

내부 열교환기 부착 R744-R404A용 캐스케이드 냉동시스템의 성능 분석 Performance analysis of a R744 and R404A cascade refrigeration system with internal heat exchanger

오후규 · 손창효

H. K. Oh and C. H. Son

(접수일 : 2011년 06월 28일, 수정일 : 2011년 10월 12일, 채택확정 : 2011년 11월 02일)

Key Words : Carbon dioxide(이산화탄소), Cascade refrigeration system(캐스케이드 냉동시스템), Internal heat exchanger(내부 열교환기)

Abstract : This paper describes an analysis on performance of R744-R404A cascade refrigeration system with internal heat exchanger to optimize the design for the operating parameters of the system. The operating parameters considered in this study include subcooling and superheating degree, internal heat exchanger and compression efficiency, evaporating and condensing temperature in the R744 low- and R404A high-temperature cycle and temperature difference of cascade heat exchanger. The main results are summarized as follows : COP of cascade refrigeration system increases with the increasing of compression efficiency, but decreases with the increasing temperature difference of cascade heat exchanger. Also, the COP increases with the increasing of internal heat exchanger efficiency in high-temperature cycle, but decreases with that in low-temperature cycle. Therefore, internal heat exchanger efficiency, compressor efficiency and temperature difference of cascade heat exchanger on R744-R404A cascade refrigeration system have an effect on the COP of this system.

기호설명

COP : 성적계수
 h : 엔탈피 [kJ/kg]
 m : 질량유량 [kg/s]
 P : 압력 [Pa]
 Q : 전열량 [kW]
 s : 엔트로피 [kJ/kgK]
 T : 온도 [°C]
 W : 압축일량 [kW]
 Δ : 변화량
 η : 효율

c : 가스냉각기, 압축
 cas : 캐스케이드 열교환기
 e : 증발기
 F : 냉동공간
 H : 고온 사이클
 IHX : 내부 열교환기
 L : 저온 사이클
 m : 기계
 o : 응축매체
 suc : 과냉각도
 suh : 과열도

하첨자

∞ : 덕트 유입공기

1. 서 론

지금까지 캐스케이드 냉동사이클의 고온부와 저온부에 사용되어 왔던 프레온계 냉매는 지구온난화와 오존층 파괴로 인해 사용이 제한되어 있기 때문에, 이에 대한 대체 냉매로 ethanol, R717(NH₃, 암모니아), R1270(프로필렌), R290(C₃H₈, 프로판),

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

R744(CO₂, 이산화탄소)와 같은 자연냉매(Natural refrigerant)들이 거론되고 있다. 즉, 고온 사이클 내에는 ethanol, R717, R1270, R744, R290 등이, 저온 사이클 내에는 R744, R290, R717 등이 고려되고 있다.^{1~4)}

자연냉매를 적용한 캐스케이드 냉동시스템에 대한 종래의 연구들을 살펴보면, 우선 Lee 등⁵⁾은 저온 사이클 내 R744의 응축온도를 최적화하기 위해 R744(고온부)와 R717(저온부)의 캐스케이드 냉동사이클의 성능을 이론적으로 분석하였다. 또한, Bhattacharyya 등⁶⁾은 고온 사이클 내 R744의 증발온도를 최적화하기 위해 R744(고온부)와 R290(저온부)을 적용한 캐스케이드 냉동사이클의 성능을 연구하였다. 그리고 Bansal-Jain⁷⁾은 저온부에 R744 냉매를, 고온부에 ethanol, R717, R1270, R290, R404A 등의 냉매를 적용한 캐스케이드 냉동사이클에 대한 성능을 열역학적으로 분석하였다. Winkler 등⁸⁾은 저온부에 R744 냉매를, 고온부에 R404A의 냉매를 적용한 캐스케이드 냉동사이클에 대한 성능 분석을 하였다. Rees 등⁹⁾은 고온부에 R404A 냉매를, 저온에는 R744 냉매를 적용하고, 저온사이클의 R744를 팽창밸브로 팽창시키는 방법과 액펌프로 순환시키는 방법으로 캐스케이드 냉동사이클에 대한 성능을 연구하였다. Knudsen-Pachai¹⁰⁾는 슈퍼마켓의 저온저장 냉동시스템의 고온부에 R404A 냉매를, 저온부에 R744 냉매를 적용한 캐스케이드 냉동시스템에 대해서 연구하였다. 이러한 종래의 연구로부터 알 수 있듯이, 내부 열교환기를 부착한 R744와 R404A용 캐스케이드 냉동사이클에 대한 성능 분석에 대한 자료가 부족할 뿐만 아니라 정확한 이론이 확립되어 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고온과 저온 사이클에 내부 열교환기(Internal heat exchanger)를 채용한 R744(저온 사이클)와 R404A(고온 사이클)용 캐스케이드 냉동사이클의 성능에 미치는 인자들을 이론적으로 파악 및 분석하고, 이를 통해 자연냉매를 적용한 캐스케이드 냉동시스템의 최적 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 성능 분석

