

이젝터를 적용한 냉동사이클의 냉매종류별 성능특성 Performance Characteristics of Refrigeration Cycles with Ejector using Refrigerants

윤정인* · 김청래** · 손창효*†

Jung-In Yoon*, Chung-Lae Kim** and Chang-Hyo Son*†

(Received 11 October 2016, Revision received 01 February 2017, Accepted 02 February 2017)

Abstract: Studies in liquid-vapor ejector, which performs a great efficiency in refrigeration cycle is highly concerned. This paper is based on basic refrigeration cycle and three ejector refrigeration cycles and the comparison and contrasts about when 6 different refrigerants are applied to such refrigeration cycles. All cycles had a percentage increase of COP from 4 to 74% when ejector was applied, and the source of increasement was the decrease of total work done due to ejector's pressure recovery function. When R-245fa is applied to cycle (d), results showed that COP was the most superior in such cycle, R-245fa showed high volume entrainment ratio in all cycles. Future studies in refrigeration cycles will require more knowledge and experiments on ejector's appliance to refrigeration cycles and the actuation of such functions.

Key Words : Refrigeration cycle, Ejector, Ejector cycle

- 기호 설명 -

하첨자

C : 압축비	[-]	c : 압축기
COP : 성능계수	[-]	d : 이젝터 디스차지
E : 유인	[-]	e : 증발기
m : 냉매 유량	[kg/h]	in : 입구
P : 압력	[kPa]	m : 이젝터 모터브
Q : 열량	[kW]	out : 출구
VE : 체적유인비	[-]	r : 비율
W : 일량	[kW]	s : 이젝터 석션
ρ : 밀도	[kg/m ³]	t : 총합

*† 손창효 : 부경대학교 냉동공조공학과
E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6183

*윤정인 : 부경대학교 냉동공조공학과
**김청래 : 부경대학교 냉동공조공학과 대학원

*† Chang-Hyo Son : Department of Refrigeration and Air Conditioning, Pukyong National University.

E-mail : Sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6183

*Jung-In Yoon : Pukyong National University.

**Chung-Lae Kim : Graduate School, Pukyong National University.

1. 서 론

본 논문에서는 다양한 냉동사이클의 성능을 비교 및 분석하였다. 냉동사이클에 이젝터를 적용할 경우 COP가 증가함을 이론적으로 확인하였고, 가장 효과적인 사이클을 제안하며 추후 연구방향을 제시하였다.

이젝터를 적용한 냉동시스템 Wang 등¹⁾의 경우 구동유체의 상(Phase)이 액체와 기체의 혼합 상태라는 점이 특징적이다. 이 경우 팽창밸브에 의한 팽창이 수반되며, 이 과정에서 구동유체의 압력이 감소되어 이젝터 성능의 저하를 야기한다. 반면에 부분 증발에 의한 구동유체의 밀도 감소로 인해 흡입부 유체와의 질량유량 비율은 상대적으로 양호하게 나타났다. Park 등²⁾은 구동압력과 형상과 같은 이젝터의 성능변수에 대한 CFD해석을 통해 내부 유동을 분석하였다. Yoon 등³⁾은 이젝터를 적용한 냉동사이클에 R-134a를 적용하였을 경우에 대해 성능분석을 실시하였다. Lawrence 등⁴⁾은 이상류 이젝터를 적용한 세 가지 냉동사이클을 분석하였으며, 압축기 입구에 이젝터를 적용한 사이클이 가장 효과적임을 확인하였다. 전술한 바와 같이, 이젝터 냉동사이클과 관련된 각종 연구가 활발히 진행되고 있음을 알 수 있다. 반면에, CHC계 냉매의 사용이 이미 제한되었음에도 불구하고, HFC계 냉매 또는 천연냉매 등의 대체냉매에 대한 이젝터 냉동사이클의 성능 분석 연구 이론은 확립되어 있지 않다.

따라서 본 논문에서는 기본 냉동사이클과 Yoon 등의 연구³⁾에서 분석한 세 가지 이젝터 냉동사이클을 대상으로 하여, 6종의 다양한 냉매가 적용되었을 때의 성능을 비교 및 분석하고자 한다. 이론적 비교를 위해서 Aspen HYSYS⁵⁾를 이용하여 동일한 분석조건을 기준으로 해석하였다.

