

이젝터를 적용한 팽창기체 흡입 냉동시스템의 성능향상 해석 연구

윤상국[†]

(원고접수일 : 2014년 7월 7일, 원고수정일 : 2014년 7월 30일, 심사완료일 : 2014년 8월 18일)

Theoretical study on the performance improvement of refrigeration system installed with ejector entraining expansion gases after expansion process

Sangkook Yun[†]

요약: 본 연구는 이젝터 팽창기를 적용한 냉동기에서 팽창한 냉매가 액기분리기에 포집된 후, 이 증포화기체의 일부는 이젝터로 재흡입되고, 포화액체는 증발기에 유입되어 증발된 후 액기분리기의 잔여 기체와 혼합되어 압축되는 공정을 고안하여 특성을 해석하였다. 본 공정의 특성은 이젝터에서 등엔트로피 팽창 후 액체량의 증가로 냉동능력이 증가하고, 압축기에 유입되는 기체의 압력이 상승하게 되어 압축일이 감소함으로써 효율이 증가하게 된다. 냉매 R134a를 적용하는 냉장고 시스템과 본 고안 시스템을 비교한 결과, 이젝터에서 압력이 65% 저하될 때 COP는 27.8%가 증가된 최대값이 되었다. 다른 냉매의 경우 R401A가 75% 압력강하에서 40.1%의 COP 증가를 보였다. 이젝터의 디퓨저에서의 압력 상승율이 20%~60%까지 변화될 때, COP 증가율은 2.6%~3%로 영향이 매우 적었다.

주제어: 이젝터, 액기분리기, 냉동능력, 압축일량, 성능계수

Abstract: In this paper, the performance characteristics for newly developed ejector refrigeration system, which is that the part of saturated vapor from liquid-vapor separator after ejector expansion process is entrained in ejector, and the saturated liquid flows in the evaporator and compressed with the rest of vapor in separator, is studied. The reasons of the performance improvement of refrigeration system are that the refrigeration capacity is increased due to quality reduction after iso-entropic expansion process by ejector and the compression work is reduced because of the relatively high pressure of vapor refrigerant before compression process. The comparison results of the ejector system entraining expansion gases with the present residential freezer show that the COP increases to 27.8% maximum in case of the pressure drop to 65% of high pressure of freezer, and to 40.1% for 75% pressure drop of refrigerant R401A. The COP improvement rate with 20%~60% pressure lift in diffuser of ejector is only 2.6%~3%.

Keywords: Ejector, Liquid-vapor separator, Refrigeration capacity, Compression work, COP

1. 서론

세계 각국은 이산화탄소의 배출을 억제함으로써 지구온난화의 문제를 해결하고자 에너지 소비 기기의 효율을 높이기 위한 많은 노력을 하고 있다. 일반적으로 가정용 냉장고를 포함한 냉동기

는 외부로부터 열이 침입하면 냉동기가 지속적으로 가동되는 전력소비가 큰 기기이다. 대표적 냉동기인 냉장고는 모든 가정에 1개 이상 보유하고 있는 바, 이의 효율개선은 국가적 에너지절약, CO₂ 발생 저감 측면에서 매우 의미가 큰 자명

[†] Corresponding Author: Division of Mechanical & Energy Systems Engineering, Korea Maritime Ocean University, Dongsam-dong, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: skyun@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4363

한 일이다. 냉장고 효율개선의 한 방법으로 이젝터를 적용한 연구가 수행되고 있으며[1], 각종 냉동기의 효율 개선하기 위한 많은 이젝터 적용 연구와 특허가 출원되고 있다[4]-[10]. 또한 이젝터를 적용한 냉동시스템 연구들을 검토, 분석한 논문들이 발표되고 있다[2][3].

이젝터 시스템의 특징은 팽창과정이 등엔트로피 과정으로 압력강하가 일어나 기존 사이클의 등엔탈피 팽창에 의한 손실을 감소시키는 것이다. 또한 이젝터의 디퓨저(Diffuser)부는 압력을 상승시키는 승압 기능을 갖는다. 이젝터는 냉동기 효율을 향상시키고, 구조가 간단하며 구동부가 없어 유지 및 관리가 용이하고 신뢰성이 높아 실제 냉동기에 적용이 쉬운 관계로 이의 적용 연구가 널리 진행되고 있는 것으로 보인다[2][3].

