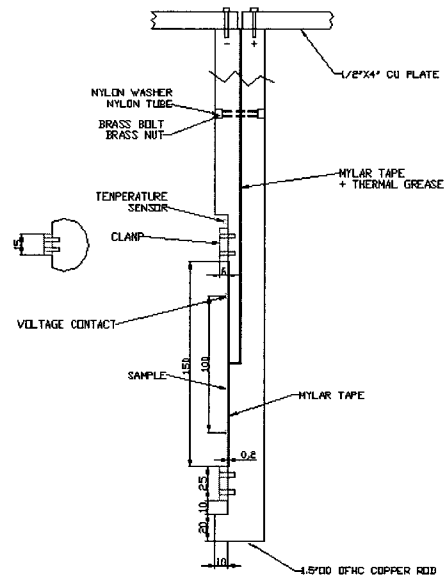


그림 3 FRP tail 단면도
Fig. 3 The cross section of the FRP tail

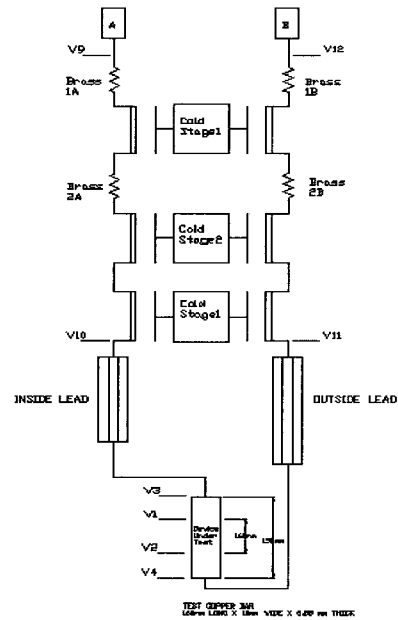


그림 4 시스템 내부의 전기회로 구성도
Fig. 4 System internal electrical schematic

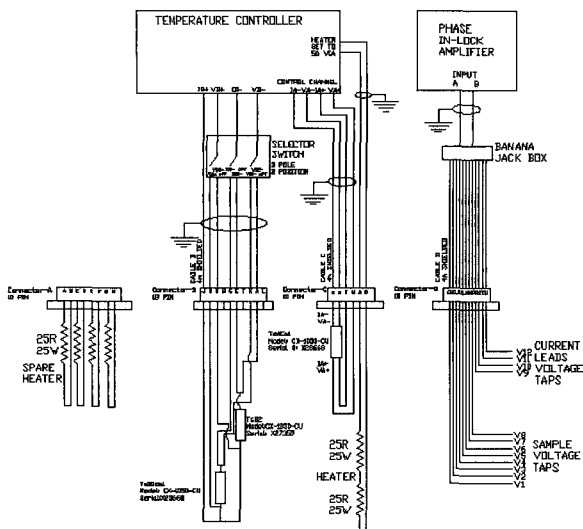


그림 5 시스템 외부의 전기회로 구성도
Fig. 5 System internal electrical connections

2.3 냉동기

400A의 전류를 연속적으로 흘리기 위해 sample이 충분히 냉각될 수 있도록 2대의 냉동기가 사용되었다. 2대의 냉동기를 모두 운전시, sample mount의 최소 온도는 30-35K 내에 도달한다.

3. 시험 및 결과

개발된 장치의 성능을 평가하기 위해서 그림 6과 같은 시험회로를 구성하였다. 고온초전도 tape 샘플에 흐르는 전류는 일본의 IDX사에서 제작된 초전도 전원장치에 의해 공급되며, 최대 3000A 교류전류를 인가할 수 있고, 주파수 가변 범위는 10Hz에서 1kHz이다. 샘플에 부착된 양단전압은 유도성 전압성분을 제거하기 위해서 stepping motor로 제어되는 cancel coil과 직렬로 연결되고, 측정된 전압은 Yokogawa isolation amplifier, lock in amplifier 및 Lakeshore DAQ board를 거쳐서 PC에 저장된다. PC는 Labview 프로그램에 의해서 제어되며, 실시간으로 전압과 전류 data를 기록하고, 도식화하며, 자동으로 시험회로의 시동작이 가능하다. 초전도 선재의 교류손실을 측정을 위해서 미국 AMSC사에서 제작된 Hermetic wire 한 개를 사용하였다. 사용된 선재의 크기는 4.45mm(폭)x0.44mm이고, 임계전류는 600A @30K이다.

