

비가연성 5성분계 혼합냉매 조성변화에 따른 줄-톰슨 사이클 성능특성

Performance Characteristics of Joule-Thomson Cycle with Non-Flammable 5-component Mixed Refrigerants

최지후* · 박성수* · 이선근* · 윤지훈* · 손창효** · 윤정인***†

Ji-Hoo Choi*, Sung-Soo Park, Sun-Geun Lee*, Ji-Hoon Yoon*,
Chang-Hyo Son** and Jung-In Yoon***†

(Received 7 October 2020, Revision received 4 December 2020, Accepted 7 December 2020)

Abstract : Energy efficiency has been appeared in the spotlight recently. For this reason, the optimization of mixed refrigerant is also being highlighted. However, there are very few cases where non-flammable ones are optimized for the 170-288K temperature range. This paper analyzes from thermodynamic aspects of non-flammable mixed refrigerants in the Joule-Thomson cycle by simulation. In the temperature range of 170-288K, the composition ratio of the mixed refrigerants of five-component, R-245fa, R-134a, R-404A, R-23 and R-14 was optimized. Through this analysis, the refrigeration characteristics of each refrigerant were analyzed. In particular, the optimal composition ratio was found through temperature changes in enthalpy difference and intermediate heat exchanger with pressure difference between high and low pressure.

Key Words : Mixed refrigerant, Non-flammable, 5-component, J-T cooler

1. 서 론

최근 초저온 시장의 활성화에 단단 혼합 냉매 줄-톰슨 냉동기(SMR J-T)의 상당한 발전이 있었

다. 줄-톰슨 냉동기에서 Brodyanskii et al.¹⁾은 혼합 냉매를 처음 사용하였으며, 냉각기에 사용되는 냉매는 주로 비등점이 매우 낮은 냉매이다. 고압 2.0 - 3.0 MPa, 저압 0.1 - 0.4 MPa에서의 SMR J-T 시

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

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

*최지후(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2428-4998>), 박성수(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-5318-5649>), 이선근(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-0849-6007>), 윤지훈(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-3610-6344>)

: 대학원생, 부경대학교 냉동공조공학과

**손창효(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2143-0515>)

: 부교수, 부경대학교 냉동공조공학과

*** Jung-In Yoon(ORCID:<https://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

*Ji-Hoo Choi(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2428-4998>), Sung-Soo Park(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-5318-5649>), Sun-Geun Lee(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-9724-9707>), Ji-Hoon Yoon(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-3610-6344>)

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

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

시스템은 손쉬운 제조와 부품의 중요한 가공이 필요 없고 다른 냉동기와 비슷한 냉동 효과, 적당한 압축비, 최소 진동, 높은 신뢰성 및 적은 비용 등의 많은 장점을 가지고 있다.²⁻⁶⁾

비가연성 SMR J-T 냉동기의 연구에는 Boiarski et al.⁷⁾은 비가연성 혼합 냉매와 가연성 혼합 냉매 간의 성능 비교를 보여 주었으며, Khatri와 Boiarski⁸⁾는 비가연성 혼합 냉매를 사용하여 80~150 K의 온도 범위에서 SMR J-T 냉각기와 관련된 실험 및 모델링 작업을 보고했다. Dobak et al.⁹⁾은 110~190 K의 온도 범위에서 소형 혼합 가스 냉동 시스템에 사용되는 일부 비가연성 혼합물에 대한 특허를 획득했다. 그러나 이는 많은 부분의 가연성 냉매를 포함하고 있어 안전성에 문제가 있을 수 있다. 게다가 현재 국내 S사에서 평택공장을 증설 중에 있는데, 여러 반도체 기업의 투자에 따라 수많은 냉동기의 수요가 생길 것이며, SMR의 경우, LNG 액화에서의 연구 외에는 많은 연구가 없으며, 특히 비가연성 혼합 냉매에 대한 연구가 부족한 현실이다.

