

6.6kV-200A급 HTS 한류기 DC Reactor용 과냉질소 냉각시스템의 개발

김형진, 권기범, *강형구, *배덕권, *안민철, **정은수, **장호명, *고태국
홍익대학교 과학기술 연구소, *연세대학교 전기전자공학과, **홍익대학교 기계시스템디자인공학과

Development of cooling system with sub-cooled nitrogen for DC Reacter of 6.6kV-200A class HTS fault current limiter

H.J. Kim, K.B. Kwon, *H.G. Kang, *D.K. Bae, *M.C. Ahn, **E.S. Jeong,
**H.M. Chang, *T.K. Ko

Hongik University Research Institute of Science and Technology, *Yonsei University
Department of Electrical and Electronic Engineering, **Hongik University
Department of Mechanical and System Design Engineering

www.hongik.ac.kr

Abstract - The sub-cooled nitrogen cooling system at 65 K with GM cryo-cooler is developed for cooling down the DC reactor of 6.6 kV-200 A class HTS Fault Current Limiter(SFCL). The sub-cooled nitrogen cooling is more economic than saturated nitrogen cooling, because the length of HTS wire is reduced in the same capacity, as well as, more stable. The cooling system with the GM cryo-cooler installed on the cryostat is not only compact but also efficient for energy saving. In the nitrogen vessel, after evacuating with vacuum pump to saturated nitrogen at 65 K, sub-cooled nitrogen at 65 K is made by putting in gas helium to 1 atm. During the short circuit test occurring the fault current of 1000 A, the sub-cooled nitrogen cooled DC reactor for SFCL is kept the state of sub-cooled nitrogen at 65 K.

1. 서 론

전력수요의 증가로 인해 전력계통의 단락용량이 증가하고 이로 인한, 사고전류 발생의 위험성이 증가하는 가운데, 고온초전도 한류기를 전력계통에 적용하여 전력계통의 안정성을 높이는 문제가 절실히 요구되고 있는 실정이다.[1,2] 고온초전도 한류기를 개발하고 실용화하는데 있어서 가장 중요한 요소 중 하나인 안정적으로 고온초전도 한류기를 냉각할 수 있는 극저온 냉각시스템의 개발이 필수적이다. 고온초전도 한류기를 냉각하는 방법으로는 액체질소를 사용하여 냉각하는 방법과 극저온 냉동기를 직접 접촉하여 냉각하는 방법으로 크게 나뉠 수 있다. 액체질소를 사용하여 냉각하는 방법은 극저온 유체를 사용함

으로써, 고온초전도체를 안정적으로 극저온상태를 유지할 수 있는 장점이 있지만, 열부하로 인하여 손실되는 극저온 유체를 주기적으로 보충해야 하는 단점이 있다. 반면에, 극저온 유체를 사용하지 않고 극저온 냉동기로 직접 접촉하여 전도냉각하는 방식은 냉각시스템의 구성이 용이하고 액체질소 보다 낮은 온도로 냉각시킬 수 있는 장점이 있으나, 극저온유체를 사용할 때보다 안정성이 많이 떨어지는 단점이 있다.[3] 본 극저온 냉각시스템은 Fig. 1.에서 보는 것처럼 액체질소를 사용하여 냉각함으로써 고온초전도 한류기의 안정성을 확보하고, 열부하로 인하여 증발되는 액체질소를 극저온 냉동기로 냉각하여 외부에서 추가적으로 액체질소를 공급하지 않는 단순한 구조로 개발하였다. 1기압, 65 K으로 과냉한 액체질소를 이용하여 고온초전도 한류기를 냉각한다. 과냉질소를 사용함으로써 고온초전도체의 임계전류를 높이고 고온초전도 코일의 리액턴