그러나 단점으로는 이젝터에서의 압력강하가 증발기의 압력보다 낮아야 하고, 많은 양의 냉매가 소요되며, 증발기의 증발한 기체 전부를 흡입하여야 하여 이젝터의 크기가 커지게 되고, 이젝터의 효율에 따라 냉동기 효율이 영향을 크게 받게 되므로 이의 효율 개선을 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 또한 모든 이젝터 적용 사이클은 응축된 냉매액이 이젝터를 통과하면서, 증발기에서 증발한 저압의 냉매 기체를 흡입하는 공정으로 이루어져 있다[1]-[10]. 이는 증발기의 냉매기체 전부가 이젝터에서 흡입되는 것으로 이젝터의 흡입 성능이나 압력강하 성능에 의하여 운전과 냉동기 성능이 크게 좌우되는 문제를 갖는다.

이에 본 연구에서는 새로운 시스템으로 이젝터에서 팽창된 냉매를 액기분리기에서 분리하고 이때 생성된 기체 중 일부를 이젝터로 재순환시키고 액체만이 포화상태로 증발기에 유입한다. 액기분리기의 잔여 냉매기체는 중간압력으로 증발기 출구의 저압기체와 혼합되어 압축기에서 압축됨으로써 압축일량이 감소하는 시스템을 고안하여 해석하였다.

공정의 해석은 열손실이 없는 이론적 사이클을 기준하여 해석하였으며, 열역학 물성값은 미국 NIST의 Refprop 9.0을 사용하여 산정하였다. 본 기술이 널리 보급되고 있는 가정용과 상업용 냉

동고 등에 적용된다면 에너지 이용 효율을 높여 국가 에너지절약에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 냉동시스템 분석

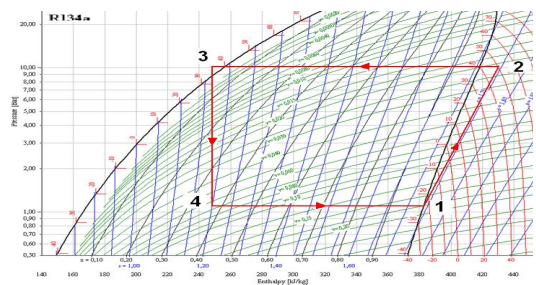
2.1 기존 냉동시스템 분석

기존의 1개의 모세관을 적용한 냉장고 냉동시스템과, 본 연구의 이젝터와 액기분리기를 적용한 냉동시스템을 비교하고 성능을 분석하였다. 기존 냉장고에 적용되는 시스템은 압축기, 응축기, 모세관 팽창장치, 증발기로 구성된다.

Figure 1은 냉매 R134a가 적용된 냉장고 사이클의 모리엘 선도로 공정을 보면, 압축기 입구측 -25℃, 0.1064 MPa의 포화기체가 1.0166 MPa까지 등엔트로피 과정으로 압축되고, 응축기에서 40℃에 액화된 후 35℃로 5℃만큼 과냉되어 팽창된다. 팽창은 모세관에서 교축과정인 등엔탈피 과정으로 압력이 0.1064 MPa로 강하되면서 온도가 -25℃로 저하되고 건도가 0.37835이 되어 증발기에서 흡열을 하게 된다. 냉장고의 압축과정에서의 등엔트로피 값은 1.7461 kJ/kg·K이며, 압축기 토출 온도는 50℃가 된다.

이 냉동고 공정의 냉동효과(Qe)는

$$Q_e = m(h_1 - h_4) \tag{1}$$



Points	1	2	3	4
T.(℃)	-25	50.04	35	-25
P(MPa)	0.1064	1.0166	1.0166	0.1064
h(kJ/kg)	383.45	430.58	248.99	248.99

Figure 1: Mollier diagram of simple refrigeration system of residential freezer.

으로 134.46 kJ/s가 되고, 여기서 질량유량흐름(m)을 1 kg/s로 기준하면 압축일량(W)은 47.13 kJ/s가 된다. 그러므로 이 공정의 성능계수(COP)는 아래 식에서 2.853이 된다. 여기서 h는 엔탈피이다.

$$COP = Q_e/W = m(h_1 - h_4)/m(h_2 - h_1) \quad (2)$$

2.2 기존 이젝터 적용 시스템

Figure 2는 현재 널리 연구되고 있는 이젝터를 적용한 대표적 냉동사이클 시스템도와 p-h 선도이다. 지점 3의 응축기에서 고압의 과냉 냉매액은 이젝터에서 등엔트로피 과정(3→4)으로 증발기 압력보다 낮은 압력까지 팽창하게 된다. 압력이 강하되면서 온도가 저하된 액기 혼합냉매는 액기분리기에 포집된다. 액기분리기의 기체(1)는 압축기에 흡입되어 압축되며, 액체는 추가 팽창과정(8→8a)을 거쳐 증발기에 주입된다. 이 증발기에서 기화된 냉매는 전량 이젝터에서 흡입되어 액기분리기로 흐르게 된다.

