

◆특집◆ 진공에 의한 저온 유지 기술과 그 응용

진공 및 복사 단열에 의한 저온 유지 기술

박성제\*

Vacuum and Radiation Insulation in the Cryogenic Engineering

Seong Je Park\*

**Key Words** : Insulation(단열), Vacuum(진공), Cryocooler(극저온 냉동기), Infrared detector(적외선 검지기), Superconductor filter(초전도 필터), Dewar(저온 용기)

1. 서론

초전도 산업과 저온 작동 정밀 센서 등의 발달로 -153℃(약 120K) 이하의 저온을 발생하는 극저온 냉동 기술과 저온을 유지하기 위한 저온 용기(cryostat), 진공기술이 필요하게 되었다.

저온 용기란 극저온을 유지하기 위한 저온항온 용기의 총칭으로, 액체헬륨, 액체질소 등의 한계를 보낼하는 듀어(dewar)로부터 초전도 코일이나 SQUID, 적외선 센서, 이동통신무선기지국용 초전도 필터 등의 극저온 소자를 보낼하는 용기까지 포함한다.

극저온의 온도범위에 대한 명확한 정의는 없지만, 천연가스를 저장하는 온도인 120K 정도부터, 액체질소 온도(77K), 액체헬륨온도(4.2K), 초유동 온도(1.8K), 또한 수 mK과 서브 mK 까지의 저온 유지 용기를 포함한다. 저온 유지를 위한 저온 용기의 설계는 단열 기술이 매우 중요하다. 저온 유지를 위한 단열 기술에는 방사 단열기술, 열전도

에 대한 단열기술, 대류 열전달에 대한 단열 기술 등이 있지만, 진공에 의한 대류 열전도에 대한 단열 기술이 가장 중요한 기술로 고려되고 있다.

최근에는 의료용 MRI, 야간 투시경용 냉각형 적외선 센서, 이동통신무선기지국용 초전도 필터 등과 같이 일반인들도 극저온을 이용하게 되어 보다 사용하기 쉽고 안정적인 저온용기가 요구되고 있다. Table 1은 저온 용기의 사용을 필요로 하는 극저온 냉각 기술의 적용 분야를 보여주고 있다.

Table 1 Applications of the cryocooler

산업명	제품 또는 공정
전자산업	CMOS, GaAs, HEMT, Computer, Mixer, Low Noise Amplifier, Fast AD-DA converter
통신산업	초전도 필터
초전도 산업	MRI, SQUID, NMR, SMES
진공산업	Cryopump
표면처리산업	X-ray detector
군수산업	Infrared detector, CCD 소자,
과학/의료분야	SEM, Gamma-ray detector, 극저온 수술

\* 한국기계연구원 열유체공정기술연구부

Tel. 042-868-7394, Fax. 042-868-7335

E-mail sjpark@kimm.re.kr

냉동 공조 분야 특히, 적외선 센서 및 초전도 센서 냉각용 극저온 냉동기와 진공 분야에 관심을 두고 연구 활동을 하고 있다.

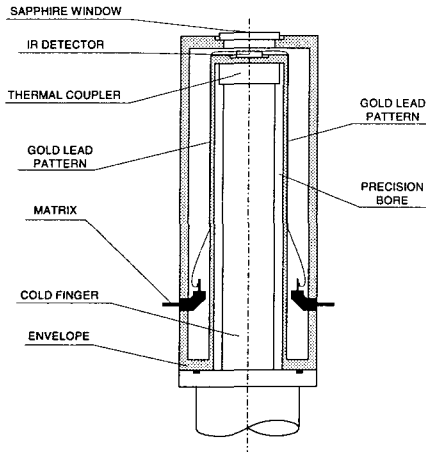


Fig. 1 Dewar for cooling of the infrared detector

Fig. 1은 저온 용기의 일례로서 적외선 검지기 냉각의 조립도와 사진을 보여 주고 있다. 적외선 검지기는 이면이 냉각되고 주위로부터의 열 침입을 막기 위해 저온 진공 용기에 넣어진 구성을 하고 있다. 냉각해야 할 열량은 적외선 검지기의 전기적 발열량, 적외선의 입사열량, 진공 및 복사 단열 성능에 의해 결정되는 것이지만, 통상적으로는 0.3~2W정도로 고려한다.

따라서 본 연구에서는 초전도 센서 및 저온 작동 정밀 센서 등의 저온 냉각 기술과 이러한 센서들의 저온 유지를 위한 저온 용기와 진공 기술을 고찰하고자 한다.

