

Gifford-McMahon 극저온 냉동기의 특성에 관한 실험적 연구

정철진, 고득용*

한양대 대학원, 한국기계연구원*

An experimental study on the characteristics of Gifford-McMahon cryocooler

C.J.Jeong, D.Y.Koh*

Graduate School, Hanyang University, Korea Institute of Machinery & Materials*

E-mail : cjx@kebi.com

Abstract - To achieve good cryogenic circumstances by Gifford-McMahon cryocooler, we have to constitute optimal conditions with various factors for G-M cryocooler.

In this study, cool-down characteristics were presented with some factors using brass matrix mesh (1st stage) and Pb ball (2nd stage) as regenerator materials for the heat exchangers. The effects of the variations of Helium gas pressure and cycle frequency on the cooling capacity of G-M cryocooler are investigated experimentally. The presented results could be summarized as follows : 1) As the steady state pressure increases, 'no load temperature' decreases but cooling capacity increases. 2) It is confirmed that the characteristics of the specific heat of the regenerator materials agree well with the cool-down characteristics of 10 K cryocooler.

Key words: Cryocooler(극저온냉동기), Optimal condition(최적 조건), Regenerator(재생기)

1. 서 론

G-M cryocooler의 냉각 능력에 영향을 미치는 요소로써 헬륨 압축기로부터 cryocooler로 공급하는 냉매 헬륨가스의 압력, cryocooler 구동 모터의 회전 속도(rpm), cryocooler내 흡·배기 밸브의 개폐 시기 및 왕복기(열재생용 축냉재를 넣은 displacer)의 운동과의 적절한 위상차, 왕복기내 축냉재의 재질 및 매트릭스 크기(mesh) 등이 있는데, 이러한 것들이 최적의 상태가 되어야 한다. 또한 부수적인 각종 손실(P-V 선도의 비이상성에 의한 압력 손실 등)의 최소화 등이 G-M cryocooler의 성능 개선에 필요한 요소들이다. 더 나아가 재생기를 싸고 있는

왕복기는 열전도성이 약한 재질을 사용하여야 하며,^[1] 재생기 성능에 따라 열교환 효과가 다르므로 재생기 재료의 선정이 매우 중요하다. 재생기의 재료들은 극저온 상태하에서는 물질의 비열이 낮아지는 특성이 있어서 그 비열에 따라 전열 성능이 달라진다. 이상에서 재생기 축냉재의 비열은 냉매 헬륨가스의 비열보다 높아야 열교환기로서의 역할을 수행할 수 있다.

본 연구에서는 축냉재로써 황동 매트릭스 mesh(1단), 납볼(2단)을 사용하고 냉매 헬륨가스의 공급 압력과 주파수의 변동이 G-M cryocooler의 냉각 능력에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다.

2. 본 론

2.1 실험 장치

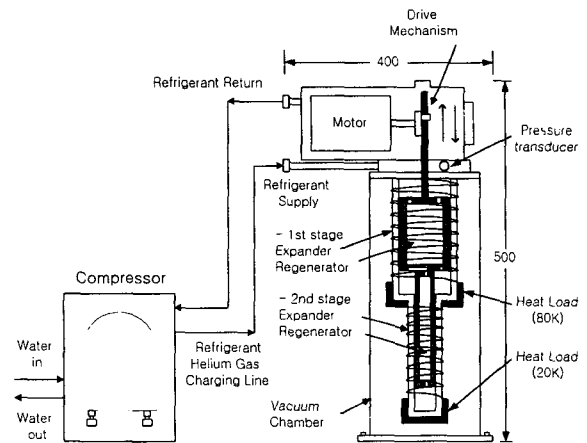


Fig. 1. Schematic diagram of G-M Cryocooler

본 연구에서 사용된 G-M cryocooler의 장치도는 Fig. 1과 같다.

필요한 압력만큼의 냉매 헬륨가스를 압축기에 충전하여 cryocooler와 압축기를 작동하면 압축

기로부터 압축된 헬륨가스가 냉동기로 공급된다.

냉동기에서는 모터의 회전운동이 cryocooler 왕복기의 직선운동으로 전달되어 팽창기내에서 냉매 헬륨가스는 냉각된다.

