

## Bath cryostat의 제작특성에 관한 연구

김 구 영\*

### A study on the construction characteristic of bath cryostat

Goo-Young Kim\*

#### ABSTRACT

The bath cryostat of cryogenic apparatuses which are generally used to study physical phenomena under low temperature and ultra low temperature has been designed and constructed. The practical use of the cryostat is verified by the measurement of the storage life of liquid helium and liquid nitrogen vessels. The cryostat consists of triple structure of high vacuum environment in order to minimize the evaporation rate of liquid helium and liquid nitrogen by thermal conductivity and radiant heat. The minimum thickness which can stand against inner and outer pressures is calculated from considering the strength of the material.

**Key Words :** Bath cryostat, Low temperature(저온), Thermal conductivity(열전도), Storage life of LHe-LN<sub>2</sub> Vessels(액체헬륨-질소용기의 저장수명)

#### 1. 서 론

저온과 극저온은 현대의 연구기술분야에서 필수적인 부분이 되었다. 그 몇가지 간단한 예를 들자면 이들 분야는 가스액화 및 분석, 금속제조산업, 생필품 저장 및 운송, 전자통신기술, 진공기술, 로켓 및 초전도기술, 핵 및 소립자 물리, 고체물리등에 이용되고 있으며 아울러 저온 생물학과 저온 의학 분야에도 사용되고 있다. 또한 최근에 반도체 기술과 컴퓨터 기술은 저온에서의 다양한 실험으로부터 얻어진 온도 의존적-물리적 파라미터의 연구결과에 대한 지식 없이는 결코 생각할 수 없으며, 그 예로써 전기전도율, 홀효과(hall effect)의 대전운반자의 접속(charged carrier concentration), 분광학적 데이터, 비열, 열전도, 열전 파라미터(thermoelectric parameter), 자화율, 라만효과(Raman effect), 중성자 퍼위 및 회절(neutron

deviation and diffraction) 등이 있다<sup>1)</sup>.

저온하에서는 원자나 분자의 열적운동이 극히 제한되므로 매우 많은 물리적 현상에 대해 원칙적인 연구와 이해가 가능하다고 말할 수 있을 것이다. 따라서 저온 분야에 대한 다양한 연구 경험이 요구되게 되었으며 또한 그 저온장치의 응용방법이 많이 개발되기 시작하였다.

본 연구에서는 저온하에서 연구를 실행하는 데에 필수적이면서 저온냉각장치의 기초가 되는 bath cryostat의 설계 특성에 관하여 고찰하고 실제 설계제작을 시도하여 그 결과 4K이하의 저온을 실현하였으며, cryostat 설계 목적의 핵심인 냉매(LHe, LN<sub>2</sub>)의 저장수명시간을 10ℓ 액체헬륨(LHe) 용기와 12ℓ 액체질소(LN<sub>2</sub>) 용기에 대하여 각각 약 139 hr과 48.5 hr의 좋은 결과를 얻었다.

\* 한국표준과학연구원 공작실(정희원)

## 2. Bath cryostat의 설계특성

### 1. 액체 냉각제의 특성

모든 cryostat 설계기술의 우선적인 요지는 액체 냉각제의 특성과 밀접한 관련을 갖는다. 특히 액체헬륨의 특성은 다음 Fig. 1.에서 보는 바와 같이 액체와 기체 상태의 엔탈피의 진행과정이 대단히 중요하다<sup>2)</sup>. 액체헬륨의 극히 낮은 증발열  $Q_v=2.7 \times 10^3 \text{ J/l}$ , 그리고  $Q_v=2.1 \times 10^5 \text{ J/l}$ 로서  $Q_v$ 가 80배에 달하는 4.2K~300K 사이의 상대적으로 높아진 냉각가스 엔탈피등은 완벽한 열적분리와 냉각가스 엔탈피의 최선의 이용이라는 측면에서 설계에 고려해야 할 사항이다. 1W의 열적손실은 약 1.4ℓ LHe/h를 증발시키게 되지만 적절한 열교환기를 사용하여 헬륨가스 냉매의 엔탈피를 완전하게 이용하는 경우 단지 17cm<sup>3</sup>/h에 불과하다. 이것은 즉 냉각에너지의 부분적 이득이 대개의 경우 헬륨가스 자체내에서 얻어진다는 것을 의미한다.

