

R744-R404A용 캐스케이드 냉동시스템 개발에 관한 연구(1)

- 성능 특성에 관한 분석 -

오후규¹ · 손창효[†]

(원고접수일 : 2010년 12월 6일, 원고수정일 : 2011년 2월 7일, 심사완료일 : 2011년 3월 4일)

Development of Cascade Refrigeration System Using R744 and R404A

- Analysis on Performance Characteristics -

Hoo-Kyu Oh¹ · Chang-Hyo Son[†]

요 약 : 본 논문은 R744-R404A용 캐스케이드 냉동시스템의 기초 설계자료를 제공하기 위해서 성능특성에 대해 분석하였다. 작동변수로는 R404A용 고온사이클과 R744용 저온사이클의 과냉각도와 과열도, 압축효율, 응축과 증발온도이다. 이에 대한 주요결과를 요약하면 다음과 같다. 고온사이클에만 과열도를 주는 것이 가장 높은 COP를 가지는 반면에 저온·고온사이클 모두에 대해 과냉도를 주는 것이 가장 높은 COP를 가진다. 과열도, 과냉각도, 압축효율, 증발온도, 응축온도 등의 인자들이 R744와 R404A용 캐스케이드 냉동사이클의 COP에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었고, 이들 각각의 인자들은 캐스케이드 냉동사이클의 성능을 최대로 하는 캐스케이드 증발온도가 존재함을 알 수 있었다.

주제어 : 이산화탄소, 캐스케이드 냉동시스템, 증기 압축식 냉동시스템, 성능분석

Abstract: In this paper, analysis on the performance characteristics of R744-R404A cascade refrigeration system is presented to offer the basic design data for the operating parameters of the system. The operating parameters considered in this study include subcooling and superheating degree, compressor efficiency, and condensing and evaporating temperature in R404A high- and R744 low-temperature cycle, respectively. The main results were summarized as follows : It was observed that the highest COP of the system is achieved by higher superheating degree in R744 cycle than that in R404A cycle. The COP of the system increased by giving the subcooling degree in both cycles. The COP of the cascade system is the highest value when the system is operated at an optimum evaporation temperature.

Key words: Carbon dioxide, Cascade refrigeration system, Vapor compression refrigeration system, Performance analysis

1. 서 론

지금까지의 캐스케이드 냉동장치는 R22, R134a와 같은 고비점 냉매를 고온사이클에, R23, R170, R115의 저비점 냉매를 저온사이클에 사용해왔다. 그러나 향후 이러한 프레온계 냉매는 오존

층 파괴와 지구온난화로 인해 사용이 규제됨에 따라 환경에 무해한 R1270, R290, R717, R744와 같은 자연냉매로 대체될 가능성이 높아지고 있다.

이러한 자연냉매를 적용한 캐스케이드 냉동시스템에 대한 종래의 연구들을 살펴보면,

[†] 교신저자(부경대학교 냉동공조공학과, E-mail:sonch@pknu.ac.kr, Tel: 051-621-6802)

¹ 부경대학교 냉동공조공학과

우선 [1]은 저온사이클내 R744의 응축온도를 최적화하기 위해 캐스케이드 냉동사이클의 성능을 이론적으로 분석하였다.

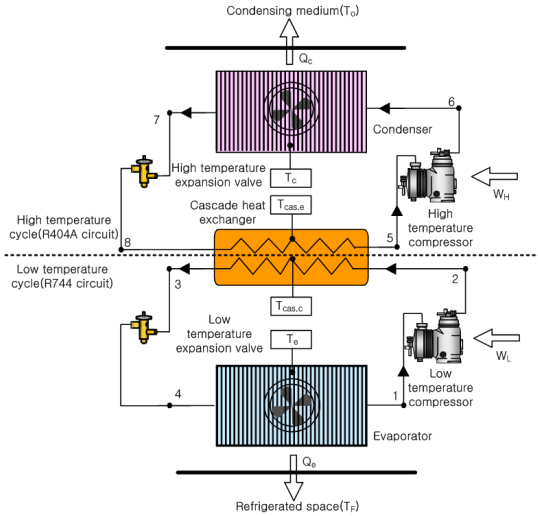


Figure 1: Schematic diagram of a cascade system.

