

다양한 냉매를 적용한 내부열교환기 부착 2단 압축 냉동시스템의 성능 분석

Performance Analysis of Two-stage Compression Refrigeration System with Internal Heat Exchanger Applied Various Refrigerants

윤정인* · 허성관** · 제재면** · 전민주** · 손창효****† · 문정현****
 Jung-In Yoon*, Seong-Kwan Heo**, Jae-Myun Je**, Min-Ju Jeon**,
 Chang-Hyo Son****† and Jung-Hyun Moon****

(Received 12 October 2015, Revision received 01 December 2015, Accepted 01 December 2015)

Abstract: In this paper, cycle performance analysis of two-stage compression and one-stage expansion refrigeration system applied various refrigerants is presented to offer the basic design data for the operating parameters of the system. The operating parameters considered in this study include degree of superheating and subcooling, compressor efficiency, evaporation temperature, condensing temperature, mass flow rate ration into inter-cooler, effectiveness of internal heat exchanger. The main results were summarized as follows : The COP of two-stage compression and 1-stage expansion refrigeration system increases with the increasing subcooling, mass flow rate ration of inter-cooler, evaporation temperature, but decreases with the increasing condensing temperature and superheating degree. Therefore, subcooling degree, mass flow rate ratio of inter-cooler of two-stage compression and 1-stage expansion using substitute refrigerant have an effect on COP of this system. The COP of alternative refrigerants was higher than the COP of R22 in this study, although the COP of some mixed refrigerants were lower than COP of R22.

Key Words : Two-stage compression and one-stage expansion refrigeration system, Alternative refrigerant, Internal heat exchanger, COP, Mass flow-rate

— 기 호 설 명 —

	C_p	: 정압비열	[kJ/kg°C]
	h	: 엔탈피	[kJ/kg]
COP	: 성능계수	m	: 질량유량 [kg/s]

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

*윤정인 : 부경대학교 냉동공조공학과

**허성관, 제재면, 전민주 : 부경대학교 냉동공조공학과 대학원

****문정현 : 선박해양플랜트연구소

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

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

*Jung-In Yoon : Department of Refrigeration and Air Conditioning, Pukyong University.

**Seong-Kwan Heo, Jae-Myun Je, Min-Ju Jeon : Department of Refrigeration and Air Conditioning, Pukyong University, undergraduate

****Jung-Hyun Moon : Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

Q : 전열량 [kW]
 T : 온도 [°C]
 W : 압축일량 [kW]

발온도를 필요로 한다. 이와 같이 낮은 온도의 증발온도를 얻기 위해서는 단단 냉동 시스템이 아닌 2단 압축 시스템 또는 2원 냉동 시스템을 이용한다. 본 연구에서는 2단 시스템에 대해 알아보도록 한다. 지금까지 2단 압축 1단 팽창식 냉동 시스템에 사용되어 왔던 프레온계 냉매는 오존층을 파괴하고 지구온난화에 영향을 미치는 환경오염 물질로 분류되어 규제가 가속화 되고 있는 실정이다. 따라서 이에 대한 대체 냉매로 R717(암모니아), R600a(이소부탄), R1270(프로필렌)과 같은 자연냉매가 거론되고 있다. 이는 몬트리올 의정서에 의해 2030년에 프레온계 냉매는 규제대상이 된다는 것을 고려할 때 자연냉매의 사용이 증가하는 것은 당연하다. 그동안 2단 압축 1단 팽창식 냉동 시스템의 성능 분석에 대한 연구^{1,3)}를 살펴보면 냉매를 각각 분석한 연구는 있지만 프레온계 냉매와 자연냉매를 동시에 비교·분석한 연구 결과는 전무한 상태이다.

