

R744-R410A용 이원 냉동시스템 성능 특성

구학근^{1*}

¹동명대학교 냉동공조공학과

Performance Characteristics of Cascade Refrigeration System Using R744 and R410A

Hak-Keun Ku^{1*}

¹Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Tongmyong University

요약 본 논문은 R744-R410A용 이원 냉동시스템의 작동변수에 대한 기초 설계자료를 제공하고자 이원 냉동시스템의 성능 특성을 분석한 것이다. 이원 냉동시스템의 성능은 EES 프로그램을 이용하여 분석하였다. 작동변수로는 R410A용 고온사이클과 R744용 저온사이클의 압축기효율, 응축과 증발온도이다. 이원 냉동사이클의 응축온도가 감소할수록 이원 냉동사이클의 COP는 증가하며, 증발온도가 증가할수록 COP가 증가함을 알 수 있다. 또한, 이원 냉동사이클의 압축효율이 증가할수록 COP가 증가한다. 그러므로 압축효율, 증발온도, 응축온도 등의 인자들이 R410A와 R744용 이원 냉동사이클의 COP에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 그리고 이 이원 냉동사이클은 각각의 변수들에서 최고 효율을 가지는 캐스케이드 증발온도가 존재함을 알 수 있다. 따라서 이러한 인자들을 고려하여 R410A와 R744용 이원 냉동사이클을 설계하는 것은 중요하다.

Abstract This paper presents the analysis on performance characteristics of R744-R410A cascade refrigeration system to offer the basic design data for the operating parameters of this system. The performance of cascade refrigeration system is analyzed by using EES program. The operating parameters include compressor efficiency, and condensing and evaporating temperature in R410A high- and R744 low-temperature cycle, respectively. The COP of this system increases with the decrease of condensing temperature, and increases with the increasing evaporating temperature. And the COP of this system increases with the compression efficiency. Therefore, it can be seen that the compression efficiency, and evaporating and condensing temperature of R744-R410A cascade refrigeration system have an effect on the COP of this system. Also, it can be known that the cascade evaporation temperature with the highest efficiency in each parameter is present. Thus, it is an important to design R744-R410A cascade refrigeration system by considering these parameters.

Key Words : Cascade refrigeration system. Performance analysis, R410A, R744, Vapor compression system

1. 서론

일반적으로 저온용 냉동장치에는 다단 압축 사이클이나 이원 냉동사이클이 사용된다[1-3]. 그러나 단일 냉매를 사용하는 다단 증기 압축 냉동장치는 높은 압력비로 인해 저열원으로부터 고열원으로 열을 보내는데 에너지 소비가 많으므로, 이원 냉동시스템을 사용하는 것이 유리

하다. 기존의 이원 냉동사이클의 고온사이클에는 R22, R134a와 같은 고비점 냉매를, 저온사이클에는 R23, R115와 같은 저비점 냉매를 사용하고 있다. 이와 같은 프레온계 냉매는 열역학적 특성으로 인해 증기 압축 냉동시스템에서는 가장 효율적인 작동을 할 수 있다. 그러나 프레온계 냉매는 오존층 파괴와 지구온난화로 인해 사용이 제한되기 때문에, 환경에 영향을 최소화하는 자연냉매에

이 논문은 2012년 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음(2012A017)

*Corresponding Author : Hak-Keun Ku(Tongmyong Univ.)

Tel: +82-51-629-1681 email: hgkur@tu.ac.kr

Received March 19, 2013 Revised (1st March 28, 2013, 2nd April 1, 2013, 3rd April 2, 2013) Accepted April 11, 2013

대한 관심이 대두되었다. 대체 냉매로써 고온사이클에는 R290, R717과 같은 자연 냉매가 사용되며, 저온사이클에는 R744 등과 같은 자연 냉매들이 대두되고 있다.