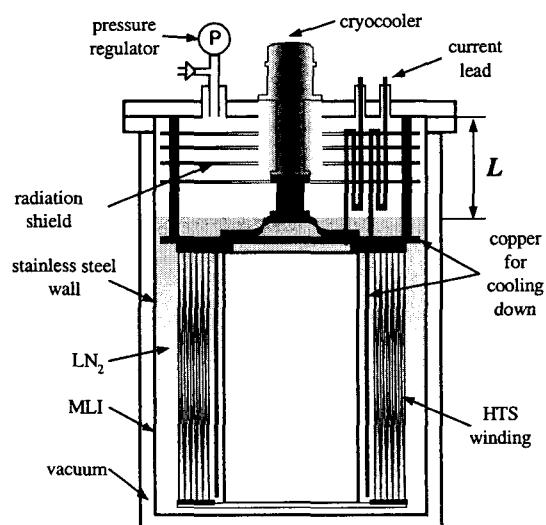


Fig. 1. Schematic of the sub-cooled nitrogen cooling system

스를 크게 하여, 더욱 안정적인 운전할 수 있게 한다.

본 논문에서는 과냉질소를 이용한 6.6 kV-200 A급의 고온초전도 한류기 DC reactor용 냉각시스템을 설계, 제작하고, 액체질소가 1기압 77 K에서 과냉상태인 1기압 65 K으로 냉각시키는 실험과 과냉상태에서 고온초전도 한류기의 단락시험시 온도변화에 대한 실험을 소개한다.

2. 설계 및 제작

유도형 한류기 DC reactor용 고온초전도 코일들의 크기는 Table 1.에 나온 것과 같다. 이 고온초전도 코일은 5개의 중공형 실린더가 동심 원을 이루도록 배치되어 있고, 내경은 600 mm, 외경은 780 mm이며, 높이는 736 mm이다. 이 고온초전도 코일의 총 인덕턴스는 약 100 mH로 훈치시 발열량은 냉각온도에 따라 약 5 - 10 kJ이다. 이 고온초전도 코일을 기준으로 하여 한류기용 DC Reactor용 냉각장치의 형상을 설계하였다.

Table 2.에는 유도형 한류기 냉동시스템의 제원을 나타내었다. 먼저 극저온용기의 형상을 살펴보면 제시된 고온초전도 코일과 부속품들이 조립되고 액체질소가 충분한 양이 채워질 수 있도록 설계하였으며, 이때 액체질소의 부피는 약 280 리터로 고온초전도 코일을 냉각시키고, 과냉상태를 유지하는데 충분한 부피이다.

전류도입선은 300 K에서 65 K사이에서 300 A미만으로 정상운전을 할 때 냉동부하가 최소가 되도록 설계하였다. 10 - 50 ms 동안 1000 A의 전류가 흘러도 냉각부하는 크게 변하지 않는다. 300 K에서 65 K사이에서 1000 A의 전류가 흐를 때를 기준으로 전류도입선을 설계하게 되면, 정상운전시 과도한 열부하가 발생하게 되므로 이러한 경우에는 300 K에서 65 K 사이에서 300 A의 전류가 흐를 때를 기준으로 전류도입선을 설계하여야 한다.[4] 이때의 최적 형상은 구리의 경우, 전류도입선의 직경을 12 mm로 할 경우, 길이는 2.47 m가 되어야 25.9

Table 1. specification of HTS coil

bobbin	length (m)	diameter (mm)	winding (turn)	inductance (mH)
1	800	600	106	4.4
2	800	640	99	
3	800	680	93	36.8
4	800	720	88	
5	800	760	83	99.18

W로 최소 발열량을 나타내기 때문에 이러한 형상을 구성하는 것은 구조상 불가능하므로, 황동을 사용한다. 황동의 경우, 300 K에서 65 K 사이에서 300 A의 전류가 흐를 때, 최소발열량은 24.4 W로 전류도입선의 직경을 12 mm이면, 전류도입선의 길이는 31.3 cm의 형상을 나타내서 냉각시스템을 구성하는데 무리가 없다.[5,6]

