

고온초전도 응용기기용 과냉질소 냉각시스템의 냉각특성

Characteristics of Sub-cooled Nitrogen Cryogenic System for Applied High-Tc Superconducting Devices

강형구*, 김형진**, 배덕권*, 안민철*, 윤용수***, 장호명#, 고태국##

Hyoungku Kang*, Hyung Jin Kim**, Duck Kweon Bae*, Min Cheol Ahn*, Yong Soo Yoon***,
Ho-Myung Chang#, Tae Kuk Ko##

Abstract: The cryogenic system for 6.6 kV/200 A inductive superconducting fault current limiter (SFCL) was developed at Yonsei university in 2003. The sub-cooled nitrogen cryogenic system could be applied to not only SFCL but also many other applied high-Tc superconducting (HTS) devices like superconducting motor, superconducting generator and superconducting magnetic energy storage (SMES). Generally, the cooling capacity of GM-cryocooler depends on the load temperature. Therefore, it is necessary to perform the cooling capacity test at no load condition to calculate the exact cooling power and heat load of cryogenic system. In this research, the cooling capacity test of GM-cryocooler was executed and the heat load of developed cryogenic system was calculated. The long run operation test results of sub-cooled nitrogen cryogenic system were successful in pressure and temperature condition. Moreover, the design and fabrication method of cryogenic system were introduced and the test results were described.

Key Words: cryogenic system, HTS device, SFCL, sub-cooled nitrogen

1. 서 론

연세대학교에서는 21세기 프론티어 사업의 일환으로 유도형 고온초전도 한류기를 개발하고 있다. 1차년도 연구에서는 전도냉각을 이용한 한류기용 냉각시스템을 개발하고 냉각 특성실험과 단락실험을 수행하였다. 이 실험을 통하여 전도냉각용 시스템에서는 GM-냉동기를 사용하여 초전도 마그넷을 20 K 이하로 냉각시켜 임계전류값을 액체질소에서의 값보다 5.5 배 이상 높일 수 있는 장점을 가지고 있지만, 한류기와 같이 순간적으로 전류의 크기가 크게 변화하는 초전도 응용기

기에서는 냉각시스템이 열적으로 상당히 불안정하여 응용에 부적합하다는 결론을 얻었다 [1], [2]. 따라서 2차년도 연구에서는 시스템의 임계전류와 전기적 절연 특성을 향상시키고, 또한 열적 안정성을 동시에 향상시킬 수 있는 과냉질소 냉각시스템을 개발하여 한류기에 적용하였다. 실험을 통하여 과냉질소 냉각시스템은 한류기 뿐만이 아니라 모든 고온초전도 응용시스템에 응용될 수 있으며, 그 특성 또한 매우 우수하다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 3차년도 연구에서는 여러 가지 장점을 가지고 있는 과냉질소 냉각시스템을 실제 고온초전도 응용기기에 사용될 수 있도록 설계, 제작하여 성능 특성을 시험하였다. 또한, 정확한 냉각시스템을 설계, 제작하기 위해서는 GM-냉동기의 온도별 냉각 용량특성을 알아야 하므로, 냉동기 용량을 각 온도에 따라 측정하였다. 본 논문에서는 과냉질소 냉각시스템의 설계와 제작기법을 소개하였으며, 제작된 과냉질소 냉각시스템의 예비시험을 통하여 얻어진 냉각특성 결과를 분석하였다. 본 실험을 통해 3차년도에 제작된 냉각시스템은 2차년도 시스템에 비해 열부하가 현저히 줄어들어 냉각특성이 매우 향상됨을 알 수 있었다. 또한 400 여 시간 동안의 냉각실험을 통해서 정상상태의 시스템 온도가 비교적 안정적으로 유지됨을 알 수 있었다. 예비시험을 통해 얻어진 냉각특성을 분석하였으며, 현재 시스템의 특성 개선과 관련하여 추가적인 연구를 진행 중에 있다.

