

4 K GM 극저온냉동기를 이용한 헬륨 재응축형 극저온용기의 성능 평가시험

김형진, 김성래*, 심기덕**, 진홍범**, 권영길**, 장호명***, 이봉근
(주) 덕성, CVE*, 한국전기연구원**, 홍익대학교***

Test of evaluating performance of Helium recondensing type cryostat with 4 K GM cryocooler

H. J. Kim, S. R. Kim*, K. D. Sim**, H. B. Jin**, Y. K. Kwon**, H. M. Chang***, B. G. Lee
DUKSUNG Co., LTD., CVE*, KERI**, Hoingik University***

hjkim@duksung21.com

Abstract - The helium recondensing type cryostat with 4 K GM cryocooler is fabricated in order to keep cryogenic state of two saddle type superconducting magnet opposite to each other designed maximum 0.3 T magnetic field, and 1270 mm diameter open bore. The current leads which consist of metal current leads made for brass sheet and HTS current leads made in American Superconductor™ intermediate cool down with cryocooler. Thus, the cryocooler for helium recondensing is a 1.5W/4.2 K GM SUMITOMO cryocooler. While superconducting magnet is working of 1600 gauss to 200 A, the cryostat keep constantly

the level of liquid helium at 0.05 bar gauge pressure.

1. 서 론

헬륨 재응축형 극저온용기를 사용하는 것은 초전도자석시스템을 운전하는 데에 매우 효율적이며 안정적인 방법으로써 지금까지 초전도 시스템 냉각의 표준이 되어온 액체 헬륨등의 극저온 유체를 이용한 액체냉각방식에서 한단계 앞선 기술의 냉각방식이다.[1-3] 한편, 최근에는 고온초전도체와 극저온냉동기의 기술 발전으로 인하여 냉동기로 직접 전도냉각하는 초전도 시스템이 등장하게 되었다.[4-6] 액체냉각방식은 극저온액체

| | | | | | |
|-----|------------------------------|--------|------|-----|---------|
| b | SHIELD FREEZING REFRIGERATER | | EA | 1 | |
| a | RECONDENSING REFRIGERATER | | EA | 1 | |
| 4 | LHe VESSEL ASS'Y | SUS304 | EA | 1 | |
| 3 | ZOK SHIELD ASS'Y | A1050 | EA | 1 | |
| 2 | BOX SHIELD ASS'Y | A1050 | EA | 1 | |
| 1 | VACUUM VESSEL ASS'Y | SUS304 | EA | 1 | |
| NO. | DESCRIPTION | MAT'L | UNIT | QTY | REMARKS |

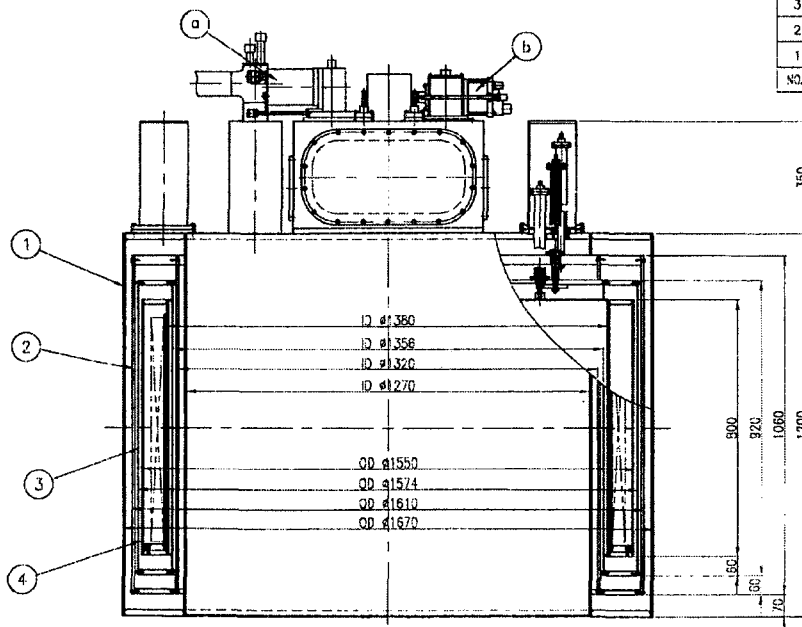


Fig. 1. Schematic and picture of the helium recondensing type cryostat with 4 K GM cryocooler for superconducting magnets used in single crystal puller

