아르곤가스를 사용하는 급속냉각형 쥴톰슨 냉각기의 냉각 특성

Cooling characteristics of rapid cool-down type J-T cooler using argon gas

*#이용덕[1], 김상운[1], 여보연[1]

*#Y.D. Lee(LeeYongDeog@lignex1l.com) [1] , S.W.Kim[1], B.Y.Yeu[1]

[1] LIG 넥스원,

Key words : Joule-Thomson cooler, Rapid cooling, Cool-down characteristics

1. 서론

아르곤가스를 냉매로 사용하는 쥴톰슨(Joule-Thomson) 냉각기는 질소가스에 비해 냉각 온도가 약 10 K 높으나 아르곤 가스의 높은 냉동 능력과 고압에서도 높은 냉동 능력을 유지할 수 있어, 적외선 검출기의 급속한 냉각기 가능한 장점으로 인해 열 부하 200 mW 급 급속유량조절형 쥴톰슨냉각기(이하 J-T 냉각기)로 많이 사용되고 있다.

J-T 냉각기의 성능은 냉각(cool-down)시간, 냉각 후 유지온도, 지속시간 등으로 이며, 급속냉각을 위해서는 냉각초기 수십 W 이상의 냉동능력을 유지하여야 하며, 낮은 냉각 유지온도 및 장시간의 지속시간을 위해서는 냉각완료 후 급속한 유량제어를 통해 정상상태에서의 유량을 최소화하여 냉동능력을 최소화 하여야 한다.

본 논문에서는 아르곤 가스를 냉매로 사용하는 직경 9.5 mm 급 J-T 냉각기의 냉각 특성 및 모사 듀워의 열부하 특성을 제시하고, 이를 고찰하고자 한다.

2. 본론

J-T 냉각기는 고압의 가스가 노즐을 통해 급속 팽창할 때 발생하는 강온효과(쥴톰슨효과)를 통해 냉각이 발생하며, 팽창 후 효율적으로 극저온의 온도에 도달하기 위해 일반적으로 열교환기를 통해 예냉을 수행한다.

적외선 검출기의 강온이 발생하며, 빠른 냉각을 위해서 J-T 냉각기는 냉각초기 큰 냉동능력이 필수적이다.

적외선 검출기를 냉각대상으로 하는 J-T 냉각기는 압력용기, 가스 여과부, 팽창후 배출되는 가스와 공급되는 가스와의 열교환을 통해 예냉을 수행하는 열교환기, 쥴톰슨노즐, 정상상태에서의 유량을 최소화하고 안정적인 냉각유지온도를 구현하기 위한 유량조절기구 등으로 구성된다.

J-T 냉각기의 작은 체적에서 큰 열전달면적을 얻기 위해 열전도도가 높은 금속재질의 관 외부에 얇은 핀을 부착한 휜-관(finned tube) 열교환기를 사용한다.[1)]

쥴톰슨 팽창을 통해 냉각기에서 발생하는 냉동능력은 냉각기로 공급되는 가스 및 배출되는 가스의 에너지 평형을 통해 구할 수 있다.[2)]

그림 1 은 질소(끓는점 77.35 K)와 아르곤(끓는점 87.4 K)의 팽창전 압력변화에 따른 단위질량 당 냉동일(냉각기 입출구의 엔탈피 차이)을 나타낸다.

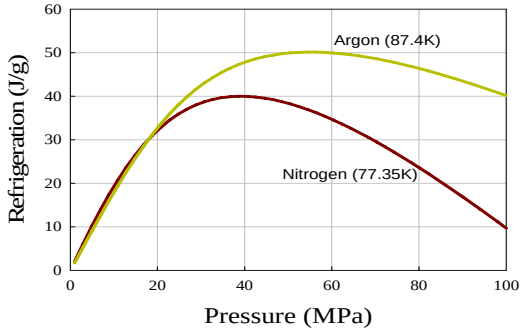


Fig. 1. Ideal refrigeration of the J-T cooler with the nitrogen and argon gas

2.1 냉각기 설계

2.1.1 열교환기

급속냉각형 J-T 냉각기는 냉각초기 큰 가스유량을 통해 큰 냉동능력을 구현하여야 한다. 이를 위해서는 충분한 열교환이 가능한 열교환기의 열전달면적의 확보가 필수적이다.. 그림 2 은 휜-관 열교환기의 길이에 따른 냉동능력의 해석결과를 나타낸다..