본 논문에서 사용되는 냉매의 열역학적 물성치(엔탈피, 엔트로피, 압력, 온도 등)와 성능 분석은 EES(Engineering Equation Solver)¹¹⁾ 소프트웨어를

이용하여 계산하였다. 고온 사이클에는 R404A 냉매를, 저온 사이클에는 R744 냉매를 적용하고, 고온과 저온 사이클에 내부 열교환기를 부착한 캐스케이드 냉동시스템의 성능 분석을 위해 다음과 같이 가정하였다.

Table 1 Analysis conditions

Refrigerant	R744, R404A
$T_c, [^{\circ}\text{C}]$	20 ~ 50
$T_e, [^{\circ}\text{C}]$	-25 ~ -50
$\Delta T_{\text{suc}} = \Delta T_{\text{suc,L}} = \Delta T_{\text{suc,H}}, [\text{K}]$	0 ~ 20
$\Delta T_{\text{sub}} = \Delta T_{\text{sub,L}} = \Delta T_{\text{sub,H}}, [\text{K}]$	0 ~ 20
$\eta_{\text{IHX}} = \eta_{\text{IHX,L}} = \eta_{\text{IHX,H}}, [V]$	0.5 ~ 1.0
$\eta_c = \eta_{c,L} = \eta_{c,H}, [V]$	0.5 ~ 1.0
$\eta_m = \eta_{m,L} = \eta_{m,H}, [V]$	1
$\Delta T_{\text{cas}} = T_{\text{cas,c}} - T_{\text{cas,e}}, [\text{K}]$	3 ~ 7
$T_{\text{cas,c}}, [^{\circ}\text{C}]$	-5 ~ -25
$T_{\text{cas,e}}, [^{\circ}\text{C}]$	-10 ~ -30

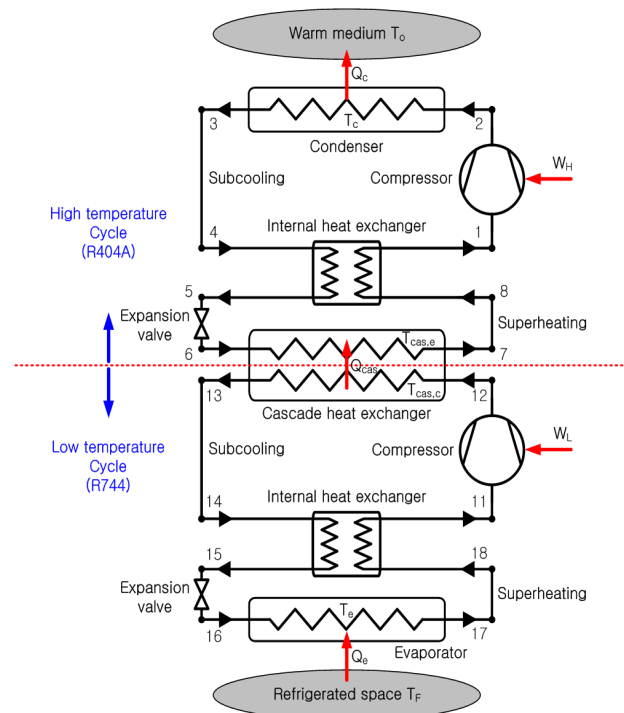


Fig. 1 Schematic diagram of R744 and R404A cascade refrigeration system with internal heat exchanger.

· 저온과 고온 사이클의 압축기 내 냉매는 단열압

축과정이고, 기계효율은 1이다.

