

공 학 석 사 학 위 논 문

극저온 냉동기용 Cold Box에 관한 연구



이 논문을 통하여 그 공로로 제출함

2004년 2월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

권 용 하

권용하의 공학석사 학위논문을 인준함

2003년 12월

주 심 공학박사 오 후 규 (인)

위 원 공학박사 김 종 수 (인)

위 원 공학박사 김 영 수 (인)

목 차

ABSTRACT	I
NOMENCLATURE	III
1. 서 론	1
2. 기본 이론	4
2.1 재료	4
2.2 단열	5
2.2.1 MLI	5
2.2.2 열설계	10
2.2.3 기술적 양면성	14
2.3 진공	14
2.3.1 진공펌프	14
2.3.2 Leak	17
2.3.3 수증기	20
2.3.4 Thermal desorption(bake)	21
2.3.5 Getter	23
2.4 Cool down	27
2.5 Reverse Brayton cycle	29
2.6 극저온 냉동 시스템	32

3. 실험장치 및 방법	36
3.1 진공배기	36
3.2 Cool down	39
3.3 Insulation test	41
3.4 반복 실험	43
 4. 결과 및 고찰	 44
4.1 진공배기	44
4.1.1 Test 1	44
4.1.2 Test 2, Test 3	47
4.2 Cool down	50
4.2.1 Test 1	50
4.2.2 Test 2, Test 3	52
4.3 Insulation test	55
 5. 결론	 57
 참고문헌	 59

A Study on Cold Box for Cryocooler System

Yong-Ha, Kwon

Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering,

Graduate School

Pukyong National University

Abstract

Cold box is demanded to maintain cryogenic condition for stable drive of superconductivity & cryogenic apparatus.

If short term and small scale system, it is possible to create cryogenic condition by just use of cryocooler or liquified gas like nitrogen and neon, helium, etc. But if long term and large scale system that need stable drive, it is demanded very difficult, complicate pre-process.

In cryogenic condition, Austenitic stainless steels(300 series), GFRPs, etc. are used for structure materials. Because many material properties change in cryogenic condition, special cautions are demanded on welding, brazing, etc.

Because insulation and structural strength are in inverse proportion, balance is important of these two matters.

MLI(Multi-Layer Insulation) is used on insulation. It is demanded

'high vacuum(about $10^{-5} \sim 10^{-7}$ Torr)' for effective use. To get high vacuum, special cares are necessary about leak, remaining gas, desorption, etc.

Unfortunately, on the above matters, researches are insufficient. It is the fact that most things are depend on field-technician's '*know-how*'.

This study purpose to secure core technology on design of cold box that manage the heat load and maintain temperature and pressure of liquified nitrogen is used by refrigerant in cryocooler system.

'Cool down test' and 'Insulation test' are performed to secure thermal confidence of cold box. From cold box design to cool down & insulation test, through the all production process, this study purpose to found data base.

NOMENCLATURE

SYMBOLS

A	: Heat transfer area	$[m^2]$
C	: Coefficient, factor	
Fo	: Fourier number	
h	: Heat transfer coefficient, Conductance	$[W/m^2K]$
k	: Thermal conductivity,	$[W/mK]$
L	: Length, Thickness	$[m]$
N	: Number of layers	
Q	: Heat transfer rate	$[W]$
r	: Radius	$[m]$
T	: Temperature	$[K]$
t	: time	$[s]$

GREEK SYMBOLS

α	: Thermal diffusivity	$[m^2/s]$
Δx	: Unit length	$[m]$
ε	: Emissivity	
σ	: Stefan-Boltzmann constant = 5.67×10^{-8}	$[W/m^2K^4]$

SUBSCRIPTS

<i>l</i>	: Low temperature side
<i>2</i>	: High temperature side
<i>c</i>	: Conductance
<i>cond</i>	: Conduction
<i>R</i>	: Radiation
<i>ss</i>	: Steady state

제 1 장 서 론

초전도, 극저온 기술의 실용화가 활발히 진행 중에 있다. 지난 1960년대, 특정물질을 아주 낮은 온도로 냉각하면 전기저항이 제로가 되는 초전도 현상이 발견된 이래, 초전도 기술은 SMES(Superconducting Magnet Energy Storage), 초전도 한류기(Superconducting Fault Current Limiter : SFLC) 등의 전력 기기와 초전도체로 제작된 칩 등의 전자 디바이스, 초전도 MRI(Superconducting Magnetic Resonance Instrument), SQUID(Superconducting QUantum Interface Device) 등의 의료 기기 및 자기부상열차, 전자추진선박 등 교통·수송분야에 이르기까지 산업전반에 걸쳐 응용, 실용화가 진행되고 있다. 이렇게 각광받는 초전도 기술은 특히 전력 에너지분야에서 그 가치를 높게 평가받고 있다. 도시와 산업은 나날이 성장하고 있고, 산업설비 역시 고출력화 되어감에 따라 전력수요 역시 이에 비례하여 급증하고 있다. 청정고급 에너지인 전력은 이렇듯 수요 급증 일로에 있으나, 그 생산, 이송, 변환 등의 과정에서 발생하는 손실이 커, 이의 절감 방안이 절실한 실정이다. 전력의 이송 등에서 사용되는 기존의 구리 선재에선 필연적으로 저항에 의한 열발생으로 인해 전력 에너지가 소모된다. 하지만 초전도 기술을 이용하면 저항이 제로가 되므로 전력 에너지의 무용한 소모를 줄일 수 있게된다.⁽¹⁾ 특히 1986년, 베드노르츠와 뮐러가 세라믹 계열 소재에서 액체질소의 온도(77.3K)에서도 초전도 현상이 발생하는 ‘고온초전도체(High Temperature Superconductor)’를 발견한 이래, 연구는 더욱 활성화, 가속화되고 있다. 고온초전도란 초전도 현상의 3가지 조건인 ‘임계온도(Critical Temperature)’, ‘임계자장(Critical Magnetic Field)’, ‘임계전류밀도(Critical Current Density)’ 가운데 초전도현상이 일어날 수 있는 임계온도가 액체질소

의 비등점인 77K 이상인 초전도현상을 말한다. (상대적으로 ‘저온초전도’ 현상은 액체헬륨의 비등점인 4.2K 근방 혹은 77K 이하에서 초전도현상이 발생하는 것을 말한다.)⁽²⁾

산업의 성장, 발전과 더불어 가스액화 및 수송, 특수목적용 고순도 가스생산, 각종 산업 공정에서의 저온환경 조성 등에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있어 극저온 기술의 응용, 실용화도 활발한 상태이다.

국내에서도 근래 초전도·극저온 분야에 대한 관심이 고조되어 있는 상태이다. 지난 1998년 ‘사단법인 한국초전도·저온공학회’가 설립되어 활발한 활동과 함께 성장 중에 있고, 국가적 차원에서도 21C 프론티어 연구개발사업의 일환으로 ‘차세대 초전도 응용기술 개발사업(DAPAS program)’이 시행 중에 있어, 국내 유수의 기업과 연구소, 대학 등이 참여하여 연구 개발에 힘쓰고 있다.

저온공학은 극저온(cryogenic)상태에서 이상에서 언급한 각종 초전도·극저온 기기들을 안정적으로 운전할 수 있는 극저온 생성 및 유지기술을 담당한다. 다시 말해 초전도·극저온 기기의 성능 및 경제성을 좌우하는 핵심기술의 일환인 것이다.

중대형의 초전도·극저온 기기들을 안정적으로 운전하기 위해선 해당 시스템을 극저온 상태로 유지하도록 하는 cold box가 필요하다. Cool down은 이러한 cold box를 비롯한 각종 극저온 관련 시스템을 정상적으로 운전하기 전, 저온환경을 조성하는 과정이다. 상온(300K)에서 극저온(120K 이하)으로 갑작스레 냉각되면 열응력으로 인해 시스템의 파괴가 발생할 수 있으므로, 예냉과정이 필요하다. 또한 일회적이고 한시적인 극저온 환경을 요하는 중소형 시스템이라면 단순히 극저온 냉동기를 사용하거나 액화가스를 이용하여 즉각적으로 극저온 환경을 조성해주면 되지만, 장기적이고 안정적인 시스템의 운전을 요하는 경우라면 아주 까다롭고, 번거로운 전(前)과

정을 필요로 한다. 단순히 시스템의 온도를 내리는 것도 중요하지만, 장기적인 관점에서 열침입의 저감을 위해선 고진공 상태를 유지하는 것이 필요하다.

세계적인 초저온 관련업체 및 cryostat 등의 저온 기기 제작회사, 해외 대학 연구소는 물론 국내 가스엔지니어링 회사에서도 대형 극저온 기기나 가스 액화 plant급의 개발, 제작 및 건설 실적 등은 그리 어렵지 않게 찾을 수 있으나 그 세부적인 기술까지는, 특히 cold box의 제작 및 단열, cool down test 등은 공개되어 있지 않은 상황이다. Chi(1961)⁽³⁾가 액체수소를 이용해 저온 액화 가스 전송관의 cool down 시간과 온도를 연구한 사례와 M.V. Krishnamurthy 등 (1996)⁽⁴⁾이 착탈식 액체질소 전송관에서 나관(bared line)과 jacket 처리된 관의 cool down 특성에 관한 실험을 한 연구 등이 있으나, 극저온 냉동 시스템용 cold box와 그 cool down 등에 관한 구체적인 연구는 공개된 바가 거의 없는 상황이다.

본 연구는 reverse Brayton cycle을 이용한 극저온 냉동 시스템의 일환인 cold box에 관한 연구이다. Cold box는 극저온 냉각물질로 많이 사용되는 액체 질소의 온도와 압력을 적정 조건으로 유지하고, 열부하 변동 등에 안정적으로 대처하도록 한다. 본 연구는 cold box 설계에 필요한 각종 핵심요소기술 및 제작된 cold box의 신뢰성 평가 방법을 확보하고, 그 전(全)과정을 cold box 연구에 대한 D/B로써 확보하고자 하는 목적으로 수행되었다.

제 2 장 기본 이론

극저온 시스템은 일반 냉동 시스템에 비해 상온과의 온도차가 더욱 커 열침입 차단的重要性이 더 큼은 당연하다. 일반 냉동시스템의 단열에선 잘 고려하지 않는 복사의 영향을 고려함은 물론이고 시스템 내부에서 각 구성품 간에 일어나는, 공기 분자들의 이동에 의한 전열인 대류까지 억제해야 한다. 이처럼 극저온 시스템에서는 그 운전과정은 물론, 각 구성요소들의 배치가 극저온 영역 내에서 이뤄져야 한다. cold box는 쉽게 말해 이러한 극저온 환경을 ‘유지’하는 큰 사이즈의 ice box와 같은 역할을 한다. 좀 더 엄격하고 극한적인 조건이 요구되므로, 고진공 및 예냉 등의 특수 처리가 요구되는 것이다.

2.1 재료

극저온 기기용 구성재료로는 스텐레스(Austenitic stainless steels)와 알루미늄 합금 등의 금속 소재와 Fiber-epoxy 복합재 같은 소재가 사용된다.

극저온용 스텐레스로는 SUS 304, 304L, 316, 316L 등이 주로 사용된다. 이러한 300 시리즈 재료는 가공이 용이하고, 진공환경의 용접에 적합하며, 충격·인장 강도 등이 우수하다.(tensile modulus $\approx$ 200 GPa) 그리고 bake out(열처리)도 쉬우며, 표면 outgassing도 적고, 여타 탄소강에 비해 진공환경에서의 수소 방출량도 적다. 그러나 용접, 브레이징 등의 작업시, annealing 효과에 의해 이상의 우수한 성질들을 잃을 수 있으므로 주의해야 한다.

알루미늄 합금들은 열전도율이 높고, 강도가 상대적으로 약하다는 단점이 있으나, 가볍고, 수소 방출량이 적고, 잘 연마된 경우엔 방사율이 종래의 5% 이하 수준으로 낮아질 수 있어 복사 shield, 반사막 등으로 많이 이용된다.

Fiber-epoxy 복합재료는 G-10, 11 등이 많이 사용된다. 이러한 FRP 계 소재는 가볍고, 단단하며, 열전도도도 낮고, 우수한 진공특성을 가진다. 그러나 고온 취약성으로 인해 열처리가 곤란하다는 등의 단점이 있다.⁽⁵⁾

이상의 재료들로 저온용기를 제작할 때는 각 재료간의 열수축의 차이를 충분히 고려해야 한다. 구성재료의 접합에는 기계적 강도, 기밀성, 내열특성 등을 고려하여 행하는데, 용접, 은납, 납땜, 에폭시 등으로 접합을 행한다.

2.2 단열

2.2.1 MLI

여타 저온 기기 및 설비들과 마찬가지로 cold box에서도 단열은 매우 중요하다. 극저온 기기들의 단열엔 진공단열이 사용되는데 본 cold box의 경우에는 그 중에서도 단열 성능이 매우 뛰어난 MLI를 사용하였다. Fig. 2.1에 각 단열 방법에 따른 열전도도를 비교하여 나타내었다.⁽⁶⁾

MLI(Multi-Layer Insulation)는 글자 그대로 다층단열을 말한다.(MLI와 같이 단열 성능이 매우 우수하여 극저온 영역의 단열에서 사용되는 단열법을 ‘superinsulation’이라고 통칭하기도 한다.) 1951년 스웨덴의 P. Peterson에 의해 고안되고 Linde社에 의해 실용화된 MLI는

종래 단열보다 10^{-3} 배 이상 작은 열전달율을 가져 저온분야의 발전에 일조 하였다.

