

600kJ급 SMES용 전도냉각시스템 열해석

홍용주[†]·염한길*·박성제*·김효봉*·고득용*

Thermal analysis of the conduction cooling system for HTS SMES system of 600 kJ class

Yong-Ju Hong, Han-Kil Yeom, Seong-Je Park, Hyo-Bong Kim
and Deuk-Yong Koh

Key Words: Superconducting Magnet Energy Storage(초전도 전력저장), Conduction cooling system(전도냉각시스템), Cryocooler(극저온냉동기)

Abstract

SMES systems need cryogenic cooling systems. Conduction cooling system has more effective, compact structure than cryogen. In general, 2 stage GM cryocoolers are used for conduction cooling of HTS SMES system. 1st stages of cryocoolers are used for the cooling of current leads and radiation shields, and 2nd stages of cryocoolers for HTS coil. For the effective conduction cooling of the HTS SMES system, the temperature difference between the cryocooler and HTS coil should be minimized. In this paper, a cryogenic conduction cooling system for HTS SMES is analyzed to evaluate the performance of the cooling system. The analysis is carried out for the steady state with the heat generation of the HTS coil and effects of the thermal contact resistance. The results show the effects of the heat generation and thermal contact resistance on the temperature distribution.

1. 서론

전력품질에 매우 민감한 전자기기, 제어장치 및 정보기기 등에서 순간적인 정전 및 전력품질 저하는 막대한 경제적, 사회적 손실을 초래한다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 축전지를 이용한 무정전 전원장치가 사용되고 있으며, 초전도 자석을 이용한 초전도 전력저장(Superconducting Magnet Energy Storage, SMES) 장치는 축전지에 비해 높은 효율 및 작은 설치공

간, 환경 친화적 특성으로 인해 기존의 무정전 전원장치의 유력한 대안으로 상용화를 위한 활발한 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁾

고온 초전도 전력저장 시스템(HTS SMES System)은 종래의 저온(LTS) SMES 시스템이 초전도 선재의 냉각을 위해 지속적인 액체헬륨(LHe)의 공급이 요구되어 막대한 운용비용이 요구되는 반면 상대적으로 저렴한 냉각비용이 요구되는 장점을 지니고 있어, 최근 다양한 초전도선재 개발 및 시스템 개발이 진행되고 있다.

SMES 시스템은 초전도 코일, 전력변환기, 고온 초전도 전류도입선 및 cryostat을 포함한 냉각시스템으로 구성되며, cryostat에서는 고온의 주위로부터의 열침입 차단과 초전도 코일의 효율적인 냉각을 위해 한계를 통한 액체 냉각 방법 또는 극저온냉동기를 통한 전도 냉각 방법^(2,3)이 사용되어 지고 있다.

전도 냉각 방법은 극저온 냉동기의 저온부를

† 회원, 한국기계연구원 에너지기계연구센터

E-mail : yjhong@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7366 FAX : (042)868-7335

* 한국기계연구원 에너지기계연구센터

초전도 코일에 직간접적으로 접촉시켜 초전도 코일을 냉각하는 방식으로, 극저온냉동기의 경제적인 운전 및 초전도 코일의 효율적인 냉각을 위해서는 열침입을 최소화 할 수 있는 cryostat의 지지구조 및 복사 차폐체 뿐만 아니라, 최적의 극저온냉동기 운전을 위해 극저온냉동기의 저온부와 초전도 코일의 온도차를 최소화하는 냉각구조가 필수적이다.

본 연구에서는 600kJ급 HTS SMES 시스템의 전도냉각시스템의 설계 타당성을 검증하기 위해 소형 전도냉각형 HTS SMES 시스템을 설계, 제작, 성능평가를 수행⁽⁴⁾한 바 있으며, 이를 기반으로 600kJ급 HTS SMES 시스템의 전도냉각시스템을 설계하고, 열부하에 따른 냉각구조의 열해석을 수행하여 냉각시스템의 온도차를 구하였다.

2. 600kJ급 HTS SMES 냉각시스템

전도냉각형 HTS SMES 시스템 및 cryostat은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 HTS 코일과 HTS 코일을 20 K 이하의 온도로 냉각하기 위한 냉각구조, 주위로 부터의 복사열전달을 최소화하기 위한 복사 차폐체, 복사 차폐체를 냉각하기 위한 액체질소 용기, 전류도입선 및 HTS 코일을 냉각하기 위한 두개의 4.2 K용 2단 GM(Gifford McMahon) 극저온 냉동기, 열침입을 최소화하기 위한 진공배기 시스템으로 구성된다.