- 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 단열 팽창인 등엔탈피과정이다.

- 운동에너지와 위치에너지의 변화는 없는 것으로 가정한다.

Fig. 1은 본 연구에서 적용하는 캐스케이드 냉동시스템의 상세도를 나타낸 것이다. 캐스케이드 열교환기 내 R744와 R404A의 전열량(Q_{cas})은 위의 가정에서 주위로의 열손실이 없다고 하였으므로 아래의 식(1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

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

$$Q_{cas} = m_L(h_{12} - h_{13}) = m_H(h_7 - h_6) \quad (2)$$

캐스케이드 냉동시스템의 전체 성적계수(COP)는 아래의 식(3)으로 계산한다.

$$COP = \frac{Q_e}{W_L + W_H} \quad (3)$$

Table 1에는 본 연구에서 사용되는 캐스케이드 냉동시스템의 성능 분석 범위를 나타내었다. 성능 분석 범위는 R744와 R404A용 캐스케이드 냉동사이클의 일반적인 운전조건이다. Table 1의 분석범위로부터 나온 결과값을 이용하여 R744와 R404A용 캐스케이드 냉동사이클의 성능에 영향을 미치는 압축효율, 내부 열교환기효율, 캐스케이드 온도차, 캐스케이드 증발온도의 영향들에 대해서 살펴보고자 한다.

3. 성능분석 결과 및 고찰

3.1 압축효율의 영향

Fig. 2는 동일한 증발온도, 응축온도, 캐스케이드 온도차, 고·저온 사이클의 과열도와 과냉도, 내부 열교환기효율의 조건에서 R744-R404A용 캐스케이드 냉동시스템의 압축기에 대한 압축효율의 영향을 파악하기 위해 고·저온 사이클 각각에 대해 압축효율을 부가한 그래프이다. Fig. 2에서 알 수 있듯이, 압축효율이 0.8 이하인 경우, R744용 저온 사이클에만

압축효율을 부가했을 때 캐스케이드 냉동사이클의 성적계수가 가장 높았고, 고·저온 사이클 모두에 대해 압축효율을 부가했을 때의 성적계수가 가장 낮았다. 그러나 압축효율이 0.8 이상인 경우에는 이와 반대되는 경향을 보이고 있다. 일반적으로 냉동공조용 압축기의 실제 압축효율은 0.8 이하이므로 이에 대한 분석결과를 이용하여 캐스케이드 냉동장치의 설계 및 제작에 적용하였다. 즉 아래의 결과 그래프들은 고단축 압축효율을 0.8로 일정한 조건에 대한 것들이다. 그리고 위의 압축효율에 대한 결과로부터 캐스케이드 냉동시스템에 사용되는 압축기의 경우 R744용 저온 사이클에만 압축효율을 부가하여 R744-R404A용 캐스케이드 냉동시스템의 성적계수를 파악해 보았고, 그 결과는 Fig. 3에 나타내었다.

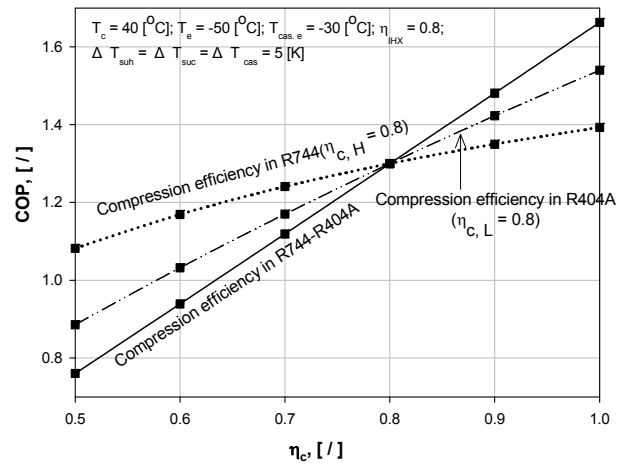


Fig. 2 Effect of compression efficiency on system and individual cycles.