팽창기 외표면의 copper cap 위에 열선(Nichrome)과 온도센서(silicon diode)를 장착하였고 각각의 리드선으로 팽창기를 감아 올렸다. 저압과 고압을 모두 받는 cryocooler 헤드부에 압력센서를 부착하였다. 사용한 실험 장비는 Table 1과 같다.

Table 1. Instruments for Experiment

Use for	Instruments	
Vacuum	Vacuum pump	rotary pump (pirani gauge)
		diffusion pump (penning gauge)
Temp. (2stage)	Neocera temperature controller Lakeshore 208 Thermometer (silicon diode temperature sensor)	
Heating (2stage)	DC Power supply 2EA (Heater wire sensor)	
Pressure	PCB Charge Amplifier ; Quartz dynamic pressure transducer (piezo type)	
	Digital Oscilloscope	
Voltage, Ampere	Power supplier (for step motor)	
RPM operation	Stepping motor driver	
I, V, Ω	Digital multimeter	
Refrigerant supply	Helium compressor(CTI) 1.8kW	

실험에 필요한 열선, 온도센서, 압력센서의 설치, 재생기 축냉제의 충전 등은 아래의 설명과 같이 하였다.

2.1.1 열선 (heater wire)

팽창기 1단과 2단 냉단부(cold end)의 외표면에 있는 Copper cap 위에 열선을 붙였다. 이 열선의 설치 목적은 무부하 온도가 아닌 열이라는 부하를 가해 줌으로써 부하 작용시의 온도 강하 특성, 즉 냉동능력(Watt)을 측정하기 위한 선이다. 팽창기 1단 열선과 리드선의 총 저항은 39.7 Ω으로 히터부 직렬 15Ω + 15Ω = 30Ω, 리드선 저항이 9.7Ω이다. 2단 열선과 리드선의 총 저항은 21.7Ω으로 히터부 직렬 5.5Ω + 5.5Ω = 11Ω, 리드선 저항이 10.7Ω이다.

열선은 NC-32, Nichrome 선으로써 진공하

에서의 퓨징 커런트(fusing current)는 1.8A이다. 열선의 전원 공급기 인가 전압은 2단의 경우 $V = iR = 1.8A \times 11\Omega = 19.8 V$ 인데 10V 이하로 가하여 열선이 손상되지 않게 한다. 리드선은 1단, 2단 다같이 팽창기 외부를 감아 올렸으며 Kapton film으로 부착하였다.

2.1.2 온도 센서

온도 측정용의 열전대(thermo-couple)로써 일반적으로 구리-콘스탄탄의 T-type 열전대 등을 사용하지만 극저온에는 실리콘 다이오드 온도센서 등과 같은 저항온도계를 주로 사용한다.

온도 센서는 1단, 2단 다같이 극저온 측정용 Silicon diode 온도 센서 DT-470-CU-13으로써 CU타입을 사용하였다. 4개의 가닥으로 된 Lead Color는 Red(I-), Green(V-), Black (I+), Clear(V+)로써 CU 계열 Package installation instruction에 의거, 다이오드의 흐름을 Fig. 2와 같이 한다. DT-470 계열의 실리콘 다이오드 온도 센서의 측정 전류는 10μA(±0.05%)이다. 즉, 이 온도 센서는 저항 온도계의 일종으로 10μA의 일정 전류를 흘려 측정되는 전압에 의해 온도를 측정한다.

온도 측정 기술이 중요시되는 것은 냉각온도가 곧, cryocooler의 냉각 능력과 직결되기 때문이다. 이러한 G-M cryocooler 실험에서는 각 단의 팽창기 외표면 냉단부(cold end)에서 측정되는 온도가 곧 팽창기내에서 팽창된 가스의 온도라고 가정한 것인데, 실제로는 팽창기 끝부분에 부착한 copper cap의 온도가 냉각된 가스로부터 copper 표면으로 가는 열전달 효과에 의해 결정된 것이기 때문에 측정된 가스의 온도는 측정된 냉단부의 표면온도 보다 낮아야 한다.

