고자기장용 자석을 위한 밀폐순환형 냉각장치

Closed-Loop Cooling System for High Field Mangets

최연석*, 김동락**, 이병섭*, 양형석*, T. A. Painter***, J. R. Miller***

Y. S. Choi*, D. L. Kim**, B. S. Lee*,
H. S. Yang*, T. A. Painter***, and J. R. Miller***

Abstract: A closed-loop cryogenic cooling system for high field magnets is presented. This design is motivated by our recent development of cooling system for 21 tesla Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance (FT-ICR) superconducting magnets without any replenishment of cryogen. The low temperature superconducting magnets are immersed in a subcooled 1.8 K bath, which is connected hydraulically to the 4.2 K reservoir through a narrow channel. Saturated liquid helium is cooled by Joule-Thomson heat exchanger and flows through the JT valve, isenthalpically dropping its pressure to approximately 1.6 kPa, corresponding saturation temperature of 1.8 K. Helium gas exhausted from pump is now recondensed by two-stage cryocooler located after vapor purify system. The amount of cryogenic heat loads and required mass flow rate through closed-loop are estimated by a relevant heat transfer analysis, from which dimensions of JT heat exchanger and He II heat exchanger are determined. The detailed design of cryocooler heat exchanger for helium recondensing is performed. The effect of cryogenic loads, especially superfluid heat leak through the gap of weight load relief valve, on the dimensions of cryogenic system is also investigated.

Key Words: heat transfer, heat exchangers, cryostats, superconducting magnets.

1. 서 론

초전도 자석은 생물, 화학, 물리, 그리고 재료분야의 분석을 위한 다양한 연구장비에 많이 사용된다. 근래에 생물학 분야에서 거대 단백질체 구조분석을 위해서 21 테슬라 (T: tesla) 이상의 고자기장 초전도 자석을 가지는 핵자기공명(NMR: Nuclear Magnetic Resonance) 장치를 제작하여 성공적으로 운영하고 있으며 [1-3], 최근에는 950 MHz NMR 장치를 개발하여 성능평가 중에 있다. 초전도 자석이 고자기장화 되어감에 따라 저온용기 (Cryostat)의 크기도 대형화 되어가고 있으며, 극저온을 유지시키기 위해 효율적, 안정적이며 운영하기가 편한 냉각시스템이 요구되고 있다.

NMR 장치를 비롯한 대부분의 연구장비에서는 초전도 자석이 수직방향으로 설치되는데 비하여, FT-ICR (Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance)질량분석장치에서는 수평방향으로 설치된다 [4]. FT-ICR 장치를 위한 21 T 초전도 자석 개발이 한국 기초과학지원연구원(KBSI)와 미국 국립고자장연구소(NHMFL)의 공동연구로 진행되고 있다 [5]. 공동연구의 목표는 1.8 K에서 작동하는 컴팩트하고 효율이 높은 수평형 초전도 자석을 개발하는 것이다. 정밀한 자기장 균일성을 요구하는 FT-ICR 질량분석기 또는 NMR 고자기장 초전도자석 시스템에서는 고자기장화 되어감에 따라 장치가 대형화되며 액체헬륨 및 액체질소의 빈번한 공급이 필요하게 된다. 극저온 액체의 빈번한 공급문제를 개선하기 위하여 21 T 초전도 자석을 위한 효율적인 냉각시스템의 개념이 소개되었다 [5]. Fig. 1은 21 T 초전도 자석용 냉각장치의 단면도이다. 저온용기의 중앙에 초전도 자석이 헬륨 II 용기에 잠겨져 있으며, 저온용기에 설치된 2단 소형냉동기는 복사열차폐체 및 4.2 K 헬륨용기를 냉각한다.

