

SMR(Single Mixed Refrigerant) 냉동기의 작동 압력 변화에 따른 성능 특성

Performance Characteristics according to the Change in Operating Pressure of the SMR Refrigerator

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

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

(Received 29 November 2021, Revision received 15 December 2021, Accepted 16 December 2021)

Abstract : Demand for low temperatures below -60°C is increasing in various places. Accordingly, SMR refrigerators are attracting attention as a way to supply them. we recognized the limitation that the study of SMR refrigerators is focused on selecting the composition ratio of mixed refrigerants. However, operating pressure is also an important factor that greatly affects the performance of the refrigerator. In this study, we attempted to understand the performance characteristics of the refrigerator according to the change in operating pressure. The experiment was conducted by changing the compressor discharge pressure to 15bar and 20bar while the compressor suction pressure was fixed to 2.5bar, and the compressor discharge temperature, power consumption, cooling time, refrigeration capacity, and COP were calculated and compared. As a result of the experiment, it was confirmed that when the compressor discharge pressure was high, the compressor discharge temperature increased due to the increase in the compression ratio, and larger power consumption was required. It was confirmed that the cooling time was faster due to a decrease in the heat exchange amount of the intermediate heat exchanger when the compressor discharge pressure was high. It was confirmed that the refrigeration capacity and COP also increased when the compressor discharge pressure was high.

Key Words : Mixed refrigerant, Operating pressure, SMR Cycle, Refrigerator

****† 윤정인(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1099-3435)

: 정교수, 부경대학교 냉동공조공학과

E-mail : yoonji@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180

*박성수(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5318-5649),

박상찬(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6153-9793) :

대학원생, 부경대학교 냉동공조공학과

**윤지훈(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3610-6344) :

박사과정, 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

****† Jung-In Yoon(ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1099-3435)

: Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

E-mail : yoonji@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180

*Sung-Soo Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5318-5649)

*Sang-Chan Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6153-9793)

: Graduate student, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

**Ji-Hoon Yoon(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3610-6344)

: Doctor course, 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.

1. 서 론

최근 산업, 식품, 의약 등 많은 분야에서 -60°C 이하 저온의 수요가 늘고 있다. 산업 분야에서는 대표적으로 반도체 공정을 예로 들 수 있으며 식각 공정 시 화학 반응으로 인해 발생하는 다량의 열을 처리하기 위해서는 -60°C 이하의 브라인 공급이 필수적이다.¹⁾ 식품 분야에서는 식품 장기 보관 시 신선도 유지를 위해 -60°C 이하의 고내 온도가 필요하며 이를 통해 6개월 이상 식품의 신선도 유지가 가능하다.²⁾ 의약 분야에서는 의약품의 품질 유지를 위해 -60°C 이하의 고내 온도가 필요하며 이의 대표적인 예로 COVID-19 바이러스 백신인 화이자 백신을 들 수 있다.³⁾

이러한 저온의 공급을 위해 기존에는 이원 케이스케이드 냉동기가 주로 사용되었다. 그러나 이원 케이스케이드 냉동기는 사이클이 두 개로 구성되므로 복잡성과 유지보수에 불리함을 수반한다는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 해결할 수 있는 방안으로 SMR(Single Mixed Refrigerant) 냉동기가 주목받고 있다. SMR 냉동기는 1대의 압축기로 -60°C 이하의 저온을 얻을 수 있으며 시스템의 구성이 간단해 소형화가 가능하다는 장점이 있다.⁴⁾

이러한 SMR 냉동기의 성능 특성 파악을 위해 아래와 같은 연구들이 진행된 바 있다.

Lee et al.⁵⁾은 3성분 혼합냉매를 사용해 조성비 변화에 따른 실험을 진행해 증발기 입구 도달 온도, 냉동능력, 응축 압력을 비교하였다.

T. Bai et al.⁶⁾은 줄-톱슨 냉동기에 R170과 R290으로 구성되는 혼합냉매를 사용해 조성비 변화에 따라 -60°C 의 증발기 입구 온도에서 쿨링 타임, 압축기 토출 온도, 압축기 축동력을 비교하는 실험을 진행하였다.

Kim et al.⁷⁾은 -70°C 이하의 증발기 입구 온도에서 운전 가능한 줄-톱슨 냉동기를 개발하고자 하였다. 이를 위해 혼합냉매를 구성하는 단일 냉매의 조성비 변화 실험을 진행하였으며 증발기 입구 온도에 미치는 영향을 분석하였다.

Dorosz et al.⁸⁾은 중간열교환기에서 발생하는 최소 엔탈피 차의 최대화에 중점을 두고 이론적 최

적화를 진행하였다. 이를 통해 선정된 조성비의 이론적 냉동 효과와 실제 실험을 통해 얻은 냉동 효과를 비교하였다.