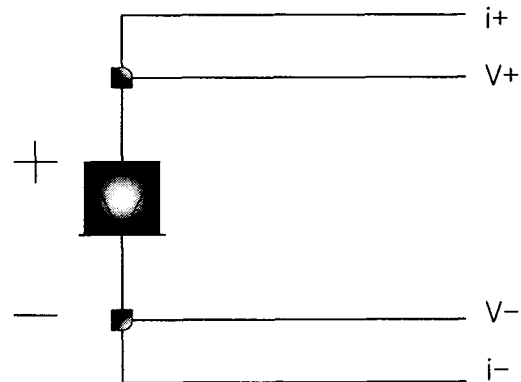


Fig. 2. Four-Lead Measurement scheme

2.1.3 압력 센서

압력센서는 Piezo 타입의 Dynamic quartz pressure transducer 112A 9690을 사용하였다. 저압, 고압을 모두 받는 Cryocooler의 헤드에 홀을 뚫어서 센서 체결부(adapter)를 별도로 제작하여 기밀을 위해 테프론(teflon) 테이프를 감은 후 나사식으로 체결하고 그 위에 압력 센서를 체결

하였다. 압력 센서는 흡·배기시 팽창기의 압력을 측정한다. 압력 센서로부터의 압력은 Charge amplifier를 거친 후, 오실로스코프의 화면에서 다이내믹 압력으로써 저·고압의 압력차를 볼 수 있다.

Charge amplifier의 압력센서 Calibration range는 0~300psi(21.09kgf/cm²) (동압)이며, Sensitivity 1.23pC/psi, 고유주파수 300kHz이다.

2.1.4 재생기 (regenerator) 축냉재의 충전

재생기는 고압의 헬륨 가스가 통과할 때에는 헬륨 가스를 냉각시키고, 저압의 헬륨 가스가 통과할 때에는 헬륨 가스를 가열하는 열교환기이다. 본 재생기는 왕복기내에 축냉재를 채워 둔 상태로써 왕복기와 일체형으로 되어 있다. 왕복기의 재질은 열강화 수지인 베크라이트를 사용하였으며, 이는 실린더 벽과의 전도에 의한 열손실을 줄이기 위해 열전도성이 약한 재료를 사용한 것이다.

이 실험에서 열재생용으로 사용한 축냉재는 1단 황동 mesh, 2단 Pb ball이며 2단부의 경우 축냉재만의 질량은 164.11g, 왕복기만의 질량은 51.32g이다.

Fig. 3은 2단부의 예로써 축냉재 맨 아래에 구멍을 여러 개 뚫은 황동 와셔로 하단을 잡아주고, 그 위에 황동 매트릭스, 펠트(Felt, 양모), 황동 매트릭스 순으로 하여 가운데에 Pb 볼을 가득 채워 넣은후 다시 황동 매트릭스, 펠트 등을 앞에서 한 역순으로 쌓은 후, 멈춤링(스냅링)으로 이상의 것들이 새어 나오지 않도록 막았다. 여기서 펠트는 필터의 역할을 한다. 1단에 사용한 황동 mesh는 전기 전도도가 높고, 2단에 사용한 납볼은 전기 전도도가 낮다.

열교환용 축냉재에는 황동, 납볼, 희토류 등이 있으나 황동은 70K 이상의 온도에서 비열이 큰 재질로써 효율이 좋고, 20 K 정도의 극저온에는 Pb 볼(지름 약 0.1mm)을 사용하며,^[2] 또 10 K 이하의 온도에는 납볼도 효과가 미약하므로 Yb, Er, Gd 등의 희토류(rare earth) 또는 백금류 희귀 금속인 Rh 등을 열재생용 축냉재로 사용하여야 한다. 이들 희토류 또한 종류에 따라 열교환 효과가 다르다. 축냉재를 한 단(stage)에 하이브리드(hybrid) 구조로 구성을 할 때에는 저온부에 비열이 더 큰 재료를 넣는다.^[3] 이상에서 재생기(축냉재)의 비열은 냉매(헬륨가스)의 비열보다 높아야 한다.