2. 본 론

2.1. 냉각시스템 설계

2차년도 냉각시스템은 6.6 kV/ 200 A 급 유도형 한류기의 단락특성 시험을 위한 것으로, 액체질소의 상태를 한시적으로 64 K, 1 기압으로 유지하는 것을 목적으로 제작되었다. 2차년도에 개발된 단시간 운전 용 과냉질소 냉각시스템의 실험결과는 성공적이었으며, 결과는 이미 여러 논문지에 발표한 바 있다 [3], [4]. 본 3차년도 연구에서는 개발된 초전도 응용기기를 설계통에 바로 적용하기 위한 장시간용 냉각시스템을 설계, 제작하였다. 3차년도 시스템에서는 질소총외곽에 진공층을 만들어 외부 복사열의 양을 최소화하였다. 다음의 그림 1에 과냉질소 냉각시스템의 개략 설계도를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 전류 도입선과 신호측정부를 stand-off 방식으로 제작하여 전체 시스템의 높이를 최소화하였다. 써멀링커 (Thermallinker)는 효율적으로 시스템을 냉각시키기 위해서 열손실을 최소화할 수 있는 구리 편조선 형태

* 학생회원 : 연세대 공과대 전기전자공학과 박사과정

** 학생회원 : 홍대 과학기술 연구소 연구원

*** 정회원 : 안산공대 공과대 전기과 교수

정회원 : 홍대 공대 기계시스템 디자인공학과 교수

정회원 : 연세대 공대 전기전자공학과 교수

원고접수 : 2004년 02월 20일

심사완료 : 2004년 03월 22일

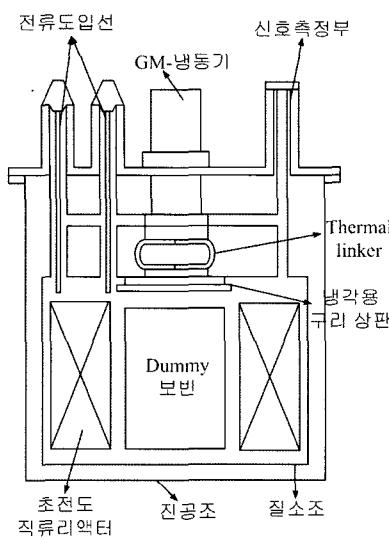


그림 1. 3차년도 과냉질소 냉각시스템의 개략 설계도.

로 제작하였다. 그리고 냉각용 구리상판은 씨멀링크와 연결되어 있으며 질소조에 용접되어 있다. 또한 진공조는 외부의 열침입을 최소화하기 위해서 10-5 Torr 이하의 진공도를 유지하였다. 실제로 2차년도 냉각시스템의 구조는 질소조 외곽에 진공조가 없기 때문에 질소조를 통한 외부 열침입량은 대략 32 W 이상의 값으로 매우 크게 계산되었다 [3]. 더미보빈 (dummy bobbin)은 시스템의 중앙에 위치하며, 액체질소의 양을 최소화하기 위해서 제작하였다. 액체질소는 사고시 열적 안정성에는 도움이 되지만, 그 양이 너무 많으면 오히려 냉동 부하의 양이 증가하게 되어 시스템의 효율이 떨어지게 된다. 따라서 더미보빈을 사용하여 액체질소의 양을 최적화하는 것이 필요하다.

2.2. 냉동기 용량

일반적으로 GM-냉동기는 온도에 따라 냉각용량이 변화하게 된다. 따라서 냉각시스템의 열부하와 시스템의 냉각용량을 정확히 알기 위해서는 각 온도별 냉동기의 용량실험을 수행해야 한다. 용량을 측정하기 위해서 냉동기를 진공조 안에 위치시키고 냉동기 1단 끝

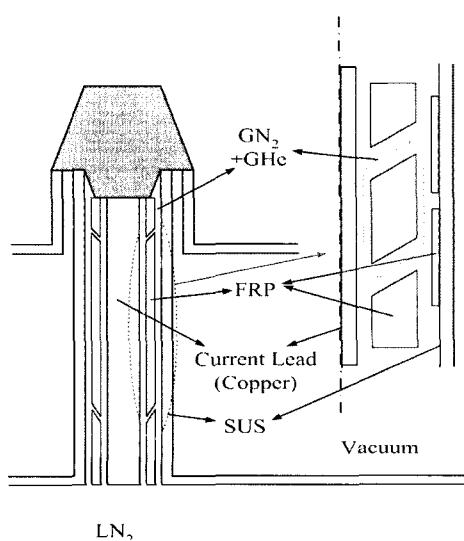


그림 2. Neck Type 전류도입선의 개념도.

