

## 줄톰슨냉동기의 열교환기 성능에 관한 연구

### Study of the Performance of the Fin-Tube Heat Exchanger of the Miniature Joule-Thomson Refrigerator

홍용주<sup>1\*</sup>, 김효봉<sup>1</sup>, 박성제<sup>1</sup>, 최영돈<sup>2</sup>

Yong-Ju Hong<sup>1\*</sup>, Hyo-Bong Kim<sup>1</sup>, Seong-Je Park<sup>1</sup>, Young-Don Choi<sup>2</sup>

**Abstract:** Miniature Joule-Thomson refrigerators have been widely used for rapid cooling of infrared detectors, probes of cryosurgery, thermal cameras, missile homing head and guidance system, due to their special features of simple configuration, compact structure and rapid cool-down characteristics. The thermodynamic performance of J-T refrigerator highly depends on the hydraulic and heat transfer characteristics of the recuperative heat exchanger. The typical recuperative heat exchanger of the J-T refrigerator has the double helical tube and fin configuration. In this study, effectiveness-NTU approach was adopted to predict the thermodynamic behaviors of the heat exchanger for the J-T refrigerator. The thermodynamic properties from the REFPROP were used to account the real gas effects of the gas. The results show the effect of the operating conditions on the performance of the heat exchanger and refrigerator for the given heat exchanger. The influences of mass flow rate and the supply pressure on the effectiveness of heat exchanger and the ideal cooling capacity are discussed in details.

**Key Words:** Joule-Thomson refrigerator, heat exchanger.

#### 1. 서 론

스터링(Stirling) 냉동기, Gifford-McMahon 냉동기, 맥동관 냉동기 등 기계식 극저온냉동기에 비해 단순한 구조, 급속한 냉각 특성을 장점으로 하는 소형 줄톰슨 냉동기(Joule-Thomson refrigerator)는 적외선센서의 급속냉각, 저온수술, 열영상카메라, 미사일유도시스템 등 다양한 분야에서 널리 사용되어지고 있다.

줄톰슨냉동기의 냉각은 줄톰슨 노즐을 통과하는 고압의 가스가 등엔탈피 교축과정을 통해 팽창하면서 발생하는 강온효과(Joule-Thomson effect)에 의해 생성되며, 대향류 열교환기를 통해 교축 전/후 가스간의 열

교환을 수행하여, 냉각의 효과를 증폭하여 120 K 이하의 극저온의 온도에 도달할 수 있으며, 작동가스에 따라 다양한 온도 영역의 냉각이 가능한 소형 극저온 냉동기이다.

수백기압 이상의 고압 질소(끓는점 77.3 K) 및 아르곤(끓는점 87.3 K) 가스를 사용하는 줄톰슨냉동기는 일반적으로 100 K 이하의 온도 및 수초내에 급속한 냉각을 요구하는 적외선센서의 냉각[1]에 사용되고, 아르곤, R134A, R32 등 다양한 냉매를 혼합한 혼합냉매 줄톰슨냉동기는 그 보다 높은 온도영역을 대상으로 하는 저온수술용[2]으로 사용되고 있다. 또한 극저온냉동기에 의해 예냉된 고압의 수소, 헬륨 등의 가스를 이용하여 저온에서 극저온냉동기의 냉각성능을 향상시켜 대용량의 초전도 응용기기의 냉각을 하는 목적으로 사용되기도 한다.

적외선센서 냉각을 목적으로 하는 소형 줄톰슨 냉동기는 유량조절기구의 구조에 따라 고정오리피스형(fixed orifice type) 및 유량 자동조절형(demand flow type)으로 분류되며, 고정오리피스형 줄톰슨 냉동기는 제작 및 조장이 간편하나 냉각부하에 대응하는 적절한 가스유량으로의 조절이 불가능한 단점을 지니고 있으나 저온부의 급속한 냉각이 가능하며, 벨로즈(bellows)를 이용하여 냉각이 완료된 후 필요이상의 액체의 생성을 억제하는 유량 자동조절형 줄톰슨 냉동기는, 구조가 복잡하며 유지보수가 힘든 단점을 지니고 있으나, 고정형에 비해 장시간 운전할 수 있는 장점을 지니고 있다.

