

고온초전도체 SMES 장치의 전도냉각시스템 연구

고 득 용, 이 관 수*

한양대학교 대학원, *한양대학교 기계공학과

A Study of a Conduction Cooling System of a HTS SMES System

Deuk-Yong Koh, Kwan-Soo Lee**

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received October 26, 2006; revision received March 6, 2007)

ABSTRACT: A superconducting magnetic energy storage (SMES) system has shorter response time and longer life time, and is more economical, and environment-friendly than other uninterruptible power supply (UPS). A conduction cooling system is well answer for the high temperature superconductor (HTS) SMES system. Because the conduction cooling system is simple, light and small structure. The purpose of this paper is to design and verify the effective conduction cooling system for the HTS SMES system. The analysis of heat loads in cryostat is performed. Thermal shield heat loads, temperatures of HTS coil surface and conduction Cu plate are estimated and measured.

Key words: Conduction cooling(전도냉각), High temperature superconductor(고온초전도체), Superconducting magnetic energy storage(초전도자석 에너지저장장치), Cryostat(저온용기), Uninterruptible power supply(무정전 전원장치)

1. 서 론

순간적인 정전 및 전력품질 저하는 민감한 전자기기, 제어장치 및 정보기기 등에는 심각한 장애를 일으킬 수 있어 종래에는 이와 같은 문제점 해결을 위해 축전지를 이용한 무정전 전원장치를 사용하였다. 그러나 축전지를 이용한 무정전 전원장치는 수명이 짧고, 환경오염을 일으킬 수 있을 뿐만 아니라 넓은 설치공간이 필요한 단점을 지니고 있다. 초전도 자석을 이용한 에너지저장(SMES) 시스템은 축전지에 비해 높은 효율 및 작은 설치공간, 환경친화적 특성으로 인해 기존의

무정전 전원장치의 대체는 물론 피크부하 절감을 위한 대용량의 전력저장장치로 개발되고 있다.⁽¹⁾

특히, 고온초전도체 에너지저장(HTS SMES) 시스템은 종래의 저온초전도체 에너지저장(LTS SMES) 시스템에 비해 상대적으로 냉각비용이 저렴하기 때문에 최근 활발한 연구개발이 진행되고 있다.^(2,3) 그렇지만 대표적인 고온초전도체인 BSCCO 선재는 액체질소 온도에서, 낮은 임계전류밀도와 자기장하에서 임계전류밀도의 갑작스런 감소로 인해 에너지저장량이 냉각에 소요되는 전력량에 비해 상당히 떨어지게 된다. 따라서 최소한 30 K 정도까지는 초전도 선재가 냉각되어야 효과적인 에너지 저장장치로서 역할을 할 수 있게 된다.^(4,5) 이를 근거로 본 연구에서는 전도냉각 시스템의 냉각 안전성까지 고려하여 초전도 코일의 냉각온도를 20 K 이하로 유지하기 위한 전도

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2220-0426; fax: +82-2-2295-9021

E-mail address: ksleehy@hanyang.ac.kr

냉각시스템을 설계하였다.

냉각방식에는 저온의 액체에 초전도체를 침적하여 냉각하는 액체냉각방식과 극저온 냉동기 헤드에 냉각대상을 직·간접으로 접촉시켜 냉각하는 전도냉각방식이 있다. 전도냉각방식은 액체냉각방식에 비해 열손실을 줄일 수 있고, 시스템의 소형, 경량화가 가능하며, 설치 위치나 각도에 있어 유연한 구성을 할 수 있는 장점이 있다. 초전도 코일, 전력변환기, 고온초전도 전류도입선 및 저온용기(cryostat) 등으로 구성된 HTS SMES 시스템의 전도냉각을 위해 주로 사용되는 극저온냉동기는 일반적으로 2단의 Gifford-McMahon(GM) 냉동기로, 상대적으로 높은 온도의 1단은 복사차폐막이나 전류도입선 등의 중간 냉각에 사용되고 온도가 낮은 2단은 열전도판이나 선을 통해 고온초전도 코일을 냉각하게 된다.⁽⁶⁾ 극저온냉동기의 경제적인 운전 및 초전도 코일의 효율적인 냉각을 위해서는 열침입을 최소화할 수 있는 저온용기의 지지구조 및 복사차폐막뿐만 아니라, 최적의 극저온냉동기 운전을 위해 극저온냉동기의 저온부와 초전도 코일의 온도차를 최소화하는 냉각구조가 필수적이다.^(7,8)

