

# 운전조건 변화에 따른 혼합냉매 Joule-Thomson 냉동기의 성능특성 Performance Characteristics of Mixed Refrigerant Joule-Thomson Refrigerator with Respect to Operating Conditions

박상찬\* · 박성수\* · 윤정인\* · 설성훈\* · 손창효\* · 윤지훈\*\*

Sang-Chan Park\*, Sung-Soo Park\*, Jung-In Yoon\*, Sung-Hoon Seol\*,  
Chang-Hyo Son\* and Ji-Hoon Yoon\*\*

(Received 1 January 2022, Revision received 14 February 2022, Accepted 14 February 2022)

**Abstract** : Joule-Thomson refrigerators have the advantages of simple structure and no moving component at the cold part, which should result in high reliability. Change in refrigeration capacity were investigated by varying the compressor discharge pressure, evaporator inlet pressure, and aftercooler outlet temperature to analyze the influence of operating conditions on the performance of Joule-Thomson refrigerators. The results show that a refrigeration capacity was significantly affected by compressor discharge pressure, evaporator inlet pressure, and aftercooler outlet temperature. Furthermore, the aftercooler outlet temperature has the greatest influence on refrigeration capacity.

**Key Words** : Mixed refrigerant (MR), Operating conditions, Joule-Thomson refrigerator, Hysys

## — 기 호 설 명 —

Q : 열량 [kJ]

P : 압력 [kPa]

h : 비엔탈피 [kJ/kg]

IHX : 내부열교환기

\*† 윤지훈(ORCID:<http://orcid.org/0000-0003-3610-6344>) : 대학원생, 부경대학교 냉동공조공학과

E-mail : neverzksch@naver.com, Tel : 051-629-6180

\*박상찬(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-6153-9793>), \*박성수(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-5318-5649>) : 대학원생, 부경대학교 냉동공조공학과

\*윤정인(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-1099-3435>) : 교수, 부경대학교 냉동공조공학과

\*설성훈(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-9724-9707>) : 조교수, 부경대학교 냉동공조공학과

\*손창효(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2143-0515>) : 부교수, 부경대학교 냉동공조공학과

\*† Ji-Hoon Yoon(ORCID:<http://orcid.org/0000-0003-3610-6344>) : Graduate student, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

E-mail : neverzksch@naver.com, Tel : 051-629-6180

\*Sang-Chan Park(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-6153-9793>), \*Sung-Soo Park(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-5318-5649>) : Graduate student, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

\*Jung-In Yoon(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-1099-3435>) : Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

\*Sung-Hoon Seol(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-9724-9707>) : Assistant Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

\*Chang-Hyo Son(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2143-0515>) : Associate Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

## 하첨자

- E : 증발기
- C : 애프터쿨러(응축기)

## 1. 서 론

Joule-Thomson 냉동기(혹은 Linde-Hampson 냉동기)는 고압의 기체가 오리피스나 모세관 등 좁은 유로를 통과하면서 팽창할 때 생기는 Joule-Thomson 효과를 이용해 낮은 온도를 얻는 냉동기이다. Joule-Thomson은 구조가 간단하여 제작 비용이 타 극저온 냉동기에 비해 낮고 저온부에서 기계적인 진동이나 마찰을 일으키는 요소가 없어서 높은 신뢰성을 가지고 있다는 장점이 있다.<sup>1,2)</sup> 혼합냉매(Mixed Refrigerant, MR)를 사용한 Joule-Thomson 냉동기는 냉매의 종류와 조성비에 따라 넓은 증발온도 범위를 가질 수 있기 때문에 가스의 액화, 반도체 공정, 식품의 급속동결 등 다양한 저온분야에 적용되어져 왔으며,<sup>3,4)</sup> 최근 들어 백신의 저온보관, 반도체 공정을 위해서 -60℃ 이하의 온도에 대한 수요가 증가하고 있는 상황이다.<sup>5,6)</sup>

