

증기-액 이젝터를 적용한 R134a 냉동사이클의 성능 비교

윤정인¹ · 김창래² · 손창효[†]

(Received October 8, 2015 ; Revised November 6, 2015 ; Accepted November 24, 2015)

Performance comparison of refrigeration cycle using R134a with the vapor-liquid ejector

Jung-In Yoon¹ · Chung-Lae Kim² · Chang-Hyo Son[†]

요약: 최근 기본 냉동사이클에 이젝터를 적용한 고효율 냉동사이클의 개발에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 이러한 이젝터는 그 적용 위치에 따라 이젝터의 역할 뿐만 아니라 냉동사이클의 성능도 달라진다. 따라서 본 연구에서는 이젝터 적용 위치가 다른 세 가지 냉동사이클을 선정하고, 각 사이클의 성능을 비교 및 분석하였다. 그 결과, 모든 이젝터 적용 냉동사이클의 COP가 기본 냉동사이클에 비해 최대 44% 향상되었다. 특히 본 연구에서 제안하는 이젝터 냉동사이클의 COP가 3.47로 가장 높게 나타났다. 그리고, 기본 냉동사이클과 비교하여 Bergander 사이클, Xing 사이클, 그리고 본 연구에서 제안한 이젝터 냉동사이클의 응축열량이 최대 21% 감소하였다. 따라서, 본 연구로부터 이젝터 적용 냉동사이클에서 이젝터의 압력비, 토출부 건도, 압축비 등은 냉동장치의 성능 향상에 영향을 미치는 중요한 요소이므로 이들에 대한 최적 제어가 대단히 중요하다.

주제어: 증기-액 이젝터, R134a, 이젝터 냉동사이클, 성능계수

Abstract: Recently, research on high-efficiency refrigeration cycles that apply an ejector to basic cycles has progressed actively. The role of the ejector and the performance of refrigeration cycles are subordinate to ejector locations. In this study, the performance of three refrigeration cycles with different ejector locations is compared and analyzed. The results showed an increased COP in all cycles due to the application of the ejector, with the highest increase of 44% compared to a basic refrigeration cycle. The ejector refrigeration cycle proposed in this study presents the highest COP, 3.47. Moreover, the decrease in condensation capacity in Bergander's cycle, Xing's cycle, and our proposed ejector refrigeration cycle went up to 21%. In refrigeration cycles applying the ejector, the pressure ratio of the ejector, the vapor fraction of discharge, and compression ratio are important factors for COP enhancement. For this reason, detailed and accurate control of these is significant.

Keywords: Vapor-liquid ejector, R134a, Ejector refrigeration cycle, Coefficient of performance

Nomenclature

COP : 성능계수 [-]
P : 압력 [kPa]
Q : 열량 [MJ/h]
T : 온도 [°C]
W : 일량 [kW]

m : 이젝터 흡입부
r : 비율
s : 이젝터 유입부
t : 전체

Nomenclature

d : 이젝터 토출부
e : 증발기

1. 서론

냉동장치의 고효율화를 위한 연구는 다양하게 진행되고 있다. 이러한 방법으로는 열전달성능이 우수한 열교환기(증발기 및 응축기) 및 터보압축기 등의 고성능 장치를 사용하거나, 최적 냉매 선정, 냉매 유동 시 에너지 손실을 최

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2143-0515>): Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University, Sinseon-ro, Nam-gu, Busan, 365, Korea, E-mail: sonch@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6183

1 Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University, E-mail: yoonji@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6180

2 Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University, E-mail: clkimpknu@gmail.com, Tel: 051-629-6180

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

소화하는 장치 구성 등의 방법이 있을 수 있다. 특히 최근에는, 증기-액 이젝터를 냉동장치에 적용하여 그 성능을 향상시키는 방법이 고려되고 있다.

지금까지 발표된 이젝터 냉동사이클과 관련된 종래연구 [1]-[4]를 살펴보면, 우선 Chen *et al.* [1]은 이젝터 및 냉동사이클 구성요소들의 적용 위치와 숫자를 다양하게 하여 사이클 성능 향상 원인을 분석하였다. 그 결과, 냉동사이클에 이젝터는 성능 향상에 효과적이며, 다목적으로 적용할 수 있음을 확인하였다.

Xing *et al.* [2]은 응축기 입구와 출구에 이젝터를 각각 적용하여 응축기 입구 냉매액을 과냉시키는 냉동사이클에 두 가지 냉매를 적용하여 분석하였다. 그 결과, R404A 사용 시 10%, R290 사용 시 7% 정도의 COP 향상을 각각 확인하였다.