[2]은 고온사이클내 R744의 증발온도를 최적화하기 위해 캐스케이드 냉동사이클의 성능을 연구하였다. 그리고 [3]은 저온부에 R744 냉매를 적용한 캐스케이드 냉동사이클에 대한 성능을 열역학적으로 분석하였다. 이러한 종래의 연구로부터 알 수 있듯이, 자연냉매를 적용한 캐스케이드 냉동시스템의 성능 분석에 대한 자료가 부족하며, 정확한 이론이 확립되어 있지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 고온사이클에는 R404A

냉매를, 저온사이클에는 R744 냉매를 적용한 캐스케이드 냉동사이클의 성능에 미치는 인자들을 이론적으로 파악 및 분석하고, 이를 통해 캐스케이드 냉동시스템의 최적 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 성능 분석

본 논문에서 사용되는 냉매의 열역학적 물성치와 성능 분석은 EES(Engineering Equation Solver) [4] 소프트웨어를 이용하여 계산하였다. 고온사이클에는 R404A 냉매를, 저온사이클에는 R744 냉매를 적용한 캐스케이드 냉동시스템의 성능 분석을 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 저온과 고온사이클의 압축기내 냉매는 단열압축과정이고, 압축효율과 기계효율은 각각 0.8과 1이다.

- 저온과 고온사이클의 열교환기(증발기, 응축기, 캐스케이드 열교환기)내 냉매 압력강하와 열손실은 무시한다.

- 냉매배관의 압력강하와 열손실은 무시한다.
- 팽창밸브내 냉매는 단열팽창인 등엔탈피과정이다.
- 운동에너지와 위치에너지의 변화는 없으므로 가정한다.

그림 1은 본 연구에서 적용하는 캐스케이드 냉동시스템의 상세도를 나타낸 것이고, 이의 분석에 필요한 식들은 표 1에 정리하였다. 캐스케이드 열교환기내 R404A와 R744의 전열량(Q_{cas})은 위의 가정에서 주위로의 열손실이 없다고 하였으므로 아

Table 1: Balance equation for each component of R404A and R744 cascade refrigeration system.

Cycle	Component	Energy	Mass
High temperature refrigeration cycle (R404A circuit)	Evaporator(8→5)	$Q_{cas,e} = m_H (h_5 - h_8)$	$m_H = m_5 = m_6$ $= m_7 = m_8$
	Compressor(5→6)	$W_H = m_H (h_6 - h_5) / \eta_{cH} \eta_{cL}$	
	Condenser(6→7)	$Q_c = m_H (h_6 - h_7)$	
	Expansion valve(7→8)	$h_7 = h_8$	
Low temperature refrigeration cycle (R744 circuit)	Evaporator(4→1)	$Q_e = m_L (h_1 - h_2)$	$m_L = m_1 = m_2$ $= m_3 = m_4$
	Compressor(1→2)	$W_L = m_L (h_2 - h_1) / \eta_{cL} \eta_{cH}$	
	Condenser(2→3)	$Q_{cas,c} = m_L (h_2 - h_3)$	
	Expansion valve(3→4)	$h_3 = h_4$	

래의 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$Q_{cas} = Q_{cas,c} = Q_{cas,e} \quad (1)$$

$$Q_{cas} = m_L(h_2 - h_3) = m_H(h_5 - h_8) \quad (2)$$

캐스케이드 냉동시스템의 전체 COP는 아래의 식 (3)으로 계산한다.

$$\begin{aligned} COP &= \frac{Q_e}{W_H + W_L} \\ &= \frac{(h_5 - h_8)(h_1 - h_4)}{(h_6 - h_5)(h_2 - h_3) + (h_5 - h_6)(h_2 - h_1)} \quad (3) \end{aligned}$$

R404A와 R744의 캐스케이드 냉동사이클의 각 상태점에서의 열물성치(엔탈피, 엔트로피, 압력, 온도 등)와 COP는 EES를 이용하여 계산하였다. 이렇게 해서 나온 결과값을 이용하여 R404A와 R744용 캐스케이드 냉동사이클의 성능에 영향을 미치는 과열도, 과냉도, 압축효율, 증발온도, 응축온도 등의 변수들에 대해서 살펴보고자 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 과열도의 영향

