

고온 초전도 SMES용 전도냉각시스템 특성시험

Test of the Conduction Cooling System for HTS SMES

염한길^{1*}

Hankil Yeom^{1*}

Abstract: The characteristic of the superconducting magnetic energy storage (SMES) system is faster response, longer life time, more economical, and environment friendly than other uninterruptible power supply (UPS) using battery. So, the SMES system can be used to develop methods for improving power quality where a short interruption of power could lead to a long and costly shutdown. Recently, cryogen free SMES has developed using BSCCO(Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide) wire. We fabricated and tested the conduction cooling system for the 600 kJ class HTS SMES. The experiment was accomplished for the simulation coils. The simulation coils were made of aluminium, it is equivalent to thermal mass of 600 kJ HTS SMES coil. The coil is cooled with two GM coolers through the copper conduction bar. In this paper, we report that the test results of cool-down and heat loads characteristics of the simulation coils. The developed conduction cooling system adapted to 600 kJ HTS SMES system and cope with the unexpected sudden heat impact, too.

Key Words: SMES, high temperature superconductor, conduction cooling, cryogenic system.

1. 서 론

고온 초전도체를 이용한 에너지 저장장치는 종래의 저온 초전도체를 이용한 장치에 비해 효율이 높고, 설치 면적이 작으며, 환경 친화적 특성을 갖고 있다[1]. 또한 냉각비용이 저렴하고 저장되는 에너지 밀도가 높기 때문에 최근 활발한 연구개발이 진행되고 있다[2, 3]. 그렇지만 고온 초전도 선재인 BSCCO는 액체질소 온도에서 낮은 임계전류밀도와 자기장하에서 임계전류밀도의 갑작스런 감소로 에너지 저장량이 냉각소요 전력량에 비해 상당히 떨어지게 된다. 따라서 최소한 20 K까지는 초전도 선재가 냉각되어야 효과적인 에너지 저장장치로서 역할을 할 수 있게 된다.

전도냉각방식은 극저온 냉동기의 헤드를 초전도 마그네트 에 직, 간접으로 접촉하여 냉각하는 방식으로 기본개념은 매우 단순하나, 이를 실현하기 위해서는 cryostat의 단열 및 고진공 유지기술, 저침입열 구조설계기술, 초전도코일의 열부하 분석기술, 고온초전도 전류리드 냉각기술 등의 요소기술들이 필요하다. 이러한 요소기술들은 초전도 마그네트 연구분야에서 초전도 코일의 구조 및 열부하 패턴, 전기적 절연 등의 요소 기술들과 상호 연관관계를 갖고 있다.

본 연구에서의 600kJ급 HTS SMES의 경우 필요한 HTS 코일의 길이가 약 11 km로 상당히 길기 때문에 다수의 판의 형태로 적층된 구조를 채택하고 있어, 이를 냉각하기 위해 소형 시스템에서와 동일한 구조를 채택할 경우 냉각시스템의 열용량(thermal mass)이 매우 커질 뿐만 아니라 냉각구조의 조립이 용이하지 않는 문제점이 발생한다. 따라서 600kJ급 HTS SMES의 냉각시스템은 HTS 코일의 내측 면에 16개의 전도바를 부착하여 코일과의 접촉면적을 넓혔고, 전도바는 OFHC 재질의 열교환기를 통해 극저온 냉동기의 저온부와 연결되는 구조로 설계하였다.[4]

600kJ급 HTS SMES 시스템용 전도냉각시스템의 열성능을 입증하기 위해 냉각시스템의 성능시험을 수행하였다.

2. 실험 장치

2.1. HTS SMES 전도냉각시스템 열부하 분석

전도 냉각시스템의 개략도는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 2대의 극저온 냉동기, 전류도입선, 초기 냉각시간을 줄이기 위한 열교환기, 모사코일 냉각을 위한 16개의 열전도바, 복사열을 차단하기 위한 복사 차폐막 등으로 구성되어 있다. 극저온 냉동기는 일본 스미토모사의 RDK-415D로 1단은 무산소동 편조선에 의해 전류도입선과 복사차폐막을 냉각하고, 2단은 16개의 전도바를 통해 알루미늄 모사코일을 냉각한다. 열교환기는 초기 냉각시 액체질소나 헬륨가스를 이용하여 냉각함으로써 극저온 냉동기 2단의 냉각 부하를 줄여줌으로써 초기 냉각시간을 줄일 수 있게 된다.