에 극저온 히터를 감아 온도를 조절하여 용량실험을 수행하였다. 본 실험에서는 14 K에서 70 K 까지 온도범위에서의 냉동기 용량을 측정하였다. 본 실험에 사용된 GM-냉동기는 Leybold 사에서 제작된 120 T 모델이며, 정격용량은 80 K에서 120 W으로 명시되어 있다.

2.3. 냉각시스템의 특징

3차년도 냉각시스템의 가장 큰 특징은 세 가지가 있다. 첫 번째는 2차년도 시스템에 사용된 전도냉각용 수직구리바를 사용 [3]하는 대신 그림 1과 같이 구리상판만을 사용하여 냉각하였다. GM 냉동기는 무산소동으로 만들어진 씨멀링크를 통해 냉각용 구리상판에 연결되어져 있다. 이 구리상판은 질소조 상부 중앙에 위치하며 질소조와 용접으로 연결되어져 있다. 따라서 액체질소는 냉각용 구리상판에 의한 냉각뿐만이 아니라 질소조에 의해서도 보조 냉각이 이루어지도록 설계되었다. 두 번째, 전류도입선의 구조이다. 본 시스템의 전류도입선은 전기적으로 절연시켜 질소조 내부에 위치시켰다. 전류도입선이 진공조측에 노출되지 않고 질소조측 내에 위치시킴으로써 얻을 수 있는 장점은 구조가 간단하고 저렴하며, 비용축 기체와 기체질소에 의한 보조냉각이 이루어진다는 것이다. 다음의 그림 2에 이러한 neck type 전류도입선의 개념도를 나타내었다. 세 번째로 stand-off 구조를 통해 시스템의 높이를 줄여 시스템의 부피를 최소화하였다. 또한, 전류도입선부과 신호 측정부는 서로 기체 통로판을 통해 압력을 같게 하여 액체질소의 높이를 조절하였다.

3. 실험

3.1. 냉동기 용량실험

냉각시스템의 열부하와 냉각용량을 정확히 알기 위해서 냉동기의 용량실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 Leybold 120 T 냉동기의 정격용량은 80 K에서 120 W이지만 실제로 냉각 초기에 냉동기의 온도는 80 K이 아니라 과냉질소의 온도인 64 K보다 다소 낮은 온도가 될 것이기 때문에 정확한 온도에서의 냉각용량이 필요하다. 냉동기의 온도는 콜드헤드측의 극저온 히터를 이용하여 조절하였으며, 그림 3에 냉동기 용량실험을 위한 구조도를 나타내었고, 표 1에는 냉동기 용량실험에 사용된 재원의 사양을 나타내었다. 또한, 냉동기 콜드헤드측의 온도는 측정 오차를 최대한 줄이기 위해서 그림 3에서와 같이 콜드헤드측 세 곳에 실리콘 다이오드 온도센서를 위치시켜 측정하였다.

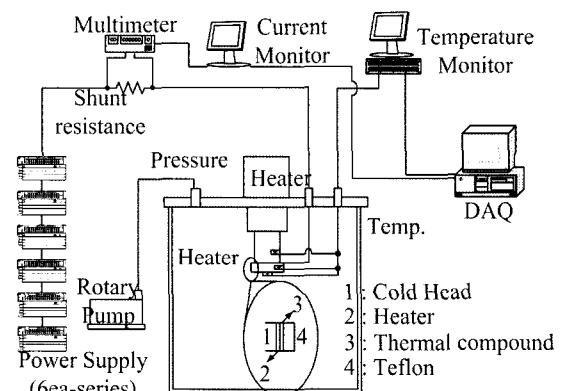


그림 3. 냉동기 용량실험 개념도.