냉각시스템은 극저온용기를 개방형을 채택하였기 때문에 개방공간으로의 열침입이 상당히 크다. 이것을 효과적으로 막아내기 위하여, 개방공간의 대류를 막고, 또한 액체질소로의 복사열침입을 막기 위하여, 방사율이 높은 재료로 baffle을 설치한다. 이 baffle의 개수는 4개로 하였고, baffle 간의 간격은 상판에서 첫 번째 baffle까지는 100 mm이고, 두 번째와 세 번째 그리고 네 번째 baffle 각각의 간격은 50 mm로 하였다. 끝으로 마지막 baffle과 질소 자유표면사이의 거리는 약 200 mm 정도로 유지하였다. 또한, baffle에는 다수의 구멍을 뚫어서 전류도입선, 냉동기, 지지대, 신호선 등이 자유롭게 지날 수 있게 하였다.[7]

액체질소의 냉각은 냉동기의 끝단과 연결된 구리판에 의하여 이루어진다. 구리판의 구조는 냉동기의 끝단과 구리덩어리를 볼트로 접합하고, 이 구리덩어리와 십자로 겹친 구리판묶음을 볼트로 접합하고, 이 구리판묶음을 원형의 구리상판에 네 곳으로 이어 볼트 접합하였다. 원형의 구리상판과 수직 구리판이 볼트접합으로 연결하였다.

기계적 지지대는 열전도도가 낮으면서도 기계적 강도가 좋은 G-10 FRP를 사용하였으며, 길이 400 mm, 내경 10 mm, 외경 20 mm의 튜브 형태로 총 4개를 사용하였다. 냉동기는 Leybold사의 COOLPOWER 120T를 사용하였

Table 2. specification of cooling system

vessel	Diameter	840 mm
	Height	1320 mm
magnet	Inner Dia.	600 mm
	Outer Dia.	780 mm
LN ₂	Height	736 mm
	Volume	280 L
Current Leads	Length	300 mm
	Diameter	37.41 mm
Mechanical support	Number	4
	Length	400 mm
	Inner Dia	10 mm
	Outer Dia	20 mm
operation	Cryocooler	117W @ 77 K
	Room T	300 K
	LN ₂ T	65 K ~ 77 K
	Current	300 A

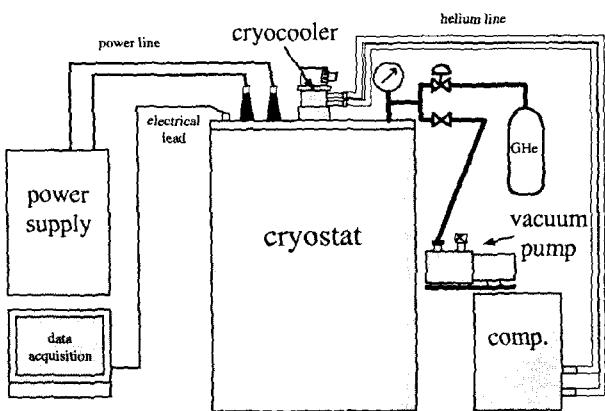


Fig. 2. schematic of cooling experiment

으며, 이 냉동기는 77 K에서 117 W, 65 K에서 105 W의 냉동용량을 가지고 있다.

3. 냉각실험 및 단락시험

냉각 실험은 고온초전도 코일의 임계전류측정을 위한 예비 냉각 실험과 단락시험을 위한 냉각까지 2회로 나누어 행하였다. Fig. 2.는 실험장치를 나타낸 개략도로써 실험장치의 구성은 고온초전도 코일을 위한 극저온용기와 극저온냉동기를 작동시키는 압축기, 온도센서의 데이터를 측정하고 기록하는 DAQ 보드와 컴퓨터, 고온초전도 코일에 전류를 공급하는 전류공급장치로 이루어진다. 냉각실험은 액체질소를 주입한 뒤, 냉동기를 작동시켜 냉각하였다. 예비 냉각 실험에서는 질소용기 내의 압력을 1 기압으로 유지하면서 냉각시키는 방법과 기체질소를 약 17 kPa까지 감압시킨 후, 다시 1 기압까지 기체헬륨을 주입하는 방법을 이용하여 냉각하였다.

