

고온측 냉매에 따른 이원 냉동시스템의 성능 분석

Performance Analysis of Cascade Refrigeration System with Respect to Refrigerants Applying to High Temperature Cycle

윤정인* · 전민주* · 손창효†
Jung-In Yoon*, Min-Ju Jeon* and Chang-Hyo Son†

(Received 20 December 2016, Revision received 13 June 2017, Accepted 13 June 2017)

Abstract: This paper presents the Coefficient of performance(COP) and mass flow ratio of cascade refrigeration system with respect to refrigerants applying to high temperature cycle. The operating parameters considered in this study include degree of superheating and subcooling, compressor efficiency, evaporating temperature, condensing temperature and internal heat exchanger effectiveness in high temperature cycle. The result of this study is as follows : The COP of cascade system increases with increasing degree of superheating and subcooling, compressor efficiency and internal heat exchanger effectiveness except increasing condensing temperature. The mass flow ratio of low and high temperature cycle increases with increasing evaporating temperature and condensing temperature, but decreases with increasing internal heat exchanger effectiveness, degree of superheating and subcooling. Also, the mass flow ratio has no correlation with compressor efficiency at high temperature cycle.

Key Words : Natural and alternative refrigerants, R717, Cascade system, COP, Mass flow ratio

1. 서 론

최근 프레온 냉매로 인한 오존층 파괴나 지구 온난화와 같은 환경 문제가 야기되면서 프레온 냉매를 규제하는 국제협약(교토의정서, 몬트리올 의정서 등)에 의해 우리나라는 2030년부터 프레온 냉매의 사용이 금지된다. 이러한 이유로 프레온 냉매의 대체 냉매로 자연냉매인 R744와 R717의 연구가 활발하게 진행되어 왔으며, 두 냉매를 적

용한 연구로는 단단 냉동사이클에서부터 2단 또는 3단의 다단 압축 사이클이나 2개의 사이클을 이용한 이원 냉동사이클에 대한 연구가 있다.¹⁻²⁾

특히, 자연냉매를 적용한 캐스케이드 냉동시스템에 대한 종래의 연구들을 살펴보면, Antonio Messineo³⁾는 R744(저온부)와 R717(고온부)의 캐스케이드 냉동시스템을 열역학적으로 분석하였고, Bansal-Jain⁴⁾은 R744(저온부)와 ethanol, R290, R404A, R1270 등(고온부)을 적용한 캐스케이드 냉동시스템에 대한 성능을 열역학적으로 분석하

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

*† Chang-Hyo Son : Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong National University.
E-mail : Sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6183
*Jung-In Yoon, Min-Ju Jeon : Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong National University.

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

Cycle	Component	Energy	Mass
High Temperature Refrigeration Cycle	Compressor(13→14)	$W_H = m_H(h_{14} - h_{13}) / (\eta_{c, H} \cdot \eta_{m, H})$	$m_H = m_9 \sim m_{15}$
	Condenser(14→15)	$Q_c = m_H(h_{14} - h_{15})$	
	Internal heat exchanger(16→11, 10→13)	$Q_{IHx, H} = (h_{11} - h_{16}) = (h_{13} - h_{10})$	
	Expansion valve(11→12)	$h_{11} = h_{12}$	
	Cascade heat exchanger(12→9, 6→7)	$Q_{cas} = m_H(h_9 - h_{12}) = m_L(h_6 - h_7)$	
Low Temperature Refrigeration Cycle	Compressor(5→6)	$W_L = m_L(h_6 - h_5) / (\eta_{c, L} \cdot \eta_{m, L})$	$m_L = m_1 \sim m_8$
	Internal heat exchanger(8→3, 2→5)	$Q_{IHx, L} = (h_8 - h_3) = (h_5 - h_2)$	
	Expansion valve(3→4)	$h_3 = h_4$	
	Evaporator(1→4)	$Q_e = m_L(h_1 - h_4)$	

였다. Oh 등⁵⁻⁶⁾은 R744(저온부)와 R404A(고온부)의 캐스케이드 냉동시스템의 성능 및 엑서지 분석을 연구하였다. 이러한 종래연구로부터 이원 냉동장치의 저온부나 고온부에 R744와 R717를 적용하는 사례를 많이 발견할 수 있다. 하지만 R717을 저온부에 적용하는 사이클은 성능 분석에 대한 자료가 R744를 저온부에 적용한 사이클에 비해 상대적으로 부족하다. 따라서 본 연구에서는 저온부에는 R717을, 고온부에는 다양한 냉매를 적용한 캐스케이드 냉동시스템의 작동 변수에 따른 성능을 분석함으로써, 이를 통해 자연냉매를 적용한