이들 자연냉매를 적용한 이원 냉동시스템에 대한 종래의 연구들을 살펴보면, Bansal-Jain[4]은 저온부에 R744 냉매를, 고온부에 ethanol, R717, R1270, R290, R410A 등의 냉매를 적용한 이원 냉동사이클에 대한 성능을 열역학적으로 분석하였다. Winkler 등[5]은 저온부에 R744 냉매를, 고온부에 R410A의 냉매를 적용한 이원 냉동사이클에 대한 성능 분석을 하였다. Rees 등[6]은 고온부에 R410A 냉매를, 저온에는 R744 냉매를 사용하여 팽창밸브로 팽창시키는 방법과 액뎀프로 순환시키는 방법으로 이원 냉동사이클에 대한 성능을 연구하였다. Knudsen-Pachai[7]는 슈퍼마켓의 저온저장 냉동시스템의 고온부에 R410A 냉매를, 저온부에 R744 냉매를 적용한 이원 냉동시스템에 대해서 연구하였다. 이러한 종래의 연구로부터 최근 들어 자연냉매용 이원 냉동시스템에 대한 관심이 커지고 있으나, 이와 관련 자료가 부족하며, 이론이 확립되어 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고온부에는 R410A 냉매를, 저온부에는 R744 냉매를 적용한 이원 냉동사이클의 성능에 미치는 인자들을 이론적으로 파악 및 분석하고, 이를 통

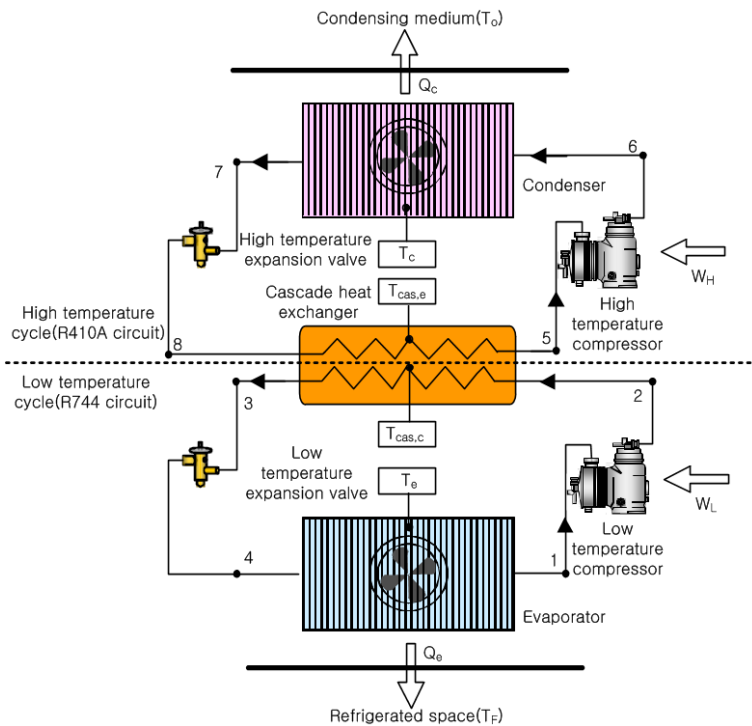
해 이원 냉동시스템의 최적 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 성능 분석

본 논문에서 사용되는 냉매의 열역학적 물성치와 성능 분석은 EES(Engineering Equation Solver)[8] 소프트웨어를 이용하여 계산하였다. 고온사이클에는 R410A 냉매를, 저온사이클에는 R744 냉매를 적용한 이원 냉동시스템의 성능 분석을 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 저온과 고온사이클의 압축기내 냉매는 단열압축 과정이고, 압축효율과 기계효율은 각각 0.8과 1이다.
- 저온과 고온사이클내 열교환기(증발기, 응축기, 이원 열교환기)내의 냉매 압력강화와 열손실은 무시한다.
- 저온과 고온사이클의 팽창밸브내 냉매는 단열팽창인 등엔탈피과정이다.
- 운동에너지와 위치에너지의 변화는 없는 것으로 가정한다.

Fig. 1은 본 연구에서 적용하는 이원 냉동시스템의 상세도를 나타낸 것이고, 이의 분석에 필요한 식들은 Table 1에 정리하였다. 캐스케이드 열교환기 내 R410A와 R744



[Fig. 1] Schematic diagram of a cascade system.

의 전열량(Q_{cas})은 위의 가정에서 주위로의 열손실이 없다고 하였으므로 아래의 식(1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

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

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

이원 냉동시스템의 전체 성능계수(COP)는 아래의 식(3)으로 계산한다.