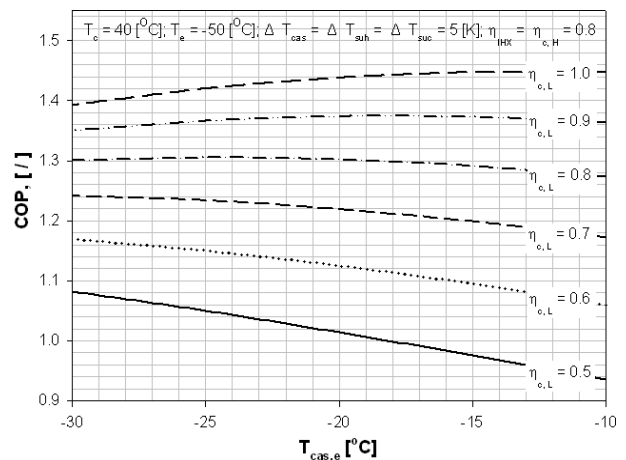


Fig. 3 Variation of system performance with respect to cascade evaporating temperature and compression efficiency on R744 cycle.

Fig. 3은 캐스케이드 증발온도와 R744 압축기의 압축효율 변화에 따라 R744와 R404A를 사용하는 캐스케이드 냉동사이클의 성적계수(COP)를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 η_{cl} 가 증가할수록 캐스케이드 냉동사이클의 COP가 증가함을 알 수 있다. 이는 η_{cl} 가 증가할수록 Q_e 는 변화가 없고 W_H 는 소폭으로 W_L 은 큰 폭으로 감소하기 때문이다.

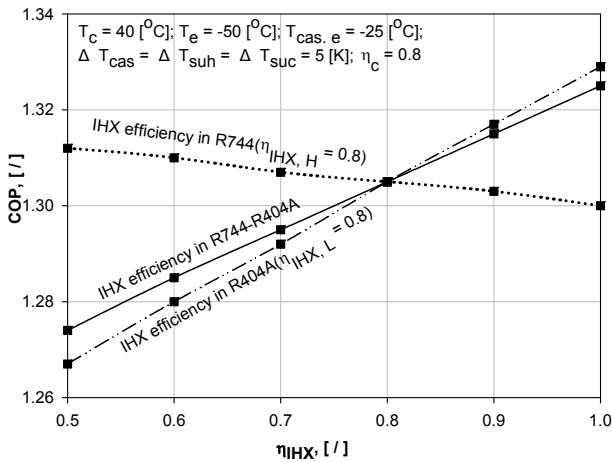


Fig. 4 Effect of IHX efficiency on system and individual cycles.

3.2 내부 열교환기의 영향

내부 열교환기의 유용도(Effectiveness)가 0이라는 것은 내부 열교환기가 없는 경우(내부 열교환기 없는 시스템)를 말하며, 유용도가 1이라는 것은 전열면적이 무한한 내부 열교환기를 가지고 있는 경우(시스템)를 의미한다.

Fig. 4는 동일한 증발온도, 응축온도, 캐스케이드 온도차, 고·저온 사이클의 과열도와 과냉도, 압축효율의 조건에서 R744-R404A용 캐스케이드 냉동시스템의 내부 열교환기에 대한 효율의 영향을 파악하기 위해 고·저온 사이클 각각에 대해 내부 열교환기 효율을 부가한 그래프이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, R744용 저온 사이클에만 내부 열교환기 효율을 부가했을 때 캐스케이드 냉동사이클의 성적계수가 가장 높았고, R404A용 고온 사이클에 대해 내부 열교환기 효율을 부가했을 때의 성적계수가 가장 낮았다. 따라서, 캐스케이드 냉동시스템에 사용되는 내부 열교환기의 경우 R744용 저온 사이클에만 내부 열교환기 효율을 부가하여 R744-R404A용 캐스케이드 냉동시스템의 성적계수를 파악해 보았고, 그 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5는 캐스케이드 증발온도와 R744 내부 열교

환기의 효율 변화에 따라 R744와 R404A를 사용하는 캐스케이드 냉동사이클의 성적계수(COP)를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 $\eta_{IHx, L}$ 이 증가할수록 캐스케이드 냉동사이클의 COP가 감소함을 알 수 있다. 이는 $\eta_{IHx, L}$ 가 증가할수록 Q_e 의 증가량 보다 고·저온 사이클의 압축일량(W_L, W_H)의 합이 더 많이 증가하기 때문이다.

