

## 6.6kV/200A급 유도형 한류기용 과냉질소 냉각시스템의 특성

박동근, 강형구, 윤경용, 주민석, 김태중\*, 고태국  
연세대학교 전기전자공학과, \*성남기능대학

### Characteristic of sub-cooled nitrogen cryogenic system for 6.6kV/200A Inductive Superconducting Fault Current Limiter

Dong Keun Park, Hyoungku Kang, Kyoung Yong Yoon, Minseok Joo,  
Tae Jung Kim\* and Tae Kuk Ko  
Dept. of Electrical and Electronic Engineering Yonsei University,  
\*Seongnam Polytechnic College

dogma@yonsei.ac.kr

**Abstract** - The cryogenic system for inductive superconducting fault current limiter (SFCL) has been investigated recently. In this investigation, the sub-cooled nitrogen cryogenic system was adopted to enhance the performance of DC reactor for 6.6kV/200A inductive SFCL.

In sub-cooled nitrogen state at 64K, the critical current value and the thermal conductivity are larger than those of saturated nitrogen state at 77K and the electrical insulation capacitance should be remarkably enhanced. The solenoid type of 84mH superconducting DC reactor was fabricated and cooled down to 64K by using sub-cooled cooling method with GM-cryocooler and rotary pump.

The fabrication techniques of cryogenic system and some experimental results such as cooling down characteristic are introduced in this study. Moreover, the sub-cooled nitrogen cryogenic system was detailedly introduced in this paper.

## 1. 서 론

현재 연세대학교에서는 과학기술부에서 주관하는 21세기 프론티어 사업의 일환으로 6.6kV/200A급 유도형 고온 초전도 한류기의 개발 연구를 수행중이다. 이미 1차년도(2002~2003)에 3.3kV/80A급 유도형 고온초전도한류기를 개발하고, 단락실험을 하였다[1]. 1차년도에서는 GM 냉동기를 이용한 전도냉각 방식을 이용하여 정상상태에서 DC 리액터를 20K 까지 냉각시키는데 성공하였다. 정상상태에서의 20K

일 때의 임계전류 특성은 상당히 향상됨을 알 수 있었지만, DC리액터 내에 전류가 흐를 때 DC리액터의 온도가 급격히 상승하게 되고 그에 따라 임계전류값도 떨어지게 된다. 결과적으로 이러한 원인으로 인해 DC리액터는 열적으로 불안정하게 된다. 즉 전도냉각 방식은 한류기 시스템의 임계전류 특성을 향상시키는 장점을 가진 반면, 열적 안정성이 떨어지는 단점을 갖는다. 그러므로 초전도한류기와 같이 사고전류가 급격하게 증가하는 경우에는 냉매를 이용한 냉각방식이 전도냉각 방식보다 더 적합한 것으로 판단되어졌다. 본 연구에서는 6.6kV/200A급 초전도 한류기의 열적 안정성을 향상시키기 위해 과냉질소를 이용한 냉각방식을 채택하였다. 본 실험은 64K, 101kPa의 과냉질소 조건하에서 성공적으로 수행되었으며, 상세한 제작기술과 실험결과 및 토론을 기술하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 DC 리액터 및 더미보빈 제작

본 실험에서는 미국의 AMSC사에서 제작한 강화초전도선재(reinforced wire)를 이용하여 DC 리액터를 제작하였다. 초전도 DC 리액터는 5개의 보빈이 직렬연결되어 있는 구조이다. 또한 각각의 보빈은 4개의 선재로 적층되어 감겨있다. DC 리액터용 보빈은 극저온에서 강한 기계적 특성을 보이는 GFRP로 만들어졌으며, 5개의 직렬 연결된 보빈의 총 인덕턴스는 약 84mH이고 총 사용된 선재의 길이는 3.6km이다. DC 리액터의 자세한 사양은 Table 1에 명시하였다. 또한 냉각 시스템에 사용되는 과냉질소의 양을 줄이기 위해 GFRP로 만든 더미보빈(dummy bobbin)을 제작하였다. 하지만 과냉질소의 양은 곧 냉각기의 부하가 되므로 적절한 양의 과냉질소로 최적화하는 것이 중요하다. 따라서 GFRP 더미보빈으로 냉각 시스템의 과냉질소 양을 최적화시킬 수 있었다.

Table 1. Specification of DC reactor

I.D.(mm)	600
O.D.(mm)	784
Total wire length(km)	3.6
Inductance(mH)	84

## 2.2. 과냉질소 냉각시스템의 설계 및 제작

과냉 질소 상태에서의 열전도도와 전기적 절연 특성 및 초전도 선재의 임계전류 특성은 포화상태의 액체질소 특성보다 향상된다. 따라서 64K, 101kPa 상태의 과냉질소가 되도록 냉각 조건을 제어하였다. GM 냉동기는 thermal anchor를 거쳐 구리 상판과 수직 전도용 냉각 구리바를 이용하여 액체질소를 64K까지 냉각시키게 된다. GM 냉동기의 용량은 80K에서 120W이며 이 냉각기의 냉각시스템은 Fig. 1과 같이 thermal anchor와 구리상판, 수직 전도용 냉각 구리바를 통한 자연 대류의 원리를 기초로 설계되었다. 전류 도입선은 구리보다 열적 안정성에서 더 효율적인 황동으로 만들었다. 전류도입선의 길이는 31cm이고 지름은 0.12cm 이다. Fig. 2에는 냉각시스템의 제작 과정을 보여주고 있다.

