

## 고체질소 냉각 고온초전도 동기기용 회전자의 온도특성

조영식, 홍정표, 이주\*, 심기덕\*\*, 손명환\*\*, 권영길\*\*, 류강식\*\*  
창원대학교, \*한양대학교, \*\*한국전기연구소

### Temperature Characteristic of Rotor of HTS Synchronous Machine cooled by Solid Nitrogen

Young-Sik Jo, Jung-Pyo Hong, Ju Lee\*, Ki-Deck Sim\*\*,  
Myoung-hwan Sohn\*\*, Young-Kil Kwon\*\*, Kang-Sik Ryu\*\*  
Chang-won National University, \*Han-yang University, \*\*KERI

gkstkso@netian.com

**Abstract** - This paper deals with cryogen, which is used solid nitrogen to keep the operating temperature of High Temperature Superconducting (HTS) synchronous machine. To make the solid nitrogen of liquid nitrogen, liquid helium (LHe) passes into and cools the heat exchanger to its own temperature. Two types of heat exchangers are designed and manufactured to make the solid nitrogen, and temperature characteristics of those compare with each other. The rotor cooled by latent heat of solid nitrogen and it is kept under 40K during 2 hours and 30 minutes without LHe.

#### 1. 서 론

고온초전도체가 발견된 이후에 미국을 위시한 많은 나라에서 고온초전도 응용에 대한 연구가 국가적인 사업으로 가속화되고 있다 [1]-[3]. 고온초전도 응용이 성공하기 위해서는 많은 분야의 연구가 뒷받침 되어야하는 복합기술 분야인데, 그 중에서도 시스템의 운전온도를 만드는 냉각기술은 매우 중요하다. 최근에는 고온초전도체를 저렴하고 안정적으로 냉각시킬 수 있는 방법의 일환으로 냉동기를 부착한 고온초전도 마그네트의 개발이 가속화되고 있다. 하지만 고온초전도 회전기기의 냉각제는 회전 중인 시스템에 냉매를 공급해야 하므로 냉동기를 부착하기에는 어려움이 많아서 아직까지는 액체 헬륨을 많이 사용한다. 액체헬륨은 고온초전도체가 높은 성능을 발휘할 수 있게 하지만 단가가 매우 높다. 따라서 획기적인 냉각방법이 개발된다면 고온초전도 회전기기 분야의 산업화는 더욱 가속될 것이다.

저온초전도 마그네트는 허용되는 동작온도범위가 1K 정도에 불과하지만 고온초전도 마그네

트는 특별한 운전조건을 제외하고는 도체의 임계 온도보다 낮은 특정 온도범위에서 운전이 가능하다. 따라서 고온초전도 마그네트에 엔탈피가 큰 고체 질소를 사용하여 10K~15K 정도까지 냉각시킨 후에는 다른 냉매의 공급이 없이도 한계 운전온도까지 수~수십 시간 유지 가능하다면 좋은 냉각 방법이 될 수 있을 것이다.

본 논문에서는 고온초전도 동기기용 회전자의 냉각제로서 액체질소를 액체 헬륨을 이용하여 응고시켜서 냉각제로 사용하는 것에 대해 연구하였다. 먼저, 액체질소를 응고시키기 위해서 나선형과 디스크형의 열 교환기를 설계, 제작하고, 두 종류의 열 교환기 성능을 평가하여 성능이 뛰어난 나선형 열교환기를 채택하였다.

회전자의 허용 운전온도는 고온초전도 회전기기의 계자코일로 사용될 고온초전도 마그네트의 성능을 평가하여 35~40K의 온도로 판단하였다. 4개의 마그네트를 가지는 회전자에서 액체 헬륨으로 응고된 질소 냉각제는 액체헬륨의 공급이 없이 코일을 15K에서 40K까지 유지하는 시간이 약 2시간 30분이었다.

#### 2. 회전자의 구조

그림 1은 설계된 HTS 동기기용 회전자의 단면을 보여준다. 액체질소 공급관은 3중관을 사용하여 최내층으로 액체질소를 공급하고 중간층은 충전 시나 증발에 의해서 나오는 질소가스 배출구이며 최외층은 상온과 저온부를 열적으로 단열시키기 위한 진공층으로 구성하였다. 댐퍼는 구리를 사용하여 진공조 속에 하나를 설치하여 super-insulation을 하였는데 이것은 외부로부터 침투하는 복사열을 차단할 뿐만 아니라 외부에서 침투하는 시변자속의 침투를 막는 역할을 한다. 댐퍼이외의 회전자 부품은 비자성체인 SUS를 사용하였으며 온도특성을 파악하기 위하여 CGR센서를 각 부품에 설치하였다.