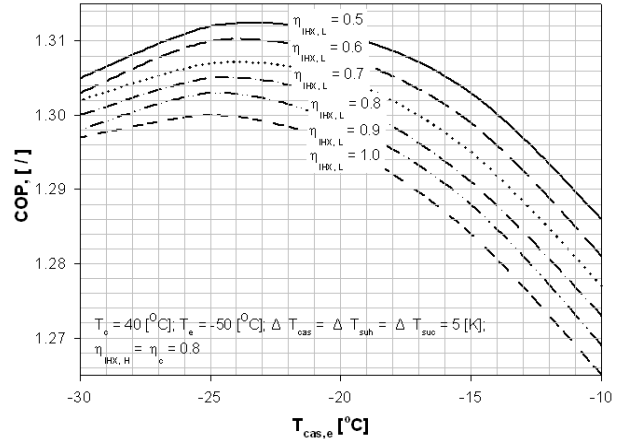


Fig. 5 Variation of system performance with respect to cascade evaporating temperature and IHX efficiency on R744 cycle.

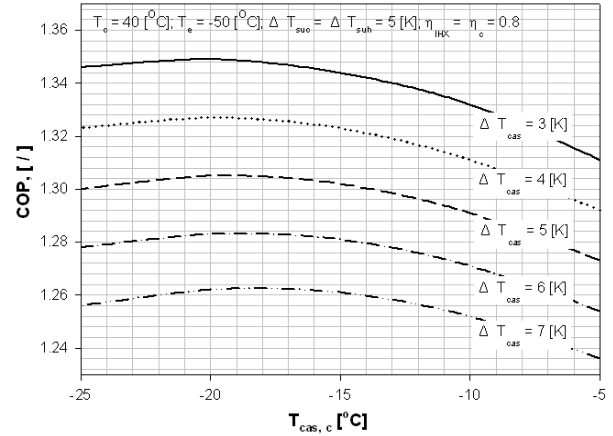


Fig. 6 Variation of system performance with respect to cascade evaporating temperature and temperature difference.

3.3 캐스케이드 온도차의 영향

Fig. 6은 동일한 증발온도, 응축온도, 저·고온 사이클의 과열도와 과냉도, 압축효율, 내부열교환기 효율의 조건에서 캐스케이드 응축온도와 캐스케이드 온도차 변화에 따라 R744와 R404A를 사용하는 캐스케이드 냉동사이클의 성적계수(COP)를 나타낸 것이다.

Fig. 6에서 캐스케이드 온도차가 감소할수록 캐스케이드 냉동사이클의 COP가 증가함을 알 수 있다. 이는 캐스케이드 온도차가 감소할수록 Q_e 와 W_L 이 거의 일정한 반면 W_H 가 감소하기 때문이다.

3.4 캐스케이드 증발온도의 영향

Fig. 2~6에서 알 수 있듯이, 일정한 과열도와 과냉도, 증발온도, 응축온도, 캐스케이드 온도차, 압축효율, 내부 열교환기효율에 대해 캐스케이드 증발온도가 감소할수록 성적계수는 -25°C 전후까지 증가했다가 감소하는 경향을 보인다. 이러한 결과에는 증발열량(Q_e), 고·저온 사이클의 압축일량(W_H , W_L), R404A 물성치 등이 관여하기 때문이다. 우선, 증발열량은 $T_{cas,e}$ 가 감소함에 따라 일정한 비율로 계속해서 증가한다. 따라서, 고온과 저온 사이클의 압축일량에 의해 성적계수가 좌우된다.

Nicola 등¹²⁾은 COP는 캐스케이드 증발온도에 영향을 받고 최적의 캐스케이드 증발온도는 냉매에 따라서 다르다고 하였고, Nasruddin¹³⁾은 고온 사이클에 R404A, 저온 사이클에 R744를 적용하였을 때 캐스케이드 증발온도 -13°C 일 때 최대 COP를 보여준다고 하였다. 또한, Getu와 Bansal¹⁴⁾의 논문에서도 유사한 결과를 보여준다고 하였다. 윤린과 조용¹⁵⁾은 캐스케이드 컨덴서의 응축온도가 너무 낮거나 높게 설정될 때 한쪽의 압축기에서 담당할 부하가 커지기 때문에 각 압축기 간의 부하의 균형점에서 최대 COP가 형성되는 것으로 판단된다고 하였다.