표 1. 냉동기 용량실험에 사용된 재원의 사양

히터	NiCr (103 Ω)		
온도센서	실리콘 다이오드 × 3 ea		
진공도	3×10^{-3} Torr 이하		
직류 전원 공급장치	HP 6253A × 4ea	~20V, ~4A	
	HP 6286A × 1ea	~20V, ~10A	
	ED Lab. 200E × 1ea	~20V, ~1.2A	

또한 진공조 안의 진공도는 3×10^{-3} Torr 이하로 유지하였다. 온도조절용 히터는 극저온에서도 저항값이 거의 변하지 않는 NiCr 히터를 사용하였으며, 전류 인가를 위해서 20 V급 전원 공급장치를 5개 직렬연결하여 사용하였다.

3.2. 냉각실험

그림 4에 3차년도 냉각시스템의 냉각특성 실험전경을 나타내었다. 시간에 따른 냉각시스템의 온도변화는 냉동기의 콜드헤드, 냉각용 구리상판, 마그넷 상부, 그

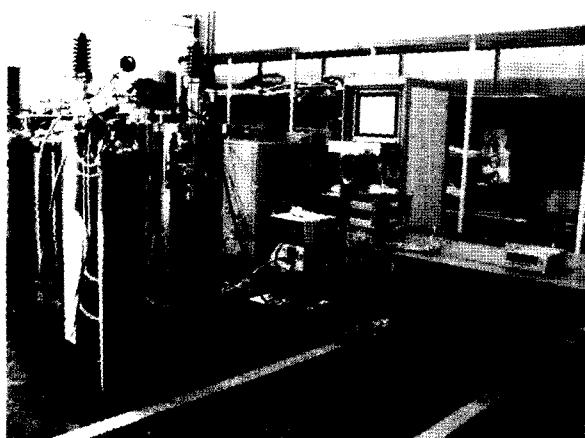


그림 4. 3차년도 냉각시스템의 냉각특성 실험전경.

리고 마그넷의 하부에서 각각 실리콘 다이오드와 cernox 센서를 이용하여 측정하였다. 또한 온도센서를 이용한 레벨미터를 제작하여 액체질소의 수위를 측정하였으며, 시스템의 내부압력 또한 압력센서를 이용하여 장시간 측정하였다. 본 논문에서는 냉동기 용량 실험 결과와 냉각실험 결과를 이용해 냉각시스템의 열부하와 냉각용량을 계산한 결과에 대해 주로 기술하였다. 시스템의 온도와 액체질소의 수위, 그리고 압력 등에 관해서는 실험 결과를 정리하여 추후에 발표할 것이다.

4. 실험 결과

4.1. 냉동기 용량실험 결과

GM-냉동기의 냉각특성 결과는 다음의 그림 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 무부하상태에서 GM-냉동기는 약 1 시간 정도 후에 15 K까지 냉각되었다. 또한 콜드헤드의 상부(Top), 중부(Middle), 하부(Bottom)에서 측정한 온도 모두 동일한 결과값을 가짐을 알 수 있었다.

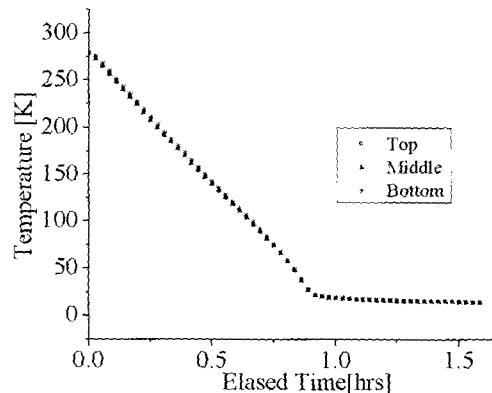


그림 5. 무부하시 냉동기의 냉각특성 그래프.