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

R410A와 R744의 이원 냉동사이클의 각 상태점에서의 열물성치(엔탈피, 엔트로피, 압력, 온도 등) 계산은 Table 2에 나타내었다. Table 1로부터 Table 2의 수식과 열물성치값을 계산하고 이렇게 나온 결과값을 이용하여 R410A와 R744용 이원 냉동사이클의 성능에 영향을 미치는 압축효율, 증발온도, 응축온도 등의 인자들에 대해서 살펴보고자 한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축효율의 영향

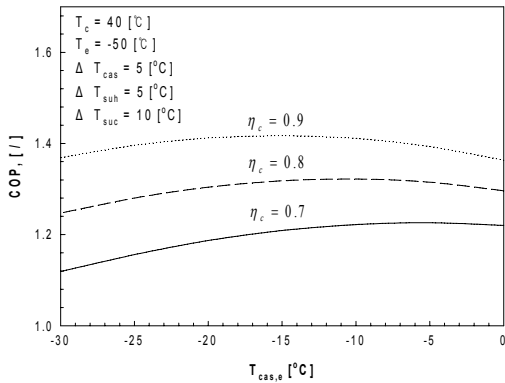
Fig. 2-5는 응축온도($T_c=40^\circ\text{C}$), 증발온도($T_e=-50^\circ\text{C}$), 캐스케이드 열교환기내 냉매 온도차($\Delta T_{cas} = T_{cas,c} - T_{cas,e}$)

[Table 1] Balance equation for each component of R410A and R744 cascade refrigeration system.

Cycle	Component	Energy	Mass
High temperature refrigeration cycle (R410A 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)	$h_3 = h_4$	

[Table 2] Calculations of thermodynamic state points of R410A and R744 cascade refrigeration system.

Evaporator outlet	Compressor outlet	Condenser outlet	Expansion valve outlet
High temperature refrigeration cycle(R410A circuit)			
$P_5 = f(R410A, T = T_{cas,e}, x = 1)$	$P_6 = f(R410A, T = T_{c,x} = 1)$	$P_7 = P_6$	$P_8 = P_5$
$T_5 = T_{cas,e} + \Delta T_{suh,H}$	$T_6 = f(R410A, P = P_6, h = h_6)$	$T_7 = T_c - \Delta T_{suc,H}$	$T_8 = T_{cas,e}$
$h_5 = f(R410A, T = T_5, P = P_5)$	$h_6^* = f(R410A, P = P_6, s = s_5)$ $h_6 = (h_6^* - h_5)/\eta_{cL}\eta_{mH} + h_5$	$h_7 = f(R410A, P = P_7, T = T_7)$	$h_8 = h_7$
$s_5 = f(R410A, T = T_5, P = P_5)$			
Low temperature refrigeration cycle(R744 circuit)			
$P_1 = f(R744, T = T_e, x = 1)$	$P_2 = f(R744, T = T_{cas,c}, x = 1)$	$P_3 = P_2$	$P_4 = P_1$
$T_1 = T_e + \Delta T_{suh,L}$	$T_2 = f(R744, P = P_2, h = h_2)$	$T_3 = T_{cas,c} - \Delta T_{suc,L}$	$T_4 = T_e$
$h_1 = f(R744, T = T_1, P = P_1)$	$h_2^* = f(R744, P = P_2, s = s_1)$ $h_2 = (h_2^* - h_1)/\eta_{cH}\eta_{mH} + h_1$	$h_3 = f(R744, P = P_3, T = T_3)$	$h_4 = h_3$
$s_1 = f(R744, T = T_1, P = P_1)$			