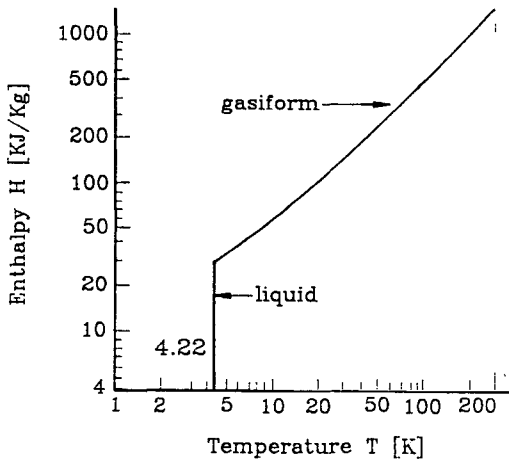


Fig. 1. Enthalpy of helium under 1 atm.

### 2. 열전도

Cryostat 설계에서 열적분리 (thermal isolation) 상태가 양호하면 냉매소비량이 줄어들게 되어 그 냉매저장수명이 길어지게 된다. cryostat의 열전달은 실제로 2가지 크기 즉 열전도와 복사를 통하여 이루어진다. 이때 용기내의 잔류가스를 통한 대류와 열전도는 보통 고진공 (<math>10^{-5} \text{ pa}</math>) 하에서 무시될 수 있다.

열전도에 의한 열의 이동은 중심시험관, 냉매공급관, 실험통로 및 배선통로 등을 경유하여 이루어지며, 이러한 고체재료를 통한 단위시간 당의 열전도는 고온  $T_1$ 에서 저온  $T_2$ 까지 흐른 열량으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>3)</sup>.

$$\dot{Q}_{\text{TC}} = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT = \bar{\lambda} \frac{A}{L} \Delta T \quad (1)$$

$\lambda(T)$  : 재료의 열전도력 (W/cm K)

A : 재료의 단면적 (mm<sup>2</sup>)

L : 고온  $T_1$ 과 저온  $T_2$  사이의 열전도된 재료의 길이 (mm)

이러한 공식에 의한 계산이나 주어진 데이터를 사용하여 다음과 같은 설계요소를 어떻게 해결할 것인지를 최종적으로 결정할 수 있다.

- 1) 열적분리거리 (distance of thermal isolation)를 얼마나 길게 해야만 하는지?
- 2) 주어진 강성에 의한 용기벽 두께는 얼마나 얇게 선택할 수 있는지?
- 3) 원하는 매개온도 (intermediate temperature)를 얻기 위해서 복사보호관 (shields of radiation), 중심시험관 등의 열적 연결은 어떻게, 어디에 할 것인지?

위의 3가지점의 결정에 있어 특히 고려해야 할 점은

- 시험설비 (cryostat 부품, 탐침, 호우더, 전기공급로)를 통한 열적부하는 소형실험 장치의 경우 대개는 중심시험관에 의한 열의 이동으로 부터 발생된 열적부하가 대부분을 차지하게 된다.

- 중심시험관과 차거워진 헬륨 냉각기체 사이의 열교환에 대한 정확한 계산을 해야한다. 이 계산은 물론 대단히 복잡하다. 냉각기체와 중심시험관 사이의 열교환은 대개 매우 활발하기 때문에 실제 설계에서는 중심시험관의 단면적 A에 대한 관의 길이 L의 비는 최소화된 열흐름만이 존재하도록  $10 < L/A < 30 \text{ cm}^{-1}$ 의 범위를 넘어서는 안된다.

가장 많이 사용되는 재료의 온도범위에 따른  $\lambda(T)$ 의 값은 Table 1. 과 같다<sup>4)</sup>.

