Micro SMES용 크라이오스테트 제작 및 특성평가

Manufacture and Tests of Cryostat for Micro SMES

조전욱*, 심기덕*, 하홍수*, 김해종*, 성기철*, 권영길*,
고득용**, 염한길**, 류충식***, 김성래***

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

Abstract : SMES consists of superconducting magnet, a power converter, a cryostat and HTS current leads. The prototype cryostat with HTS current leads and refrigerators was designed and manufactured for developing micro SMES. The temperature rise under dc current in HTS current leads was measured. The performances of helium boil-off and mechanical stress were evaluated during transfer and vibration tests. The results will be used to develope the micro-SMES system.

Key Words : superconducting magnet energy storage, cryostat, current leads, vibration test

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 전력품질에 대한 수준은 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 소요면적의 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 전압동요(Flicker), 순시 전압저하(Voltage Sag), 순시 전압상승(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 크라이오스테트를 포함한 냉각시스템 등으로 구성되며, 이중에서 크라이오스테트는 초전도 마그네트의 안정적 운전과 액체헬륨의 증발을 최소화하기 위하여 복잡한 단열구조와 냉동기를 설치하여 제작되고 있다. 특히 도서지역이나 군사용의 micro-SMES와 같이 이동성이 요구되는 시스템에서 크라이오스테트의 지지 및 단열구조는 더욱 복잡하다.

본 연구에서는 이동형 micro-SMES의 개발을 위하여 SMES용 크라이오스테트를 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 고온초전도 전류리드의 온도변화를 측정하였다.

2. 본 론

2.1. 크라이오스테트 설계 및 제작

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

* 정 회 원 : 한국전기연구원 초전도응용연구그룹
** 정 회 원 : 한국기계연구원 열유체시스템연구부
*** 정 회 원 : (주)C.V.E.
원고접수 : 2001년 10월 15일
심사완료 : 2001년 11월 07일