한편, 혼합냉매를 사용한 Joule-Thomson 냉동기의 최적화에 대한 다양한 연구가 수행되었다. Lee et al.<sup>7)</sup>은 반도체 공정 냉각을 목적으로 하는 Joule-Thomson 냉동기에서 R-600a, R-23, R-14를 혼합한 3성분 혼합냉매를 사용해 조성비 변화에 따른 실험을 진행하였으며, 추가로 가연성 냉매인 R-600a 대신 비가연성 냉매인 R-134a, R-245fa를 적용한 경우와 비교하였다. T. Bai et al.<sup>8)</sup>은 -60℃의 냉장고 고내 온도를 목표로 R-170과 R-290을 혼합한 2성분 혼합냉매를 사용한 냉동기에서 냉매의 조성비가 정상상태 도달 시간, 작동 압력, 온도에 미치는 영향을 비교하였다. Choi et al.<sup>9)</sup>은 -100℃의 증발기 출구 온도를 목표로 하는 반도체 공정 냉각용 Joule-Thomson 냉동기에서 R-134a, R-404A, R-116, R-23, R-14를 혼합한 5성분 혼합냉매를 적용했을 때 운전압력에 따른 열역학 2법칙

효율을 분석하였다. Sunil과 G. Venkatarathnam<sup>10)</sup>은 R-14와 탄화수소를 혼합한 MR Joule-Thomson 냉동기에서 -120℃에서 -60℃ 사이의 증발온도를 대상으로 운전압력과 조성비를 이론적으로 최적화하였다.

종래 연구들은 목표 온도에 도달하기 위한 혼합냉매의 선정이나 이론 및 실험적 방법을 통해 혼합냉매의 조성비를 최적화하는 연구가 주를 이루었으며, 사이클의 운전조건이 성능에 미치는 영향에 대해 조사한 연구는 비교적 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 반도체 공정 냉각용으로 -70℃의 증발기 입구 온도를 목표로 하는 Joule-Thomson 냉동기를 대상으로 토출 압력, 증발기 입구 압력, 애프터쿨러 출구 온도의 변화가 냉동능력에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 시뮬레이션 방법 및 조건

### 2.1 MR Joule-Thomson 사이클

Fig. 1은 혼합냉매를 사용한 Joule-Thomson 사이클의 개략도를 나타내고 있다. 일반적인 증기 압축식 냉동시스템과 유사하며 증발기에서 나오는 저온의 냉매와 애프터쿨러 출구에서 나오는 고온의 냉매가 상호 열교환할 수 있는 내부 열교환기가 설치되어 있다는 차이가 있다. 또한 일반적인 증기압축식 냉동기에서는 응축기에서 냉매가 완전히 응축되지만 Joule-Thomson 사이클에서는 애프터쿨러가 과열된 냉매의 온도를 상온 수준까지 내리는 역할만 수행하기 때문에 응축기가 아닌 애프터쿨러로 칭하며 내부열교환기에서 대부분의 응축이 일어나게 된다.<sup>3)</sup>