Table 1. Thermal conductivity of typical materials for low temperature

Range of temperature	inwatt/cm K						
	T <sub>2</sub> =300K T <sub>1</sub> = 77K	T <sub>2</sub> =300K T <sub>1</sub> = 20K	T <sub>2</sub> =300K T <sub>1</sub> = 4K	T <sub>2</sub> =77K T <sub>1</sub> =20K	T <sub>2</sub> =77K T <sub>1</sub> = 4K	T <sub>2</sub> =20K T <sub>1</sub> = 4K	T <sub>2</sub> =4K T <sub>1</sub> =2K
Stainless steel (18% Cr : 8-9% Ni)	0.123	0.109	0.103	0.055	0.045	0.0097	0.0022
Nickel Silver (47Cu : 41Zn : 9Ni : 2Pb)	0.20	0.19	0.18	0.14	0.12	0.039	0.005
Brass (70 Cu : 30 Zn)	0.81	0.70	0.67	0.31	0.26	0.078	0.015
Copper (OFHC)	0.91	1.71	0.63	0.95	0.80	0.25	0.07
Copper (electrolyte-cu)	4.1	5.4	5.7	0.7	9.8	10	4
Monel annealed (66 Ni : 2 Fe : 2 Mn : 30 Cu)	0.207	0.192	0.183	0.133	0.113	0.040	0.007
Monel hard (72 Ni : 14-17 Cr : 6-10Fe)	0.125	0.111	0.106	0.061	0.051	0.012	0.003
Pyrex glass	0.0082	0.0071	0.0068	0.0028	0.0025	0.0012	0.0007

3. 열복사

열복사에 대한 정확한 이해는 실제의 경우 매우 어렵다 할 수 있으며 특히 복사교환이 복사의 축길이의 기능과도 같은 수직 표면상의 복사능과 흡수력을 정확히 알아야만 한다. 복사로 인해 이동된 열량은 Stefan-Boltzmann의 복사법칙으로써 정의된다<sup>5)</sup>.

$$\dot{Q}_R = \sigma \cdot \epsilon \cdot A (T_1^4 - T_2^4) \quad (2)$$

Q<sub>R</sub> : 단위 시간당 저온 표면에 전달된 열량 (W)

σ : 복사상수 (Stefan-Boltzmann constant)

$$= 5.67 \cdot 10^{-12} (W \text{ cm}^{-2} \text{ K}^{-4})$$

T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> : 고온, 저온 표면온도 (K)

A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> : 고온, 저온 표면적 (mm<sup>2</sup>)

ε : 고온 표면 ε<sub>1</sub>와 저온 표면 ε<sub>2</sub>의 기하학적인 방출 계수 (Emission coefficient)

방출계수 ε는 열복사의 감소를 위해 중요하다. ε는 표면에 반사된 복사광이 강하면 강할수록 그 값이 더 작아진다. 여기서 특히 중요한 것은 전기적 전도성이 좋은 재질이다. 오염된 표면, 응축개스로 덮인 표면이나 합금을 사용한 표면에서는 방출계수가 커진다. 자주 사용되는 재료의 ε값이 Table 2.에 나타나 있다.

Table 2. Emission coefficients of typical materials.

Material	ε
Au	0.01
Ag	0.02 (300K)
	0.008 (77K)
Cu, electrical	0.018~0.008
	-polished
	polished
Oxidized	0.03
	0.2~0.8
Brass, polishing	0.03
Al, electrical	0.03 (300K)
	-polished
	Oxidized
	0.02 (77K)
	0.3~0.8
Stainless steel	0.05
	gold-plated
	0.03
Glass, Teflom, Nylon	≥ 0.9
Super-insulation	1 ~ 0.02

대형 cryostat에서는 경우에 따라 방출표면이 수 평방 미터에 달 할 수도 있다. 이때에 수반되는 열복사는 냉각매체의 증발을 현저히 촉진케 된다. 이러한 경우 복사를 감소시킬 수 있는 두가지 가능성이 있다.

- 1) 표면 폴리싱을 통하여 ε의 값을 최소화하고 산화를 방지하기 위하여 금 또는 니켈도금을 한다. 가장 간단한 효과적인 방법은 오염된 표면위에 특수 절연체를 덧 씌우는 것이다.
- 2) n개의 복사 보호판을 추가해 끼워 넣으므로써 열복사 손실을 감소시킨다. ( $Q_R = 1/n + 1 \cdot Q_R$ )

이러한 방법에 의한 특수 절연체의 사용으로 복사를 열배이상 감소시킬 수 있다. 특수절연체는 열전도를 줄이기 위하여 거친 표면으로된 금속증착 호일과 두겹의 유리섬유 혹은 종이로 구성되어 있다. 특수절연체의 사용에 따른 단점은 복합적으로 생성된 넓은 표면으로부터 나중에 발생하는 가스로 인한 저온장치내의 펌핑시간이 길어지게 되는 점이다.

