

저온 사이클에 R744를 적용한 2원 냉동시스템의 성능분석 Performance Analysis of the Cascade Refrigeration System using R744 with the low temperature cycle

손창효* · 문춘근**†

Chang-Hyo Son* and Choon-Geun Moon**†

(Received 24 December 2018, Revision received 18 April 2019, Accepted 18 April 2019)

Abstract: This paper analyzes coefficient of performance (COP) and mass flow ratio with respect to several factors in the high temperature cycle of cascade refrigeration system such as degree of superheating and subcooling, temperature of condensing and evaporating, efficiency of the internal heat exchanger and compressor. Various refrigerants are used in the high temperature cycle, and R744 is only used in low temperature cycle. The results are summarized as follows: the COP increases with increasing degree of subcooling. The COP decreases with increasing degree of superheating except R22, R32 and R717. The COP decreases with increasing condensing temperature and increasing internal heat exchanger efficiency. The mass flow ratio increases with increasing condensing temperature of the high temperature cycle. The mass flow ratio decreases with increasing superheating, subcooling, internal heat exchanger and evaporating temperature. Nevertheless, the mass flow ratio has no change with increasing compressure efficiency.

Key Words : Cascade System, Coefficient of Performance, Control, Mass Flow Ratio, Internal Heat Exchanger

— 기 호 설 명 —

COP : 성능계수
 h : 엔탈피 [kJ/kg]
 m : 질량유량 [kg/s]
 Q : 전열량 [W]
 T : 온도 [°C]
 W : 일량 [kW]

그리스 문자

Δ : 변화량
 η : 효율
 ϵ : 내부열교환기 효율

하첨자

c : 압축

**† 문춘근(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-3183-6591>)
 이사, ㈜대일
 E-mail : drmchg@gmail.com, Tel : 051-730-8500
 *손창효(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2143-0515>) :
 부교수, 부경대학교 냉동공조공학과

*† Choon-Geun Moon (ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-3183-6591>) : Director, Daeil Co., Ltd.
 E-mail : drmchg@gmail.com, Tel : 051-730-8500
 *Chang-Hyo Son(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2143-0515>) : associate professor, Department of Refrigeration and Air Conditioning, Pukyong University.

- cas : 캐스케이드 열교환기
- con : 응축
- e : 증발
- H : 고온측
- IHX : 내부열교환기
- L : 저온측
- m : 기계
- sub : 과냉도
- sup : 과열도

1. 서 론

프레온계 냉매는 열역학적으로 우수하고, 안정성이 높아 냉동·공조 시스템에 광범위하게 사용되어 왔으나, 프레온 계열의 냉매가 대기에 누출될 경우 이들 물질에 포함되어 있는 염소성분에 의해서 오존층이 파괴되는 문제를 발생시키게 된다. 그래서 현재 몬트리올 의정서 및 교토 의정서에 의거한 국제적인 환경규제가 시행되고 있다.

근래에 대형할인마트에서는 -30~-50℃의 저온을 얻기 위하여 2원 냉동시스템을 많이 사용하고 있다. 2원 냉동시스템은 고온 사이클과 저온 사이클로 구성되어 있는데, 고온 사이클에는 R1270, R717, R744, R600a 그리고 저온 사이클에는 R717, R744 등이 주로 사용되고 있다. 특히 일본, 유럽 등의 선진국에서는 저온 사이클에 R744냉매를 사용하는 2원 냉동시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데 다른 냉매와 다르게 누설 시 폭발성과 유독성이 없기 때문이다. 그러나 아직 저온 사이클에 R744를 적용한 2원 냉동시스템에서 고온 사이클에 사용되는 냉매들에 대한 비교 데이터가 많이 부족하다.

따라서 EES(Engineering Equation Solver) 프로그램을 사용하여 고온 사이클에 R22, R32, R134a, R404A, R410A, R507A, R600a, R717, R1270냉매를 적용하고 저온 사이클에 R744 냉매를 적용한 내부열교환기 부착 2원 냉동사이클의 제어성능을 비교분석하여 다양한 냉매를 적용한 이원 냉동시스템의 설계 기초자료를 제공하고자 한다.