Sumeru *et al.* [3]은 이젝터를 적용한 냉동사이클을 수치 해석적 방법을 적용하여 주위온도의 변화에 따라 성능을 분석하였다. 그 결과 제안한 이젝터 냉동사이클의 COP가 4~14% 정도 증가한다고 보고하였다.

Lawrence *et al.* [4]은 2상류 이젝터를 적용한 세 가지 냉동사이클을 각각 분석하였다. 그 결과, 이젝터가 적용된 냉동사이클은 팽창밸브를 적용한 일반 냉동사이클에 비하여 성능이 개선되었으며, 압축기 입구에 추가로 증발기를 설치한 냉동사이클이 가장 높은 COP를 나타내었다.

이상의 종래 연구로부터, 기본 증기압축식 냉동장치와 고효율화를 위해서 이젝터를 적용하고자 하는 연구가 다양하게 진행되고 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 이들 연구 대부분은 기본적인 성능 분석 등에 대한 것으로, 아직까지 명확한 이론이 확립되어 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기본 냉동사이클에 증기-액 이젝터를 적용하여 냉동사이클의 성능 분석 및 비교를 한 후, 가장 우수한 성능을 가지는 냉동사이클을 제시하고자 한다. 이를 위해 상용프로그램 HYSYS [5]를 이용하여 동일한 분석조건에 대해서 각각의 이젝터 냉동장치 성능계수를 비교 및 분석하였다.

2. 이젝터 냉동사이클

2.1 이젝터 구성 및 작동원리

Figure 1은 이젝터의 단면도와 이젝터 내 냉매 압력변화를 나타낸 것이다. Figure 1과 같이, 이젝터는 Motive부, Suction부, Discharge부로 구성되며, Motive부와 Suction부로 유체가 유입되어 혼합 과정을 거친 후, Discharge부로 토출된다. 일반적으로 냉동사이클에 적용되는 이젝터에서 Motive부로 유입되는 고압의 냉매액은 Motive 노즐을 통과하면서 압력이 감소하게 된다. 이로 인해 Suction부로 저압과 저속의 냉매증기를 유인하여 흡입한 후, 이젝터 내부에서 혼합된다. 혼합된 2상의 냉매는 Discharge부로 토출되면서 Suction부 압력에 비하여 압력이 회복되는 과정을 거친

다. 이때 Discharge부로 토출되는 냉매는 Motive부의 고압액과 Suction부의 저압 증기의 중간압력을 형성한다. 이러한 원리를 이용하여 해양온도차발전의 고효율화에 관한 연구가 일부 이루어지고 있다[6]-[8].

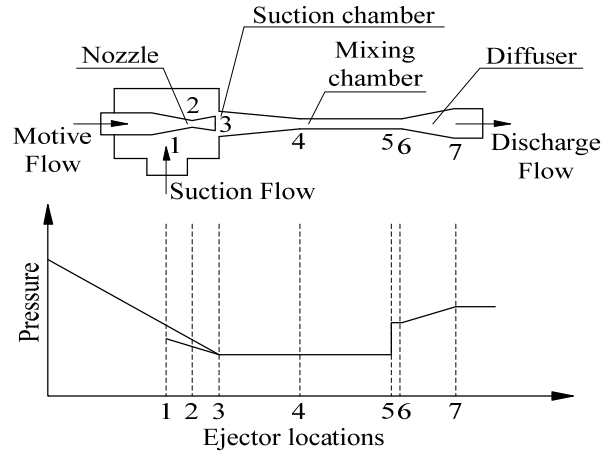


Figure 1: Schematic view of an ejector and variations of pressure along the ejector

2.2 사이클 개요

Figure 2에 기본 증기 압축 냉동사이클을 포함하여 증기-액 이젝터를 적용한 총 네 가지 냉동사이클의 개략도를 나타내었다. 그 중, 두 가지 사이클은 종래연구에서 언급되었던 냉동사이클 중에서 선정하였으며, 마지막으로 이젝터 Motive부에 펌프를 설치한 사이클을 제안하였다.

Figure 2-(a)는 가장 기본적인 증기압축식 냉동사이클로 이젝터를 제외한 압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기의 네 가지 주요기기로 구성된다. 이 냉동장치는 Figure 2-(b)~(d)의 이젝터 냉동사이클과의 성능 비교를 위한 기준 냉동사이클이다.