그림 7은 냉각 동안의 냉동기와 sample mount의 온도변화이다. 냉각 시작으로 부터 98분경과 후에 냉동기와 sample mount의 최저온도는 각각 10K와 16K에 도달하였다. 그림 8은 다양한 전송전류에서의 sample mount의 포화 온도이다. sample mount의 온도는 전송전류가 증가함에 따라 전류도입선에서의 발열량 증가로 상승하였고, 전송전류가 400A일 때 32K까지 상승하였다. 그림 9는 30K, 60Hz에서 측정된 sample의 교류손실 측정 결과이다. 측정된 교류손실 값이 30K에서 sample의 임계전류를 고려해서 노리스의 타원형 모델 이론에 의해서 계산된 교류손실 결과 보다 작음이 관측되었다[6]. 이러한 원인은 sample의 온도가 내려감에

따라 노리스 식에서는 고려되지 않는 n 값이 증가하였기 때문으로 판단된다[7].

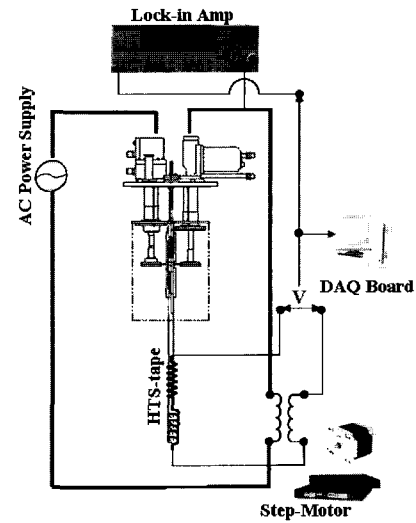


그림 6 냉동기 냉각형 cryostat의 평가를 위한 시험구성
Fig. 6 Setup for performance evaluation of the cryocooler cooled cryostat

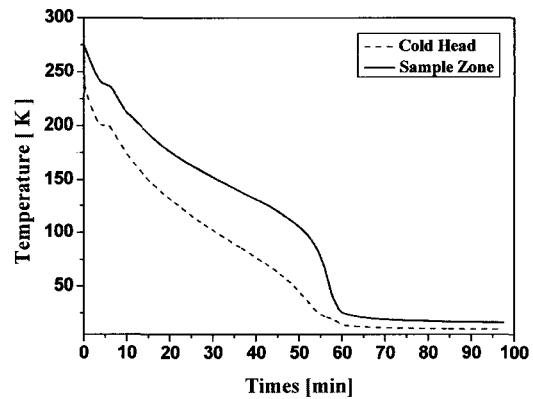


그림 7 냉각 동안의 시스템의 온도변화
Fig. 7 Temperature transition during cool down

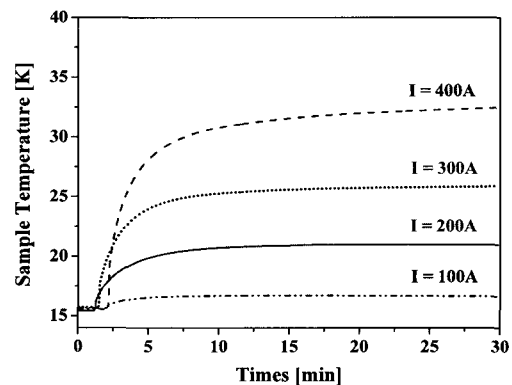


그림 8 전송전류에 따른 sample의 포화온도
Fig. 8 Saturation temperature of the sample mount at various current