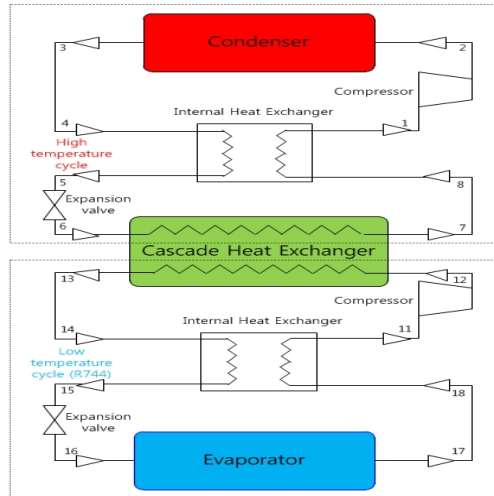


Fig. 1 Schematic diagram of cascade refrigeration system

2. 제어성능분석

본 논문에서 사용되는 냉매의 열역학적 물성치와 제어성능분석은 EES프로그램을 이용하여 계산하였다. 저온 사이클에는 냉매를 R744로 고정하고, 고온 사이클에는 R22, R32, R134a, R404A, R410A, R507A, R600a, R717, R1270을 적용시켰다. 고온과 저온 사이클에 내부 열교환기를 부착한 2원 냉동시스템의 제어성능분석을 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 저온과 고온 사이클의 압축기 내 냉매는 단열 압축과정이다.
- 저온 사이클의 내부열교환기 효율은 0.4이다.
- 저온과 고온 사이클 내 열교환기 (증발기, 응축기, 캐스케이드 열교환기) 내의 냉매 압력강하와 열손실은 무시한다.
- 저온과 고온 사이클 내 배관의 압력강하와 열손실은 무시한다.
- 저온과 고온 사이클의 팽창밸브 내 냉매는 단열팽창인 등엔탈피 과정이다.
- 운동에너지와 위치에너지의 변화는 없는 것으로 가정한다.
- 저온 사이클의 냉매 질량유량(m_L)는 1 kg/s로

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

Cycle	Component	Energy	Mass
High temperature cycle	Compressor(1→2)	$W_{c,H} = m_H(h_2 - h_1)/\eta_{c,H}\eta_{m,H}$	m_H $= m_1 = m_2$ $= m_3 = m_4$ $= m_5 = m_6$ $= m_7 = m_8$
	Condenser(2→3)	$Q_{c,H} = m_H(h_2 - h_3)$	
	Internal heat exchanger(4→5)	$Q_{H,IHX} = m_H(h_4 - h_5)$	
	Expansion valve(5→6)	$h_5 = h_6$	
	Evaporator(6→7)	$Q_{e,H} = m_H(h_7 - h_6)$	
	Internal heat exchanger(8→1)	$Q_{H,IHX} = m_H(h_1 - h_8)$	
Low temperature cycle	Compressor(11→12)	$W_{c,L} = m_L(h_{12} - h_{11})/\eta_{c,L}\eta_{m,L}$	m_L $= m_{11} = m_{12}$ $= m_{13} = m_{14}$ $= m_{15} = m_{16}$ $= m_{17} = m_{18}$
	Condenser(12→13)	$Q_{con,L} = m_L(h_{12} - h_{13})$	
	Internal heat exchanger(14→15)	$Q_{IHx,L} = m_L(h_{14} - h_{15})$	
	Expansion valve(15→16)	$h_{15} = h_{16}$	
	Evaporator(16→17)	$Q_{e,L} = m_L(h_{17} - h_{16})$	
	Internal heat exchanger(18→11)	$Q_{IHx,L} = m_L(h_{11} - h_{18})$	

고정한다.

Fig. 1은 2원 냉동시스템의 개략도이며 제어성능분석에 필요한 식들은 Table 1에 정리하였다. 캐스케이드 열교환기 내의 고온 사이클의 냉

매로부터의 전열량과 저온 사이클의 냉매(R744)의 전열량(Q_{cas})는 조건들에 의해서 식 (1)로 나타낼 수 있다. Table 2는 실험에서 사용되는 제어 변수들의 범위를 정리한 것이다.