## 2.3 실험 결과

과냉질소 냉각시스템의 실험 조건은 64K, 101kPa이다. 먼저 GM 냉각기를 이용하여 냉각을 하고 로타리 펌프를 이용하여 냉각시스템을 감압한다. 로타리 펌프로 감압하여 냉각하는 방

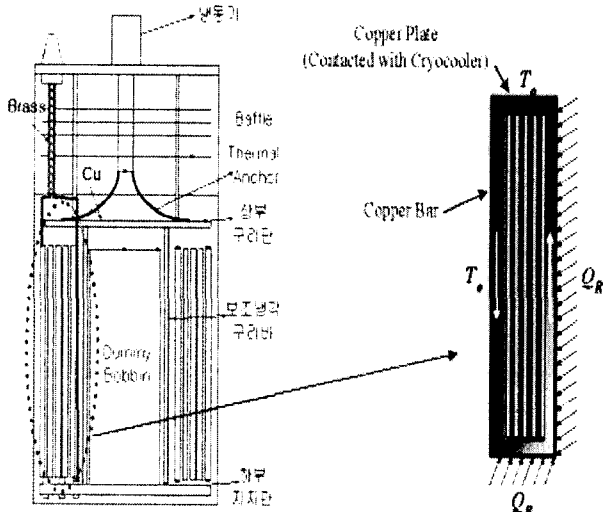


Fig. 1. Base upon natural convection

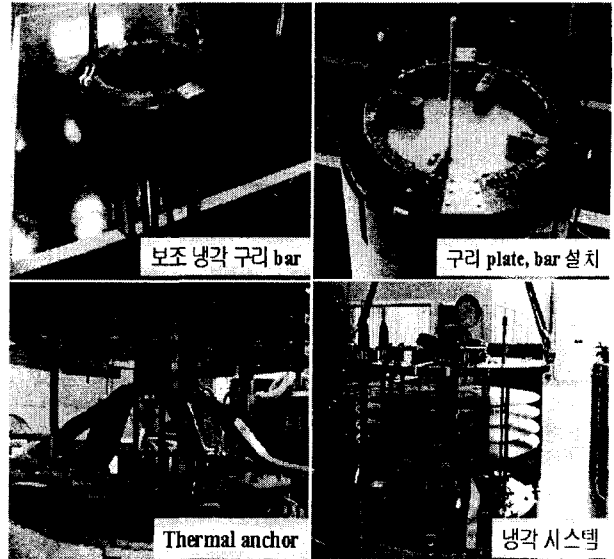


Fig. 2. Fabrication of cryogenic system

법의 경우, 냉동기만으로 전도 냉각하는 방법보다 액체질소의 온도를 보다 빠른 시간에 떨어뜨릴 수 있다. 이렇게 감압된 시스템의 압력을 101kPa까지 올리기 위해 기체 헬륨을 냉동기에 주입한다. 여기에서 기체헬륨을 시스템에 주입하는 이유는 기체 헬륨이 다른 기체, 즉 질소와 반응을 잘 하지 않고, 액화점이 낮으므로 냉각기 헤더에 의해 액화되지 않기 때문에 기체 헬륨으로 압력을 가한다.

8개의 극저온용 온도센서를 냉동기 콜드헤더와 방열판, DC리액터, 그리고 전도 냉각 바에 부착하여 냉각 시간에 따른 온도를 측정하였다. 각 온도센서의 위치는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 4에서는 구간별 DC 리액터의 냉각특성을 보였다. DC 리액터의 모든 부분에서 온도는 서로 유사하다. 다만 냉각기의 냉각기 헤더 부분은 DC리액터 부분에서 떨어진 부분이라 특성곡선이 다르게 나타난다. 1구간에의 액체질소 온도는 20시간 동안 선형적으로 서서히 감소하다가 감압되는 2구간에서는 5시간 만에 급격히 감소하였다. 결과적으로 액체질소가 64K에 도달하기까지 25시간의 냉각시간이 소요되었고, 그 후 3구간에서 로타리 펌프를 끄고 15시간 동안 GM 냉동기만으로 냉각을 하였다. 그 결과 질소는 63K에서 열었고, 부피가 감소하였다. 4구간에서 얼어버린 질소를 녹이기 위해 냉각기를 끄고, 10시간이 지나 64K의 액체질소를 만든 후에, 마지막으로 기체 헬륨을 주입하여 시스템의 압력을 1기압까지 증가시켰다. 기체 헬륨이 냉각시스템의 압력을 기압으로 만드는데 약 30분이 소요되었다. 감압 방식을 도입하여 냉각시스템의 온도를 약 10.8시간에 64K까지 냉각할 수 있었다. 이 실험 결과는 설계했던 파라미터로 계산했던 값과 상당히 유사하다. 설계와 실험에서의 미소한 차이는 액체 질소의 양을 정확히 측정할 수 없었던 점과, 전류도입선에서의 전도열 손실에서 발생하였다.