전도를 통해 저온용기(cryostat)로 침입되는 열은 열교환기를 80K 상부 복사차폐막에 고정하고, 복사차폐막을 상부 플랜지에 고정하기 위한 각각 4개씩의 중공(中空)형 GFRP 지지바, 액체질소 공급 및 배출을 위한 스테인리스 판, 극저온 냉동기를 장착하기 위한 포트, 전류도입선(황동, 500 A용) 등을 통해 전달된다. 복사에 의한 열은 진공 용기, 복사 차폐막, 액체질소 공급 및 배출관, 알루미늄 모사코일 표면 등을 통해 전달된다. 이렇게 침입되는 열은 전도 냉각시스템의 기본적인 열부하로 작용하므로 정확한 분석이 필

¹정 회 원 : 한국기계연구원 에너지기계연구본부
/인하대학교 기계공학과

*교신저자 : hkyeom@kimm.re.kr

원고접수 : 2008년 01월 10일

심사완료 : 2008년 03월 13일

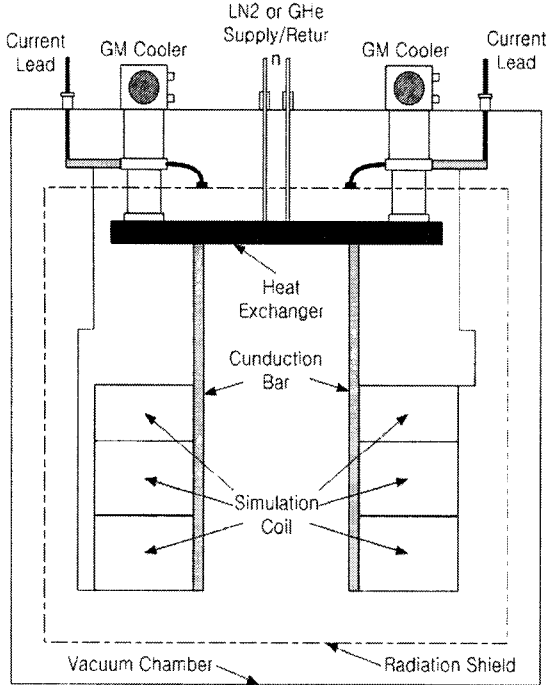


Fig. 1. Schematic diagram of the conduction cooling system.

요하다.

동심 원통형상의 복사체에 의한 열침입은 아래의 식에 의해 구할 수 있다. 스테인리스 진공용기, 알루미늄 복사차폐막, GFRP 지지바 등의 방사율은 각각 0.048, 0.02, 0.68을 사용하여 복사 열침입량을 계산하였다.

$$Q_{rad} = \sigma(T_H^4 - T_L^4)A_1 \times \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_H} + \frac{A_H}{A_L} \left(\frac{1}{\epsilon_L} - 1 \right)} \quad [W]$$

여기서, T : 면의 온도, A : 면적, ϵ : 면의 방사율
 σ : 스테판-볼츠만 상수 [$5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$]

또한 전도에 의한 열침입을 구하기 위해 아래의 열전도 적분값을 사용하였다.

$$Q_{cond} = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda dT = \frac{A}{L} \left(\int_{T=4K}^{T_2} \lambda dT - \int_{T=4K}^{T_1} \lambda dT \right) \quad [W]$$

여기서, A : 단면적, L : 양 끝단 온도사이의 거리
 λ : 열전도도 [W/mK]

스테인리스의 열전도 적분값은 300 K, 80 K, 20 K에서 각각 3060, 349, 16.3 W/m를 사용하였고, GFRP의 300 K, 80 K, 20 K에서의 열전도 적분값은 각각 103.1, 9.95, 1.44 W/m를 사용하여 계산하였다.