Table 2 Analysis conditions

Items	Conditions
ε_H	0.1, 0.2, 0.3, 0.4*, 0.5[-]
ε_L	0.4[-]
$\eta_{c,H}$	0.6, 0.7, 0.8*, 0.9, 1[-]
$T_{con,H}$	40* 45 50 55 60[°C]
$T_{e,H}$	0, -5, -10*, -15, -20[°C]
$T_{sub,H}$	0*, 5, 10, 15, 20[°C]
$T_{sup,H}$	0*, 5, 10, 15, 20[°C]
ΔT_{cas}	5[°C]
$\eta_{c,L}$	0.8[-]
$\eta_{m,H}$	0.8[-]
$\eta_{m,L}$	0.8[-]
$T_{sub,L}$	0[°C]
$T_{sup,L}$	0[°C]
$T_{con,L}$	-5[°C]
$T_{e,L}$	-50[°C]

*Standard condition

$$Q_{cas} = Q_{con,L} = Q_{e,H} \quad (1)$$

$$Q_{cas} = m_L(h_{12} - h_{13}) = m_{e,H}(h_7 - h_6) \quad (2)$$

$$W_c = \frac{m_{e,H}(h_2 - h_1)}{\eta_c \eta_m} \quad (3)$$

$$COP = \frac{Q_{e,H}}{W_c} \quad (4)$$

$$\frac{m_{e,H}}{m_L} = \frac{h_{12} - h_{13}}{h_7 - h_6} \quad (5)$$

여기서 $Q_{con,L}$ 은 저온 사이클 응축기의 방열열량이고, $Q_{e,H}$ 는 고온 사이클 증발기의 흡열열량이다. 그리고 m_L 와 m_H 는 각각 고, 저온 사이클의

냉매 질량유량이며, $h_1 \sim h_{18}$ 은 Fig. 1의 각각의 지점에 해당하는 엔탈피 값이다. 압축일량, COP, 질량유량비를 구하는 식은 식 (2), (3), (4)를 이용하여 계산한다.

3. 제어성능분석 결과 및 고찰

3.1 고온 사이클의 과열도에 따른 영향

Fig. 2는 Table 2의 표준조건 하에서 고온 사이클의 과열도제어를 0~20°C 까지 5°C 씩 증가시켰을 때의 냉매별 COP와 질량유량비를 나타낸 것이다. Fig. 2와 3의 상부가 COP, 하부가 질량유량을 나타내는 그래프이다. 과열도가 5°C 증가함에 따라 COP가 증가하는 냉매는 R134a, R404A, R410A, R507A, R600a, R1270으로 각각의 변화량은 0.135~0.204%, 0.360~0.436%, 0.000~0.071%, 0.425~0.430%, 0.334~0.398%, 0.069~0.206%이다.

COP가 증가하는 이유는 P-h 선도 상에서 식 (1)~(3)에서 h_1 과 h_7 의 증가하는데 ($h_2 - h_1$)의 감소량이 ($h_7 - h_6$)의 감소량보다 커진다. 즉 압축일량의 감소량이 전열량의 감소량보다 커져 COP