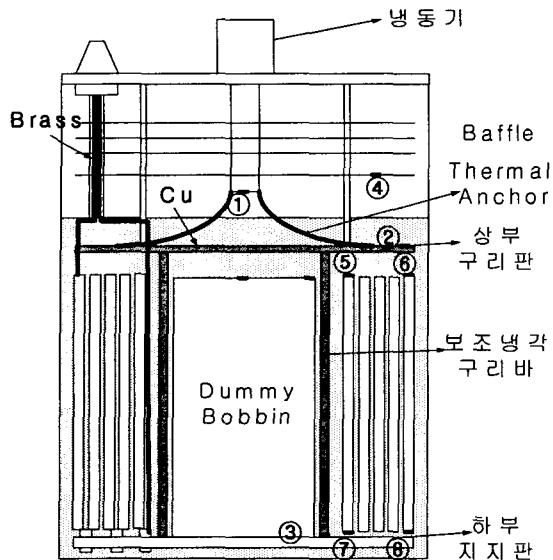


Fig. 3. Location of temperature sensors

과냉 질소 상태에서는 액체질소의 기포 발생이 상당히 억제되었고, 열전도도가 향상됨으로써 열적 안정도가 향상되었으며 DC 리액터의 임계전류도 상당히 향상됨을 알 수 있었다.

### 3. 결 론

6.6kV/200A급 유도형 고온초전도한류기(SFCL)에서의 과냉질소 냉각 시스템을 설계하고 제작하였다. 이번 연구는 사고시 단락실험을 위해 개발한 냉각시스템이다. 22.9kV 또는 154kV급의 초전도한류기와 같이 대규모 장치에서는 보다 신뢰성있고 안정한 냉각시스템의 제작에 관한 연구가 더 필요하다.

이번 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 6.6kV/200A급 유도형 고온초전도한류기의 단락실험을 위한 냉각시스템의 개발을 성공적으로 수행하였다.
2. 향상된 냉각특성을 위해 자연대류 개념이 도입되었다.
3. 사고시 과냉질소 냉각시스템이 전도냉각시스템[2]보다 열적으로 안정함을 알 수 있었다.
4. 로타리 펌프를 이용한 감압 냉각으로 냉각 시간을 줄일 수 있었다. 이 방법은, 냉각되는 질소의 온도가 포화곡선을 따라 내려간다. 따라서 추가적인 가압과정이 필요함을 알 수 있었다.
5. 감압 냉각방식으로 효율적인 과냉질소 냉각을 할 수 있었다. 기체헬륨으로 냉각시스템을 가압하였다. 냉각시스템에 가해진 압력은 약 101kPa 이고 전기적절연과 기계적인 안정성이 면밀히 검토되어야 할 것으로 판단된다.

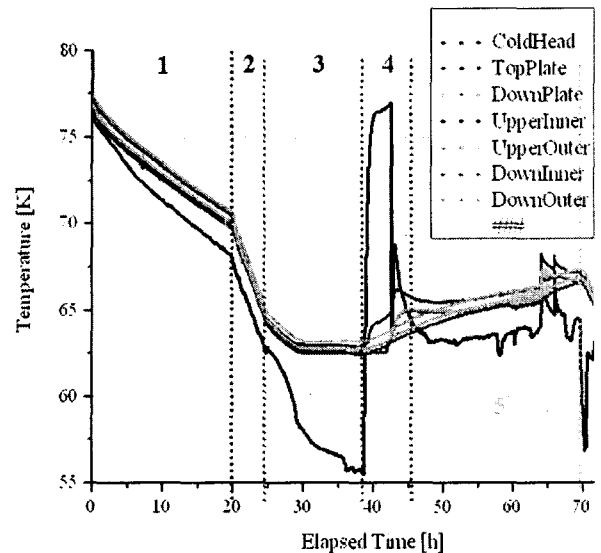


Fig. 4. Cooling characteristic of sub-cooled nitrogen system

이번에 제작된 냉각시스템은 한류기의 단락시험을 위해 개발된 것이다. 따라서 상용화되기 위해서는 온도제어와 압력제어 분야에서 조금 더 자세한 연구가 필요할 것이다. 하지만 유도형 고온초전도 한류기에서의 과냉질소를 이용한 냉각시스템의 유용함은 이번 연구를 통하여 확인할 수 있다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### (참 고 문 헌)

- {1} Hyoungku Kang, Min Cheol Ahn, Duck Kweon Bae, Tae Kuk Ko June 2003 IEEE trans. on Applied Superconductivity, vol. 13, 2008-2011, "Design, fabrication and testing of superconducting dc reactor for 1.2kV/80A inductive fault current limiter
- {2} Hyoungku Kang, Duck Kweon Bae, Min Cheol Ahn, Tae Kuk Ko: 2003 Cryogenics, "Design, fabrication techniques and test results of 1.2kV/80A inductive fault current limiter by using conduction-cooled system"