## 2. 초전도 센서 및 저온 작동 센서 냉각용 저온 발생 기술

### 2.1 극저온 냉동기 개요

냉매로 가스를 사용하는 극저온 냉동기는 압축기, 팽창기, 압축기와 팽창기를 연결하는 열교환기를 구성요소로 하고 있다. 이와 같은 구성 중에 팽창방식(단열팽창, 등온팽창, 등엔탈피 팽창 등), 팽창기 종류(터빈, 피스톤, 밸브), 팽창기의 단수(단단, 다단), 열교환기의 종류(향류형 열교환기, 재생형 열교환기, 양자의 조합), 압축기의 종류(기계식, 열식) 등에 따라 여러가지의 극저온냉동기로 분류되고, 각 냉동기는 용도에 따라 온도레벨 이나 냉동용량을 가지고 있다. 또 효율, 신뢰성, 진동, 크기, 가격 등에도 장점과 단점을 가지고 있다. 따라서 극저온 냉동기를 선택할 때는 저온용기에 요구되는 성능이나 사용 환경등에 따라 최적의 냉동기를 선택하는 것이 중요하다.

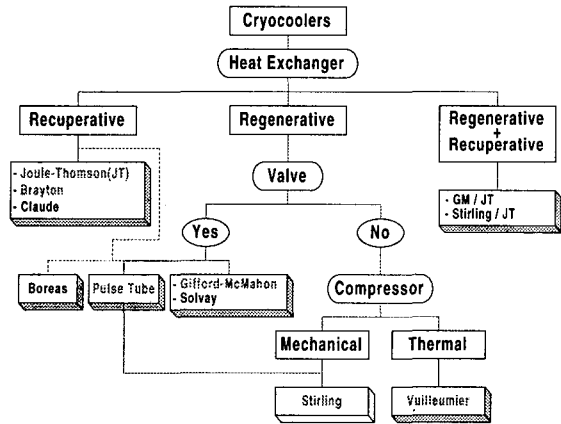


Fig. 2 Classification of cryocoolers

Fig. 2에 구조에 따라 분류한 극저온 냉동기의 종류를 보여준다. 극저온 냉동기 중에 비교적 많이 사용되는 G-M냉동기와 Stirling 냉동기, 맥동관 냉동기(Pulse tube), J-T냉동기 등에 대해 저온용기와 조합하여 사용하는 입장에서 서술해 본다.

### 2.2 Gifford-McMahon(G-M) 극저온 냉동기

G-M(Gifford-McMahon) 냉동기는 초전도 자석냉각에 가장 많이 사용되고 있는 냉동기이다. Fig. 3에 G-M냉동기의 사진을 보여준다. 주로 2단의 냉각단을 가지고 있으며, 1단은 30~100K 정도의 온도

범위에서 동작하고, 수십W의 냉동능력을 가지며, 2 단은 10~20K 정도에서 수W의 냉동능력 또는 자성 축냉재를 사용하여 4K까지의 냉동까지 가능하게 되었다.

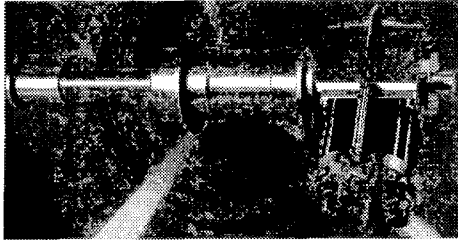
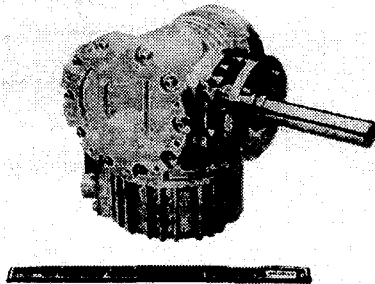
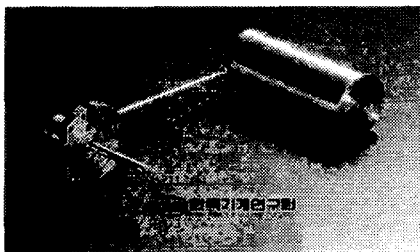


Fig. 3 Gifford-McMahon Cryocooler

G-M냉동기의 최대특징은 고신뢰성과 저가격에 있다. 필터와 일부 부품을 교환하면 1년 연속운전이 가능하다. 또 압축기는 저가격을 실현하기 위해 일반 에어컨용 압축기를 헬륨용으로 개조하여 사용하고 있다. 효율이나 크기, 중량면에서 스테링냉동기에 비해 열등하지만 팽창기와 압축기를 분리하여 설치할 수 있다는 장점이 있다. 저온 용기측에 팽창기만을 탑재하므로써 저온용기의 소형화를 꾀할 수 있다.