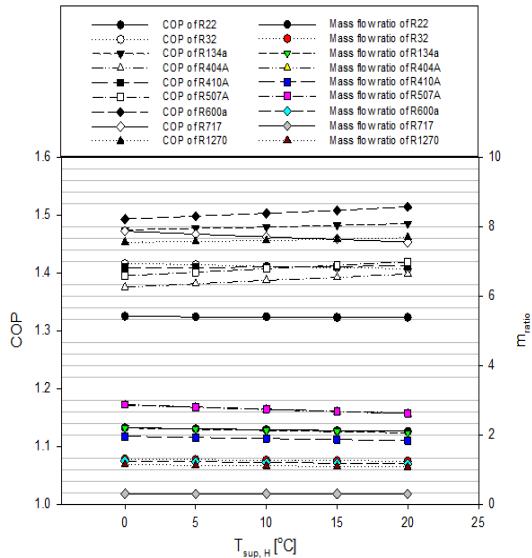


Fig. 2 Curve for COP and mass flow ratio by increasing superheating degree

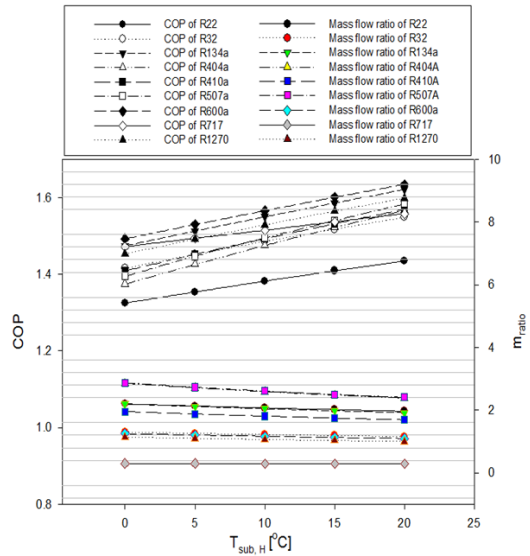


Fig. 3 Curve for COP and mass flow ratio by increasing subcooling degree

가 증가하게 된다. 반면에 R22, R32, R717은 감소하며 감소량은 각각 0.000~0.0076%, 0.141~0.212%, 0.274~0.343%이다. 그 이유는 ($h_2 - h_1$)의 감소량이 ($h_7 - h_6$)의 감소량보다 작기 때문이다.

질량유량비는 R22, R32, R134a, R404A, R410A, R507A, R600a, R717, R1270 모두 감소하였으며 변화량은 각각 1.178~1.241%, 1.089~1.154%, 1.602~1.642%, 2.137~2.278%, 1.505~1.638%, 2.166~2.301%, 1.692~1.827%, 0.605~0.634%, 1.515~1.665%이다. 질량유량비가 감소하는 이유는 식 (4)에서 h_7 이 증가하기 때문이다.

3.2 고온 사이클의 과냉도제어에 따른 영향

Fig. 3은 Table 2의 표준조건 하에서 고온 사이클의 과냉도를 0~20°C 까지 5°C 씩 증가시켰을 때의 냉매별 COP와 질량유량비를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 과냉도가 5°C 씩 증가함에 따라 COP가 증가하는 냉매는 R22, R32, R134a, R404A, R410A, R507A, R600a, R717, R1270이고 COP의 변화량은 각각 1.845~2.189%, 1.845~2.189%, 2.207~2.646%, 2.957~3.709%, 2.480~3.052%, 2.857

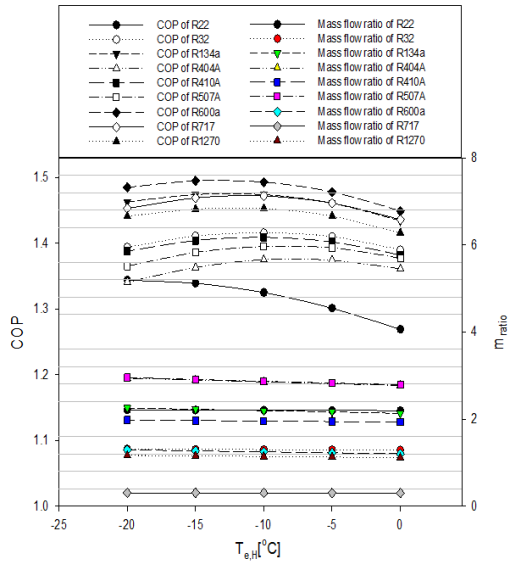


Fig. 4 Curve for COP and mass flow ratio by increasing evaporating temperature of high temperature cycle

~3.728%, 2.124~2.478%, 1.366~1.495%, 2.173~2.684%이다.