본 연구에는 시뮬레이션을 통해 비가연성 혼합 냉매의 열역학적 분석을 통해 170~200 K의 온도 범위에서 5성분계 R-134a, R-404A, R-116, R-23, R-14의 혼합 냉매의 조성비를 최적화하였다. 이를 통해 각 냉매의 조성에 따른 냉동 성능 특성들에 대해 분석하였으며 각 냉매의 특성에 대해 분석하였다.

2. SMR J-T 성능 특성 시뮬레이션

2.1 SMR J-T 사이클

Fig. 1은 본 연구의 시뮬레이션 개략도이다. 압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기는 일반 냉동 사이클과 같지만 중간 열교환기가 더해진 사이클이며 이를 줄-툽슨(J-T) 사이클이라 하고, SMR은 Single Mixed-Refrigerants의 약자로 Auto Cascade 방식과는 다르게 1단 압축 1단 팽창의 냉동기 방식처럼 되어 있으며, 시스템 내의 온도 범위가 매우 넓다. 팽창밸브에서 줄-툽슨 팽창을 통해 저온 저압으로 떨어지며 혼합 냉매의 특성과 줄-툽슨 냉동기의

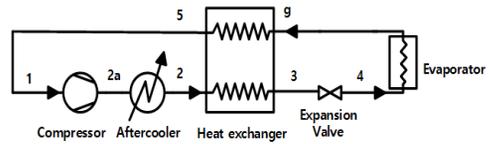


Fig. 1 Schematic diagram of MR J-T cycle

특성이 잘 맞물려 초저온의 영역에서 다른 방식의 냉동 사이클에 비해 높은 엑서지 효율을 낼 수 있으며, 강화되는 냉매 규제에 발 빠르게 대처할 수 있다.

2.2 혼합 냉매 선택

Fig. 2는 증발 압력 0.1 MPa, 애프터쿨러 출구 온도 300 K일 때의 작동 압력에 따른 몰당 엔탈피 차를 나타낸 그래프이다. 저비점 냉매인 질소나 아르곤 같은 경우 고비점 냉매인 프로판이나 에탄에 비해서 높은 압력이 필요하며, 질소의 경우는 1 kJ/mol의 냉각 열량을 얻기 위해 2.46 MPa 정도가 필요하고 프로판의 경우, 0.79 MPa의 작동 압력을 필요로 한다. 이러한 문제점들은 혼합 냉매를 사용함과 동시에 해결이 가능하다. 실제로 질소, 아르곤, 메탄, 크립톤, 에탄, 프로판을 이용하여 혼합 냉매를 조합할 경우, 1 kJ/mol의 냉각 열량을 작동 압력 2.5 MPa 아래에서 얻을 수 있다.

이러한 이점을 가진 혼합 냉매를 선택할 때 가장 중요한 점은 비점이다. 실제로 두 가지 냉매를 사용하였을 때 비점 차이가 크다면 시스템 내의 압력 상승에 영향을 미칠 수 있으며, 단일 냉매와는 다르게 열교환기 내에 핀치 포인트(온도 차이가 최소가 되는 포인트)가 발생하여 시스템 엑서지 효율 저하를 야기한다. 이러한 문제는 3개 이상의 냉매를 사용하여 해결할 수 있으며, Fig. 3과 같이 시스템 내의 온도 범위에서의 고압과 저압의 엔탈피 차를 이용해 온도 범위 내에서의 엔탈피 차가 서로 겹치게 하는 냉매와 작동 압력을 설정하면 된다.