표 1. 크라이오스테트의 제원
Table 1. Dimensions of cryostat

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

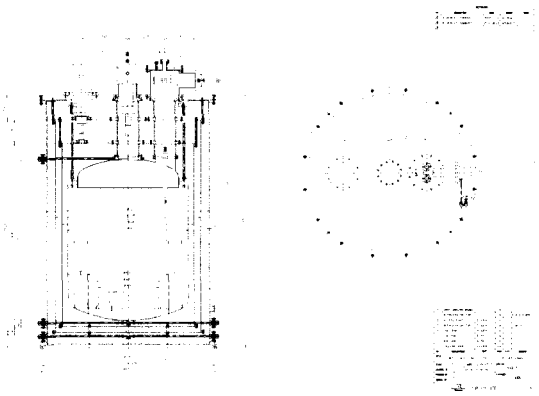


그림 1. 크라이오스테트 도면
Fig. 1. Drawing of cryostat

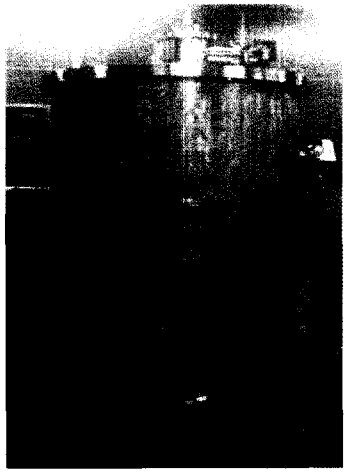


그림 2. 제작된 크라이오스테트 사진
Fig. 2. Picture of prototype cryostat

표 2. 경로별 침입열량
Table 2. Estimated values of heat leak

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

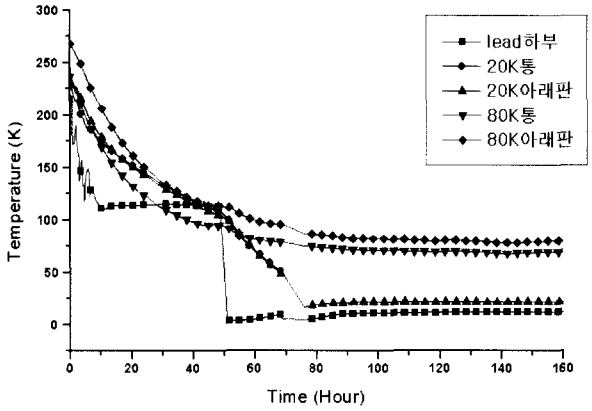


그림 3. 냉각 중 각 shield의 온도
Fig. 3. Temperature of each thermal shields during cooling down

2.2. 전류리드 통전시험

크라이오스테트의 효과적 운전을 위하여 극저온 상태의 안정적 유지뿐만 아니라 냉매손실의 최소화가 필요하기 때문에 우수한 특성의 크라이오스테트 개발과 함께 저손실 전류리드의 개발이 필요하다. 구리, 황동과 같은 금속재료를 전류리드로 사용하면 높은 열전도도와 주울열에 의한 열 발생으로 냉매의 손실이 커지지만, 고온초전도 전류리드를 사용하면 가스냉각방식의 전류리드보다 냉각손실이 적어 고온초전도 전류리드가 점차 실용화되고 있다[5].

본 연구에서는 micro-SMES용으로 개발된 고온초전도 전류리드를 사용하여 통전시의 온도 변화를 측정하여 냉동기 사용조건 등을 파악하였다[6].

실험에서 고온초전도 전류리드의 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 약 34~37K, 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 5K에서 14K

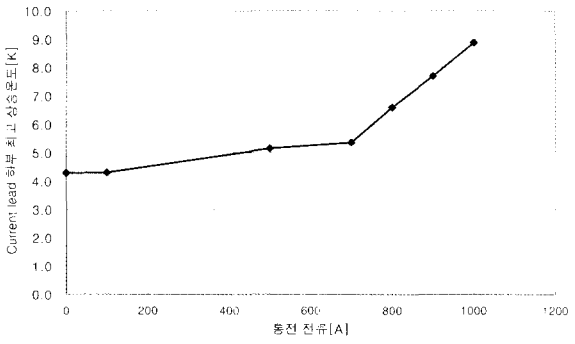


그림 4. 전류의 증가에 따른 고온초전도 전류리드의 온도 변화
Fig. 4. Temperature rise according to applied currents

로 9K 상승하였으며 상부는 증발되는 헬륨가스에 의해 45K이상 상승하지 않아 고온초전도 전류리드의 운전에 문제가 없음을 확인하였다.

2.3. 이동중 크라이오스테트의 특성시험

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

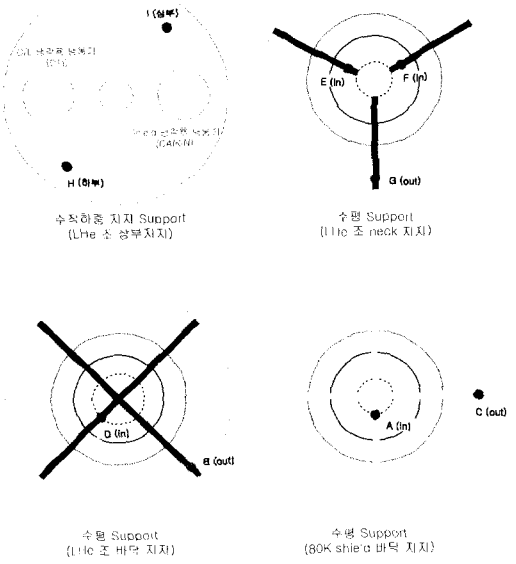


그림 5. 스트레인 센서 설치 위치
Fig. 5. Location of strain sensors

그림6는 트럭에 싣고 진동시험을 하며 고속도로를 이동하는 사진이며, 그림7은 액체헬륨으로 냉각된 상태로 창원에서 대전으로 이동하면서 HBM Co.의 8채널 MGC Plus를 사용하여 측정한 support bar들의 strain 값을 나타낸 것이다. 이 데이터들은 현재 개발중인 크라이오스테트의 기본 자료로 활용하기 위하여 정밀 분석중이다.