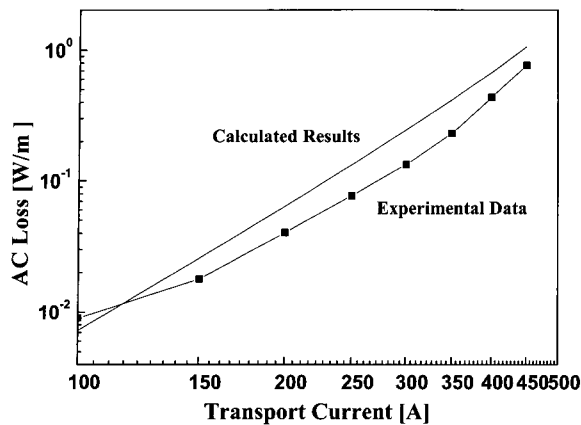


그림 9 30K에서 전송전류에 따른 sample의 교류손실
 Fig. 9 AC losses on the sample as a function of the transport current at 30K, 60Hz

5. 결 론

다양한 온도에서 고온초전도 tape에서의 임계전류 및 교류손실 측정이 가능한 전도냉각형 cryostat이 설계, 제작되었다. 2대의 밀폐순환형 냉동기를 이용하여 sample mount의 온도를 98분 경과후에 16K까지 떨어뜨렸다. 냉동기와 sample의 최저도달온도는 각각 10K과 16K이었다. 시험 중에 sample mount의 온도는 전송전류가

400A일때 최대 32K까지 상승하였다. 다양한 전송전류에 대하여 sample에서의 교류손실이 측정되었고, sample의 온도가 떨어짐에 따라 고온초전도 tape의 교류손실이 감소함이 관측되었다.

본 연구를 통해서 개발된 전도냉각형 cryostat는 냉동기 부착형 초전도 기기의 운전 전류 및 냉각용량을 결정하는데 기여할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] S. W. Schwenterly, J.A. Demko, J.W. Lue, M.S. Walker, C.T. Reis, D.W. Hazelton, Xin Shi, and M.T. Gardner, "AC Loss Measurements with a Cryocooled Sample," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 2, pp. 4027-4030, 2001.
 [2] N. Chakraborty, A.V. Volkobuz, and A.D. Caplin, "Bolometric measurement of ac loss in HTS taped: a

novel approach of microwatt sensitivity," Supercond. Sci. Technol. 13, pp. 1062-1066, 2000.

[3] C. Traholt, Kruger Olsen, O. Tonnesen, M. Daumling, F. Hansen, C.N. Rasmussen, and D. Wilen, "Measuring the Current Distribution in a 10 m Long High Temperature Superconducting Cable Conductor," Physica C 372-376, pp. 1567-1570, 2002.
 [4] Qiuliang Wang, Luguang Yan, Baozhi Zhao, Sousen Song, and Yuanzhong Lei, "Development of Wide-Bore Conduction-Cooled Superconducting Magnet System for Material Processing Applications," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2, pp. 372-375, 2004.
 [5] 산업자원부, "전력품질개선용 고온초전도전력저장시스템 개발 1차년도 중간보고서", 2005
 [6] W. T. Norris, "Calculation of hysteresis in hard superconductors carrying AC: isolated conductors and edges of thin sheets", Journal of Physics D 3: Applied Physics, Vol.3, pp. 489-507, 1970
 [7] M. A. Young, J. A. Demko, M. J. Gouge, M. O. Pace, J. W. Lue, and R. Grabovickic, "Measurements of the performance of BSCCO HTS tape under magnetic fields with a cryocooled test rig", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 2964-2967, 2003.

저 자 소 개



배 준 한 (裴俊漢)

1966년 4월 30일 생, 1992년 건국대학교 전기공학과 졸업, 1994년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도기기연구그룹 선임연구원



심 기 덕 (沈基德)

1973년 2월 1일 생, 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도기기연구그룹 선임연구원