Tixador et al.은 냉동기 저온부와 코일 냉각관을 한쪽에서만 접촉하여 초전도 코일을 냉각하였으나,⁽⁷⁾ 본 연구에서는 극저온냉동기의 저온부와 초전도 코일의 온도차를 줄이기 위해 2대의 냉동기를 이용하여 초전도 코일을 양쪽에서 냉각할

수 있도록 냉각관을 설계하였고, 초기 냉각시간 절약 및 복사차폐막의 정확한 열부하 산정을 위해 복사차폐막 하부에 액체 질소조를 설치하였다. 이와 같이 본 연구에서는 HTS SMES의 전도냉각시스템을 설계하고 저온용기의 열부하 분석과 실험을 통해 전도냉각시스템의 성능을 검증하였다.

2. 고온초전도 SMES 전도냉각시스템

2.1 저온용기의 열부하 분석

고온초전도 SMES의 전도냉각시스템은 Fig. 1과 같이 2대의 GM 극저온 냉동기로 전류도입선과 초전도 코일을 냉각하고 액체질소를 이용하여 복사차폐막을 냉각하는 방식을 설계하였다. 전류도입선은 HTS 벌크 타입으로 외경 12.0 mm 길이 160.0 mm로 설계하였다.

계산된 저온용기의 열부하는 Table 1에 보는 바와 같이 전도에 의한 열부하 3.841 W, 복사에 의한 열부하 15.730 W로 나타났으며, 각 온도대별 열부하는 각각 18.403 W @80 K, 1.169 W @20 K로 나타났다. 또한 복사차폐막 냉각을 위해 설치된 액체 질소조의 주입 및 배출관을 통해서도 1.35 W의 열침입이 있는 것으로 계산되었다.

2.2 냉각시스템 성능시험장치

고온초전도 SMES 냉각시스템 성능시험장치는 Fig. 2에 보는 바와 같이 전류도입선 및 초전도 코일 냉각을 위한 2대의 GM 냉동기 및 압축기, 저온용기 진공배기를 위한 진공펌프, 온도 및 진공도 확인을 위한 모니터, 복사차폐막 냉각을 위한 질소조에 LN2 공급 및 배출관 등으로 구성된

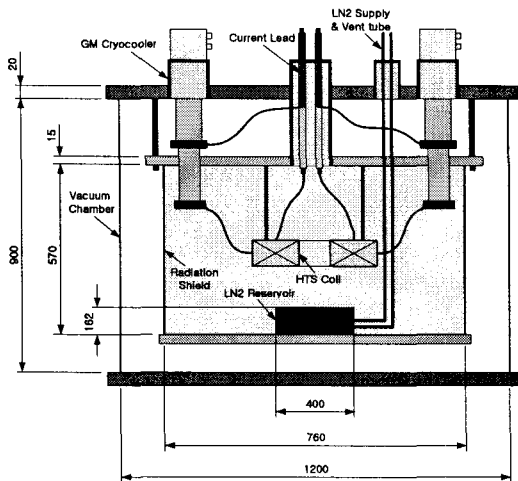


Fig. 1 Outline of HTS SMES conduction cooling system.

Table 1 Heat load of cryostat

Conduction load	(W)	Radiation load	(W)
80 K support bar	0.506	Thermal shield	14.370
20 K support bar	0.053	LN2 tube	1.348
LN2 tube	0.305	HTS coil	0.012
80 K cooler port	1.874	Mid_sum	15.730
20 K sensor line	1.104		
Mid_sum	3.841		
Total			19.571

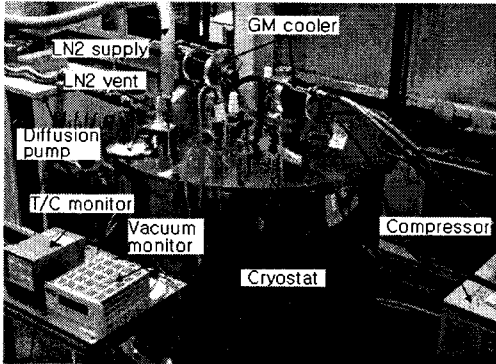


Fig. 2 Test equipments.