15 K까지 냉각시킨 후에 콜드헤드에 권선한 극저온 히터에 전류를 인가한 후에 그에 따른 콜드헤드의 온도변화를 측정하였다. 콜드헤드에 인가해 준 전류의 범위는 0~1.16 A로 이를 전기량으로 환산하면 0~139 W이다. 냉동기 용량실험의 결과는 다음의 그림 6에 나타내었다. 공칭 정격용량은 80 K에서 120 W였지만, 실험을 통해서 얻은 결과는 64 K에서 134 W로 실험에 사용된 냉동기의 실제 용량은 정격용량과 약간의 차이가 있다는 것을 알 수 있었다. 이는 냉각 시스템을 제작하는데 중요한 설계 요소가 된다. 그림 6의 결과에 따르면, 64 K에서의 냉각용량은 약 133 W이며 50 K에서의 용량은 약 103 W가 되는 것을 알 수 있었다.

4.2. 냉각실험 결과

파냉질소 냉각시스템을 77 K에서 64 K까지 냉각시켜주는 초기 냉각방식으로는, 첫째 진공펌프에 의한 강제감압방식이 있으며, 둘째 GM-냉동기만을 사용한 냉각방식이 있다. 진공펌프를 사용한 강제감압방식은 질소조 내부에 존재하는 수증기 등의 불순물들을 제거하고 초기 냉각시간을 단축시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 그리고 냉동기만을 이용한 냉각방식은 초기 냉각시간이 강제감압방식에 비해 다소 오래 걸리지만 시스템의 열부하 계산을 위해서 필요하다. 본 예비실험에서는 두 가지 냉각방식 모두를 이용하여 실험하였다. 진공펌프를 사용하여 강제감압한 경우에는 포화 액체질소 온도부터 63 K까지 냉각시키는데 약 6 시간이 소요되었으며, 냉동기만을 사용하여 냉각한 경우에는 31.4 시간이 소요되었다. 그림 7에 냉동기만을 사용하여

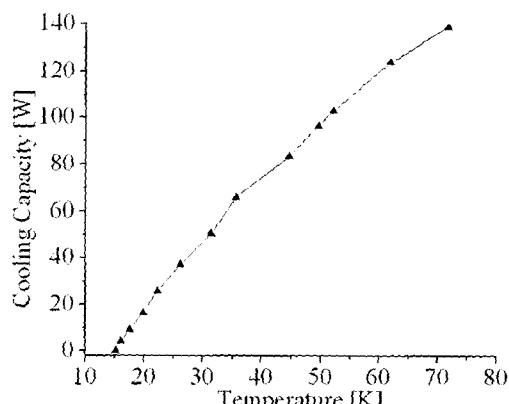


그림 6. 온도별 냉동기의 용량특성 그래프.

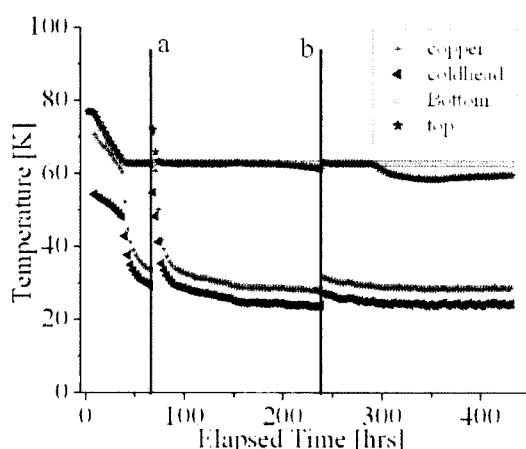


그림 7. 3차년도 냉각시스템의 냉각특성.