COP가 증가하는 이유는 과냉도가 증가할수록 h_3 과 h_6 이 감소하게 된다. h_6 이 작아지면 식 (1)~(3)에서 전열량 Q_{cns} 가 증가하기 때문에 COP가 증가한다.

질량유량비가 감소하는 냉매는 R22, R32, R134a, R404A, R410A, R507A, R600a, R717, R1270으로 그 변화량은 각각 2.628~3.043%, 2.523~3.154%, 3.033~3.601%, 3.994~4.940%, 3.148~3.941%, 3.798~4.881%, 3.100~3.365%, 1.597~1.747%, 2.990~3.593%이다.

질량유량비가 감소하는 이유는 식 (4)에서 h_6 이 감소하기 때문이다.

3.3 고온 사이클의 증발온도와 응축온도제어에 따른 영향

Fig. 4와 5는 표준조건에서 고온 사이클의 증발온도와 응축온도의 변화에 따른 COP와 질량유량비를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 고온 사이클의 증발온도가 5°C씩 증가함에 따라 COP가 증가하는

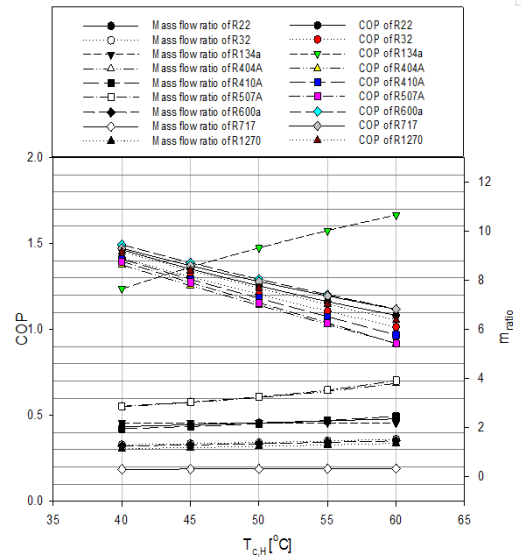


Fig. 5 Curve for COP and mass flow ratio by increasing condensing temperature of high temperature cycle

질량유량비의 변화는 0.136~0.182%, 0.309~0.383%, 1.393~1.502%, 1.458~1.485%, 0.566~0.661%, 1.414~1.478%, 1.732~1.912%, 0.459~0.668%로 나타났다.

이는 참고문헌의 4, 5의 논문에서 나타난 과열도의 영향과 유사하다. 각 냉매에 따라 최고의 COP를 가지는 $T_{e,H}$ 가 존재한다는 것이다. 이는 2원 냉동시스템에서 응축온도가 너무 낮거나 높게 설정되거나 저온 사이클의 압축일량이 다른 쪽 압축일량에 비해 커짐으로 각각의 사이클에서 압축기 부하 균형점에서의 COP가 최대인 것이다. 이러한 결과가 나오는 이유는 증발열량과 고온, 저온 사이클의 압축일량이 작용했기 때문으로 $T_{e,H}$ 가 감소할수록 W_H 은 증가하는 반면 W_L 은 감소하기 때문이다.

질량유량비의 변화가 위의 수치와 같이 나타나는 이유는 식 (4)에서 $(h_{12} - h_{13})$ 은 일정하지만 $(h_7 - h_6)$ 이 증발온도의 변화에 따라 지속적으로 감소했기 때문이라고 볼 수 있다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 고온 사이클의 응축온도를 5°C씩 증가시키기에 따라 COP가 감소하는 냉매는 R22, R32, R404A, R410A, R507A, R600a,