그림 2는 응축온도($T_c = 40^\circ\text{C}$), 증발온도($T_e = -50^\circ\text{C}$), 캐스케이드 온도차($\Delta T_{cas} = T_{cas,c} - T_{cas,e} = 5^\circ\text{C}$), 과냉각도($\Delta T_{suc} = \Delta T_{suc,L} = \Delta T_{suc,H} = 0^\circ\text{C}$), 저온과 고온압축기의 압축효율($\eta_c = \eta_{cL} = \eta_{cH} = 0.8$)를 동일하게 유지한 상태에서 캐스케이드 증발온도(R404A의 증발온도, $T_{cas,e}$)와 저온·고온사이클의 과열도(압축기 입구온도-증발기 출구온도, $\Delta T_{suh} = \Delta T_{suh,L} = \Delta T_{suh,H}$) 변화에 따라 R404A와 R744를 적용한 캐스케이드 냉동사이클의 성적계수(COP)를 나타낸 것이다.

그림 2에서 고온사이클의 과열도가 증가할수록 COP는 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 과열도가 증가할수록 저온사이클의 증발열량(Q_e)은 일정한 반면 고온사이클의 압축일량(W_H)이 증가하기 때문이다. 또한, $T_{cas,e}$ 가 감소함에 따라 과열도의 영향이 더 크다는 사실을 알 수 있다. 이는 엔탈피의 변화에 의해 나타나는 것으로 보인다. 즉 엔탈피는

압력(P), 비체적(v), 내부에너지(u)의 물성치가 관여하는데, 내부에너지가 증가할수록 비체적은 감소하는 것을 알 수 있었다. 이러한 경향이 나타나는 이유는 과열도의 영향을 많이 받는 부분은 내부에너지와 비체적의 증가와 감소비율이 크기 때문이며, 내부에너지와 비체적의 증가와 감소비율이 작을 때는 과열도의 영향을 작게 받는다고 할 수 있다.

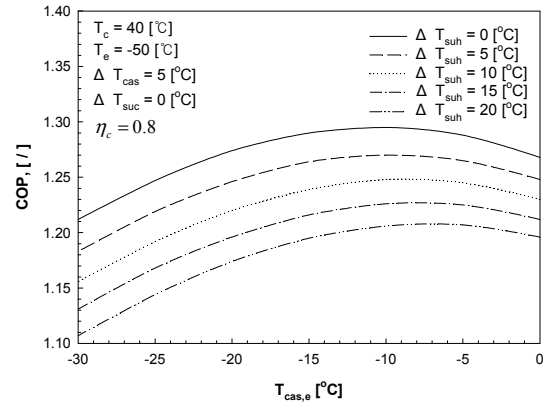


Figure 2: System performance curve for R404A with variation of superheating degree.

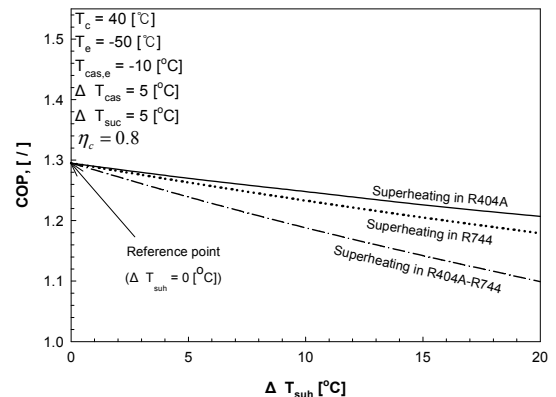


Figure 3: Effect of superheating degree on system and individual cycles.