그림의 모리엘선도에서 응축된 액체 냉매는 5℃ 만큼 과냉되어 35℃에 응축기에서 이젝터를 통하여 0.1064 MPa까지 등엔트로피 팽창된다면 건도는 0.33471이 되고, 증발에 이용되는 냉동능력

은 143.87 kJ/s로 등엔탈피 팽창의 134.46 kJ/s 보다 6.9% 증가하게 된다. 압축과정을 보면 이젝터의 디퓨저에서 6→7로 승압된 후 지점 1에서 지점 2까지 압축된다. 이때 압축일량은 이젝터의 디퓨저에서 상승된 압력만큼 압축일량이 감소하게 된다. 냉장고 조건에 맞춘 해석 문헌에 의하면 COP 향상이 이젝터 효율이 80%일 때 22.9%, 100%일 때 50.8% 향상됨을 제시하고 있다[1].

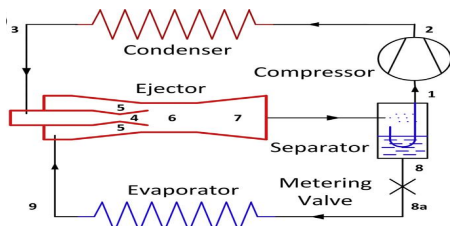
2.3 팽창기체 흡입 이젝터 적용 시스템

Figure 3과 Figure 4는 본 연구에서 새로이 고안한 공정과 p-h 선도를 나타낸다. Figure 3은 팽창기체 흡입 이젝터를 적용한 냉동 시스템이다. 본 고안 공정의 해석기준은 압축되는 기체질량유량흐름(m)을 1 kg/s로 기준하였으며, 액기분리기에서 이젝터로 재흡입된 냉매기체량(6) 만큼 압축기 흡입 기체량(6')이 발생하는 것으로 하였다.

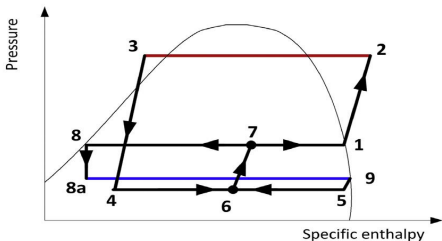
시스템의 원리를 보면, 응축기(b)에서 액화된 냉매가 이젝터(c)에서 중간압력(3')까지 등엔트로피 과정으로 팽창하여 건도가 생성되면서 액기분리기(d)에 포집된다. 이 중 생성된 중간압력의 포화기체(6)는 이젝터로 다시 반송되어 흡입되고 이젝터 용량을 초과한 기체는 압축기로 흡입된다. 이 중간압력의 기체는 증발기의 저압기체와 합하여져 압축됨으로써 압축일량이 감소하게 되는 것이다. 액기분리기내 포화액체(7)는 추가 팽창장치(e)를 거쳐 최종 압력과 온도가 되어 증발기(f)에 주입된다.

Figure 4는 개발 공정의 모리엘 선도이다. 이젝터에서 등엔트로피 팽창된 중간압력의 냉매 3'는 이젝터내에서 반송 흡입되는 6, 4'와 합하여져 5'가 되고 이젝터 디퓨저부(5'→5)에서 압력이 상승하여 상태 5가 된다. 통상 디퓨저부의 압력 상승은 20~60%로 알려져 있다[1]. 지점 5의 액기 혼합물은 액기분리기에서 포화액체 7이 등엔탈피 교축팽창과정으로 지점 8이 되어 증발기에 주입되고, 포화기체 6은 이젝터로 흡입되며, 잔여기체 6'는 증발기 기체와 합하여져 압축된다.

본 고안시스템의 장점으로 Figure 4에서 보는 바와 같이 이젝터의 팽창이 증발압력 보다 높은 중간압력까지의 팽창으로 이젝터의 운전성이 향



(a) Diagram of ejector system

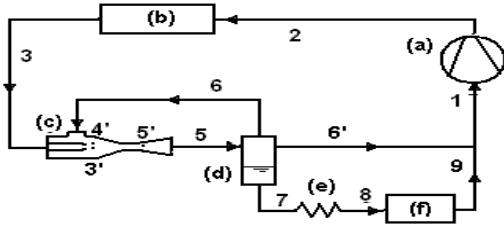


(b) Mollier diagram of ejector system

Figure 2: Typical system of ejector refrigeration.