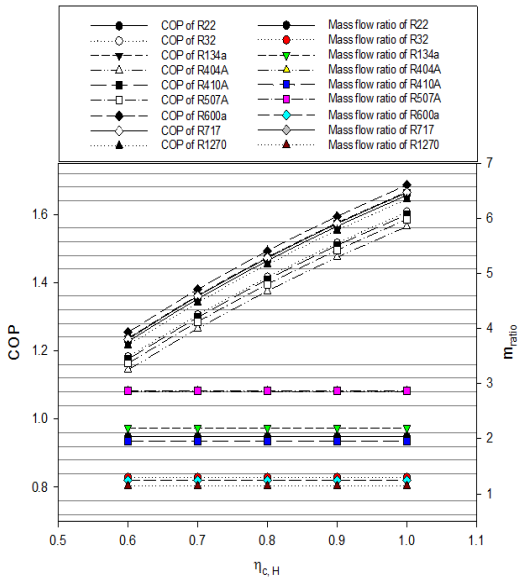


Fig. 6 Curve for COP and mass flow ratio by increasing compressor efficiency

R717, R1270의 COP의 변화량은 -6.885~7.650%, -7.768 -8.318%, -8.72~10.719%, -8.304~9.907%, -8.746~11.667%, -6.916~7.033%, -6.527~6.861%이다.

COP가 감소하는 이유는 고온 사이클 냉매의 증발열량은 동일하나 식 (2)에서의 압축일량이 증가하기 때문이다.

COP가 증가하는 냉매는 R134a이며 그 변화량은 7.321~7.509%이다.

질량유량비가 증가하는 냉매는 R22, R32, R134a, R404A, R410A, R507A, R600a, R717, R1270이며 변화량은 3.382~4.029%, 3.462~4.808%, 3.965~4.911%, 5.957~9.318%, 4.759~7.598%, 5.99~10.910%, 3.766~4.283%, 1.846~2.055%이다.

질량유량비가 증가하는 이유는 h_5 의 값이 증가하여 $(h_6 - h_5)$ 값은 감소해 식 (4)의 고온 사이클 냉매의 질량유량은 증가하기 때문에 질량유량비는 커진다.

3.4 고온 사이클의 압축효율과 내부열교환기 효율제어에 따른 영향

Fig. 6과 7은 압축효율에 따른 영향과 내부열교

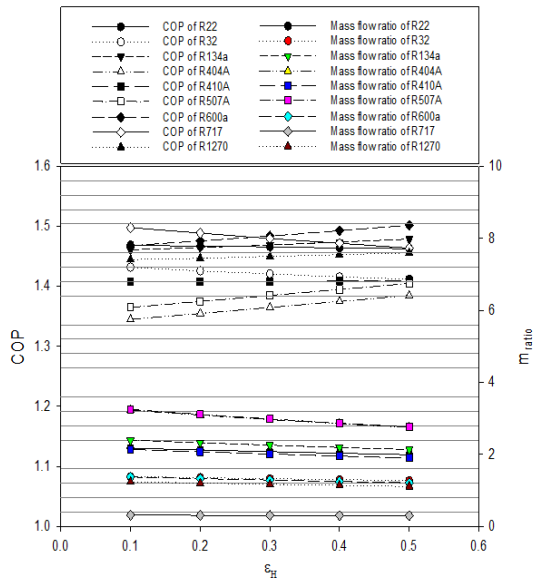


Fig. 7 Curve for COP and mass flow ratio by increasing internal heat exchanger efficiency

환기제어에 따른 영향이 COP와 질량유량비에 영향을 미치는 것을 그래프로 나타낸 것이다.

고온 사이클의 압축효율이 10%씩 증가함에 따라 COP가 증가하는 냉매는 R22, R32, R134a, R404A, R410A, R507A, R600a, R717, R1270이며, 변화량은 5.815~10.187%, 6.003~10.406%, 5.778~10.194%, 6.106~10.577%, 5.964~10.468%, 6.020~10.490%, 5.77~10.048%, 5.785~10.211%이다. 질량유량비의 변화는 없는 것으로 나타났다.

압축일량은 압축효율이 증가함에 따라 감소할 것이다. 이는 질량유량비와 고온 사이클 냉매의 증발열량은 압축효율과 무관함을 의미하며 압축일량만 감소하여 COP만 증가한다.