(a) Integral type



(b) Split type

Fig. 4 Stirling cryocooler

### 2.3 스테링 극저온 냉동기

스테링 극저온 냉동기는 가장 효율이 높은 극저온 냉동기이고 G-M 극저온 냉동기에 비해 소형화가 가능한 극저온 냉동기이다. 스테링 냉동기는 G-M 냉동기와 달리 1단의 냉각단을 가지고 60~80K 정도에서 0.5~5W의 비교적 작은 냉동능력을 가진 것이 일반적이다. 따라서 주로 우주용 등의 특수한 용도와 적외선 센서의 냉각등 비교적 작은 저온용기에서 상시운전되거나 교환이 용이한 시스템에 많이 사용된다. Fig. 4에 분리형과 일체형의 스테링 냉동기 사진을 보여준다.

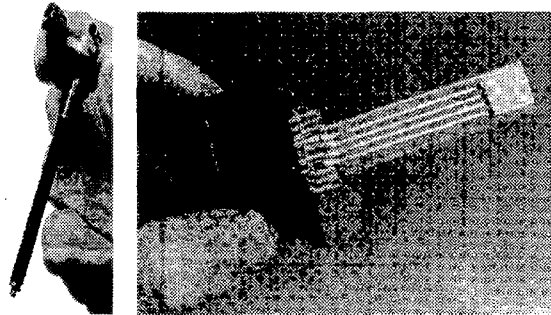


Fig. 5 Joule-Thomson cryocooler(APD, MMR)

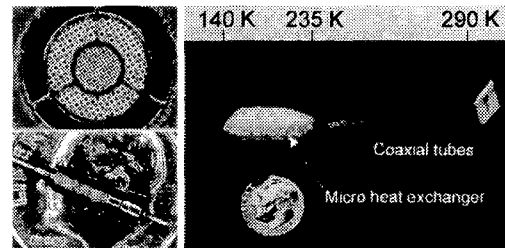
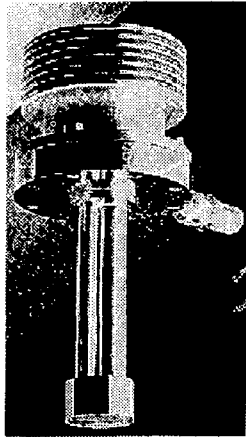


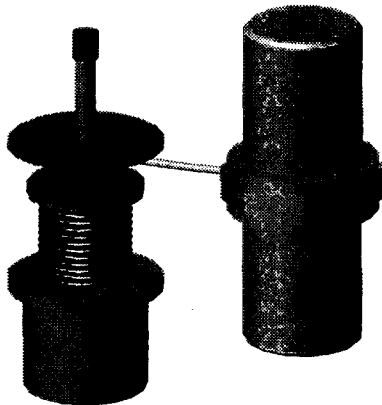
Fig. 6 Cryosurgery using Joule-Thomson cryocooler

### 2.4 Joule-Thomson 극저온 냉동기

J-T(Joule-Thomson) 극저온 냉동기는 중대형의 액화 사이클 뿐만 아니라 짧은 냉각시간, 단순한 구조, 소형 등의 장점을 지니고 있어, 소형 및 초소형의 이동 통신, 적외선 감지 장치, 열 추적 카메라, 미사일 유도장치의 냉각이나 극저온 수술용으로 주로 개발, 사용되어지고 있다. J-T냉동기는 압축된 냉매를 단열된 오리피스를 통해 배출할 때 발생하는 Joule-Thomson효과를 이용한 냉동기이나 Fig. 5는 J-T 극저온 냉동기 사진을 보여주고 있으며, Fig. 6은 J-T 극저온 냉동기를 이용한 극저온 수술 개념도를 보여주고 있다.



(a) U-type(Aisin seiki)



(b) Coaxial type(KIMM)

Fig. 7 Pulse tube cryocooler

### 2.5 맥동관(Pulse tube) 극저온 냉동기

최근 가장 주목을 받고 있는 극저온 냉동기로서 맥동관(pulse tube) 냉동기가 있다. 맥동관 냉동기는 스테링 냉동기나 G-M 냉동기와 같이 열교환기로서 축냉기를 가진 냉동기이지만, 팽창기에 피스톤이나 변위기가 없고 맥동관이라 불리는 파이프가 팽창기 역할을 하는 극저온 냉동기로 팽창기에 피스톤 등의 움직이는 부품이 없기 때문에 저진동, 고신뢰성의 극저온 냉동기로 각광을 받고 있다. 맥동관 냉동기는 G-M 극저온 냉동기와 같이 밸브에 의해 팽창기와 연결된 형태인 G-M형 맥동관 냉동기와 Stirling 극저온 냉동기와 같이 밸브가 없이 압축기와 팽창기가 연결된 stirling형 맥동관 냉동기로 구분할 수 있으며, 각각 G-M냉동기와 stirling 냉동기를 대체해 가고 있다.