그리스 문자

Δ : 변화량
 η : 효율
 ε : 유용도

하첨자

c : 압축, 응축기
 e : 증발기
 H : 고단축
 IHX : 내부 열교환기
 L : 저단축
 m : 기계
 suc : 과냉각도
 suh : 과열도

따라서 본 논문에서는 내부열교환기²⁾가 부착된 2단 압축 1단 팽창식 냉동시스템에서 프레온 단일냉매(R22, R32, R134a), 프레온계 혼합냉매(R404A, R410A, R507A), 탄화수소계 자연냉매(R600a, R717, R1270) 등을 동시에 과냉도, 과열도, 유용도, 응축온도, 중간냉각기유량, 증발온도의 변화에 따라 COP에 미치는 영향을 비교·분석하였다. 이를 통해 2단 압축 1단 팽창식 냉동시스

1. 서 론

많은 중·대형 냉동설비에서 저온의 동결 식품의 저장과 급속 냉동은 -30~-50°C 범위의 저온 증

Table 1 Energy and mass balance equation for each component of refrigeration system

Component	Energy	Mass
Low stage compressor(2→3)	$W_L = m_L(h_3 - h_2)/\eta_{mL}\eta_{dL}$	$m_H = m_M + m_L$ $m_M = m_L \left[\frac{(h_7 - h_9) + (h_3 - h_4)}{(h_4 - h_8)} \right]$ $m_H = m_L \left[\frac{(h_3 - h_9)}{(h_4 - h_8)} \right]$
Intercooler(3→4)	$Q_{m,suc} = m_L(h_3 - h_4)$	
High stage compressor(4→5)	$W_H = m_H(h_5 - h_4)/\eta_{mH}\eta_{dH}$	
Condenser(5→6)	$Q_c = m_H(h_6 - h_5)$	
Internal heat exchanger(6→7)	$Q_{IHX} = m_H C_p (T_6 - T_7)$	
Intercooler Expansion valve(7→8)	$h_7 = h_8$	
Intercooler(8→4)	$Q_m = m_M(h_4 - h_8)$	
Intercooler(7→9)	$Q_{m,suc} = m_L(h_9 - h_7)$	
Main Expansion valve(9→10)	$h_9 = h_{10}$	
Evaporator(10→1)	$Q_e = m_L(h_1 - h_{10})$	
Internal heat exchanger(1→2)	$Q_{IXH} = m_L C_p (h_2 - h_1)$	

템의 설계에서 시스템에 맞는 최적의 냉매 선택을 위한 기초자료를 제공하고자 하는 것이 본 논문의 목적이다.

2. 성능 분석

본 논문에서 사용되는 냉매의 열역학적 물성과 성능 분석은 EES(Engineering Equation Solver)4) 소프트웨어를 이용하여 계산하였다. 총 9가지의 냉매를 적용한 2단 압축 2단 팽창 냉동시스템의 성능 분석을 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 저단과 고단의 압축기내 냉매는 단열압축 과정이고, 압축효율과 기계효율은 각각 0.8이다.
- 냉매배관의 압력강하와 열손실은 무시한다.
- 열교환기(증발기, 응축기, 내부열교환기)내 냉매 압력강하와 열손실은 무시한다.
- 팽창밸브내 냉매는 단열팽창인 등엔탈피과정이다.
- 운동에너지와 위치에너지의 변화는 없는 것으로 가정한다.

Fig. 1은 본 연구에서 적용하는 2단 압축 냉동시스템의 상세도를 나타낸 것이고, 분석에 필요한 식들은 Table 1에 정리하였으며, Fig. 2는 냉동사이클의 성능 분석을 하기위한 운전조건이다. 그리고 내부열교환기의 유용도²⁾는 아래의 식 (1)로 계산한다.

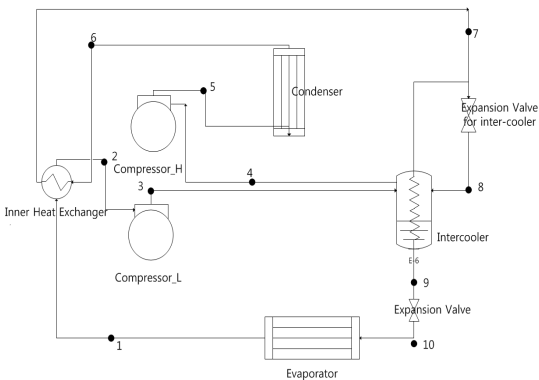


Fig. 1 Schematic diagram 2-stage compression and 1-stage expansion refrigeration system attached internal heat exchanger

Table 2에 나와 있는 분석조건에서 중간냉각기 유량비는 냉매마다 그 한계치가 존재한다. 대부분 냉매가 0.4 이상이 되면 소프트웨어 상에서 사이클이 성립하지 않는다.