본 논문에서는 21 T FT-ICR 초전도 자석을 위한 밀폐순환형 냉각시스템의 실질적인 구성요소에 대한 설계방법이 소개된다. 밀폐순환형 냉각시스템은 초기 냉각 후 정상상태 운전중에는 액체헬륨의 공급이 필요없기 때문에 매우 효율적인 시스템이다. 하지만, 이 시스템의 가능성을 확인하기 위해서는 냉각시스템 내부의 정확한 온도분포를 열적으로 해석하는 것이 필요하다. Joule-Thomson (JT) 냉각장치, 헬륨 II 열교환기,

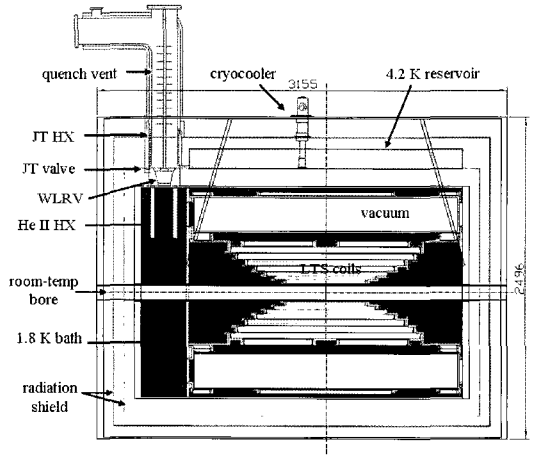

Fig. 1. Cross-sectional view of cooling system for 21 T FT-ICR magnets.

* 정 회 원 : 한국기초과학지원연구원 선임연구원
** 정 회 원 : 한국기초과학지원연구원 책임연구원
*** 정 회 원 : 미국 국립고자장 연구소 (NHMFL)
원고접수 : 2006년 1월 31일
심사완료 : 2006년 3월 7일

그리고 냉동기 열교환기 등의 상세설계가 관련된 열전달 해석을 통해서 이루어 진다. 본 연구의 해석 결과는 NMR, MRI 와 같은 고자기장용 초전도자석 응용을 위한 냉각장치의 설계에 많은 도움을 줄 것이다.

2. 밀폐순환형 냉각장치

Fig. 2는 본 연구에서 다루어질 21 T 초전도 자석을 위한 밀폐순환형 냉각시스템의 개략도 이다. 초전도 자석은 안전을 위해 설치된 Weight Load Relief Valve (WLRV)의 매우 좁은 틈을 통하여 4.2 K 헬륨용기와 연결된 1 기압, 1.8 K 초유동 헬륨 용기안에 잠겨져 있다. 4.2 K 액체헬륨은 JT 열교환기에 의해 냉각되고 JT 밸브를 통과하면서 Fig. 3에서 보는 바와 같이 일정한 엔탈피를 유지하면서 약 1.6 kPa 의 압력 (상응하는 포화온도 1.8 K) 으로 떨어진다. 헬륨은 헬륨 II

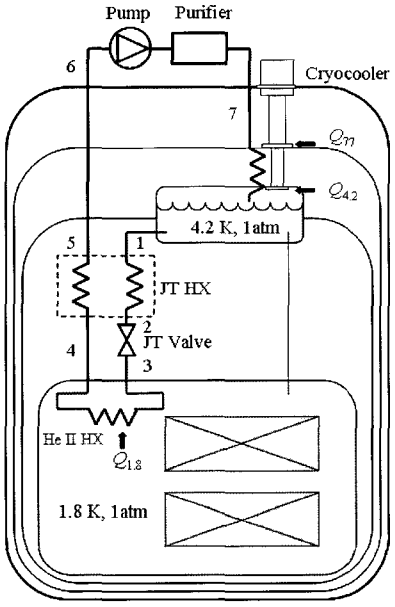

Fig. 2. Schematic of closed-loop cryogenic system for 21 T FT-ICR magnets.

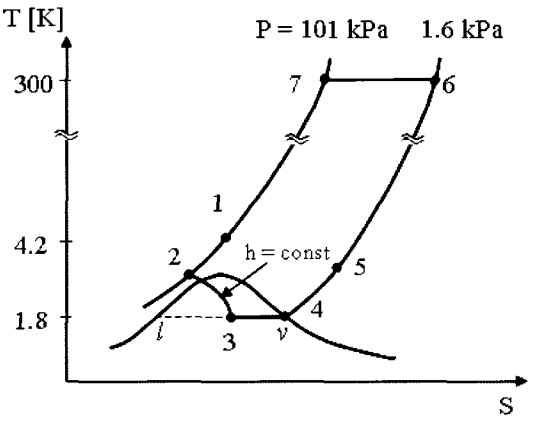

Fig. 3. Thermodynamic cycle of cryogenic cooling system.