4. 비열(Specific heat)

이 파라미터는 300K로 부터 4.2K까지 냉각이 이루어지면 약 0.5~0.6배 정도가 항시 변화하게 된다. 액체 헬륨으로 냉각된 물질의 비열이나 실험중에 있는 cryostat 냉각부위의 온도변화 또한 마찬가지로 냉각제 절약의 이유에서라도 가능한 한 적게 유지되어야 한다. 즉 냉각장치의 각 설계 요소들 (액체헬륨 용기의 재료, 관의 직경, 최소두께등)은 최소한의 열 흡수용적(thermal capacity)을 갖도록 설계되어야 한다. 단 이것은 설계 요소 부품의 강성을 고려하는 것을 전제로 허용되어야 한다.

Table 3. 은 1kg의 각기 다른 재료를 300k에서 4K내지는 77K까지 냉각시킬때 필요한 액체헬륨과 액체질소의 소비량을 나타낸 것이다.

5. 열팽창(Thermal expansion)

냉각용 금속재료(Cu, 스테인레스강)은 4K이상의 상온에서 어느 정도의 수축을 일으킨다. 예를 들어 길이 1m의 Cu에 대해서 3.5mm의 길이변화를 예측할 수 있다. 양단 고정된 재료의 경우 발생된 수축응력은 최대사용 응력 이상으로 되게 된다. 그러므로 특히 여러 재료를 사용하여 cr-yostat를 설계할 때는 각 재료의 열팽창계수를 고려해야만 한다. Table 4. 는 cryostat의 설계에 자주 사용되는 재료를 나타낸 것이다.

3. Bath cryostat의 설계제작

1. 기본원리 및 구조

Bath cryostat의 사용목적은 냉매인 액체헬륨, 액체 질소의 저장 수명시간을 가능한 한 장시간 동안 연장시켜 4K이하의 극저온을 실현하는 데에 있다. 이를 위해서는 액체질소 용기와 액체헬륨 용기를 상온으로부터 철저히 격리시켜 열의 이동에 따른 열적손실을 방지해야 한다.

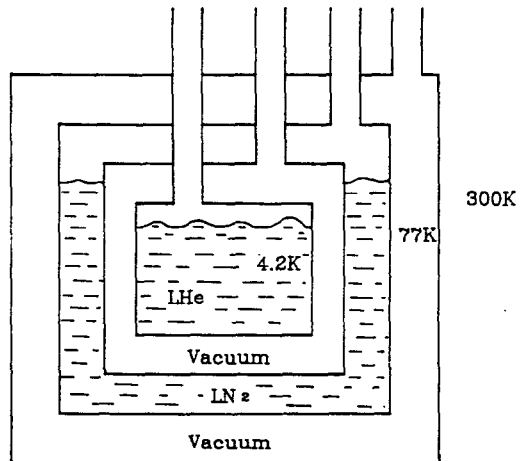


Fig. 2. Schematic diagram of bath cryostat.

Table 3. Consumption of coolant for refrigeration of metals.

Start-, end-temperature	Consumption in Liter LHe/Kg-metal by utilization of vaporized heat (and of cold gas-enthalpy)		
	Aluminium	Stainless steel	Copper
LN <sub>2</sub> : 300K → 77K	1.00 (0.63)	0.53 (0.33)	0.46 (0.28)
LHe : 300K → 4.2K	66.40 (1.60)	33.60 (0.80)	31.60 (0.80)
77K → 4.2K	3.20 (0.22)	1.44 (0.10)	2.16 (0.16)

Table 4. Typical materials used for cryostat

용도	재질
Vacuum chamber	Stainless steel (STS 303, STS 304, STS 316) Al 및 Al 합금, Glass fiber-강화 플라스틱
LN <sub>2</sub> and LHe Vessel	Stainless steel (STS 303, STS 304, STS 316) Cu, Glass fiber
Radiation shields, evaporator, probe holder	Cu, Al (Brass도 가능)
Thermal bridge	Cu, Copper-Beryllium, Phosphor bronze
Supports	Stainless steel tube, Nylon, Teflon, Quartz
Cold sealings	Indium (또한 Al, Cu, Ag, Teflon)
Super Insulator	Al-vapor deposition Mylar-and Hostaphan-foils, Al-foil with glass fiber paper or nylon nets etc, -aerated plastics
Heater	Constantan, Carbon resister
electric lead wires/insulators	Cu, Constanten/Sapphire, Quartz