저온용기로 침입되는 열부하 계산값은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Heat loads of cryostat

| Conduction load (W) | | Radiation load (W) | |
|-------------------------------|-------|----------------------|-------|
| 300K → 80K support bar | 0.506 | 80K Radiation shield | 25.48 |
| 80K → 20K support bar | 0.053 | LN2 tube | 0.006 |
| LN2 tube | 0.784 | 20K Simulation coil | 0.004 |
| 300K → 80K cooler port | 1.874 | | |
| 300K → 80K Current lead(pair) | 54.2 | | |
| Total (80K/20K) | | 82.85 / 0.057 | |

2.2. 전도냉각 실험장치

온도센서(Silicon diode, SD-670, Lakeshore)극저온 냉동기 각 저온부, 전류도입선, 열교환기, 2개의 열전도바 상하부, 알루미늄 모사코일 상하부 표면, 복사 차폐막 상하부 등 모두 30개를 부착하여 전도 냉각시스템의 온도변화를 관찰할 수 있도록 하였고 (218S 온도모니터, Lakeshore), 50W 용량의 카트리지 전기히터를 알루미늄 모사코일 상부에 4개, 하부에 2개씩 부착하여 초전도 코일의 열발생을 모사할 수 있도록 하였다. 전기히터에는 Agilent사의 6654A power supply를 이용하여 전기를 공급하였다. 진공용기의 진공도는 Alkatel사의 ACS 1000 진공게이지를 이용하여 측정하였다. 측정 데이터는 Labview 프로그램을 이용하여 PC로 저장하였다. Fig. 2는 온도센서 및 전기히터의 설치 위치를 나타내고 있다.

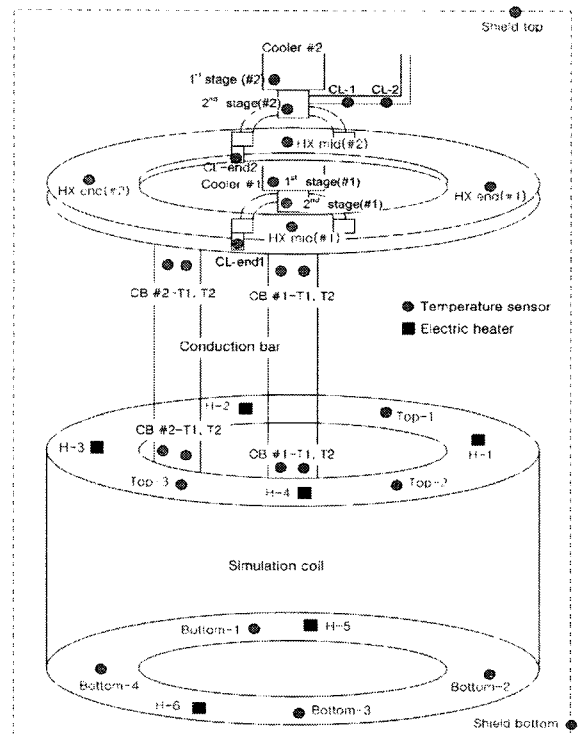


Fig. 2. Temperature sensor and electric heaters installed positions.

3. 실험 결과

3.1. 통전시험

Fig. 3은 통전시험시 냉동기 성능곡선상에 냉동기 1, 2단의 온도를 표시한 것으로 무부하시 (28.8, 4.1), 2단에 10 W 히터 가열시 (37.7, 8.9), 전류도입선에 330 A 통전시 (47.8, 8.9)로 나타났다. Fig. 3에 나타난 냉동기의 온도변화를 근거로 330 A 통전시 전류도입선 1개의 총 열부하를 산정하면 약 40 W가 되고(<3>지점), 주울열에 의한 부하는 약 20 W가 됨(냉동기 1단의 <3> 지점과 <2>지점의 차이)을 알 수 있다. 따라서 330 A 통전시 2개의 전류도입선으로부터 발생하는 최종 열부하는 약 80 W가 된다.