그림 6. 이동시험중의 크라이오스테트
Fig. 6. Cryostat during the transfer

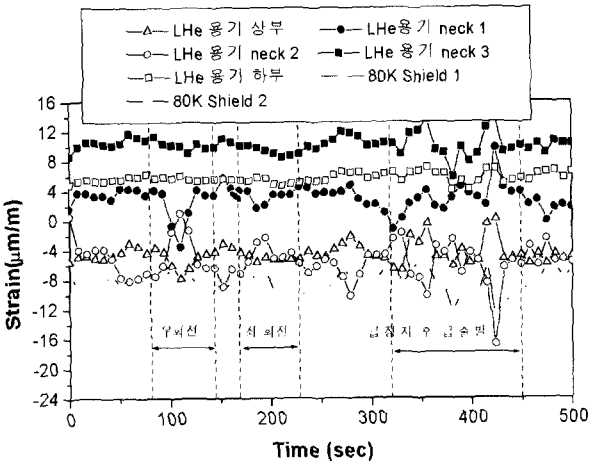


그림 7. 이동 시험중의 지지bar의 strain 특성
Fig. 7. Strain characteristics of support bars during the transfer

2.4. 공진주파수 특성시험

상기와 같이 직접적인 strain 특성측정과 병행하여 규격KS R 1034 "자동차 부품 진동시험 방법"[7]에 따라 그림8과 같이 6자유도 진동대에 크라이오스테트를 설치하여 공진 주파수를 측정하였다. 크라이오스테트의 진동 가속도를 계측하기 위하여 전후, 좌우 및 상하 방향으로 각각 가속도계를 부착하였으며 가해지는 진동 가속도는 6자유도 진동대에 설치된 가속도계로 측정하였다.

크라이오스테트에 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 크라이오스테트의 진동응답 가속도와 가해진 진동가속도의 비를 Spectrum Analyzer (HP 3582A)로 분석하였다. 그림8은 6자유 진동대에 설치하여 시험중인 크라이오스테트 사진이며, 표3은 spectrum analyzer로 측정된 각 방향에서의 공진 주파수이다.

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

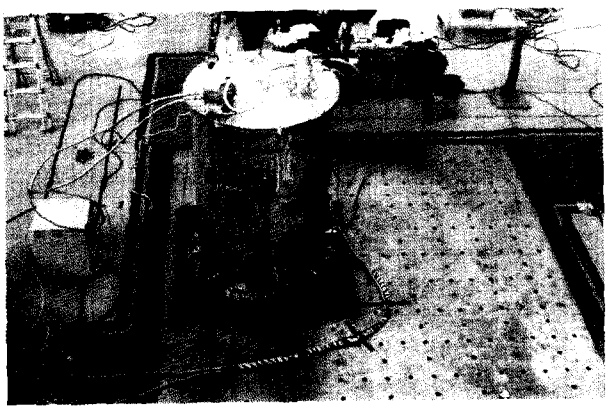
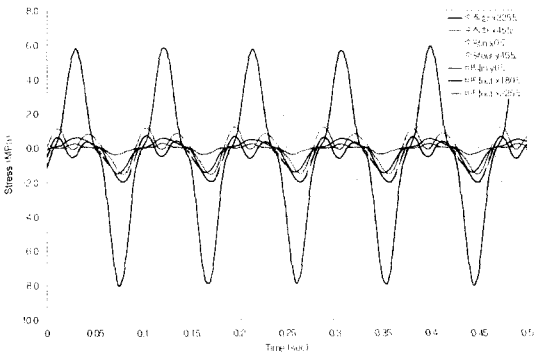