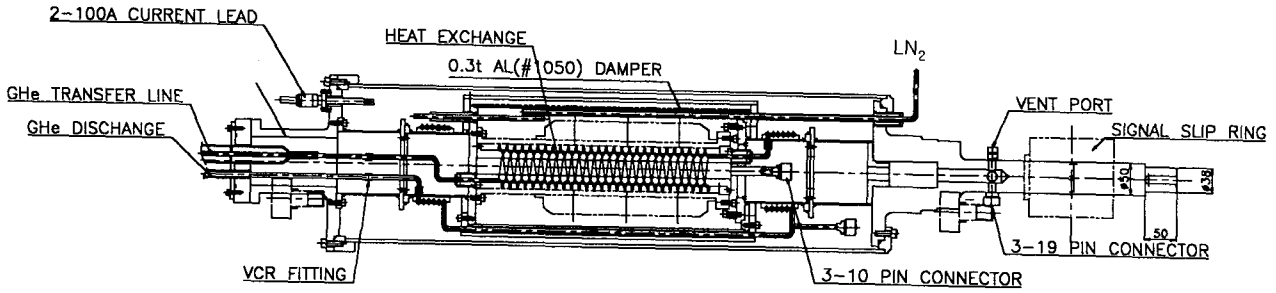


Fig. 1. Rotor of HTS synchronous machine

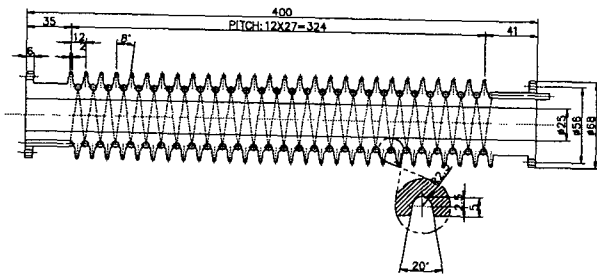


Fig. 2. Helical type heat exchanger

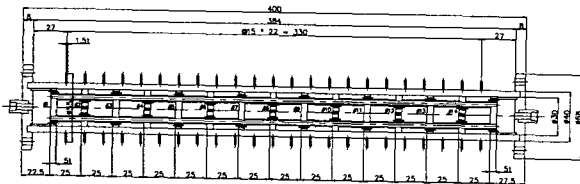


Fig. 3. Disk type heat exchanger

### 3. 열 교환기

액체질소를 응고시키기 위해서 나선형과 디스크형의 열 교환기를 설계, 제작하였다. 재질은 열전도도가 좋은 동(C1100)을 사용하였고, 나선형 열 교환기는 높은 열 전도율을 얻기 위해서 보빈의 주위로 핀을 부착하여 열 교환되는 단면을 최대로 하였다. 그림 2는 나선형 열 교환기의 설계 단면을 보여준다. 왜경 68 mm, 내경 25 mm, 전체길이는 400 mm, 그리고 나선형의 5 mm 동튜브는 열 교환기 보빈에 27회 회전하게 하여 보빈과 핀을 통해서 효과적으로 액체질소를 응고시키게 된다.

그림 3은 디스크형 열 교환기의 설계단면으로 내부의 디스크 형태는 헬륨의 흐름에 와류를 일으키기 위하여 홀을 내부와 외부 교대로 만들었으며, 전체길이나 왜경은 나선형과 같다.

그림 4는 나선형 열 교환기를 사용하여 액체질소를 응고시켰을 때의 온도특성을 보여준다. 이 실험에서는 내부를 볼 수 있는 관측형 극저온 진공용기를 사용하였으며, 제작한 고온초전도 마그네트 하나를 설치하여 임계전류 측정실험을 함

께 수행하였다.

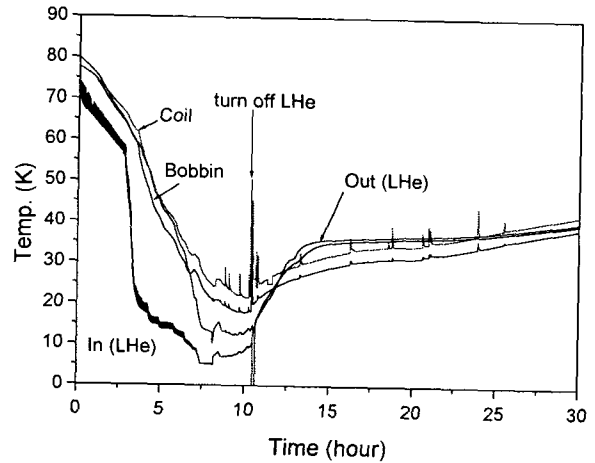


Fig. 4. Temperature Characteristic of helical type heat exchanger

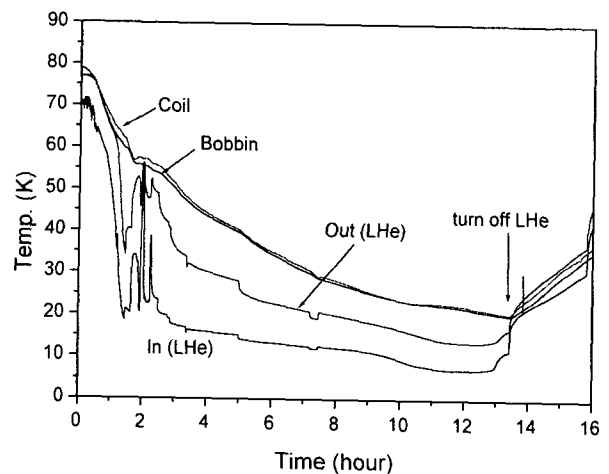


Fig. 5. Temperature Characteristic of disk type heat exchanger

그림 4에서는 계자의 임계전류 시험 때문에 코일의 온도가 코일에서의 온도가 급격히 상승했다가 하강하는 양상을 가진다. 액체헬륨으로 냉각을 시작한지 7시간 이상이 소요된 뒤에 코일과 보빈의 온도가 25K에 도달하였으며, 헬륨공급을 중단하고 약 16시간 이후에 40K이 되었다. 코일의 온도가 25K이 된 이후부터 40K이 되기