Fig. 4는 전류도입선에 330 A의 전류를 인가하였을 때 전류도입선의 온도변화를 나타낸 그림이다. 전류도입선의 전류인가는 냉동기 1단측의 열부하에 큰 변화를 유발하여 냉동기 1단측 온도의 상승을 유발한다. 이는 인가된 전류에 의해 주울 열이 발생되었기

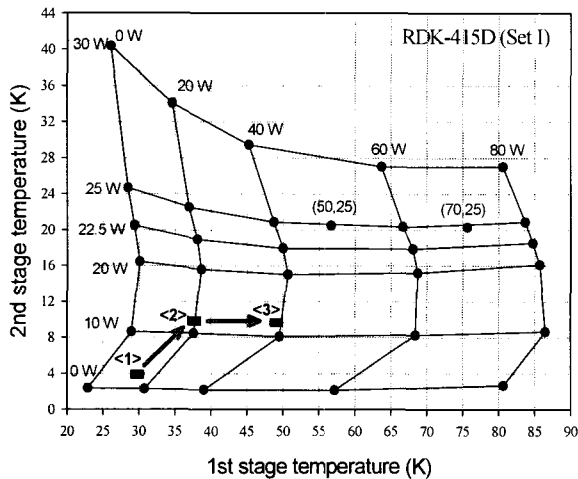


Fig. 3. Performance map of the cryocooler (<1> no load, <2> 20W heating on 2nd stage of the cooler, <3> 20 W + 330A).

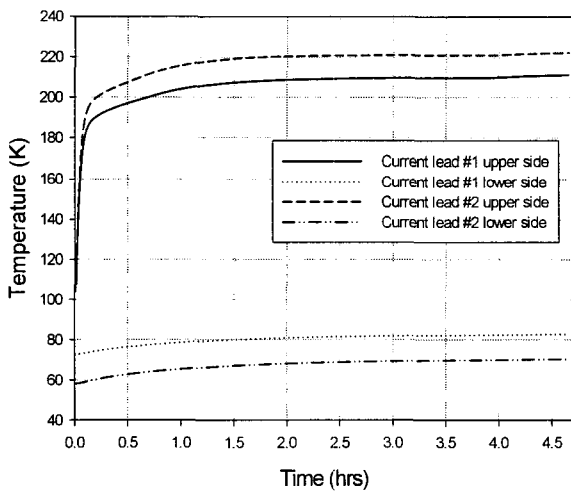


Fig. 4. Temperature change of current leads with the heat load of 20W and applied current of 330A.

때문으로 전류도입선의 상온측 부위는 100 K 이상 큰 온도상승이 발생하는 것으로 나타났다. 보통 SMES 시스템의 운전시간은 수초에 불과하지만 실험에서는 정상상태의 특성을 구하기 위해 4시간 이상 전류를 인가하였다.

반면 전류도입선 저온부의 경우 전류인가 시에도 약 80 K 부근의 온도로 유지됨을 알 수 있다. 장시간의 전류 인가에도 불구하고 전류도입선이 80 K 이하의 온도 범위를 유지하고 있는 것으로 보아 본 전도냉각 시스템은 설계 사양에 맞게 운전되고 있는 것으로 판단된다.