를 사용한다는 번거로움과 많은 운전비용에도 불구하고 극저온액체의 증발잠열을 이용하여 초전도 시스템을 열적으로 안정하게 운전할 수 있다는 장점으로 아직까지도 많이 사용하고 있다. 반면에, 직접 전도냉각방식은 시스템의 유연한 구성과 경제성등의 장점이 있으나, 초전도자석의 열적 안정성 구현의 어려움이 있어 이 부분에 대한 많은 연구가 활발히 진행되고 있는 상황이다.[7-8] 이렇듯 액체냉각방식의 장점인 열적 안정성을 유지함과 동시에, 고가의 극저온유체를 절약하는 방편으로 헬륨을 극저온냉동기로 이용해서 재응축하여 초전도 시스템을 냉각하는 방법이 있다. 극저온냉동기를 이용한 헬륨 재응축방식은 단순 액체 냉각방식과 냉동기 직접 전도냉각방식의 장점을 모두 가지고 있지만, 시스템의 구성과 운전에 있어서는 단순 액체 냉각방식보다 복잡해지는 단점이 있기 때문에 제작과 운전에 보다 세심한 연구개발이 필요하다.

Fig. 1.은 단결정성장용 초전도자석을 냉각시키기 위한 재응축방식의 극저온용기이다. 헬륨을 응축시키기 위한 냉동기와 복사차폐막을 냉각시키기 위한 냉동기가 장착되어 있으며, 진공용기 내부에 헬륨조를 중심으로 복사차폐막이 이중으로 되어 있다. 이러한 재응축방식의 초전도시스템 냉각을 위한 극저온용기는 헬륨의 증발량을 영으로 유지하는 것을 목적으로 한다. 그래서 헬륨조에서의 열부하가 재응축을 수행하는 극저온 냉동기의 헬륨증발온도에서의 냉동용량보다 작아야 하는데, 실용화된 고온초전도체 전류도입선의 개발과 높은 성능의 4 K 극저온냉동기의 개발로 인하여 재응축방식의 냉각을 실현할 수 있게 되었다. 그럼에도 불구하고 헬륨 재응축부의 설계와 전류도입선 중간냉각부의 설계는 여전히 주요한 제작기술로 남는다. 본 시험에 제작된 극저온용기에서 전류도입선은 황동과 American

superconductor사의 250 A급 HTS(High temperature superconductor) 전류도입선을 조합하여 냉동기로 전도냉각하여 헬륨조로의 열유입을 막을 수 있었다. 한편, 재응축을 위한 극저온냉동기는 일반적으로 JT(Joule-Thomson)형 극저온냉동기와 GM(Gifford-McMahon)형 극저온냉동기를 많이 사용하는 데, JT형 냉동기에 비해 다소 냉동용량은 작지만, 비교적 사용이 용이하고 신뢰도가 높은 SUMITOMO사의 2단형 GM 극저온냉동기를 사용하였다. 초전도자석은 마주보는 두개의 말안장형 코일로써 200 A에서 1600 gauss로 운전하였다. 극저온용기 내의 헬륨은 계기압력 0.05 bar에서 액체헬륨의 수위가 일정하게 유지되었다.

