2001년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집(2001.4.19~21)

초전도에너지저장장치용 Cryostat 제작 및 특성시험

조전욱, 심기덕, 하홍수, 김해종, 성기철, 권영길, 류강식, 고득용*, 류충식**, 김성래**
한국전기연구원, *한국기계연구원, **(주)CVE

Manufacturing and Tests of Cryostat for SMES

J.W.Cho, K.D.Sim, H.S.Ha, H.J.Kim, K.C.Seong, Y.K.Kwon, K.S.Ryu, D.Y.Koh*, C.S.Ryoo**, S.R.Kim**
KERI, *KIMM, ** CVE

Abstract - SMES consists of superconducting magnet, power conveter and cryostat and HTS current lead. The prototype cryostat with HTS current leads and refrigerators was designed and manufactured for micro-SMES. HTS current lead with cryocooler was measured the temperature rise under dc current. The cryostat was evaluated the helium boil-off and mechanical stress during transfer and vibration test. These results will be applied to develope the micro-SMES system.

1. 서 론

전력계통으로부터 공급되는 전력의 질은 전통적으로는 정전방지 및 규정주파수/규정전압의 유지였지만, 최근에는 반도체 전력소자의 스위칭 능력을 응용한 제어가 범용화되고 대형화하여 전압, 주파수 등의 전력품질이 저하하는 경향이 있는 반면 전력제어 설비, 자동화 설비 및 컴퓨터 설비 등에서 요구하는 전력품질은 더욱 높아지고 있다. 특히 전력품질에 매우 민감한 전자기기, 제어장치 및 정보기기 등에서는 순간적인 정전 및 전력품질 저하에 의해 막대한 금전적, 인명적 손실을 초래할 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 납축전지를 이용한 UPS를 사용하고 있지만 축전지의 제한적 수명과 화학물질의 사용으로 인한 축전지 폐기시 고가의 처리비용과 환경오염문제와 넓은 소요면적이 필요 등 사용상 많은 문제점을 가지고 있다. 그러나 에너지 저장요소로서 초전도마그네트를 이용하면 축전지보다 고속의 충·방전이 가능하므로 보호시간이 짧고 고출력용 비상전원으로 최적이며 예측 불가능한 순시전압강하 및 순시정전은 물론 유효·무효전력에 대한 독립적인 제어가 가능하여 Flicker, Voltage Sag, Voltage Swell 등과 같은 전기품질 개선에 대해서도 효과가 매우 높다. 뿐만 아니라 잦은 반복 운전을 해도 축전지와 같은 열화가 없으므로 반영구적으로 사용할 수 있으며 구성요소가 매우 간단하므로 초전도 마그네트의 상태 진단이 용이하여 보수가 매우 편리하다. 따라서 이러한 장점으로 인해 자원절약이나 환경보호 문제는 물론 에너지의 사용효율 측면에서도 유리한 SMES system의 상용화가 이루어지고 있다[1]-[3].

SMES는 90%이상의 고효율과 고속응성 및 소형화가 가능하여 전력설비의 효과적인 운용과 안정도 향상을 위하여 연구가 진행되어 최근에는 군사용 제어기기나 IBM의 집적회로 시험장비와 같은 정밀 전원이 요구되는 곳에 사용되고 있다[4]. SMES는 초전도마그네트, 전력변환기, 최근에 적용되고 있는 고온초전도 전류리드 및 cryostat를 포함한 냉각시스템 등으로 구성되며, 이중에서 cryostat는 초전도마그네트의 안정적 운전과 액체헬륨의 증발을 최소화하기 위하여 복잡한 단열구조와 냉동기를 설치하여 제작되고 있다. 특히 도서지역이나 군사용의 micro-SMES와 같이 이동성이 요구되는 시스템에서 cryostat의 지지 및 단열구조는 더욱 복잡하다.

본 연구에서는 이동형 micro-SMES의 개발을 위하여 SMES용 cryostat를 설계 및 시제작하여 각각의 thermal shield의 온도분포와 LHe 증발량 및 이동시 발생할 수 있는 지지구조의 응력변화, 공진주파수 등을 평가하였다. 또한 통전전류의 변화에 따라 전도냉각 구조의 HTS current lead의 온도변화를 측정하였다.