장치는 Fig. 2. 에서 보는 바와 같이 외부 진공용기, 액체질소 용기 및 액체헬륨 용기의 3중 구조로 되어 있으며 각 용기 사이를 고진공(10<sup>-5</sup> Pa 이하)으로 격리하므로써 열의 이동을 근본적으로 차단하는 원리를 가진다. 액체헬륨 용기는 직경 200mm, 길이 320mm로 용량은 약 10ℓ이며 액체질소 용기는 직경이 210mm, 길이 360mm의 용량 약 12ℓ이다. 이들 용기는 복사에 의한 열적손실을 최대한 억제하기 위하여 양면이 경면 폴리싱된 스테인레스강 강판을 사용하였으며 TIG 용접에 의한 접합이 될 수 있는 구조로 설계 되었다. 진공용기는 직경 280mm, 길이 1005mm로써 사용 재질은 역시 스테인레스강이다. Fig. 3. 에서 보는 바와 같이 시험중심관, 액체헬륨 주입구, 액체질소 주입구, 진공용기의 상하 플렌지등은 모두 스테인레스강의 재질을 사용하였으며, 액체질소-복사보호판은 OFHC의 재질을 선택하였다.

2. 설계계산

가. 용기 및 관의 두께

액체헬륨 및 액체질소 용기는 시스템이 진공상태일때 내압이 작용하게 되고 실제 가동 및 조립전 누설시험시에는 외압이 작용하게 된다. 따라서 이들 용기의 두께 결정에는 내·외압의 영향을 모두 고려해야만 한다. 그러나 진공용기의 경우에는 외압의 영향만을 고려하면

된다. 일반적으로 최대허용압력 P<sub>max</sub>는 진공하에서 1을 취하지만 액체헬륨과 액체질소 용기의 경우에는 안전성을 고려하여 1.5로 한다.

○ 외압이 작용할 경우의 탄성변형

외압이 작용할 경우의 탄성변형에 대한 용기 및 관의 두께 계산은 다음식(3)으로부터 얻어질 수 있다<sup>6)</sup>

$$P = \frac{E}{S_k} \left\{ \frac{20}{n} \frac{1}{(n^2 - 1) \left[ 1 + \left( \frac{1}{Z} \right)^2 \right]^2} \cdot \frac{S_o - C_1 - C_2}{D_o} + \frac{80}{12(1 - \nu^2)} \cdot \frac{2n^2 - 1 - \nu}{[n^2 - 1 + \frac{1}{n}] \left[ 1 + \left( \frac{1}{Z} \right)^2 \right]} \cdot \left[ \frac{S_o - C_1 - C_2}{D_o} \right]^3 \right\} \quad (3)$$

여기서

P : 최대 압력 (진공=1)(bar)

S<sub>k</sub> : 탄성변형에 대한 안전계수

(합금 또는 비합금강=3)

n : 변형 횟수

$$\left( = 1.63 \sqrt[4]{\frac{D_o^3}{l^2 (S_e - C_1 - C_2)}} \right)$$

Z : 변형 수치

$$= 0.5 \cdot \frac{\pi \cdot D_o}{l}$$

(n : integral,  $n \geq 2$ ,  $n/Z$ )

$S_e$  : 유효벽 두께 [mm]

$C_1$  : 벽두께의 보정상수

$C_2$  : 마멸에 대한 보정상수

$D_o$  : 원형용기의 외경 [mm]

$\nu$  : 횡적 수축 요소 ( $\approx 0.3$ )

E : 탄성률 (스테인레스강=2.03×10<sup>4</sup>) [Kg/mm<sup>2</sup>]

○ 외압이 작용할 경우의 소성변형

외압이 작용할 경우의 소성변형에 대한 두께 계산은 다음식 (4), (5), (6)으로부터 얻어질 수 있다.