소형 HTS SMES 시스템의 경우, GM 극저온 냉동기의 2단 저온부에 열접촉 면적의 확대를 위한 냉각판을 설치하고, HTS 코일의 구리 전도판과의 원활한 열전달을 위해 각각의 냉동기에 3개씩 총 6개의 OFHC 재질의 전도 냉각 구조를 채택한다. 또한 2개의 HTS 코일 전류도입선은 각각의 GM 극저온 냉동기의 1단 저온부를 통해 전도냉각되며, 복사 차폐체 및 HTS 코일의 지지대는 고온으로 부터 전도 열전달을 통한 열침입을 최소화하기 위해 AI 및 GFRP 재질을 채택하였으며, 복사 차폐체의 냉각을 위해 액체질소 저장 용기를 복사 차폐체에 부착하여 극저온냉동기의 열부하의 감소를 도모하였다.

한편 본 연구에서의 600kJ급 HTS SMES의 경우 필요한 HTS 코일의 길이가 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 발생하였다. 따라서 600kJ급 HTS SMES 시스템의 냉각시스템은 HTS 코일의 내측면에 16개의 전도바를 부착하여 냉각하는 방식을 채택하였으며, 전도바의 냉각을 위해 HTS 코일의 상부에 열전달확장판을 설치하였으며, 두 대의 GM 극저온냉동기의 2단 저온부를 통해 냉각하는 구조를 채택하였다. 이때 GM 극저온냉동기의 1단 저온부를 통해 전류도입선 및 복사차폐체를 냉각하는 구조를 채택하였다.

한편 600kJ급 HTS SMES 시스템의 경우 HTS 코일의 열용량이 매우 커 극저온냉동기 단독으로 냉각이 수행될 경우 상당한 냉각시간이 소요될 것으로 예측된다. 본 연구에서는 냉각시간의 단축을 위해 열전달확장판의 하부에 액체냉각시스템을 설치하였다. 액체냉각시스템은 냉각초기에 액체질소의 주입을 통해 극저온냉동기의 열부하를 크게 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.



