

## G-M 극저온 냉동기(Gifford-McMahon Cryocooler)

고득용  
한국기계연구원

### 1. 서론

G-M 극저온 냉동기는 1959년 미국의 A.d.Little 사의 Gifford와 McMahon이 처음으로 개발하였으며, 70년대부터 반도체 제조용 진공펌프로 cryopump의 극저온 냉각면 생성을 위한 냉동기로서의 수요가 증가하였고, 소형 극저온 냉동기의 다양한 필요성에 부응하여 보급이 활발해졌다.

G-M 극저온 냉동기의 장점으로서는 구성요소가 적어 기계적 신뢰도가 높고, 압축기로서 일반공조용 압축기의 사용이 가능하므로 가격이 저렴하고, 실링부가 상온이며 쉘 양단의 압력차가 적으므로 밀봉에 어려움이 없으며, 다단으로 연결하여 원하는 온도까지 낮출 수 있다는 점이다.

단점으로는 효율이 스테어링 냉동기에 비하여 낮다는 점이지만 가격이 상대적으로 낮고 기계적 신뢰도가 높다는 점에서 극저온 분야에서 널리 사용되고 있다.

최근에는 최저도달온도가 4.2 K 이하인 2단 G-M 극저온 냉동기 개발을 위해 2단 재생기의 재질에 관한 연구와 밸브 개선을 위한 연구가 중점적으로 진행되고 있으며, 4.2 K용 2단 G-M 극저온 냉동기는 초전도체 시스템에서 액체헬륨의 재응축 및 고온초전도체 시스템에서 높은 냉동능력을 활용하기 위해 주로 사용되고 있다.

이 글에서는 cryopump 및 초전도체 냉각시스템용으로 널리 사용되는 G-M 극저온 냉동기의 구조 및 냉동원리를 알아보고, 연구방향 및 향후 전망 등에 관해서 서술하고자 한다.

### 2. G-M 극저온 냉동기

그림 1은 2단 G-M극저온 냉동기의 구조를 개략적으로 나타낸 것이다. G-M냉동기는 크게 압축기모듈(compressor module)과 팽창기모듈(expander module)로 나누어진다.

압축기모듈은 냉동기의 팽창기모듈에 기름(oil)제거된 헬륨기체를 요구압력으로 공급하는 기능을 가지고, 압축기(compressor), 압축기 냉각장치, 기름분리기(oil separator), 활성탄 흡착기(charcoal activated adsorber) 등으로 구성된다. 팽창기모듈은 왕복기(displacer), 재생기(regenerator), 구동장치(drive mechanism), 밸브 등으로 구성되어 있다. 왕복기는 일반적으로 열전도가 낮은 재료를 사용한다. 재생기는 고압의 작동체를 가열하는 열교환기이다. 대부분의 실제 G-M냉동기에서는 재생기가 왕복기의 내부에 채워져 있는 일체형 타입이다. 재생기의 재료는 일반적으로 작동온도에서 비열이 비교적 높은 것을 사용한다. 구동장치는 왕복운동과 밸브의 여닫힘이 위상차를 가지고 연동할 수 있도록 설계되어야 하며, 주로 사용하는 방법은 rhombic drive mechanism, scotch yoke drive mechanism, pneumatic drive mechanism 등이 있다.

그림 2는 팽창부의 P-V 선도를 나타내며, 냉동기의 작동과정은 다음과 같다.