저진동, 고신뢰성, 장수명의 장점을 가진 맥동관 냉동기는 고온초전도체를 이용한 이동 통신무선기지국용, 필터를 내장한 저온용기의 저온 발생에 최적의 냉동기로 알려져 있다. Fig. 7에 맥동관 냉동기의 사진을 보여주고 있다.

## 3. 저온 유지 기술

### 3.1 단열 기술 개요

저온 용기를 설계, 제작할 때 얼마나 높은 단열 성능을 유지하는가 하는 것이 저온 유지를 위한 가장 중요한 요소이다. 단열 성능이 나쁜 저온 용기를 설계하면 한계로 직접 냉각하는 경우에는 액체 질소 또는 액체 헬륨의 증발량이 증가하게 되어 빈번히 보충 하므로써 작업성과 경제성이 나빠지게 되며, 극저온 냉동기로 직접 냉각하는 경우에는 극저온 냉동기의 냉동능력 및 입력이 증가하게 되고, 적외선 센서나 이동통신무선기지국용 초전도 필터의 경우에는 빠른 시간 이내에 정상작동이 힘들게 된다.

저온 용기를 포함한 극저온 냉각 시스템에서 고온 측으로부터 저온 측으로의 열전달의 형태는 복사 열전달, 대류 열전달, 비등 열전달, 응축 열전달, 고체 또는 기체의 열전도에 의한 열전달, 기체의 분자 열전도에 의한 열전달 등이 있다. 이 중에서 저온용기에서의 실온부로부터 극저온부로의 열침입의 주요한 열전달 형태는 대략 3가지로 구분할 수 있다.

- (1) 고온면과 저온면 사이에 존재하는 기체의 열전도 또는 분자 열전도에 의한 열전달
- (2) 고온면으로부터 저온면으로의 복사에 의한 열전달
- (3) 고온면과 저온면 사이를 연결하는 고체의 열전도에 의한 열전달

본 연구에서는 3개의 열전달 형태중 서로 밀접한 관계가 있는 (1)과 (2)에 대하여 서술하고자 한다.

### 3.2 진공 단열기술과 복사 단열기술

고온면과 저온면 사이의 기체에 의한 열전달에 관해 고찰한다. 2개 면의 위치 관계나 양면 사이의 온도구배가 어떤 조건을 만족하면 대류가 생기지만 여기에서는 단순화를 위해 대류를 고려하지 않는다. Fig. 8에 2개의 면 사이의 거리를 일정하게 하고 기체의 압력을 변화 시킨 경우, 고온면으로부터 저온면으로의 단위 면적당 열전달량(열유속)을 나타내고 있다.

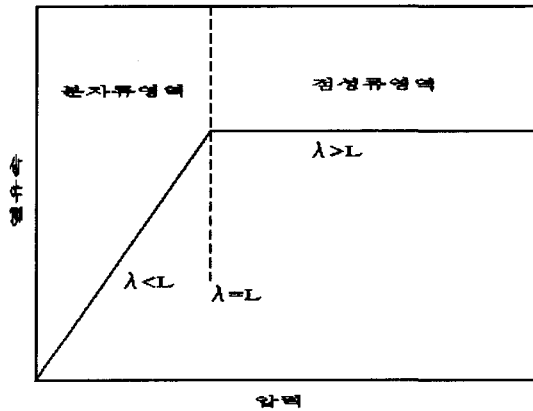
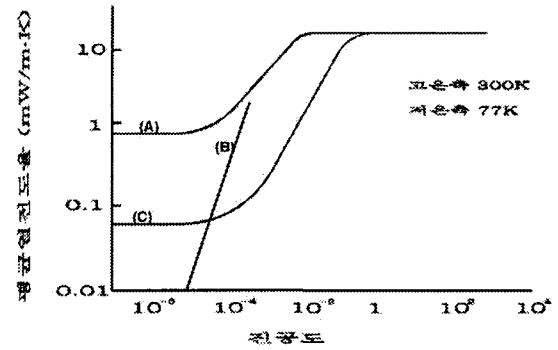


Fig. 8 Relation between the pressure and thermal flux

기체의 압력이 대기압 또는 그 이상에서 2 면 사이의 거리(L)가 기체분자의 평균자유행정( $\lambda$ )에 대해 충분히 큰 경우 기체의 열전도에 의해 고온면으로부터 저온면으로 열이 이동한다. 열전도의 경우 열유속은 기체의 열전도율과 온도 구배의 곱에 비례하지만 온도 구배는 일정하고, 기체의 열전도율도 압력에 관계없이 거의 일정하기 때문에 열유속은 일정한 값이 된다. 다음으로, 기체의 압력을 내려 L이  $\lambda$  와 비슷하거나 그 이하가 되면 공간의