열교환기로부터 증기상태로 나와 JT 열교환기를 지나간다. 저온용기 외부에 위치한 진공펌프를 통과한 헬륨기체는 정화장치에 의해 정화되고 저온용기에 설치된 2단 냉동기에 의해 액화되어 4.2 K 헬륨용기에 저장된다. 따라서 이 시스템은 밀폐시스템이다.

Fig. 2에 보여준 21 T 초전도 자석을 위한 냉각시스템에는 다음과 같은 4개의 열손실이 있다 [5]; 지지대를 통한 열전도(Q_k), 복사열전달 (Q_r), 전류도입선을 통한 열전달 (Q_l), 그리고 4.2 K의 액체헬륨과 1.8 K의 초유동유체사이의 열손실 (Q_{sl}). 초전도 자석이 잠겨있는 용기의 총 열손실량은 식 (1)로부터 구할 수 있으며, 이 양은 JT 냉각장치의 냉각용량과 평형을 이루어야 한다.

$$Q_{1.8} = Q_k + Q_r + Q_l + Q_{sl} \tag{1}$$

열역한 제1법칙을 이용하면 헬륨 II 열교환기를 통과하는 질량유량을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{m} = \frac{Q_{1.8}}{h_4 - h_2} \tag{2}$$

여기서, h는 엔탈피를 의미하며, 아래첨자 2 그리고 4는 각각 헬륨 II 열교환기의 입구 및 출구를 나타낸다.

2.1. Joule-Thomson 열교환기

Hampson 타입 [6-7]의 열교환기가 21 T 초전도 자석을 위한 냉각시스템의 JT 열교환기로 사용될 예정이다. 액체헬륨은 핀(fin)이 설치된 관을 통과하며, 1.8 K 헬륨 II 열교환기로부터 펌프로 들어가는 헬륨가스에 의해 예냉각된다. 따라서 JT 열교환기를 통과하는 유동의 형상은 각각의 나선형 관을 기준으로 보면 교차유동(Cross-flow)이나, 전체적으로 보면 대향유동(Counter-flow)이다[8]. 열교환기의 표면적은 NTU-effectiveness 방법에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{A = Ntu \bullet C_{\min}}{U} \tag{3}$$

여기서 Ntu 와 C는 각각 열전달 단위수 및 비열을 의미한다. 관의 외부 표면적을 기준으로 하면 총 열전달계수(U)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U = \left(\frac{1}{h_0} + \frac{D_0 \bullet \ln(D_0/D_i)}{2k_w} + \frac{D_0/D_i}{h_i} \right)^{-1} \tag{4}$$

여기서 D와 k는 각각 관의 지름과 열전도도를 의미하며, 아래첨자 i와 o는 각각 관의 내부 및 외부를 의미한다. 관 외부 및 내부의 대류열전달계수(h)는 다음의 관계식으로부터 구할 수 있다 [7-8].

$$h_0 = \frac{0.346 Re^{-0.407} C G_{\max}}{\Pr^{2/3}} \tag{5}$$

$$h_i = \frac{0.023 Re^{-0.2} B_c C G_{\max}}{\Pr^{2/3}} \tag{6}$$

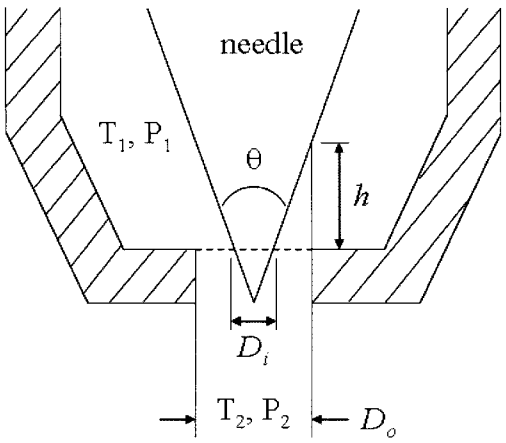

Fig. 4. Cross-sectional view of Joule-Thomson valve.