MLI는 여러 층의 복사 반사용 금속박막(shield) 사이에 spacer(혹은 separator)라는 저전도율의 물질이 삽입되어있는 샌드위치 구조로 되어있다.

MLI는 모든 가능한 열전달을 최소화하는데 목적이 있다. 따라서 낮은 방사율과 전도율, 높은 반사율을 가진 소재들로 구성된다. 복사 shield에는 반사율이 높은 금 혹은 알루미늄 계열의 물질이 사용되며, 그 두께가 수십 nm에서 수 μm 정도로 매우 얇다. 따라서 구조적 강도와 이용의 편의성 등을 위해 Mylar(polyethylene terephthalate) 혹은 Kapton(polyimide) 등의 플라스틱 소재(수~수 십 μm)에 단면 혹은 양면 코팅돼 사용된다. spacer는 복사 shield 간의 열접촉을 방지하기 위해 사용되는 것으로, 저전도율의 Dacron fabric, fiberglass (Dexiglas, Tissuglas 등), silk, nylon net 등의 소재가 이용된다. 경우에 따라선 깨지기 쉬운 유리섬유지 계열의 separator를 사용하지 않고, 복사 shield 자체를 crinkling, embossing 형태로 제작하여 몇몇 접점만을 가지고 서로 지지하는 구조를 사용하기도 한다.

MLI가 설치되는 공간은 통상 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ Torr(1 Torr = 1 mmHg $\approx$ 133.3 Pa) 정도의 진공상태이다. 이 상태에선 가스의 유동이 자유분자운동의 영역이므로 대류는 없고, 기상(氣相) 열전도도 실제적으로 거의 없다고 가정한다. 다시 말해 잔류가스에 의한 열전달량을 무시할 수 있는 정도가 된다는 것이다.

이상에서 살펴본 것과 같이 MLI에선 복사와 전도만을 고려할 수 있다. 복사 차단용 shield가 많을수록 복사 열전달이 감소하고, 저전도율의 spacer 등의 증가도 고체 열전도를 일정 수준까지 감소시킨다. 하지만 단열 시스템이 매우 압착될 경우, 고체 열전도의 증가분은 복사열전달의 감소분을 초과하게 된다. 따라서 MLI의 구성에 있

어 적정 density, 즉 단위 길이(두께)당 박수($N/\Delta x$)를 선정하는 것이 경제적으로든 성능 면에서든 중요하다.

MLI에 있어 shield에 평행한 방향으로의 전열은 법선 방향으로의 그것의 10^3 배 정도로 크다. 이러한 열전달의 이방성에 의해 구조물의 지지부(support)나 부득이하게 단열층을 관통해야 하는 vent line, 접합·연결부 등에서 심각한 열손실의 우려가 있으므로 설계, 제작 시 각별한 주의가 필요하다.

MLI는 우수한 단열성능으로 극저온 기기들에 많이 사용되긴 하나, 정상상태에 도달하는데(적정 진공도에 도달하기까지) 많은 시간이 걸리기 때문에 cryostat, cold box, 저온액화가스 저장용기 등 장시간에 걸쳐 사용하는 기기 및 시설들에 사용하는 것이 좋다.

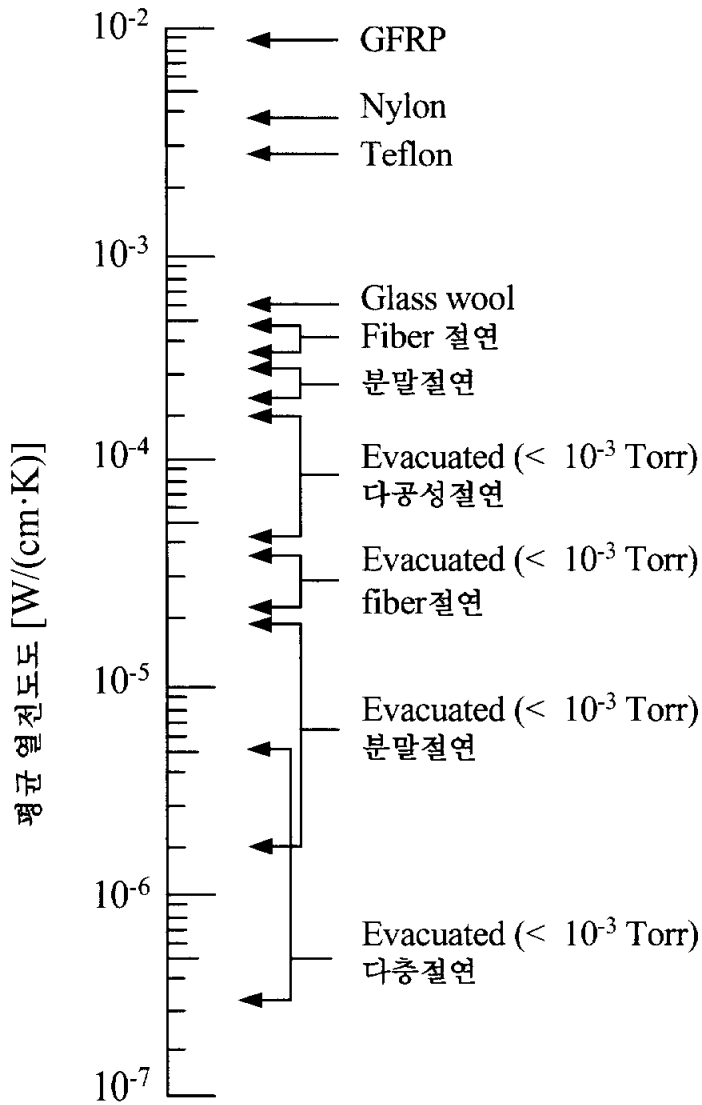


Fig. 2.1 Thermal conductivity of each insulation method
(Both ends : 300K and 80K)

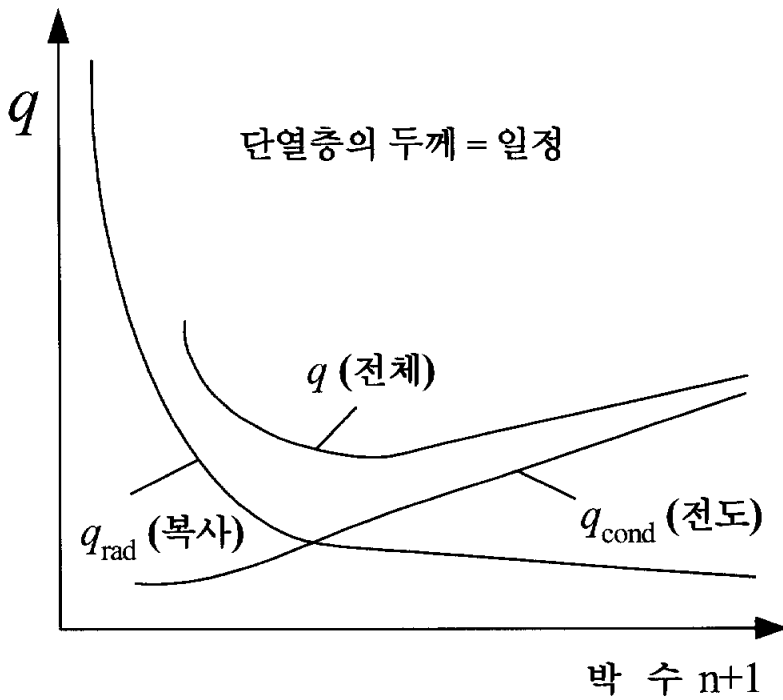


Fig. 2.2 Heat transfer through MLI

2.2.2 열설계

1) 전도에 의한 열전달

단면 A가 일정한 고체를 통한 전도 열전달은 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$Q_{cond} = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} k(T) dT \quad (2.1)$$

k 는 일반적으로 온도에 따라서 큰 폭으로 변하기 때문에 위의 식의 적분은 kT 곡선의 면적으로부터 구해진다.

2) 대류에 의한 열전달

진공부의 압력이 10^{-3} Pa 이하라면 잔류가스에 의한 대류열전달은 다른 열전달 기구에 비해 무시할 수 있을 정도가 된다. MLI를 사용하는 진공부의 압력은 통상 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ Torr 정도의 압력 영역이므로 MLI 단열법을 사용할 경우 대류 열전달은 무시 가능하다.

3) 복사에 의한 열전달

Cold box에 많이 사용되는 동심원통형의 복사 열전달 기구에 의한 저온 면으로의 열전달은 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$Q_R = C_R \cdot C_T \cdot (T_2 - T_1) \quad [W/cm^2] \quad (2.2)$$

$$C_R = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \quad [W/cm^2 \cdot K^4] \quad (2.3)$$

$$C_T = \frac{T_2^4 - T_1^4}{T_2 - T_1} \quad [K^3] \quad (2.4)$$

이를 간단히 하면 다음과 같다.

$$Q_R = \frac{\sigma A_1 (T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)} \quad (2.5)$$

MLI는 열침입, 특히 복사 열침입의 저감에 매우 효과적이거나, 정상 상태에 도달하는데 장시간이 소요되므로 그 사용 용도에 대한 고려가 필요하다.

4) 유효 열전도율

MLI를 사용하여 단열할 경우 실험적인 데이터가 확보된 몇몇 경우에 대해서는 다음과 같은 유효열전도율 k_t 를 이용하여 열침입량을 계산할 수 있다.⁽⁹⁾

$$k_t = \frac{\left[\frac{h_c + \sigma \epsilon (T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)}{(2 - \epsilon)} \right]}{(N / \Delta x)} \quad (2.6)$$

이 때, h_c 는 MLI의 spacer에 대한 컨덕턴스로 소재의 열전도도, 두께, 기타 소재별 실험적 상수 등과 관련된 값으로 별도의 계산이 곤란하긴 하나 상용되는 주요 소재들에 대해선 그 값들이 공개되어 있다. 이 식은 실험적인 항(h_c)이 포함된다는 단점이 있으나 Dacron 등 널리 사용되는 소재에 대해서는 관련 식과 값들이 공개되어 있

으므로 계산이 용이하다. 그리고 총 열전달에 대한 전도(k_c)와 복사(기타 항)의 기여 정도를 쉽게 파악할 수 있어 단열 시스템의 설계, 평가에 도움이 된다.

MLI를 통한 열침입은 다음과 같이 계산되기도 한다.⁽¹⁰⁾

$$Q_{MLI} = k_{MLI} \cdot A \cdot \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \cdot \left(\frac{N}{N-1} \right) \quad (2.7)$$

이때 k_{MLI} 는 평균 유효 열전달계수[$W/m \cdot K$]로 역시 복사와 전도항을 포함하고 있다.

Ter Brake와 Flokstra(1988)⁽¹¹⁾는 k_{MLI} 의 최소 값인 $k_{MLI}^{\min}(=k_{MLI}/\Delta x)$ 를 구체적인 수치로 제안하였다. 실온을 300K, 진공 내측의 온도를 액체질소의 온도인 77K라고 할 때, 단위 cm당 25~30여 층의 최적의 층밀도를 가질 때, $k_{MLI}^{\min} = 4 \times 10^{-3} [W/m^2 \cdot K]$ 라는 구체적인 값을 제안하였다. T_2, T_1 이 각각 300K, 77K와 유사한 온도이고, MLI 단열이 최적 밀도 수준으로 행해졌을 때, 이상의 조건을 사용하여 다음과 같은 Q_{MLI} 로 근사될 수 있다고 제안하였다.

$$Q_{MLI} = k_{MLI}^{\min} A (T_2 - T_1) \quad (2.8)$$

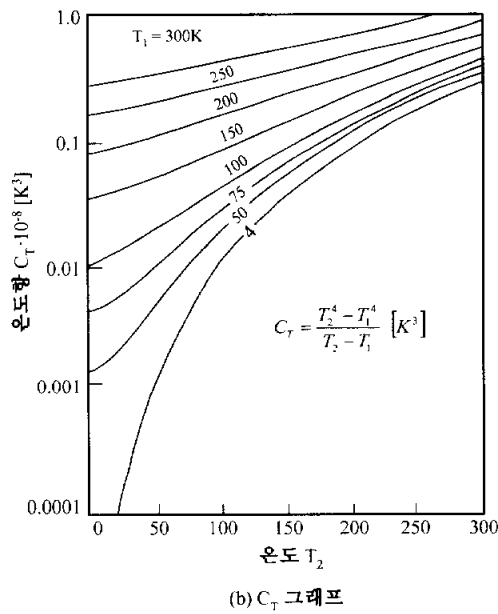
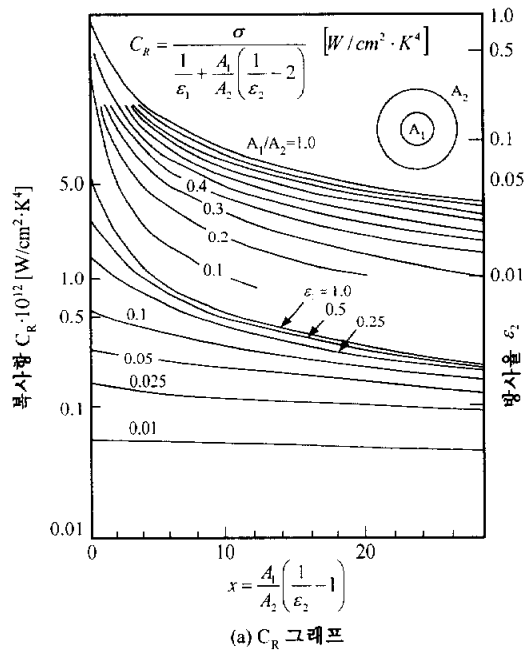