해석결과는 이와 같은 열교환기의 유용도 증가로 냉동능력의 증가를 나타내고 있으며, 60 slpm 이상의 가스유량에서 약 50 W 이상의 냉동능력이 발생하는 것으로 나타나, 200 mW 급 적외선 검출기의 급속냉각을 위한 냉동능력을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

2.1.2 유량조절기구

J-T 냉각기의 정상상태 가스유량을 최소화하고 낮은 냉각 유지온도를 얻기 위한 유량조절기구는 일반적으로 벨로우즈에 충전된 가스의 온도에 따른 압력변화를 통해 니들(needle)을 이송하는 벨로우즈 방식을 많이 사용하고 있다.

벨로우즈에 작용하는 힘은 내부 가스의 압력에 의한 힘과 벨로우즈 구조에 의한 스프링힘의 합으로 나타낼 수 있다.

$$k_{eq} \cdot x = \frac{P_{ch} V_o}{V_o - Ax} A + k_s \cdot x \qquad (1)$$

벨로우즈는 박판의 소재로 제작되며, 벨로우즈의 기하학적 형상에 따라 스프링강성의 변화가 발생한다.

그림 3 은 초기 충전가스 압력의 변화에 따른 벨로우즈의 길이변화를 나타낸 그림이다.

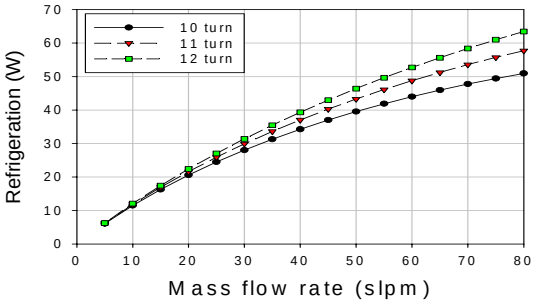


Fig. 2. Refrigeration of the J-T cooler with double wound finned tube h

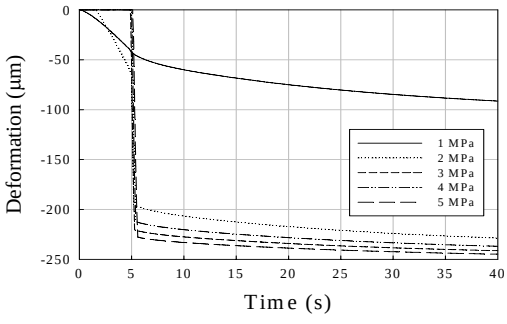


Fig. 3. Deformation of the bellows with the sudden change of the temperature

그림 4 는 노즐을 통해 급격한 팽창이 수행되는 가스노즐과 니들의 틈새 형상은 나타낸다. 그림 5 는 은 니들 선단 각도의 변화에 따른 노즐 특성변화를 나타낸 그림이다

.

$$H_{th} = L\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2)$$

$$S_{th} = \pi\left(d - L\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)L\left[\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right] \quad (3)$$

$$\dot{m} = \rho_{th} S_{th} V_{th} \quad (4)$$

여기서 L 은 니들의 이송거리, H 는 최소 틈새, S 는 단면적, Θ는 니들 선단각, 하첨자 th 는 목을 각각 나타낸다

그림 6 은 니들 선단각 30 도 및 40 도의 경우 니들의 이송거리에 따른 노즐의 유동면적을 나타낸 그림이다.

한편 노즐의 목을 통과하는 고압 아르곤 가스의 음속은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$h(P_{th}, T_{th}) + \frac{1}{2}V_{th}^{\ 2} = h(P_o, T_o) \quad (5)$$

$$s(P_{th}, T_{th}) = s(P_o, T_o) \quad (6)$$

$$V_{th} = a(P_{th}, T_{th}) \quad (7)$$

여기서 h는 엔탈피(enthalpy), s는 엔트로피(entropy), P는 압력, T는 온도, 하첨자 o는 목상류, th는 노즐목을 각각 나타낸다. 노즐에서의 가스의 음속은 식(5) 및 (6)을 시행오차법을 통해 식(5)와 (6)을 만족하는 속도를 구함으로서 얻을 수 있다.[3)]

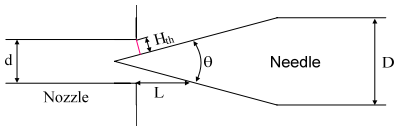
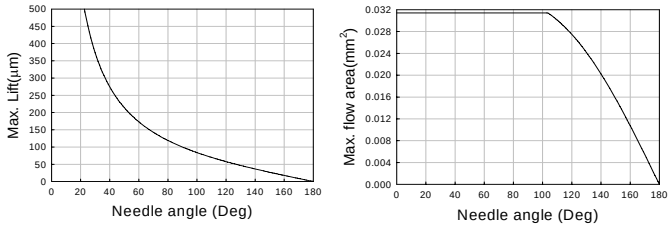


Fig. 4. Configuration of the nozzle and needle



(a) Maximum of the lift area vs. needle angle

(b) Maximum of the flow vs. needle angle

Fig. 5. Characteristics of the nozzle with respect to the change of the needle

.