상태는 점성류 영역에서 분자류 영역으로 천이하여 열전달의 형태도 변화한다.  $\lambda$  가 L에 대해 충분히 큰 상태( $\lambda > 10 \times L$ )까지 압력이 내려 가면 분자 열전도라는 열전달 형태로 바뀌어 열유속은 압력에 비례하는 값으로 된다. 따라서 Fig. 8과 같이 압력의 저하와 함께 열전달량이 감소하게 된다.



- (A) 단순 진공단열(단열두께 12.7mm)
- (B) d=12.7mm에서의 분자류 열전달 감소 곡선
- (C) 50층의 방사 쉴드와 60층의 섬유 spacer

Fig. 9 Effect of the vacuum by the MLI

그렇지만 압력을 내리면 내릴수록(진공도를 높게 하면 할수록) 열전달량이 증가하지는 않고, 어떤 압력 이하로 내려가면 다시 열전달량은 거의 일정한 값으로 된다. Fig. 9에 고온측(300K), 저온측(77K)에서 2 면 사이의 거리가 12.7mm인 경우의 평균열전도율(열유속/온도구배)과 기체압력의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 (A)는 진공단열만을 하였을 경우의 결과로서 압력이 0.1 Torr(1 Torr = 0.133322Pa) 이상에서는 점성류 영역으로 평균열전도율도 일정하게 된다. 0.1 Torr 이하에서는 분자류 영역으로 천이하여 압력에 비례하여 평균열전도율도 감소하지만,  $10^{-4}$  Torr 보다 낮은 압력에서는 다시 평균열전도율은 거의 일정하게 된다. 그림에서 (B)는 분자 열전도만을 고려할 때 기체의 압력에 비례하여 선형적으로 감소하는 평균열전도율을 보여 주고 있다. (A)와 (B)를 비교하면, 예를 들어 압력이  $10^{-5}$  Torr 에서는 실제의 열전달량 (A)는 분자 열전도만을 고려한 경우인 (B)의 50배 이상 된다. 이것은 어떤 압력이하( $10^{-3}$  Torr 정도 이하)에서는, 2 면 사이의 열전달에서 지배적인 요소가 분자 열

전도에 의한 열전달로부터 다른 열전달 형태로 이행하기 때문이다.

(A)의 경우 고온면과 저온면의 사이에서는 기체만 있기 때문에, 복사에 의한 열전달이 지배적으로 된다고 고려된다. 복사열전달은 기체의 압력에 의존하지 않기 때문에 항상 일정값을 가진다. 압력이 높을 때는 복사에 의한 열전달량에 비해 기체의 열전도 또는 분자열전도에 의한 열전달량이 크기 때문에 유사한 곡선을 그린다. 그러나 압력이 낮게 되면 일정값을 나타내는 복사열전달량이 복사열전도에 의한 열전달량 보다 높게 되어 어떤 압력 이하에서는 일정한 열전달량을 나타내게 된다.

따라서 Fig. 9에 나타난 실험조건의 경우 분자열전도의 관점에서는  $10^{-4}$  torr 이하까지 진공도를 높일 필요까지는 없다. 더욱 단열성능을 향상 시키기 위해서는 복사에 의한 열전달량 저감에 주력할 필요가 있다.

다음으로 복사에 의한 열전달에 관해 고려한다. 지금 동심원주 또는 동심구상에서 면1로부터 면2에 대한 복사열전달량  $Q_{rad}$ 는

$$Q_{rad} = \sigma (T_1^4 - T_2^4) A_1 \times \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} (\frac{1}{\epsilon_2} - 1)} \quad (1)$$

여기에서, A: 표면적, T: 온도,  $\epsilon$ : 방사율,

$\sigma$ : stephan Boltzmann 상수

$$(\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

이다.

식(1)로부터 알 수 있듯이 복사에 의한 열전달량을 감소 시키는 데는 방사율을 낮출 필요가 있다. 방사율은 재료의 종류, 재료의 표면상태, 온도에 따라 다른 값을 나타낸다. 방사율을 낮추기 위해서는 여러장의 복사선타드를 사용한다.

고온측 온도  $T_H$ , 저온측 온도  $T_L$ , 면적 A,의 평행평판사이의 복사열전달은 식(1)에 의해

$$Q_{rad} = \sigma (T_H^4 - T_L^4) A \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_H} + \frac{1}{\epsilon_L}} \quad (2)$$

로 된다.