2. 설계 및 제작

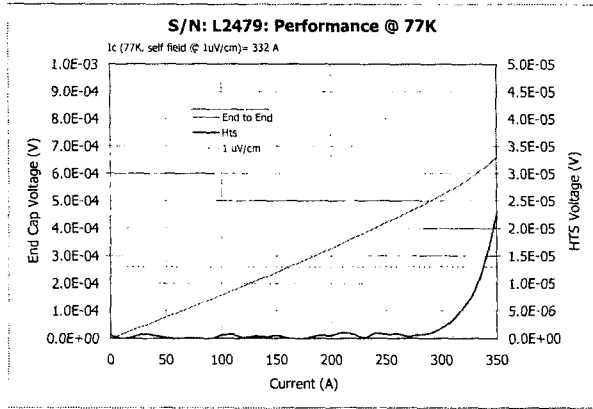
2.1 극저온 용기

일반적인 극저온용기는 상온으로부터 헬륨조로의 열침입을 가장 효과적으로 막을 수 있는 구조로 설계된다.[1-3,9-10] 이를 위해서 열전도도가 낮으면서도 충분한 강도를 갖는 재료를 기계적 지지대로 사용하며, 헬륨조를 진공용기 안에 넣어 대류에 의한 열손실을 막는다. 또한 중간냉각을 하는 복사차폐막을 설치하여 복사에 의한 열침입을 막는다. 냉동기를 이용한 재응축형 극저온용기도 이러한 일반적인 단열구조를 갖으면서, 냉동기의 cold head가 효과적으로 헬륨을 재응축할 수 있도록 설계해야한다. 무엇보다 재응축형 극저온 용기의 전류도입선은 금속 전류도입선과 HTS 전류도입선을 냉동기를 이용한 전도냉각하는 구조로 설계하여야 한다. Table 1.에 극저온 냉동기의 사양 및 각 부분에 부과되는 냉동부하를 나타내었다.

기계적 지지대는 수직 지지대와 수평 지지대

Table 1. Cooling powers of cryocoolers and calculated heat loads on each stages of cryocoolers.

| cryocooler | cryocooler for recondensing helium (SUMITOMO SRDK-415) | | cryocooler for cooling down radiation shield (Leybold RGD 5/100-SDF) | |
|---|--|---------------|--|--------------|
| | first stage | second stage | first stage | second stage |
| cooling power at designed operating temperature | 32 W @ 40 K | 1.5 W @ 4.2 K | 100 W @ 80 K | 5 W @ 20 K |
| heat load | | | | |
| Current OFF | | | | |
| conduction | | | | |
| support | - | 0.02 W | 2.3 W | 0.6 W |
| current leads | 2.3 W | 0.03 W | 16.4 W | - |
| radiation | 13 W | 0.1 W | 24 W | 0.8 W |
| total | 15.3 W | 0.15 W | 42.7 W | 1.4 W |
| Current ON | | | | |
| current lead | 8 W | 0.3 W | 32.9 W | - |
| total | 21 W | 0.35 W | 59.2 W | 1.4 W |



CS025030, April 23, 2001

American Superconductor

Fig. 2. End cap and HTS voltage of HTS current lead as function of current. (American Superconductor™: CS025030)

로 구성되어 있으며 각각의 지지대는 헬륨조와 20 K 복사차폐막, 20 K 복사차폐막과 80 K 복사차폐막, 80 K 복사차폐막과 진공용기사이에서 지지하는 것으로 중간 냉각을 하였다. 기계적 지지대는 열전도도가 낮으면서 기계적 강도가 우수하고 가공이 용이한 G-10 FRP환봉을 사용하였다.

복사차폐막은 이중으로 설계하였는데, 이 복사차폐막의 중간냉각은 Leybold사의 2단 GM 극저온냉동기를 사용하였다. 복사차폐막은 열전도도와 강도, 가공성을 고려하여 알루미늄으로 제작하였고, 80 K으로 설계한 복사차폐막에는 다단 복사차폐층(MLI: Multi Layer Insulation)을 30겹 시공하였으며, 20 K 복사차폐층과 헬륨조 표면에 알루미늄 박판 테이프를 사용하여 유효방사율을 감소시켰다.