캐스케이드 냉동시스템의 최적 설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 성능분석

본 논문에서 사용되는 냉매의 열역학적 물성치와 성능 분석은 EES(Engineering Equation Solver) 소프트웨어를 이용하여 계산하였다. 저온측 사이클에는 R717을, 고온측 사이클에는 R22, R32, R134a, R404A, R410A, R507A R600a, R1270을 적용한 이원 냉동시스템의 성능 분석을 위해 다음과 같이 가정하였다.

저온&고온 사이클에서 압축기 내의 냉매는 단열압축 과정이고, 기계효율과 저온측 사이클의 압축효율은 0.8이다.

저온&고온 사이클에서 배관 내의 압력강하와 열손실은 무시한다.

저온&고온 사이클에서 팽창밸브 내의 냉매는 단열 팽창인 등엔탈피 과정이다.

운동에너지와 위치에너지의 변화는 없는 것으로 가정한다.

Fig. 1은 본 연구에서 적용하는 캐스케이드 냉동시스템의 개략도를 나타낸 것이고, 분석에 필요한 식들은 Table 1에 정리하였다. 캐스케이드 열교환기 내 R717의 전열량(Q_{cas})은 위의 가정에서 주위로의 열손실이 없다고 하였으므로 아래의 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

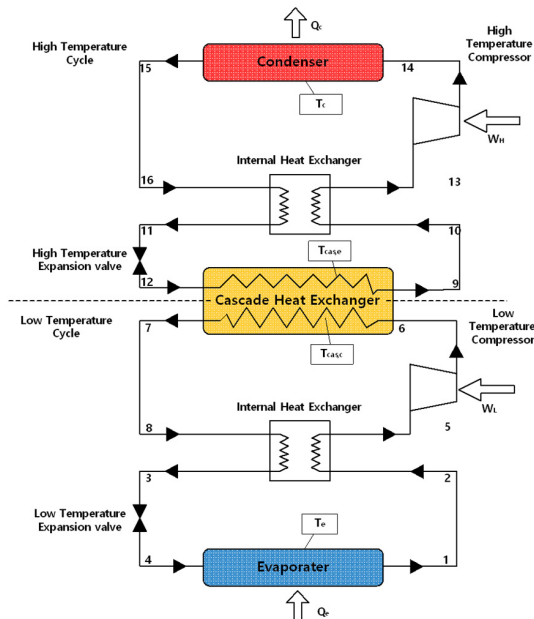


Fig. 1 Schematic diagram of a cascade system.

Table 2 Analysis conditions.

Refrigerant	Value	Unit
T_c	40*, 45, 50, 55, 60	°C
T_e	-50	°C
$\Delta T_{cas} = T_{cas, c} - T_{cas, e}$	5	°C
$T_{suh, L} = T_{suc, L}$	0	°C
$T_{suh, H} = T_{suc, H}$	0*, 5, 10, 15, 20	°C
$T_{cas, e}$	-20, -15, -10*, -5, 0	°C
$T_{cas, c}$	-15, -10, -5*, 0, 5	°C
$\eta_m = \eta_{m, L} = \eta_{m, H}$	0.8	-
$\eta_{c, L}$	0.8	-
$\eta_{c, H}$	0.6, 0.7, 0.8*, 0.9, 1	-
ϵ_L	0.4	-
ϵ_H	0.1, 0.2, 0.3, 0.4*, 0.5	-

*Standard condition

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

$$Q_{cas} = m_L(h_6 - h_7) = m_H(h_9 - h_{12}) \quad (2)$$

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

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

$$= \frac{(h_9 - h_{12})(h_1 - h_4)}{(h_6 - h_7)(h_6 - h_5) + (h_9 - h_{12})(h_{14} - h_{13})}$$

Table 2의 분석조건으로부터 Table 1의 수식의 결과 값을 이용하여 저온부에 R717을 사용한 이원 냉동시스템의 성능에 영향을 미치는 고온 사이클의 작동 변수들이 시스템에 미치는 영향에 대해서 살펴보고자 한다.