식(6)에서 C와 G_{max}는 각각 비열 및 단위면적당 최대 질량유량을 의미하여, B_c는 관의 곡률 때문에 발생하는 2차유동의 영향으로 생기는 코일보정인자(Coil correction factor)로 다음의 관계식으로 구할 수 있다 [8].

$$B_c = 1 + 3.6\left(1 - \frac{D_i}{D_m}\right)\left(\frac{D_i}{D_m}\right)^{0.8} \tag{7}$$

여기서 D_i는 관의 내부지름을 나타내며, D_m는 코일의 평균지름을 의미한다.

2.2. Joule-Thomson 밸브

JT 밸브는 밸브를 통과하는 유체의 압력을 강하시켜 일정한 엔탈피상태에서 냉각효과를 발생시킨다. 본 연구에서 다루어질 JT 밸브를 Fig. 4에 개략적으로 그려보았다. JT 열교환기를 통과한 액체헬륨은 저온용기 외부에 설치된 조절장치에 의해 교축(Throttle)되어 1.8 K의 헬륨 II 열교환기로 들어간다. JT 밸브의 밸브시트(Seat)의 수력직경은 침(Needle)의 위치에 따라 변하며 다음의 관계식으로 구할 수 있다.

$$D_h = 4\frac{A}{P} = D_o - D_i = 2h\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{8}$$

여기서 h는 밸브시트로부터의 높이를 의미하며, θ는 침의 각을 의미한다. JT 밸브를 통과하는 질량유량은 밸브시트의 수력지름에 의해 결정되며, 냉각용량은 질량유량 및 헬륨의 증발잠열을 이용하여 구하였다.

2.3. 헬륨 II 열교환기

Fig. 1에서 보는 바와 같이 구리 실린더 용기의 헬륨 II 열교환기(He II HX)는 표면을 통하여 압력이 높은 (1기압) 헬륨 II 용기와 열교환을 한다. 헬륨 II 열교환기의 최대 열전달양은 다음과 같이 표현된다 [9].

$$Q_{\max} = A\left(\frac{\rho g \sin\alpha\, RT^2 f^{-1}}{h_{fg} P_0}\right)^{1/3} \tag{9}$$

식(9)에서 A 및 α는 각각 액체헬륨의 자유표면적 및 열교환기 각도를 의미하여, f^{-1}은 헬륨 II 열전도 함수이며, 식(10)으로부터 구할 수 있다 [9-10].

$$f^{-1}(T,P) = g(T_\lambda)\left(t^{5.6}\left(1 - t^{5.6}\right)\right)^3 \tag{10}$$

여기서 $g(T_\lambda) = \rho^2 S_\lambda^4 T_\lambda^3 / A_\lambda$이며 $t = T/T_\lambda$ 이다. 열교환기는 최대열전달 상태를 만족시킬 수 있도록 충분한 표면적을 가져야 한다.

$$A_s = \frac{Q_{\max}}{U\Delta T} \tag{11}$$

여기서 ΔT는 초전도 자석용기와 열교환기 표면사이의 온도차를 의미한다. 헬륨 II 열교환기를 통한 열교환은 Kapitza 전도와 열교환기 벽의 전도이며, 따라서 총 열전달 계수는 다음과 같다.

$$U = \left(\frac{1}{h_{Ki}} + \frac{t}{k_s} + \frac{1}{h_{Ko}}\right)^{-1} \tag{12}$$

여기서 k_s 와 t는 각각 열교환기 재질의 열전도도와 열교환기 벽의 두께를 의미한다. Kapitza 전도계수(h_K)는 1.8 K에서 약 4 kW/m^{2}K 이며, 두께 4 mm 구리의 k_s/t 값은 약 100 kW/m^{2}K 이다.