Fig. 2.3 Graph for calculating radiation heat loss

2.2.3 기술적 양면성

열전달에 대한 고려가 필요한 여타의 어떠한 시스템에서도 마찬가지로 극저온 시스템 설계시에는 구조적 안정성과 단열성능이 대치되는 부분이 많다. 이러한 기술적 양면성이 극저온 시스템의 설계의 난제로서 작용한다. 즉, 단열성능의 향상을 피하자면 재질, 시스템 형상, 각종 센서류 등과 관련된 port 위치, 구경 등 구조적 안정성과 관련된 부분에서의 불이익을 어느 정도 감수할 수밖에 없고, 그 반대 또한 마찬가지이다. 이러한 사항들을 고려하여 시스템의 사용 목적에 맞는 최적의 설계를 행하는 것이 중요하다.⁽¹²⁾

2.3 진공

진공이란 대기압보다 낮은 상태의 압력을 말하며, 구체적으로는 분자밀도가 2.5×10^{19} [개/cm³] 보다 작은 경우를 의미한다.(ISO 기준)

Cold box 내부를 진공상태로 유지하는 이유는 바로 열침입을 억제하기 위해서이다. 앞서 '2.2.2 열설계'에서도 설명하였지만, 진공부의 압력이 10^{-3} Pa 이하라면 잔류가스에 의한 대류 열전달은 타 열전달 기구에 비해 무시할 만한 수준이 된다. 대류는 분자운동에 의한 에너지의 전달이므로, 곧 진공은 이 공기 분자의 수가 작아 대류 열전달의 효과가 작다는 것을 의미한다.

2.3.1 진공 펌프

우리가 흔히 알고 있는 피스톤이나 로터리 방식의 진공 펌프는 목적 공간 내의 공기분자를 끌고 나오는 것이 아니라, 펌프 내부의

압력을 낮춰 목적 공간과 펌프 내부의 압력차에 의하여 자연스럽게 공기가 펌프를 통해 외부로 빠져 나오게 만드는 것이다. 이것이 흔히 알고 있는 진공 펌프의 원리이다.

그러나 특정 공간 내부의 압력은 곧 가스 분자의 운동에너지라는 관점에서 진공 펌프의 원리를 설명하면 다음과 같다.

진공 펌프는 특정 공간 내의 압력의 감소를 목적으로 한다. 이 압력을 감소시키는 방법은 두 가지가 있다. 첫 번째는 공간 내 분자의 수 자체를 줄이는 것이고, 두 번째는 분자의 운동을 저지시켜, 운동 에너지를 감소시키는 것이다. 첫 번째가 'gas transfer type'으로 목적 공간 내의 기체를 펌프를 통해 외부로 방출시키는 것이다. 두 번째가 'entrapment type'으로 가스 분자를 진공 펌프 내부에 가두어(묶어) 두는 것이다. 고진공 이상의 진공도를 얻기 위해선 주로 'entrapment type'이 사용된다.

Fig. 2.4에서 보는 것과 같이 각 진공펌프의 사용 압력 범위가 각각 다르므로 한 개의 펌프만으로는 대기압에서부터 고진공의 낮은 압력을 얻는 것은 불가능하다.⁽¹³⁾

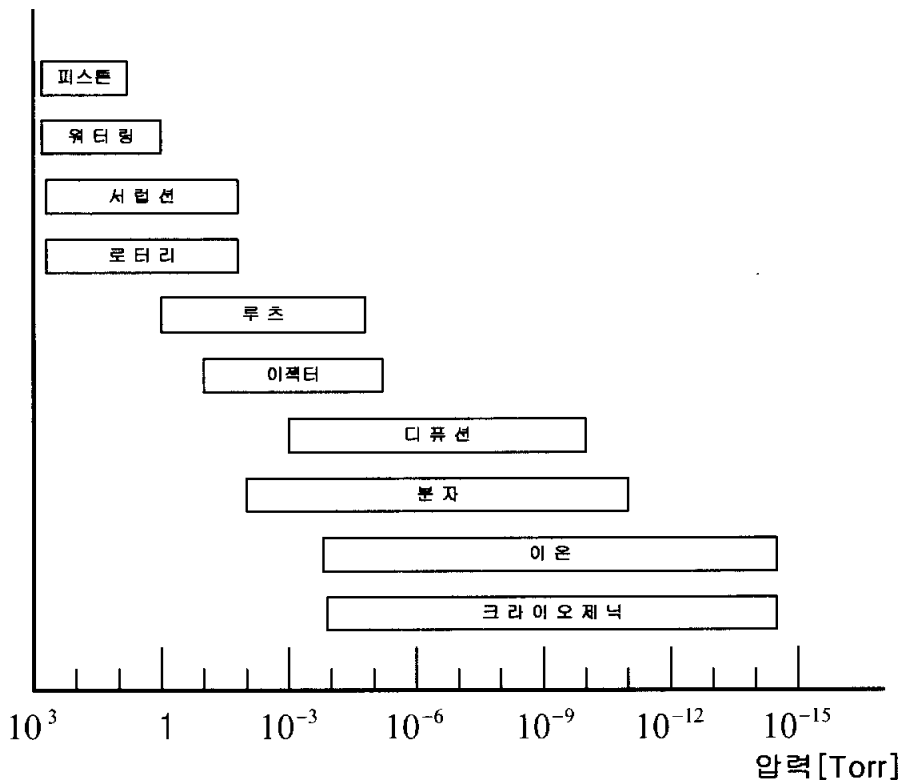


Fig. 2.4 Usable pressure range of variable vacuum pumps

2.3.2 Leak

Leak 즉, 누설이란 진공용기에 생긴 구멍 및 연결부위를 통해, 유체가 압력차 혹은 농도차에 의해 들어가거나 나오는 현상을 말하는 것이다. 높은 진공도를 유지해야 하는 극저온 용기에서는 전 제작 과정에서 leak가 생기지 않도록 주의해야 하며, 시스템을 완성하고 난 후에도 leak가 생긴 부위는 없는지 조사(detect)해야 한다. 그러나 현실적으로 완벽하게 leak를 방지할 순 없으므로 요구되는 진공도에 따른 각 허용 leak rate를 준수하도록 해야한다.

Leak의 발생 원인은 매우 다양하나 다음과 같이 분류할 수 있으므로, 극저온 용기 제작시 다음 사항들에 유의해야 한다.⁽¹⁴⁾

(1) 연결부위에서의 leak

- 용접 부위, 진공 게이지 연결 부위 등

(2) 재질 혹은 원소재 자체의 결함

- 원소재에 미세한 구멍이나 가스 경로가 있는 경우, 불균일한 조성, 균열 등

(3) 용도에 맞지 않는 재질 선택

- 너무 얇은 유리, pyrex(내열 유리)의 경우 발생하는 헬륨 투과 현상, 다공질 물질 사용, teflon 사용시의 수소 투과 현상 등

(4) Outgassing

- 표면 처리 및 연마 불량으로 인한 오염, 거친 표면으로 인한 가스의 흡착이 많은 경우 등

(5) Virtual leak

- 용접을 이중으로 하거나 가스켓을 이중으로 사용하는 경우 등.

Leak test를 행할 때 사용하는 기구를 'leak detector'라 한다. Leak

detector는 진공 시스템의 leak의 위치를 파악하고 그 양을 측정하는 장치, 혹은 시스템이다. Fig. 2.5는 leak test의 기본적인 방법 중 하나인 vacuum test 법에 대한 그림이다.

Vacuum test는 진공 챔버에서 leak가 의심되는 부위에 헬륨을 분사(spray)한 후, leak detector로 헬륨을 검출하는 원리이다. Fig. 2.5와 같이 챔버에 detector를 직접 연결하지 않고 펌프 쪽에 연결한 이유는 챔버에 대한 오염을 줄임과 동시에 배기 속력을 크게 하여 빠른 시간 내에 Leak detection을 하기 위해서이다. 이때 test용 가스로 헬륨을 사용하는 이유는 다음과 같다.

- (1) 헬륨은 불화성 기체 가운데 가장 가벼워 다른 불화성 기체에 비해 작은 틈새로도 쉽게 지나갈 수 있고, 다른 기체나 챔버와 반응하지 않음.
- (2) 전하대 질량비 $m/e=4$ 이므로 간단한 구조의 mass spectrometer로도 감지가 용이하며, 여러 개의 다른 spectrum peak들과도 쉽게 분리되어 감지가 용이함.
- (3) 공기중 농도가 5ppm 정도의 극소량이어서, mass spectrum의 background noise가 작음.
- (4) 타 불화성 가스에 비해 저렴, 무독성, 폭발 위험성이 적음.
- (5) 타 가스에 비해 빨리 leak test가 가능.

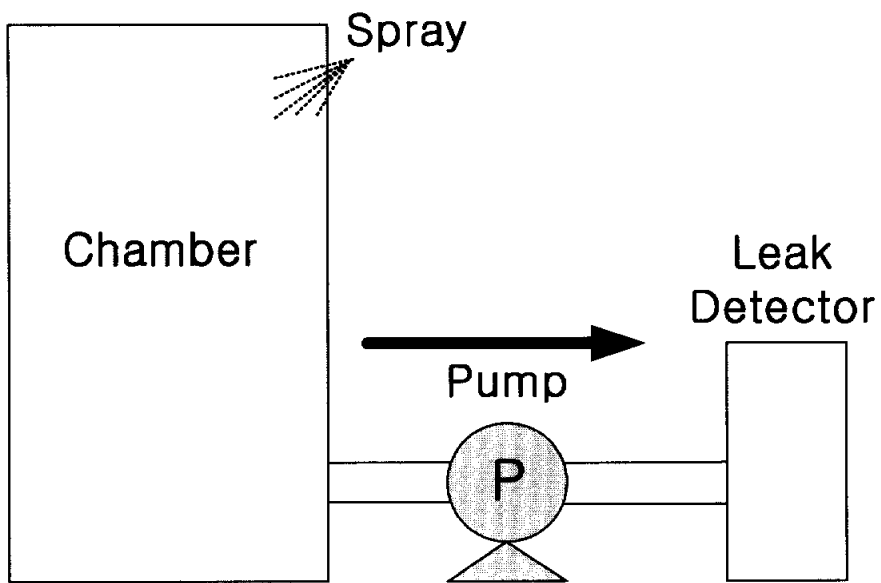


Fig. 2.5 Leak test (Vacuum test method)

2.3.3 수증기

소재의 표면에 흡착되기 쉬운 것으로 공기, 탄화수소계 가스 등이 있으나 그 중에서 가장 양이 많고 제거하기도 까다로운 것이 물, 바로 수증기이다. 수증기는 진공의 모든 공정에 문제를 야기하고, 짧은 시간 안에 압력이 극고진공(ultra high vacuum)에 도달할 수 없게 만든다. 수증기 오염 정도는 소재의 표면 특성, 처리 정도, 제작 당시의 상대습도, 기류, 대기 노출 시간 등 다양한 원인과 관련된다. 수증기는 강한 화학 흡착력에 의해 소재 표면에 붙게 되는데, 이렇게 한번 부착되고 나면, 이후 '물리 흡착력'(van der waals force)에 의해 그 위에 다시 물분자가 덧붙게 된다.

Leak가 없더라도 물이 포함된 진공시스템을 배기할 때, 23℃에서 수증기압이 2806 Pa(≈21.1 Torr)이 되면 시스템압은 더 이상 낮아지지 않고, 시스템 내의 free water vapor(진공용기 벽에 붙어 있지 않은 수증기)가 완전 배기 될 때까지 상수 값을 유지한다.(지속적인 가스 load로서 작용) 그 후 내벽에 붙어 있던 수증기가 배기 되는데, roughing(초기 진공)하는 동안은 탈착율(desorption rate)이 매우 낮고, 가스의 흐름이 분자류(molecular flow)가 되는 진공단계가 되면 급격히 증가한다. 이 영역에서의 수증기는 잔류가스의 주요 성분이다. 한 연구 결과에 의하면 50 시간이 지난 후에도 outgassing 되는 주요 가스 중 85% 이상이 수증기라고 한다.

이러한 수증기의 주요 원인으로는 다음과 같은 것들이 있다.

- (1) 가장 주된 원(source)는 대기에 노출되었던 진공 용기 내벽
- (2) 진공시스템에 들어가는 모든 부품
- (3) 공정에 사용되는 각종 가스들도 사전 건조시키지 않은 경우 대량의 수증기원으로 작용

(4) leak

- 가스 및 수증기의 지속적 공급원, 구멍, 균열, 두 개의 플랜지가 맞닿는 면, 나사구멍, O-ring, 용접부 등

(5) 적절한 조치를 취하지 않을 경우, 진공 펌프 자체도 가스 load로 작용

(6) 시스템에 사용되는 탄성체, 폴리머 물질들의 투과현상

(7) '배기-열처리'를 반복함으로 생기는 기계적 강도 변화로 인한 용접부 등의 균열

수증기는 시스템의 진공도를 저하시키는 것 외에도, 시스템 압력, 온도, 펌프의 배기속도 등의 조건이 적절히 맞으면, 질은 에어졸로 되어 진공 시스템 내의 여러 물질과 반응, 여러 이상 현상을 발생시킨다. 특히 계측기의 필라멘트, cathode 등과 반응하여 정확도를 떨어뜨리며, 수명을 단축시킨다.