또한, **그림 2**에서 알 수 있듯이, 일정한 과열도에서 고온사이클의 증발온도($T_{cas,e}$)가 감소할수록 COP는 증가하다가 -10°C 부근에서 최대값을 가진 후 다시 감소하는 경향을 보인다. 이는 [5]와 [6]의 논문에서 나타낸 과열도의 영향과 유사하다. 이

는 각 냉매에 따라 최고의 COP를 가지는 $T_{cas,e}$ 가 존재한다는 것이다. 이는 캐스케이드 냉동시스템에서 저온사이클의 응축온도($T_{cas,c}$)가 너무 낮거나 높게 설정될 때 고온 또는 저온 사이클 압축일량이 다른 쪽 압축일량에 배해서 상당히 커짐으로 각 사이클의 압축기 부하 균형점에서 최대 COP를 가지는 것으로 판단된다. 이러한 결과에는 증발열량(Q_e), 고온과 저온사이클 압축일량(W_H, W_L) 등이 관여하기 때문이다. 우선, 증발열량(Q_e)은 $T_{cas,e}$ 가 감소함에 따라 일정한 비율로 계속해서 증가한다. 따라서, 고온과 저온사이클의 압축일량(W_H, W_L)에 의해 COP가 좌우된다. 즉, $T_{cas,e}$ 가 감소할수록 W_H 는 증가하는 반면 W_L 는 감소한다. $T_{cas,e}$ 가 최대값까지의 범위에서 COP가 증가하는 이유는 W_L 의 감소비율에 비해 W_H 의 증가비율이 작기 때문이고, $T_{cas,e}$ 가 최대값 이후의 범위에서 COP가 감소하는 이유는 W_L 의 감소비율에 비해 W_H 의 증가비율이 커기 때문이다.

그림 3은 각 사이클의 과열도 변화에 따른 캐스케이드 냉동사이클의 COP를 비교한 것이다. 고온 사이클에만 과열도를 준 경우에 가장 높은 COP를 나타내고 저온·고온사이클 모두에 과열도를 준 경우에 가장 낮은 COP를 나타내는 것을 알 수 있다. 이유는 세 경우의 증발열량(Q_e)은 거의 일정한 반면에 압축일량의 값들이 차이가 있기 때문이다. 과열도를 주지 않은 사이클과 비교하여 고온사이클에만 과열도를 준 경우에는 W_H 만 증가하여서 COP가 가장 높게 나타나고, 저온사이클에만 과열도를 준 경우와 저온·고온사이클에 과열도를 준 경우에는 W_H 와 W_L 가 동시에 증가하는데 저온·고온사이클에 과열도를 준 경우가 W_H 와 W_L 가 더 높기 때문이다.

3.2 과냉각도의 영향

그림 4는 응축온도($T_c = 40^\circ\text{C}$), 증발온도($T_e = -50^\circ\text{C}$), 캐스케이드 온도차($\Delta T_{cas} = T_{cas,c} - T_{cas,e} = 5^\circ\text{C}$), 저온·고온사이클의 과열도(압축기 입구 온도-증발기 출구 온도, $\Delta T_{suh} = \Delta T_{suh,L} = \Delta T_{suh,H} = 0^\circ\text{C}$), 저온과 고온압축기의 압축효율($\eta_c = \eta_{cl} = \eta_{ch}$

$= 0.8$)로 동일하게 유지한 상태에서 캐스케이드 증발온도(R404A의 증발온도, $T_{cas,e}$)와 저온·고온사이클의 과냉각도(응축기 출구 온도-팽창밸브 입구 온도, $\Delta T_{suc} = \Delta T_{suc,L} = \Delta T_{suc,H}$) 변화에 따라 R404A과 R744를 사용하는 캐스케이드 냉동사이클의 COP(COP)를 나타낸 것이다.

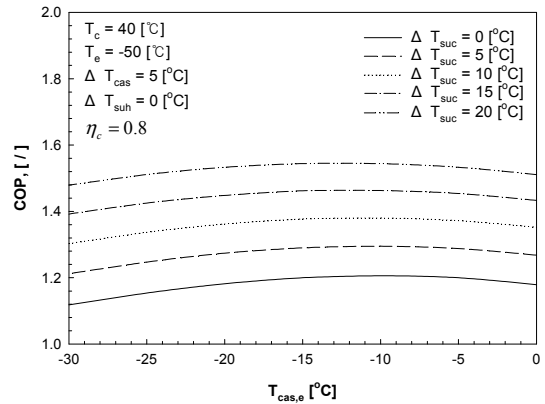


Figure 4: System performance curve for R744-R404A with variation of subcooling degree.