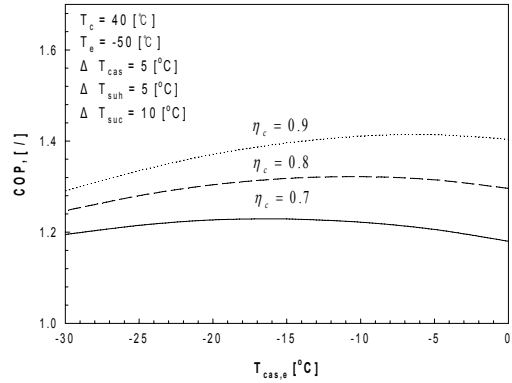


		$T_{cas,e}$				
		-30 °C	-20 °C	-10 °C	0 °C	
$\eta_c = 0.7$	Q_c [kW]	3.096	2.889	2.676	2.453	
	W_L [kW]	0.562	0.781	0.997	1.210	
	W_H [kW]	2.318	1.798	1.361	0.995	
$\eta_c = 0.8$	Q_c [kW]	3.096	2.889	2.676	2.453	
	W_L [kW]	0.562	0.781	0.997	1.210	
	W_H [kW]	2.028	1.573	1.191	0.868	
$\eta_c = 0.9$	Q_c [kW]	3.096	2.889	2.676	2.453	
	W_L [kW]	0.562	0.781	0.997	1.210	
	W_H [kW]	1.803	1.398	1.059	0.771	

[Fig. 2] System performance curve for R410A cycle with variation of compression efficiency.

= 5℃), 저온과 고온사이클의 과냉각도(응축기 출구온도-팽창밸브 입구온도, $\Delta T_{suc} = \Delta T_{suc,L} = \Delta T_{suc,H} = 10^\circ\text{C}$), 저온과 고온사이클의 과열도(압축기 입구온도-증발기 출구온도, $\Delta T_{suh} = \Delta T_{suh,L} = \Delta T_{suh,H} = 5^\circ\text{C}$)로 동일하게 유지한 상태에서 캐스케이드 증발 온도(R410A의 증발온도, $T_{cas,e}$)와 저온과 고온압축기의 압축효율($\eta_c = \eta_{cL} = \eta_{cH}$)변화에 따라 R410A와 R744를 짓이다. Fig. 2는 고온사이클의 압축효율을 변화시킨 것으로, R410A용 고온사이클의 η_c 가 증가할수록 이원 냉동사이클의 COP가 증가함을 알 수 있다. 이는 식(3)과 Fig. 2의 Table에서 η_c 가 증가할수록 Q_c 와 W_L 는 일정하나 W_H 가 감소하기 때문이다. 그리고 R410A용 고온사이클의 압축효율이 일정한 경우, $T_{cas,e}$ 가 증가할수록 증가하다가 감소하는 경향을 보인다. 이러한 결과로부터, R410A용 고온사이클이 최고의 성능계수를 나타내는 $T_{cas,e}$ 가 존재함을 알 수 있다.

Fig. 3은 각각 R744용 저온사이클의 압축효율을 변화시킨 것이고, Fig. 4는 R410A용 고온사이클과 R744용 저온사이클의 압축효율을 모두 변화시킨 것이다. Fig. 3~4에서 η_c 가 증가할수록 이원 냉동사이클의 COP가 증가함

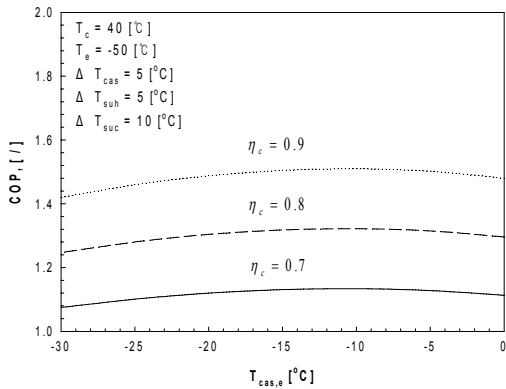


		$T_{cas,e}$				
		-30 °C	-20 °C	-10 °C	0 °C	
$\eta_c = 0.7$	Q_c [kW]	3.096	2.889	2.676	2.453	
	W_L [kW]	0.562	0.781	0.998	1.210	
	W_H [kW]	2.028	1.573	1.191	0.868	
$\eta_c = 0.8$	Q_c [kW]	3.096	2.889	2.676	2.453	
	W_L [kW]	0.492	0.684	0.873	1.210	
	W_H [kW]	1.990	1.532	1.151	0.833	
$\eta_c = 0.9$	Q_c [kW]	3.096	2.889	2.676	2.453	
	W_L [kW]	0.437	0.608	0.776	1.210	
	W_H [kW]	1.960	1.500	1.120	0.805	

[Fig. 3] System performance curve for R744 cycle with variation of compression efficiency.