진공 시스템의 표면으로부터 수분을 제거하는 것은 다음과 같은 3단계로 나눌 수 있다.

(1) 탈착(desorption)

(2) 운반(transport)

(3) 배기(pumping)

2.3.4 Thermal desorption(bake)

탈착 방법은 진공 시스템의 종류, 요구 진공도 도달 시간, outgassing 계획, 예산 등에 따라 여러 가지가 있으나, 본 논문에서는 본 시스템과 관련된 thermal desorption 즉, bake를 간단히 설명하고자 한다.

Thermal desorption은 진공 시스템 안쪽 면에 흡착된 가스분자들간의 결합력을 인위적으로 약하게 하는 강제 탈착(forced desorption)의 일종으로, 열에너지를 가스분자에 가하여 결합력을 떨어뜨리는 것이다. 이렇게 하여 단순히 진공 펌프로만 배기하는 것에 비해 탈착율을 증가시키고, 배기 시간을 단축시킨다.

Thermal desorption의 방법은 고온으로 가열하는 것이다.(bake, bake-out. 이후 bake로 통칭)

Bake의 수행을 위해선 진공 시스템의 재질이 고온으로 인한 열응력을 견딜 수 있어야 한다. 극저온 용기의 재질로 많이 사용되는 스테인레스 스틸은 통상 250℃~300℃ 까지 가열한다. 수분의 탈착을 위해서는 통상 250℃까지 가열할 필요가 있고, 금속 중에 흡착되기 쉬운 수소, 산소 등의 탈착을 위해선 이보다 높은 온도에서 장시간 bake할 필요가 있다. 하지만 MLI를 시행하는 경우, 알루미늄, 플라스틱 등 고온에 약한 소재를 사용하므로 이를 충분히 고려하여 bake를 시행해야 한다.

Bake는 24시간 정도 수행 후, 상온까지 서서히 냉각시킨다. 히터는 진공 용기 안쪽에 설치하는 것이 좋고, 그 형태는 시스템의 크기 등에 따라 hood, jacket, tape 등 여러 형태를 사용할 수 있다. 시스템을 bake 하는 데는 시간이 많이 걸리므로, 큰 진공 시스템에서는 외부에 quartz IR lamp 등을 사용하여 시간을 단축시키기도 한다.

가열과 냉각은 항상 균일하게 되어야 한다. 진공 시스템에서 온도 분포가 있을 경우, 고온부에선 탈착이, 상대적으로 저온부에선 흡착이 동시에 일어나기 때문이다. 이처럼 불균일한 가열, 냉각은 표면을 오염시키고, 최대 도달 압력(ultimate pressure)에도 영향을 미친다.

냉각법에는 진공용기에 부착된 코일에 냉각수를 공급해 냉각하거나, 차가운 공기를 불어 넣어주는 방법 등이 사용된다.

연속적인 'bake-냉각'은 열응력으로 인한 virtual leak를 발생시켜,

진공도에 영향을 주므로 주의가 필요하다.

2.3.5 Getter

Bake 등의 강제 탈착 방법을 사용하여도 잔류가스를 완전히 제거하기는 어렵고, 이는 고진공 영역에서부터는 매우 중요한 사안이다. 이럴 때 사용하는 것이 바로 getter로, 활성탄과 같이 흡착(sorption) 작용을 하는 물질을 말한다. Getter의 원리는 ‘gettering’이다. Gettering은 화학적으로 활성화(active)된 금속 표면에 활성 가스 분자들을 흡착, 안정화된 화합물을 형성하는 것으로 이러한 원리로 진공 용기내의 잔류가스를 흡착, 소기의 진공도를 달성한다. 다시 말해, getter는 잔류가스 중 활성화 가스를 제거하는 일종의 화학 펌프(chemical pump)인 것이다.

Getter는 증발형(evaporable type)과 비증발형(non-evaporable type) 그리고 화학적 getter와 물리적 getter로 나눌 수 있다.

비증발형 getter(non-evaporable getter : NEG)는 getter 물질을 따로 증발시켜 증착막을 형성할 필요가 없다는 잇점이 있다. 그리고 극저온 상태에서 아주 약한 결합력으로 가스를 흡착하는 물리적 getter보다는 강한 화학적 결합력으로 흡착 작용을 하는 화학적 getter가 많이 사용된다. 그런 이유로 ‘비증발형 화학적 getter(이하 NEG)’가 사용의 편리성과 강한 흡착 작용 등의 면에서 많이 사용되고 있다.

NEG의 배기작용은 기체분자가 getter 물질의 표면에서 해리되어 흡착이 일어나고 적절한 온도에서 재료 내부로 확산되어 들어가 영구적으로 고정되는 과정으로 이뤄진다. 이상의 과정 등으로 인해 기체가 표면을 다 덮어 흡착력이 떨어지면 가열하여 표면에 흡착된 기체들을 재료 내부로 확산시키고 신선한 표면을 노출시키는 활성화(activation) 과정(Fig. 2.6)을 거쳐 흡착능력을 회복한다.⁽¹⁵⁾

Getter를 통해 pumping되는 가스의 반응은 가스의 종류에 따라 다음과 같이 분류된다.

(1) 수소 및 그 동위원소

: 수소 분자는 getter와 안정한 결합을 형성하진 않지만, getter 표면에서 해리되어 수소 원자로 된 후, getter에 전자를 주고 이온화되고 getter 안으로 확산되어 고용체(solid solution)를 형성한다. 저온에서 이상의 과정은 getter 안과 밖의 수소 농도가 같아질 때까지 일어나는데, getter의 온도가 증가하면 내부의 수소가 다시 방출되어 나온다. 일반적인 gettering 효과는 온도가 높을수록 증가하나, 수소는 가능한 한 낮은 온도일수록 흡착능력이 증가한다.

(2) 수소 이외의 활성가스

: O_2 , N_2 , CO , CO_2 같은 활성가스 분자들은 getter 표면에서 분해되어 getter 구성 물질들과 산화물, 질화물, 탄화물을 형성, 화학적인 비가역 과정을 통해 영구 고착된다. 이 과정에서 생긴 물질들의 화학결합은 매우 강하여 $1000^\circ C$ 까지 가열하여도 결합이 끊어지지 않으며, 가열할수록 getter 내부로 확산되어 새로이 깨끗한 표면에 계속적인 흡착이 일어나게 된다.

(3) 수증기와 탄화수소

: Getter 표면에서 수소, 산소, 탄소로 분해되어 각각 흡착된다.

(4) 비활성 가스

: 비활성 가스는 getter에 흡착되지 않는다. 이를 이용, getter를 비활성 가스 중의 불순물을 제거하는 purifier로 사용할 수 있다.

NEGs는 서로 연결되는 미세한 많은 기공이 있는 구조적 특징을 가진다. 전체 부피의 수 십%에 이르는 기공을 통해 기체가 퍼져 들어가는 것은 마치 물질 내부로 기체가 확산해 들어가는 것과 같은 효과를 나타낸다. 또 기하학적 표면적에 비해 수 십~수 백 배의 실

효표면적을 가지므로 수(水)원자층의 표면흡착만으로도 상당한 배기 용량을 제공한다.

NEGs의 원료로는 티타늄, 지르코늄, 하프늄 등의 물질과 그 합금이 사용되고 있다.

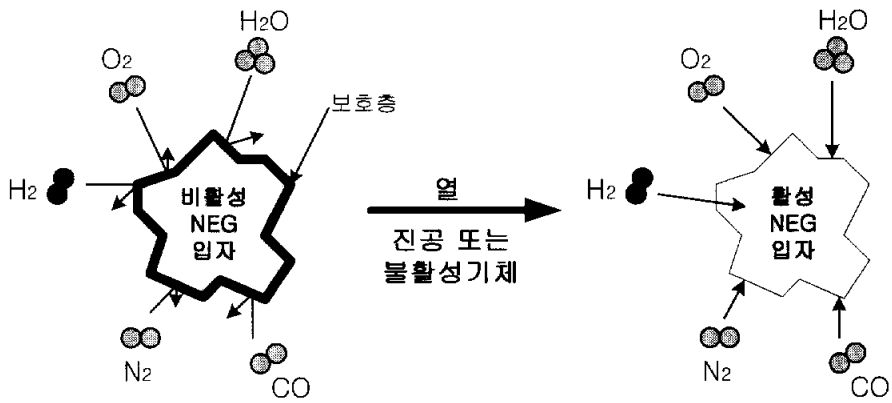


Fig. 2.6 Activation process of NEG

2.4 Cool down

'Cool down'이란 말 그대로 시스템의 온도를 떨어뜨리는 것을 말한다. 즉 극저온 환경을 조성하는 것으로, 진공·단열 처리가 완료된 극저온 시스템의 정상적인 운전 전에 시스템을 극저온 상태로 만들어 정상적인 운전 초기, 갑작스런 극저온 유체의 유입에 따른 열응력에 의한 시스템의 파괴를 방지하고, 유입된 냉각 유체의 과도한 증발에 따른 초기 냉동 능력의 저하 등을 방지하기 위해 시행한다. 이는 중·대형의 장기 운전을 요하는 극저온 시스템에는 필수적인 과정이다.

Kreith 등(1963)⁽¹⁶⁾이 일정 물성치 가정 하에서 cool down 동안 dewar 용기 내 단열층에서의 온도분포를 연구한 바 있으나, 그 수치 해석과 실제 실험결과가 잘 일치하지 않고, 고성능의 단열법은 그 열전달 프로세스가 정확하게 수식적으로 밝혀지지 않는 등, 전반적으로, cool down에 관한 연구가 많이 부족한 상태이다.

Krishnamurthy 등은 액체 질소 이송관에 대해, 공급 압력에 따른 cool down time을 실험적인 상관식으로 나타낸 바 있으나, 중·대형 시스템 및 액화가스 저장 시스템 등 전반적으로 적용하기는 곤란하다.

현재도 제작 현장에서는 cool down이 정확한 계산에 의해 수행되지 않으며, 많은 부분이 실무자들의 know-how에 의해 수행되고 있는 실정이다.

Randall⁽⁹⁾은 전반적인 극저온 시스템에 적용 가능한 cool down 소요시간에 대한 식을 제시하였다.

Cool down time을 '극저온 시스템 내부로의 열전달율의 편차가 1% 이내일 때인 정상상태 도달 시간'이라 정의할 때, 무차원 시간을 나타내는 Fourier number를 사용하여 다음 결과와 같이 유도하였다.

$$2 \exp(-\pi^2 Fo_{ss}) = 0.01 \quad (2.9)$$

$$Fo_{ss} = -\frac{\ln 0.005}{\pi^2} = \frac{\alpha t_{ss}}{L^2} = 0.53683 \quad (2.10)$$

$$t_{ss} = \frac{0.053683 \times L^2}{\alpha} \quad (2.11)$$

α , L 은 각각 단열층의 열확산계수(thermal diffusivity)와 두께, 하첨자 ss 는 정상상태(steady state)를 말한다.

이러한 연구 결과들이 보고되고는 있지만, 아직 cool down에 대한 명확한 정의는 없는 상태이다. 전술한 Randall의 경우처럼 실제 작동 온도 부근에서 모든 시스템 내로의 열전달율이 거의 비슷해지는 것을 cool down이라 보는 경우도 있고, 좀 더 관대한 개념으로는 열응력에 의한 재료의 파괴·변형 등을 방지하는 정도로 시스템을 냉각한다는 개념으로 보기도 한다. 특히 본 연구와 같이 시스템 내에 기-액이 공존하는 부분이 명확하고, dewar처럼 냉각유체를 봉입하여 가만히 두는 것이 아니라 별도의 냉동기를 부착하여 과열된 냉각유체를 연속적으로 냉각하는 경우라면 cool down은 후자의 개념을 사용해도 무방하다 하겠다.

이러한 모호한 개념 때문에 cool down time도 관점에 따라 천차만별이다.(정확히는 기술자의 technique에 의존한다.) Randall 등의 개념을 따르자면 최소 수 주~수 개월 이상이 소요되지만, 단순히 시스템의 온도를 적정 수준(역시 기술자의 know-how에 의존)으로 냉각하는데는, 시스템의 동작 온도가 액체질소 정도(77K)라면 바로 액을 주입하는 방법을 사용하여 수 십분 내로 소기의 cool down을 달성할

수 있다.(물론 cool down 기술자의 시스템 구조 및 재질에 대한 이해가 선행되어야 한다.)

실제 제작 현장에선 일반적으로 다음과 같은 방법을 사용하여 cool down을 행한다.

완성된 극저온 시스템에 저온의 질소를 투입하는데, 급격한 온도변화에 기인한 열응력이 발생시키는 재료의 변형 및 파괴를 방지하기 위하여 '기(氣, 상대적 고온)→기액혼상(氣液混相)→액(液, 상대적 저온)'의 순서로 시스템 내로 투입시킨다. 기액혼상으로 투입할 때, 처음엔 가스의 비율을 높게 하다가 점점 액의 비율을 높여가며 투입한다.