줄톰슨냉동기는 핀-튜브형태의 열교환기와 열교환기의 구조적 기반을 제공하는 멘드렐, 줄톰슨노즐 등으로 구성되며, 줄톰슨냉동기는 저온용기에 삽입되어 사용된다.

줄톰슨 냉동기의 열교환기는 소형의 열교환기로 최대한의 열교환을 수행하기 위해 일반적으로 핀을 부착한 관을 나선형으로 감아 사용하여 열전달면적을 증가시키며, 열교환기의 성능 저하는 냉동기 저온부의 냉각온도 상승 및 냉각시간의 증가 및 운전시간의 증가가 유발되기 때문에 열 및 압력강하 측면에서 최적성능의 열교환기가 요구된다.

Xue 등[3]은 소형 줄톰슨냉동기의 열교환기에 대해 열교환기에서 고압가스만의 압력강하를 고려한 수치해석을 수행하여, 제한된 가스의 공급압력(140 ~180 bar)에 대해 열교환기의 유용도, 열손실 등을 제시한 바 있다.

Maytal[4]은 줄톰슨냉동기의 최적성능을 위해서는 열교환기의 크기가 최적화되어야 하고, 주어진 열교환기 크기 또는 가스유량에 대해 최적의 조건을 제시한 바 있으나, 열교환기에서 발생하는 압력강하의 영향은 고려하지 않았다.

<sup>1</sup>정 회 원 : 한국기계연구원 에너지기계연구본부

<sup>2</sup>비 회 원 : 고려대학교 기계공학과

\*교신저자 : yjhong@kimm.re.kr

원고접수 : 2008년 10월 01일

심사완료 : 2009년 02월 09일

게재확정 : 2009년 02월 09일

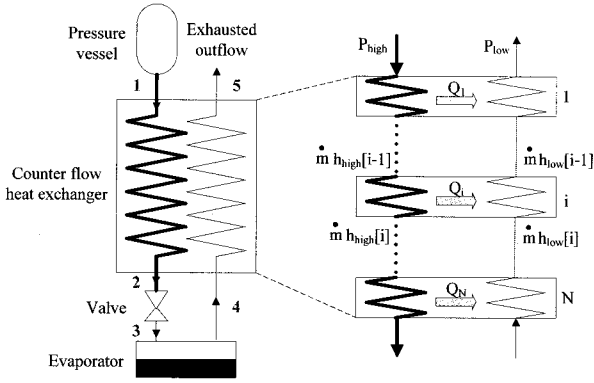


Fig. 1. Schematic diagram of a J-T cooling cycle.

본 연구에서는 열교환기의 압력강하를 고려한 유용도-NTU(Number of Transfer Units) 방법을 사용하여 수치해석을 수행하였으며, 줄튐스냉동기로 공급되는 질소 및 아르곤 가스의 압력변화에 따른 열교환기의 성능 및 최대냉각성능, 열교환기의 압력강하가 저온부의 온도에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 본 론

### 2.1. 열교환기 모델링

줄튐스냉동기는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 고압의 가스를 공급하는 압력용기(또는 압축기), 대향류열교환기(1-2, 4-5), 줄튐스밸브(2-3), 증발기(3-4)로 구성되고, 고압의 가스는 열교환기 내부에서 팽창 후 배출되는 저압가스와 열교환을 통해 냉각된다.

줄튐스 노즐의 교축과정을 통한 가스의 엔탈피(h)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$h_3 = h_2 \quad (1)$$

증발기에서 발생하는 냉동능력은 증발기 입출구의 엔탈피차 및 가스의 질량유량( $\dot{m}$ )으로 나타낼 수 있고 [5], 증발기에서 발생하는 최대의 냉동능력은 Fig. 4의 상태 4가 포화증기 상태일 때 나타난다.

$$Q_{ideal} = \dot{m}(h_4 - h_3) \quad (2)$$

Fig. 1의 각각의 열교환기  $i$  요소 출구에서의 고압가스 및 저압가스의 엔탈피는 열교환기의 길이방향 전도 열전달을 무시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_{high}[i] = h_{high}[i-1] - Q_i/\dot{m} \quad (3)$$

$$h_{low}[i] = h_{low}[i-1] - Q_i/\dot{m} \quad (4)$$

여기서  $Q_i$ 는 두 유로사이의 열전달량을 나타내고, 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$Q_i = \varepsilon C_{min}(T_{high}[i-1] - T_{low}[i]) \quad (5)$$

여기서  $\varepsilon$ 은 열교환기의 유용도,  $C_{min}$ 은 고압 및 저압 가스유동 중 작은 열용량을 나타낸다.