Figure 2-(b)는 응축기에서 분리된 냉매액의 일부가 펌프를 거쳐 이젝터 Motive부로 흡입되며, 나머지 냉매액은 팽창밸브, 증발기 그리고 압축기를 거쳐 이젝터 Suction부로 흡입되는 냉동사이클이다. 이때 압축기 토출측에 설치된 이젝터는 압축기 토출압력을 낮추어 압축일량을 감소시키고, 이로 인해 성능계수를 향상시키는 역할을 한다[1].

Figure 2-(c)는 응축기에서 분리된 냉매액의 일부가 펌프를 거쳐 이젝터의 Motive부로, 잔여 냉매액은 첫 번째 팽창밸브에서 팽창과정을 거치면서 냉매증기가 일부 발생하게 되며, 이젝터의 Suction부로 흡입된다. 1차 팽창시 이젝터로 흡입되지 않은 냉매액은 포화액 상태에서 다시 팽창하며, 이로 인해 증발기 입구 건도가 감소되어 냉동효과가 증가되므로 냉매순환량을 감소시킬 수 있다는 장점이 있다[2].

Figure 2-(d)는 이젝터의 Motive부에 펌프, Discharge부에 기-액 분리가 설치된 사이클이다. 이젝터 출구의 냉매는 2상으로 유동하며 기-액 분리로 들어간다. 이때 포화냉매

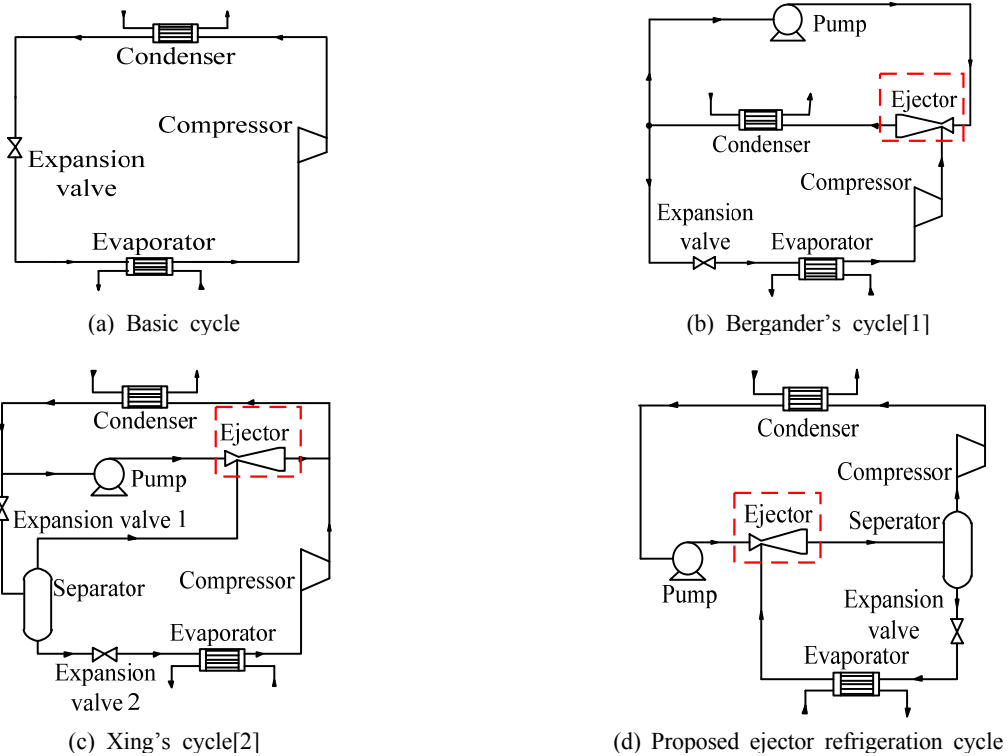


Figure 2: Schematic diagram of various refrigeration systems with vapor-liquid ejector

증기는 압축기에서 압축되어 응축기를 거쳐 고압의 냉매액이 되고 펌프를 지나면서 압력상승과정을 거친 후, 이젝터의 Motive부로 흡입된다. 그리고, 포화냉매액은 팽창밸브를 거쳐 증발기에서 증발되어 이젝터의 Suction부로 흡입된 후, 이젝터 내부에서 고압의 냉매액과 혼합 및 토출되며 다시 기-액 분리기로 들어가는 사이클이 구성된다. 기-액 분리기의 고압 냉매액은 포화상태이기 때문에 팽창과정을 거친 후 증발기 입구 건도가 낮아져 엔탈피차가 증가하고, 이로 인해 냉동효과가 증가하여 증발기로 흐르는 냉매의 유량이 가장 적다는 장점이 있다.