2.5 Reverse Brayton cycle

본 연구에서 사용한 극저온 시스템은 역브레이튼 극저온 냉동기(reverse Brayton cryocooler)로 HTS(고온초전도) cable의 냉각물질인 액체 질소의 냉각을 목적으로 사용된다.

본래 역브레이튼 사이클은 공기를 직접 냉매로 이용하는 항공 공조(航空空調)나 공기 액화과정 등에 사용되나, 극저온 시스템에서도 채용되고 있다.⁽¹⁷⁾

국외의 경우, 역브레이튼 사이클을 이용한 극저온 냉동기로는 1987년 NASA/GSFC의 지원으로 미국의 Creare Inc.에서 냉각용량 5 W@65K의 극저온 냉동기를 개발하여 현재 미 공군의 Philip 연구소에서 시험 중에 있다. 여타 초전도 전력 기기용으로는 미국의 PSI社에서 11.5 kW@80K 용량의 브레이튼 냉동기 및 250 W@100K의 브레이튼 냉동기 시제품이 출시되고 있다. 또한 미국의 American Superconductor Corp社의 Pirelli Cables System Team에서 미국

DOE(Department of Energy, 에너지局)의 지원 아래 cable 냉각시스템의 pilot test에서 밀폐형 역브레이튼 사이클을 채용한 바 있다. 국내의 경우, 현재까지 역브레이튼 사이클을 이용한 연구 사례는 없고, 주로 G-M 또는 맥동관 냉동기를 중심으로 연구가 진행되고 있는 실정이다.

역브레이튼 냉동기는 recuperator type으로 다음과 같은 장점이 있다.

- (1) 진동이 적고, turbo expander 등을 사용하기 때문에 유동이 안정적이다.
- (2) 가스 베어링, 터보 시스템의 적용으로 장시간 운전이 가능하다.
- (3) 냉매의 장거리 이송이 가능하다.
- (4) 대용량으로 작은 사이즈를 제외하고는 높은 효율을 발휘할 수 있다.

그러나 다음과 같은 단점이 있다.

- (1) 소형으로 제작하기가 어렵다.
- (2) 큰 열교환기가 필요하다.
- (3) 제작 비용이 고가이다.

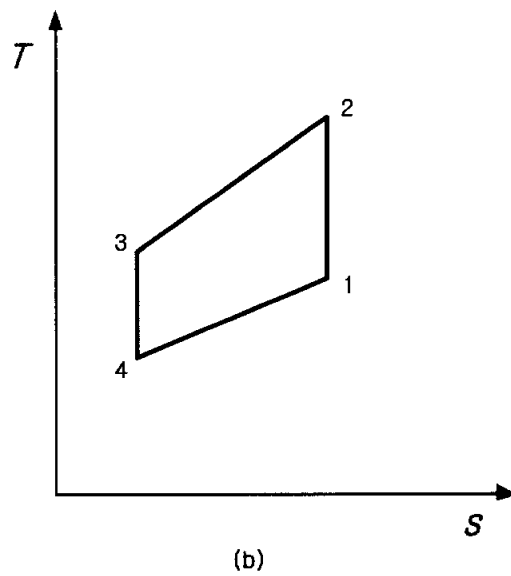
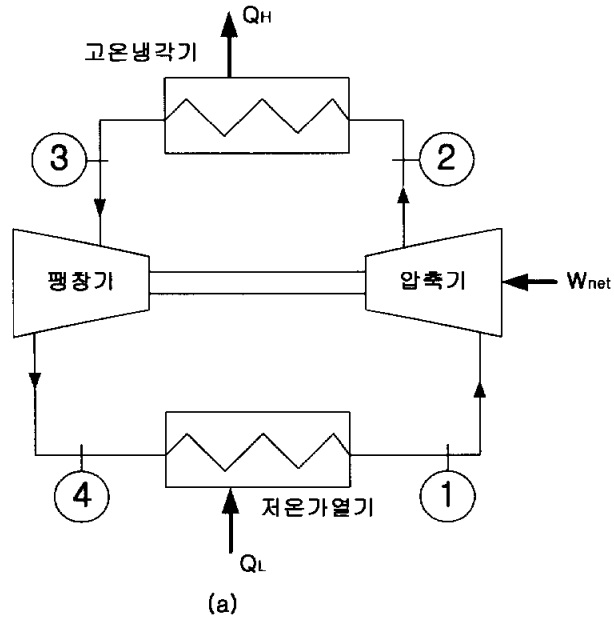


Fig. 2.7 Reverse Brayton cycle
 (a) components
 (b) $T-s$ diagram

2.6 극저온 냉동 시스템

실제 실험에 들어가기에 앞서 본 연구에 대한 총괄적인 이해가 필요하다.

본 연구에서의 극저온 냉동 시스템은 고온초전도 케이블 등에서 냉각물질로 사용되는 액체 질소에 대해, 냉각 작용을 수행하여 과열된 질소를 다시 과냉시키는(77K 까지) 것을 목적으로 한다.

역브레이튼 극저온 냉동시스템은 열교환기(recuperator), 냉매 압축기, 팽창기(turbo expander), cold box 및 각종 control valve 등으로 구성되어 있으며 냉매는 네온을 사용한다.

본 시스템의 냉동 사이클 및 구조는 Fig. 2.8과 2.9에 나타나 있다.

Fig. 2.8에서 보는 것처럼 팽창기 출구에서 65.39K로 냉각된 네온 가스는 cold box로 유입되어 load(Table 2.1의 ⑰)측에서 유입된 액체 질소를 과냉시킨다.

Cold box는 이상과 같이 저온의 네온 가스와 고온의 액체질소가 열교환 하는 곳으로 크게 열교환기, 질소기액분리장치, 액체질소 순환펌프, 액체 질소 챔버, 지지대 및 각종 밸브류 등으로 구성된다.

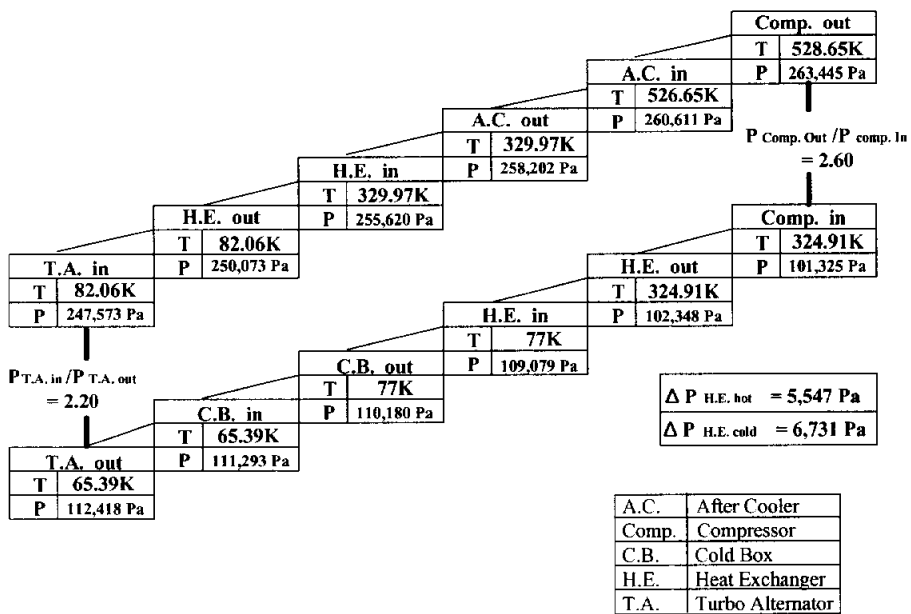


Fig. 2.8 Reverse Brayton cryocooler cycle

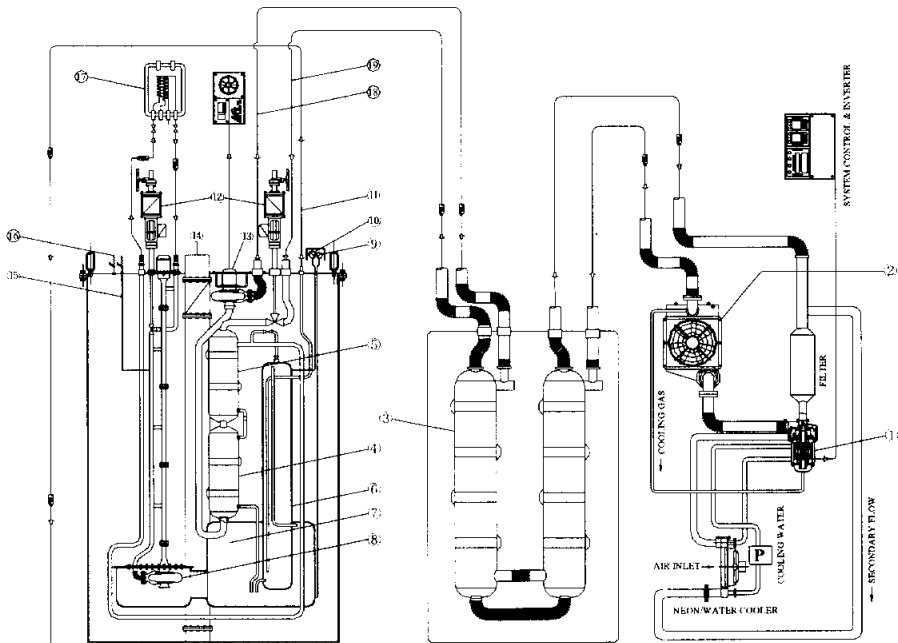


Fig. 2.9 Schematic diagram of reverse Brayton cryocooler

Table 2.1. Components of reverse
Brayton cryocooler

No.	Spec.
①	Compressor
②	After cooler
③	Recuperator
④	1st heat exchanger
⑤	2nd heat exchanger
⑥	Nitrogen liquid-gas separator
⑦	Liquified nitrogen chamber
⑧	Liquid nitrogen circulation pump
⑨	Pressure gauge
⑩	Liquid level gauge
⑪	Liquid nitrogen inlet line
⑫	Load flow control valve
⑬	Turbo alternator
⑭	Support pipe
⑮	Safety valve
⑯	Vacuum safety valve
⑰	Load(HTS cable)
⑱	Gas Ne inlet line
⑲	Gas Ne outlet line

제 3 장 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용한 cold box는 직경 1.4 m, 높이 2 m의 원통형 구조로 내부의 개략적 형태는 **Fig. 2.9**와 같다.

주요 재질로는 SUS 316L을 사용하였으며, 지지대(support pipe)는 전도 열전달을 고려하여 FRP(G 10)를 사용하였고, 구조적 강도를 위해 FRP에 SUS를 부착하는 방법을 사용하였다.

Cold box의 외부는 내조(內槽, inner vessel)와 외조(外槽, outer vessel)로 구성되어 있으며, 내조와 외조 사이의 공간, 정확하게는 내조 바깥면에 MLI 시공이 되었다. MLI의 층수는 30층으로 하였다. (권장 winding 횟수 : 28~30회/cm)

2.3.2에서 설명한 바와 같은 leak test를 행하여 기밀성을 확보하였다.

3.1 진공 배기

Cold box에 **Fig. 3.1**과 같은 일단의 펌프들을 연결한다.

MLI가 시공된 내-외조간 공간 뿐 아니라, 내조측에도 앞서 2.2에서 언급한 것과 같이 열침입 억제를 위해 진공 배기를 실시한다.

2.3.1에서 설명한 바와 같이 대기압에서부터 진공단열의 압력 영역까지 한 개의 펌프만으로는 진공을 얻을 순 없으므로(최근 출시되는 일부 펌프들 중엔 대기압에서부터 고진공 영역 정도까지의 진공 배기가 가능한 것도 출시되고 있기는 하다.) 각각의 압력 영역에 맞는 진공 펌프를 여러 개 사용한다.

Fig. 3.1에 표시된 펌프 1, 2, 3은 각각 오일 로터리, 부스터, 터보

펌프이다.

3대의 진공 펌프는 Fig. 3.1과 같이 직렬로 연결되어 있다. 진공배기가 시작되면 밸브 1이 열리고 오일 로터리 펌프가 구동되어 5×10^{-2} Torr 까지 밸브 2를 통해 진공배기한다. 이때 밸브 3, 4는 닫혀 있다. 이 진공도를 넘어서면 밸브 2가 닫히고 밸브 3이 열려 부스터 펌프로 진공배기를 시작한다. 이때 오일 로터리 펌프는 운전을 멈추는 것이 아니라 계속 운전되어 배기를 돕는다. 부스터 펌프로 5×10^{-4} Torr 까지 진공배기한다. 이 진공도를 넘어서면 역시 밸브 3이 닫히고 밸브 4가 열려 터보 펌프로 진공배기를 시작한다. 역시 부스터 펌프도 운전을 멈추지 않는다. 터보 펌프의 운전으로 진공도가 5×10^{-7} Torr 정도가 되면 밸브 1이 닫히고 펌프를 이용한 배기를 완료한다.

배기 완료 72시간 경과 후, 진공도를 체크하여 5×10^{-5} Torr 이상이면 진공 배기 및 기밀이 잘 이루어진 것으로 본다.