여기에서 저온판과 고온판 사이에 단열되고 같은 방사율을 가지는 N개의 복사선타드(고온측으로부터 1,2,3,... i,i+1,...,N)를 삽입한다. I번째 복사 선타드

로부터 i+1번째의 선타드에 대한 복사열 전달량  $Q_i$ 는

$$Q_i = \sigma (T_i^4 - T_{i+1}^4) A \times \frac{\epsilon}{2 - \epsilon} \quad (3)$$

$T_0 = T_H$ ,  $T_{N+1} = T_L$ 로 두면 각 선타드 사이의 복사 열전달량은 모두 똑같기 때문에

$$Q_0 = Q_1 = \dots = Q_i = Q_{i+1} = \dots = Q_N = Q'_{rad} \quad (4)$$

$\epsilon_H = \epsilon_L = \epsilon$  라 하면 식(2)~(4)로부터

$$Q'_{rad} = \frac{1}{N+1} Q_{rad}$$

가 된다. 즉 2개의 평행 평판 사이에 N개의 복사선타드를 삽입하면 복사 열전달량이  $1 / (1+N)$ 로 저감된다.

이와 같은 성질을 이용한 단열방법이 다층단열법이다. 저온용기에 있는 온도가 다른 2개의 면사이에, 예를 들면 실온부에 어떤 진공용기와 열선타드(thermal shield)사이에 다층단열재(Multi-Layer Insulator, MLI)를 삽입하여 복사 열전달량을 저감하는 방법이다.

Fig. 9에 다층 단열법에 의한 효과를 보여주고 있다. 그림에서 (A)는 2면 사이(고온측 300K, 저온측 77K, 거리 12.7mm)를 진공 단열만에 의한 열전도율을 나타내지만 (C)는 2면 사이에 50층의 다층 단열재를 삽입한 경우의 평균 열전도율을 보여주고 있다. 평균열전도율은 진공도에 대해 (A)와 비슷한 곡선을 그리지만, 진공도가 높은 경우 평균 열전달율이 1/10 정도 낮게 된다.

즉, 다층 단열재에 의해 약 10배의 단열효과가 얻어진다. 이상 진공단열과 다층 단열재에 의한 단열방법에 대해 서술했다. 충분히 높은 진공도를 유지한 상태에서 다층 단열재의 원리와 효과를 고려하는 것이 매우 중요하다.

## 4. 진공 생성 기술

### 4.1 진공의 개요

연속체 유동과 자유분자 유동을 구분하기 위하여 결정하는 무차원수로서 주로 누드센(Knudsen) 수( $N_{Kn} = \lambda / D$ ,  $\lambda$ 는 가스분자의 평균자유행로, D는 유동 채널의 특성 크기)를 사용한다. 유동 영역

은 누드센 수에 의해 다음과 같이 나눌 수 있다.

- (1) 연속 유동 :  $N_{Kn} < 0.01$
- (2) 혼합유동 :  $0.01 < N_{Kn} < 0.30$
- (3) 자유분자유동 :  $0.30 < N_{Kn}$

가스의 평균자유행로는 가스의 점도에 의해 표현되어 아래의 식이 된다.

$$\lambda = \left(\frac{\mu}{p}\right)\left(\frac{\pi R_u T}{2 g_c M}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$N_{Kn} = \left(\frac{\mu}{pD}\right)\left(\frac{\pi R_u T}{2 g_c M}\right)^{\frac{1}{2}}$$

여기서 viscosity는 영국단위로 표현되며, P는 가스의 압력,  $R_u$ 는 일반가스상수, T는 정대온도, M은 가스분자의 질량이다.

유동 영역에서 진공도는 대략 아래와 같이 구분될 수 있다.

- (1) Rough vacuum :  $3 \text{ kPa} < p \text{ or } 25 \text{ Torr} < p$   
vacuum forming, common industrial applications
- (2) Medium vacuum :  $0.1 \text{ Pa} < P < 3000 \text{ Pa}$  or  
 $10\text{-}3 \text{ Torr} < p < 25 \text{ Torr}$   
steel degassing, vacuum impregnation, vacuum-melting operation, Evacuated powder insulations operate at the lower end of this level
- (3) High vacuum :  $0.1 \text{ mPa} < p < 100 \text{ mPa}$  or  
 $10^{-6} \text{ Torr} < p < 10^{-3} \text{ Torr}$   
vacuum evaporation, coating, heat treating and brazing, particle accelerator, Multilayer insulation
- (4) Very-high vacuum :  $0.1 \text{ Pa} < p < 100 \text{ Pa}$  or  
 $10^{-9} \text{ Torr} < p < 10^{-6} \text{ Torr}$   
Environmental chamber and surface studies of semiconductor materials
- (5) Ultrahigh vacuum :  $p < 100\text{nPa}$  or  $p < 10^{-9} \text{ Torr}$