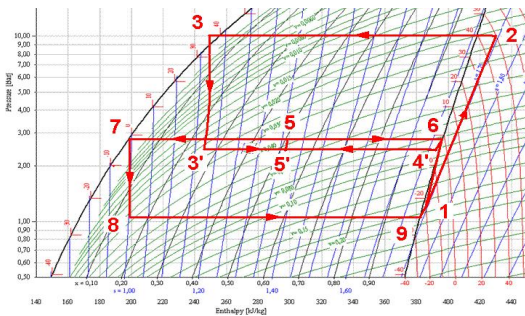
상되는 점이다. 기존 이젝터 시스템인 **Figure 2**와 의 구조적 차이점은 증발기 냉매기체가 이젝터에 전량 흡입되는 반면, 본 고안 시스템은 압축기로

흡입되어 이젝터의 부하가 크게 경감되는 것이다. 또한 본 고안은 공정이 간단하고 충전 냉매량이 크게 감소하게 된다.



(a) Compressor, (b) Condenser, (c) Ejector, (d) Liquid/vapor separator, (e) Capillary tube, (f) Evaporator

Figure 3: Vapor entrained ejector system(VEES).



Points	1	2	3	3'
T.(°C)	-17.0	46.5	35	-6.3
P(MPa)	0.2779	1.0166	1.0166	0.2316
h(kJ/kg)	388.35	428.22	248.99	244.31
m(kg/s)	1.0	1.0	1.0	1.0

4'	5'	5	6	6'
-6.3	-6.3	-1.4	-1.4	-1.4
0.2316	0.2316	0.2779	0.2779	0.2779
394.88	275.32	276.83	397.77	397.77
0.25935	1.25935	1.25935	0.25935	0.25935

7	8	9
-1.4	-25	-25
0.2779	0.1064	0.1064
198.08	198.08	383.45
0.74065	0.74065	0.74065

Figure 4: Mollier diagram of VEE system.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 냉동효과 및 압축일량의 변화

Figure 5는 이젝터에서 팽창이 1.0166 MPa로 부터 0.1064 MPa, -25°C까지 일어날 때와 중간 압력(**Figure 4**의 지점 3')이 0.6066 MPa, 0.4816 MPa, 0.3566 MPa, 0.2316 MPa 때의 압력강하 폭에 따른 냉동능력과 압축일량의 변화를 보여준다. 이 때 이젝터의 성능 효율은 100%로 하였고 압축기의 압축질량은 1 kg/s를 기준하여 분석하였다. 이젝터 효율은 노즐 직경, 디퓨저의 길이, 확산 각도, 규격 등 다양한 인자들의 영향을 받게 되나, 본 연구에서는 이젝터에서의 압력강하 정도와 디퓨저부에서의 압력 상승 능력 변화에 대하여만 이론적으로 비교 분석하였다.

그림에서 보면, 이젝터에서 압력강하의 폭이 클수록 냉동능력은 증가하고 압축일량은 감소 후 증가를 보여준다. 냉동능력은 압력강하가 크면 등엔트로피 팽창에 의한 냉매액량이 증가하기 때문이고, 압축일량의 변화는 압력강하가 크게 되면 등엔트로피 압축열량이 증가하기 때문으로 분석된다. 대표적 산정 경우로 **Figure 4** 공정을 기준하여 분석한다. 이젝터에서 1.0166 MPa로부터 0.2316 MPa까지 압력강하가 발생하는 경우 건도는 0.25935가 되며, 이젝터 디퓨저부에서 승압이 적은

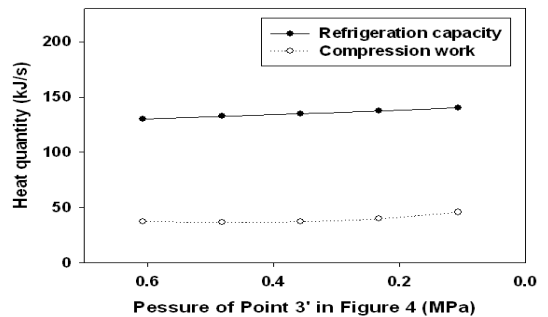


Figure 5: Refrigeration capacity and work requirement for each pressure drop of VEE system.