2. 이젝터 냉동사이클

2.1 이젝터 형상 및 효과

Fig. 1은 앞의 연구³⁾에서 사용한 이젝터 단면도 및 각 위치별 냉매 압력변화를 그래프로 나타낸

것으로 본 논문에서의 이해도를 높이기 위해 여기서 다시 상세히 설명하고자 한다. 이젝터는 Motive, Suction, Discharge로 구성되며, Motive 및 Suction으로 유입된 유체가 혼합된 후, Discharge로 토출된다. Motive로 유입되는 고압의 액상태 냉매는 Motive 노즐을 통과하며 유속이 증가하는 동시에 압력이 감소되며 Suction으로 저압의 냉매증기가 유입되어 Mixing chamber에서 혼합된다.^{3,6)}

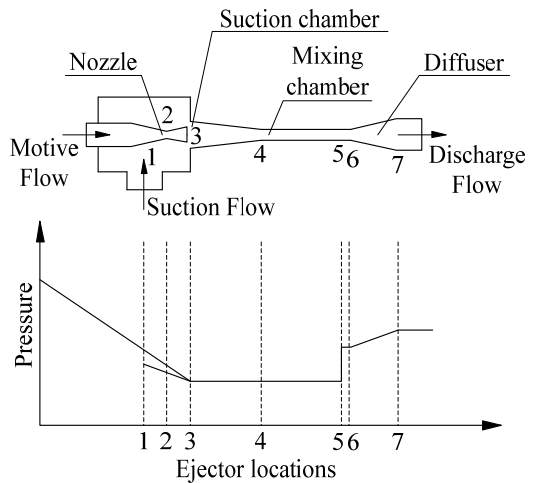


Fig. 1 Schematic view of an ejector and variations of pressure³⁾

2.2 비교 대상 사이클 요약

Fig. 2는 본 논문에서 비교대상으로 하는 네 가지 냉동사이클의 개략도를 나타낸 것이다. 이는 전편의 논문(3)에서 설명하였기에 여기서는 간단히 설명하고자 한다. Fig. 2-(a)는 기본 증기압축 냉동사이클로 비교 대상 사이클의 기준이 되는 사이클이다. Fig. 2-(b)는 응축기의 냉매액이 펌프와 증발기로 분지되는 냉동사이클이다. Fig. 2-(c)는 일반적으로 많은 연구가 이루어지는 액-증기 이젝터 냉동사이클이다. Fig. 2-(d)는 (c)와 유사하지만, Motive 전단에 승압펌프를 추가로 설치한 냉동사이클이다. (c)와 비교하여 Discharge의 압력이 회복되는 정도가 크기 때문에, 압축기 흡입냉매의 압력을 더욱 증가시킬 수 있다는 장점이 있다.