Table 2 Analysis conditions

Refrigerant	R22, R32, R134a, R404A, R410A, R507A, R600a, R717, R1270
$T_c, [^{\circ}\text{C}]$	40*, 45, 50, 55, 60
$T_e, [^{\circ}\text{C}]$	-50*, -45, -40, -35, -30
$\Delta T_{\text{suc}}, [^{\circ}\text{C}]$	0, 5*, 10, 15, 20
$\Delta T_{\text{sub}}, [^{\circ}\text{C}]$	0, 5*, 10, 15, 20
$\eta_c = \eta_{\text{cL}} = \eta_{\text{cH}}, [/]$	0.6, 0.7, 0.8*, 0.9, 1.0
$\eta_m = \eta_{\text{mL}} = \eta_{\text{mH}}, [/]$	0.6, 0.7, 0.8*, 0.9, 1.0
$\frac{G_m}{G}, [/]$	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3*
$\varepsilon, [/]$	0.1, 0.2, 0.3*, 0.4, 0.5

*Standard condition

$$\varepsilon = \frac{T_{e,o} - T_{e,i}}{T_{c,i} - T_{e,i}} = \frac{T_2 - T_1}{T_6 - T_1} \quad (1)$$

2단 압축 냉동시스템의 COP는 아래의 식 (2)로 계산한다.

$$\text{COP} = \frac{Q_e}{W_H + W_L} = \frac{(h_1 - h_{10})}{(h_3 - h_2) + \frac{(h_3 - h_9)}{(h_4 - h_8)}(h_5 - h_4)} \quad (2)$$

총 9가지 냉매(R22, R32, R134a, R404A, R410A, R507A, R600a, R717, R1270)의 열물성치(엔탈피, 엔트로피, 압력, 온도 등)와 COP는 EES를 이용하여 계산하였다. 이렇게 해서 나온 결과값을 이용하여 2단 압축 냉동시스템에서 과열도, 과냉도, 압축효율, 응축온도, 증발온도, 중간냉각기 유량, 내부열교환기의 유용도 등의 변수에 따라 각 냉매에 대한 성능을 분석해 보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 과열도의 영향

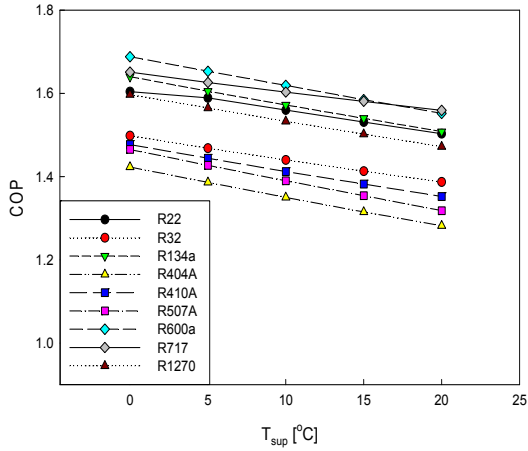


Fig. 2 The effect of superheating degree for 2-stage compression and 1-stage expansion system COP.

Fig. 2는 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템에 대한 과열도 영향을 파악하기 위해 증발온도(T_e) -5°C , 응축온도(T_c) 40°C , 과냉각도(T_{sub}) 5°C , 고단 및 저단 압축기의 기계효율($\eta_{\text{mL}}, \eta_{\text{mH}}$) 및 압축효율($\eta_{\text{cL}}, \eta_{\text{cH}}$) 0.8, 중간냉매유량비(G_{m}/G) 0.3, 내부열교환기 유용도(ϵ) 0.3으로 일정하게 유지되고 있는 상태에서 과열도를 증가시키며 그에 따른 9가지 냉매별 성능계수(COP)의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 2에서와 같이 과열도가 증가함에 따라 COP가 전체적으로 감소하는 경향을 보인다. 그 이유는 과열도가 증가하면 토출가스온도의 상승, 저단축 흡입 냉매증기의 비체적증가에 따른 압축 일량이 증가하기 때문이다. 같은 과냉도에서는 R600a와 R717이 가장 높은 COP를 보이고 있고, 그 변화량은 0.94%에서 2.59%까지 감소하였다.