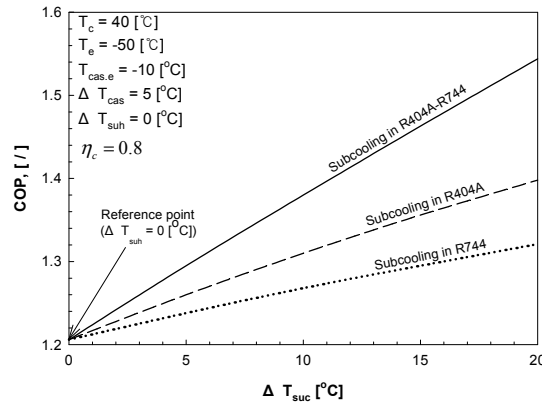


Figure 5: Effect of subcooling degree on system and individual cycles.

그림 4에서 ΔT_{suc} 가 증가할수록 COP가 증가함을 알 수 있다. 이는 ΔT_{suc} 가 증가할수록 W_L 은 일정하고 W_H 가 조금 감소하며 Q_e 가 증가하기 때문이다. 또한, **그림 4**에서 ΔT_{suc} 가 일정한 경우, $T_{cas,e}$ 가 감소할수록 COP가 증가하다가 최대값을 가진 후 다시 감소하는 경향을 보인다. 이는 위의

과열도에서 언급한 이유와 동일하다. **그림 5**는 각 사이클의 과냉도 변화에 따른 캐스케이드냉동사이클의 COP를 비교한 것이다. 저온·고온사이클에 과냉도를 준 경우에 가장 큰 COP를 나타내고 저온 사이클에 과냉도를 준 경우에 가장 낮은 COP를 나타내는 것을 알 수 있다. 저온·고온사이클에 과냉도를 준 경우에 가장 큰 COP를 나타내는 이유는 W_H 가 감소하면서 W_L 은 일정하며 Q_e 의 값이 증가하기 때문이다. 저온사이클에 과냉도를 준 경우에 가장 낮은 COP를 나타내는 이유는 W_L 은 일정하나 W_H 의 증가비율이 Q_e 의 증가비율보다 더 크기 때문이다.

3.3 압축효율의 영향

그림 6은 응축온도($T_c=40^\circ\text{C}$), 증발온도($T_e=-50^\circ\text{C}$), 캐스케이드 온도차($\Delta T_{cas}=T_{cas,c}-T_{cas,e}=5^\circ\text{C}$), 저온·고온사이클의 과냉각도(응축기 출구 온도-팽창밸브 입구온도, $\Delta T_{suc}=\Delta T_{suc,L}=\Delta T_{suc,H}=10^\circ\text{C}$), 저온·고온사이클의 과열도(압축기 입구 온도-증발기 출구온도, $\Delta T_{suh}=\Delta T_{suh,L}=\Delta T_{suh,H}=5^\circ\text{C}$)로 동일하게 유지한 상태에서 캐스케이드 증발 온도(R404A의 증발온도, $T_{cas,e}$)와 저온과 고온압축기의 압축효율($\eta_c=\eta_{cL}=\eta_{cH}$)변화에 따라 R404A와 R744를 사용하는 캐스케이드 냉동사이클의 COP를 나타낸 것이다.

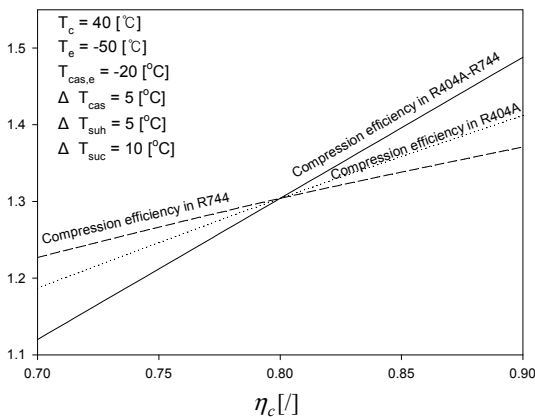


Figure 6: Effect of compression efficiency on system and individual cycles.

그림 6에서 압축효율이 0.8이상인 경우에는 저온·고온사이클이 가장 큰 COP를 나타내고 저온사이클이 가장 낮은 COP를 나타내는 것을 알 수 있다. 압축효율을 0.8이하인 경우에는 저온·고온사이클에서 가장 낮은 COP를 나타내고 저온사이클에서 가장 높은 COP를 나타낸다. 이유는 압축효율을 크게 준 경우는 Q_e 가 일정한 반면에 W_H 와 W_L 가 감소하기 때문이다. 압축효율 낮게 준 경우는 Q_e 가 일정한 반면에 W_H 와 W_L 가 증가하기 때문이다.