2.2 실험 방법

2.2.1 압력 및 주파수 변화에 따른 온도강하 측정

실험은 헬륨가스의 충전압력이 18kgf/cm², 16kgf/cm², 14kgf/cm² 일 때 각각의 주파수 45rpm, 60rpm, 70rpm 에 대하여 행하였다. 이와 같은 실험에서 팽창기 1, 2단의 최저 도달 온도는 1단이

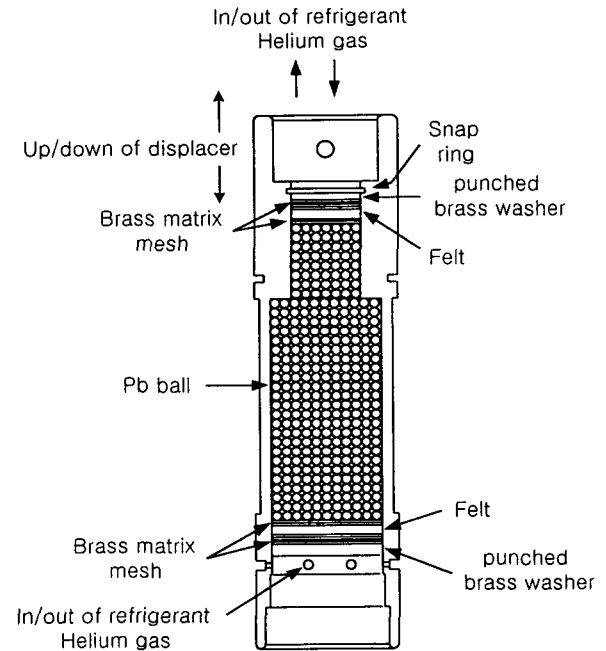


Fig. 3. The 2nd stage regenerator

38.16 K(18kgf/cm², 60rpm), 2단이 10.27 K(18kgf/cm², 45rpm) 이었다. 이는 각각, -234.99℃, -262.88℃의 극저온에 해당한다. 냉동 능력 또한 1단 온도 80 K 및 2단 온도 20 K에서 위의 압력과 주파수에 대하여 행하였다.

진공 펌프로써 압축기, cryocooler, chamber 순으로 진공 작업을 하였다. 극저온에서 진공을 유지하는 것은 외부로부터의 열 유입을 차단하는 역할을 한다. 팽창기를 둘러싸고 있는 챔버에는 계속하여 진공 펌프 라인을 연결하여 작동시켜 두었다. 챔버의 진공도는 pirani 게이지와 penning 게이지로 볼 수 있다. 본 실험에서는 10⁻⁶ torr 까지 진공을 유지하였다.

헬륨 가스의 공급 압력 및 주파수를 실험 때마다 다르게 하여 G-M cryocooler의 냉각 능력에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다.

2.2.2 냉동능력 측정

냉동 능력은 다음과 같이 측정하였다.

$$\begin{aligned} \text{냉동 능력} : Q &= i_H V_H \\ &= i_H^2 R_H \\ &= \frac{V_H^2}{R_H} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{전압 } V_T = i_H (R_H + R_L),$$

$$\text{전류 } i_H = \frac{V_T}{R_H + R_L}$$

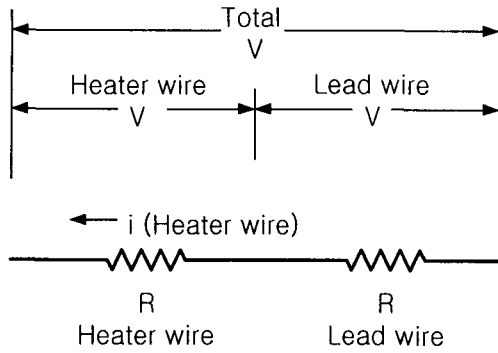


Fig. 4. The circuits of heater sensor

따라서 냉동 능력 $Q = \left(\frac{V_T}{R_H + R_L}\right)^2 R_H$ (2)

1단 : $Q_1 = (i_{H1})^2 R_{H1}$ (2-1)

2단 : $Q_2 = (i_{H2})^2 R_{H2}$ (2-2)

냉동능력은 팽창기 2단, 1단의 순서로 측정하였다. 무부하 온도가 완전히 수렴한 후, 먼저 2단에 히터를 가하여 온도 20 K에 대한 냉동능력을 측정하였다. 그런 다음 1단의 냉동능력을 측정할 때에도 2단 히터는 끈 상태에서 80 K에 대한 냉동능력을 측정하였다. 냉동능력을 미리 추정 후 히터를 가열할 때에는 1단 및 2단에 가할 전압 V_T 를 식(2)로부터 구하면 각각 다음과 같다.