열교환기의 유용도는 대향류동의 유용도-NTU(6)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NTU(1 - C_r)]} \quad (6)$$

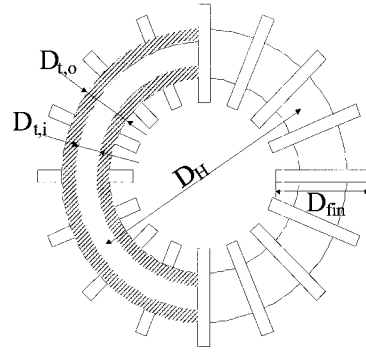


Fig. 2. Cross-sectional view of a heat exchanger.

$$NTU = UA/C_{min} \quad (7)$$

여기서  $C_r$ 은 열교환기 두 유동의 열용량비를 나타내고  $U$ 는 총합열전달계수,  $A$ 는 열전달면적을 나타낸다.  $UA$ 는 고압 및 저압가스의 열전달계수와 열교환기 튜브의 열전도에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$UA = \frac{1}{1/h_{tc,high}A_{high} + \ln(D_{t,o}/D_{t,i})/2\pi k_f L_t + 1/\eta h_{tc,low}A_{low}} \quad (8)$$

여기서  $h_{tc}$ 는 열전달계수를  $\eta$ 는 핀효율을 나타내며, 고압가스 및 저압가스의 열전달계수는 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다[5].

$$\frac{h_{tc,high}D_{t,i}}{k_{high}} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(1 + 3.5 \frac{D_{t,i}}{D_H}\right) \quad (9)$$

$$\frac{h_{tc,low}D_{low}}{k_{low}} = 0.26 Re^{0.6} Pr^{1/3} \quad (10)$$

열교환기  $i$  요소의 압력강하는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dP_{high}}{dx} = -\frac{f_{high}}{2D_{t,i}} \rho U^2 - \frac{d\rho U^2}{dx} \quad (11)$$

$$\frac{dP_{low}}{dx} = \frac{f_{low}}{2} \rho U^2 + \frac{d\rho U^2}{dx} \quad (12)$$

여기서  $U$ 는 가스의 속도  $x$ 는 열교환기의 길이 방향,  $f$ 는 마찰계수를 나타내며, 고압 및 저압가스의 마찰계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$f_{high} = 0.184/Re^{0.2} \left(1 + 3.5 \frac{D_{t,i}}{D_H}\right) \quad (13)$$

$$f_{low} = \left(0.088 + 0.16X_L(X_T - 1)^{-n}\right) 2/Re^{0.15} \quad (14)$$

$$n = 0.43 + 1.13/X_L \quad (15)$$

여기서  $X_T$ 는 무차원화된 열교환기 길이방향 피치,  $X_L$ 은 무차원화된 열교환기 반경방향 피치를 나타낸다.

열교환기 각 요소에 대해 식 (1) ~ (15)를 풀기 위해서는 고압가스 및 저압가스의 밀도, 점성계수 등의 물성이 요구되어 진다. 본 연구에서는 REFPROP [8]을 사용하여 각각의 위치에서의 가스 물성을 구하였다.

### 2.2. 해석조건

Table 1. Dimensions of a heat exchanger.

Parameters	Value
Diameter of helix	4.070 mm
Inner diameter of tube	0.300 mm
Outer diameter of tube	0.500 mm
Pitch of tube	0.950 mm
Number of turn of tube	42
Height of fin	0.200 mm
Pitch of fin	0.132 mm
Thickness of fin	0.080 mm
Number of fin per revolution of tube	55

해석은 직경 5 mm, 길이 38 mm인 적외선센서 냉각용 소형 줄토크냉동기의 열교환기에 대해 수행하였으며, 열교환기의 기하학적 변수들은 Table 1에 나타내었다.