값인 20% 상승되는 것으로 가정하여 0.27792 MPa로 하였다. 액기분리기로부터 이젝터로 흡입되는 냉매기체량은 팽창 때 기화된 건도의 일부가 흡입되며, 이 양만큼 압축기에도 흡입되는 것으로 한다. 액기분리기의 액체 7은 모세관 교축팽창(지점 7→8)이 이루어지므로 증발기 유입 냉동능력은

$$Q_e = m_7 (h_9 - h_8) \quad (3)$$

로 137.29 kJ/s가 된다. 압축일량은 팽창과정에서 이젝터에서 흡입한 양만큼 증발기에서 토출되는 기체와 합하여져 압축기에 흡입되는 일량이다. 먼저, 압축기 입구인 지점 1의 압력(P_1)은

$$P_1 = m_9 P_9 + m_6 P_6 \quad (4)$$

로 0.15032 MPa이 되고, 이 지점 1의 포화기체 엔탈피는 388.35 kJ/kg이 된다. 그러므로 지점 2까지의 압축일량은 39.87 kJ/s가 되어 COP는 3.44로 증기압축 냉동시스템보다 20.7% 증가한다.

3.2 압력강하 폭에 따른 성능 변화

Figure 6은 응축기 압력인 1.0166 MPa에서 이젝터를 통과하면서 팽창될 때의 냉동기 성능 변화를 보여준다. 이젝터에서 압력이 65% 강하된 0.419 MPa로 팽창할 때 냉동기 효율 향상이 27.8%로 최대값을 보였다. 압력강하가 이보다 적거나 크면 COP는 감소하였다. 압력강하가 큰 경우에 COP가 감소하는 이유는 이젝터의 등엔트로피 팽창으로 냉매액은 증가하여 냉동능력은 향상되나, 반면 압축일량은 이젝터로부터 흡입되는 기체 압력이 낮아 등엔트로피 일량이 증가하게 되는 데 기인한 것이다.

3.3 이젝터 승압 변화에 따른 COP 변화

Figure 7은 이젝터 팽창 후 디퓨저부에서 압력이 20~60% 상승될 때의 효율 변화를 나타낸 것이다. 이젝터에서 0.2316 MPa까지 압력강하가 발생한 Figure 4의 경우를 보면, 이젝터 디퓨저부에서 승압이 20% 상승할 때 효율증가율은 20.7%가 되었으며, 60% 상승한 0.37056 MPa의 경우에는 효율 증가율이 23.3%로 2.6% 증가에 불과하였다. 즉, 이젝터 디

퓨저부 승압에 의한 냉장고 효율에의 영향은 매우 적은 것으로 분석되었다.

3.4 기타 냉매의 이젝터 냉동시스템 성능

Figure 8은 냉동기에 널리 쓰이는 대표적 냉매들의 팽창기체 흡입 이젝터 시스템에서의 성능 변화를 보여준다. 분석 기준은 R134a와 동일한 증발기 온도와 응축기 온도로 하였으며, 팽창압력은 이젝터에서 50%, 75%까지 감압되는 경우를 검토하였다. 비교한 냉매 중 성능계수 향상이 제일 큰 냉매는 R401A로 50% 압력강하에 대하여 38.1%, 75% 압력강하에 대하여는 40.1%의 증가를 나타내었다. 이는 냉매의 이젝터 압력강하에 따른 건도 생성량의 감소, 포화액의 냉동능력, 압축일량의 감소의 냉매특성에 기인한 것이다.

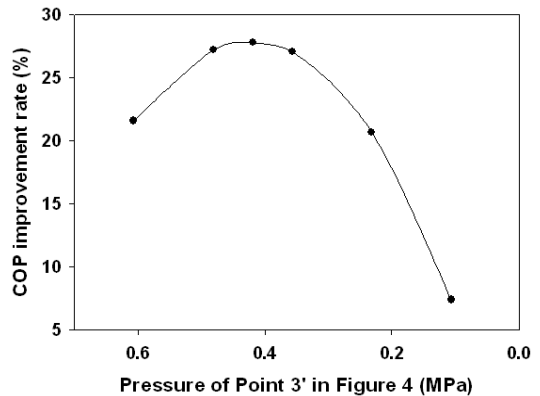


Figure 6: COP improvement rate for each pressure drop of VEE system.