$$V_{T1} = (R_{H1} + R_{L1})\sqrt{\frac{Q_1}{R_{H1}}} \quad (3)$$

$$V_{T2} = (R_{H2} + R_{L2})\sqrt{\frac{Q_2}{R_{H2}}} \quad (4)$$

위에서 구한 전압을 가감하여 부과하면서 수렴 온도를 찾는다. 해당 전류 i_H 는 power supplier에 자동으로 나타나므로 알 수 있다. 냉동 능력은 (2)식으로부터 구할 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 무부하 온도 및 냉동능력

Cryocooler의 팽창기 끝단 초기 온도가 1단, 2단 각각 293.1 K, 293.2 K 정도의 상온에서 동시에 시작된 무부하 온도 강하 특성 실험에 의한 팽창기의 최저 도달 온도는 1단, 2단에서 각각 38 K, 11 K 정도이었다. 냉동 능력은 충전 압력 18kgf/cm², 45rpm (Fig.6)의 실험에서는 1단, 2단 80 K, 20 K에서 각각, 10.8 W, 3.73 W 이었고 16 kgf/cm², 60rpm (Fig.7)에서는 14.7 W, 3.45 W이었으며 16kgf/cm², 70rpm (Fig.7)에서는 14.7 W, 2.13 W이었다. 충전 압력을 더 낮춘 14kgf/cm², 45rpm (Fig.8)에서는 9.08 W, 1.804 W이었으며 14kgf/cm²,

60rpm (Fig.8)에서는 12.68 W, 2.11 W이었다.

정상상태의 압력이 높을수록 최저 도달 온도가 낮아지고 냉동 능력은 좋아지는 것을 알 수 있었으며, 압력도 높고 주파수도 높은 18kgf/cm², 70rpm 에서는 온도의 하강 속도는 무척 빨랐다. 최저 도달 온도 10 K 대의 온도는 2.1.4 항에서 언급한 축냉재의 특성과 잘 맞다. 여기서는 황동 매트릭스(1단)와 Pb 볼(2단)을 축냉재로 사용하였으며, 10 K 이상의 온도에서 좋은 효율을 발휘하는 Pb 볼을 사용하였기 때문에 11 K 정도에서 냉각 온도가 수렴하였다. 만약 10 K 이하의 온도를 달성하기 위해서는 2.1.4 항에서 언급한 것처럼 Yb, Er, Gd 등의 희토류 광물 또는 백금류 희귀 금속인 Rh 등을 열재생용 축냉재로 사용하여야 한다.

실험 결과의 그래프 Fig.5-Fig.8에서 1단의 온도가 51 K 전후에서 수렴한 것을 볼 수 있는데, 이는 "헬륨(⁴He)의 반전(역전)온도^[41]"가 51 K 인 것과 무관하지 않다. 반전온도보다 낮은 온도 영역에서는 팽창시 냉각되고 높은 영역에서는 가열된다. 수렴온도 부근에서 1단과 2단 온도의 등락은 일시적인 heat pumping 현상이 발생하였기 때문이다. 하강 온도는 팽창기를 2단으로 하였으므로 동시에 시작된 1단 온도가 51 K 부근에서 먼저 수렴하고, 이어 2단 온도는 10 K 부근에서 수렴하였다.

3.2 성능계수(COP) 및 효율

사용한 G-M Cryocooler의 성능계수(COP : coefficient of performance)를 Carnot 성능계수와 비교해 보면 다음과 같다.

16kgf/cm², 70rpm 인 2단부의 예(Fig.7)를 들면

- 압축기 power $W_C = 220V \times 7.9A$
 $= 1738 W$
 $= 1.74 kW$

- 냉동부하 $Q_{L2} = 2.13 W$ (20 K에서)

- $COP = \frac{Q_{L2}}{W_C} = 0.001226$

- $COP_{Carnot} = \left(\frac{T_L}{T_H - T_L}\right)_{Carnot}$
 $= \frac{20K}{293.1K - 20K}$
 $= 0.073233$

따라서 효율은 $\frac{COP}{COP_{Carnot}} = 1.67\%$ 이다.