적외선 검출기 냉각용 줄토크냉동기의 작동가스는 질소 또는 아르곤가스가 많이 사용되어 지고 있으며, 아르곤 가스는 질소에 비해 냉각온도는 약 10 K 더 높으나 빠른 냉각시간과 높은 냉동능력으로 인해 급속 냉각을 요구하는 유도무기 냉각 등에 많이 사용되어 지고 있다.

본 연구에서는 적외선 검출기 냉각에 많이 사용되어 지는 질소 및 아르곤 가스의 공급압력이 열교환기 및 줄토크냉동기에 미치는 영향을 고찰하기 위해 고압용기의 체적이 커 공급압력이 일정하게 유지되는 경우, 공급압력 5 ~ 50 MPa에 대해 수행하였으며, 공급가스의 온도는 300 K로 일정한 것으로 가정하였다. 또한 저압가스의 출구 압력은 대기압으로, 증발기 출구의 가스상태는 포화증기 상태로 가정하였다.

2.3. 해석결과 및 고찰

Fig. 3은 질소가스의 공급압력 변화에 따른 열교환기의 UA값을 나타내고 있다. UA값은 동일한 공급압력에서 가스유량이 큰 경우 큰 값을 나타내나, 일정한 가스유량에서 UA는 공급압력이 변화하는 경우에도 큰 변화가 발생하지 않는 것으로 나타나 저압, 저온가스의 열전달 특성이 총합열전달계수에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

이는 저압가스의 경우 동일한 가스유량에서 팽창 후 저압유로의 압력의 큰 변화가 발생하지 않고, 증발기의 온도 역시 80K 부근으로 유사하기 때문에 열전달 계수의 큰 변화가 발생하지 않기 때문이다.

Fig. 4는 질소가스의 공급압력 변화에 따른 열교환기의 유용도를 나타내고 있다.

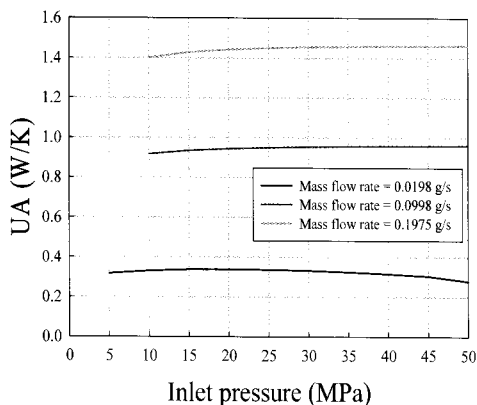


Fig. 3. UA with varing pressure of nitrogen gas.

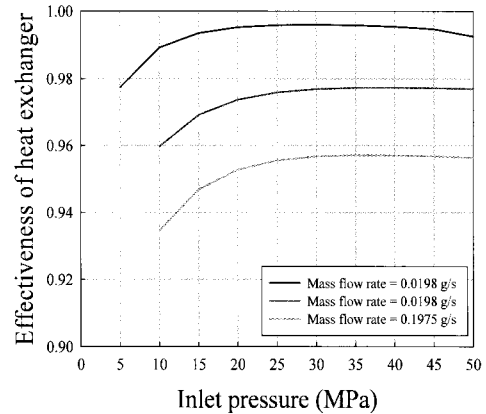


Fig. 4. Effectiveness of a heat exchanger with varing pressure of nitrogen gas.

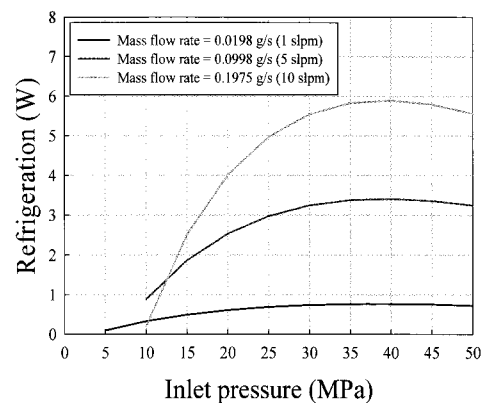


Fig. 5. Cooling capacity of a refrigerator with varing pressure of nitrogen gas.