63 K까지 냉각시킨 실험결과를 나타내었다. 그림에서 Bottom과 Top은 모두 온도센서를 보빈에 부착시켜 얻은 결과로써 그 위치에서 액체질소의 온도를 나타낸다. 그림 7에서 a와 b는 각각 액체질소를 보충한 시점을 나타낸다. a와 b에서 콜드헤드와 구리상판의 온도가 일시 상승하는 것은 액체질소 주입시에는 순간적으로 외부 공기가 침입하기 때문이며, 질소 주입이 끝나고 페스템이 되면 시스템의 모든 온도가 다시 안정화된다. 실험시작 후 약 140 시간 후에 비응축 기체를 주입하여 1기압의 과냉질소 상태를 만들었다. 그림 7에서와 같이 액체질소의 온도는 400 시간 이상 63 K이 안정적으로 유지됨을 알 수 있었다. 과냉질소 냉각시스템의 열부하는 위의 냉각실험 결과와 다음의 식 (1)을 통해 계산할 수 있다.

$$Q = C_p \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T [J]$$

(1)

여기에서 C_p 는 액체질소의 비열로써 2.000 [$J/kg \cdot K$], ρ 는 액체질소의 비중으로서 860 [kg/m^3], V 는 액체질소의 체적으로 0.3 [m^3], 그리고 ΔT 는 액체질소의 온도변화로써 14 K이다. 이 결과를 이용해서 냉동기가 냉각시스템을 냉각시키는데 사용한 cooling power를 계산하면 63.9 W가 된다. 또한 그림 7에서 액체질소의 온도가 77 K에서 63 K으로 냉각될 때의 콜드헤드 평균온도는 약 50 K이므로, 50 K일 때의 냉각용량은 그림 6에서 105 W로 구할 수가 있다. 따라서 냉각시스템의 열부하는 냉동기의 냉각용량에서 실제 사용된 cooling power를 뺀 값으로 약 41.1 W가 된다. 이 값은 2차년도에 설계, 제작된 냉각시스템의 열부하값인 82.7 W에 비해 41 W 정도가 감소되었음을 알 수 있었다 [3], [4].

5. 결 론

일반적으로 과냉질소 내에서 Bi-2223 선재의 특성은 포화 액체질소 내에서의 특성에 비해 임계전류는 약 1.5 배 이상 증가하고 전기적 절연특성도 우수해지며, 열전달 특성도 약 12 % 정도 우수해진다. 따라서 이러한 과냉질소 냉각시스템은 많은 고온초전도 응용

기기에 널리 사용될 수 있을 것으로 보인다. 과냉질소 냉각시스템을 제작하기 위해서는 시스템의 온도와 압력을 장시간 동안 안정적이고 신뢰적으로 유지하여야 한다. 2002년에서 2003년까지 수행된 2차년도 연구에서는 단시간 시험용 과냉질소 냉각시스템을 제작하고 실험에 성공한 바 있다. 이에 3차년도에 개발한 과냉질소 냉각시스템은 열부하의 양이 크게 줄어 장시간 운전에 적합할 뿐만 아니라, 실제 초전도응용기기에 사용될 수 있을 정도의 온도와 압력면에 있어서 신뢰성을 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다. 3차년도 냉각시스템에서는 질소조 외곽에 진공층을 두어 외부로부터의 복사열을 최소화함과 동시에 stand-off 구조를 적용하여 시스템의 부피를 최소화하는데 성공하였다. 또한 냉동기만을 이용하여 77 K에서 63 K 과냉질소 상태의 온도로 냉각시키기 위해서 31 시간 정도가 소요되었으며, 액체질소의 온도는 약 400 시간 이상 안정화되었다. 또한, 비응축 기체를 주입함으로써 시스템의 압력을 1기압으로 조절하였으며, 이 압력값 역시 장시간 일정하게 유지되는 것을 확인하였다. 실험 시작 후 약 300 시간 후에 마그넷 상부쪽 액체질소의 온도가 58 K까지 내려갔으나, 마그넷 상부가 결빙될 경우, 냉동기의 온도가 마그넷 하부까지 원활히 전달되지 않아 온도가 상승한 하부의 액체질소가 다시 마그넷 상부로 올라가게 되고, 이로 인해 마그넷 상부의 온도가 다시 상승하게 되는 이른바 '자체 온도조절 능력'인 대류작용에 의해 액체질소의 온도는 58 K 이하로 냉각되지 않는다는 것을 알 수 있었다. 현재 본 실험은 계속 진행 중에 있으며, 추후에는 시간 경과에 따른 액체질소의 변화량과 시스템의 압력 변화와 압력 유지방법, 그리고 통전시 시스템의 온도변화와 입력변화 등에 대해서 분석, 발표할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 현