3.4 응축온도의 영향

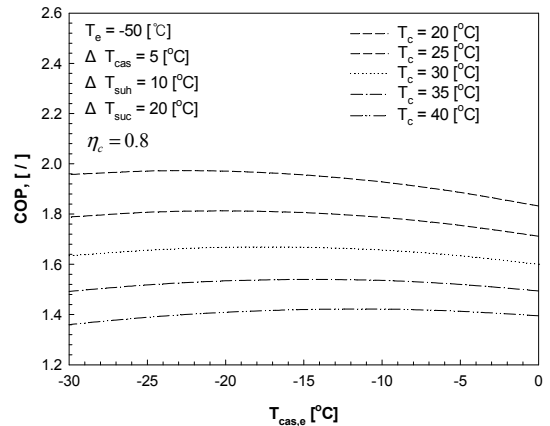


Figure 7: System performance curve for R744-R404A with variation of condensing temperature.

그림 7은 응축온도($T_c=40^\circ\text{C}$), 증발온도($T_e=-50^\circ\text{C}$), 캐스케이드 온도차($\Delta T_{cas}=T_{cas,c}-T_{cas,e}=5^\circ\text{C}$), 저온·고온사이클의 과냉각도(응축기 출구 온도-팽창밸브 입구온도, $\Delta T_{suc}=\Delta T_{suc,L}=\Delta T_{suc,H}=20^\circ\text{C}$), 저온·고온사이클의 과열도(압축기 입구 온도-증발기 출구온도, $\Delta T_{suh}=\Delta T_{suh,L}=\Delta T_{suh,H}=10^\circ\text{C}$)로 동일하게 유지한 상태에서 캐스케이드 증발 온도(R404A의 증발온도, $T_{cas,e}$)와 고온사이클의 응축온도(T_c)변화에 따라 R404A와 R744를 사용하는 캐스케이드 냉동사이클의 COP를 나타낸 것이다. **그림 7**에서 T_c 가 감소할수록 캐스케이드 냉동사이클의 COP가 증가함을 알 수 있다. 이는 T_c 가 감소할수록 Q_e 와 W_L 이 거의 일정한 반면 W_H 가

감소하기 때문이다. 또한, **그림 7**에서 T_c 가 일정한 경우, $T_{cas,e}$ 가 감소할수록 COP가 증가하다가 최대 값을 가진 후 다시 감소하고 증가하는 경향을 보인다. 이와 같이 T_c 가 일정한 경우, $T_{cas,e}$ 의 감소에 따른 COP의 변화는 위에서 언급한 것처럼, Q_e 는 거의 일정한 비율로 증가하지만, W_H 는 증가하고 W_L 는 감소한다. 즉, $T_{cas,e}$ 의 감소에 따른 W_H 와 W_L 의 증가와 감소 비율이 변하기 때문이다.

3.5 증발온도의 영향

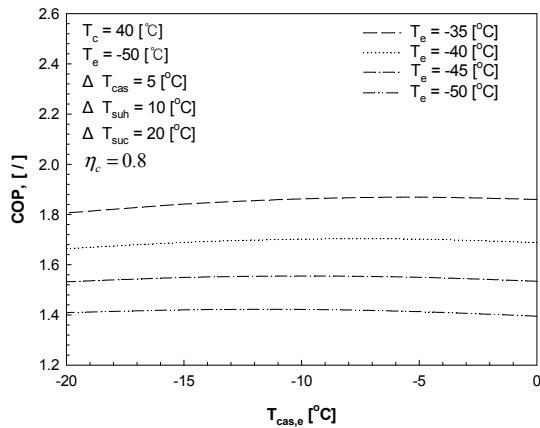


Figure 8: System performance curve for R744-R404A with variation of evaporating temperature.