2.4. 냉동기 열교환기

정화된 헬륨가스는 냉동기의 1단 냉동부에 의해 예냉각되고 2단 냉동부에 의해 액화된다. 냉동기 냉동부의 표면적은 매우 제한되어 있으므로 Fig. 5에 보인 바와 같이 구리실린더를 냉동부에 열결시키면 열교환 면적을 크게 만들 수 있다. 헬륨가스가 통과하는 구리관을 위에 언급한 구리실린더에 부착시켜면 헬륨가스

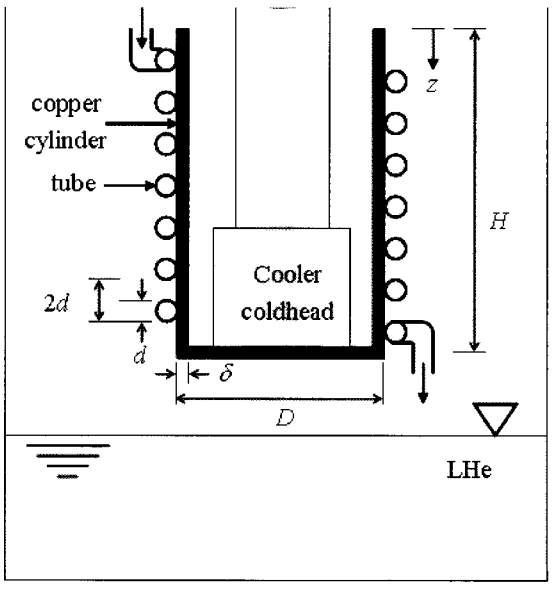

Fig. 5. Cryocooler heat exchanger on extended surface of copper cylinder.

액화를 위한 냉동기 열교환기를 만들 수 있다. 열교환기로 들어가는 헬륨의 온도는 냉동기의 1단 냉동부의 온도와 같다. 이 시스템에서 열교환 방식은 구리 원통에서의 열전도와 관내부에서 헬륨가스의 강제 대류열전달 이다. 구리실린더 및 구리관의 크기, 그리고 헬륨가스 질량유량이 열교환기의 출구온도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 에너지 평형 관계식을 도출하였다. 이 관계식들을 이용하여 구리실린더 및 관 내부 헬륨가스의 수직방향 온도분포를 구하였다.

$$k(\pi D\delta)\frac{d^2T_C}{dz^2}+h\frac{\pi^2 D}{2}(T_{He}-T_C)=0 \qquad (13)$$

$$\dot{m}_{He}C_P\frac{dT_{He}}{dz}-h\frac{\pi^2 D}{2}(T_{He}-T_C)=0 \qquad (14)$$

식(13), (14)의 경계조건들은 다음과 같다.

$$T_{He}=T_{cooler,1st},\ \frac{dT_C}{dz}=0\ \ at\ \ z=0 \qquad (15)$$

$$T_C=T_{cooler,2nd}\ \ at\ \ z=H \qquad (16)$$

식(13), (14)는 수치해법에 의해 동시에 풀 수 있다. 4차 Runge-Kutta 방법이 수치적분을 위해 사용되었고, 1차 내삽법에 의한 슈팅(Shooting)방법이 초기값을 효율적으로 찾는데 사용되었다 [11].

3. 결과 및 토의

초전도 자석용 용기의 열손실 중, 안전을 위해 설치된 Weight Load Relief Valve (WLRV)의 간극을 통한 초유동유체의 열손실이 정상상태에서 가장 지배적이다. Fig. 6은 WLRV의 간극에 따른 전체 열손실 및 필요한 질량유량을 보여준다. 초유동유체의 열손실은 간극 20 ~ 140 μm 에 대하여 Mardion 모델 [12]. 을 이용하여 계산하였다. 간극이 증가하면 총 열손실량은 증가하며, 주어진 간극에 대하여 열손실량은 0.25 ~1.55 W 이다. 냉각시스템을 냉각시키기 전에 초전도 자석용기를 진공펌프 및 헬륨가스를 이용하여 미세한 분진 등을 제거하면 WLRV의 간극을 20 μm 까지 줄일 수 있다 [13]. 질량유량 또한 간극에 비례하며, 주어진 간극에 대하여 질량유량은 0.013 ~ 0.079 g/s 이다.