고온 사이클 내부열교환기의 효율이 10%씩 증가함에 따라 COP가 증가하는 냉매는 R134a, R404A, R410A, R507A, R600a, R717, R1270이며, 변화량은 0.273~0.339%, 0.727~0.743%, 0.000~0.071%, 0.717~0.733%, 0.542~0.603%, 0.543~0.604%이다. COP가 증가하는 이유는 내부열교환기의 효율이 증가할수록 고온 사이클 압축일량에서의 h_1 이 증가하여 압축일량이 증가하게 되기

때문이다. COP가 감소하는 냉매는 R22, R32이며, 그 변화량은 -0.068~-0.136%, -0.282~-0.419%만큼 변화한다. 질량유량비가 감소하는 냉매는 R22, R32, R134a, R404A, R410A, R507A, R600a, R717, R1270이며, 그 변화량은 2.064~2.210%, 1.923~2.168%, 2.735~2.966%, 3.749~4.181%, 2.712~3.042%, 3.801~4.276%, 2.965~3.160%, 1.055~1.148%이다. 질량유량비의 변화는 고온 사이클 내부열교환기의 효율 증가에 따라 h_6 가 감소하게 되고, 이는 $(h_7 - h_6)$ 이 증가하게 되므로 고온 사이클 냉매의 질량유량은 감소하게 된다.

4. 결 론

저온 사이클에 R744를 사용하는 내부열교환기 부착식 2원 냉동시스템에서 고온 사이클에 총 9가지 냉매를 적용시켜 여러 제어변수에 따른 COP, 질량유량비의 변화를 알아보았다.

1) 고온 사이클의 과열도가 증가할수록 R22와 R404 냉매의 COP는 감소하였고, 기타 냉매들은 COP가 증가하는 경향을 보였다. 질량유량비는 과열도가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

2) 고온 사이클의 과냉도가 증가할수록 모든 냉매의 COP가 증가하였고, 질량유량비는 감소하였다.

3) 고온 사이클의 증발온도가 증가할수록 COP의 변화는 증가하다가 감소하는 경향을 보였으며, 예외적으로 R22냉매는 COP의 지속적인 감소를 보였다. 질량유량비는 증발온도가 감소할수록 모든 냉매가 증가하는 경향을 보였다.

4) 고온 사이클의 응축온도가 높을수록 COP는 감소하는 경향을 보였으며, 질량유량비는 증가하는 경향을 보였다.

5) 고온 사이클의 압축효율이 증가할수록 COP는 증가하는 경향을 보였으며, 질량유량비의 변화는 없었다.

6) 고온 사이클의 내부열교환기 효율이 증가할수록 R717냉매는 COP가 감소하였으며, 나머지 냉매는 증가하는 경향을 보였다. 그리고 질량유량비는 효율이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비 (2017년)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

C. H. Son; Project administration, Supervision, Writing-original, Writing-review editing, C. G. Moon; Data curation, Formal analysis, Investigation.

References

1. H. K. Oh, C. H. Son, W. B. Yi and M. J. Jeon, 2013, "Performance Analysis of R404A Refrigeration System with Heat Exchanger Using R744 as a Secondary Refrigerant", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 25, No. 10, pp. 548-554. (DOI:10.6110/KJACR.2013.25.10.548)
2. H. K. Oh and C. H. Son, 2012, "Performance analysis of a R744 and R404A cascade refrigeration system with internal heat exchanger", Journal of the Korean Society of Power System Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 38-46. (DOI:10.9726/kspe.2012.16.1.038)
3. P. Bansal and J. Sanjeev, 2007, "Cascade Systems: Past, Present, and Future", ASHRAE Transactions, Vol. 113, Issue 1, pp. 245-252.
4. H. M. Getu and P. Bansal, 2008, "Thermodynamic analysis of an R744-R717 cascade refrigeration system", International journal of refrigeration, 31, pp. 45-54. (DOI:10.1016/j.ijrefrig.2007.06.014)
5. G. D. Nicola, G. Giuliani, F. Polnara and R. Stryjek, 2008, "Blends of acrbon dioxide and HFCs as working fluids for the low-temperature circuit in cascade refrigerating systems", International journal of refrigeration, vol 28, pp. 45-54. (DOI:10.1016/j.ijrefrig.2004.06.014)