전까지 약 16회의 임계전류 실험을 하였으며, 냉각에 사용된 액체헬륨은 약 184리터로 시간당 약 17.81리터를 공급하였다.

그림 5는 디스크형 열 교환기를 사용한 액체 질소를 응고실험의 결과이다. 액체헬륨으로 냉각을 시작한지 7시간 이상이 소요된 뒤에 코일과 보빈의 온도가 30K에 도달하였으며, 헬륨공급을 중단하고 2시간 20분 뒤에 35K이 되었다. 냉각에 사용된 액체헬륨은 약 232리터로 시간당 약 17.85리터를 공급하였다.

두 종류의 열 교환기에서 평균적인 액체헬륨 소모량은 거의 같았지만 나선형이 디스크형보다 우수한 열 교환 성능을 나타내므로 열 교환기는 나선형을 선택하였다.

#### 4. 회전자의 온도특성

제작된 회전자는 4개의 HTS 마그네트를 가지고 있으며 앞서의 실험을 통해 채택된 나선형 열 교환기를 부착하였다. 온도특성 실험을 위하여 진공조의 진공은  $1.2 \times 10^{-6}$  Pa까지 유지했으며 내부의 각 지점에 CGR센서를 부착하였다.

그림 6은 회전자의 온도특성 실험의 결과를 나타낸다. 사용된 액체헬륨은 약 180리터로 시간당 약 10.3리터를 공급하였으며 액체헬륨을 공급한 뒤 약 17시간 30분 뒤의 코일의 온도는 14K이었고, 40K까지 도달하는 시간은 약 2시간 30분이었다.

액체헬륨을 제거한 뒤의 극저온을 유지하는 시간은 나선형 열 교환기를 극저온 진공용기에서 실험했을 때와 매우 큰 차이를 보이는데, 이것은 회전자 내의 응고된 질소의 양이 적고 질소 주입구와 열 교환기를 통한 열 침입이 극저온 진공용기의 구조보다 많음에 기인한 것으로 사료된다. 하지만 극저온 진공용기에서의 실험보다 액체헬륨을 시간당 적은 양을 주입하여 코일에서 14K까지 도달하는 시간은 많이 소요되었으나 더 낮은 온도까지 도달하였다.

#### 6. 결 론

본 논문에서는 고온초전도 동기기용 회전자의 냉각제로서 액체질소를 차가운 기체 헬륨을 이용하여 고화시켜서 냉각제로 사용하는 것에 대해 연구하였다.

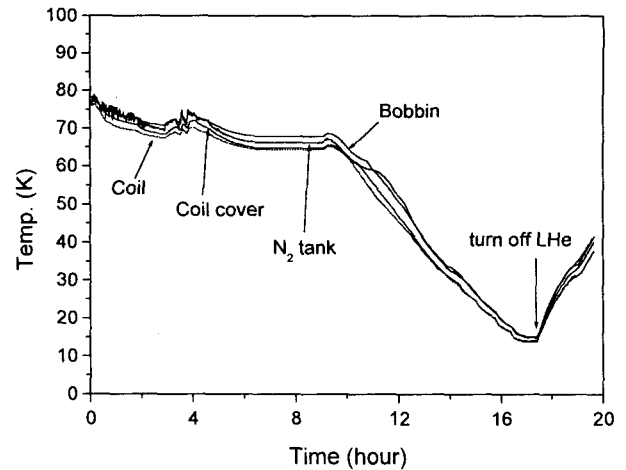


Fig. 6. Temperature Characteristic of rotor of HTS synchronous machine

디스크형에 비해서 열 교환 능력이 우수한 나선형 열 교환기를 고온초전도 동기기용 회전자에 배치하여 온도특성 실험을 수행하였다. 코일의 온도는 극저온 진공용기에서의 실험에 비해서 10K 낮은 온도가 만들어 졌지만 유지시간은 13시간 30분 짧아졌다. 향후, 회전자 내부로 침입하는 열을 최소화하기 위해서 회전자 구조와 액체헬륨의 공급, 회수방법을 개선한 뒤에 다시 실험할 계획이다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] B.B.Gamble, et al., "Prospects for HTS Applications", IEEE Trans. on Magn., Vol. 32 No. 4, pp. 2714-2719, 1996
- [2] K.Sato, et al., "HTS Large Scale Application Using BSCCO Conductor", IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol. 7 No. 2, pp. 345-350, 1997
- [3] D. Bruce Montgomery, "The Future Prospects for Large Scale Application", IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol. 7 No. 2, pp. 345-350, 1997