열교환기의 유용도는 공급압력이 증가하면서 점차 증가하여 최대값을 나타내었으며, 가스유량이 증가하는 경우 유용도는 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 유용도의 감소는 열교환기를 통과하는 가스유량의 증가에 비해 UA의 증가폭이 작기 때문에 가스유량이 큰 경우 식 (7)의 NTU가 감소하기 때문이다. 열교환기의 유용도의 감소는 열교환기 고압가스의 팽창 전 온도의 상승을 유발하고 이는 증발기에서 팽창 후 가스의 건도를 증가시키게 되어, 가스유량당 냉동능력의 감소가 유발된다.

Fig. 5는 질소가스 줄토크냉동기의 냉동능력을 나타낸다. 질소의 경우 이상적인 열교환기에서는 약 40MPa의 공급압력에서 최대의 냉동능력이 나타나며, 해석결과도 이와 잘 일치하며, 높은 공급압력의 경우 가스유량의 증가에 의해 냉동능력의 증가가 발생하는 것으로 나타났다. 이때 냉동능력의 증가는 유량의 증가에 선형적으로 비례하여 증가하지는 않았는데 이는 열교환기의 유용도 감소로 인해 유발되었다.

한편 해석결과 본 연구에서의 줄토크냉동기의 최대 냉동능력은 가스유량 10 slpm (0.1975 g/s)에서 약 6 W로 나타났다.

Fig. 6 및 7은 질소가스의 공급압력 40 MPa인 경우 열교환기 내부의 고압가스 및 저압가스의 온도 및 압력 변화를 나타낸다.

Fig. 6의 온도분포는 가스유량이 작은 경우 더 비선형적으로 분포하고 열교환기에서 고압가스와 저압가스의 온도차가 작게 발생하였다. 또한 가스유량이 작은 경우 열교환기로 유입되는 고압가스와 배출되는 저압가스의 온도차는 작게 나타나고, 팽창 전 열교환기

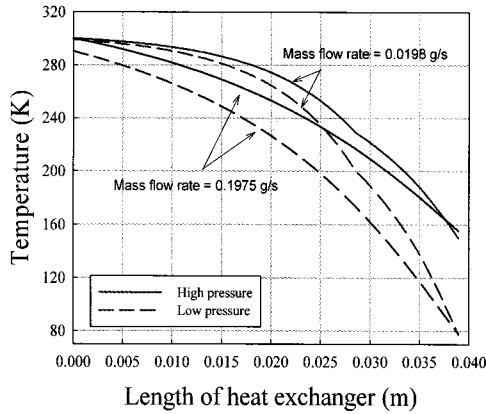


Fig. 6. Temperature variation of high and low pressure gas along the heat exchanger with N2 gas.

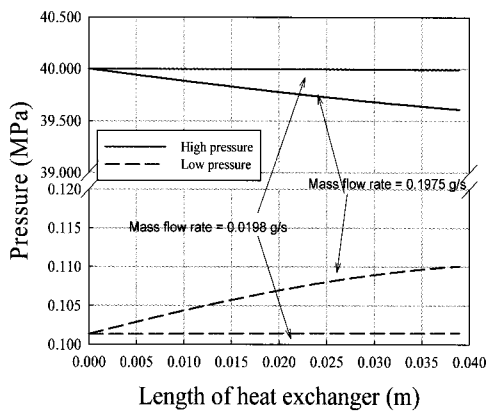


Fig. 7. Pressure variation of high and low pressure gas along the heat exchanger with N2 gas.

끝단의 고압가스 온도는 더 높게 나타났다. 이는 가스 유량 증가로 인한 열교환기의 유용도의 감소로 인해 유발된다. 또한 작은 질량유량에서의 저압가스의 비선형적인 온도구배는 저압가스와 접촉하고 있는 저온용기의 온도구배에도 영향을 미쳐 저온용기의 냉각부를 감소시키는 결과를 나타낼 것으로 판단된다.