$$\frac{D_o}{l} \leq 5 \text{ 일 경우 :}$$

$$P = \frac{20 K}{S_F} \cdot \frac{S_e - C_1 - C_2}{D_o} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1.5u (1 - 0.2 \frac{D_o}{l}) D_o}{100 (S_e - C_1 - C_2)}} \quad (4)$$

$$\frac{D_o}{l} > 5 \text{ 일 경우 :}$$

$$P = \frac{20 K}{S_F} \cdot \frac{S_e - C_1 - C_2}{D_o} \quad (5)$$

용기의 가열을 필요로하는 경우 :

$$P = \frac{30 K}{S_F} \left( \frac{S_e - C_1 - C_2}{l} \right)^2 \quad (6)$$

여기서

K : 고체특성값 (스테인레스강=19~23) [Kg/mm<sup>2</sup>]

$S_F$  : 소성변형에 대한 안전계수

(합금 또는 비합금강=2)

$l$  : 변형이 가능한 용기의 길이 [mm]

$u$  : 용기의 진원도 [%]

$$\text{타원형 : } u = 2 \frac{D_{i \max} - D_{i \min}}{D_{i \max} + D_{i \min}} \cdot 100$$

$$\text{원형 : } u = \frac{4}{D_o} q \cdot 100$$

$D_i$  : 원형용기의 내경 [mm]

$q$  : 원형의 크기 [mm]

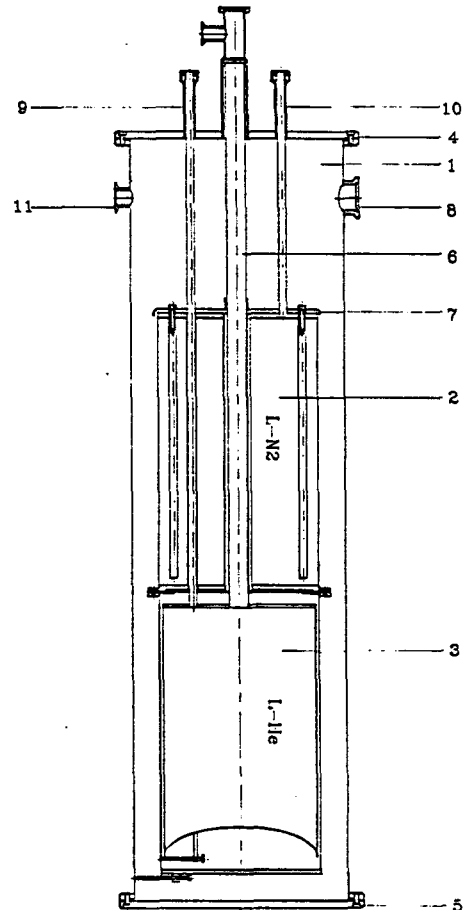


Fig. 3. Design of bath cryostat.

- |                            |                                      |
|----------------------------|--------------------------------------|
| 1. Vacuum chamber          | 7. LN <sub>2</sub> -radiation shield |
| 2. LN <sub>2</sub> -Vessel | 8. Connecting flange                 |
| 3. LH <sub>2</sub> -Vessel | 9. LH <sub>2</sub> -inlet            |
| 4. upper-flange            | 10. LN <sub>2</sub> -inlet           |
| 5. lower-flange            | 11. Safety valve                     |
| 6. Center tube for probe   |                                      |

○ 내압이 작용할 경우의 두께

내압이 작용할 경우의 두께 계산은 용기의 외경과 내경의 비가  $\frac{D_o}{D_i} \leq 1.2$  일 경우 다음식 (7) 로 부터 계산할 수 있다.

$$S_w = \frac{D_o \cdot P}{K} + C_1 + C_2 \quad (7)$$

$$20 \frac{V + P}{S}$$

V : 강도의 감소 요소

내·외압을 모두 고려하여 최소두께를 결정해야만 하는 용기 (LHe, LN<sub>2</sub>) 에서는 위의 3가지 경우로부터 계산된 두께 중 안전성을 고려하여 가능한 큰 값을 취하면 된다. 계산 결과 진공용기, 액체헬륨 및 액체질소 용기의 두께는 1.5mm로, 중심시험관 0.3mm, LHe 공급관, LN<sub>2</sub> 공급관 및 가스 배출관의 두께는 0.1mm로 결정하였다.