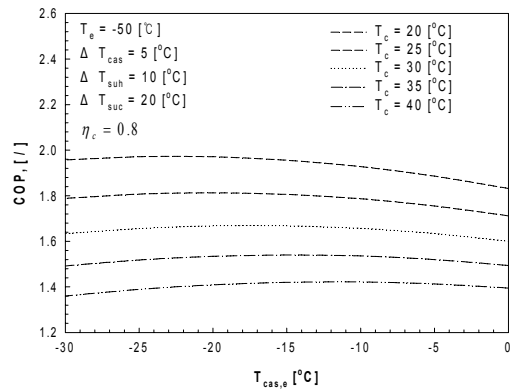
을 알 수 있다. 이는 η_c 가 증가할수록 Q_c 는 일정하나 W_L 와 W_H 가 감소하기 때문이다.

Fig. 2~4에서 η_c 가 일정한 경우, $T_{cas,e}$ 가 감소할수록 COP가 증가하다가 최대값을 가진 후 다시 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 Getu-Bansal[4] 논문의 결과와 유사하다. 즉, 각 냉매에 따라 최고의 COP를 가지는 $T_{cas,e}$ 가 존재한다는 것이다. 이는 이원 냉동시스템에서 저온사이클의 응축온도($T_{cas,c}$)가 너무 낮거나 높게 설정될 때 고온 또는 저온 사이클 압축일량이 다른 쪽 압축일량에 비해서 비대하게 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 성능계수가 좌우된다. 즉, $T_{cas,e}$ 가 감소할수록 W_H 는 증가하는 반면 W_L 는 감소한다. $T_{cas,e}$ 가 최대값까지의 범위에서 성능계수가 증가하는 이유는 W_L 의



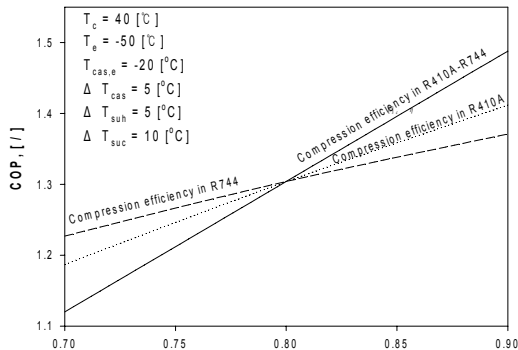
T _{cas,e}		T _{cas,e} [°C]			
		-30	-20	-10	0
η _c =0.7	Q _c [kW]	3.096	2.889	2.676	2.153
	W _L [kW]	0.562	0.781	0.997	1.210
	W _H [kW]	2.318	1.798	1.361	0.992
η _c =0.8	Q _c [kW]	3.096	2.889	2.676	2.153
	W _L [kW]	0.492	0.684	0.873	1.059
	W _H [kW]	1.990	1.532	1.151	0.833
η _c =0.9	Q _c [kW]	3.096	2.889	2.676	2.153
	W _L [kW]	0.437	0.608	0.776	0.941
	W _H [kW]	1.742	1.333	0.995	0.716

[Fig. 4] System performance curve for R744-R410A with variation of compression efficiency.



T _{cas,e}		T _{cas,e} [°C]			
		-30	-20	-10	0
T _c =20	Q _c [kW]	3.096	2.889	2.676	2.453
	W _L [kW]	0.492	0.684	0.873	1.059
	W _H [kW]	1.181	0.862	0.592	0.363
T _c =30	Q _c [kW]	3.096	2.889	2.676	2.453
	W _L [kW]	0.492	0.684	0.873	1.059
	W _H [kW]	1.538	1.161	0.844	0.577
T _c =40	Q _c [kW]	3.096	2.889	2.676	2.453
	W _L [kW]	0.492	0.684	0.873	1.059
	W _H [kW]	1.990	1.532	1.151	0.833

[Fig. 6] System performance curve for R744-R410A with variation of condensing temperature.



[Fig. 5] Effect of compression efficiency on system and individual cycles.

