

GM 냉동기를 이용한 네온액화시스템 제작과 특성

권운식, 손명환, 백승규, 이연용, 권영길, 서정세*, 문태선**, 조창호**
 한국전기연구원, 경상대학교*, 두산중공업기술연구원**

Neon liquefaction system manufacture and characteristic that use GM refrigerator

W.S. Kwon, M.H. Sohn, S.K. Baik, E.Y. Lee, Y.K. Kwon,
 J.S. Seo*, M.T. Sun**, C.H. Cho**

Korea Electrotechnology Research Institute, Gyeongsang National University*,
 Doosan Heavy Industries & Construction Co., LTD**

gamja762@hotmail.net

Abstract - We manufactured neon liquefaction system for cooling system of HTS motor. The neon liquefaction system consists of a GM refrigerator, a liquefaction vessel and a vacuum chamber. It is found that the neon starts to be liquefied in the liquefaction vessel after 35 minutes of cool-down from gas state of 294K. Capacity of neon liquefaction system and the liquefaction rate were about 36W, 0.1g/s.

1. 서 론

초전도 모터 개발의 초기 단계에서는 NBTi와 같은 금속계 저온초전도를 사용하는 저온초전도 모터에 대한 연구가 많았지만 최근에는 BSCCO 선재를 사용하는 고온초전도모터의 연구가 진행되고 있다.

저온초전도체를 사용하는 경우에는 보통 운전 온도가 4.2K이기 때문에 액체헬륨을 냉매로 사용하는 반면 고온초전도체의 경우 그 동작온도를 25~30K 정도로 하여 운전시킬 수 있으므로 액체네온 혹은 기체헬륨을 사용한다. 기체헬륨은 단순히 온도 차이에 의한 열량할 때의 증발잠열을 냉각에 활용할 수 만을 냉각에 활용하지만 액체네온은 기체로 상변화 있으므로 냉각 효율 면에서 액체네온이 기체헬륨보다 유리하다 할 수 있다.

최근의 연구동향을 보면 미국의 AMSC와 독일의 Siemens사의 초전도 모터에서도 GM (Gifford - McMachon) 냉동기를 이용하여 기체네온을 액화하여 고온초전도체를 냉각하는 방법을 사용하고 있다.

액체네온을 사용한 고온초전도모터의 냉각을 위해서는 네온액화장치의 연구가 선행되어야 할 것이다. 네온을 액화하기 위한 소형 액화시스템의 경우 여러 가지 방법이 있겠지만 그 중 기체네온을 GM냉동기에 직접 접촉시켜 냉각하여 액

화시키는 직접냉각방식이 구성이 간단하고 유지보수가 간편할 것으로 사료된다.

따라서, 본 연구에서는 GM냉동기를 이용하여 기체네온을 액화하기 위한 복사, 전도, 대류 열전달을 고려하여 네온 액화시스템을 설계 제작하고, 액화시스템의 액화 실험을 수행하였다.

2. 네온액화시스템 제작 및 실험

2.1 네온액화시스템 제작

가스네온을 냉동기에 직접 접촉시켜 네온의 비등점인 27.1 K 까지 냉각하여 액화시키기 위해서는 냉동기의 성능은 고정되어 있으므로 상온으로부터 유입되는 전도(conduction), 대류(convetion), 복사(radiation) 열손실을 최대한 줄일 수 있는 단열구조여야 한다. 또한 콜드헤드(cold head)가 효과적으로 네온을 액화시킬 수 있도록 설계하여야 한다.

액화시스템은 GM냉동기, 진공챔버, 열교환기, 액화용기와 각종배관들로 구성되어 있고 그 기본구조는 Fig. 1과 같다.

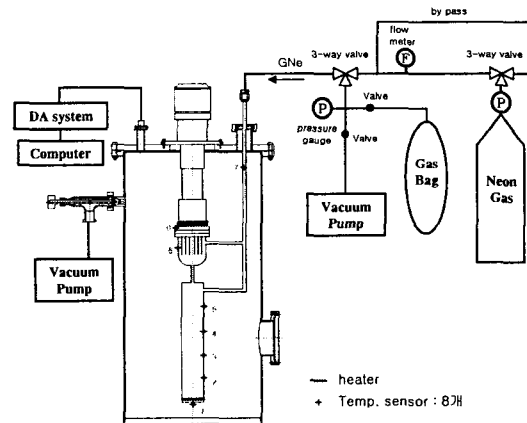


Fig. 1. Schematic diagram of neon liquefaction system

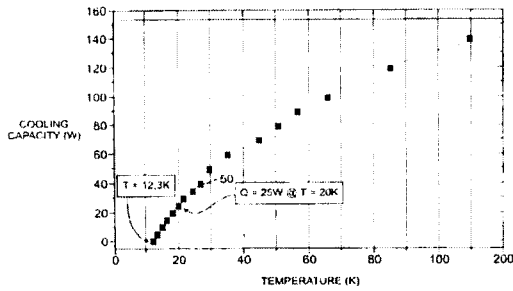


Fig. 2. Cooling capacity of GM refrigerator

고온초전도모터의 작동온도가 25~30K일 경우 예상되는 열부하(heat load)는 20-30W 이므로 40W @25K의 냉동성능을 가진 GM냉동기(Leybold Vakuu GmbH 사, RGS 120T)를 선택하였고, 그 냉동성능은 Fig. 2와 같다.