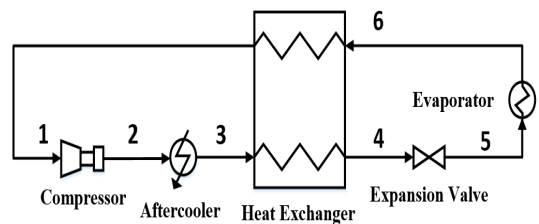


Fig. 1 Schematic diagram of Joule-Thomson cycle

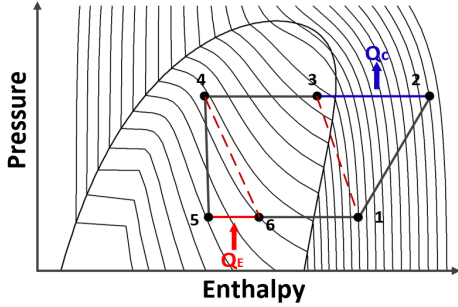


Fig. 2 P-h diagram of MR Joule-Thomson cycle

Fig. 2는 혼합냉매를 사용한 Joule-Thomson 사이클의 P-h 선도를 나타내고 있다. 단일냉매를 사용한 냉동사이클과는 다르게 습증기 영역에서 등온선이 수평선이 아닌 기울기를 가진다. 이는 비점이 다른 냉매를 섞은 비공비 혼합냉매이기 때문에 습증기 영역에서 한 냉매가 상변화 하는 동안 다른 냉매의 온도가 변하면서 전체 냉매의 평균온도가 변화하기 때문이다. 일반적인 증기 압축식 냉동사이클에서 응축기 출구로 나오는 냉매의 온도는 상온 수준이지만 혼합냉매를 사용한 Joule-Thomson 사이클은 애프터쿨러 출구에서 나온 상온 수준의 냉매가 내부 열교환기를 통해 열교환하면서 더 낮은 온도를 가지게 된다. 그 결과, 팽창밸브 입구 온도가 감소하게 되면서 일반적인 증기 압축식 냉동시스템보다 더 낮은 증발온도를 얻을 수 있게 된다. 애프터쿨러 출구에서 나온 고온 스트림과 증발기 출구에서 나오는 저온 스트림이 상호 열교환하기 때문에 P-h 선도에서 3번과 4번의 엔탈피 차이와 1번과 6번의 엔탈피 차이는 이론적으로 같은 값을 갖게 된다.

## 2.2 시뮬레이션 조건

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 시뮬레이션 사이클을 나타내고 있으며, Table 1은 시뮬레이션 조건을 나타내고 있다. 냉매는 사용처를 고려해 비가연성인 R-134a(표준비점:  $-26.3^{\circ}\text{C}$ ), R-23(표준비점:  $-82.1^{\circ}\text{C}$ ), R-14(표준비점:  $-127.8^{\circ}\text{C}$ )를 혼합한 3 성분 혼합냉매를 사용하였다. 사이클은 압축기, 애프터쿨러, 내부 열교환기(Intermediate Heat Exchanger, IHX), 팽창밸브, 증발기로 구성되어 있

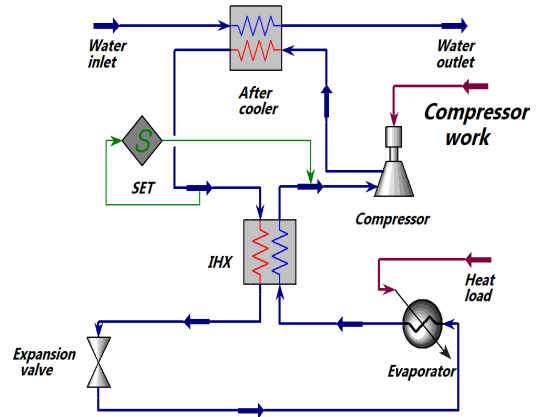


Fig. 3 Schematic diagram simulation

Table 1 Simulation condition

Parameter	Value	Unit
Aftercooler outlet temperature	18~27	$^{\circ}\text{C}$
Evaporator inlet temperature	-70	$^{\circ}\text{C}$
Compressor work	2.2	kW
Compressor discharge pressure	1,000~2,000	kPa
Evaporator inlet pressure	250~500	kPa
Heat exchanger pressure drop	30	kPa

으며, 시뮬레이션은 Aspen사의 Hysys<sup>11)</sup>를 이용하였다. 증발기 입구 온도는  $-70^{\circ}\text{C}$ 로 고정하였으며, 압축기의 축동력은 2.2 kW로 설정하였다. 작동 압력이 변화하게 되면 압축기의 축동력과 냉동능력이 모두 영향을 받지만 냉동능력의 변화가 COP에 더 큰 영향을 미치기 때문에 본 연구에서는 압축기 동력을 고정하였다.<sup>12)</sup> 모든 열교환기에서의 압력강하는 30 kPa로 설정하였다. 압축기의 흡입온도는 내부 열교환기의 효율을 감안하여 애프터쿨러 출구 온도보다  $2^{\circ}\text{C}$  낮은 온도로 설정하였다. 본 연구에서는 운전조건이 사이클의 성능에 미치는 영향에 대해 분석하기 위해 사이클의 압축기 토출 압력, 증발기 입구 압력, 애프터쿨러 출구 온도를 변화시켰을 때 사이클의 냉동능력 변화를 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 압축기 토출 압력의 영향