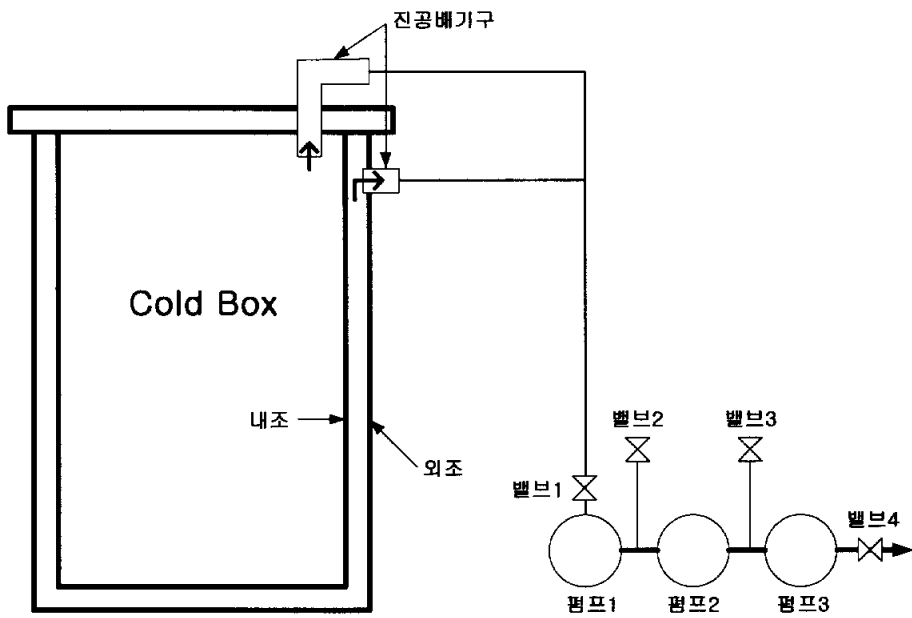


Fig. 3.1 Vacuum pumping

3.2 Cool down

2.4에서 설명한 바와 같은 field technique을 사용하였다.

Fig. 3.2와 같이 질소 기액분리장치 쪽에 연결된 질소 주입관에 저온의 질소를 공급할 supply dewar를 연결한다. 그리고 질소 이송관에 기화기를 부착하여 cold box 내로 유입되는 질소의 건도를 조절하도록 하였다.

Fig. 3.2와 같이 3군데에 온도 센서를 부착하여 cool down test의 진행과정을 살펴보는데 도움이 되도록 하였다. T1은 액체 질소 챔버의 하부 외면에, T2는 기액분리장치 상부 외면에, T3는 열교환기 상부 외면에 부착하였다.(cold box 내의 열교환기는 핀-관형 열교환기로 관측으로 질소가 흐른다. 따라서 T3는 질소의 유로와 직접 접촉하지 않고 질소가 흐르는 관과 접촉하고 있는 case의 외면에 부착된 것이다.)

질소의 주입은 앞서 설명한 바와 같이 급격한 온도변화에 기인한 열응력이 발생시키는 cold box 재질의 변형 및 파괴를 방지하기 위하여 [기(gas, 상대적 고온)→기액혼상(gas-liquid mixture)→액(liquid, 상대적 저온)]의 순서로 시스템 내로 주입한다. 이때 냉각 작용을 하고 가열된 질소 가스는 vent line을 통해 외부로 배기한다.

Cool down 대상 시스템의 크기가 1m^3 이하로 그리 크지 않으므로 cool down time은(전문 기술자의 의견을 따르자면) 열응력 등을 고려하더라도 1시간이면 충분하다.

질소 주입은 건도 1에서 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0 이렇게 10분 단위로 0.2씩 감소되게 한다.

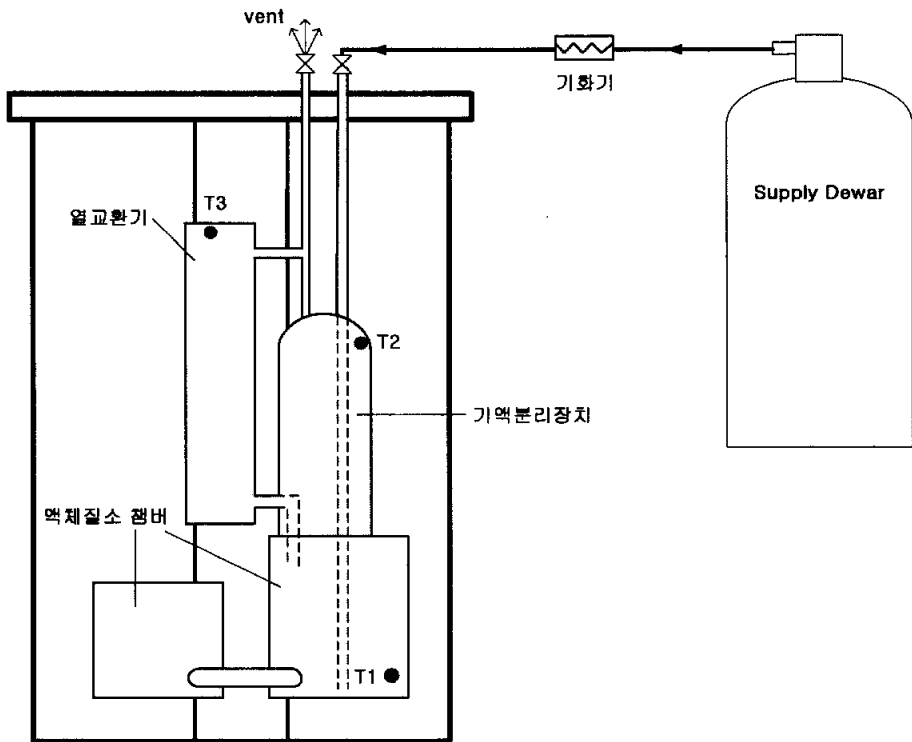


Fig. 3.2 Cool down apparatus

3.3 Insulation test

Cool down이 완료되면 cold box 시스템의 전체적인 단열 성능을 평가하는데 이를 insulation test라 한다.

Dewar, cryostat 등을 비롯한 극저온 용기 및 시스템의 insulation test는 냉각물질로 사용되는 ‘액화가스의 증발’을 통해 확인한다. 즉 극저온 시스템 내부에서 냉각물질로서 작동하는(순환하는 그렇지 않든) 액화가스가 외부로부터의 침입열량에 의해 얼마만큼 증발하는가를 관찰함으로써 해당 시스템의 단열 성능을 평가하는 것이다.

당초 시스템의 열설계를 통해 단열을 고려하나 극저온 영역에서의 단열 방법들은 아직 그 열전달 프로세스가 명확하게 밝혀지지 않았고, 공개된 연구 데이터도 많이 부족하여 정확한 설계가 사실상 불가능한 상황이다. 이러한 이유로 극저온 시스템들의 단열 성능은 cool down 이후, insulation test를 거쳐야 비로소 확실히 검증되는 것이다.

본 연구에서 시행한 insulation test 방법은 다음과 같다.

Cold box의 vent 측에 Fig. 3.3과 같이 gas meter가 부착되어있다. Cold box 내로 침입하는 열에 의해 봉입된 액체 질소가 증발하게 되면 부착한 gas meter에 의해 증발되는 가스의 양이 측정되는데, 이 측정되는 양이 단열 성능의 평가 기준이 된다. 각 시스템의 운전방식, 사용 목적 등에 따라 기준은 다르게 적용될 수 있다. 본 연구에서의 극저온 냉동 시스템은 cryostat 등과 같이 액화가스를 장기간 밀봉하는 형식이 아니기 때문에 좀 더 완화된 기준을 적용하였다. 질소가 들어가는 전체 체적을 만액 시켰다고 가정할 때, 하루 동안 그 체적의 5%에 해당하는 액체가 증발하는 정도의 질소가 배기 되면 단열 성능이 만족할 만한 수준이란 기준을 적용하였다.

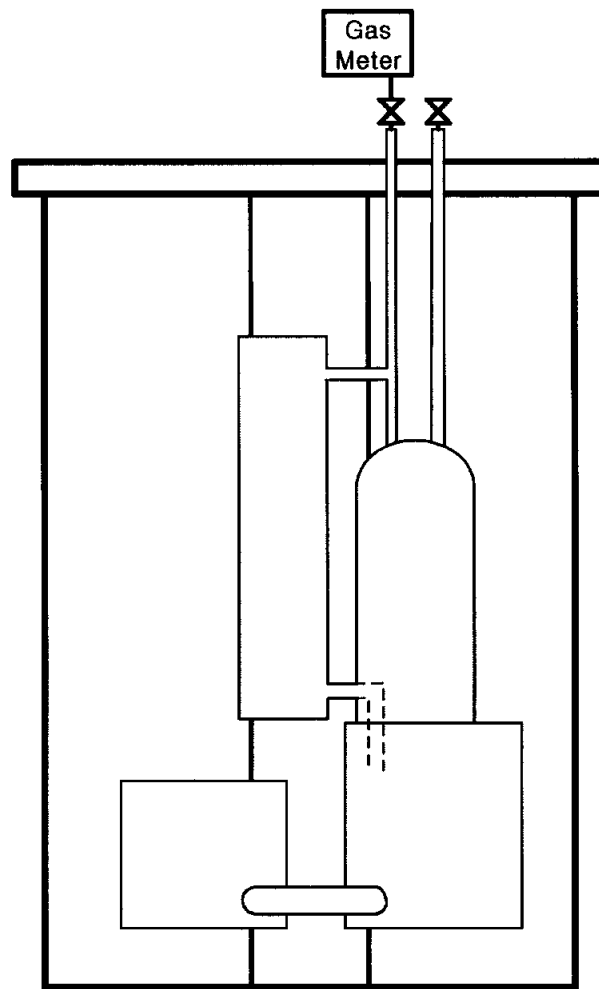


Fig. 3.3 Insulation test

3.4 반복 실험

신뢰성을 위해 각 test는 동일한 방법으로 3회씩 실시하였다.

고진공 상태에서 cool down 된 대상공간을 초기상태로 되돌리기 위해 [진공배기 → cool down → insulation test]로 구성되는 한 회의 실험을 완료한 후, 진공 밸브와 질소 주입구를 대기 중으로 개방하여 대상공간을 대기압, 상온 수준으로 되돌렸다.

압력과 온도를 초기상태로 회복하여 차회(次回)의 실험을 수행하는데는 8일의 시간 간격을 두었으며 실험 재개 전, T1, T2, T3의 온도를 체크하여 모두 293.7K 이상인 경우 실험을 수행하였다.

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 진공 배기

4.1.1 Test 1

Test 1의 진공 배기 결과를 나타내면 **Fig. 4.1**과 같다. 애초 대기압인 760 mmHg에서 오일 로터리 펌프를 사용하여 배기한 결과 1시간 만에 4.8×10^{-2} Torr까지 압력이 떨어져, 이후 부스터 펌프를 가동하였다. 이후 23시간을 더 배기한 결과 4.83×10^{-4} Torr까지 압력이 떨어졌다. 마지막으로 터보 펌프를 가동하였다. 3일(72시간)을 더 배기한 결과 진공도가 4.9×10^{-7} Torr까지 달성되었다. 이때부터 배기를 중단하고 연결된 valve를 차단하였다.

Fig. 4.1에서 보는 것처럼 pumping을 중단하면 진공도가 다시 떨어지는데(압력이 상승) 이는 outgassing 등의 leak 때문이다. 하지만 그림에서 보는 것처럼 배기 중단 후 29시간 이후(배기 시작 125시간 이후)부터는 진공도가 6.5×10^{-6} Torr 정도로 일정함을 관찰할 수 있다. 이는 진공 공간 내에 넣어둔 getter의 흡착량과 outgassing 등의 leak량이 평형을 이루었기 때문이다. **Fig. 4.2**은 getter를 적절히 채용한 시스템과 그렇지 않은 시스템을 비교한 것이다.

본 시스템의 진공도가 6.5×10^{-6} Torr로 MLI 적정 진공도 및 잔류 가스에 의한 대류 열전달을 무시할 수 있는 압력인 10^{-3} Pa(7.518×10^{-6} Torr) 이하이므로 단열을 위한 진공도로는 적절한 수준을 달성하였음을 알 수 있으며, 현장(field) 시공 허용의 기준으로 삼은 5×10^{-5} Torr도 충분히 만족하였다.