3.2 냉각시험

Fig. 5 ~ Fig. 7에는 전도 냉각시스템의 냉각시험 결과를 나타내었다. Fig. 4는 냉동기 저온부와 열교환기의 온도변화로, 무부하 상태에서 냉동기 각 단이 최저온도에 도달하기까지 걸린 시간은 약 29시간 정도로 나타났다. 냉동기 1단의 온도는 액체질소의 공급에 관계없이 냉각이 되고 있으나 2단부의 온도는 액체질소 공급에 따라 온도변화가 심하게 나타났다. 이러한 현상이 발생하는 것은 열교환기의 액체질소 냉각유로가 단일 유로로 되어 있어 한쪽으로는 액체질소 공급할 경우 열교환기 입구측은 냉각이 잘 이루어지지만 출구측은 액체질소가 증발하여 거의 가스 상태로 냉각을 하기 때문에 입구측에 비해 냉각이 잘 되지 않아 입출구 온도차가 심하게 나타난다. 따라서 이를 방지하기 위해 액체질소를 공급 및 배출관으로 번갈아 공급했기 때문이다. 이러한 방법에 의해 열교환기 전체 온도를 비교적 균일하게 유지하면서 약 80 K까지 냉각하였다. 80 K 이하에서는 액체질소가 고화될 염려가 있어 냉동기에 의해서만 냉각이 진행되었다. Fig. 6은 모사코일 상하부의 온도변화로 열교환기부에서 발생하던 온도 떨림 현상은 열전도바를 통해 감쇄되어 비교적 매끈한 온도변화 형태를 나타내고 있다. 평형상태에 도달했을 때 상부는 5.5 K, 하부는 6.6 K로 약 1 K의 온도 차이가 발생하였고, 냉동기 2단부는 4.7 K로 약 2 K 정도의 온도 차이를 나타내었다. 이는 2단 저온부 → 열교환기 → 전도바 → 모사코일로 이어지는 냉각경로 상의 접촉부 접촉저항에 의한 것으로 기존 2.5 K[5]보다 개선된 것으로 나타났다.

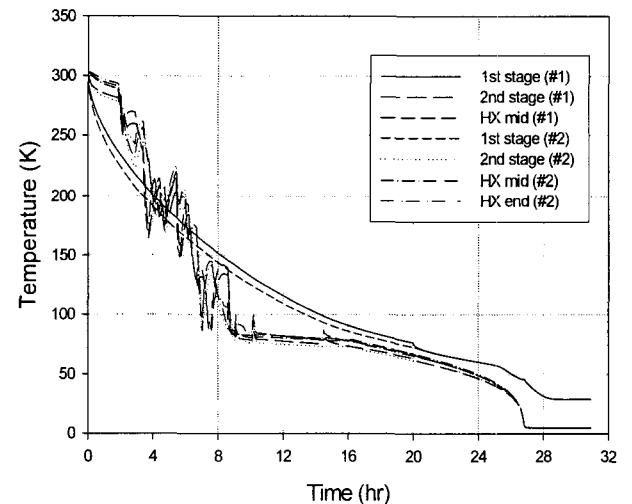


Fig. 5. Cool-down characteristic of the heat exchanger and cryocooler heads.

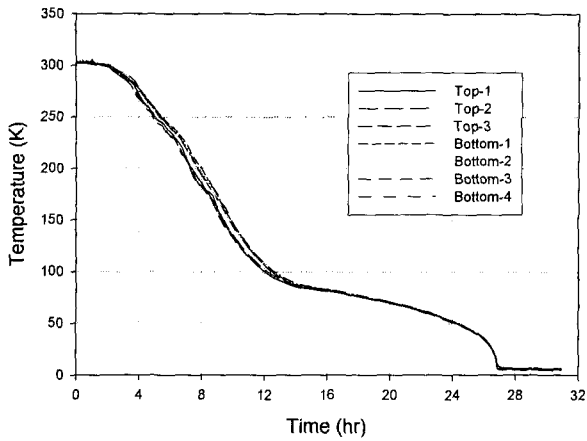


Fig. 6. Cool-down characteristic of the simulation coils.