진공 챔버는 대류에 의한 열침입을 막기 위하여 사용되어 진다. 지름 400mm, 높이 800mm로 설계 되었고, 진공을 뽑기 위한 Evacuation port가 있고, 상부면에 냉동기, 신호선, 각종배관과 결합 할 수 있는 구조로 되어 있다. 진공 밀봉(sealing)을 위해 고무 O-ring을 사용하였다. 향후 모터와 결합하기 위하여 하부에 결합부분을 제작하였다.

콜드헤드의 하단에는 열교환기를 설치하여 기체네온의 접촉면적을 증가시켜 보다 빠르고 효율적인 네온 응축을 수행하도록 설계하였다. 열교환기는 극저온에서 열전도율이 뛰어난 무산소동(OFHC)을 사용하였고 핀과 플레이트를 일체형으로 가공하였다. 또한 콜드헤드와의 결합 시 인듐포일(indium foil)을 이용하여 결합하여 접촉저항을 최대한 줄일 수 있도록 하였다.

액화용기의 전체적은 약 1.5ℓ이고 하부의 체적은 약 1ℓ이다. 하부 용기에 0.2ℓ 간격(60mm 간격)으로 온도 센서(Silicon Diode : Lake Shore DT-470)를 설치하였고, 온도 센서간의 거리를 가능하면 멀게 하기 위하여 하부 용기를 가늘고 길게 제작하였다. 온도 센서의 위치가 가까우면 액체면의 온도센서 온도와 가스면의 온도센서 부분의 온도차가 작을 것으로 사료되기 때문이다. 또한 액화용기의 상, 하부 옆면에 가스 루프관을 설치하여 가스의 흐름이 액체의 흐름을 방해하지 않도록 설계하였다. 액화용기와 열교환기와 결합은 가스 유출 없도록 하기 위해 진공밀봉이 되어야 하므로 진공 밀봉시 납접합(soldering)을 하였다.

냉동기 콜드헤드의 온도가 네온의 어는점(24.55K)이하로 내려가는 것을 막기 콜드헤드에 CGR 온도센서와 heater(Fig.3)를 장착하고 Temperature controller (LakeShore사 Model DRC-93, heater output 50W)로 온도를 모니터하고 조절하였다. 또한, 액화용기 하부에도 heater(Fig.3)를 설치하여 과도한 재응축으로 음압(negative pressure)이 되는 것을 방지하고 적절한 압력을 유지하기 위하여 네온

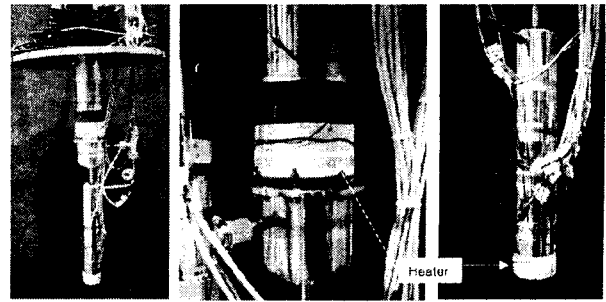


Fig. 3. Location of heater & Temp. sensor
강제증발용 heater를 장착하였다.

2.2 실험

먼저 진공 챔버 내부를 진공 펌퍼를 이용하여 1.5×10^{-5} torr 정도로 유지하였고, 액화용기와 배관 등의 불순물(공기 중의 질소, 산소, 수증기 등)을 제거하기 위하여 용기와 관 내부를 진공으로 만든 후 네온가스를 채워 넣는 퍼지 작업을 3~4회 반복하였다.

퍼지 작업이 끝나면 냉동기를 작동시키고 용기내 압력을 절대압력 2bar로 일정하게 기체네온을 공급해 주면서 온도 센서가 부착된 액화장치 의 각 부분의 온도와 보충되는 네온가스의 유량을 측정하였다. 또한 실험 중 콜드헤드의 온도가 네온의 빙점(24.55K) 이하로 내려가 네온이 고화되는 것을 막기 위하여 Temperature controller로 콜드헤드의 온도를 빙점 이상으로 유지 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

먼저 가스네온을 절대압력 2bar로 일정하게 공급하면서 냉동기를 작동시킨 후 시간에 따른 액화용기 각 부분의 온도변화는 Fig.4와 Fig.5와 같다. 네온의 액화점은 2bar로 일정하게 공급 할 때에는 29.5K이다. 액화용기의 1번~5번 센서의 온도는 일정하게 감소하다가 약 35분경에 액화용기 바닥면 1번 센서의 온도가 급격히 하락함을 알 수 있다. 이는 액화가 시작되어 바닥면에 액체 네온이 떨어지고 있음을 알 수 있다. 초기에 네온이 일단 충전되면 네온의 공급유량은 거의 없다. 단지 냉각에 의한 네온의 비체적의 감소로 약간의 유량 증가만이 있을 뿐이다. 그러나 액화가 시작되면 유량은 급격히 증가하고, 전체 시스템이 정상상태에 도달하면 유량도 일정하게 유지되었다.