2.3 분석 조건 및 계산식

Table 1은 상기의 네 가지 냉동사이클을 동일한 조건에서 비교하기 위한 분석조건을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 냉동창고의 냉동실에 적합한 실내온도인 -20℃를 만족하기 위하여 증발온도를 -25℃로 설정하였다. 이때, 추가로 증발온도 변화에 따른 사이클 특성 변화를 알아보기 위하여 -20℃~-30℃ 조건에서도 분석하였다.

Table 1에서 증발열량은 250kW로 동일하게 설정하여 각 냉동사이클의 성능을 비교하였다. 또한 이젝터의 압력비 (Ejector pressure ratio)는 다음과 같이 정의된다.

$$P_r = \frac{P_m - P_s}{P_d - P_s} \tag{1}$$

Table 1: Analysis conditions

Items	Values
Refrigerants	R134a
Condensation temperature [°C]	35
Evaporation temperature [°C]	-20 ~ -30
Heat exchanger pressure drop [kPa]	10
Evaporation capacity [kW]	250
The degree of superheat and subcooled of heat exchanger outlet [°C]	5
Pump efficiency [%]	75
Compressor efficiency [%]	75
Ejector pressure ratio [-]	6.8

각 냉동장치의 COP, 즉 성능계수는 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$COP = \frac{Q_e}{W_t} \tag{2}$$

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

Figure 3은 전술한 네 가지 냉동장치의 증발온도에 따른 COP 변화를 비교한 그래프이다. 그 결과, 이젝터를 적용하지 않은 (a) 사이클에 비해서 이젝터를 적용한 모든 사이클

(b)~(d)의 COP가 약 4~44% 향상되었다. 특히 이젝터를 적용한 냉동사이클 중에서 가장 높은 COP는 증발온도 -20°C인 (d) 사이클로써, COP는 3.47로 나타났다. Figure 3으로부터 본 논문의 서론에서 언급한 것처럼, 냉동창고용 냉동사이클의 증발온도는 -25°C이기 때문에, 네 가지 냉동사이클 중 성능측면에서 (d) 사이클이 가장 적합한 것으로 판단된다.

Figure 4는 각각의 증발온도에서 (a) 사이클 대비 (b)~(d) 사이클의 COP 향상률의 변화를 나타낸 것이다. 그 결과, (b)와 (c) 사이클의 경우, 각각 4%와 9%의 COP 향상률을 보였으며, 증발온도가 증가하면서 거의 일정하였다. (d) 사이클의 경우 27~44%의 COP 향상률을 나타내었으며, (b), (c) 사이클에 비해서 매우 높은 수치이다. 반면에 (d) 사이클의 COP는 증발온도가 증가할수록 급격히 감소하는 경향을 보였다. 그 이유는 일반적으로 냉동장치의 증발온도가 증가할수록 증발기 입구 건도가 감소하여 냉매순환량이 감소하고, 이로 인해 압축일량도 감소하게 되기 때문이다. 따라서, Table 1과 식 (2)로부터 증발온도가 증가할수록 냉동사이클의 COP는 증가하게 되는데, 이때 (d) 사이클은 다른 냉동사이클에 비해 냉매순환량 감소에 따른 압축일량 감소율이 많이 낮기 때문에 COP 향상률은 오히려 증발온도가 증가할수록 감소하게 된다.