2. 본 론

2.1 Cryostat 설계 및 제작

그림1과 그림2는 본 연구에서 제작한 cryostat의 설계도와 제작된 cryostat의 모습이다. 주요 제원은 표1과 같으며 외경 1210 mm, 높이 1930 mm, dummy magnet을 포함하여 무게 1700 kg의 cryostat를 시제작하였다. 그림1에서 7은 20K와 80K shield 냉각용 냉동기이며, 8은 전류리드 냉각용 냉동기이다.cryostat의 열설계를 위해서는 대류와 복사에 의한 열전달과 전도에 의한 열전달 특성을 정확하게 해석하고, 각각의 변수에 대한 정확한 데이터가 요구된다. 본 연구에서는 그간 MRI 및 각종 cryostat의 제작 경험과 데이터를 바탕으로 설계하였으며, 표2는 헬륨 vessel 및 20K, 80K thermal shield로의 열침입량 계산결과를 요약한 것이다. 그림3은 냉각중의 20K과 80K thermal shield 및 HTS current lead의 온도를 나타낸 것이며 이때의 증발량은 약 1.7ℓ/hr로서 전류리드에 의한 증발량을 고려하면 설계치와 어느 정도 일치함을 확인하였다.

표1. Cryostat 제원

구 분	크 기 [mm] 외경	높이	재 질
LHe 조	900	1300	STS
20 K shield	980	1470	Al
80 K shield	1080	1690	Al
진공조	1210	1930	STS

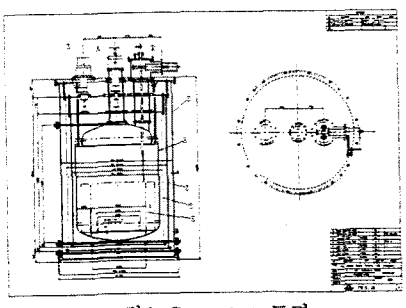


그림1 Cryostat 도면

그림 2. 제작된 cryostat 사진

표 2. 경로별 침입열량

구분	열침입 경로	산출량 [W]	소계[W]
LHe 조	전도열	0.1548	0.3137
	복사열	0.1589	
20 K shield	전도열	1.175	1.222
	복사열	0.047	
80 K shield	전도열	4.3	26.6
	복사열	22.3	

* 전류리드 및 신호선 제외

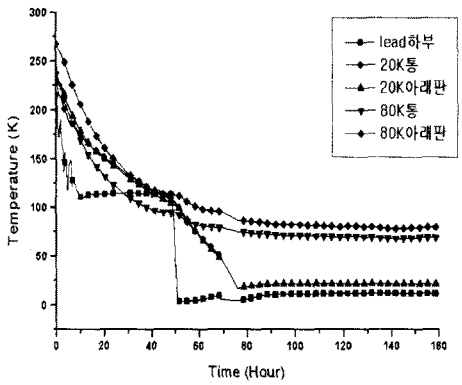


그림 3 냉각 중 각 shield의 온도변화

2.2 Current Lead 통전시험

cryostat의 효과적 운전을 위하여 극저온 상태의 안정적 유지뿐만 아니라 냉매손실의 최소화가 필요하기 때문에 우수한 특성의 cryostat 개발과 함께 저손실 current lead의 개발이 필요하다. 구리, 황동과 같은 금속재료를 current lead로 사용하면 높은 열전도도와 주울열에 의한 열 발생으로 냉매의 손실이 커지지만, 고온초전도(HTS) current lead를 사용하면 가스냉각방식의 current lead보다 냉각손실이 적어 고온초전도 current lead가 점차 실용화되고 있다[5].

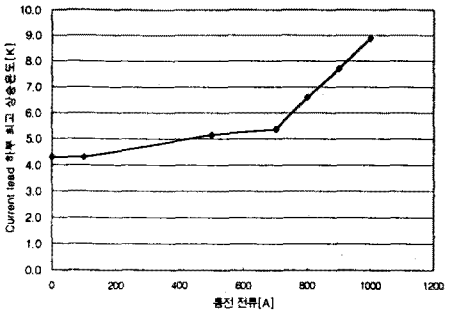


그림 4. 전류의 증가에 따른 HTS current lead의 온도 변화

본 연구에서는 micro-SMES용 으로 개발된 HTS current lead[6]를 사용하여 통전시의 온도 변화를 측정하여 냉동기 사용조건 등을 파악하였다.

실험에서 HTS current lead의 냉각을 위하여 전도냉각용으로 사용된 냉동기는 CTI사의 1050CP GM 냉동기로서 20K은 20W, 80K은 65W의 용량을 갖는 2단 냉동기이며 80K cold head를 전류리드에 연결하여 운전하였다.