3.3 실험 결과의 그래프 비교

Fig. 5는 팽창기 1단과 2단의 무부하 온도 강하 특성을 그래프로 나타낸 하나의 예이며, 부하 온도 실험에 의한 냉동능력은 1단 80 K에서 14.7 W이며, 2단 20 K에서 2.13 W이다. 충전 압력과 주파수를 다르게 하여 실험한 여러결과들은 앞

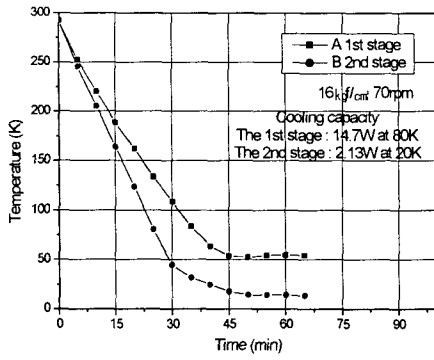
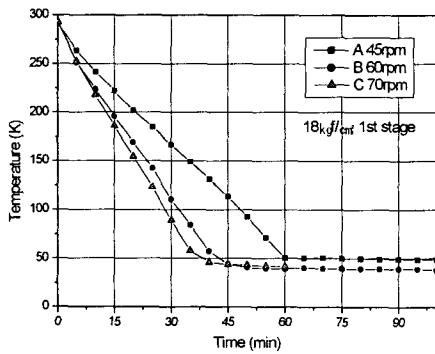


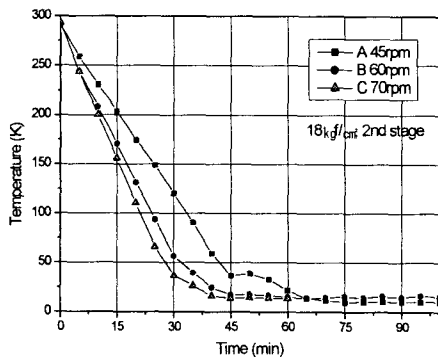
Fig. 5. Cooling capacities and Cool-down characteristics

면에서 이미 나열하였다.

Fig.6은 충전 압력 $18\text{kg}_f/\text{cm}^2$, 모터의 회전수 45rpm, 60rpm, 70rpm의 조건으로 실험한 결과이다. 팽창기 1단과 2단의 온도 하강을 5분간격으로 동시에 측정하였으므로, 점의 위치를 잘 보면 rpm이 높을수록 온도가 빨리 떨어지는 것을 볼 수 있다.



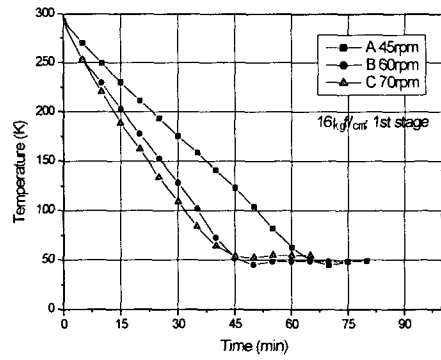
(a) The 1st stage ($18\text{kg}_f/\text{cm}^2$)



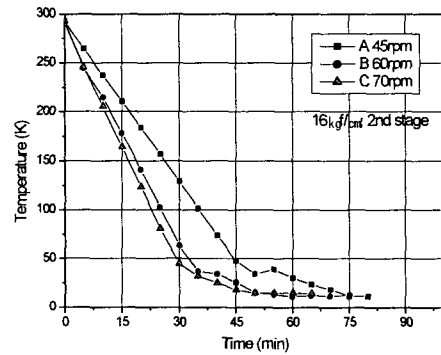
(b) The 2nd stage ($18\text{kg}_f/\text{cm}^2$)

Fig. 6. Cool-down characteristics ($18\text{kg}_f/\text{cm}^2$)

Fig.7은 더 낮은 압력 $16\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 에 대한 실험 결과이다. 충전압력 $18\text{kg}_f/\text{cm}^2$ (Fig.6)인 경우처럼 이 또한 rpm이 높을수록 온도가 빨리 떨어지는 것을 볼 수 있다.