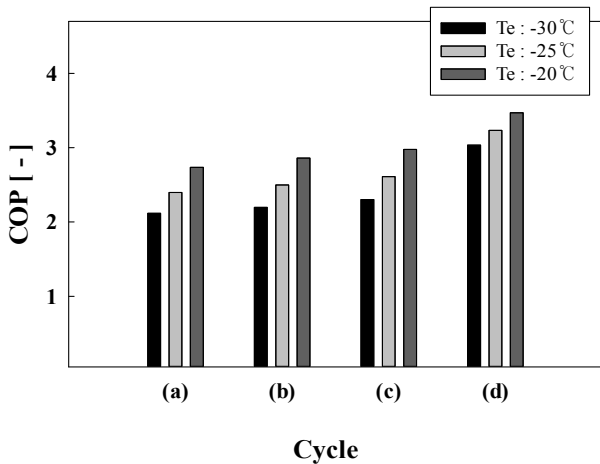


Figure 3: Comparison of COP

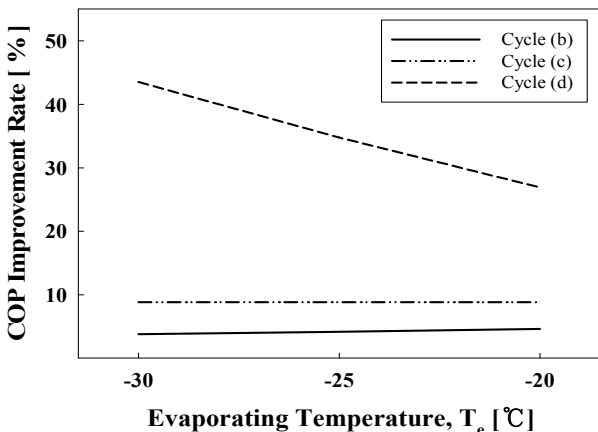


Figure 4: Comparison of COP Improvement Ratio

Figure 5는 네 가지 냉동장치의 압축기와 펌프에 사용된 총 투입일량 즉, 압축일량 및 펌프동력을 포함한 총 일량을 나타낸 것이다. 그 결과, 증발온도가 증가할수록 (a)~(d) 사이클 모두 총 투입일량이 감소하였다. 그 이유는 증발온도가 증가할수록 냉매순환량이 감소하여 압축일량과 펌프동력이 감소하기 때문이다. 즉, 각 사이클별로 상세해가 추가되어 기본 증기압축식 냉동장치의 압축기 역할을 일부 수행하기 때문이다. 또한 (c) 사이클의 경우, 냉동시스템의 냉매순환량이 (b), (d) 사이클에 비해서 최대 127% 정도 감소하기 때문이다. (d) 사이클의 경우, 증발기 출구의 저압냉매가 바로 압축기로 흡입되지 않고, 이젝터에 의해 증발압력 보다 높은 고압의 냉매증기가 압축기 입구로 흡입되기 때문이다.

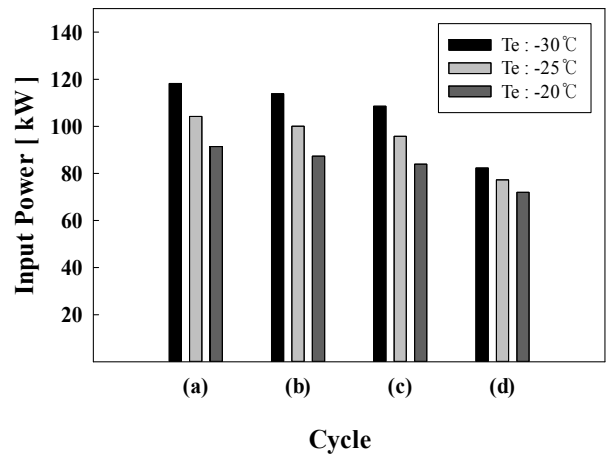


Figure 5: Comparison of Input Power

Figure 6은 냉동사이클 내를 흐르는 총 냉매순환량과 그 중 증발기로 흐르는 냉매순환량의 비율을 나타낸 결과이다. Figure 6으로부터, 모든 사이클에서 증발온도가 증가하면서 냉매순환량이 감소하게 되는데, 그 이유는 냉매는 높은 온도에서 증발할 경우, 단위질량당의 냉동능력이 증가하기 때문이다. 또한, 동일한 증발온도에서 네 가지 사이클의 냉매순환량 비교 결과, 이젝터를 적용한 냉동사이클의 냉매순환량이 기본 냉동사이클 보다 높게 나타났다. 그 이유는, 이젝터 적용 냉동사이클의 경우, 증발압력 대비 압력회복을 위해 이젝터의 Motive부로 냉매액을 일정비용 이상 순환시켜야 하기 때문이다. 하지만 (b), (d) 사이클의 냉매순환량이 (a) 사이클 대비 92~150% 증가하였다. 이는 (b), (d) 사이클의 이젝터가 Motive부의 고압냉매액과 Suction부의 저압냉매증기를 혼합하여 Suction부 압력 대비 냉매압력을 회복시키는 기능을 하기 위하여 냉매순환량이 큰 비율로 증가하기 때문이다. 반면에 (c) 사이클의 경우는 최대 약 11%로 소폭 증가하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 (c) 사이클의 이젝터는 냉매의 압력을 회복시키는 역할이 아닌 냉매액의 일부를 순환시켜 압축기 토출 냉매증기를 냉각시키기 때문이다. (d) 사이클의 경우는, 이젝터 Discharge부의 압력이 기본 냉동사

이클의 증발압력보다 높은 압력으로 압축기 입구로 흡입되므로 (b) 사이클에 비해서 압축기로 순환하는 냉매량이 감소하고 이로 인해 전체 냉매순환량이 감소한다.