Fig. 4는 사이클의 증발기 입구 압력이 고정됐을 때 압축기 토출 압력 변화에 따른 냉동능력의 변화를 나타내고 있다. 증발기 입구 압력은 열교환기에서의 압력강하를 감안하여 압축기의 흡입 압력이 대기압 이하가 되지 않도록 250 kPa로 고정하였다. 압축기 토출 압력은 일반적인 압축비와 토출 가스의 온도를 고려하여 1,000 kPa에서 2,000 kPa로 설정하였다.

압축기 토출 압력이 상승하면 냉동능력은 선형적으로 증가하다가 특정한 압축기 토출 압력에서부터 냉동능력이 급격하게 상승하는 경향을 보였다. 냉동능력이 증가하는 이유는 중간열교환기에서 열교환량이 감소하기 때문으로 판단된다.

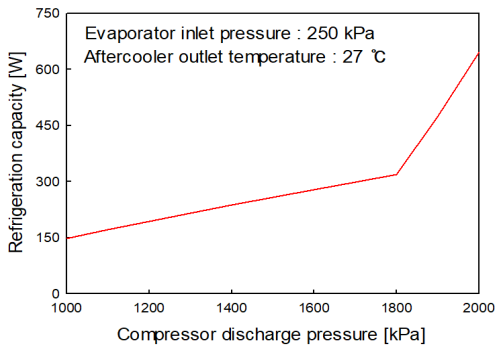


Fig. 4 Influence of compressor discharge pressure

Fig. 5에서 나타나듯 애프터쿨러 출구 온도가 고정된 상태에서 압축기 토출 압력이 상승하면 애프터쿨러 출구의 상태점(3번)이 등온선을 따라 이동하게 된다. 증발기 입구의 상태가 고정되어 있기 때문에 토출 압력이 상승하여도 팽창밸브 입구의 엔탈피는 고정된 상태이다. 따라서 내부 열교환기에서 엔탈피차(3번과 4번지점의 엔탈피차)가 감소하게 된다. 증발기 입구의 상태(5번)와 압축기 입구의 상태(1번)가 고정되어 있기 때문에 5번과 1번의 엔탈피차는 토출 압력이 상승하여도 동일하다. 따라서 토출 압력이 상승하면서 내부 열교환기에서 엔탈피차가 감소한 만큼 증발기에서 냉동효과가 증가하기 때문으로 판단되며, 이는 토출 압력이 변화할 때 고온 스트림에서 내부 열교환기의 입출구 엔탈피차를 나타내는 Fig. 6에서 확인할 수 있다.

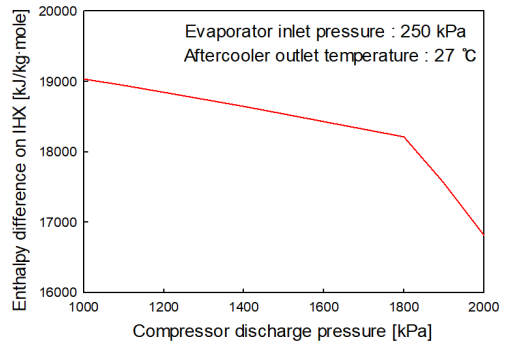


Fig. 6 Enthalpy difference on IHX according to change of compressor discharge pressure