앞서 확인한 것처럼 SMR 냉동기에 대한 연구는 혼합냉매의 조성비에 중점을 둔 경우가 많았다. 그러나 혼합냉매 조성비뿐만 아니라 작동 압력 역시 냉동기의 성능에 큰 영향을 미치는 요인으로 작용한다. 이에 본 연구에서는 실험을 통해 SMR 냉동기의 압축기 토출 압력 변화에 따른 압축기 토출 온도, 소비 동력, 쿨링 타임, 냉동능력을 비교하고 냉동기의 성능 특성을 파악하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

SMR 냉동기는 Fig. 1과 같은 사이클로 구성되며 실험 장치의 개략도는 Fig. 2와 같다. 실험 장치는 크게 압축기, 팽창탱크, 에프터쿨러, 중간열교환기, 팽창밸브, 증발기로 구성된다. 압축기는 3마력 스크롤 압축기를 사용하였고 파워미터와 연결해 소비 동력을 측정하였다. 증발기는 슬라이드스와 히터를 이용해 부하를 인가하도록 구성하였다. 팽창밸브는 미세한 압력 조절을 위해 니들 밸브를 사용하였다.

압축기 흡입 압력은 시스템 불안정 시 발생할 수 있는 수분과 공기의 유입을 방지하기 위해 2.5 bar(A)로 선정하였고 압축기 토출 압력은 토출 압력 변화에 따른 냉동기의 성능 특성을 확인하기 위해 15 bar(A)와 20 bar(A)로 선정하였다. 냉동기 초기 기동 시 저단 스트림의 급격한 온도 강하로 인해 압축기 토출 압력이 급격하게 떨어지게 되는데 이때마다 압축기 흡입부와 연결된 팽창탱크에서 냉매를 흘려주어 작동 압력을 유지하였다.

에프터쿨러 출구 온도는 상온의 공기로 냉각된다는 가정 하에 27°C 로 선정했으며, 압축기 흡입 온도는 중간열교환기의 유용도에 따라 실제 실험 시 22°C 로 유지되는 모습을 보였다. 압축기 토출 온도는 압축기의 안전장치 가동 조건인 130°C 이하로 운전을 지속하였다. 증발기 입구 온도는 피냉각물을 -60°C 이하로 만들기 위해 -70°C 로 선정

하였다.

냉매는 어는점과 줄-뜸승 팽창계수를 고려해⁹⁾ R134a, R23, R14로 구성된 혼합냉매를 사용하였으며 실험은 모두 동일한 조성비에서 진행되었다.

Table 1 Experimental condition

Parameter		Value	Unit
Aftercooler outlet temperature		27	℃
Compressor suction temperature		22	℃
Compressor discharge temperature		≤130	℃
Compressor suction pressure		2.5	bar(A)
Compressor discharge pressure		15	bar(A)
		20	
Target evaporation temperature		-70	℃
Composition ratio of mixed refrigerant			Unit
R134a	R23	R14	%
50-60	20-30	15-25	

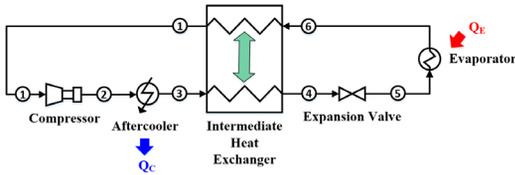


Fig. 1 Schematic diagram of SMR cycle

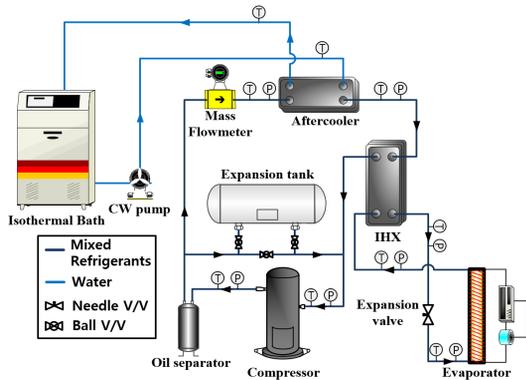


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 토출 압력 변화에 따른 압축기 토출 온도와 소비 동력 비교

압축기 토출 압력 변화에 따른 실험 결과를 Fig. 3, Fig. 4에 나타냈다. -70℃의 증발기 입구 온도에 도달할 때까지 압축기 토출 온도를 비교한 결과 15 bar로 운전 시 90℃, 20 bar로 운전 시 100℃ 부근에서 유지되는 모습을 확인할 수 있었다. 이를 통해 압축기 토출 압력이 높을 때 압축기 토출 온도 역시 높아지는 것을 확인했으며 이는 압축비가 늘어났기에 발생한 현상으로 사료된다.