이와 같은 냉각부의 감소는 저온용기의 열질량 (thermal mass)의 감소를 유발할 것으로 예측되어 유량자동조절형 줄토크냉동기의 냉각완료 시점에서의 유량제어(감소)에도 냉각소요시간의 증가를 억제하는 요인으로 작용하는 것으로 판단된다.

한편 열교환기 내부의 고압가스와 저압가스의 압력의 변화는 1 slpm의 가스유량의 경우 거의 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 10 slpm의 가스유량의 경우 고압가스의 경우 약 1%, 저압가스의 경우 약 10%의 압력손실이 발생하는 것으로 나타났다. 저압가스의 압력손실의 증가는 증발기의 냉각온도(포화온도)의 상승을 유발하나, 해석결과의 압력손실은 1 K 미만 포화온도의 상승을 유발하는 것으로 나타나, 해석영역의 가스유량에 대해서는 열교환기의 저압가스의 압력손실은 냉동기의 성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 아르곤 가스의 경우 줄토크냉동기의 냉동능력을 나타내고 있다. 해석은 가스유량이 질소의 경우와 동일한 1 (0.0282 g/s), 5, 10 slpm에 대해 수행하였다. 해석결과 아르곤 가스의 경우에는 해석압력영역에서 공급압력이 증가하면 지속적으로 냉동능력이 증가하는 것으로 나타났다.

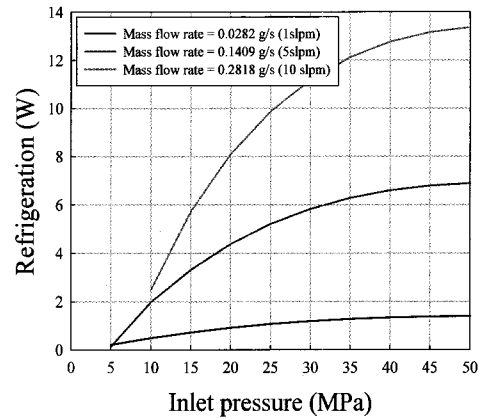


Fig. 8. Cooling capacity of a refrigerator with varying pressure of the argon gas.

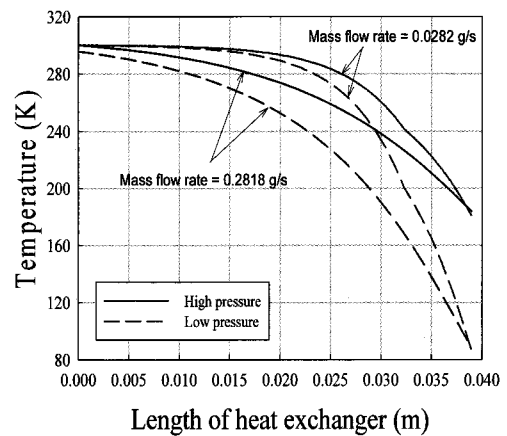


Fig. 9. Temperature variation of high and low pressure gas along the heat exchanger with the argon gas.

이는 아르곤의 경우 이상적인 열교환기를 가진 줄토크냉동기의 냉동능력의 최대값이 50 MPa 이상에서 발생하기 때문이다.

해석결과 아르곤을 작동유체로 하는 냉동기의 냉동능력은 질소의 경우에 비해 질량유량의 차이보다 더 큰 냉동능력의 증가가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 아르곤의 경우 동일한 공급압력에서 단위질량유량당 냉동능력이 더 크기 때문이다.

Fig. 9는 아르곤 가스의 공급압력 40 MPa인 경우 열교환기 내부의 고압가스 및 저압가스의 온도분포를 나타낸다.

해석결과 아르곤 가스를 사용하는 줄토크냉동기의 온도분포는 Fig. 6의 질소가스에 비해 동일한 체적유량에서 더 큰 비선형성을 나타내었으며 유량의 증가에 대해 팽창 전 고압가스의 온도 상승이 작게 발생하며, 저압가스 출구의 온도 역시 고압가스 입구온도와의 차이가 작게 발생하는 것으로 나타났다.