본 논문에는 Fig. 4와 같이 170 K에서 288 K까지의 엔탈피 차를 일정하게 하기 위하여 고비점 냉매 R-245fa(NBP : 15°C)를 기준으로, R-134a(NBP : -26.3°C), R-404A(NBP : -46.6°C / -45.8°C),

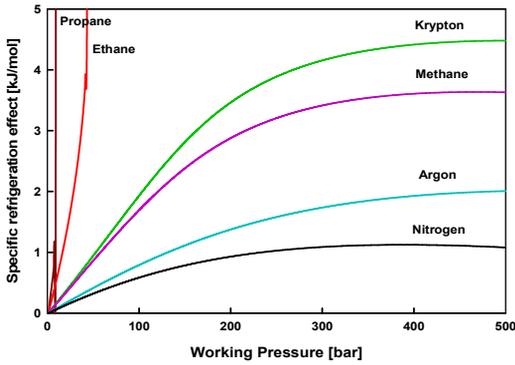


Fig. 2 Variation of specific refrigeration effect with operating pressure for different working fluids

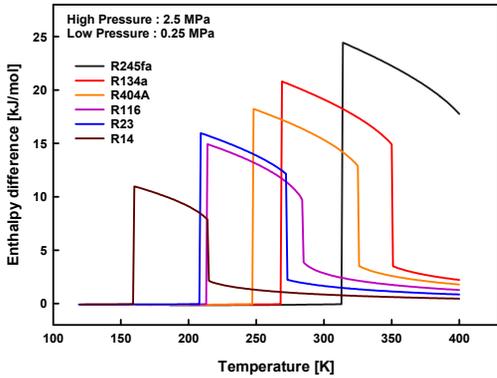


Fig. 3 Enthalpy difference with operating pressure for different working fluids

R-23(NBP : - 82.1°C), R-14(NBP : - 127.9°C)를 선택하여 시뮬레이션을 하였다.

2.3 SMR J-T 성능 특성 시뮬레이션

Fig. 5의 경우, 시뮬레이션 계략도이다. Aspen Tech 사의 HYSYS¹⁰⁾를 이용하였고, 상태방정식은 Peng-Robinson¹¹⁾으로 설정하였으며 식은 아래와 같다.

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a\alpha}{V(V+b) + b(V-b)} \quad (1)$$

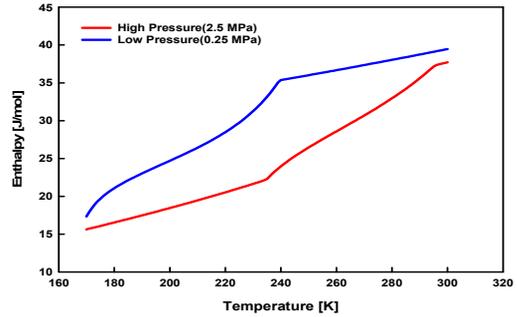


Fig. 4 Enthalpy temperature variation for hot and cold stream with different operating pressure

$$a = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (2)$$

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} \quad (3)$$

$$\alpha = [1 + (C_1 + C_2\omega - C_3\omega^2)(1 - T_r^{0.5})]^2 \quad (4)$$

이때, $C_1=0.37464$, $C_2=1.54226$, $C_3=0.26992$ 이다. 시뮬레이션의 경우, Table 1과 같이 압축기 흡입 압력은 시스템의 안정화를 위해 압축기 흡입 압력 0.2 MPa와 0.25 MPa로 설정하였고 압축기 토출 압력의 경우, 모든 케이스의 압축비 15 이하로 하여 1.6 MPa부터 2.6 MPa까지로 설정하였다. 압축기 토출 온도의 경우, 압축기의 안정성을 위해

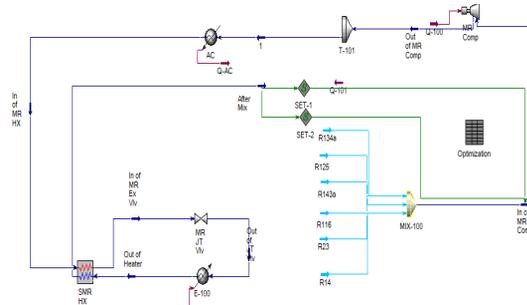


Fig. 5 Simulation diagram of MR J-T Cooler

Table 1 Analysis conditions of MR J-T cycle in this study

Design parameter	Values	Unit
Working refrigerant	R245fa, R134a, R404A, R23, R14	-
EOS	PR	-
Load heat exchanger outlet temperature	173	K
Aftercooler outlet	288	K
Compressor duty	2.1	kW
Compressor efficiency	65	%
Aftercooler pressure drop	10	kPa
Cold side pressure drop of heat exchanger	20	kPa
Warm side pressure drop of heat exchanger	20	kPa
Pressure drop of load heat exchanger	10	kPa
Low pressure	0.21, 0.22, 0.23, 0.24, 0.25	MPa
High pressure	1.6 ~ 2.6 [step : 0.1]	MPa