질소용기의 압력을 1 기압으로 유지하면서 냉각시킬 경우에는 극저온용기에 액체질소를 주입한 후, 냉동기를 가동시켜 액체질소를 냉각시켰다. Fig. 3.는 냉각시간에 따른 각 부분의 온도변화를 나타낸 그래프로써, 액체질소의 온도가 78 - 75 K 사이를 오르내리면서 거의 냉각이 이루어지지 않음을 알 수 있다. 냉각이 이루어지

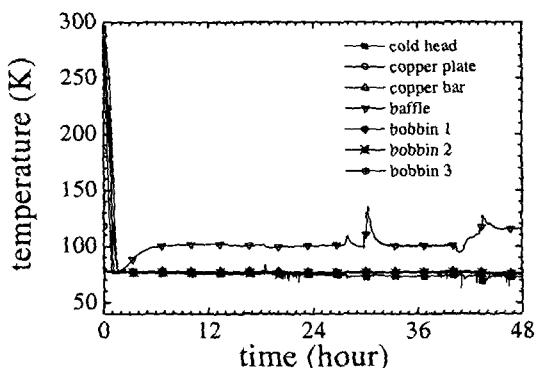


Fig. 3. 1st preliminary cooling test

지 않는 것은 최적설계된 전류도입선을 사용하지 않고 임계전류실험을 위하여 임의의 전류도입선을 사용하여 과도한 냉각부하가 발생하였기 때문이다. 다른 이유는 질소용기 내부의 압력을 기체질소 1기압으로 유지시키면서 냉각하기 때문에 기체질소와 액체질소사이의 상변화를 위한 잠열로 인하여 액체질소의 온도를 빠르게 낮추는 것이 어렵기 때문이다. Fig. 4.는 전류도입선을 제거하고 난 이후의 온도변화를 나타낸 그래프이다. 전류도입선을 제거하고 난 이후 액체질소의 온도가 시간당 약 0.1 K씩 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 72 K에서 임계전류 실험 결과, 인가전류 370 A에서 퀘치가 발생하였다.

두 번째 예비 냉각 실험에서는 전류도입선을 최소의 냉각부하를 갖는 최적형상의 활동으로 제작하여 설치하였다. 전류도입선을 FRP 관을 이용하여 절연하였다. FRP 관의 두께는 5mm이고 외경은 35 mm이다. Fig. 5.는 두 번째 예비 냉각실험의 온도변화 그래프이다. 단지 냉동기만을 이용하여 냉각할 때는 시간당 0.1 K 정도로 온도가 낮아졌으나, 진공펌프를 이용하여 기체질소의 압력을 약 17 kPa까지 낮추면 시간당 1.2 K 정도로 온도가 낮아지고, 65 K이 되었을 때, 1 기압까지 기체헬륨을 주입하면 1기압 65 K으로 과냉된 액체질소 상태를 얻을 수 있다. 감압방법은 로타리방식 진공펌프를 이용하여 1시간 작동에 10분씩 정지하는 방법으로 진행하였다. 온도가 가장 낮은 센서(bobbin 3)를 기준으로 65 K이 되었을 때(압력계: - 65 cmHg), 헬륨가스를 압력계의 눈금이 0.05 kgf/cm²가 될 때 주입하였다. 온도는 점차 상승하여 약 12시간이후에는 약 66 K (bobbin 3)을 유지하였다. 또한 압력도 다소 상승하여 0.1 - 0.15 kgf/cm² 정도가 되었다. 압력을 0.05 kgf/cm²에 맞추고 임계전류실험을 한 결과 약 470 A에서 퀘치가 발생하였다. 퀘치 발생시 약 0.05 - 0.1 kgf/cm²의 압력이 발생하였다. 안전을 위한 텔리프밸브는 약 0.3 bar에서 반응하는 것을 사용하였다.