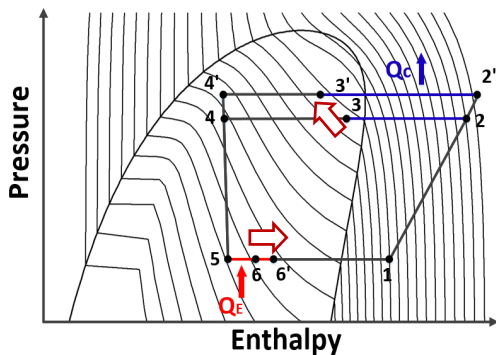


Fig. 5 P-h diagram according to change of compressor discharge pressure

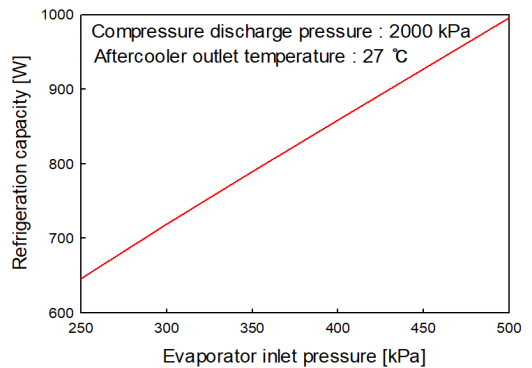


Fig. 7 Influence of evaporator inlet pressure

특정한 토출 압력에서 냉동능력이 급격하게 상승하는 이유는 증발기 내부의 냉매의 상태에 기인한 것으로 판단된다. 증발기 입구 상태(250 kPa, -70℃)에서 각 냉매의 비점은 -4.3℃(R-134a), -64.8℃(R-23), -113.79℃(R-14)이다. 즉 증발기 내에서 R-134a와 R-23은 액 상태, R-14는 기체 상태로 존재한다. 압축기 토출 압력이 상승하면서 증발기에서 흡수하는 열량이 증가하게 되고 그 결과, 과냉액 상태였던 R-23이 비등을 시작하기 때문에 냉동효과가 크게 상승한다고 사료된다.

압축기 토출 압력을 상승시키면 냉동능력의 증가를 얻을 수 있지만 높은 토출 가스 온도는 오일의 탄화를 야기할 수 있다. 따라서 적절한 토출 가스 온도의 범위에서 압축기의 토출 압력을 높게 유지하는 것이 냉동능력 측면에서 우수하다고 판단된다.

### 3.2 증발기 입구 압력의 영향

Fig. 7은 압축기 토출 압력을 2,000 kPa로 고정하고 증발기 입구 압력을 일반적인 압축비를 고려하여 250 kPa에서 500 kPa까지 증가시켰을 때 냉동능력의 변화를 나타내고 있다. 냉동능력은 증발기 입구 압력이 상승할수록 증가하는 경향을 보이는데, 이는 압축기의 흡입압력이 증가하면서 냉매가스의 비체적이 감소하여 냉매 순환량이 늘어나기 때문으로 판단된다.

증발기 입구 압력을 상승시키면 냉동능력의 증대를 얻을 수 있으나 증발기 입구 온도에 영향을 주게 된다. Fig. 8은 사이클의 고압에 해당하는 2,000 kPa과 저압에 해당하는 250 kPa에 대한 등압선을 나타낸 T-h 선도이며 Fig. 9는 사이클의 고압이 2,000 kPa, 저압이 500 kPa일 때 T-h 선도를 나타내고 있다. 팽창밸브에서 일어나는 Joule-Thomson 팽창은 등엔탈피 과정이기 때문에 T-h 선도 상에서 같은 엔탈피일 때 고압의 등압선과 저압의 등압선 사이의 온도 차이가 Joule-Thomson 팽창을 통해 얻을 수 있는 이론적 온도 강하로 생각할 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9에 원형으로 표시된 부분처럼 두 등압선이 만나게 되면 더 이상 Joule-Thomson 팽창을 통해 온도 강하를 얻을 수 없