Fig. 1 600kJ HTS SMES

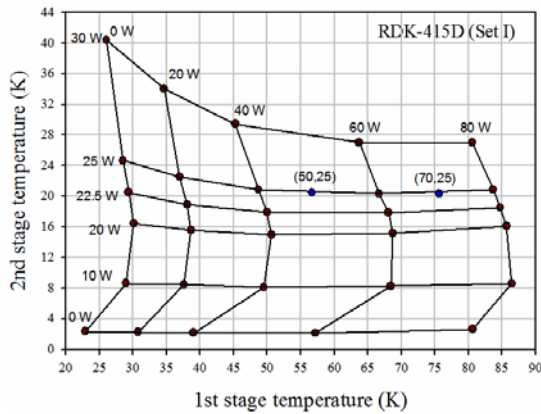


Fig. 2 Performance of the cryocooler

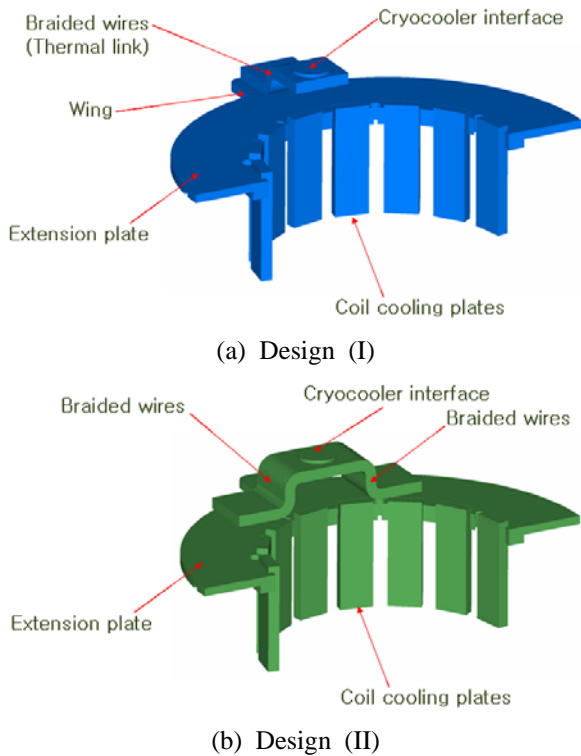


Fig. 3 Conduction cooling systems for HTS SMES

600kJ급 HTS SMES 시스템용 냉각시스템의 설계는 냉동기 1단 열부하 130W, 2단 열부하 40W에 대해 수행되었으며, Fig. 2의 극저온냉동기의 냉동능력을 기준으로 고려할 때 1단 저온부의 온도는 75K 이하, 2단 저온부의 온도는 16K 이하의 온도로 유지될 것으로 판단된다.

Fig. 3은 냉각시스템 설계안으로 단순한 구조 및 작은 열용량을 위한 설계 (I)과 시스템에서 발생하는 온도차의 감소를 위한 설계 (II)를 나타내고 있다.

Table 1 Temperature rise due to the thermal contact resistance (D(I), * : D(II))

Interface	Area (cm ²)	Heat flow (W)	Temperature Rise (K)
Cryocooler-BW	36.32	20	0.179
BW-EP	80 (80*)	20 (10*)	0.081 (0.041*)
EP-CCP	18	2.50	0.045
Total	-	20	0.305 (0.265)
CU-IN-CU(6MPa) : 3.077 (W/cm ²)/K			

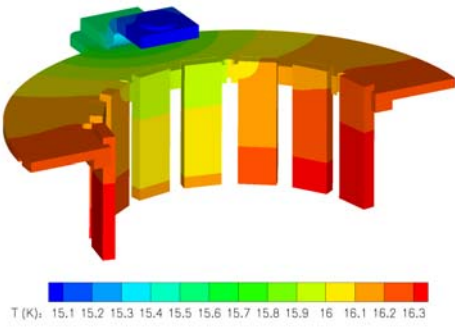
본 연구에서는 Fig. 3의 설계안에 대해 정상상태 열해석을 통해 냉각시스템의 온도분포를 구하고, 이를 통해 우수한 성능의 냉각구조 채택하고자 한다.

Table 1은 설계안 (I), (II)에 대해 열접촉저항만을 고려한 온도차를 나타내고 있다. 이때 설계안은 열접촉저항으로 인한 온도차의 발생을 최소화하기 위해 각각의 접촉부를 인듐을 사용하여 체결압력 6MPa로 체결하는 것으로 하였다. 열접촉저항으로 인한 온도차는 냉동기와 편조선 연결부에서 가장 크게 발생하고, 설계 (I)의 경우 약 0.3 K으로 나타났으며, 설계 (II)의 경우 (I)에 비해 0.04K가 작게 발생하는 것으로 예측된다.

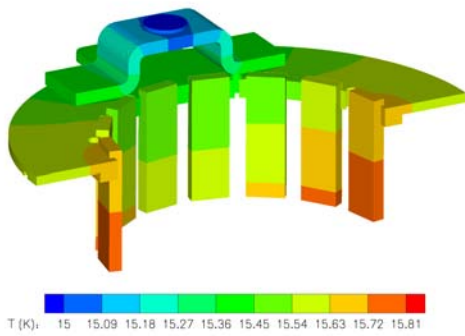
3. 냉각시스템 온도분포 해석

600kJ급 HTS SMES 시스템용 냉각시스템의 열전달 특성 해석은 GM 극저온 냉동기의 2단 저온부가 일정한 온도조건(15 K)으로 유지되고, 복사차폐체(일정온도 조건 80 K)에 의한 열침입과 HTS 코일 및 전류도입선에서 40 W의 발열이 존재하는 정상운전의 경우에 대해 정상상태 열전달 해석을 수행하였다. 이때 40 W의 열부하는 HTS 코일에서 균일하게 발생하여 16개의 전도바를 통해 균일하게 냉각되는 것으로 가정하였다. 냉각시스템은 무산소동(OFHC) 재질로 구성되었으며, OFHC의 열전도도는 온도의 함수 (RRR=100, no magnetic flux)로 고려하였다.

해석은 열접촉저항이 온도에 미치는 영향을 고려하기 위해 2가지 두께(R1,R2)의 인듐에 대해 수행하였으며, 열부하에 의한 영향을 고려하기 위해 열부하의 변화(0 ~ 20 W)에 대해 해석을 수행하였다.