3.2 과냉도의 영향

Fig. 3은 2단 냉동시스템에서의 과냉도의 영향을 분석하기 위해 증발온도 -50°C , 응축온도 4

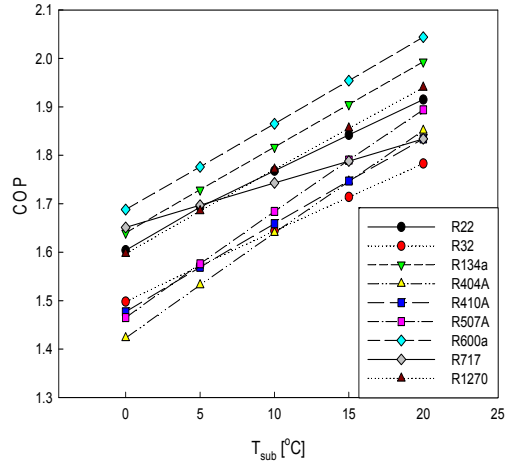


Fig. 3 The effect of subcooling degree for 2-stage compression and 1-stage expansion system COP.

0°C , 과열도 5°C , 고단 및 저단 압축기의 기계효율 및 압축효율 0.8, 중간냉매유량비(G_{m}/G) 0.3, 내부열교환기 유용도(ϵ) 0.3으로 일정하게 유지시키고 있는 상태에서 과냉도를 증가시키며 COP 변화를 나타내었다. 과냉도가 증가할수록 2.57%~7.66% 까지 증가되고 있다. 과냉도가 증가하면 팽창밸브로 들어가는 냉매의 온도가 낮아져 교축작용 이후 증발기로 들어가는 냉매의 건도가 작아져 냉동효과가 증가하여 COP가 증가한다. 하지만 과냉도가 5°C 씩 증가할수록 COP의 증가량은 감소한다. 과냉도의 전체적인 변화에서 R600a, R134a, R1270이 높은 COP를 보인다. 그리고 과냉도가 5°C 이상에서는 R717이 R22와 R1270보다 낮은 COP를 나타낸다.

3.3 증발온도의 영향

Fig. 4는 2단 냉동시스템에서의 증발온도의 영향을 분석하기 위해 응축온도 40°C , 과냉각도 5°C , 과열도 5°C , 고단 및 저단 압축기의 기계효율 및 압축효율 0.8, 중간냉매유량비 0.3, 내부열교환기 유용도 0.3으로 일정하게 유지시키고 있는 상태에서 증발온도를 -50°C ~ 30°C 까지 증가시키며 COP 변화를 나타내었다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 증발온도가 저온일수록 COP는 10.33%~11.56%

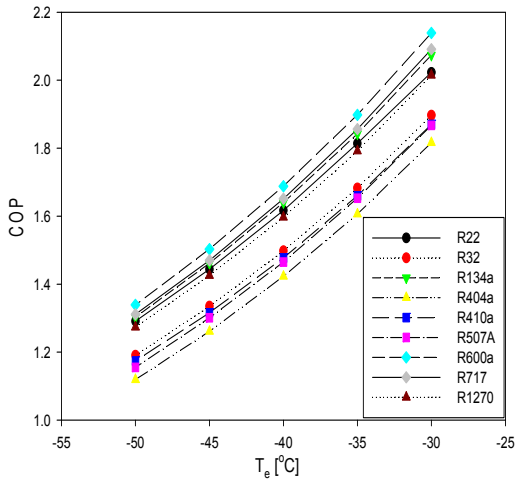


Fig. 4 The effect of evaporation temperature for 2-stage compression and 1-stage expansion system COP.

