

극저온 냉동기를 이용한 헬륨 재응축형 초전도 마그네트 시스템에 대한 실험적 연구

김형진, 심기덕*, 최석진, 한호환, 김경한, 진홍범*, 이봉근
(주) 덕성, 한국전기연구원*

Experimental study of Helium recondensing type superconducting magnet system with cryo-refrigerator

H. J. Kim, K. D. Sim*, S. J. Choi, H. H. Han, K. H. Kim, H. B. Jin*, B. G. Lee
DUKSUNG CO., LTD, KERI*

Abstract - 초전도 마그네트 시스템의 냉각방법 중, 액체 헬륨등의 극저온 유체를 이용한 액체냉각방식이 극저온 냉동기를 이용한 직접 전도냉각 방식에 비해 신뢰도가 높은 열적 안정성으로 인하여, 현재도 많은 초전도 마그네트 시스템이 액체냉각방식을 이용하고 있다. 그러나, 고가의 극저온 액체의 재충전으로 인하여 경제성이 낮고 취급이 불편한 단점이 있다. 이러한 액체냉각방식의 단점을 보완하고자 극저온 유체를 시스템 안에서 직접 응축하여 재충전을 하지 않는 재응축형 시스템을 개발하여 실험하였다. 실험에 사용한 초전도 마그네트 시스템은 상온보아 1270 mm, 최대자장 0.3 T로 설계되었고, 금속 전류도입선과 HTS 전류도입선을 복합적으로 사용하였으며, 복사차폐막 냉각용 극저온 냉동기와 헬륨 재응축용 극저온 냉동기를 사용하였다. 초전도 마그네트는 200 A에서 1600 gauss의 자장으로 운전하였고, 극저온 용기에서는 0.05 bar의 압력으로 액체 헬륨이 증발하지 않고 유지되었다.

1. 서 론

헬륨 재응축형 냉각방식으로 초전도 마그네트 시스템을 운전하는 것은 매우 효율적이며 안정적인 냉각 방법으로써 지금까지 주로 사용된 냉각방식인 극저온 액체냉각방식의 단점을 효과적으로 보완한 냉각방식이다. [1-3] 근래에 고온초전도체와 극저온냉동기의 기술발달으로 인하여 극저온냉동기로 직접 전도냉각하는 초전도 시스템이 등장하게 되었다. [4-6] 액체냉각방식이 극저온액체를 사용하는 불편함과 높은 운전비용에도 불구하고 초전도 시스템을 열적으로 안정하게 운전할 수 있기 때문에 많이 이용되고 있는 반면에, 직접 전도냉각 방식은 시스템의 유연한 구성과 경제성등의 장점이 있

나, 초전도자석의 열적 안정성 구현의 어려움이 있어 일부 제한된 환경에서 적용되고 있으며, 보편적인 사용을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. [7-8] 이렇듯 액체냉각방식의 장점인 열적 안정성을 유지함과 동시에, 고가의 극저온유체를 절약하는 방편으로 헬륨을 극저온냉동기로 재응축하여 초전도 시스템을 냉각하는 방법이 있다. 극저온냉동기를 이용한 헬륨 재응축방식은 액체냉각방식과 냉동기 직접 전도냉각방식의 장점을 모두 가지고 있지만, 시스템의 구성과 운전에 있어서는 일반적인 액체냉각방식보다 복잡해지는 단점이 있다.

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 실

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 total	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

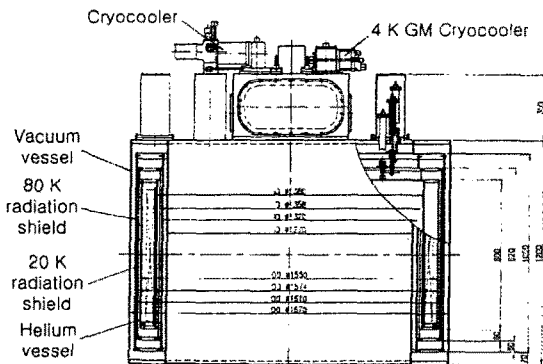


Fig. 1. Schematic of the helium recondensing type cryostat with 4 K GM cryocooler for superconducting magnets used in single crystal puller

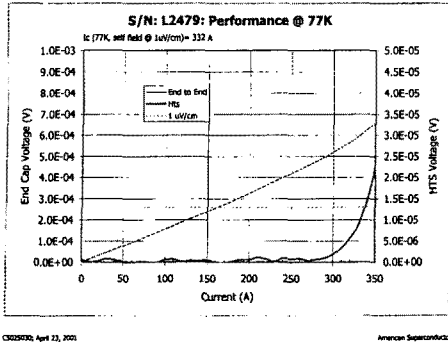


Fig. 2. End cap and HTS voltage of HTS current lead as function of current. (American Superconductor™: CS025030)

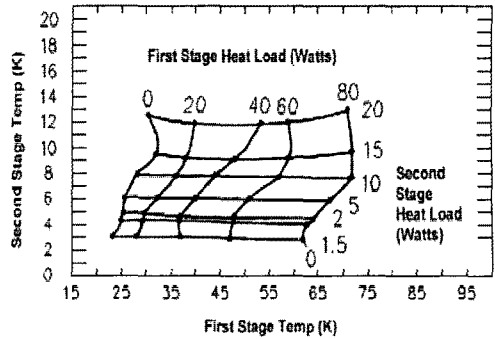


Fig. 3. Load map of cryocooler for recondensing helium. (SUMITOMO SRDK-415)

현할 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 사용하는데, JT형 냉동기에 비해 다소 냉동용량은 작지만, 비교적 사용이 용이하고 신뢰도가 높은 SUMITOMO사의 2단형 GM 극저온냉동기를 사용하였다. 초전도자석은 마주보는 두개의 말안장형 코일로서 200 A에서 1600 gauss로 운전하였다. 극저온용기 내의 헬륨은 계기압력 0.05 bar에서 액체헬륨의 수위가 일정하게 유지되었다.