약 150분이 경과하고 네온가스의 공급을 중단 한 후 액화용기의 압력은 낮아졌고 콜드헤드의 온도는 내려가 Temperature controller heat가 작동하여 콜드헤드의 온도는 빙점이상의 온도로 유지 되었다.

4. 결론

고온초전도 동기모터의 냉각시스템을 위해 일차적으로 네온액화시스템을 제작하고 액화실험을 하였다. 네온액화시스템은 GM냉동기, 액화용기, 열교환기, 진공챔버, 각종배관과 유량, 압력, 온도센서 등으로 구성되었다. 가스네온을 절대압력 2bar로 일정하게 공급하고 냉동기를 작동시킨 후 약 35분경부터 액화가 시작되었고, 액화기의 액화성과 액화량은 각각 36W와 0.1g/s이다. 이는 현재 개발중인 100마력급 초전도 모터의 예상되는 열부하(20~30W)를 충분히 커버할 수 있을 것으로 사료된다. 전도와 복사열침입량은 0.08W 7.15W로 총 7.23W 이었다. 추후 복사실드, 초단열재등으로 복사열침입을 최소화 시키면 액화성을 더 높일 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용 기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Richardson and Tavner, "Neon liquefaction system for high Tc experiments", Cryogenics, Vol. 35, pp 195 - 198, 1995
- [2] 백중훈, 강병하, 장호명, "직접냉각에 의한 수소액화장치의 성능실험", 공기조화 냉동공학 논문집, 9권, PP. 284~291, 1997
- [3] David Madura, et. al. "Test Results of a 5000HP HTS Motor", The Applied Superconductivity Conference, 2LB02, 2002
- [4] M. Frank et. al. "Cooling System for Siemens 400kW HTS Synchronous Machine", ASC2002 contribution, 2LB04, 2002

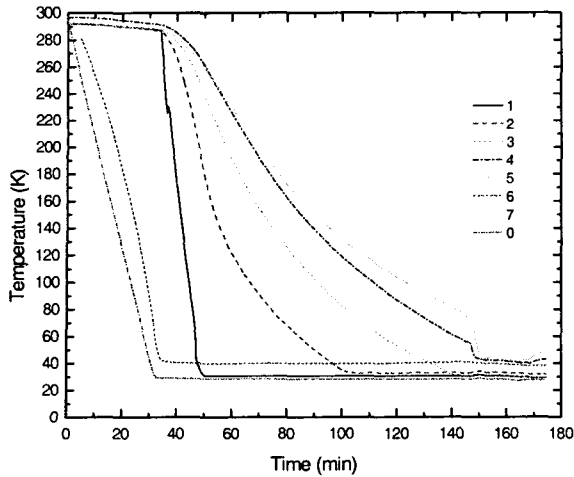


Fig. 4. Cool-down characteristics

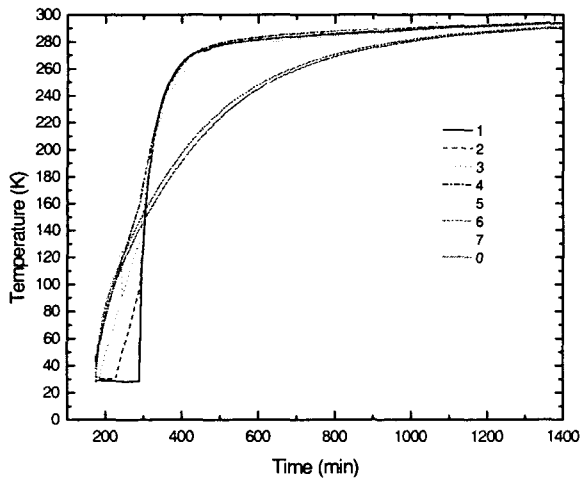


Fig. 5. Warm-up characteristics

실험에 사용한 네온가스의 양은 572g 정도이고, 액화시스템이 정상상태에 도달한 후 액화된 네온의 양과 액화 시에 걸린 시간을 이용하여 액화기의 액화성과 액화량을 계산하였다. 액화성은 약 36W 액화량은 약 0.1g/s 이었다. 외부로부터의 전도와 복사 열침입량은 식(3.1), (3.2)를 이용하여 계산하였고, 네온 가스 주입관을 통한 전도열침입은 0.08W, 복사열침입은 7.07W로 총 7.15W의 열침입이 있었다.

$$Q = \frac{A}{L} \int_{T_L}^{T_H} k(T) dT \quad (3.1)$$

$$Q_R = \sigma A_1 E (T_2^4 - T_1^4)$$

$$E = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_2 + \frac{A_1}{A_2} (1 - \epsilon_2) \epsilon_1} \quad (3.2)$$

추후 복사실드, 초단열재(MLI)등을 이용하여 복사 열침입을 최소화시켜 액화성을 더 높일 수 있을 것으로 사료된다.