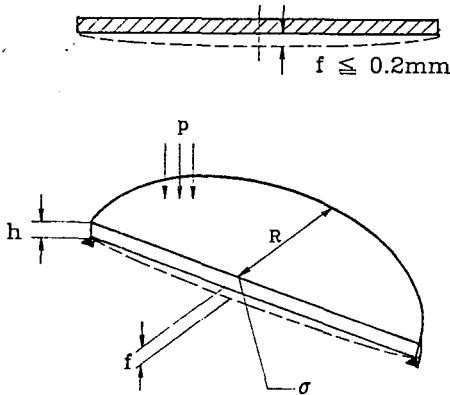


Fig. 4. Circular plate on free surface.

나. 각 용기의 상·하 플랜지의 두께

진공용기의 경우 상·하 플랜지의 두께는 진공상태 하에서 그 변형량이 fig. 4. 에서 보는 바와 같이 0.2mm 이내가 되어야 한다.

진공 플랜지에 적용되는 자유평면상의 원형관의 변형량  $f$  은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$f = 0.7 \frac{P \cdot R^4}{E \cdot h^3} \quad (8)$$

여기서

$$\text{최대 응력 } \sigma_{max} = 1.24 \frac{R^2 \cdot P}{h^2} \quad (\text{중양에서})$$

최대 압력  $P = 0.1 \text{ N/mm}^2$

탄성률  $E = 210,000 \text{ N/mm}^2$

액체질소 용기 및 액체헬륨 용기의 플랜지 두께의 안전성은 실제 진공시험 검사의 경우에만 고려하면 되므로 외부 진공용기 플랜지의 경우와는 달리 두께변형량  $f$  값은  $f \leq 0.5$  이내이면 충분하다. 계산 결과 진공용기의 플랜지 두께는 10mm, 액체헬륨 및 액체질소 용기의 플랜지 두께는 5mm로 결정하였다.

다. 열전달에 의한 냉매 손실량

열전달에 의한 액체헬륨, 액체질소 증발은 실제로 중심시험관, 각 냉매의 공급관 및 가스 배출관 등을 통하여 이루어지게 된다. 이들을 통한 열전도 및 복사의 온도영역은 fig. 5. 에서 보는바와 같이 300K~77K와 77K~4K로 나누어 생각할 수 있으며 각 온도 영역에서의 열전도와 복사계산은 식 (1), (2) 로 부터 계산할 수 있다.

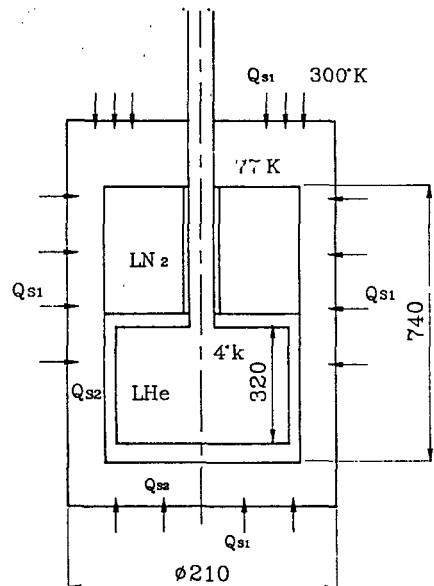


Fig. 5. Heat transfer of cryostat.

각 용기의 소재를 매개로 하여 이루어지는 열전도나 복사에 의한 냉매손실 이외에도 고려해야 할 사항은 고진공( $10^{-5}$  Pa 이하) 하에서 각 냉매의 잔류 가스를 통한 열전도 문제이다. 여기서 잔류가스의 열전도에 의한 액

체질소 증발량은 극히 작을량이기 때문에 무시했으며 액체헬륨의 경우 0.42cm<sup>3</sup>/h로 계산되었다.

### 3. 제작 및 시험

모든 진공용기의 제작과 마찬가지로 bath cryostat의 제작에는 고도의 판금 및 용접기술이 요구되며 또한 고진공(10<sup>-5</sup> Pa 이하)에 사용되는 금속밀봉(구리 gasket 사용) 방식의 콘플랫 플랜지(conflat flange)의 제작은 정밀가공기술이 필요하다.