파워미터를 통해 측정한 압축기 소비 동력은 15 bar로 운전 시에는 2.3 kW, 20 bar로 운전 시에는 3.2 kW가 산출되었다. 이 또한 압축비 상승으로 인해 발생한 차이로 사료된다.

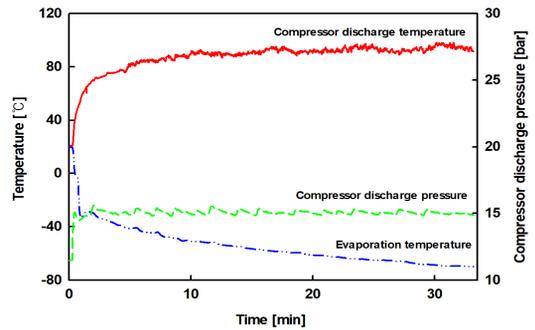


Fig. 3 Compressor discharge temperature up to -70℃ (15 bar)

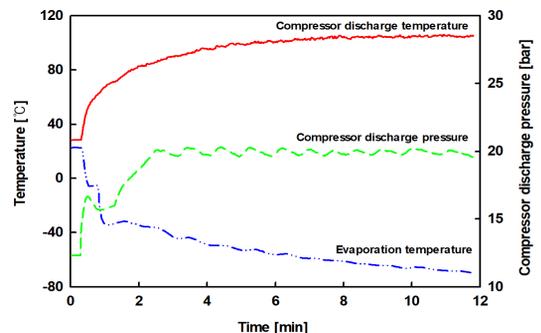


Fig. 4 Compressor discharge temperature up to -70℃ (20 bar)

3.2 토출 압력 변화에 따른 쿨링 타임 비교

실험을 통해 압축기 토출 압력 변화에 따른 쿨링 타임을 관찰하고 Fig. 5에 나타내었다.

실험 결과, 압축기 토출 압력을 20 bar로 유지하며 운전을 지속했을 때 목표 증발기 입구 온도에 -70°C에 21분 빨리 도달하는 모습을 보였다.

이러한 결과의 원인은 중간열교환기의 열교환량 변화로 판단되었다. Fig. 6에서 보이는 것처럼 에프터쿨러 출구의 온도가 고정되었을 때 압축기 토출 압력이 상승함에 따라 에프터쿨러의 방열량이 늘어나고 이와 동시에 목표 증발기 입구 온도에 도달하기 위한 중간열교환기의 열교환량이 감소했음을 확인할 수 있다. 이로 인해 목표 증발기 입구 온도에 도달하기 위한 중간열교환기의 열교환량이 줄어들게 되었고 쿨링 타임이 감소하게 된 것으로 판단된다.

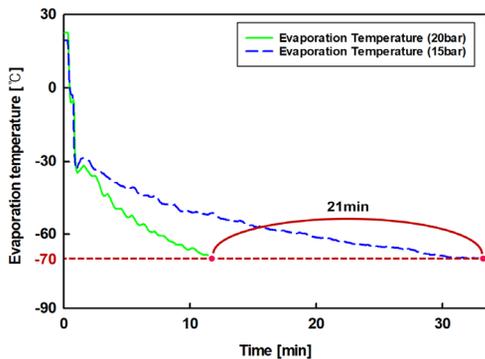


Fig. 5 Cooling time according to change of compressor discharge pressure

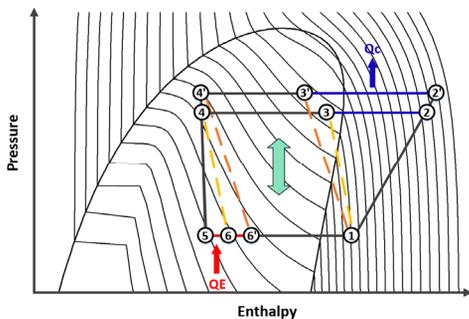


Fig. 6 P-h diagram according to change of compressor discharge pressure

3.3 토출 압력 변화에 따른 냉동능력과 COP 비교

압축기 토출 압력이 다를 때, 목표 증발기 입구 온도인 -70°C에서 냉동능력을 산출하고 이를 통해 COP를 계산한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 냉동능력은 압축기 토출 압력이 15 bar일 때 240 W, 20 bar일 때 580 W가 산출되었다. 압축기 토출 압력 변화에 따라 2배 이상의 큰 차이가 관찰되었는데 이는 앞서 언급한 중간열교환기의 열교환량 변화가 원인인 것으로 사료된다.