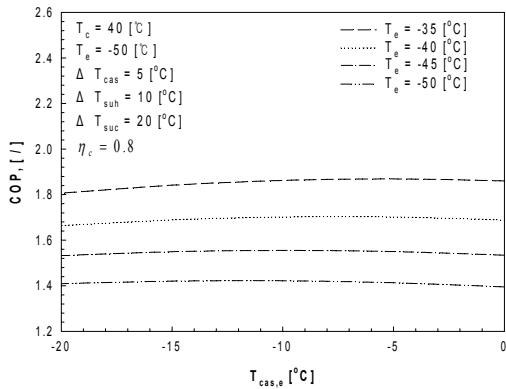
감소비율에 비해 W_H의 증가비율이 작기 때문이고, T_{cas,e}가 최대값 이후의 범위에서 성능계수가 감소하는 이유는 W_L의 감소비율에 비해 W_H의 증가비율이 커기 때문이다.

Fig. 5는 각 사이클의 압축효율 변화에 따른 이원냉동 사이클의 성능계수를 비교한 것이다. 압축효율이 큰 경우

에는 저온·고온사이클에서 가장 큰 성능계수를 나타내고 저온사이클에서는 가장 낮은 성능계수를 나타내는 것을 알 수 있다. 반면에 압축효율이 낮은 경우에는 저온·고온 사이클에서 가장 낮은 성능계수를 나타내고 저온사이클에서 가장 높은 성적계수를 나타낸다. 그 이유는 압축효율이 큰 경우는 Q_c가 일정한 반면에 W_H와 W_L가 감소하기 때문이다. 그리고 압축효율이 낮은 경우는 Q_c가 일정한 반면에 W_H와 W_L가 증가하기 때문이다.

3.2 응축온도의 영향

Fig. 6은 응축온도(T_c=40℃), 증발온도(T_e=-50℃), 캐스케이드 열교환기내 냉매 온도차(ΔT_{cas} = T_{cas,c} - T_{cas,e} = 5℃), 저온과 고온사이클의 과냉각도(응축기 출구온도-팽창밸브 입구온도, ΔT_{suc}=ΔT_{suc,L}=ΔT_{suc,H}=20℃), 저온과 고온사이클의 과열도(압축기 입구온도-증발기 출구온도, ΔT_{suh}=ΔT_{suh,L}=ΔT_{suh,H}=10℃)로 동일하게 유지한 상태에서 증발온도(R410A의 증발온도, T_{cas,e})와 고온사이클의 응축온도(T_c)변화에 따라 R410A와 R744를 사용하는 이원 냉동사이클의 성능계수(COP)를 나타낸 것이다.



T _{cas,e}		T _{cas,e} [°C]			
		-30	-20	-10	0
T _e -40	Q _e [kW]	3.122	2.916	2.702	2.479
	W _L [kW]	0.271	0.449	0.624	0.797
	W _H [kW]	1.886	1.446	1.081	0.778
T _e -50	Q _e [kW]	3.096	2.889	2.676	2.453
	W _L [kW]	0.492	0.684	0.873	1.059
	W _H [kW]	1.990	1.532	1.151	0.833

[Fig. 7] System performance curve for R744-R410A with variation of evaporating temperature.

Fig. 6에서 T_c 가 감소할수록 이원 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, Fig. 6에서 T_c 가 일정한 경우, $T_{cas,e}$ 가 감소할수록 COP가 증가하다가 최대값을 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.

3.3 증발온도의 영향

Fig. 7은 응축온도($T_c=40^\circ\text{C}$), 증발온도($T_e=-50^\circ\text{C}$), 캐스케이드 열교환기내 냉매 온도차($\Delta T_{cas} = T_{cas,e} - T_{cas,e} = 5^\circ\text{C}$), 저온과 고온사이클의 과냉각도(응축기 출구온도-팽창밸브 입구온도, $\Delta T_{suc} = \Delta T_{suc,L} = \Delta T_{suc,H} = 20^\circ\text{C}$), 저온과 고온사이클의 과열도(압축기 입구온도-증발기 출구온도, $\Delta T_{sub} = \Delta T_{sub,L} = \Delta T_{sub,H} = 10^\circ\text{C}$)의 동일한 실험조건에서 캐스케이드 증발온도(R410A의 증발온도, $T_{cas,e}$)와 고온사이클의 증발온도(T_e)변화에 따라 R410A와 R744용 이원 냉동사이클의 성능계수(COP)를 나타낸 것이다.