3. 분석조건 및 계산식

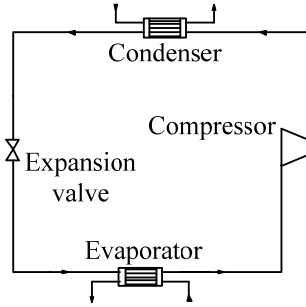


Fig. 2-(a) Basic cycle

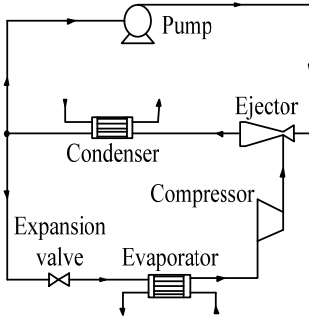


Fig. 2-(b) Pump cycle¹⁾

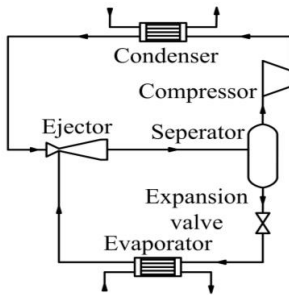


Fig. 2-(c) Ejector cycle⁶⁾

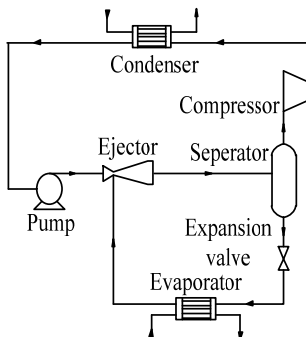


Fig. 2-(d) Pump-ejector cycle³⁾

3.1 시뮬레이션 분석조건

Table 1은 Fig. 1의 네 가지 냉동사이클을 비교 및 분석하기 위해 설정한 조건을 나타낸 것이다. 시뮬레이션의 변수인 냉매는 R-22, R-134a, R-245fa, R-290, R-600a, R-1270의 6종을 선택하였다. 응축온도는 일반적으로 냉동창고 등에서 사용하고 있는 에바콘으로 가정하여 35℃로 설정하였다. 증발온도는 대형 냉동창고의 냉동실 온도를 약 -20℃로 유지하기 위한 온도인 -25℃로 설정하였다. 또한 냉동능력은 250 kW 로 모든 조건에서 동일하게 유지하였다.

Table 1 Analysis conditions

Parameters	Value
Refrigerants [-]	R-22, R-134a, R-245fa, R-290, R-600a, R-1270
Condensing temperature [°C]	35
Evaporating temperature [°C]	-25
Heat exchanger pressure drop [kPa]	10
Refrigerating capacity [kW]	250
superheat and subcool degree [°C]	5
Pump efficiency [%]	75
Compressor efficiency [%]	75
Ejector pressure ratio [-]	6.8

3.2 계산식

결과를 분석하기 위해서 이젝터의 압력비, 냉동 장치의 성능계수, 압축기의 압축비, 이젝터의 체적유량비를 계산하였고, 다음과 같은 계산식을 사용하였다.

$$P_r = \frac{P_m - P_s}{P_d - P_s} \quad (1)$$

$$COP = \frac{Q_e}{W_t} \quad (2)$$

$$C_r = \frac{P_{c,in}}{P_{c,out}} \quad (3)$$

$$E_r = \frac{m_s}{m_m} \quad (4)$$

$$VE_r = \frac{m_s / \rho_s}{m_m / \rho_m} \quad (5)$$

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

Fig. 3은 냉매별 전체일량을 나타낸 그래프이다. (a)사이클의 전체일량이 약 102~108 kW의 수치를 나타내는 반면, (b)사이클은 96~101 kW, (c) 사이클은 80~85 kW, (d)사이클은 57~82 kW의 수치를 나타내며 서서히 감소함을 확인할 수 있다. 특히, R-245fa를 적용한 경우에 감소변화율이 가장 뚜렷하기 때문에 성능향상이 기대되어진다.