감소한다. 그 이유는 증발온도가 낮아지면 압축비가 커지고, 압축일량이 증가하기 때문에 COP는 감소한다.

3.4 응축온도의 영향

Fig. 5는 2단 냉동시스템에서의 응축온도의 영향을 분석하기 위해 증발온도 -50°C , 과냉각도 5°C , 과열도 5°C , 고단 및 저단 압축기의 기계효율 및 압축효율 0.8, 중간냉매유량비 0.3, 내부열교환기 유용도 0.3으로 일정하게 유지시키고 있는 상태에서 응축온도를 40°C 에서 60°C 까지 증가시키며 COP변화를 나타내었다. 공랭식 응축기라 생각하고 외기를 고려했을 때, 40°C 이상의 응축온도가 열교환 측면에서 유리하다고 생각하여 40°C 부터 5°C 씩 증가시키며 COP의 변화를 나타내었다. 응축온도가 증가하면 압축비가 증가하고 압축일량이 증가하여 COP가 감소하게 된다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 응축온도가 증가함에 따라 8.14%~14.40% 정도로 COP가 감소하였다. COP감소량이 가장 큰 것은 혼합냉매인 R507A이고, 가장 작은 것은 R717이다. 그리고 55°C 이상의 응축온도에서는 R600a보다 R717의 COP가 큰 것을 알 수 있다.

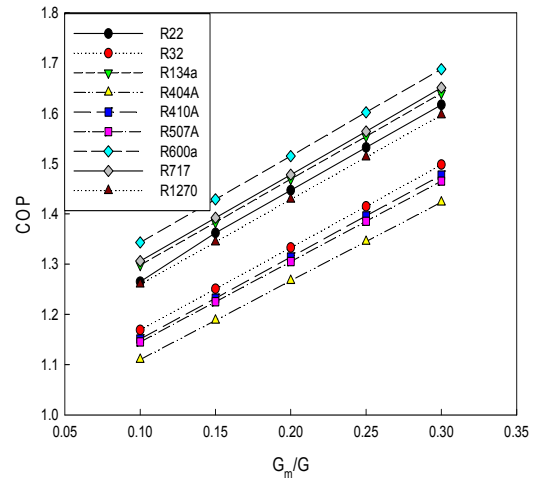


Fig. 6 The effect of mass flow ratio of inter-cooler for 2-stage compression and 1-stage expansion system COP.

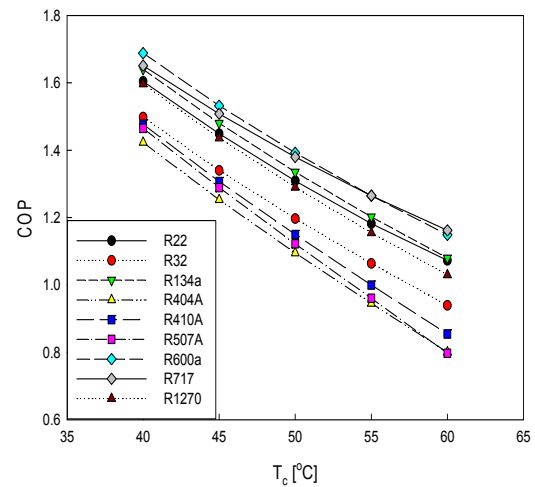


Fig. 5 The effect of condensing temperature for 2-stage compression and 1-stage expansion system COP.

3.5 중간냉각기의 냉매유량 영향

Fig. 6은 2단 냉동시스템에서의 중간냉각기의 냉매유량의 영향을 분석하기 위해 증발온도 -50°C , 응축온도 40°C , 과열도 5°C , 과냉각도 5°C , 고단 및 저단 압축기의 기계효율 및 압축효율 0.8,

내부열교환기 유용도 0.3으로 일정하게 유지시키고 있는 상태에서 응축기를 나온 냉매 중간냉각기로 by-pass되는 중간냉각기의 냉매유량의 비를 0.1에서 0.3까지 증가시키며 COP의 변화를 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 by-pass되는 냉매유량이 증가할수록 COP는 9.24~14.03%로 COP가 증가하였다. 중간냉각기로의 냉매유량이 증가하면 저단축 압축기로 흡입되는 냉매유량이 감소됨으로 인해 저단축 압축일량이 감소하기 때문에 COP가 증가한다.