Fig. 7에서 T_e 가 증가할수록 이원 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, Fig. 7에서 T_e 가 일정한 경우, $T_{cas,e}$ 가 감소할수록 COP는 거의 일정한 것으로 나타났다. 이는 위에 언급한 압축효율과 응축온도의 영향과는 달리, 이원 냉동사이클의 최고 COP가 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

4. 결론

지금까지 R410A와 R744용 이원 냉동사이클의 성능에 영향을 미치는 압축효율, 증발온도, 응축온도 등의 인자들에 대해서 살펴보았다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 압축효율이 증가할수록 이원 냉동사이클의 COP는 증가하며, R410A용 고온사이클의 증발온도가 감소할수록 COP가 증가하다가 감소하는 경향을 볼 수 있었으며, 압축효율이 낮은 경우에는 R744용 저온사이클의 COP가 가장 높았다. 그러나, 압축효율이 높은 경우에는 저온과 고온사이클의 COP가 가장 높은 것을 알 수 있었다.
2. 응축온도가 감소할수록 이원 냉동사이클의 COP는 증가하며, R410A용 고온사이클의 증발온도가 감소할수록 COP가 증가하다가 감소하는 경향을 알 수 있었다.
3. 증발온도가 증가할수록 이원 냉동사이클의 COP는 증가하며, R410A용 고온사이클의 증발온도가 감소할수록 거의 일정한 경향을 나타내었다.
4. 압축효율, 증발온도, 응축온도 등의 인자들이 R744와 R410A용 이원 냉동사이클의 COP에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었고, 이들 각각의 인자들은 이원 냉동사이클의 성능을 최대로 하는 캐스케이드 증발온도가 존재함을 알 수 있었다. 따라서 이러한 인자들을 고려하여 R410A와 R744용 이원 냉동사이클을 설계하는 것은 중요하다.

References

- [1] Sawalha, S., 2005. Using CO₂ in supermarket refrigeration. ASHRAE J. 47 (8), pp. 26 - 30, 2005.
- [2] Wilson, I. and Maier, D., Carbon dioxide for use as a refrigerant. In: Refrigeration Science and Technology, Proceedings, IIR-IRHACE Conference, Innovative

- Equipment and Systems for Comfort and Food Preservation. The University of Auckland, pp. 305 - 311, 2006.
- [3] Park, S. N. and Kim, M. S., Performance of autocascade refrigeration system using carbon dioxide and R134a, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 11, No. 6, pp. 880-890, 1999.
- [4] Bansal, P. K. and Jain, S., Cascade systems: past, present, and future. ASHRAE Trans. 113 (1), pp. 245 - 252, 2007.
- [5] Winkler, J. M., Aute, V., Radermacher, R., Shapiro, D., Simulation and Validation of a R410A/CO₂ cascade refrigeration system. Proceedings of the international refrigeration and air conditioning conference at Purdue. 12 (1), 2273, 2008.
- [6] Rees, B., Rohrer, C., Shapiro, D., Trachta, J., Performance testing and comparison of liquid overfeed and cascade CO₂ systems with R410A primary. International congress of refrigeration. 22, ICR07-B2-123, 2007.
- [7] Knudsen, H. J. H., Pachai, A. C., Energy Comparisons between carbon dioxide cascade systems and state of the art R410A systems. Refrigeration science and technology. 01511637(2), P10, 2004.
- [8] EES: Engineering Equation Solver, fChart Software Inc., 2006.

구 학 근(Hak-Keun Ku)

[정회원]



- 1983년 2월 : 부산 수산대학교 냉동공학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 부산 수산대학교 냉동공조공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 부경대학교 냉동공조공학과 (공학박사)
- 1992년 9월 ~ 현재 : 동명대학교 냉동공조공학과 교수

<관심분야>

냉동공조시스템의 성능 향상 및 고성능 열교환기 개발