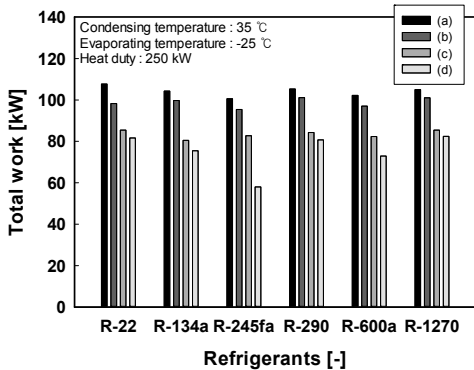


Fig. 3 Total work with various refrigerants

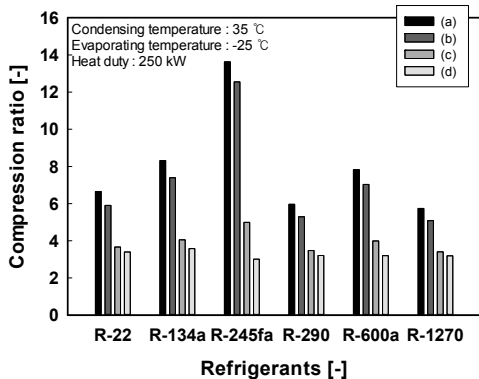


Fig. 4 Compression ratio with various refrigerants

또한 (b)사이클과 (d)사이클은 펌프를 추가로 설치했음에도 불구하고, 압축일량이 대폭 감소함에 따라 전체일량이 감소함을 확인하였으며, 이는 펌프를 사용하는 것이 이젝터 냉동사이클의 성능향상에 유리하게 작용함을 알 수 있다. Fig. 4는 냉매별 압축비를 나타낸 그래프이다. Fig. 3의 원인을 분석한 결과, 압축기 입출구의 압력에 의해 계산되는 압축비의 감소 때문임을 확인하였다. 압축비가 감소하게 되면 압축기 입출구의 엔탈피차가 줄어들기 때문에 압축일량이 감소한다. (a)와 비교했을 때, (b)보다는 (c)와 (d)가 더욱 급격한 압축비변화율을 나타냈다. 특히 (d)는 Motive 전단에 추가로 설치한 승압펌프로 인해 (c)보다 더욱 낮은 약 3의 압축비를 보였다. 한편, R-245fa를 (a)와 (b)에 적용한 것과 같이 압축비가 상당히 높은 경우, 2단 압축 사이클 등의 타 시스템을 구성하는 것이 바람직하다.

Fig. 5는 냉매별 각 사이클의 COP를 나타낸 그래프이다. 앞서 분석한 Fig. 3과 Fig. 4의 결과로, 모든 냉매에서 (a), (b), (c), (d)의 순서로 COP가 증가하였다. (a), (b), (d)의 경우 R-245fa가, (c)의 경우에는 R-134a가 가장 높은 COP를 보였다. 또한, (a)와 (c)를 비교하면, R-134a가 약 1.24배 증가할 때, 나머지 냉매는 약 1.15~1.2배로 비교적 소폭 증가하였다. (a)와 (d)를 비교하면, R-245fa가 약 1.7배 증가할 때, 나머지 냉매는 약 1.27~1.4배로 비교적 소폭 증가하였다. 따라서 비교대상의 사이클과 냉매 중, R-245fa를 (d)에 적용했을 때의 성능이 가장 우수함을 확인할 수 있다.

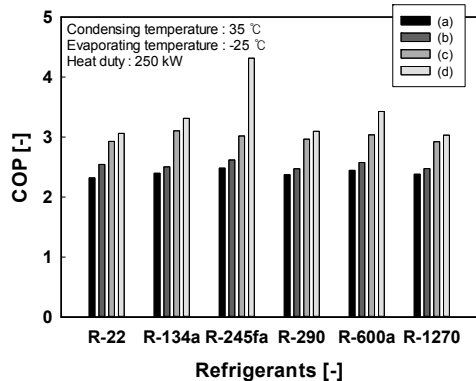


Fig. 5 COP with various refrigerants

Fig. 6은 냉매에 따른 응축열량의 차이를 나타낸 그래프이다. (b)의 경우, (a)와 비교해 모든 냉매에서 응축열량이 소폭 감소하였다. 응축기를 통과하는 냉매의 유량은 (b)가 약 2.6배 많으나, 응축기가 이젝터의 Discharge 후단에 위치해 건도가 약 0.42인 이상의 냉매가 통과하기 때문임을 확인하였다. 반면에 (c)와 (d)는 (a)와 비교해 약 1.1~1.27배 증가한 응축열량을 나타낸다. 응축열량의 증가는 열교환기의 소형화에 불리한 조건이기 때문에, (c), (d)와 같은 장치를 구성할 경우 설치 공간을 신중히 고려해야 한다.