120℃ 이하로 고려하였으며, 애프터 쿨러와 부하 열교환기에서의 압력 강하는 10 kPa로 설정하였고, 중간 열교환기 내의 압력 강하는 저압 측 20 kPa, 고압측 20 kPa로 설정 후 Case Study를 하였다.

3. SMR 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 R-245fa, R-134a, R-404A, R-23, R-14를 이용하여 Fig. 6와 같이 일정한 엔탈피 차이가 나도록 열역학적으로 분석하였다. 그 이유는 일정한 엔탈피 차는 온도 강하 시간 감소에 큰 영향을 주며 시스템의 정상화에 큰 변수가 될 수 있다. 이러한 분석과 HYSYS 시뮬레이션을 통해 중간 열교환기의 온도차를 일정하게 설정하였고, 이와 더불어 압축기의 토출 온도 및 압력을 분석하여 여러 가지의 조성 비율을 찾았다.¹²⁾

Fig. 6은 고압의 변화에 따른 제2법칙 효율을 나타낸 그린 그래프이다. 고압이 증가함에 따라 냉동 효과와 압축기 토출 온도가 증가한다. 이는 같은 압축기 성능에서 고압이 증가할수록 유량과

냉각 능력은 둘 다 증가하지만 저압 0.25 Mpa일 때 가장 많이 증가했으며, 이는 R-14의 엔탈피 차이가 두 압력일 때 가장 크기 때문이며 저압 0.2MPa, 고압 2 MPa일 때와 비교하여 최대 40% 가량 증가했다. 저압 0.21 MPa일 경우 2.5 MPa를 넘어갈 경우, 압축 일량의 변화량이 급격하게 늘어나 성능 계수 또한 감소하는 경향을 보였으나 나머지의 경우, 압력이 상승할수록 성능 계수가 올랐다.

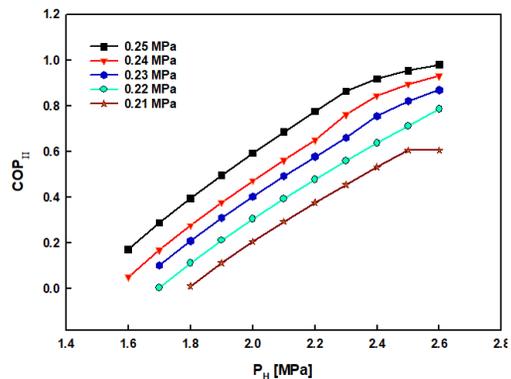


Fig. 6 COP_{II} variation with High Pressure

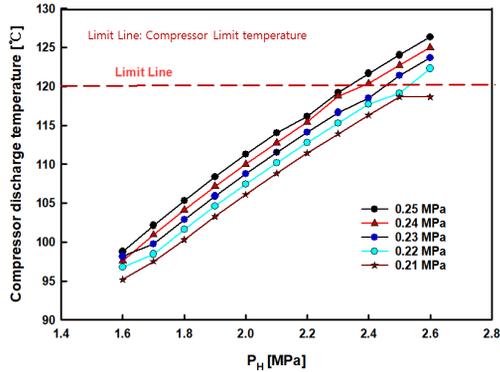


Fig. 7 Compressor discharge temperature variation with High Pressure

Fig. 7은 고압의 변화에 따른 압축기 토출 온도의 그래프이다. 압축기 토출 온도는 압축비에 따라 급격하게 상승하며 저압 0.25 Mpa일 때, 고압은 2.5 MPa 이하로 운전해야 안전성을 유지할 수 있었으며 그 이상의 압력이 될 경우, 압축기 토출 온도가 120°C가 넘어 시스템의 불안정을 야기할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 SMR J-T 냉동기 성능 특성 분석을 하고자 시뮬레이션을 통해 특성을 분석하였으며 결론은 다음과 같다.