3.3 열부하 시험

SMES 시스템의 가동시 초전도 코일에서 발생하는 발열을 모사하기 위해 모사코일 상부와 하부에 각각 4개와 2개씩 총 6개가 설치된 전기히터에 전체 발열량이 각각 20 W, 40 W가 되도록 발열시켜 전도 냉각 시스템의 냉각특성을 파악하였다. Fig. 7과 Fig. 8에는 20 W 발열시 냉동기 저온부와 열교환기부, 알루미늄 모사코일의 온도변화 특성을 나타내었다. 냉각경로에 따른 온도변화를 살펴보면, 모사코일 하부 16.0 K → 모사코일 상부 11.7 K → 전도바 하부 11.3 K → 전도바 상부 11.1 K → 열교환기부 10.2 K → 냉동기 2단 저온부 9.4 K로 모사코일 냉각경로를 따라 전체적으로 6.6 K의 온도 차이를 나타냈다. 40 W 발열시에는 같은 경로를 따라 발생한 온도 차이는 12.2 K로 20 W 발열시 발생했던 온도 차이의 2배 정도로 크게 나타났다. 각 부하 상태에서 각 부위의 평형 온도를 Table 2에 나타내었다. 열부하 시험을 통해 초전도 코일에서 20 W 가 발열하여도 초전도 코일의 설계 운전조건인 20 K 보다 낮게 유지(16 K 이하)됨으로써 본 고온초전도 SMES의 에너지저장량도 본래 설계치 600 kJ을 초과할 것으로 기대된다.

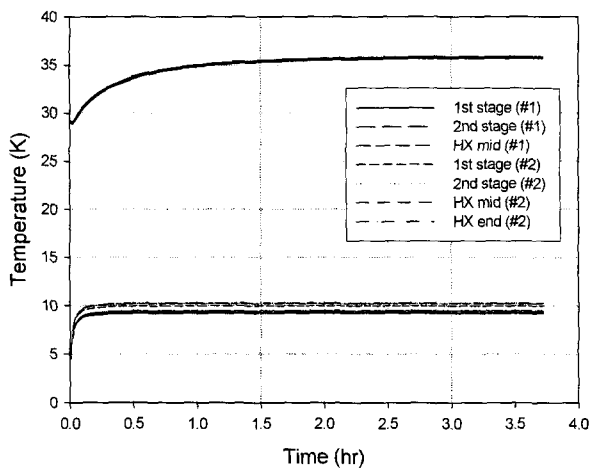


Fig. 7. Heat load characteristic of the cooler and heat exchanger on 20 W.

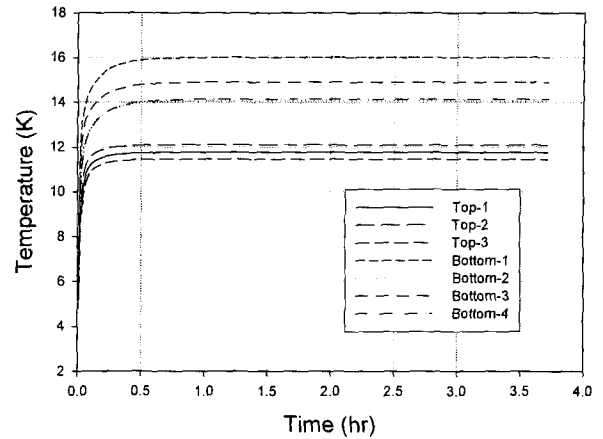


Fig. 8. Heat load characteristic of the simulation coils on 20 W.

Table 2. Equilibrium temperature of cooling system

| Part | | No load | 20 W | 40 W |
|-----------------|-----------|---------|------|------|
| Cooler | 1st stage | 29.1 | 35.8 | 36.3 |
| | 2nd stage | 4.7 | 9.4 | 18.1 |
| Heat exchanger | | 5.0 | 10.2 | 19.1 |
| Conduction bar | Top | 6.0 | 11.1 | 19.7 |
| | Bottom | 5.6 | 11.3 | 20.1 |
| Simulation coil | Top | 5.5 | 11.7 | 20.8 |
| | Bottom | 6.6 | 16.0 | 24.1 |

3.4 열충격 시험

Fig. 9와 Fig. 10은 초전도 코일에 1200 Joule(300W, 4sec)의 갑작스런 열이 발생하였을 때 냉동기 저온부와 열교환기부, 알루미늄 모사코일의 온도변화 특성을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이