그림 8은 응축온도($T_c=40^{\circ}C$), 증발온도($T_e=-50^{\circ}C$), 캐스케이드 온도차($\Delta T_{cas} = T_{cas,c} - T_{cas,e} = 5^{\circ}C$), 저온-고온사이클의 과냉각도(응축기 출구 온도-팽창밸브 입구온도, $\Delta T_{suc} = \Delta T_{suc,L} = \Delta T_{suc,H} = 20^{\circ}C$), 저온-고온사이클의 과열도(압축기 입구 온도-증발기 출구온도, $\Delta T_{suh} = \Delta T_{suh,L} = \Delta T_{suh,H} = 10^{\circ}C$)의 동일한 실험조건에서 캐스케이드 증발온도(R404A의 증발온도, $T_{cas,e}$)와 고온사이클의 증발온도(T_e)변화에 따라 R404A와 R744용 캐스케이드 냉동사이클의 COP를 나타낸 것이다. **그림 8**에서 T_e 가 증가할수록 캐스케이드 냉동사이클의 COP가 증가함을 알 수 있다. 이는 T_e 가 증가할수록 Q_e 와 W_H 이 거의 일정한 반면 W_L 가 감소하기 때문이다. 또한, Figure 8에서 T_e 가 일정한 경우, $T_{cas,e}$ 가 감소할수록 COP는 거의 일정한 것으로 보

이나 실제로는 COP가 증가하다가 최대값을 가진 후 다시 감소하고 증가하는 경향을 보인다. 이는 위에서 언급한 과열도와 과냉각도의 영향과 동일한 이유 때문이다.

4. 결론

R404A와 R744용 캐스케이드 냉동사이클의 성능에 영향을 미치는 과열도, 과냉각도, 압축효율, 증발온도, 응축온도 등의 변수들에 대해서 살펴보았고, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 고온사이클에만 과열도를 주는 것이 가장 높은 COP를 가지는 반면에 저온-고온사이클 모두에 대해 과냉각도를 주는 것이 가장 높은 COP를 가지는 것을 알 수 있었다.

2. 압축효율이 낮은 경우에는 저온사이클의 COP가 가장 높았고, 압축효율이 높은 경우에는 저온-고온사이클의 COP가 가장 높은 것을 알 수 있었다.

3. 과열도, 과냉각도, 압축효율, 증발온도, 응축온도 등의 인자들이 R744와 R404A용 캐스케이드 냉동사이클의 COP에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었고, 이들 각각의 인자들은 캐스케이드 냉동사이클의 성능을 최대화 하는 캐스케이드 증발온도가 존재함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 한국연구재단 일반연구자지원 기본유형 I의 “하이브리드형 CO₂ 캐스케이드 냉동 시스템 개발(1663000201003800)”사업의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Lee, T. S., Liu, C. H. and Chen, T. W., “Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade condenser in CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems”. Int. J. Refrigeration 29, pp. 1100-1108, 2006.
- [2] Bhattacharyya, S., Mukhopadhyay, S., Kumar, A. and Khurana, R. K.,

- Sarkar, J., "Optimization of a CO₂-C₃H₈ cascade system for refrigeration and heating", Int. J. Refrigeration 28, pp. 1284-1292, 2005.
- [3] Bansal, P. K. and Jain, S., "Cascade systems: past, present, and future", ASHRAE Trans. vol. 113, no. 1, pp. 245-252, 2007.
- [4] EES: Engineering Equation Solver, fChart Software Inc., 2006.
- [5] Getu, H. M. and Bansal, P. K., "Thermodynamic analysis of an R744-R717 cascade refrigeration system", International journal of refrigeration. 31, pp. 45-54, 2008.
- [6] Nicola, G. D., Giuliani, G., Polonara, F., and Stryjek, R., "Blends of acarbon dioxide and HFCs as working fluids for the low-temperature circuit in cascade refrigerating systems", International journal of refrigeration, vol 28, pp. 45-54, 2008.

저 자 소 개



오후규(吳厚圭)

1975년 부산 수산대학교 식품공학과 졸업, 1983년 와세다 대학교 졸업(공학 박사), 현재 부경대학교 기계공학부 교수



손창효(孫昌孝)

1991년 여수 수산대학교 냉동공조공학과 졸업, 2004년 부경대학교 졸업(공학 박사), 현재 부경대학교 선도사업단 연구교수