대향유동 열교환기가 JT 냉각장치에 사용되며, WLRV의 간극이 50 μm일때 필요한 열교환기 표면적은 0.2 m^2이다. 열교환기 관의 외부 및 내부의 대류 열전달계수는 각각 9.5 와 406 W/m^2K 이다. 여기에서 코일보정계수는 1.16이다. 즉, 코일의 곡률이 직선형 관에 비하여 열전달계수를 16% 향상시킨 것을 알 수 있다. 열교환기의 자세한 크기 및 재질을 Table 1에 정리하였다.

Fig. 7에 JT 밸브시트(Seat)로부터 침(Needle)의 위치에 따른 냉각용량을 침의 각도에 대하여 그려보았다. 주어진 침의 각도에 대하여 냉각용량이 많이 필요할수록 침의 위치 또는 침의 변위(Stroke)는 증가한다. 원뿔형 밸브의 간극이 50 μm일때 총 열손실량은 0.528 W 이며, 따라서 침의 각도가 2° 이면 0.35 mm 의 변위가 필요하다.

헬륨 II 열교환기의 표면적을 초전도 자석용기와 열교환기 표면사이의 온도차에 대하여 Fig. 8에 그려보았다.

앞에서 언급한 바와 같이 초전도 자석용기의 총 열손실은 WLRV의 간극을 통한 초유동유체의 열손실에

Table 1. Summary of Joule-Thomson heat exchanger.

Type		Hampson type, counter-flow
Axial length of tube		0.28 m
Diameter of mandrel		2 m
Number of Pass		16 turns
Tube	Material	Stainless steel 304
	Outer diameter	6.35 mm
	Thickness	0.89 mm
	Length	11 m
Fin	Material	Copper (OFHC)
	Height	4.67 mm
	Thickness	0.38 mm
	Pitch	1.4 mm

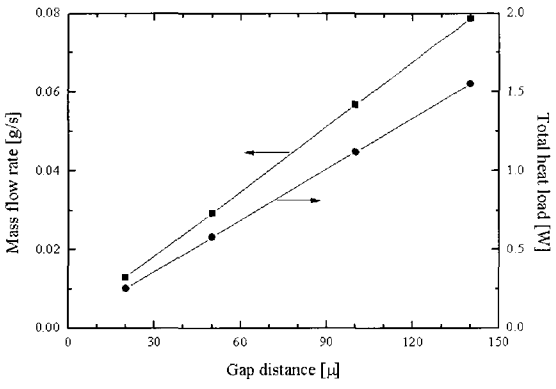

Fig. 6. Total heat load in magnet bath and mass flow rate.

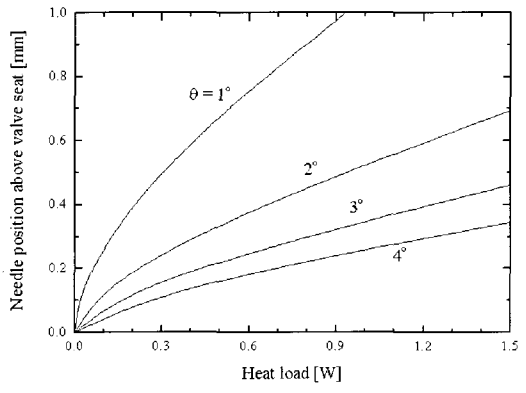

Fig. 7. Needle position above JT valve seat versus heat load.

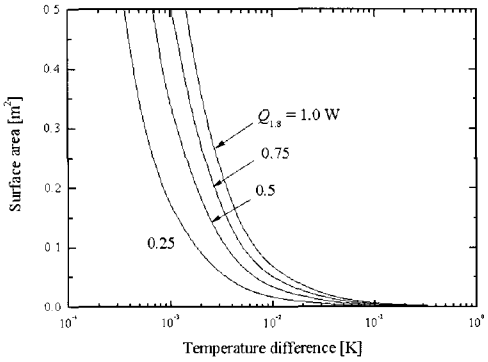

Fig. 8. Required surface area of helium II heat exchanger.