2.2 전류도입선

Table 1.에서 알 수 있듯이 전류를 통하지 않을 때와 전류를 통할 때의 발열에 의한 열부하가 늘어난다. 또한 전류도입선으로 인한 열부하가 다른 요소들에 의한 열부하보다 크다는 것을 알 수 있다. 극저온액체만을 사용하여 냉각시스템에서 증발하는 극저온유체의 증발잠열과 대류열전달을 이용하여 전류도입선을 냉각할 때와 달리 재응축방식의 경우, 반드시 HTS 전류도입선을 사용하고, 냉동기를 이용한 직접 접촉 전도냉각을 해야만 한다. 그것은 재응축을 통해 증발하는 극저온유체가 발생하지 않아, 전류도입선의 냉각에 이용할 수 없기 때문이다. HTS 전류도입선도 증발기체 냉각용으로 제작된 것이 아닌, 전도냉각용으로 최적화된 것을 사용해야 한다.[7-8] 여기서는 American superconductor사의 250 A급 HTS 전류도입선을 사용하였다. Fig. 2.는 제작사에서 제공한 HTS 전류도입선의 전류에 따른 전압곡선으로 HTS에 의한 전압발생보다는 양단의 접합부에서의 전압발생이 큰 것을 알 수 있다. 제작사에 의하면 한 쌍의 HTS 전류도입선이 64

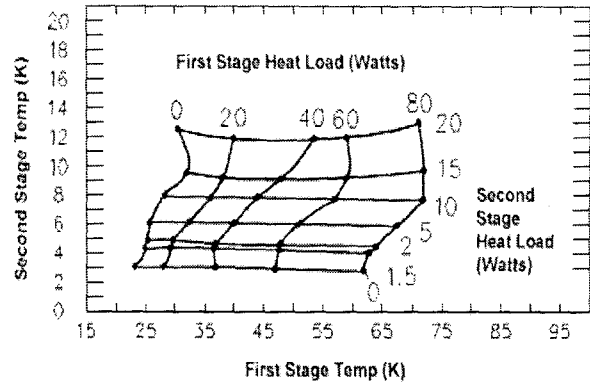


Fig. 3. Load map of cryocooler for recondensing helium. (SUMITOMO SRDK-415)

K에서 4.2 K으로 전하는 열량은 0.09 W이다. 한편, 금속 전류도입선의 경우, 전류의 세기와 양단의 온도에 따른 최소의 열전달량을 갖는 최적의 형상이 존재한다. 여기서는 상온에서 80 K, 80 K에서 40 K 사이에서 2중으로 중간 냉각하는, 황동박판으로 제작한 금속 전류도입선을 사용하였다.

2.3 헬륨 재응축

헬륨증기의 재응축현상은 단순하게 증발기체의 응축과정으로 볼 수 있으나,[10-11] 실제 거동은 매우 복잡하여 정확한 열전달 해석을 수행하기는 대단히 어렵다. 그러나 4 K 냉동기의 냉동용량과 냉동온도 사이에 특성을 고려하여 상당히 보수적으로 설계하여 재응축을 실현시킬 필요성이 있다. Fig. 3.은 4 K 극저온냉동기의 특성을 알 수 있는 냉동기 각 단의 냉동용량에 따른 온도의 변화곡선이다. 4 K cold head에 구리실린더를 장착하여 헬륨이 재응축하는 공간을 만들었다. 냉동기가 재응축용기인 구리실린더를 충분히 낮은 온도로 유지시키지 못할 경우에 대비하여 구리실린더의 길이를 충분히 길게 하였다. 또한 구리실린더와 헬륨조 사이는 스테인리스 주름관으로 연결하여 혹시 발생할지 모르는 진동과 충격에 의한 파괴에 대비하였다.

3. 실험

먼저 복사차폐막 냉각용 극저온냉동기를 가동한 후, 액체질소로 극저온용기를 예냉한 다음, 헬륨조에 헬륨을 90%이상 넣고 안정화시킨 후, 헬륨조를 밀폐시켰다. 헬륨조의 내용적은 초전도자석의 체적을 제외하고 약 300 L이며, 헬륨수위측정센서로 측정가능한 부피는 약 280 L이다. 재응축용 냉동기를 가동하고, 과도한 재응축으로 헬륨조가 음압(negative pressure)이 되는 것을 방지하고 헬륨조 내부를 일정한 압력으로 유지되도록 헬륨강제증발용 heater를 장치하였다. 헬륨조 내부의 계기압력을 0.05 bar로 유지하면서 초전도자석에 전류를 통하여 각 부분의 온도를 측정