3.6 내부열교환기 유용도의 영향

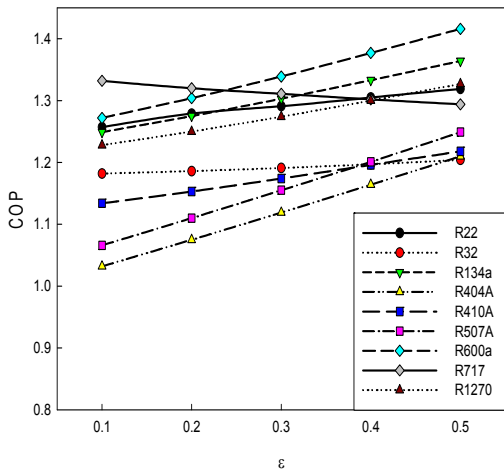


Fig. 7 The effect of effectiveness of internal heat exchanger for 2-stage compression and 1-stage expansion system COP.

Fig. 7은 2단 냉동시스템에서의 내부열교환기 유용도의 영향을 분석하기 위해 증발온도 -50 °C, 응축온도 40°C, 과열도 5°C, 과냉각도 5°C, 고단 및 저단 압축기의 기계효율 및 압축효율 0.8, 중간 냉매유량비 0.3으로 일정하게 유지시키고 있는 상태에서 내부열교환기 유용도를 0.1에서 0.5까지 증가시키며 COP 변화를 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 내부 열교환기 유용도를 증가시킴에 따라 R717을 제외한 나머지 냉매들은 0.34~4.17%로 COP가 증가한다. 유용도가 0.24 이상일 때에는 R717보다 R600a의 COP가 커진다.

4. 결 론

-30~50°C 정도의 저온을 얻기 위한 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템에서 사용되는 규제 대상 냉매인 CFC R22의 대체냉매로써, HFC 냉매로 만든 혼합냉매 R404A, R410A, 친환경적인 탄화수소계 냉매인 R600a, R717, R1270을 사용하는 내부열교환기를 포함하는 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 성능에 영향을 미치는 증발온도, 응축온도, 과열도, 과냉도 및 중간냉각기에서의 냉매유량에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 성능은 증발온도가 높을수록, 응축온도가 낮을수록 COP가 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 실제 2단 압축 1단 팽창 냉동장치가 운전되는 온도범위에서의 R22 대체냉매로서는 R600, R717, R1270을 선정하는 것이 이로운 것으로 판단된다.

동일한 운전조건에서 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 COP는 냉매종류에 상관없이 중간냉각기로 유입되는 냉매유량이 증가할수록 크게 나타나고, 실제 운전과정에서는 중간냉각기로 유입되는 냉매 유량을 증가시키는 것이 COP 측면에서 유리할 것으로 고려된다.

내부열교환기를 포함하는 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템에서 내부열교환기의 유용도가 증가함에 따라 COP가 증가되지만 자연냉매인 R717은 그 반대의 경향을 나타내므로 R717을 대체냉매로 선택하는 경우 내부열교환기의 포함 여부를 고려해야한다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비 (2015년)에 의하여 연구되었음.

References

1. K. S. Roh, 2012, "Performance Analysis of 2-Stage Compression and 1-Stage Expansion Refrigeration System using Alternative Natural

- Refrigerants”, Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 16, No. 1.
2. H. K. Ku, 2014, “Performance Analysis of R-1270(Propylene) Refrigeration system Using Internal Heat Exchanger”, Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 4, pp. 36~42.
 3. K. S. Rog and J. R. Kim, 2013, “Performance Analysis of Two-stage Compression and Two-stage Expansion Refrigeration System using Freon Refrigerants”, Vol. 25, No. 2, pp. 301~306.
 4. C. W. Park, D. G. Lee, S. K. Choi and C. D. Kang, 2009, “Two-Stage compression cycle operating with alternative refrigerant using by EES program”, pp. 533~538.