크게 의존한다. 따라서 필요한 열교환기의 표면적을 총 열손실의 범위인 0.25~1.0 W 에서 고찰하였다. 주어진 열손실에 대하여 초전도 자석용기와 열교환기 표면 사이의 온도차를 줄이기 위해서는 헬륨 II 열교환기의 표면적이 커야한다. 주어진 초전도 자석용기와 열교환기 표면 사이의 온도차에 대하여 열손실량이 커지면 헬륨 II 열교환기의 표면적도 커져야 한다. 총 열손실량이 0.5 W 일때 (또는 WLRV의 간극이 50 μm일때), 초전도 자석용기와 열교환기 표면 사이의 온도차를 1 mK 으로 하려면 0.35 m^2 의 열교환기 표면적이 필요하다. 식(9)에서 보는 바와 같이 최대 열전달율은 각도에 의존하며, 90° 일때 최대값을 갖기 때문에 수직형 열교환기가 사용된다.

헬륨액화용 냉동기 열교환기의 출구에서 헬륨가스 온도를 구리 실린더의 지름에 대하여 Fig. 9에 나타내었다. 헬륨의 질량유량은 0.025 g/s, 구리 실린더의 높이는 200 mm, 그리고 구리 관의 지름은 4.7 mm 이다. 총 열손실 및 상용 냉동기의 성능곡선 [14] 으로부터 냉동기 냉동부의 온도를 구할 수 있는데, 1단 냉동부의 온도는 70 K 그리고 2단 냉동부의 온도는 4 K 였다. 구리 실린더의 지름이 증가할수록 열교환기 출구에서 헬륨의 온도는 낮아지며, 4.2 K에서 기체에서 액체로 상변화가 일어난다. 또한, 구리 실린더의 두께가 증가할수록 열교환기 출구에서 헬륨의 온도는 낮아진다. 열교환기 입구의 온도 및 구리

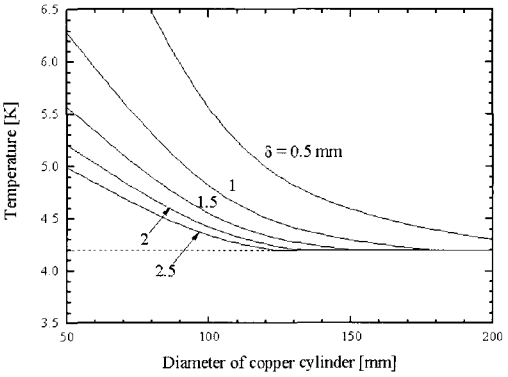

Fig. 9. Required surface area of helium II heat exchange.

실린더의 두께에 따라 다르지만 열교환기 출구에서 헬륨의 온도가 4.2 K 가 되려면 지름은 120 mm 이상이 되어야 한다. 열교환기 입구의 온도가 70 K 일때, 지름 150 mm 그리고 두께 2 mm 의 구리 실린더가 필요하다.

4. 결 론

고자기장 응용을 위한 밀폐순환형 냉각시스템을 검증하기위한 포괄적인 열전달 해석이 성공적으로 수행되었다. 2단 냉동기는 복사열차폐체 및 4.2 K 액체헬륨 용기를 냉각시키며, 상용 소형냉동기의 냉각용량 (1.5 W @4.2 K)은 4.2 K 헬륨용기로 침입되는 열부하(1.2 W)를 만족시킨다. 열해석에 의해 결정된 1.8 K 초유동 헬륨용기로의 열부하(0.5 W)를 냉각시키기 위한 JT 냉각장치, 헬륨 II 및 냉동기 열교환기의 자세한 형상 및 크기가 결정되었다. 냉동기를 이용한 밀폐순환형 냉각시스템은 21 T FT-ICR 뿐만아니라 NMR, MRI 와 같은 고자기장 초전도자석 응용에 사용될 수 있는, 크기 및 효율적 측면에서 매우 우수한 냉각장치임을 알 수 있으며 실험적 검증이 가까운 미래에 수행될 예정이다.

감사의 글

This research is supported by a joint grant from the Ministry of Science and Technology in Korea, and the National High Magnetic Field Laboratory sponsored by the National Science Foundation and the State of Florida in USA.

참 고 문 헌

[1] National Research Council, "Opportunities in high magnetic field science", National Academy of Sciences, Washington D.C., 2004, Available from: http://www.nap.edu.