다. 냉동기 1, 2단, 열전도판, 편조선, 전류도입선, 초전도 코일, 복사차폐막 등 시스템의 냉각특성 파악을 위해 25개의 온도센서가 설치되었고, 냉동기 각 단에는 전기히터를 설치하여 냉각부하를 조절할 수 있도록 하였고, 모든 측정데이터는 데이터 수집장치를 통해 PC에 저장, 분석되었다.

설계된 고온초전도 SMES용 극저온 냉각시스템의 냉각성능 확인을 위해 LN2에 의해 복사차폐막을 냉각하지 않는 경우와 복사차폐막을 냉각하는 경우에 대해 실험이 수행되었으며, 복사차폐막을 냉각하는 경우, 다시 열부하가 있는 경우와 없는 경우로 나누어 실험을 수행하였다.

2.3 실험결과

복사차폐막을 냉각하지 않는 경우 냉동기 1, 2

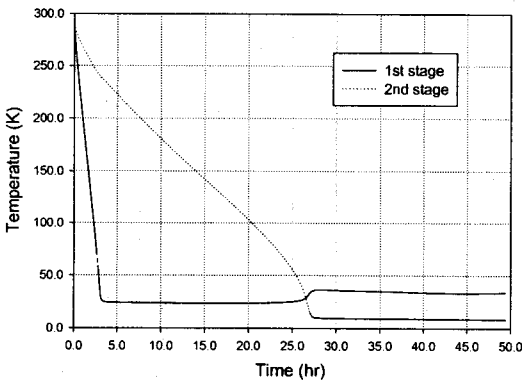


Fig. 3 Variation of the GM cryocooler 1st and 2nd head temperature.

단의 최종 도달온도는 Fig. 3에 보는 바와 같이 28시간 이후 안정되면서 각각 약 33.7K와 약 8.6K로 측정되었다. 약 27시간 지점에서 냉동기의 1단부 온도가 상승하는 것은 2단부가 충분히 냉각되어 복사차폐막을 통해 침입되는 열이 약간 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 정상상태에 도달한 이후 각 부분의 온도변화는 Fig. 4에 나타내었다. 정상상태에 도달했을 때 구리 열전도판의 온도는 약 16.6K로 냉동기 2단 헤드온도와는 약 8K의 온도차이가 발생하고 있는데 이는 냉동기 헤드에서 구리 열전도판 사이에 존재하는 냉동기 헤드 금구, 편조선 등 연결부위의 열 접촉저항에 의한 것과 복사차폐막을 냉각하지 않았기 때문에 침입되는 복사열에 의한 영향으로 볼 수 있는데, 복사차폐막이 냉각되지 않았을 때 상대적으로 복사열의 영향을 많이 받는 구리 열전도판의 윗면 온도가 바닥면 온도보다 상당히 높게 측정된 것을 근거로 판단할 때, 특히 복사열에 의한 영향이 큰 것으로 생각된다.

LN2로 복사차폐막을 냉각한 경우 냉동기 1, 2단의 최저 도달온도는 각각 약 24.8K와 약 3.5K로 측정되었으며, Fig. 5에 보는 바와 같이 구리 열전도판은 6.5K로 냉동기 2단 헤드와의 온도차이도 3K로 줄어들었다. 복사차폐막 냉각을 위한 LN2는 냉동기 1단의 헤드온도가 100K 정도되는 시점에서 주입을 시작하였고, 80K 정도로 안정되기까지는 16시간 정도가 소요되었다. 측정된 LN2 증발량을 근거로 판단할 때 복사차폐막의 열부하는 15.4W로 산정되었고 LN2 재충전 없이

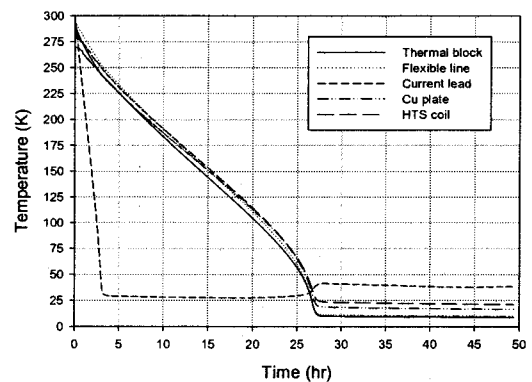


Fig. 4 Variation of the conduction cooling path temperature without thermal shield cooling.