단락시험을 위한 냉각실험은 Fig. 6.에 온도

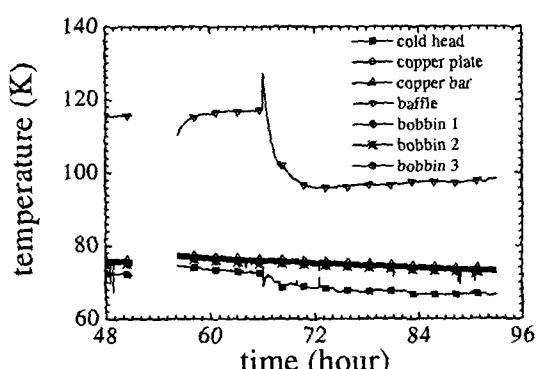


Fig. 4. 1st preliminary cooling test: modified cryostat

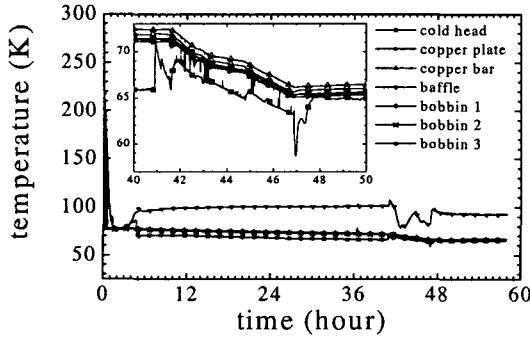


Fig. 5. 2nd preliminary cooling test

변화그래프로 나타내었다. 두 번째 예비냉각실험에서와 같은 방법으로 기체질소의 압력을 낮추고, 기체헬륨을 주입하여 1기압, 65 K의 액체질소를 만들었다. 온도가 다소 상승하는 이유는 단락시험으로 인한 안전 문제로 인하여 극저온냉동기의 전원을 차단하였기 때문이다. 1000 A의 사고전류가 흐르는 단락시험과정에서도 1기압, 65 - 66 K의 과냉상태를 잘 유지할 수 있었고, 그 결과 성공적으로 단락시험을 수행할 수 있었다.

4. 결과 및 고찰

과냉액체질소를 생성하기 위해서 극저온용기 내에 GM 극저온냉동기를 설치하고 극저온냉동기의 냉동용량만으로 액체질소를 냉각하였다. 이 경우 Fig. 4와 Fig. 5의 42시간 이전에서 보는 것처럼 액체질소의 냉각속도가 시간당 약 0.1 K 정도로 매우 느리게 나타난다. 그러나, Fig. 5의 42시간 이후는 극저온용기를 밀폐한 가운데 진공펌프를 이용하여 극저온용기의 내부의 기체질소의 압력을 액체질소의 온도가 65 K이 되는 포화압력 17.37 kPa까지 감압하여 액체질소의 온도를 65 K까지 냉각시켰다. 감압을 이용한 냉각방법의 냉각속도는 시간당 약 1.2 K로 극저온 냉동기만을 이용한 냉각방법의 냉각속도보다 약 10배정도 빠르게 나타났다. 포화증기압력을 낮 춤으로 냉각하는 방법은 진공펌프의 용량이 클 수록 냉각속도가 빨라질 수 있으며, 이러한 방법은 냉각용량이 큰 극저온냉동기를 사용하여 냉각 속도를 증가시키는 방법보다 매우 경제적이다. 기체헬륨을 가압하여 약 17 kPa인 극저온용기 내부의 압력을 1기압으로 높이는데 소요되는 시간은 1분이 채되지 않는다. 그러므로 감압하여 냉각한 후, 기체헬륨으로 가압하는 방법이 극저온냉동기만을 이용하여 냉각하는 방법보다 빠르게 냉각할 수 있음을 알 수 있다.

극저온냉동기만을 이용하여 액체질소를 냉각하는 방법은 Fig. 7.에서 점 1에서 점 2로 바로 상태를 변화시키는 것을 의미하고 감압하여 냉각한 후 기체헬륨을 이용하여 1기압, 65 K의 과냉질소를 생성하는 방법은 Fig. 7.에서 점 1에서