- [1] Hyoungku Kang, Min Cheol Ahn, Tae Kuk Ko, et al, "Design, Fabrication and Testing of Superconducting DC Reactor for 1.2kV/80A Inductive Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Applied Supercond. vol. 13, No. 2, pp.2008-2011, June 2003
- [2] Hyoungku Kang, Seungje Lee, Tae Kuk Ko, et al, "Design, fabrication techniques and test results of 1.2kV/80A inductive fault current limiter by using conduction-cooled system", Cryogenics, vol. 43, pp.621-628, 2003
- [3] Hyoungku Kang, Duck Kweon Bae, Hyung Jin Kim, Tae Kuk Ko, et al, "Cooling Characteristics of sub-cooled Nitrogen Cryogenic System for 6.6 kV/200A Inductive Fault Current Limiter", Journal of the Korea Institute of Applied Supercond. and Cryogenics, vol. 5, No. 3, pp.57-61, 2003
- [4] Hyoungku Kang, Seungje Lee, Duck Kweon Bae,

- Tae Kuk Ko, et al, "Experimental study on sub-cooled nitrogen cooling system for 6.6kV/200A inductive superconducting fault current limiter", 18th International Conference on Magnetic Technology, 2D-p49, October, 2003
- [5] Takashi Yazawa, Eriko Yoneda, Yoshihisa, et al, "Design and Test Results of 6.6kV High-Tc Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Applied Supercond. vol. 11, pp. 2511-2514, March 2001
- [6] Takashi Yazawa, et al., "66kV-class Superconducting Fault Current Limiter Magnet-Subcooled Nitrogen Cryostat", International Cryogenic Engineering 19, pp. 261-264
- [7] Chang HM, et al, "Optimization of operating temperature in cryocooled HTS magnets for compactness and efficiency", Cryogenics vol. 42, pp.787-794, December, 2002

저 자 소 개



강형구(姜亨求)

1973년 8월 4일생, 1997년 성균관대
공대 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원
전기전자컴퓨터공학과 졸업(공학석사),
현재 동 대학원 전기전자공학과
박사과정



김형진(金炯楨)

1974년 10월 4일생, 1999년 홍익대학교
기계공학과 졸업, 2001년 동 대학원
기계공학과 졸업(공학석사), (주) 덕성
초전도 사업부 연구원(2001-2002), 현재
홍익대학교 과학기술 연구소 연구원



배덕권(裴德權)

1971년 8월 16일생, 1998년 광운대
공대 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학
원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 연
세대학교 전기전자공학과 박사과정



안민철(安敏哲)

1976년 9월 20일생, 1999년 연세대
공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학
원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학석사),
현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과
정



윤용수(尹庸鉢)

1961년 8월 27일생, 1983년 성균관대학교
전기공학과 졸업, 1995년 연세대학교
대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2001
년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학
박사), 현재 안산공과대학 전기과 조교수



장호영(張鎬明)

1960년 9월 21일생, 1983년 서울대학교
기계공학과 졸업, 1984년 University of
Michigan M.S.E 졸업(공학석사), 1988
년 M.I.T. 졸업(공학박사), 현재 홍익대학교
기계시스템 디자인공학과 교수 및
F.S.U. NHMFL 객원교수



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전
기공학과 졸업, 1983년 Case
Western Reserve Univ. Dept. of
EEAP 석사 졸업(M.Sc.), 1986년
Case Western Reserve Univ.
Dept. of EEAP 박사 졸업(Ph. D.),
현재 연세대학교 전기전자공학과 교수