본 장치의 진공용기, 액체헬륨 및 액체질소 용기 그리고 시험중심관 등은 경면 폴리싱한 스테인레스강 박판이 사용되었으며 그 제작공정은 다음과 같다.

- 1) 원통 압연(rolling) 및 1차 정형(straightening),
  - 2) 축길이 방향 TIG 용접, 3) 원통의 2차 정형, 4) TIG 용접에 의한 각 플랜지의 접합, 5) 전해화학연마(electrical chemical grinding), 6) 진공누설시험
- 여기서 압연에 의한 원통 판금 작업시에는 각 용기 및 관의 진원도 및 길이방향의 진직도와 경면 폴리싱 표면의 보호등에 유의하고 TIG 용접 작업에서는 용접 전 후 용접부위에서의 열변형, 균열(crack) 발생 및 파손에 유의하였다. 그리고 용기 및 관, 조립 완성된 장치의 누설시험은 10<sup>-5</sup> Pa 이하의 진공상태하에서 실시되었으며 그 결과 완벽한 밀봉상태를 확인하였다. 진공 및 누설시험에 사용된 장치는 미국 Varian사의 LHe-leak detector (M938-41, Porta-test)이다.

### 4. 결 론

최근의 첨단과학기술의 발전과 더불어 저온 및 극저온의 극한 환경하에서의 각종 물리적 현상에 대한 다양한 연구는 매우 중요하다할 수 있다. bath cryostat는 이미 선진 각국에서 극한 상태의 물리적 현상을 측정하기 위한 보조장치로서 다방면에 걸쳐 사용되고 있지만 국내에서는 그 설계제작이 실용화 되지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 저온 및 극저온의 생산을 위해서 필요한 저온 냉각장치의 기초가 되는 bath cryostat의 제작에 관한 설계특성을 고찰하고 실제 제작을 시도하였다.

bath cryostat의 성능 시험은 각 용기의 열적분리 상태를 유지하기 위한 진공상태의 검사와 LHe 및 LN<sub>2</sub> 용기내의 냉매 저장수명시간의 검사를 통하여 이루어진다. 본 연구를 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

완성된 장치의 시험결과 10ℓ-LHe 용기에 대한 저장수명시간은 약 139 hr, 12ℓ-액체질소 용기에 대한 저장수명시간은 약 48.5 hr으로 나타났으며 설계 계산결과에 의한 143 hr/LHe, 51.3 hr/LN<sub>2</sub>과 거의 일치하고 있음을 알 수 있었다. 이 결과는 각 용기의 두께를 최소화한데 따른 것으로 table 3.에 나타난 이론치와 비교해 볼때 그 실용성이 우수함을 확인할 수 있었다. 마지막으로 본 연구는 cryostat의 국내 설계제작의 가능성을 증명하였다는 데에 의의가 있으며, 앞으로 저온하에서 실험을 필요로하는 국내의 극한기술 개발연구와 관련된 분야에서 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

### 참고문헌

1. G. Klipping, Kryotechnik-Historische Entwicklung und Anwendungsgebiete, VDI-Bildungswerk, pp.3~5. 1981.
2. E. Gmelin, Konstruktive und Verfahrenstechnische Auslegung von Kryosystemen, VDI-Bildungswerk, pp.1~21. 1982.
3. W. G. Fastowski und J. W. petrowski, Kryotechnik, Akademie-verlag Berlin, pp.262~280. 1970.
4. Werner Wiedermann, Experimentelle Mössbauerertechnik im bereich tiefer Temperaturen, Kommission für Tieftemperaturforschung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, Teil 1, pp.46~140, Teil 2, pp.174~248.
5. Hartmut Frey und Rene A. Haefer, Tieftemperaturtechnologie, VDI-Verlag GmbH, pp.233~251. 1981.
6. AD-Merkblatt B6, Zylindrische Mäntel unter äußerem Überdruck, Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter, Essen, Germany 1977.
7. AD-Merkblatt B1, Zylindrische Mäntel und Kugeln unter innerem Überdruck, Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter, Essen, Germany 1977.
8. AD-Merkblatt B0, Berechnung von Druckbehältern, Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter, Essen, Germany 1977.