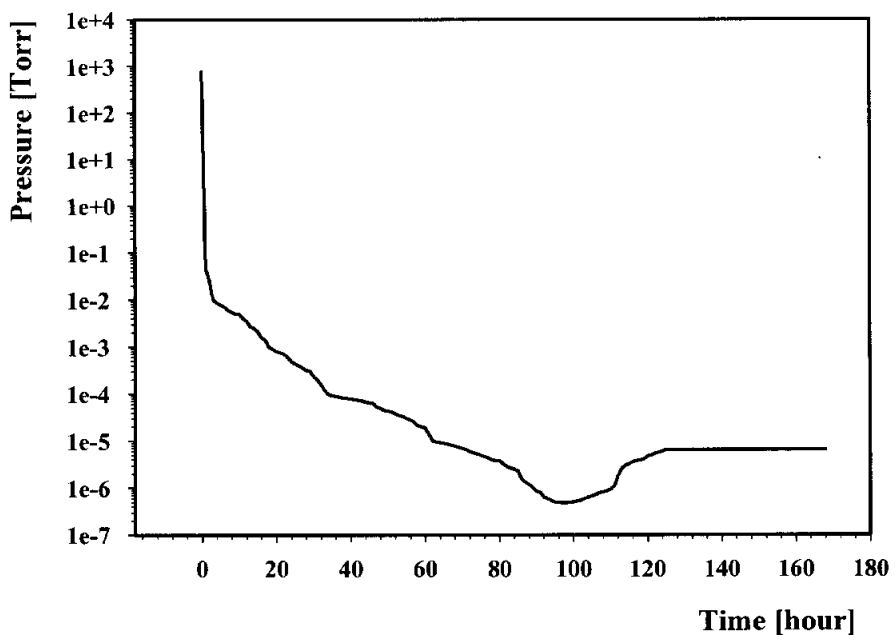


Fig. 4.1 Pumppdown behaviour of cold box on Test 1

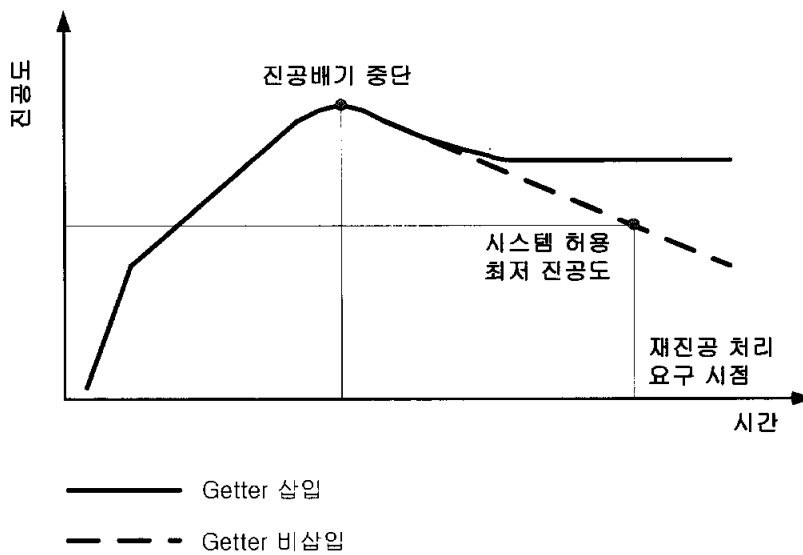


Fig. 4.2 Comparison of vacuum level
(getter & non-getter systems)

4.1.2 Test 2, Test 3

두 번째 실험의 진공 배기 결과를 나타내면 **Fig. 4.3**과 같다. 대기 압인 760 mmHg에서 오일 로터리 펌프를 사용하여 배기한 결과 1시간만에 4.9×10^{-2} Torr까지 압력이 떨어졌고, 이후 부스터 펌프를 가동하여 24시간을 더 배기한 결과, 4.6×10^{-4} Torr까지 달성되었으며, 71시간을 더 터보 펌프로 배기한 결과, 4.96×10^{-7} Torr까지 진공도가 달성되었다. 이후 밸브를 차단한지 27시간 이후부터는 진공도가 6.74×10^{-6} Torr 정도로 일정하게 유지되었다.

세 번째 실험의 진공 배기 결과를 나타내면 **Fig. 4.4**와 같다. 오일 로터리 펌프로 1시간만에 4×10^{-2} Torr까지, 이후 부스터 펌프를 26시간 더 가동하여 4.9×10^{-4} Torr까지 진공도를 달성하였고, 터보 펌프로 70시간을 더 배기한 결과 4.87×10^{-7} Torr까지 압력이 떨어졌다. 밸브 차단 27시간 이후부터는 진공도가 6.55×10^{-6} Torr 정도로 일정하게 유지되었다.

이상의 2회의 실험 결과 모두, 현장 시공 허용 기준으로 삼은 5×10^{-5} Torr를 만족하고 있다.

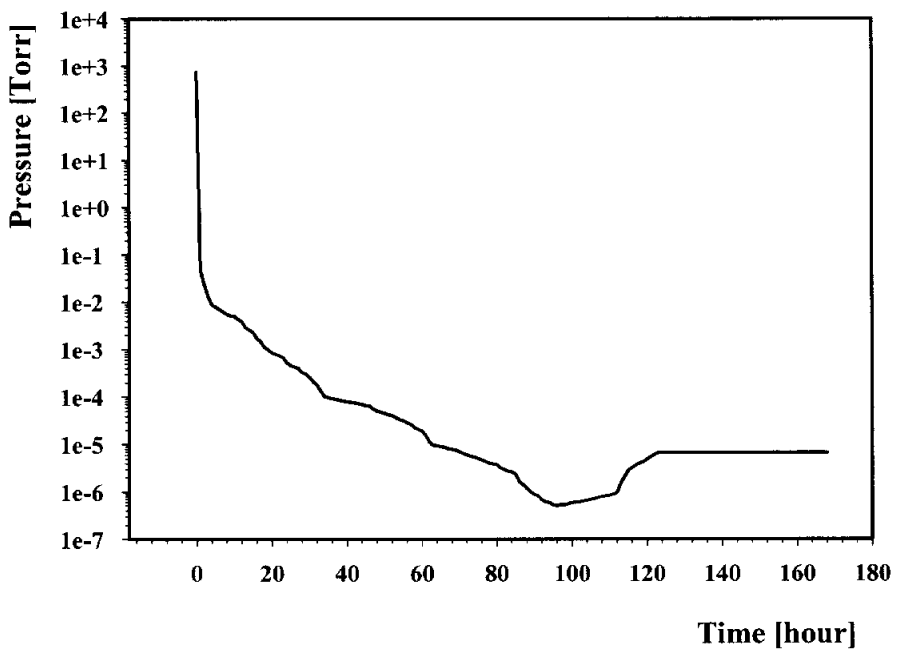


Fig. 4.3 Pumpdown behaviour of cold box on Test 2

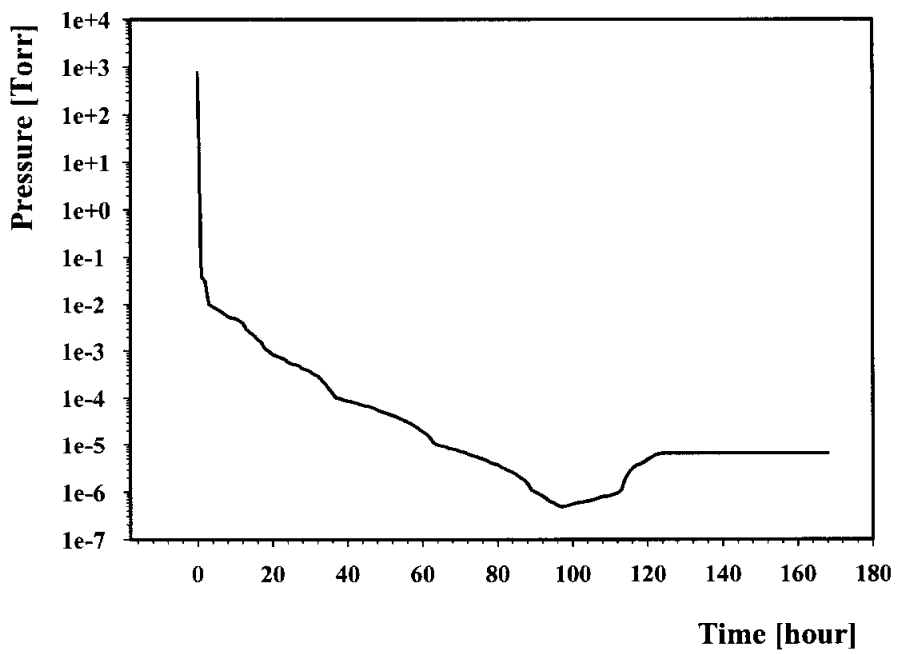


Fig. 4.4 Pumpdown behaviour of cold box on Test 3

4.2 Cool down

4.2.1 Test 1

전술한 바와 같이 질소의 건도를 낮춰가며 시스템 내로 투입하는 field technique을 사용하여 cool down test를 행한 결과는 Fig 4.5와 같다.

Graph에서처럼 초반 10분간 가스만을 주입한 경우에는 T1, T2의 온도는 거의 일치하고 있다. 저온의 질소와의 직접 접촉이 아닌 SUS를 통한 전도에 의해 냉각되는 T3는 T1, T2 보다 상대적으로 냉각속도가 느리다. 일부 액이 주입되는 10분 이후부터는 액의 증발잠열의 효과에 의해 챔버 하부(T1)가 먼저 급격하게 냉각되었다. 질소 주입 20분 이후부터는 챔버 하부의 온도는 액체 질소 온도 수준이 되었다.(78K) 액의 비율이 증가됨에 따라, 기액분리장치 상부의 온도도 액체 질소의 온도에 근접하게 되고 주입 시작 48분 이후, 액체 질소 온도 수준까지 냉각되었다. 곧이어 주입 시작 53분 이후 T3도 액체 질소 온도 수준까지 냉각되었다.

Cool down 시작 10~30분 사이, T2에서의 상대적으로 높은 온도 변화율은 기액분리기 ‘외벽에 부착된’ 온도 센서의 특성상 재질(SUS)을 통한 전도에 의해 센서 위치 수준의 챔버 내 보다 냉각이 빨리 되었었던 것이라 사료된다. 이와 같은 이유로 T3도 T2에 비해 액체 질소 온도 수준까지의 냉각에 조금 더 많은 시간이 걸리긴 하지만 T2와 유사한 온도 변화율을 보인다. 다만 T2는 저온의 질소와 직접 접촉하고 T3는 질소가 흐르는 내부의 관으로부터의 전도에만 의존하므로 T2에 비해 일정 수준까지의 냉각에 더 많은 시간이 소요된 것이라 사료된다.

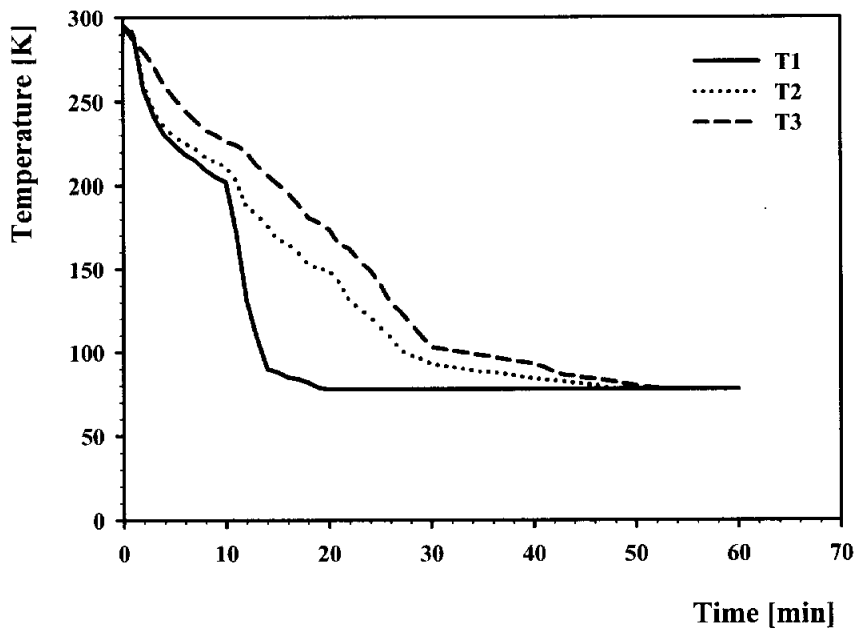


Fig. 4.5 Cool down behaviour of Test 1

4.2.2 Test 2, Test 3

두 번째 실험의 cool down test 결과는 Fig. 4.6, 세 번째 실험의 cool down test 결과는 Fig. 4.7과 같다.

두 실험 모두 Test 1과 유사한 결과를 보이며, T1이 78K로 되는 시간도 주입 시작 20분 이후부터로 동일하다. Test 2에서 T2가 액체 질소의 온도 수준까지 되는 것은 주입 시작 50분 이후부터, T3가 액체 질소의 온도 수준까지 되는 것은 주입 시작 54분부터이다. Test 3에서 T2가 액체 질소의 온도 수준까지 되는 것은 주입 시작 49분 이후부터이고, T3는 52분부터이다.