액체헬륨 주입후 고온초전도 전류리드의 상부온도는 약34~37K, 하부는 4~5K였으며, 전류를 100A에서 1000A 까지 상승시키며 전류리드의 온도상승을 측정하였다. 그림4에 그 결과를 나타내었으며, 그림에서 보는 바와 같이 900A에서 660초와 1000A에서 570초 통전시 전류리드 하부의 온도는 9K 상승한 14K로 상승하였으며 상부는 증발되는 헬륨가스에 의해 45K이상 상승하지 않아 HTS 전류리드의 운전에 문제가 없음을 확인하였다.

2.3 이동중 Cryostat의 특성시험

본 연구에서 개발중인 SMES는 이동을 고려한 시스템이기 때문에 이동시 발생할 수 있는 헬륨 vessel과 thermal shield의 진동에 대비하여 냉동기 cold head와 shield 사이에 구리연선을 사용하였다. 또한 이동중의 응력변화를 측정하기 위하여 헬륨 vessel을 지지하는 각각의 support에 그림 5와 같이 strain sensor를 설치하여, 냉각 및 이동 중에 변화하는 strain을 측정하였다.

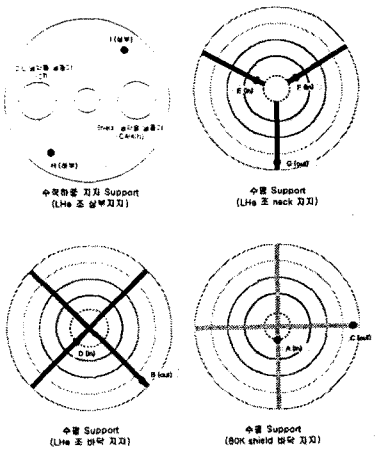


그림 5. 스트레인 센서 설치 위치

그림6는 트럭에 싣고 진동시험을 하며 고석도로를 이동하는 사진이며, 그림7은 창원(한국전기연구원)에서 대전(한국기계연구원)으로 이동하면서 측정한 support bar들의 strain 값을 나타낸 것이다. 이 데이터들은 현재 개발중인 cryostat의 기본 자료로 활용하기 위하여 정밀 분석중이다.

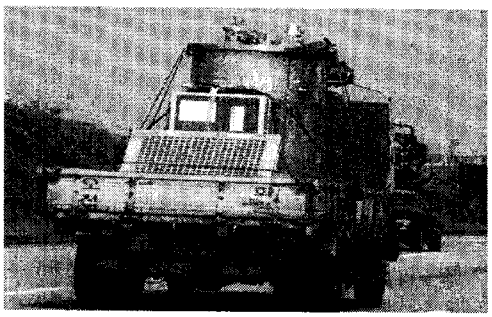


그림 6 이동시험중의 cryostat

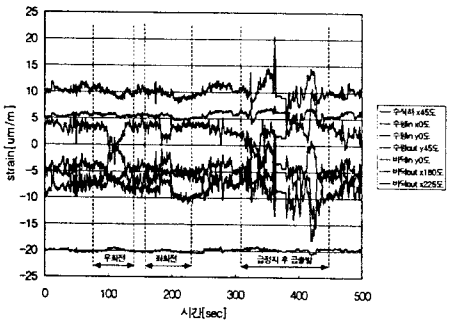


Fig. 7 이동 시험중의 지지bar의 strain

2.4 공진주파수 특성시험

상기와 같이 직접적인 strain 특성측정과 병행하여 규격 KS R 1034 "자동차 부품 진동시험 방법"[5]에 따라 그림7과 같이 6자유도 진동대에 cryostat를 설치하여 공진주파수를 측정하였다. cryostat의 진동 가속도를 계측하기 위하여 전후, 좌우 및 상하 방향으로 각각 가속도계를 부착하였으며 가해지는 진동 가속도는 6자유도 진동대에 설치된 가속도계로 측정하였다.

cryostat에 인가되는 힘의 방향은 전후(냉동기와 수평방향,Y방향), 좌우(X방향) 및 상하(Z방향) 각 방향에 대하여 진동수 범위 5~50 Hz에서 가속도 편진폭 0.05G, 진동수 변화속도 0.05 Hz/sec로 하여 공진 주파수를 측정하였다. 공진 진동수를 얻기 위해서 주파수에 따라 cryostat의 진동응답 가속도와 가해진 진동가속도의 비를 Spectrum Analyzer (HP 3582A)로 분석하였다. 그림8은 6자유 진동대에 설치하여 시험중인 cryostat 사진이며, 표3은 spectrum analyzer로 측정된 각 방향에서의 공진