2. 본 론

2.1 설계 및 제작

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 복사 에 의한 열침입을 막는다. 냉동기를 이용한 재응축형 극저온용기도 이러한 일반적인 단열구조를 갖으면서, 냉동기의 cold head가 효과적으로 헬륨을 재응축할 수 있도록 설계해야 한다. 무엇보다도 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 지지대로 구성되어 있으며 각각의 지지대는 헬륨조와 20 K 복사차폐막, 20 K 복사차폐막과 80 K 복사차폐막, 80 K 복사차폐막과 진공용기사이에서 지지하는 것으로 중간 냉각을 하였다. 복사차폐막은 이중으로 설계하였는데, 이 복사차폐막의 중간냉각은 Leybold사의 2단 GM 극저온냉동기를 사용하였다. 복사차폐막은 열전도도와 강도, 가공성을 고려하여 알루미늄으로 제작하였고, 80 K과 20 K에서 운전하도록 2단 복사차폐 설계를 하였다.

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 사용하

여 냉각시스템에서 증발하는 극저온유체의 증발잠열과 대류열전달을 이용하여 전류도입선을 냉각할 때와 달리 재응축방식의 경우, 반드시 HTS 전류도입선을 사용하고, 냉동기를 이용한 직접 접촉 전도냉각을 해야만 한다. HTS 전류도입선도 증발기체 냉각용으로 제작된 것이 아닌, 전도냉각용으로 최적화된 것을 사용해야 한다.[7-8] 250 A급 HTS 전류도입선을 사용하였다. Fig. 2.는 HTS 전류도입선의 전류에 따른 전압곡선으로 HTS에 의한 전압발생보다는 양단의 접합부에서의 전압발생이 큰 것을 알 수 있다. 한 쌍의 HTS 전류도입선이 64 K과 4.2 K사이의 열전달량은 0.09 W이다. 헬륨증기의 재응축현상은 단순하게 증발기체의 응축과정으로 볼 수 있으나,[10-11] 실제 거동은 매우 복잡하여 정확한 열전달 해석을 수행하기는 대단히 어렵다. 그러나 4 K 냉동기의 용량과 온도특성을 고려하여 설계하면 재응축을 실현할 수 있다. Fig. 3.은 4 K 극저온냉동기의 특성을 알 수 있는 냉동기 각 단의 냉동용량에 따른 온도의 변화곡선이다. 4 K cold head에 접촉한 구리실린더에서 헬륨이 재응축하도록 제작하였다.

2.2 실험

복사차폐막 냉각용 극저온냉동기를 가동한 후, 액체질소로 극저온용기를 예방한 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 헬륨강재증발용 heater를 장치하였다. 헬륨조 내부의 계기압력을 0.05 bar로 유지하면서 초전도자석에 전류를 통하여 각 부분의 온도를 측정하고 heater가 작동되는 시간을 측정하였다. 전류는 200 A를 흘렸다.

3. 결과 및 토론

Table 2.에는 온도 측정결과 및 측정된 자료를 바탕으로 계산한 열부하등이 나타났다. 먼저 복사차폐막의 냉각의 경우 매우 만족할 만한 수준이었다. 이것은 냉동기와 복사차폐막의 접착이 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 각단의 온도 변

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
room temperature	9 °C	0 °C	9 °C
boiloff rate	0	0	0
pressure of LHe vessel	0.05 bar	0.0 bar	0.05 bar
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

화를 나타낸 곡선으로 전류를 흘리기 시작한 후, 약 15분 후 정상상태에 도달하였으며, 약 1시간 동안 200 A 을 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 W의 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 흘리지 않을 때에는 작동주기가 16.0 %로 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.

4. 결 론

본 실험을 통하여 4 K GM 냉동기를 이용한 헬륨 재응축방식의 초전도시스템 냉각을 위한 극저온용기의 헬

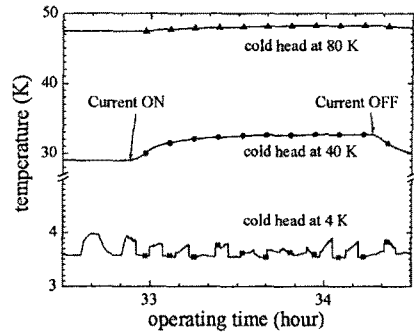


Fig. 4. Change the temperature of cold heads cooling down current leads when current changes to 200 amperes.

륨 증발량을 영으로 유지하는데 성공하였다. 이는 기존 액체냉각방식의 장점인 초전도 마그네트의 열적 안정성 유지와 냉동기전도냉각방식의 장점인 경제적인 에너지 활용을 모두 실현할 수 있었고, 가혹한 설계조건을 만족하는 정확한 제작과 안정적인 운전은 초전도 마그네트 시스템의 극저온 냉각에 있어서 새로운 기술적 성과를 이뤄낸 것을 의미한다. 냉동기로 직접 전도냉각하는 전류도입선의 발열량이 일부구간에서 설계와 다소 차이를 보이기 는 했지만, 대부분 설계와 비슷했고, 복사열전달량을 예측할 수 있었다. 이번 성과를 바탕으로 보다 다양하고 효율적인 초전도냉각시스템 개발을 위해 설계에 있어서 최적화되고 안정화된 설계기술을 구축하고, 제작 기술 향상에 전념할 계획이다.

(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 lead s", Cryogenics, vol.38, no.7, pp.729-736, 1998
- [8] 송성재, 장효명, "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