- 1) 1-2과정 : 왕복기가 팽창기의 하사점에 있을 때, 출구밸브는 닫혀있고, 입구밸브가 열려 팽창기내의 압력이 P1에서 상승한다.
- 2) 2-3과정 : 입구밸브가 열려 있는 상태에서 왕복기가 팽창기의 상사점으로 이동한다. 왕복기의 상승운동으로 왕복기 상단의 가스가 재생기를 통하여 왕복기 하단으로 유입된다. 이때 유입되는 가스는 재생기에 의하여 냉각되므로 P2의 압력을 유지하기 위해 입구밸브를 통하여 가스가 더 유입된다.
- 3) 3-4과정 : 왕복기가 팽창기의 상사점에 위치하고, 입구밸브는 닫히고 출구밸브는 열려 가스가 팽창하여 팽창기내의 압력은 P1으로 떨어진다. 이 과정에서 팽창기 하부가 극저온으로 냉각된다.
- 4) 4-1과정 : 왕복기의 하강운동으로 극저온

## 극저온냉동기 특집

의 가스가 재생기를 지나며 열을 흡수하고, 출구밸브를 통해 압축기로 되돌아가서 한 사이클을 완성한다.

이상과 같은 과정을 거쳐서 생긴 면적 1-2-3-4는 이상적인 냉동능력(Ideal refrigeration)을 나타내고 실제의 냉동능력(actual refrigeration)은 점 1과 점 3에서 고, 저압밸브에 의한 압력손실등에 의해 조금 둥근 모양을 그리게 되고, 순수냉동능력(net refrigeration)은 주어진 온도에서 heater power에 의해 가해진 냉동부하에 의해 나타내질 수 있다.