## 4.2 진공 펌프의 종류

저온 용기의 저온 유지를 위한 진공 단열은 주로  $10^{-4}\text{Torr}$  이상의 고진공 영역을 사용하므로, 본 연구에서는  $10^{-4}\text{Torr}$  이상의 진공을 발생하는 진공 펌프중에서 가장 자주 사용되는 오일확산펌프(Diffusion pump), 터보분자펌프(Turbo molecular pump)와 극저온 펌프(Cryopump)에 대하여 서술해 보고자 한다.  $10^{-4}\text{Torr}$  이상의 진공을 발생하는 펌프

의 종류 및 대체적인 동작 압력범위는 Fig. 10과 같다.

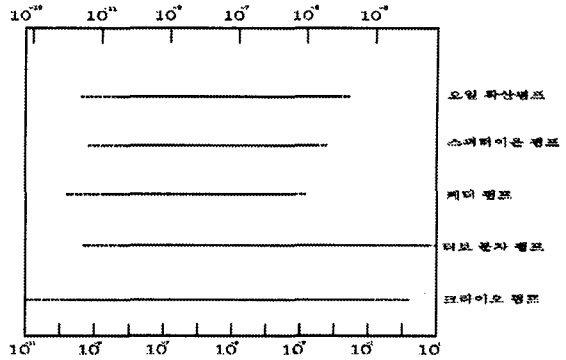


Fig. 10 Vacuum pumps and operating ranges

### 4.2.1 오일확산펌프

오일확산펌프의 작동은 Fig. 11에 나타난 것처럼 스팀 이젝터 펌프와 유사하다. 그러나 오일확산펌프는 연속류 영역보다는 자유분자유동 영역에서 작동한다. 펌프의 작동유는 펌프 바닥의 보일러에서 증발되어, 굴뚝(chimney)을 통해 위로 가속되고 증기는 노즐에서 아랫방향으로 고속으로 분출된다. 고속으로 분출된 작동유 증기는 펌핑되는 가스분자들과 충돌하여 강제로 아래로 향하게 하므로써 배기한다. 작동유 증기분자는 공기 냉각 또는 수냉각되는 펌프의 벽에서 응축되어 보일러로 다시 돌아오고, 가스 분자들은 배기 라인을 거쳐 로타리 베인펌프에 의해 시스템 바깥으로 배출된다.

오일확산펌프는 가격이 저렴하고, 구동 부위가 없으며, 모든 가스들에 대해 일정한 배기속력을 가

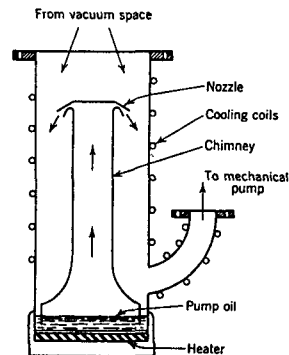


Fig. 11 Schematic of a single stage diffusion pump

지는 장점이 있지만, 가장 큰 문제점은 오일의 역류(backstream)인데, 이것을 해결할 수 있는 유일한 방법은 cold trap이나 baffle을 사용하는 것이지만 근본적으로 완전히 제거하기는 힘들다.

#### 4.2.2 터보분자펌프

터보분자펌프는 외관상으로는 항공기용 터보엔진과 유사하게 되어 있다. 즉, 고속으로 회전하는 원통 주변에 부착된, 축에 대해서 경사진 폭이 좁은 다수의 날개, 즉 가동 날개와 그것에 대해 역으로 경사지게 부착된 고정 날개를 상호 배치하여 축 방향으로 기체를 보내는 펌프이다.

터보분자펌프의 경우에는 원리적으로 가동날개의 이동속도는 기체 분자의 평균 비행속도에 가깝게 할 필요가 있다. 가동 날개의 회전수는 중요하며, 대형에서도 매분 1만 회전을 초과하고, 지름이 작은 펌프에서는 10만 회전에 가깝다. 그러나 수소와 헬륨의 제곱 평균속도인 1838m/s와 1311m/s인데 반해 터보분자펌프 가동 날개 주변의 속도는 일반적으로 300m/s 전후로 설계되기 때문에 특히 수소에 대한 압축비가 낮다.

Fig. 12는 터보분자펌프의 개략적인 구조도를 보여주고 있다.