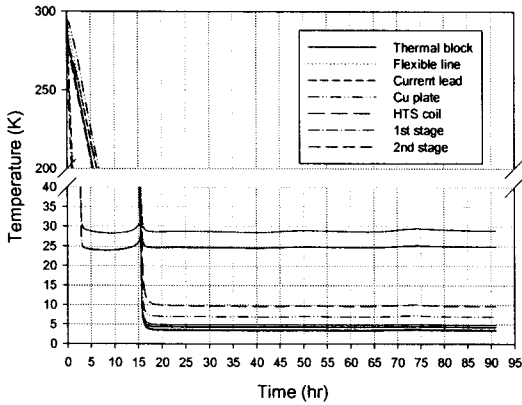


Fig. 5 Variation of the conduction cooling path temperature with thermal shield cooling.

복사차폐막의 온도가 80 K로 유지되는 시간은 약 36.5시간으로 나타났다. LN₂에 의한 복사차폐막 냉각은 실험을 위해서나 또는 초기 냉각시간을 줄이기 위한 방법으로는 활용할 수 있으나 주기적으로 재충전을 해야 하는 불편함이 있기 때문에 최종적으로는 별도의 냉동기를 추가로 설치하거나 기존 냉동기의 용량을 늘려 해결해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 6은 극저온 냉동기의 소비전력을 표시한 것으로 초기에는 냉동기 1단의 부하에 따라 소비전력이 변하다가 1단 온도가 안정되고 2단 온도가 1단 온도보다 떨어지기 시작하면서 소비전력이 갑자기 줄어들고 있음을 볼 수 있다. 이는 GM 냉동기의 특성상 1단의 온도가 안정된 이후에도 2단 온도를 1단 온도 이하로 낮추기 위해

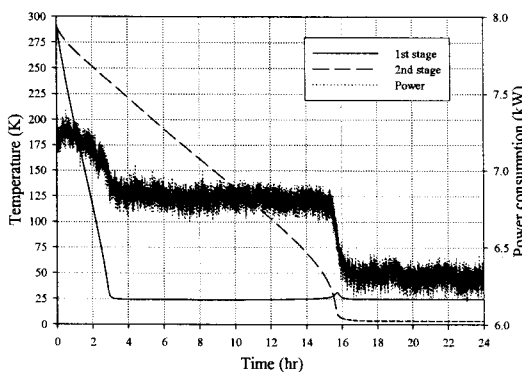


Fig. 6 Power consumption of GM cooler.

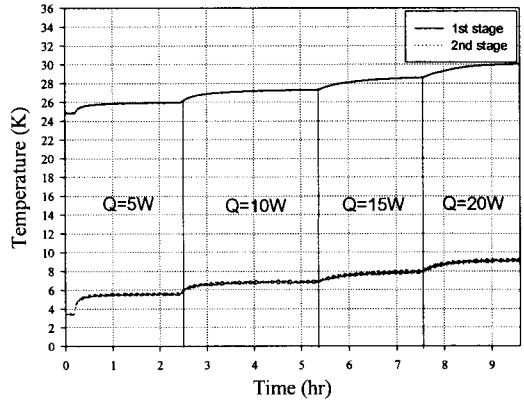


Fig. 7 Heat loads of 2nd stage.

지속적으로 전력이 소비되고 있음을 알 수 있고, 2단의 온도까지 안정되어 정상상태에 도달한 이후에는 소비전력도 약 6.4kW로 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

복사차폐막이 80 K 정도로 일정하게 유지된 상태에서는 추가적인 진공펌프의 가동 없이도 진공도가 2×10^{-7} Torr 이하를 유지하였다. 이는 냉각된 복사차폐막의 cryopumping에 의한 효과로 추가적인 흡착제(getter)의 설치나 주기적인 진공펌프의 가동이 필요 없음을 알 수 있었다.