5. 결 론

R744-R404A용 캐스케이드 냉동사이클의 성능에 영향을 미치는 압축효율, 내부 열교환기효율, 캐스케이드 온도차, 캐스케이드 증발온도에 대해서 Table 1의 운전조건하에서 살펴본 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. R744용 저온 사이클에만 압축효율의 변화를 주었을 때 캐스케이드 냉동사이클의 COP가 가장 높게 나타났고, 압축효율이 증가할수록 캐스케이드 냉동사이클의 COP는 증가함을 알 수 있었다.

2. R744용 저온 사이클에만 내부열교환기효율의 변화를 주었을 때 캐스케이드 냉동사이클의 COP가 가장 높게 나타났고, 내부열교환기효율이 증가할수록 캐스케이드 냉동사이클의 COP는 감소함을 알 수 있었다.

3. R744와 R404A용 캐스케이드 냉동시스템의 캐스케이드 온도차가 클수록 캐스케이드 냉동사이클의 COP는 감소함을 확인할 수 있었다.

4. 압축효율, 내부 열교환기효율, 캐스케이드 온도차의 요인들에 대하여 R744-R404A용 캐스케이드 증발온도가 -25°C 전후에서 최대 COP를 나타남을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2010학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2010-074)

참고 문헌

1. Sawalha, S., 2005, "Using CO₂ in supermarket refrigeration". ASHRAE J. Vol. 47, No. 8, pp. 26-30.
2. Wilson, I and Maier, D., 2006, "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.
3. Park, S. N. and Kim, M. S., 1999, "Performance of autocascade refrigeration system using carbon dioxide and R134a", Korea J. of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 11, No. 6, pp. 880-890.
4. Chaichana, C., Aye, L. and Charters, W. W. S., 2003, "Natural working fluids for solar-boosted heat pumps." Int. J. Refrigeration Vol. 26, pp. 637-643.
5. Lee, T. S., Liu, C. H. and Chen, T. W., 2006, "Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade condenser in CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems.", Int. J. Refrigeration Vol. 29, pp. 1100-1108.
6. Bhattacharyya, S., Mukhopadhyay, S., Kumar, A. Khurana, R. K. and Sarkar, J., 2005, "Optimization of a CO₂-C₃H₈ cascade system for refrigeration and heating.", Int. J. Refrigeration Vol. 28, pp. 1284-1292.

7. Bansal, P. K. and Jain, S., 2007, "Cascade systems: past, present, and future.", ASHRAE Trans. Vol. 113, No. 1, pp. 245-252 (DA-07-027).
8. Winkler, J. M., Aute, V., Radermacher, R. and Shapiro, D., 2008, "Simulation and Validation of a R404A/CO₂ cascade refrigeration system". Proceedings of the international refrigeration and air conditioning conference at Purdue. 12 (1), p. 2273.
9. Rees, B., Rohrer, C., Shapiro, D. and Trachta, J., 2007, "Performance testing and comparison of liquid overfeed and cascade CO₂ systems with R404A primary". International congress of refrigeration. 22, ICR07-B2-123.
10. Knudsen, H. J. H. and Pachai, A. C., 2004, "Energy Comparisons between carbon dioxide cascade systems and state of the art R404A systems". Refrigeration science and technology. 01511637(2), p. 10.
11. EES: Engineering Equation Solver, 2006. fChart Software Inc.
12. Nicola, G. D. et al., 2005, "Blends of carbon dioxide and HFCs as working fluids for the low-temperature circuit in cascade refrigerating systems", Int. J. Refrigeration Vol. 28, pp. 130-140.
13. Nasruddin, Darwin Rio Budi Syaka, 2009, "Thermodynamics Analysis of Refrigerant Selection in Cascade Refrigeration System", 1st International Conference of Saving Energy in Refrigeration and Air- Conditioning, pp. 55-62.
14. Getu, H. M. and Bansal, P. K., 2008, "Thermodynamic analysis of an R744-R717 cascade refrigeration system", Int. J. Refrigeration Vol. 31, pp. 45-54.
15. 윤린, 조용, "슈퍼마켓용 CO₂/NH₃ 캐스케이드 시스템과 CO₂ 2단 시스템의 성능평가", 대한설비공학회 2010 하계학술발표대회 논문집, pp. 824-829.