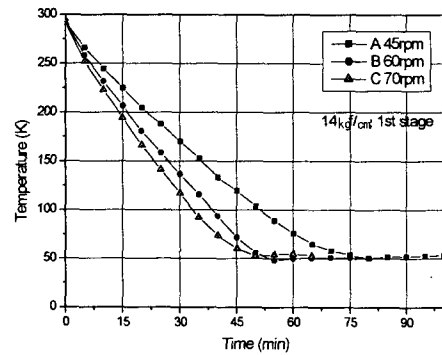


(a) The 1st stage ($16\text{kg}_f/\text{cm}^2$)

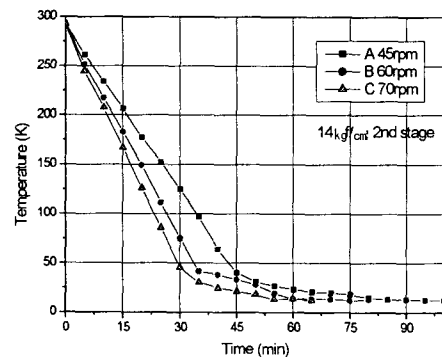


(b) The 2nd stage ($16\text{kg}_f/\text{cm}^2$)

Fig. 7. Cool-down characteristics ($16\text{kg}_f/\text{cm}^2$)



(a) The 1st stage ($14\text{kg}_f/\text{cm}^2$)



(b) The 2nd stage ($14\text{kg}_f/\text{cm}^2$)

Fig. 8. Cool-down characteristics ($14\text{kg}_f/\text{cm}^2$)

그러나, 온도는 압력이 18kgf/cm^2 인 경우보다 덜 떨어지는 것을 볼 수 있는데, 특히 1단에서 그러하다.

Fig.8은 가장 낮은 충전 압력하의 실험 결과 그래프이다. Fig.5-Fig.8에서 모두 온도가 약55분-75분만에 수렴한 것을 볼 수 있다. 1단의 경우 압력이 18kgf/cm^2 (Fig.6) 일 때 약 35분만에 약50 K에 도달한 것 (60rpm, 70rpm) 과는 달리 압력 14kgf/cm^2 인 Fig.8에서는 온도가 수렴하는데에 약50분이 소요된 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

G-M cryocooler를 사용하여 극저온 분위기를 만드는 데에는 수많은 요소들이 최적의 상태가 되어야 하는데, 본 연구에서는 각종 설계변수 중의 하나인 열재생 재료로써 황동 mesh(1단), Pb ball(2단)을 축냉재로 사용하였으며 냉매 헬륨 가스의 공급 압력과 주파수의 변동이 G-M cryocooler의 냉각 능력에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다.

Cryocooler의 팽창기 끝단 초기 온도가 1단, 2단 각각 293.1 K, 293.2 K 정도의 상온에서 동시에 시작한 무부하 온도 강하 특성 실험에 의한 팽창기의 최저 도달 온도는 1단, 2단에서 각각 38 K, 11 K 정도이었다. 부하 실험에 의한 냉동능력은 대개 팽창기 1단이 80 K에서 10 W-

15 W 정도이였으며, 2단이 20 K에서 2 W-4 W 정도이었다.

정상상태의 압력이 높을수록 최저 도달 온도가 낮아지고 냉동 능력은 좋아지는 것을 알 수 있었으며, 최저 도달 온도 10 K 대의 온도는 본 실험에서 사용한 축냉재의 특성과 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] "Heat balance analysis of single stage Gifford-McMahon cycle cryorefrigerator" Cryogenics 1986 Vol 26 March, M.Thirumalesswar and S.V.Subramanyam Cryogenics Section. pp.189-195
- [2] "Gifford-McMahon cycle a theoretical analysis" Cryogenics 1986 Vol 26 March, M.Thirumalesswar and S.V.Subramanyam pp.177-188
- [3] "Analysis of rare earth compound regenerator operating at 4 K" H. Seshake, T. Eda, K. Matsumoto, and T. Hashimo to Tokyo Institute of Technology. Toshiba Research and Development Center
- [4] 열물리학 Thermal Physics, 2nd ed. Charles Kittel, Herbert Kroemer University of California Chapter 12. Cryogenics