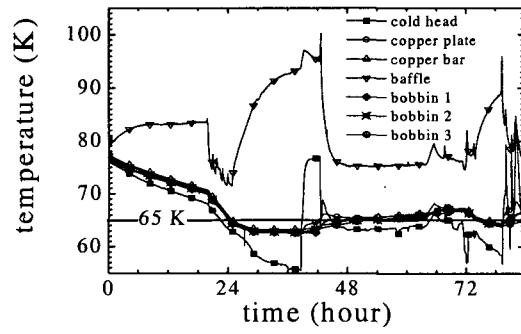


Fig. 6. short circuit test: operating current 200 A, fault current 1000 A

점 2'으로의 과정이 감압 냉각과정이고, 점 2'에서 점 2로의 과정은 기체헬륨으로 1기압까지 가압하는 과정을 나타낸다. 실제로 점 1에서 점 2로의 냉각은 액체질소의 전체가 65 K의 과냉질소로 냉각되는 것을 의미하는 것이 아니라 액체질소의 계면에서는 77 K의 포화 액체질소이된다. 액체질소의 계면과 액체질소 내부의 어느 한 지점은 65 K의 과냉질소가 되어 계면과 액체 내부에 온도차가 발생하게 된다. 그러나 감압 냉각을 이용한 방법으로 냉각하게 되면, 점 2'에서는 액체질소 전체가 65 K의 포화 액체질소가 되고, 기체헬륨으로 가압하게 되면 질소의 부분압력이 65 K일 때의 포화압력으로 유지되어 액체질소 전체가 1기압, 65 K의 과냉질소가 된다.

감압하여 냉각한 후, 기체헬륨으로 1기압까지 가압한 상태에서 극저온용기 내부의 압력을 나타내면,

$$P_{total} = P_{GN_2} + P_{GHe} \quad (1)$$

와 같다. 여기서 P_{total} 은 극저온용기 내부의 전체 압력을 나타내고, P_{GN_2} 는 극저온용기 내에 기체질소의 부분압력을, P_{GHe} 는 기체헬륨의 부분압력을 나타낸다. 기체질소의 부분압력 P_{GN_2} 이

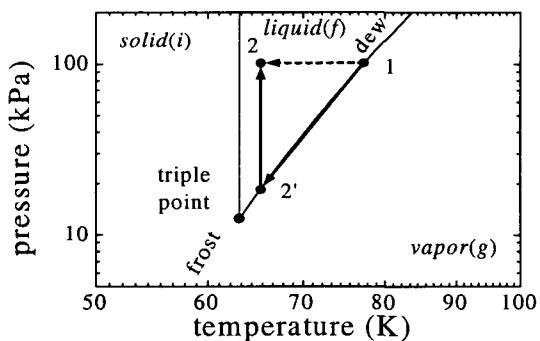


Fig. 7. change of state in the phase diagram of nitrogen

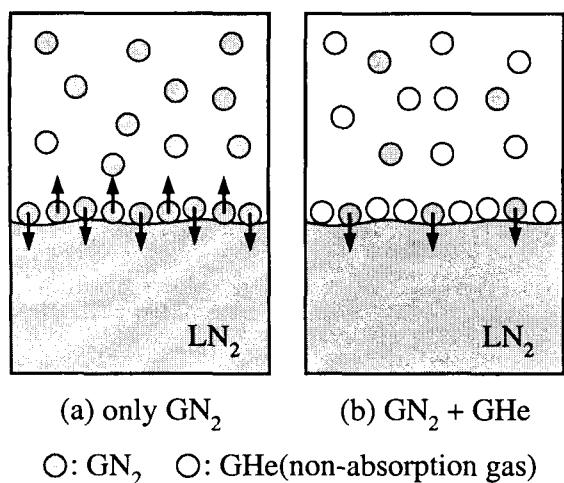


Fig. 8. model of phase change on the interface of nitrogen

액체질소가 65 K일 때의 포화증기압인 17.37 kPa이면, 전체압력 P_{total} 을 1 기압, 101.32 kPa로 만들기 위해서는 기체헬륨의 부분압력 P_{GHe} 은 83.95 kPa이 되어야 한다.[8]

극저온용기의 전체 압력 P_{total} 을 1 기압으로 유지하기 위하여 기체헬륨을 주입하는 것은 65 k에서 기체헬륨이 액체질소에 응축하거나 응고되어서 흡수되지 않기 때문이다. 수소와 헬륨, 네온을 제외한 모든 극저온 유체들의 비등점이 기체질소의 비등점보다 높아서 65 K에서 응축하거나 응고되어 액체질소에 흡수되기 때문에, 헬륨과 같은 액체질소에 흡수되지 않는 극저온유체를 극저온용기의 압력을 조절하는 물질로 사용하여야 한다. 본 실험에서는 액체질소에 흡수되지 않는 비흡수기체 중 가장 안정하고 비교적 가격이 저렴한 기체헬륨을 극저온용기의 압력을 조절하는 물질로 사용하였다.