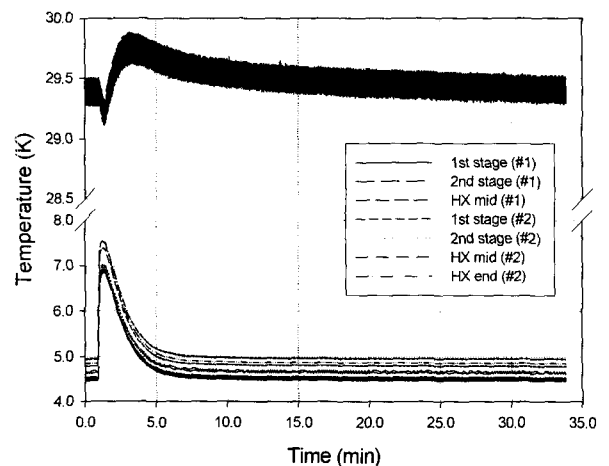


Fig. 9. Impact heat load characteristic of the cooler and heat exchanger on 1200 Joule.

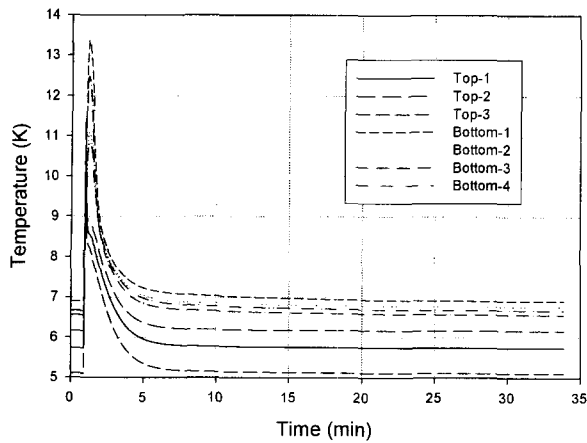


Fig. 10. Impact heat load characteristic of the simulation coils on 1200 Joule.

1200 Joule의 열충격으로 인해 초전도 코일의 온도가 최고 13.4 K까지 상승하였고(온도 상승률 0.36 K/s) 초기 온도로 회복하는데 약 10분이 소요되었다. 전도냉각시스템이 갑작스런 열부하에도 효과적으로 대응할 수 있음을 보여 주는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 600 kJ급 HTS SMES용 전도냉각시스템에 대한 냉각특성 실험이 수행되었다. 전체 냉각시간은 29시간이 소요되었고, 냉동기 2단 저온부와 모사코일은 2 K 이하의 온도차를 유지하였다. 또한 전류도입선의 330 A 전류인가 시에도 모사코일은 16K 이하의 온도를 잘 유지하였고, 1200 Joule 갑작스런 열충격에도 모사코일의 표면 온도는 20 K를 넘지 않았다. 이를 통해 냉각경로 상에 존재하는 열접속부위의 접촉 저항이 정성적으로는 상당히 작은 것을 알 수 있으나 추후에 세밀한 데이터 분석을 통해 정량적인 결과제시가 있어야 할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구의 전도 냉각시스템은 전류인가 시험, 열부하 시험, 열충격 시험 등의 결과를 고려할 때 600 kJ HTS SMES 시스템에 적합한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] H. K. Yeom, et al, "Study of Cryogenic Conduction Cooling Systems for an HTS SMES", IEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, pp. 1955~1958, 2007.
- [2] A. Ishiyama, et al, "Research and Development of HTS-SMES System", Physica C, pp. 1311 ~ 1314, 2001.
- [3] A. Ishiyama, et al, "Transient Thermal Characteristics

of Cryocooler-cooled HTS Coil for SMES", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 15, pp. 1879~1882, 2005.

- [4] Y. J. Hong, et al, "Temperature Distribution of Cryogenic Conduction Cooling System for a HTS SMES", Presented at the 20th Annual Conference on Magnet Technology, Philadelphia, Paper No. 1R02, 2007.
- [5] P. Tixador, et al, "Design of a 800 kJ HTS SMES", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 15, pp. 1907~1910, 2005.

저 자 소 개



염한길(廉漢吉)

1966년 09월 03일생, 1990년 인하대학교 항공공학과 졸업, 1992년 동 대학원 항공공학과 졸업(공학석사), 2006년 인하대학교 기계공학과 대학원 박사 수료, 현재 한국기계연구원 선임연구원