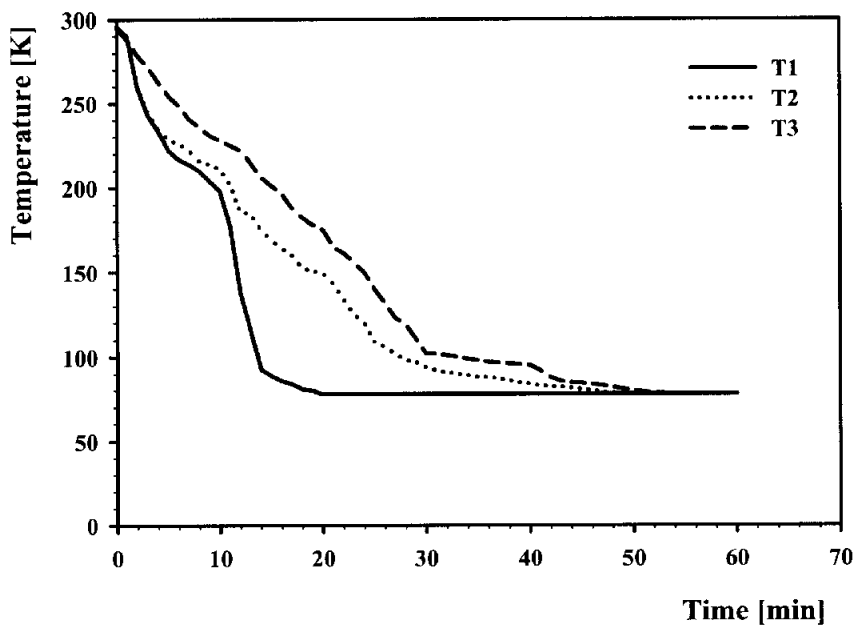


Fig. 4.6 Cool down behaviour of Test 2

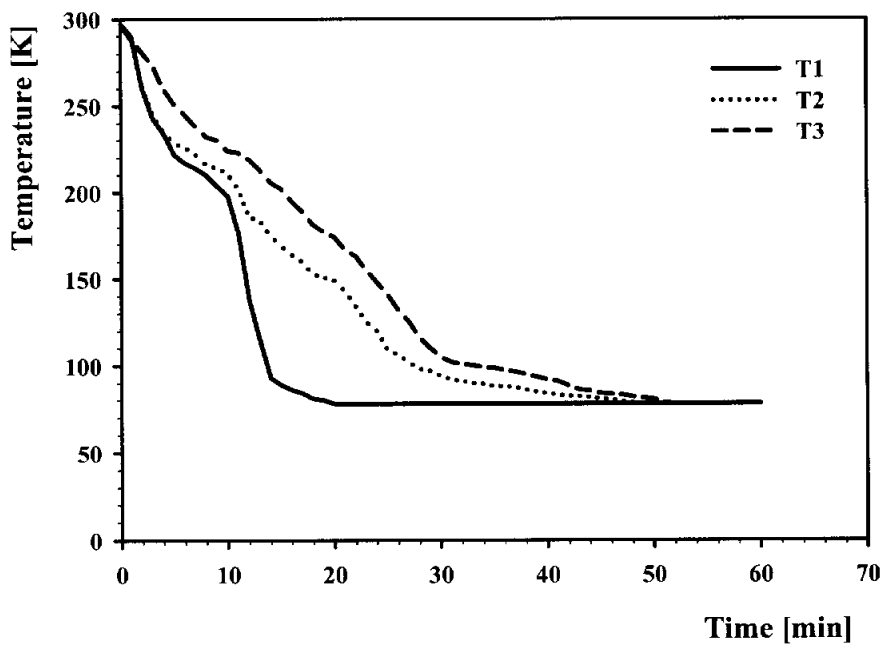


Fig. 4.7 Cool down behaviour of Test 3

4.3 Insulation test

먼저 기액분리장치와 액체 질소 챔버, 열교환기 내 질소 유로를 만약 시켰다고 가정하면 그 체적은,

$$(\pi \times 0.25^2 \times 0.32) + (\pi \times 0.28^2 \times 0.48) + (\pi \times 0.15^2 \times 0.6) + \left(\frac{2}{3} \pi \times 0.15^3\right) + \left(\frac{\pi}{4} \times 0.00774^2 \times 79\right) \approx 0.27432[m^3]$$

이 경우의 5%면 0.013716 m^3 으로, 3.3에서 전술한 바와 같이 하루에 이 정도 체적의 액이 증발할 정도의 열침입량이라면 단열이 만족할 만한 수준으로 이뤄졌다는 기준을 적용하였다.

1기압 하에서 질소의 비등점은 77.3K로 이때의 액체 질소의 밀도는 807.3 kg/m^3 이다. 가스메터의 온도를 일반적인 실온 300K로 가정한다. 이때의 기체질소의 밀도는 1.123 kg/m^3 이다.⁽¹⁸⁾ 77.3K의 액에서 300K의 기체로 증발팽창한다고 하면, 그 체적팽창은 77.3K인 액의 718.878배가 되는 셈이다. 즉 하루에 다음과 같은 양 이하의 가스가 검출되면 단열성능이 만족할만한 수준이란 것이다.

$$0.013716 \times 718.878 = 9.860131[m^3/day]$$

이를 시간으로 환산하면 $0.410839 \text{ m}^3/hr$ 이다.

Cool down test 완료후 6시간 동안 가스메터로 증발되는 액체 질소의 양을 측정한 결과, Test 1에서는 총 2.435124 m^3 의 질소 가스가 가스메터를 통해 배기 됐다. 이를 1일로 환산하면 $9.740496 \text{ m}^3/day$, 1시간으로 환산하면 $0.405854 \text{ m}^3/hr$ 로 단열 성능은 만족할만한 수준이라고 하겠다.

이 증발량을 통해 대상공간 내로 침입하는 열량을 역으로 계산할

수 있다. 배출되는 질소 기체의 밀도는 1.123 kg/m^3 이므로, Test 1에서 배출되는 가스의 질량은,

$$0.405854 \times 1.123 = 0.455774 [\text{kg/hr}]$$

1기압 하, 질소의 증발잠열은 199.3 kJ/kg 이므로, 대상공간 내로 침입하는 열량은,

$$0.455774 \times 199.3 = 90.835767 [\text{kJ/hr}] = 25.232 [\text{W}]$$

이상과 같이 Test 2와 Test 3을 수행한 결과, 검출되는 증발량은 각각 $0.401835 \text{ m}^3/\text{hr}$ 과 $0.400216 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이었다. 그리고 검출되는 증발량을 통해 역산한 침입 열량은 각각 24.982294 W 와 24.881640 W 이다.

Test 2, Test 3 모두 단열 기준을 만족하였고, 비슷한 증발량을 보였다.

그리고 이 결과들은 다음과 같은 사전에 미리 산정 해본 열침입량과 거의 일치하였다.

구분		계산 열침입량 [W]
전도	각종 밸브류	4
	Access port	3
복사	MLI 단열($\varepsilon=0.04$)	18
계		25

제 5 장 결 론

극저온 시스템에서는 단열이 필수적이고 cold box는 각 구성요소 개개에 대한 단열이 아닌 시스템 차원에서의 단열 장치이다. 보다 효과적인 단열이 요구되기 때문에 진공단열, 다층단열 등의 방법이 요구되고, 극저온의 냉각물질이 그 내부에 존재하게 되므로, dewar나 cryostat 등과 같이 cool down이나 단열성능 평가 등이 요구된다. 그러나 불행히도 아직 이 cold box에 대한 공개된 연구 data가 거의 없고, 진공배기, cool down test 등에 관한 확실한 기준도 정확히 제시되지 않은 상황이다.

이에 본 연구에서는 현장 실무자들의 field technique을 채용, cold box를 제작, test 하였으며 만족할만한 결과를 얻었다.

Test는 진공배기, cool down, 단열성능평가 3가지로 이를 통해 cold box의 성능을 평가하였다. 각 평가의 방법 및 기준은 다음과 같다.

(1) 진공배기는 진공 pump의 사용압력에 맞게 단계적으로 시행하며, MLI 단열법을 사용할 때, 허용 최저 진공도는 5×10^{-5} Torr로 본 연구에서의 cold box는 이 기준을 잘 만족하였다.

(2) Cool down은 재료의 열응력에 의한 파괴를 방지하기 위해 cool down용 냉각유체의 건도를 단계적으로 줄여가며 시행한다.

(3) 단열성능은 열침입에 따른 봉입된 냉각물질의 증발량을 통해 평가하며 하루 동안 대상 공간 전체적의 2%에 해당하는 냉각물질이 증발하는 것을 단열 성능의 최대 허용치로 한다. 이 때 본 연구에서의 cold box는 하루 동안 전체 체적의 1.75% 가량이 증발하는 수준

으로 단열 성능 평가 기준을 잘 만족하였다.

이상에서와 같이 본 연구에서의 cold box는 field technique 상의 기준을 잘 만족하여 상용으로서의 기준에 부합되는 수준이라 할 수 있다.

앞서 서론에서도 언급하였지만, 본 논문에 소개된 내용들은 cold box 제작과 관련한 주요 D/B로서 추후 cold box 및 여타 극저온 관련 시스템의 설계, 제작에 많은 도움이 될 것이라 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) 박재홍, 권용하, 김영수, 박성출, 2003, "HTS 케이블 냉각용 역브레이튼 사이클 극저온 냉동기 설계에 관한 연구, 한국초전도·저온공학회 논문지 5권, 2호, pp. 58~65
- (2) 박재홍, 2003, 초저온 공학, 부경대학교, pp. 5~13
- (3) J.W.H. Chi, 1965, "Cooldown temperatures and cooldown time during mist flow", Advances in cryogenic engineering, vol. 10, pp. 330~340
- (4) M.V. Krishnamurthy, Rajneesh Chandra, 1996, "Experimental studies on cool-down and mass flow characteristics of a demountable liquid nitrogen transfer line", Cryogenics 36, pp. 435~441
- (5) J.G. Weisend II, 1998, "Handbook of cryogenic engineering", Taylor & Francis
- (6) 권영길, 1995, 초전도 응용을 위한 극저온 기술, 극저온 냉동 Workshop, pp. 137~157
- (7) Klaus D. Timmerhaus, 1989, "Cryogenic process engineering", Plenum Press, pp. 387~392
- (8) 김성래 外, 2000, 전신촬영용 MRI cryostat 개발, 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp. 39~42

- (9) Randall F. Barron, 1990, "Cryogenic heat transfer", Taylor & Francis
- (10) P.J. van den bosch et al. , 1997, "Cryogenic design of a high-T_c SQUID-based heart scanner cooled by small Stirling cryocoolers", Cryogenics 37, pp. 139~151
- (11) H.J.M. ter Brake and J. Flokstra, 1988, "Computer aided cryostat design in Twente : recent developments", Cryogenic engineering conf. , pp. 88~92
- (12) 김성래, 권오범, 2000, "Cryostat 제작 및 응용 기술, 초전도와 저온공학 2권 2호, pp. 37~43
- (13) 황태성, 2000, 열처리 기술자를 위한 기초 진공 기술, 보문당
- (14) 주장현, 1999, "진공 기술 실무, 에드텍
- (15) 배석희 外, 2000, "진공 공학, 한국경제신문
- (16) F. Kreith et al. , 1963, "Cool-down and warm-up of large powder-insulated dewars", Advances in cryogenic engineering, vol. 14, pp. 536~543
- (17) 노승탁, 2002, 최신 공업열역학, 문운당, pp. 222~223
- (18) 정상권 外, 2002, 저온 공학의 기초, KAIST 기계공학과, 한국초전도·저온공학회

- 감사의 글 -

까까머리, 더플 코트를 입고 대학의 문을 두드린 지... 벌써 9년이나 됐습니다. 헉~ ... 한 학교에서 졸업 두 번 하기도 머리털 나온 참이고.(또 한 번 더 남았다니...)

‘많이’ 미흡하고, 부끄럽지만, 뭔가 하나의 결과물을 들고 있지니 별의 별 생각이 뱅튀기 터지듯 머릿속을 비산합니다.

누군가 큰엄한 얼굴로 ‘후회는 할망정 최선을 다한 기간이었냐?’고 묻는다면 얼굴을 붉히며 고개 떨구고 말겠지만, 그래도 차가운 바닥 위에서 부시시 일어나 무료급식 타는 걸로 하루를 열지 않게 ‘맡어주고 끌어주신’ 어러분들이 있기에, 미흡하지만 ‘이게 내 것이오’하고 조심스레 내밀 수 있게 된 지금의 제가 있는 것일 겁니다.

너무나도 바쁘신 와중에도 지도편달 해주신 지도교수 김영수 교수님, 그리고 오후규 교수님, 김종수 교수님, 급종수 교수님, 최광환 교수님, 윤정인 교수님, 정석권 교수님, 김은필 교수님. 교수님들의 지도와 애정, 염려가 아니었다면 저를 비롯한 저희 과 학생들의 지금이 없을 겁니다. 항상 건강하시고, 가정엔 사랑과 평화가 가득하길 바랍니다. 물론 추진하시는 연구들의 부궁한 발전도 아울러서 말입니다.

인관이형, 태호형, 너무나도 업무가 과중한 재홍이형, 말이... 필요 없는 종환이, 동기 녀들 밑에서 고생하는 광수, 정용, 정원, 열심히 잘 적응해 나가고 있는 종보, 기본이 된 용연이, 재말 의형은 님지 말았으면 하는 리틀 J 지환이. 우리 실험실 사 람들에게 2004년에는 Lotto의 은중이!!!

그리고 춘남, 창호, 병환, 형철, 승분, 용빈, 수정, 호생 선배들. 제게 관심을 가져 주시는 여러 선배들에게도 꾸벅.

& 기석, 동완, 재홍, 영수, 재연. 동기 형들도 땡큐.

&& 와지니 험, 병조, 따로 땡큐.

빠놓을 수 없는 녀석들, 준호-준모 Brothers, 주완이 녀석. 땡큐에 묻혀 버려랏~!

.....

마지막으로,

이 나이 되도록 철이 덜든 동생 땡에 항상 속삭이는 하나밖에 없는 우리 누나.

아들 밖에 모르셨지만, 끝내 호강 한 번 시켜드리지 못해, 죽는 그 날까지 죄스러울 어머니. ... 부디 천국에서 웃어주세요.

.....

언제나 태평한 제 신조, 낯선 검은 대륙의 말 한마디가 주위 모든 분들에게도 힘이 되었으면 합니다.

하쿠나 마타타~!