Table 2. Summary of experimental test results

| | current OFF | difference due to current | current ON |
|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| superconducting magnet | | | |
| current | 0 | + 200 A | 200 A |
| voltage | 0 | + 0.1 V | 0.1 V |
| power | 0 | + 20 W | 20 W |
| temperature of | | | |
| cold head at 4 K | 3.6 K | 0.0 K | 3.6 K |
| cold head at 40 K | 28.8 K | + 7.7 K | 36.5 K |
| cold head at 20 K | 9.5 K | 0.0 K | 9.5 K |
| shield at 20 K | 16 K | + 1.0 K | 17 K |
| cold head at 80 K | 45.5 K | + 2.3 K | 47.8 K |
| shield at 80 K | 64.8 K | + 1.0 K | 65.8 K |
| estimated heat load on | | | |
| cold head at 4 K | 0.5 W | + 0.15 W | 0.65 W |
| cold head at 40 K | 10 W | + 15 W | 25 W |
| cold head at 20 K | 3 W | 0.0 W | 3 W |
| cold head at 80 K | 35 W | + 5 W | 40 W |
| ambient temperature | 9 °C | 0 °C | 9 °C |
| boiloff rate | 0 | 0 | 0 |
| pressure of LHe vessel | 0.05 bar _{gauge} | 0.000 bar _{gauge} | 0.05 bar _{gauge} |
| heater for boiling helium | | | |
| voltage | 7.9 V | 0.0 V | 7.9 V |
| current | 0.26 A | 0.0 A | 0.26 A |
| ON time | 40 sec | - 5 sec | 35 sec |
| OFF time | 210 sec | + 110 sec | 360 sec |
| duty cycle | 16.0 % | - 7.1 % | 8.9 % |
| net heat load on LHe vessel | - 0.33 W | + 0.15 W | - 0.18 W |

하고 heater가 작동되는 시간을 측정하였다. 전류는 200 A을 흘렸다.

4. 결과 및 토론

Table 2.에는 온도 측정결과 및 측정된 자료를 바탕으로 계산한 열부하등이 나타나있다. 먼저 복사차폐막의 냉각의 경우 매우 만족할 만한 수준이었다. 이것은 냉동기와 복사차폐막의 접촉이 잘 되었고, 설계에 부합한 정교한 제작이 이루어졌음을 의미한다. 반면에 전류도입선에 관해서는 설계시보다 다소 높은 열부하가 나타났지만, 냉동기의 냉동용량이 허용하는 범위이내의 열부하이기 때문에 작동에는 문제가 없었으나, 전류도입선의 설계와 제작이 매우 정밀한 제작기술을 요구한다는 사실을 증명한다. Fig. 4.는 초전도자석에 200 A의 전류를 통했을 때, 전류도입선을 냉각하는 냉동기 각각의 온도 변화를 나타낸 곡선으로 전류를 흘리기 시작한 후, 약 15분 후 정상상태에 도달하였으며, 약 1시간 동안 200 A을 유지하는 동안 80 K cold head와 40 K cold head는 일정한 온도를 유지했다. 4 K cold head의 온도가 주기적으로 변하는 것은 냉동기의 특성이다. 200 A에서 0.1 V의 전압이 발생하여 초전도자석과 전류도입선에 전류에 의해서 20 W

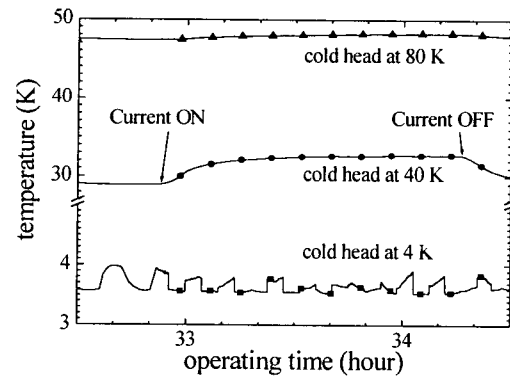


Fig. 4. Change the temperature of cold heads cooling down current leads when current changes to 200 amperes.