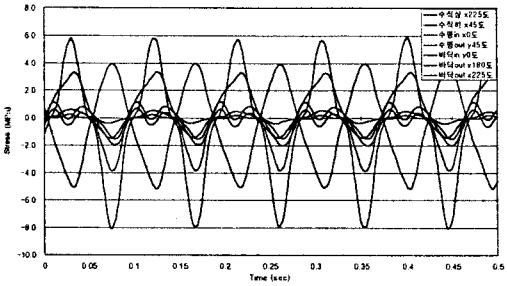
표 3. cryostat의 공진주파수

방향	공진 주파수 [Hz]
X	10.8, 32.8, 37.2
Y	12.4, 24.4, 34.8, 46.0
Z	28.8, 36.4

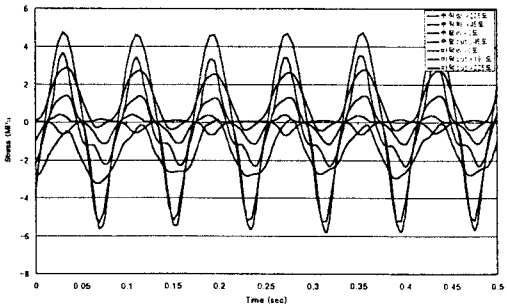
Fig 8. 진동시험중의 Cryostat

주파수이다.

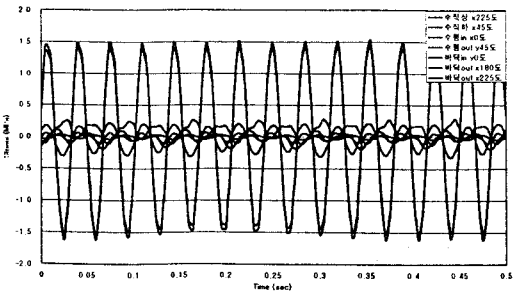
또한 각 방향의 공진 주파수를 고정한 상태로 0.1G에서 0.5G까지 0.1G단위로 증가시키며 각 support bar들의 strain을 측정하였으며, 그림9는 각 축의 공진주파수에서 support bar들의 진동시험 결과를 stress로 환산한 결과를 나타낸 것으로 support bar의 최대 인장강도이하로 충분한 안전성이 있는 것으로 확인되었다.



(a) x축, 0.5g에서의 stress



(b) y축, 0.5g에서의 stress



(c) z축, 0.3g에서의 stress

그림 8. 진동주파수에서의 각 support bar의 stress

3. 결 론

본 연구에서는 이동형 SMES용 cryostat를 제작하여 각 thermal shield의 온도분포, 헬륨 증발량, 이동중의 support의 stress, 공진주파수 등 cryostat의 운전을 위한 기본 특성을 평가·분석하였다.

그 결과 cryostat의 thermal shield의 온도가 설계치와 잘 일치하며 헬륨 증발량은 1.7ℓ/hr로서 전류리드에 의한 증발량을 고려하면 설계치와 유사한 매우 우수한 냉각특성을 나타냈다.

또한 고온초전도 current lead의 전도냉각에 의한 냉각특성과 통전시험을 통하여 현재 이동형 SMES 시스템에 적합함을 확인하였다. 이동 중에 공진에 의해 발생할 수 있는 시스템의 파손을 막기 위하여 공진 주파수를 측정하였으며 각 공진 주파수에서 가속도를 가속시키며 support bar의 stress 변화를 측정하였으며 현재 개발중인 이동형 SMES의 cryostat 개발에 적용하고 있으며 추후 이의 결과를 발표할 계획이다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] Cesar A. Luongo, "Superconducting Storage System : An Overview" IEEE Trans. on Magneticss, Vol.32, No.4, pp2214-2223, 1996

[2] 성기철, 김해종, 조전욱, 권영길, 류강식 "초전도에너지저장(SMES) 시스템의 개발동향" 초전도와 저온공학, Vol.2, No.1, pp10-18, 2000

[3] K.P.Juengst, P.Komarek, W.Maurer, "Use of Superconductivity in Energy Storage", Proc. of IEA Symposium, World Scientific Publishing Co., 1995

[4] http://www.amsuper.com

[5] John R. Hull, "High-Temperature Superconducting Current Leads", IEEE Trans. on Appl. Magnetics, Vol. 3, No. 1, 1993

[6] 장현만, 오상수, 조전욱, 조영식, 하홍수, 하동우, 성기철, 권영길, 류강식, "SMES 마그네트용 고온초전도 전류 도입선 설계", 한국초전도저온공학회 논문지, 2권, 2호, pp.6-10, 2000

[7] "자동차 부품 진동시험 방법", 한국공업규격, 1991