Fig. 6에서 보이는 것처럼 압축기 토출 압력 상승 시 에프터쿨러의 방열량 증가로 인해 중간열교환기의 열교환량이 줄어들었고 이로 인해 증발기에서 확보할 수 있는 냉동능력이 더 커질 수 있음을 확인할 수 있다.

COP는 압축기 토출 압력을 15 bar로 운전 시 0.1, 20 bar로 운전 시 0.18로 산출되었다. 3.1절에서 확인했을 때 압축기 소비 동력은 압축기 토출 압력과 비례해 증가하는 모습을 보이며 에너지 소비 측면에서 불리한 모습을 보였다. 그러나 앞서 확인한 것처럼 압축기 토출 압력이 높을 때 중간열교환기의 열교환량 감소로 인해 냉동능력이 급격하게 상승하는 모습을 보였기에 COP 산출 시 더 큰 값을 얻을 수 있었다. 이와 유사한 결과를 Choi et al.¹⁰⁾의 결과에서도 확인할 수 있었다.

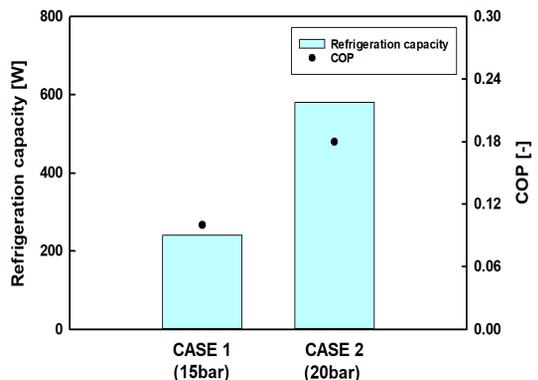


Fig. 7 Refrigeration capacity and COP according to change of compressor discharge pressure

4. 결 론

본 연구에서는 압축기 토출 압력 변화에 따른 압축기 토출 온도, 소비 동력, 쿨링 타임, 냉동능력, COP를 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1) 압축기 토출 압력이 높을 때 압축기 토출 온도와 소비 동력은 상승하며 에너지 소비 측면에서 불리한 모습을 보인다.

2) 쿨링 타임은 압축기 토출 압력이 높을 때 더 빨라지는 모습을 보인다.

3) 냉동능력은 압축기 토출 압력이 높아지자 큰 폭으로 상승하는 모습을 보였으며 이로 인해 압축기 소비 동력이 늘어남에도 불구하고 더 큰 COP를 얻을 수 있었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구(2019-2020년)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

S. S. Park; Conceptualization, Writing - original draft, Resources. S. C. Park; Investigation. J. H. Yoon; Formal analysis. S. S. Hoon; Methodology. C. H. Son; Writing - review & editing. J. I. Yoon; Project administration.

References

1. M. J. Han, 2020, "Evaluation of cooling characteristics of cryogenic cooling system for semiconductor manufacturing process using mixed refrigerant", Master Thesis, Graduate School of Ajou University.
2. J. S. Kim, 2000, "Food frozen refrigerator major", Hyoil, p. 198.

3. 2021, "COVID-19 Vaccine Storage and Transportation Management Guidelines", Korea Disease Control and Prevention Agency, pp. 35-38.
4. G. W. Hwang, S. W. Baek and S. K. Jeong, 2011, "Mixed refrigerant cooling system using non-flammable refrigerants", Paper presented at 2011 SAREK Summer Annual Conference, pp. 1081-1084.
5. K. S. Lee, J. I. Yoon, C. H. Son, J. H. Lee, C. G. Moon, W. J. Yoo and B. C. Lee, 2020, "Performance Characteristics of a Joule-Thomson Refrigeration System with Mixed Refrigerant Composition", Heat Transfer Eng, pp. 1-10.
6. 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", Appl. Therm. Eng., p. 186.
7. Y. D. Kim, S. J. Lee, J. H. Kwon and J. S. Lee, 2013, "An Experimental Study on the Ultra-Low Temperature Refrigeration System Using the Non-Flammable Mixed Refrigerants", Paper presented at 2013 SAREK Summer Annual Conference, pp. 238-240.
8. Dorosz P, Piotrowska A, Pyrka P and Bogdan P, 2019, "Analysis of the LNG re-condensation system based on Joule-Thomson cooler Analysis of the LNG re-condensation system based on Joule-Thomson cooler", IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 502 012151.
9. Little, W. A., 1997, "Method for efficient counter-current heat exchanger using optimized mixtures", U.S. Patent 5, 664, 502.
10. 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.