기체질소만으로 1 기압을 유지하면서 극저온 냉동기만으로 냉각하게 되면, 극저온냉동기로 인해 액체질소가 냉각되고 액체질소의 온도가 낮아지면 질소의 포화증기압이 낮아져서 액체질소가 기체질소로 쉽게 상변화를 할 수 있게 된다. 그래서 Fig. 8. (a)에서 나타낸 것과 같이 액체질소의 계면에서는 질소가 기체에서 액체로, 액체에서 기체로 끊임없이 상변화가 일어나게 된다. 이러한 현상은 극저온냉동기에 매우 커다란 냉동부하로 작용하게 되어서 과냉 액체질소를 생성하는 시간이 매우 증가하는 요인이 된다.

Fig. 8. (b)는 극저온용기 내부의 기체조성이 기체질소와 액체질소에 흡수되지 않는 비흡수 기체인 기체헬륨으로 이루어져 있어서, 기체질소의 부분압력 P_{GN_2} 가 65 K의 액체질소의 포화압력과 같을 때 액체질소는 전체압력 P_{total} 이 상승하여도 65 K의 온도를 유지할 수 있음을 보여준다.

5. 결 론

고온초전도 한류기의 개발에 있어서 가장 중요한 기술인 과냉질소 냉각시스템을 개발하였다. 과냉질소 냉각시스템은 1 기압에서 포화상태인 77 K의 액체질소를 사용할 때보다 열적 안정성이 우수하며, 고온초전도체의 사용량도 줄일 수 있어서 경제적이다. 본 냉각시스템의 개발로 인하여 72 K과 65 K 영역에서의 고온초전도체 임계전류 측정시험이 이루어질 수 있었으며, 기존의 과냉질소 냉각시스템의 단점으로 지적되었던 매우 긴 냉각시간을 개선하여, 기체질소의 포화증기압력을 이용한 냉각방법으로 냉각시간을 획기적으로 줄일 수 있었다. 한류기는 전력계통에 설치되어 장기간 안정적인 운전을 필요로 하는 전력기기이므로, 이후에 과냉상태에서 안정적으로 장기간 운전 할 수 있는 냉각시스템 개발에 관한 연구가 필수적이다.

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

(참 고 문 헌)

- [1] W.T. Norris, A. Power, " Fault Current Limiter using Superconductors", Cryogenics, Vol. 37, No. 10, pp 657-665, 1997

[2] Takechi Ohkuma, Yoshihiro Iwata , "Superconducting Fault Current Limiter", 低溫工學, Vol. 32, No. 8, pp 366-373, 1997

[3] 권기범, 장호명, "극저온냉동기로 전도냉각되는 초전도시스템의 열적 안정성", 한국초전도저온공학회논문지, 3권, 1호, pp 56-63, 2001

[4] 김형진, 권기범, 정은수, 장호명, "6.6 kV-200A급 초전도 한류기 DC reactor용 전류도입선의 비정상상태 해석", 한국초전도저온공학회 2003년 학술대회 논문집, pp 182-185, 2003

[5] 송성재, 장호명, "극저온 냉동기로 냉각되는 이중전류도입선의 최적설계", 공기조화냉동공학논문집, 제9권, 제4호, pp 552-560, 1997

[6] H.M. Chang, S.W. Van Sciver, "Thermodynamic optimization of conduction-cooled HTS current leads", Cryogenics, Vol.38 no.7..pp.729-736, 1998

[7] 최연석, 장호명, Steven W. Van Sciver "HTS변압기에서 액체질소 표면상부의 열전달 해석", 한국초전도저온공학회 2003년 학술대회 논문집, pp 174-177, 2003

[8] 박영무, 박경근, 장호명, 김영일, "열열학", 사이텍미디어, 제5판, p 446, 2000