(a) Design (I)



(b) Design (II)

Fig. 4 Surface temperature of conduction cooling system (R1, Q=20W)

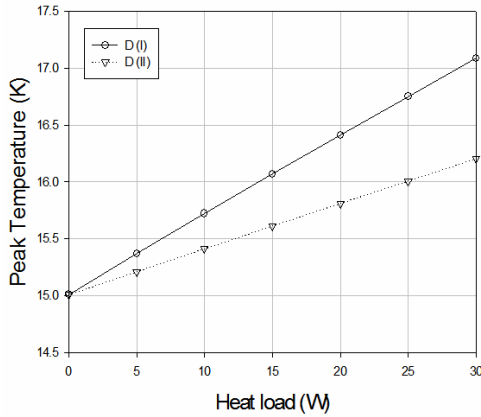
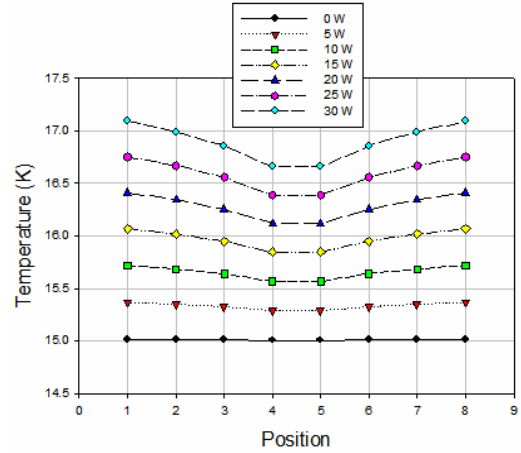
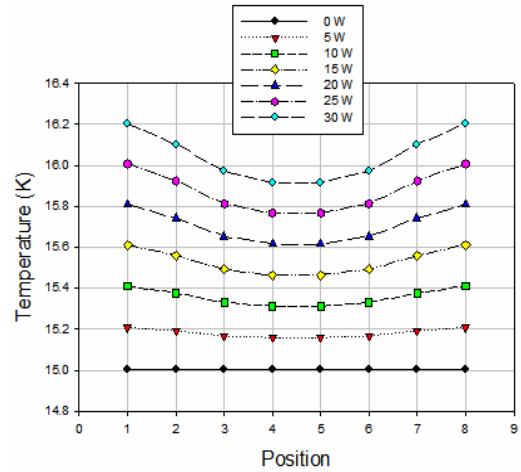


Fig. 5 Peak temperature of conduction cooling system (R1)

Fig. 4는 인듐의 두께가 1mm(R1)인 경우에 대한 냉각시스템 표면온도분포를 나타낸 그림이다. 해석결과 설계 (II)에서의 표면온도차가 설계(I)에 비해 작게 발생함을 알 수 있으며, 열전달면적의 증가로 인해 냉동기와 열전달확장판사이의 온도차가 감소하며, 열전달확장판에서의 온도분포 역시 균일하게 나타나는 것으로 예측되었다.



(a) Design (I)

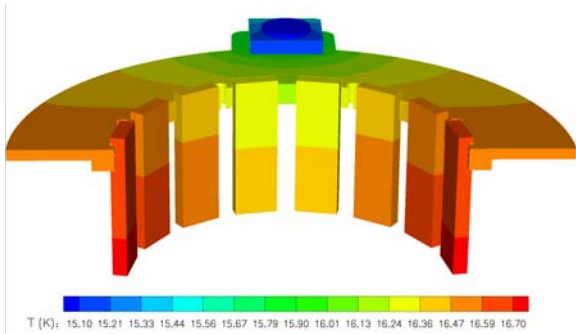


(b) Design (II)

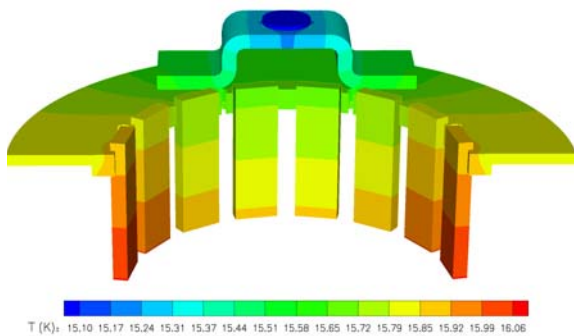
Fig. 6 Temperature distribution of coil cooling plates with heat loads (R1)