초전도 코일의 발열량을 모사하기 위해 극저온 냉동기 2단에 설치한 저항의 발열량을 Fig. 7과 같이 5, 10, 15, 20 W로 변화시키면서 실험한 결과를 Table 2에 표시하였다. 또한 극저온 냉동기 1단 열부하를 50 W로 고정하고 2단의 열부하를 0, 10, 20 W로 변화시키면서 실험한 결과 극저온 냉동기 1단측 열부하는 초전도 코일 냉각온도에

Table 2 Temperature of conduction cooling path (1st stage : no load)

HTS coil heat load (W)	Current lead (K)	Cu plate (K)	HTS coil (K)
0	28.9	6.5	14.9
5	30.2	12.4	19.8
10	31.8	16.5	23.9
15	33.1	19.1	25.9
20	36.2	21.5	28.5

Table 3 Temperature of conduction cooling path
(1st stage : 50 W)

HTS coil heat load (W)	Current lead (K)	Cu plate (K)	HTS coil (K)
0	43.8	6.6	15.1
10	49.6	16.5	23.5
20	56.5	21.9	28.7

는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다 (Table 3). 이를 근거로 판단할 때 초전도 코일의 온도를 20 K 이하로 유지하기 위해서는 전류리드의 열부하가 50 W를 넘지 않고, 초전도 코일의 열부하가 5 W 미만이면 본 연구에서 설계, 제작된 전도냉각시스템에 의해 초전도 코일을 20 K 이하로 냉각할 수 있게 된다.

3. 결 론

고온초전도 SMES 장치에 적용하기 위한 전도냉각시스템을 설계, 제작하여 기초시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 복사차폐막이 안정되게 냉각이 되면 추가적인 흡착제(getter)의 설치나 주기적인 진공펌프의 가동이 필요 없음을 알았다.

(2) LN₂에 의해서도 36시간 이상의 복사차폐막 냉각시간을 유지할 수 있었으나 주기적으로 재충전을 해야 하는 불편함이 있기 때문에 최종적으로는 LN₂의 증발량에 의해 측정된 복사차폐막의 열부하 15.4 W를 추가로 감당할 수 있도록 냉동기 용량조절이 필요할 것으로 판단된다.

(3) 초전도 코일의 냉각온도를 20 K 이하로 유지하기 위해서는 전류리드의 열부하와 전류리드의 열부하가 각각 50 W와 5 W를 넘지 않도록 설계해야 함을 알았다.

위와 같은 결론을 바탕으로 전도냉각시스템의 수정, 보완은 물론 축적된 실험데이터를 근거로 초전도 코일 및 전류리드 설계시 요구되는 냉각부하를 제시할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의

한 것입니다.

참고문헌

- 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 3 MJ/750 kVA SMES System, *Cryogenics*, Vol. 46, pp. 367-372.
- Ishiyama, A., Akita, S., Kasahara, H. and Sakaguchi, H., 2001, Research and development of HTS-SMES system, *Physica C*, pp. 1311-1314.
- Ishiyama, A., Yanai, M., Morisaki, T., Akita, S., Kouso, S., Tatsuta, Y., Abe, H. and Takasaki, K., 2005, Transient thermal characteristics of cryocooler-cooled HTS coil for SMES, *IEEE Applied superconductivity*, Vol. 15, pp. 1879-1882.
- Friedman, A., Shaked, N., Perel, E., Sinvani, M., Wolfus, Y. and Yeshurun, Y., 1999, Superconducting magnetic energy storage device operating at liquid nitrogen temperatures, *Cryogenics*, Vol. 39, pp. 53-58.
- 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*, p. 126.
- American Superconductors Inc., 1997, Revolutionizing the way the world manages energy, *Annual Report*.
- Tixador, P., Bellin, B., Deleglise, M., Vallier, J. C., Bruzek, C. E., Pavard, S. and Saugrain, J. M., 2005, Design of a 800 kJ HTS SMES, *IEEE Applied Superconductivity*, Vol. 15, pp. 1907-1910.
- Bellin, B., Tixador, P., Deleglise, M., Vallier, J. C., Pavard, S. and Bruzek, C. E., 2006, Cryogenic design of a 800 kJ HTS SMES, *Journal of Physics, Conference Series* 43, pp. 817-820.