-100°C를 증발 온도로 하는 혼합 냉매를 사용할 경우 저압 0.25 MPa, 고압 2.5 MPa일 경우는 저압 0.2 MPa, 고압 2 MPa일 경우에 비해 최대 40% 가량 성능이 올라갈 수 있음을 확인하였다. 그러나 일정 압축기 토출 온도 이상일 때, 압축기 오일의 탄화나 실린더의 과열로 인한 압축기 효율 저하로 시스템 효율 감소를 초래할 수 있다. 이에 압축기 토출 온도와 성능 등의 고려했을 때 SMR 줄-톰슨 냉동기의 저압을 0.2 MPa 내외로 작동할 경우 2.4 MPa 이내로 운전해야 한다.

후 기

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

Author contributions

J. H. Choi; Data curation, Resources. S. S. Park; Investigation. S. G. Lee; Investigation. J. H. Yoon; Investigation, Visualization. C. H. Son; Validation. J. I. Yoon; Conceptualization, Methodology, Writing - original draft.

References

1. V. M. Brodyanskii, A. K. Grezin, E. A. Gramov, V. M. Yagodin, V. A. Nikolasky and V. N. Alfeev, 1971, "The use of mixtures as the working gas in throttle Joule Thomson cryogenic refrigerators", Proceedings of 13th international congress of refrigeration, part 1, pp. 43-45.
2. W. A. Little and L. Sapozhnikov, 1994, "Development of a low cost cryogenic refrigeration system for cooling of cryoelectronics", Adv Cryog Eng, 39, pp. 1467-1474. (https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2522-6_180)
3. R. C. Longsworth, 1994, "Cryogenic refrigerator with single stage compressor", US Patent 5 337 572.
4. R. C. Longsworth, M. J. Boiarski and L. A. Klusmier, 1995, "80 K closed cycle throttle refrigerator", Cryocooler, No 8, pp. 537-541. (https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9888-3_55)
5. G. Venkatarathnam, P. S. Kumar, and M. S. Srinivasa, 2004, "Performance of throttle cycle refrigerator with nitrogen - hydrocarbon and argon - hydrocarbon mixtures", Adv Cryog Eng 49B, pp. 1576-1583. (<https://doi.org/10.1063/1.1774853>)
6. M. Boiarski, R. C. Longsworth and A. N. Khatri 1998, "High efficiency throttle cryogenic refrigerator based on one stage compressor", US Patent 5 706 663.
7. M. Boiarski, O. Podtcherniaev O and K. Flynn, 2004, "Comparative performance of throttle

- cycle cryotiger coolers operating with different mixed refrigerants", *Cryocoolers*, Vol. 13, pp. 481-488. (https://doi.org/10.1007/0-387-27533-9_61)
8. A. Khatri and M. Boiarski, 2007, "Performance of JT coolers operating at cryogenic temperatures with nonflammable mixed refrigerants", *Adv Cryog Eng* 53A, pp. 3-10. (<https://doi.org/10.1063/1.2908574>)
 9. J. D. Dobak, R. Radebaugh, M. L. Huber and E. D. Marquardt, 1998, "Mixed gas refrigeration method", US Patent 5 787 715.
 10. Aspen HYSYS. Version 8.0, Aspen Technology Inc, 2013.
 11. D. Y. Peng and D. B. Robinson, 1976. "A New Two-Constant Equation of State". *Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals*. 15: 59-64. (<https://doi.org/10.1021/i160057a011>)
 12. J. I. Yoon and C. H. Son, 2013, "Performance Characteristics of a Mixed Refrigerant OTEC Power Cycle Using Hot Waste Water", *Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals*. 15, pp. 59-64. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2013.17.6.102>)