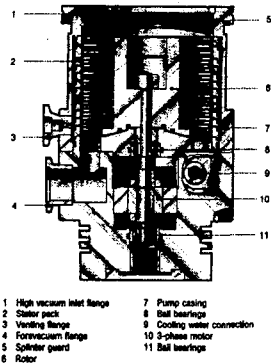


Fig. 12 Schematic diagram of a Turbomolecular pump(Leybold)

#### 4.2.3 크라이오펌프

극저온에 의해 cryopanel에 부딪히는 가스 입자는 운동에너지의 많은 양을 잃고 극저온 응축(cryocondensation), 극저온 흡착(cryosorption), cryotrapping 등의 작용에 의해서 cryopanel에 잡히게

된다.

극저온 응축은 진공 용기로부터 오는 기체가 극저온 표면에 이미 응축되어 있는 가스들과 반데르 발스(Vander Waal's) 힘에 의한 작용으로 붙잡히는 현상이다. 어떤 기체가 응축에 의해서 제거될 경우에 도달할 수 있는 최고 진공도는 cryopanel 표면의 온도에 해당하는 기체의 포화 증기압 정도이다.

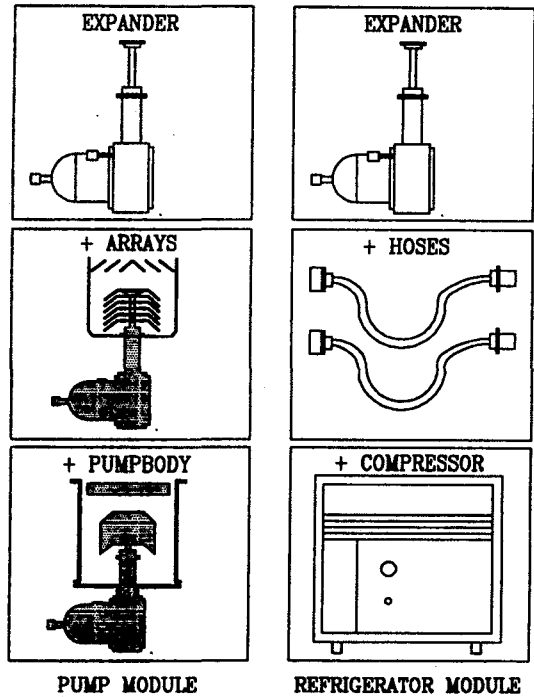


Fig. 13 Design concept of a cryopump

가스 중에서 He, Ne, H<sub>2</sub> 등의 가스는 응축에 의해서 제거하기 힘들기 때문에 흡착 재료를 cryopanel 뒷면에 붙인 형태의 극저온 흡착을 이용하여 제거해야만 한다.

크라이오 펌프는 크게 냉동기 모듈과 펌프 모듈로 구성된다. 냉동기 모듈은 주로 Gifford-McMahon 극저온 냉동기를 사용하는데, 이것은 압축기, 변위기(displacer), 재생기(regenerator), 구동장치(drive mechanism)로 구성되고, 펌프 모듈은 cryoarray와 펌프 몸체로 구성된다. Fig. 13은 cryopump의 구성에 대한 기본 개념을 나타낸 그림이고, Fig. 14는 크라이오 펌프의 단면도를 보여주고 있다.





Fig. 14 Cross section of a cryopump

## 5. 결론

최근에 초전도 산업과 저온 작동 정밀 센서 기술의 발전으로 극저온 냉동기 또는 극저온 한계에 의해 냉각된 저온 용기의 저온 유지 기술이 필요하게 되었다. 또한 의료용 MRI, 야간 투시경용 적외선 센서, 이동통신무선기지국용 초전도 필터 등과 같이 일반인들도 극저온을 이용하게 되어 보다 사용하기 쉽고 안정적인 저온용기가 요구되고 있다. 저온용기의 저온 유지 기술은 진공 및 복사 단열 기술 뿐만 아니라 극저온 발생기술과 진공 발생 기술이 같이 고려 되어야 하는 복합기술로서 앞으로 전자, 정보 통신, 나노, 바이오 산업 등에도 널리 활용될 수 있는 기반 기술로 자리 매김할 것으로 보여 관련 연구자들의 많은 노력과 관심이 요구된다.

## 참고문헌

1. J.G.Weisend II, Handbook of cryogenic engineering," Taylor & Francis, 1998.
2. A.K. De Jonge, "A Small Free-Piston Stirling Refrigerator," American Chemical Society, pp. 1136-1141, 1979.
3. Graham Walker, "Cryocoolers Part I, II," Plenum Press, 1983.
4. J.L.Ryans, D.L.Roper, "Process vacuum system design and operation," McGraw-Hill, 1986.