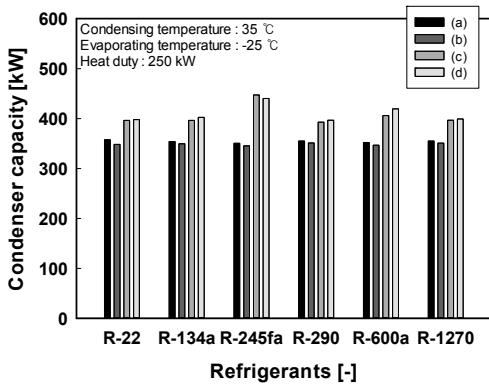


Fig. 6 Condenser capacity with various refrigerants

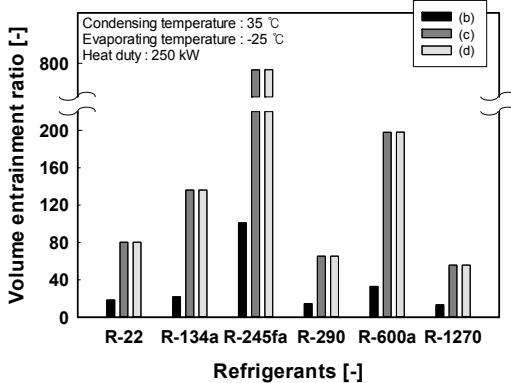


Fig. 7 Volume entrainment ratio with various refrigerants

Fig. 7은 액-증기 이젝터의 실제 구현의 기준으로 삼을 수 있는 체적유인비를 나타낸 그래프이다.

다. 액-증기 이젝터의 경우 비압축성 유체인 냉매액을 Motive유체로 하기 때문에, 체적유량비가 과하게 되면 오히려 Suction에 압력이 누적된다. 그렇게 되면 이젝터 본연의 목적인 압력회복이 정상적으로 이루어지지 못하기 때문에 이젝터의 체적유인비를 계산해 이젝터 냉동사이클에 적합한 냉매를 분석하였다. (b)에서 R-245fa를 제외하면 13~33의 체적유인비를 보인다. (c)와 (d)의 경우 (b)와 비교하여 모든 냉매에서 약 3~43배 높은 수치를 나타냈다. 특히 R-245fa의 경우, 증기의 밀도가 대단히 낮아 액의 밀도와 큰 차이를 보이기 때문에 최대 약 796의 체적 유인비를 나타냈다.

5. 결론

본 논문에서는 냉동사이클의 고성능화를 위해 최근 연구가 활발한 이젝터를 적용하여 기본 냉동사이클과 세 가지 이젝터 냉동사이클을 대상으로, 6종의 다양한 냉매가 적용되었을 때의 성능을 HYSYS를 사용해 동일한 조건에서 비교 분석하였다.

1) 이젝터를 적용한 모든 사이클의 COP가 약 4~74% 증가하였으며, 그 원인은 이젝터의 압력회복 기능에 따라 압축비 및 전체 일량이 감소했기 때문이다.

2) (d)사이클에 R-245fa를 적용한 경우, COP가 가장 우수함을 확인하였다.

3) 이젝터를 적용한 결과 (c), (d)의 응축열량이 약 10~27% 증가하기 때문에, 열교환기의 사이즈를 확대해야 하며, 기계실 공간을 고려해 시스템을 선정하는 것이 좋다.

4) (b)사이클의 경우, R-245fa를 제외하고 13~33의 체적유인비를 보였으며, R-245fa는 모든 사이클에서 높은 체적유인비를 나타냈다.

이젝터를 적용한 냉동사이클의 다양한 온도, 부하 등에 대한 이론의 확립이 필요하며, 추후 실증화 실험을 통해 실용화를 위한 연구를 위해서는 지속적으로 후속 연구가 이루어질 필요가 있다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비 (2016년)에 의하여 연구되었음.

References

1. Xiao Wang, Jianlin Yu, 2016, "Experimental investigation on two-phase driven ejector performance in a novel ejector enhanced refrigeration system", *Energy Conversion and Management* 111, pp. 391-400.
2. T. G. Park, I. S. Jung, H. T. Chung and H. M. Jeong, 2009, "CFD Simulation on Performance Parameters of an Ejector", *The Korean Society For Power System Engineering*, 11, pp. 34-37.
3. J. I. Yoon, C. L. Kim, C. H. Son, 2015, "Performance comparison of refrigeration cycle using R134a with the vapor-liquid ejector", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 39, No. 9, pp. 890-894.
4. N. Lawrence and S. Elbel, 2013, "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.
5. Aspen HYSYS, Version 8.0, Aspen Technology Inc.
6. J. I. Yoon, C. H. Son, S. M. Baek, B. H. Yea, H. J. Kim and H. S. Lee, 2013, "Performance characteristics of a high-efficiency R717 OTEC power cycle", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 72, pp. 304-308.