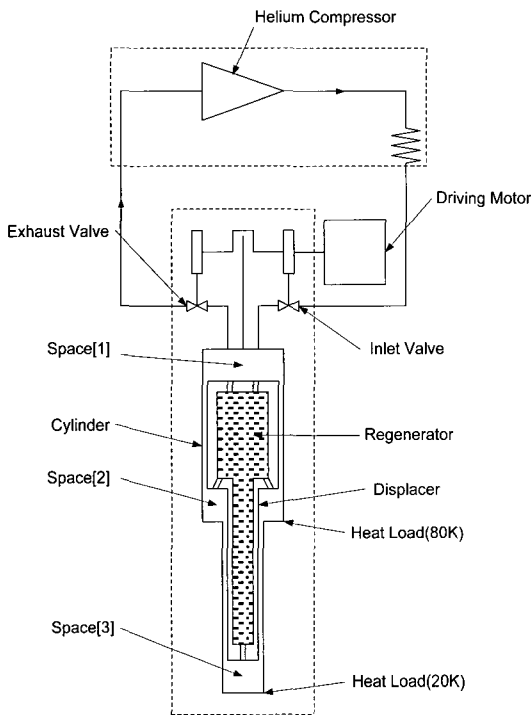


그림 1. 2단 G-M 극저온냉동기의 개략도

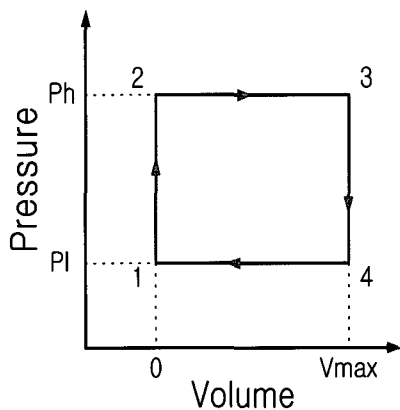


그림 2. 팽창부의 P-V선도

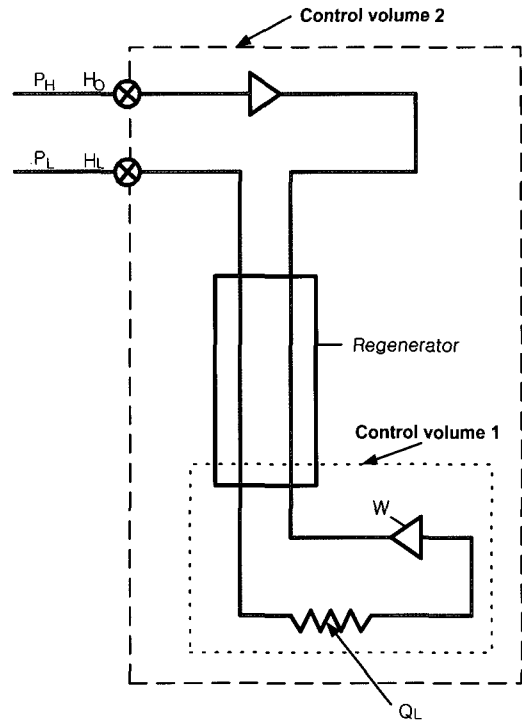


그림 3. G-M 극저온 냉동기 해석을 위한 control volume

G-M cycle의 열역학적 해석을 위하여 그림 3에 G-M 극저온 냉동기의 control volume 들을 제시하였으며, 재생기의 효율은 1, 재생기내와 cold end 에서의 void volume 1에서 에너지 평형을 고려하면

$$Q_L = W + (H_{out} - H_{in}) \quad (1)$$

여기서  $Q_L$ 은 냉동량,  $W$ 는 팽창일,  $H_{out}$ 은 control volume 1 로부터 나가는 가스의 엔탈피 그리고  $H_{in}$ 은 control volume 1 로 들어가는 가스의 엔탈피이다. 그러나 100% 효율을 가지는 재생기의 cold end 에서의 온도차는 영이고, 이상기체에 대해 엔탈피는 온도만의 함수이고 압력에 관계없기 때문에  $(H_{out} - H_{in}) = 0$  이다. 따라서  $Q_L = W$  여기서  $W$ 는 그림 2에서 보인것과 같이 P-V선도의 폐곡선 내의 내부면적이므로

$$Q_L = (P_H - P_L) V \quad (2)$$

이다. 이것은 한 사이클당의 이상 냉동능력이다. 다음에 control volume 2에서 에너지

평형식을 표현하면 다음과 같다.

$$Q_L - W = m(H_1 - H_0) \quad (3)$$

여기서 W는 시스템으로부터의 일 (이 경우는 0), H<sub>1</sub>은 나가는 기체의 엔탈피, H<sub>0</sub>는 들어오는 기체의 엔탈피, m는 냉동기로부터 들어오거나 나가는 헬륨의 양이다.

이로 인해 Q<sub>L</sub>=m(H<sub>1</sub>-H<sub>0</sub>)=mC<sub>p</sub>(T<sub>1</sub>-T<sub>0</sub>) 되고 따라서 T<sub>1</sub>은 항상 T<sub>0</sub>보다 높다는 것을 알 수 있다. 또한 한사이클당 필요한 헬륨의 양은 저온고압상태와 고온저압상태의 질량차이 이므로

$$m = \frac{P_H V}{RT_L} - \frac{P_L V}{RT_1} \quad (\text{per cycle}) \quad (4)$$

이고, 이때 필요한 최소 압축일은 등온 압축기로 가정할 때 다음과 같다.

$$W_{comp} = -mRT_0 \ln\left(\frac{P_H}{P_L}\right) \quad (5)$$

이고, 식 (4)를 대입하면

$$W_{comp} = -RT_0 \frac{V}{R} \left(\frac{P_H}{T_L} - \frac{P_L}{T_1}\right) \ln\left(\frac{P_H}{P_L}\right) \quad (6)$$

이다. 따라서 이상적인 G-M 극저온 냉동기의 최대성적계수(COP : coefficient of performance)는

$$\begin{aligned} COP_{GM} &= \frac{Q_L}{-W_{COMP}} \\ &= \frac{\left(\frac{P_H}{P_L} - 1\right)}{\left(\frac{T_0}{T_1}\right) \left(\frac{T}{T_L} \frac{P_H}{P_L} - 1\right) \ln\left(\frac{P_H}{P_L}\right)} \end{aligned} \quad (7)$$