[2] Dixon I. R. et al., "Performance of the ultra wide bore 900 MHz NMR magnet at the National High Magnetic Field Laboratory", IEEE Trans Appl Supercond, Vol. 15, 1334-1337, 2005.

[3] Kiyoshi T. et al., "Operation of a 920-NHz high-resolution NMR magnet at TMI", IEEE Trans Appl Supercond, Vol. 13, 1391-1395, 2003.

[4] Painter T. A. et al., "Conceptual design of superconducting magnet system for 21 T fourier transform ion cyclone resonance mass spectrometer", In: International Conference on Magnet Technology, September 2005, Paper#TUA3OR3.

[5] Choi Y.S. et al., "Conceptual design of cryogenic cooling system for 21 T ICR Magnetsmeter", In: International Conference on Magnet Technology, September 2005, Paper#WEA03PO10.

[6] Ng K.C. et al., "Experimental and numerical study on a miniature Joule-Thomson cooler for steady-state characteristics, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 45, 609-618, 2002.
[7] Ueno Y. et al., "Numerical study on characteristics of a pre-cooling He II heat exchanger", Advances in Cryogenic Engineering, Vol.49, 1039-1046, 2004.
[8] Barron R.F., "Cryogenic Heat Transfer", Philadelphia, Taylor & Francis, 1999
[9] Van Sciver S.W., "Heat transfer through an extended surface containing He II", Journal of Heat Transfer, Vol.121, 142-147, 1999.
[10] Van Sciver S.W., "Helium Cryogenics", New York, Plenum Press, 1986.
[11] Gerald C.F, Wheatly P.O., "Applied Numerical Analysis", New York, Addition-Wesley, 1996.
[12] Mardion G.B. et al., "Practical data on steady state heat transport in superfluid helium at atmospheric pressure", Cryogenics, Vol.19, 45-47, 1979.
[13] Matsumoto F. et al., "Testing of superfluid-cooled 920 MHz NMR cryostat", Advances in Cryogenic Engineering, Vol.47, 383-390, 2002.
[14] Product Catalogue of Cryomech, Model PT415, New York, 2005. Available from: http://www.cryomech.com.

저 자 소 개

최연석(崔然惜)
1969년 4월 5일생, 1994년 홍익대학교 기계공학과 졸업, 2004년 Florida State Univ. 기계공학과 졸업(저온공학, 공학박사), 2000년 ~ 2005년 NHMFL 연구원, 현재 한국기초과학지원연구원 선임연구원.

김동락((金東洛)
1953년 4월 4일생, 1976년 경북대학교 물리학과 졸업, 1993년 일본 오사카 시립대학 대학원 학위과정 수료(초전도 물리학, 이학박사), 1993년 ~ 현재 기 초과학지원연구원 책임연구원.

이병섭((李炳燮)
1968년 9월 3일생, 1994년 충남대 기계공학과 졸업, 1996년 동 대학원 기계공학과 공학석사, 2001년 8월 동 대학원기계공학과 공학박사 졸업(Ph. D), 현재 한국기초과학지원연구원 고자기장개발팀 선임연구원.

양형석(梁炯晳)
1969년 5월 8일생, 1994년 홍익대학교 기계공학과 졸업, 1998년 Tsukuba 대학 대학원 이공학연구과 졸업(공학석사), 2001년 동대학 대학원 공학연구과 저온공학전공 (공학박사), 현재 한국기초과학지원연구원 고자기장개발팀 선임연구원.

Thomas A. Painter
1964년 11월 8일생, 1988년 MIT 전기공학과 졸업(공학석사), 1989년 ~ 1991년 MIT Plasma Fusion Center. 1992년 ~ 현재 NHMFL, Associate in Engineering, MS&T Assistant Director.

John R. Miller
1944년 8월 10일생, 1973년 University of Virginia 물리학과 졸업(이학박사), 1974년 ~ 1983년 ORNL, 1983년 ~ 1991년 LLNL, 1991년 ~ 현재 NHMFL, Senior Scientist, MS&T DirectoMS&T Director.