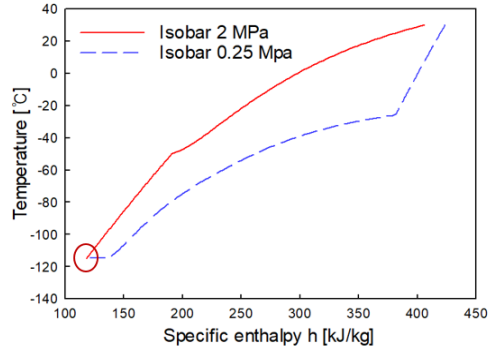


Fig. 8 T-h diagram on low suction pressure

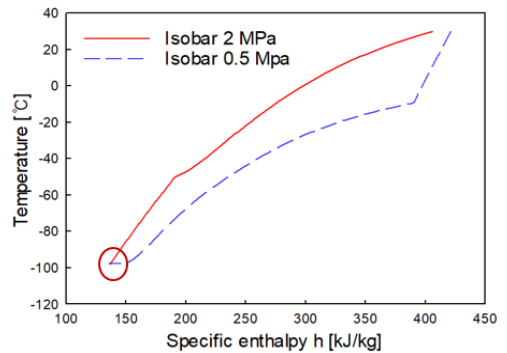


Fig. 9 T-h diagram on high suction pressure

게 되며, 이 상황에서의 온도가 사이클이 이론적으로 도달할 수 있는 가장 낮은 온도라 할 수 있다. 증발기 입구 압력을 상승시키면 냉동능력은 증가하지만 증발기 입구의 도달 온도에는 악영향을 미치게 된다. 따라서 목표로 하는 증발온도를 얻을 수 있도록 적절한 증발기 입구 압력을 선정하는 것이 중요하다고 사료된다.

### 3.3 애프터쿨러 출구 온도의 영향

Fig. 10은 압축기 토출 압력을 2,000 kPa, 증발기 입구 압력을 250 kPa로 고정했을 때 애프터쿨러의 출구 온도 변화에 따른 냉동능력의 변화를 나타내고 있다. 애프터쿨러 출구 온도는 냉각매체가 물인 경우와 공기인 경우를 가정하여 18℃에서 27℃ 범위에서 변화시켰다. 애프터쿨러 출구 온도가 감소하면 냉동능력이 크게 상승하는 모습을 볼 수 있다. 이는 팽창밸브 입구의 상태가 고

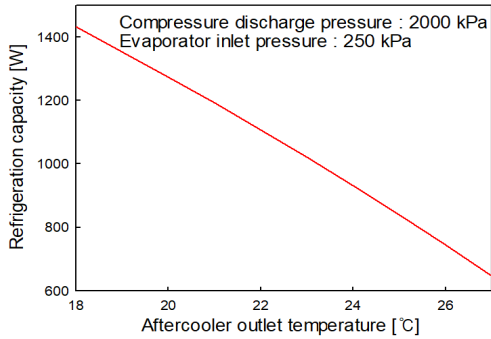


Fig. 10 Influence of aftercooler outlet temperature

정된 상황에서 애프터쿨러 출구 온도가 감소하게 되면 애프터쿨러에서 방열하는 열량이 증가하면서 중간 열교환기에서 열교환량이 감소하기 때문에 증발기에서 냉동효과가 증가하는 것으로 판단된다. 사이클의 압력을 변화시킨 경우보다 애프터쿨러 출구 온도를 감소시켰을 냉동능력이 가장 크게 증가하였다. 따라서 애프터쿨러 출구 온도가 사이클의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 인자라고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 R-134a, R-23, R-14를 혼합한 3 성분 MR Joule-Thomson 냉동기에서 압축기 토출 압력, 증발기 입구 압력, 애프터쿨러 출구 온도가 냉동능력에 미치는 영향에 대해 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 증발기 입구 압력을 고정한 상태에서 압축기 토출압력을 상승시키면 냉동능력은 선형적으로 증가하다가 특정한 압력에서 급격하게 상승하는 모습을 보였다. 이는 내부 열교환기에서 열교환량이 감소하기 때문으로 판단된다. 적정한 압축기 토출 온도를 유지하는 선에서 압축기 토출압력을 상승시키는 것이 냉동능력 측면에서 더 유리하다고 사료된다.