의 발열이 생긴다. 분석결과 300 K과 80 K 사이의 금속 전류도입선에서 5 W, 80 K과 40 K 사이의 금속 전류도입선에서 15 W의 발열이 생겼다.

전류를 흘리기 전후, 헬륨조 내부의 압력을 일정하게 하기 위하여 설치한 히터의 작동시간에 변화가 생겼다. 히터는 7.9 V에 0.26 A로 작동하여 2.05 W의 발열량을 갖고 있는데, 전류를 흘리

지 않을 때에는 작동주기가 16.0 %으로 헬륨조에 0.33 W의 열량을 가하여 압력을 유지한 반면, 200 A의 전류를 흘렸을 때에는 히터의 작동주기가 8.9 %로 0.18 W의 발열량을 보였다. 이로써 초전도자석에 200 A의 전류를 흘렸을 때 0.15 W의 발열이 생기는 것을 알 수 있었다. 이로써 본 시험에 사용된 극저온용기는 초전도자석의 정상적인 운전중에서 헬륨의 재응축이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 시험을 통하여 4 K GM 냉동기를 이용한 헬륨 재응축방식의 초전도시스템 냉각을 위한 극저온용기의 헬륨 증발량을 영으로 유지하는데 성공하였다. 이는 기존 극저온액체를 이용한 냉각방식이 주는 초전도자석의 열적 안정성 유지와 냉동기전도냉각방식에서 얻을 수 있는 효율적인 에너지 활용의 두 가지 장점을 모두 구현함과 동시에, 까다로운 설계를 정확하게 제작하고 안정적으로 운전했다는 기술적 성과를 이뤄낸 것을 의미한다. 냉동기로 직접 전도냉각하는 전류도입선의 발열량이 일부구간에서 설계와 다소 차이를 보이기는 했지만, 대부분 설계와 비슷했고, 복사열전달량을 예측할 수 있는 좋은 경험이 되었다. 이번 헬륨 재응축형 극저온냉동기의 성과에 만족하지 않고, 보다 다양하고 효율적인 초전도냉각시스템 구축을 위해 최적화되고, 안정화된 설계에 전념할 계획이다.

본 논문은 산업자원부에서 시행한 부품소재 산업에 의해 지원받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] G.K. White, "Experimental techniques in low-temperature physics", Clarendon press, 1987
- [2] K.D. Timmerhaus, "Cryogenic process engineering", Plenum press, 1989
- [3] R.F. Barron, "Cryogenic Systems", Oxford University Press, 1985
- [4] K. Watanabe, M. Motokawa, "Cryogenfree high field superconducting magnets", IEEE Transactions on applied superconductivity, vol. 10, no. 1, pp.489-494, 2000
- [5] A. Rowe, J.A. Barclay, S. Dost, "Design of an apparatus for a 5 T conduction cooled NbTi solenoid with a 203 mm room temperature", Advances in cryogenic engineering, vol. 45, pp.651-658, 2000
- [6] T. Kobayashi, Y. Sato, T. Sasaki, S Mine, "Manufacturing of liquid helium free superconducting magnets for industrial use", Advances in cryogenic engineering, vol. 43, pp.157-163, 1998
- [7] H.M. Chang, S.W. Van Sciver, "Thermodynamic optimization of conduction-cooled HTS current leads", Cryogenics, vol.38, no.7, pp.729-736, 1998
- [8] 송성제, 장호명, "극저온냉동기로 냉각되는 이중전류도입선의 최적설계", 공기조화냉동공학회, 제9권 제4호, pp.552-560, 1997
- [9] A. Bejan, J.L. Smith, "Thermo- dynamic optimization of mechanical supports for cryogenic apparatus", Cryogenics, vol.14, no.3, pp.158-163, 1974
- [10] R.F. Barron, "Cryogenic heat transfer", Taylor and Francis, 1999
- [11] F.P. Incropera, "Introduction to Heat Transfer", John Wiley & Sons, Inc., 1996