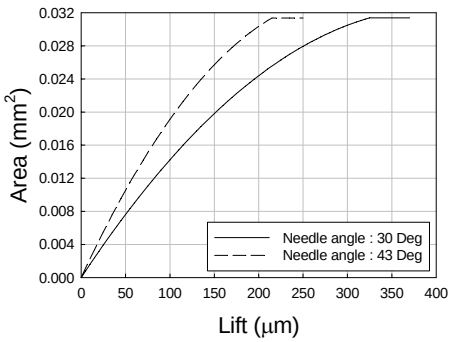


Fig. 6. Flow area of the nozzle vs. lift of the needle with the angle of 30 and 40 degree

2.2 모사듀워의 열특성

J-T 냉각기의 성능시험은 냉각기를 주위로부터의 열부하를 최소화하기 위한 모사듀워에 장착하여 수행하여야 한다. 표 2 는 액체아르곤의 증발량 측정을 통해 구한 모사듀워의 열부하 측정결과이다

Table 1. Head load of the simulation Dewar with the low and high vacuum environments.

	Boil-off rate (ml/min)	Pressure (hPa)	hfg (J/kg)	Q (mW)
Low vacuum	39.6	1001	199,309	191.6
High vacuum	103.2	995	161,265	494.2

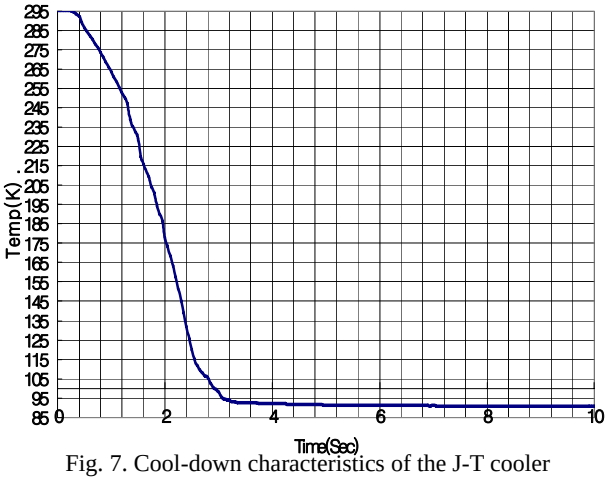


Fig. 7. Cool-down characteristics of the J-T cooler

2.3 J-T 냉각기 냉각특성

냉각기와 열부하를 측정한 모사듀워를 사용하여 냉각특성을 측정하였다. 측정은 상온의 아르곤 가스를 48.3 MPa 의 일정한 압력으로 냉각기에 공급하여 수행하였다.

그림 7 는 J-T 냉각기의 냉각특성으로 냉각초기 급속한 냉각이 발생하고, 냉각온도 95 K 에 도달하는 데 소요되는 시간은 약 3 초의 시간으로 나타났다.

3. 결론

본 연구에서는 J-T 냉각기를 적외선 검출기에 적용하기 위하여 냉각기의 설계하였고, 핵심구성품인 열교환기, 유량조절부의 특성을 해석하여, 급속냉각 및 낮은 냉각유지온도에 적합한 열교환기의 형태, 노즐과 니들의 위치 및 벨로우즈의 충전압력의 변화에 의한 냉각기의 성능변화를 고찰 및 특성평가를 하여 . 약 3 초의 냉각시간 및 90 K 의 냉각유지온도를 나타냄을 확인하였다.

후기

본 논문은 방위사업청에서 주관하는 핵심기술사업의 일환으로 추진한 중간결과물의 일부이다.

참고문헌

1. Walker, G., and Bingham, E. R., “Low-Capacity Cryogenic Refrigeration”, Clarendon Press, Oxford, 1994
2. Buller, J. S., “A Miniature Self Regulating Rapid-Cooling Joule-Thomson Cryostat”, Adv. Cryogenic Eng., Vol. 16, 205-213, 1971
3. Maytal, B. Z., “Real gas choked flow conditions at low reduced-temperature”, Cryogenics, Vol. 46, No. 1, pp. 21-29, 2006