2) 압축기 토출압력을 고정한 상태에서 증발기 입구 압력을 상승시키면 냉동능력은 증가하는 경향을 보였으나 증발기 입구 도달 온도에는 악영향을 미치는 것으로 판단된다.

3) 증발기 입구 압력과 압축기 토출 압력을 고정한 상태에서 애프터쿨러 출구 온도를 감소시키면 냉동능력은 증가하는 경향을 보였다.

4) 운전압력과 애프터쿨러 출구 온도는 사이클의 성능에 큰 영향을 주는 인자였으며, 특히 애프터쿨러 출구 온도는 냉동능력에 가장 큰 영향을 미치는 인자였다.

#### 후 기

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. C-D-2021-0118).

#### Author contributions

S. C. Park; Conceptualization, Writing-original draft. S. S. Park; Data curation, Software, J. I. Yoon; Investigation, Project administration. S. H. Seol; Visualization, Writing-review & editing. C. H. Son; Methodology, Investigation. J. H. Yoon; Supervision, Investigation.

#### References

1. Ray Radebaugh, 2003, "Cryocoolers and High-T<sub>c</sub> Devices, Handbook of High-Temperature Superconductor Electronics", Marcel Dekker Inc.
2. G. W. Hwang, S. H. In and S. K. Jeong, 2007, "Joule-Thomson Refrigerator and Mixed Refrigerant", Superconductivity and cryogenics, Vol. 9, No. 1, pp. 26-30.
3. G. Venkatarathnam, 2008, "Cryogenic mixed refrigerant processes", Springer.
4. J. I. Yoon, C. H. Son, S. H. Seol and J. H. Yoon, 2021, "Ultra-Low Temperature Chillers for Semiconductor Manufacturing Process", Advancements Towards Sustainability of HVAC & R Systems, IntechOpen. (DOI:10.5772/intechopen.98547)

5. J. Sun, M. Zhang, A. Gehl, B. Fricke, K. Nawaz, K. Gluesenkamp, B. Shen, J. Munk, J. Hagerman and M. Lapsa, 2022, "Covid 19 vaccine distribution solution to the last mile challenge: Experimental and simulation studies of ultra-low temperature refrigeration system", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 133, pp. 313-325. (<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.11.005>)
6. K. S. Lee, 2019, "Performance Characteristics of Ultra Low Temperature Mixed Refrigerant Joule-Thomson Chiller on Composition of Mixed Refrigerant", MS thesis, Pukyong National University, Busan, Korea.
7. K. S. Lee, J. I. Yoon, C. H. Son, J. H. Lee, C. G. Moon, W. J. Yoo and B. C. Lee, 2021, "Performance Characteristics of a Joule-Thomson Refrigeration System with Mixed Refrigerant Composition", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 42, No. 13-14, pp. 1087-1096. (<https://doi.org/10.1080/01457632.2020.1776995>)
8. T. Bai, D. Li, H. Xie, G. Yan and J. Yu, 2021, "Experimental research on a Joule-Thomson refrigeration cycle with mixture R170/R290 for -60°C low-temperature freezer", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 186. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116476>)
9. J. H. Choi, S. S. Park, S. G. Lee, J. H. Yoon, C. H. Son and J. I. Yoon, 2020, "Performance Characteristics of Joule-Thomson Cycle with Non-Flammable 5-component Mixed Refrigerants", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp. 92-97. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.6.092>)
10. Sunil Jerome and G. Venkatarathnam, 2020, "Performance of a Linde-Hampson refrigerator operating from -120°C to -60°C with optimised R14-hydrocarbon mixtures exhibiting vapour-liquid-liquid equilibria", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 56, pp. 1523-1535. (<https://doi.org/10.1007/s00231-019-02801-z>)
11. Aspen HYSYS. Version 12, 2020 Aspen Technology Inc.
12. S. S. Park, S. C. Park, J. H. Yoon, S. H. Seol, C. H. Son and J. I. Yoon, 2021, "Performance Characteristics according to the Change in Operating Pressure of the SMR Refrigerator", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 25, No. 6, pp. 66-70. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2021.25.6.066>)