이고, T<sub>1</sub>과 T<sub>0</sub>의 비는 절대온도로써 표현할 때 거의 1 이라고 가정하면

$$COP_{GM} = \frac{PR - 1}{(TR \times PR - 1) \ln PR} \quad (8)$$

이며, 단위 냉동량에 대한 압축기의 일은

$$\frac{-W_{COMP}}{Q_L} = \frac{(TR \times PR - 1) \ln PR}{PR - 1} \quad (9)$$

여기서 PR = 압력비 =  $\frac{P_H}{P_L}$

TR = 온도비 =  $\frac{T_1}{T_L} = \frac{T_0}{T_L}$

이 된다. 결국 카르노 사이클의 성적 계수에 대한 G-M 극저온 냉동기의 성적계수로 표현되는 figure of merit (FOM)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} FOM &= \frac{(Q/W)_{GM}}{(Q/W)_{CARNOT}} \\ &= \frac{(TR - 1)(PR - 1)}{(TR \times PR - 1) \ln PR} \end{aligned} \quad (10)$$

실제 시스템에서는 항상 일정하게 발생하는 다양한 손실들 때문에 순수 냉동능력 이상적인 냉동능력과 실제 냉동능력보다 훨씬 작게 나온다. 사이클에서 발생하는 여러 가지 손실들을 열거하면 아래와 같다.

- (1) 압력저하에 의한 P-V 손실
- (2) 전도 손실
- (3) 재생기 비효율성에 의한 손실
- (4) Shuttle loss
- (5) 재생기 void volume에 의한 손실
- (6) Cold end에서 void volume에 의한 손실
- (7) 기체의 비이상적 특성으로 인한 손실
- (8) 오-링 씬에서 기체누설에 의한 손실
- (9) 복사 손실
- (10) 잉여가스 열전도에 의한 손실
- (11) Cold end에서 불완전한 열전달에 의한 손실

### 3. 연구동향

4.2K용 G-M 극저온 냉동기는 4.2K 온도영역에서 비열특성이 우수한 재생기 물질과 재생기의 적절한 설계에 의해 달성될 수 있다. 이러한 4.2K용 G-M 극저온 냉동기는 MRI의 헬륨 재충족과 초전도 자석의

직접 전도냉각에 주로 활용되고 있다.

1959년 G-M 극저온 냉동기가 발명된 이후 약 30년간 2단 재생기용으로 납(lead ball)이 주로 사용되었다. 납은 10K 이하의 온도에서는 비열이 급격히 낮아지므로, 2단 G-M 극저온 냉동기의 최저도달온도는 약 10K가 한계였다. 1990년대 초반부터 일본 동경대를 중심으로 2단 재생기에 희토류 금속재료를 사용함으로써 4.2K 이하의 G-M 극저온 냉동기를 개발하였다. 현재 주로 사용되는 2단 재생기 재료로서는 Er<sub>3</sub>Ni, HoCu<sub>2</sub>와 세라믹 자성물질인 GAP(GdAlO<sub>3</sub>) 등이 있다. 이러한 물질들을 사용함으로써 4.2K에서 약 1W 이상의 냉동능력을 가진 G-M 극저온 냉동기와 최저도달온도 1.5K 근방의 He<sup>3</sup> G-M 극저온 냉동기를 제작하였다.

최근에는 Sumitomo에서 세라믹 자성물질인 GOS(Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S)를 사용하여 4.2K에서의 냉동능력을 향상시켰다. 이 때 2단 재생기에서 하이브리드 형태로 재생기 재질을 적층하여 온도 범위에 가장 적합한 물질을 고려하였다.

그림 4는 주요 재생기 재질의 비열을 나타낸 그림이다.