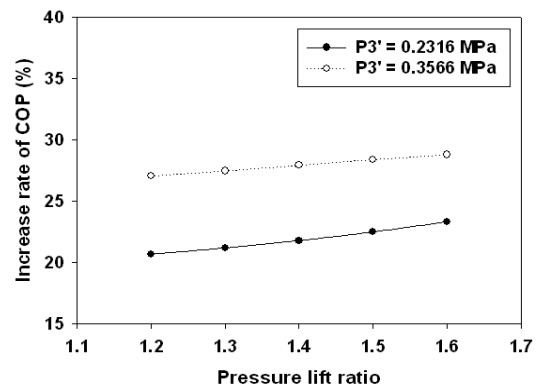


Figure 7: COP change with pressure life ratio.

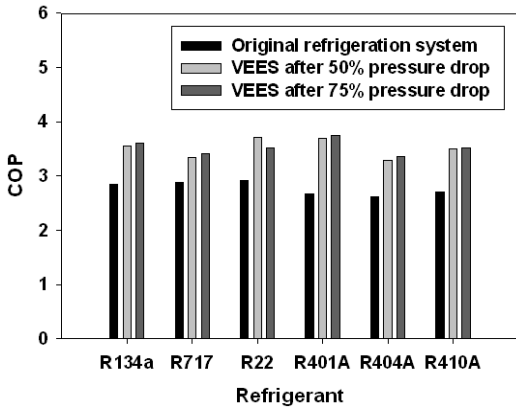


Figure 8: COP of various refrigerants.

4. 결 론

본 연구에서는 팽창장치로 이젝터를 적용하여 발생하는 냉매기체를 이젝터로 재순환시키는 냉동기 시스템을 고안하여 열해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 팽창 이젝터를 통한 냉장고 COP는 기존 증기 압축식 시스템에 비하여 크게 증가하며, 냉장고 냉매인 R134a 경우 압력이 65%까지 저하될 때 COP가 27.8% 상승하여 최대가 되었다.

(2) 이젝터에서 등엔트로피 팽창으로 냉동효과가 증가하고, 압축기 흡입 냉매량이 감소하여 압축일이 크게 감소한다.

(3) 이젝터 팽창 후 디퓨저부에서 압력이 20%~60% 상승할 때 효율 변화는 2.6%~3% 증가로 영향이 매우 적었다.

(4) 기타 냉매에 있어서도 효율이 향상되었으며 비교 냉매 중 R401A의 COP 향상이 40.1%로 제일 크게 얻어졌다.

향후 다양한 냉동시스템에 적용하여 에너지절약 효과를 분석하고자 한다.

참고문헌

[1] M. Zhou, X. Wang, and J. Yu, "Theoretical study on a novel dual-nozzle ejector enhanced refrigeration cycle for household refrigerator-freezers," *Energy Conservation and Management*, vol. 73, pp. 278-284, 2013.

[2] A. B. Little and S. Garimella, "A review of ejector technology for refrigeration applications." *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, vol. 19, no. 1, pp. 1-15, 2011.

[3] K. Sumeru, H. Nasution, and F. N. Ani, "A review on two-phase ejector as an expansion device in vapor compression refrigeration cycle" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 4927-4937, 2012.

[4] F. Liu and E. A. Groll, "Study of ejector efficiencies in refrigerant cycles," *Applied Thermal Engineering*, vol. 52, pp. 360-370, 2013.

[5] A. Khalil, M. Fatouh, and E. Elgendy, "Ejector design and theoretical study of R134a ejector refrigeration cycle," *International Journal of Refrigeration*, vol. 34, pp. 1684-1698, 2011.

[6] C. Lucas and J. Koehler, "Experimental investigation of the COP improvement of a refrigeration cycle by use of an ejector," *International Journal of Refrigeration*, vol. 35, pp. 1595-1605, 2012.

[7] Y. Jia and C. Wenjian, "Area ratio effects to the performance of air-cooled ejector refrigeration cycle with R134a refrigerant," *Energy Conservation and Management*, vol. 53, pp. 240-246, 2012.

[8] A. Khalil, M. Fatouh, and E. Elgendy, "Ejector design and theoretical study of R134a ejector refrigeration cycle," *International Journal of Refrigeration*, vol. 34, pp. 1684-1698, 2011.

[9] M. Ikegami and K. Kayano, "Refrigeration cycle device." *Japan Patent PCT/JP2012/004557*, July. 17, 2012.

[10] Kabusakigaishya Denso, "Ejector and ejector cycle device", *Korean Patent 1020060121757*, Nov., 29, 2006.