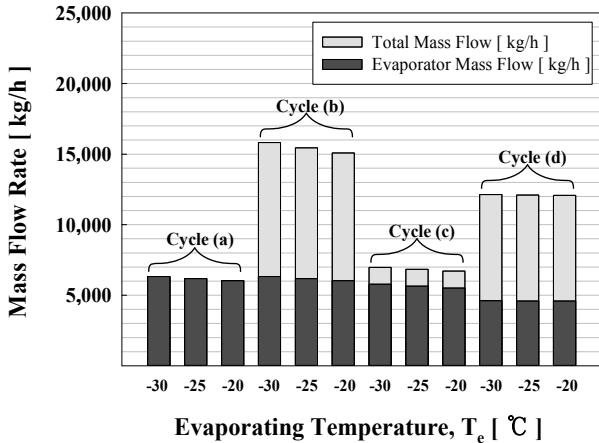


Figure 6: Comparison between Total Mass Flow and Evaporator Mass Flow

4. 결 론

본 연구에서는 기본 증기 압축 냉동사이클과 이젝터 적용 냉동사이클을 포함한 총 네 가지의 사이클을 동일한 운전조건에서 성능을 분석 및 비교하였다. 이에 대한 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 이젝터를 적용한 모든 냉동사이클의 COP가 기본 냉동사이클에 비해 4~44% 증가하였으며, 이젝터 적용 사이클 중에서 (d) 사이클의 COP가 가장 높았다. 특히 (d) 사이클이 -20°C의 증발온도에서 작동될 때 COP는 3.47로 가장 높았다.
2. 냉동장치의 구성기기 중의 하나인 펌프동력은 압축기의 일량에 비해서 대단히 적기 때문에, 고효율 냉동장치의 추가 구성기기로서 사용하는 것이 적합하리라 판단된다.
3. 이젝터를 적용한 냉동사이클의 설계, 제작 및 실제 운영을 위해서는 이젝터 유인비 및 압력비, 열교환기의 출구 냉매 건도, 각 지점의 냉매 압력, 과냉도와 과열도 등의 정확한 제어에 대한 추가 연구가 필요하다.

따라서 추후 이젝터 적용 냉동시스템의 고효율화를 위한 실용적인 연구가 지속적으로 이루어질 필요성이 있다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음

References

- [1] J. Chen, S. Jarall, H. Havtun, and B. Palm, "A review on versatile ejector applications in refrigeration systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 67-90, 2015.
- [2] M. Xing, G. Yan, and J. Yu, "Performance evaluation of an ejector subcooled vapor-compression refrigeration cycle," *Energy Conversion and Management*, vol. 92, pp. 431-436, 2015.
- [3] K. Sumeru, S. Sulaimon, H. Nasution, and F. N. Ani, "Numerical and experimental study of an ejector as an expansion device in split-type air conditioner for energy savings," *Energy and Buildings*, vol. 79, pp. 98-105, 2014.
- [4] N. Lawrence and S. Elbel, "Theoretical and practical comparison of two-phase ejector refrigeration cycles including First and Second Law analysis," *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, no. 4, pp. 1220-1232, 2013.
- [5] Aspen HYSYS, Version 8.0, Aspen Technology Inc, 2013.
- [6] J. I. Yoon, C. H. Son, K. H. Choi, C. M. Son, S. H. Seol, H. S. Lee, and H. J. Kim, "Improvement of efficiency of kalina cycle and performance comparison," *Journal of the Korean Solar Energy Society*, vol. 35, no. 5, pp. 11-19, 2015.
- [7] J. I. Yoon, C. H. Son, S. H. Seol, H. U. Kim, S. J. Ha, S. H. Jung, H. J. Kim, and H. S. Lee, "Performance analysis of OTEC power cycle with a liquid vapor ejector using R32/R152a," *Heat and Mass Transfer*, vol. 51, no. 11, pp. 1597-1605, 2015.
- [8] H. S. Lee, J. I. Yoon, C. H. Son, S. J. Ha, S. H. Seol, B. H. Ye, H. J. Kim, and G. J. Jung, "Efficiency enhancement of the ocean thermal energy conversion system with a vapor-vapor ejector", *Advances In Mechanical Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 1-10, 2015.