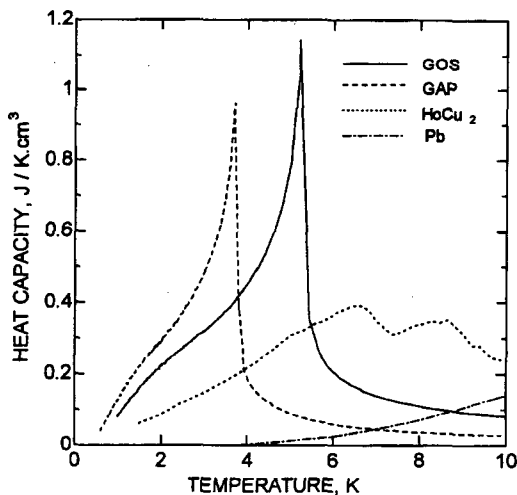


그림 4. 재생기 재질의 비열 특성

재생기 물질에 대한 연구 이외에 G-M 극저온 냉동기에서 아직 개발 중인 주요 연구분야는 2단 재생기의 실링기술과 고저압 밸브 기구이다. 또한 1.8K 이하의 온도 영역에서 작동하는 G-M 극저온 냉동기의

개발도 주요한 연구분야로 자리잡고 있다.

#### 4. G-M 극저온 냉동기의 전망

G-M 극저온 냉동기는 다른 극저온 냉동기와 헬륨 액화기에 비해 구조가 간단하고, 신뢰성이 높으며 가격이 낮아 널리 보급되어 있다. 특히 액체헬륨을 이용하거나 고온 초전도체 냉각에도 4.2K G-M 극저온 냉동기가 적극적으로 검토되고 있다.

물론 최근에 저온부에 가동부가 없어 수명향상이 기대되는 맥동관 냉동기가 활발히 연구되어 G-M 극저온 냉동기와 경쟁 관계에 있지만, 맥동관 냉동기는 G-M 극저온 냉동기에 비해 낮은 효율과 온도불안정성, 그리고 buffer에 의한 구조상의 문제를 안고 있어 아직까지 G-M 극저온 냉동기의 활용도가 훨씬 높다.

G-M 극저온 냉동기는 Cryopump는 초전도체 냉각 이외에도 적외선 센서 및 우주망원경 냉각 및 이동통신무선기지국의 초전도필터 냉각 등에도 활용될 전망이다.

우리나라에서는 제네시스 진공을 통해 Cryopump용 2단 G-M 극저온 냉동기를 생산함으로써 상업용 극저온 냉동기 생산이 최초로 시작되었으며, 국내 여러 연구자들을 통해 4.2K용 G-M 극저온 냉동기의 개발이 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] G. Walker, "Cryocoolers : Part I, II", Plenum Press, New York and London. (1983)
- [2] R.Radebaugh, "Prospect for small cryocoolers", Proc. Icec-9, Kobe, Japan, pp.761-765, (1982)
- [3] W.E.Gifford and H.O.McMahon, "A New Low Temperature Gas-Expansion Cycle"(Part I and II), Adv.Cryog.Eng., Vol.5, Plenum Press, Inc., New York, pp.354 - 372, (1960)
- [4] M. Thirumaleshwar and S.V. Subramanyam, "Two-stage Gifford-McMahon cycle cryorefrigerator operating at 20K", Cryogenics, Vol.26, pp.100-104, (1986)

- [5] M. Thirumaleshwar and S.V. Subramanyam, "Heat balance of single stage Gifford-McMahon cycle cryorefrigerator", Cryogenics, Vol.30, pp.189-195, (1990)
- [6] W.Weiwu, "Adiabatic expansion exhaust regenerative refrigerating cycle", Cryogenics, Vol.27, pp.577-581, (1987)
- [7] 박성제, 고득용, 유창중, 김의준, 최현오, "2단 Gifford-McMahon 극저온 냉동기의 특성실험", 공기조화 냉동공학 논문집, 제 5권 제3호, pp.198-206, (1993)

### 저자이력



고득용(高得龍)

1978-1982년 한양대학교 기계공학과, 1983-1985 한양대학원 기계공학과, 1997-현재 한양대학원 기계공학과, 현재 한국기계연구원 책임연구원