한편 열교환기의 저압가스에서 발생하는 압력손실로 인해 10 slpm의 가스유량의 경우 증발기의 포화온도가 약 88.5 K로 나타나, 압력손실이 1 K 이상의 온도상승을 유발하는 것으로 나타났고 동일한 체적유량의 질소가스의 경우 보다 더 큰 포화온도의 상승이 발생하는 것으로 나타났다.

따라서 줄토크냉동기에서 열교환기를 통과하는 가스 유량이 큰 경우에는 열교환기에서 발생하는 압력강하

를 고려하여 최적의 열교환기를 설계하여야 할 것으로 판단된다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 적외선 검출기 냉각용으로 많이 사용되고 있는 줄톰슨냉동기의 작동유체인 질소 및 아르곤 가스의 압력변화에 따른 열교환기의 성능 및 최대냉각 성능을 구하기 위해 수치해석을 수행하였다.

해석결과 열교환기의 열전달특성은 저압가스의 열전달계수에 의해 지배적인 영향을 받으며, 열교환기의 유용도는 열교환기의 온도구배에 영향을 미치며, 작은 가스유량에서 비선형적인 온도분포가 발생하는 것으로 나타났다. 아르곤 가스의 경우 질소 가스에 비해 큰 냉동능력을 나타내며 질소가스의 경우보다 열교환기의 온도구배가 더 비선형적으로 발생하였다.

줄톰슨냉동기의 공급가스압력 및 가스유량이 증가함에 따라 줄톰슨냉동기의 냉동능력이 증가하는 것으로 나타났다.

또한 가스유량의 증가는 증발기에서의 포화온도 상승을 유발하며, 아르곤가스가 질소가스에 비해 동일한 체적유량에서 더 큰 포화온도의 상승을 유발하는 것으로 나타났다.

### 참 고 문 헌

- [1] G. Walker, "Miniature Refrigerator for Cryogenic Sensors and Cold Electronics", Clarendon Press, Oxford, 1989.
- [2] K. Fredrickson, G. Nelis and S. Klein, "A design method for mixed gas Joule-Thomson refrigeration cryosurgical probes", Int. J. of Refrigeration, Vol. 29, pp. 700 - 715, 2006.
- [3] H. Xue, K. C. Ng, J. B. Wang, "Performance evaluation of the recuperative heat exchanger in a miniature Joule-Thomson cooler", Applied Thermal Engineering, Vol. 21, pp. 1829-1844, 2001.
- [4] B. Z. Maytal, "Maximizing production rates of the Linde-Hampson machine", Cryogenics, Vol. 46, pp. 49-54, 2006.
- [5] J. S. Buller, "A Miniature Self Regulating Rapid-Cooling Joule-Thomson Cryostat", Advances of Cryogenic Engineering, Vol. 16, 205 - 213, 1971.

- [6] K. D. Hagen, "Heat Transfer Applications", Prentice Hall Int., Inc., New Jersey, 1999.
- [7] K. D. Timmerhaus, T. M. Flynn, Cryogenic Process Engineering, Plenum Press, New York, 1989.
- [8] E. W. Lemmon, M. O. McLinden, M. L. Huber, NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, NIST, Boulder, 2002.

### 저 자 소 개



홍용주(洪溶柱)

1968년 03월 19일생, 1990년 고려대 공대 기계공학과 졸업, 1992년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 기계공학과 박사과정, 현재 한국기계연구원 선임연구원.



박성제(朴聖濟)

1962년 12월 13일생, 1985년 부산대 공대 기계공학과 졸업, 1988년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국기계연구원 책임연구원.



김효봉(金孝峰)

1960년 04월 10일생, 2000년 대전산업대 공대 기계공학과 졸업, 2003년 충남대 공대 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 한국기계연구원 선임기술원.



최영돈(崔英敦)

1950년 05월 30일생, 1973년 서울대 공대 기계공학과 졸업, 1975년 KAIST 기계공학과 졸업(공학석사), 1979년 KAIST 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 고려대학교 기계공학과 교수.