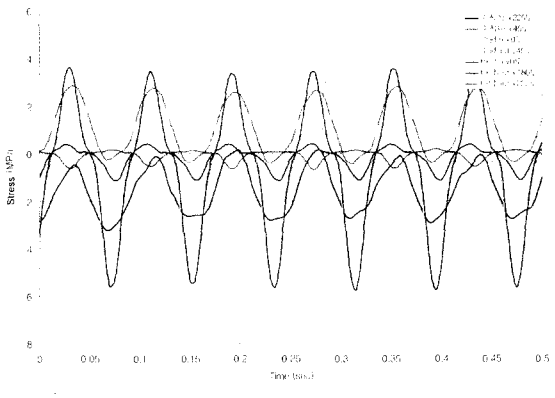
그림 8. 진동시험중의 크라이오스테트
Fig. 8. Overview of cryostat on the vibration tests

표 3. 크라이오스테트의 공진주파수
Table 3. Resonance frequency of cryostat

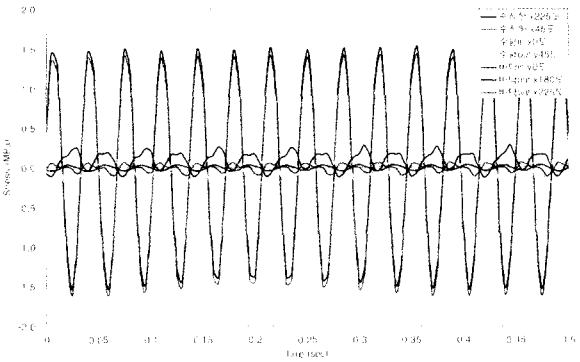
방향	공진 주파수 [Hz]
X	10.8, 32.8, 37.2
Y	12.4, 24.4, 34.8, 46.0
Z	28.8, 36.4



(a) x축, 0.5g에서의 stress



(b) y축, 0.5g에서의 stress



(c) z축, 0.3g에서의 stress

그림 9. 진동주파수에서의 각 support bar의 stress
Fig. 9. Stress characteristics of support bars at resonance frequency

3. 결 론

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

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

또한 고온초전도 전류리드의 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 크라이오스테트 개발에 적용 중이며 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 "초전도 에너지저장(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.

저 자 소 개

조전욱(趙全旭)
1960년 3월 2일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업, 2001년 연세대학교 전기공학과 졸업(공박), 1990년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원

심기덕(沈基德)
1973년 2월 1일생, 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 연구원

하홍수(河洪秀)
1969년 5월 21일생, 1995년 성균관대 금속공학과 졸업, 1997년 동 대학원 금속공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원

김해종(金海鍾)
1965년 11월 25일생, 1993년 경상대학교 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995년~1996년 (주)현대정공 근무,1996년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원

성기철(成耆哲)
1956년 2월 20일생, 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1986년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 책임연구원

권영길(權永吉)
1959년 7월 28일생, 1982년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1990년 동 대학원 기계공학과 졸업(공박), 1992년~1999년 한국전기연구원 선임연구원, 1999년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 그룹장

고득용(高得龍)
1959년 02월 12일생, 1982년 한양대공대 기계공학과 졸업, 1985년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 기계공학과 박사과정, 현재 한국기계연구원 선임연구원

류충식(柳忠植)
1962년 2월 10일생, 1987년 한양대 전기공학과 졸업, 1987-1992 현대자동차 근무, 1993-1996 (주)신성월드 근무(씨브이 전신), 1997-현재 (주)씨브이 부장 재직 중

염한길(廉漢吉)
1966년 9월 3일생, '86 ~ '90 인하대학교 항공공학과 학사, '90 ~ '92 인하대학교 항공공학과 석사, '92 ~ 현재 한국기계연구원 열유체환경연구부 선임연구원

김성래(金聖來)
1965년 10월 9일생, 1988년 부산대학교 물리학과 졸업, 1992년 부산대학교 물리학과 (이학석사) 현재 (주)CVE 과장