Fig. 5는 열부하의 변화에 따른 냉각시스템의 최대 온도를 나타낸 그림으로 설계(I)의 경우 30 W의 열부하에 약 2K를 상회하는 온도차가 예측되는 반면 설계(II)의 경우 동일한 열부하에서 1.3 K 정도로 예측되어 상당한 온도차 감소가 예측된다. 이와 같은 온도차의 감소로 부터 더 큰 열부하 조건에서도 HTS SMES 시스템이 20K 이하의 온도에서 안정적인 운전이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 6은 열부하의 변화에 따른 전도바에서의 온도분포를 나타낸 그림이다. 설계(II)는 설계(I)에 비해 낮은 냉동기와의 온도차를 나타낼 뿐만 아니라, 전체 열부하 영역에서 각각의 전도바에서의 온도분포 역시 더 균일하게 발생하는 것으로 나타났다.



(a) Design (I)



(b) Design (II)

Fig. 7 Surface temperature of conduction cooling system (R2, Q=20W)

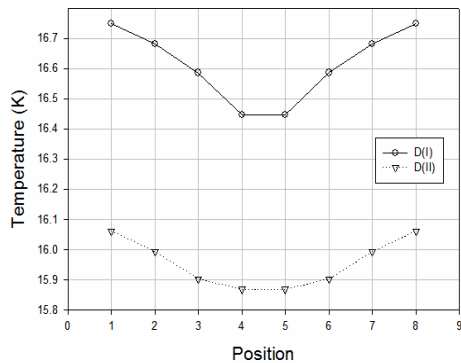


Fig. 8 Temperature distribution of coil cooling plates (R2, Q=20W)

Fig. 7은 인듐의 두께가 6mm(R2)인 경우에 대한 냉각시스템 표면온도분포를 나타낸 그림이다.

해석결과는 열접촉저항의 증가로 Fig. 4의 결과에 비해 온도차가 크게 발생하는 것으로 예측되나, 온도분포의 변화는 발생하지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 열부하가 20 W인 경우 전도바에서의 온도분포를 나타낸 그림이다. 이 경우 역시 열접촉저항의 증가로 인해 전체적인 온도분포의 상승

이 발생함을 알 수 있으며, 설계 (II)가 설계 (I)에 비해 낮은 온도차를 나타냄을 알 수 있다.

이상과 같은 해석결과를 통해 설계 (II)가 (I)에 비해 우수한 냉각특성을 나타내는 것으로 판정되었으며, 이를 600kJ급 HTS SMES 시스템의 전도 냉각시스템으로 채택하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 600kJ급 HTS SMES 시스템용 전도냉각시스템의 설계를 위해 열부하에 따른 냉각구조의 열해석을 수행하여 설계안의 타당성을 검토하였으며, 이를 통해 2대의 극저온냉동기를 사용하는 전도냉각시스템의 설계를 확정하였다.

후 기

본 연구는 전력산업개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) Kim, H. J., Seong, K. C., Cho, J. W., Bae, J. H., Sim, K. D., Ryu, K. W., Seok, B. Y. and Kim, S. H., 2006, "Development of a 3MJ/750kVa SMES System", *Cryogenics*, Vol. 46, pp. 367 ~ 372
- (2) Tixador, P., Bellin, B., Deleglise, M., Vallier, J. C., Bruzek, C. E., Pavard, S., Saugrain, J. M., 2004, "Design of a 800 kJ HTS SMES", *Applied Superconductivity Conference*, Jacksonville, Oct. 3 - 8, Paper No. 1LH01
- (3) Shikimachi, K., Moriguchi, H., Nagaya, S., Ito, T., Inagaki, J., Hanai, S., Takahashi, M., Krurusu, T., 2004, "Development of MVA class HTS SMES System for Bridging Instantaneous Voltage Dips", *Applied Superconductivity Conference*, Jacksonville, Oct. 3 - 8, Paper No. 4LB02
- (4) Yeom, H. K., Park, S. J., Koh, D. Y., Hong, Y. J., Kim, H. B. and Ryu, C. S., 2005, "A Study of Cooling System for HTS SMES", *Proceedings of the Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics*, pp. 126