3. 본 론

3.1 고온 사이클의 과열도의 영향

Fig. 2는 응축온도 40°C, 증발온도 -50°C, 캐스케이드 온도차 5°C, 과냉도 0°C 저단의 과열도 0°C, 압축기의 기계효율과 압축효율 0.8의 동일한

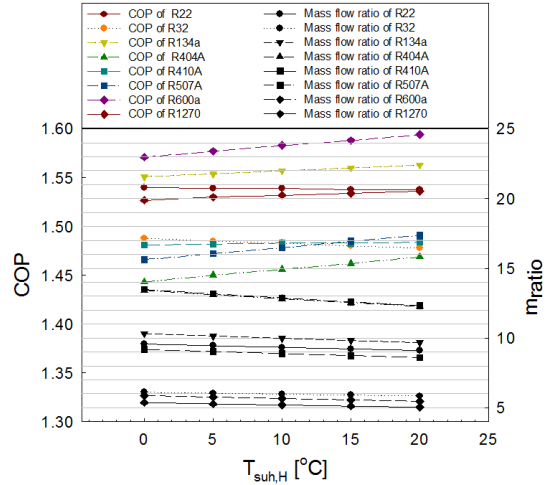


Fig. 2 COP and mass flow ratio curve for cascade refrigeration system with variation of superheating degree at high temperature.

운전조건에서 고온 사이클의 과열도($T_{suh, H}$)의 변화에 따라 고온 사이클의 냉매별 이원 냉동시스템의 총 성능계수(COP)와 질량유량비(m_{ratio})를 나타낸 것이다.

Fig. 2에서 과열도가 0°C에서 20°C로 증가함에 따라 R22와 R32의 COP는 감소하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 식 (1)과 (2)에서 고온 사이클의 질량유량(m_H)이 감소하면, h_9 , h_{12} 의 위치에 변동이 생기고, 고온 사이클의 압축일량(W_H)이 증가하기 때문이다. 식 (3)을 통해서 COP가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이와 반대로 다른 냉매들은 고온 사이클의 압축일량(W_H)이 감소하므로 COP가 증가한다. 이 중에서 R404A가 총 1.80%로 영향을 가장 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

또한 과열도가 증가함에 따라 질량유량비는 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 2에서 알 수 있듯이, R507A가 총 8.61%로 영향을 가장 많이 받고, 특히 0°C에서 5°C로 증가할 때, 2.30%로 가장 큰 결과를 보였다.

3.2 고온 사이클의 과냉각도의 영향

Fig. 3은 동일한 운전조건에서 고온 사이클의

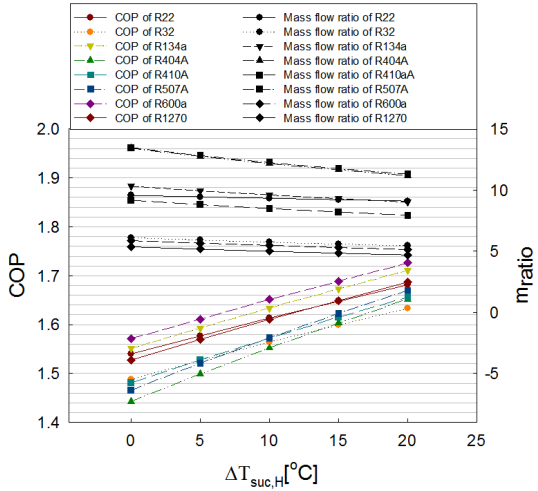


Fig. 3 COP and mass flow ratio curve for cascade refrigeration system with variation of subcooling degree at high temperature cycle.

과냉각도($T_{suc, H}$)의 변화에 따라 고온 사이클의 냉매에 따른 이원 냉동시스템의 총 성능계수(COP)와 질량유량비(m_{ratio})를 나타낸 것이다.

Fig. 3에서 과냉각도가 0°C에서 20°C로 증가함에 따라 COP는 증가하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 과열도의 영향을 분석할 때와 마찬가지로, h_9 , h_{12} 의 값의 변동이 생기고, 고온 사이클의 압축일량(W_H)이 감소하기 때문이다. 식(3)을 통해서 COP가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 중에서 R404A가 총 14.48%로 영향을 가장 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

또한 Fig. 3에서 과냉각도가 증가함에 따라 질량유량비는 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 2에서 알 수 있듯이, R404A가 총 16.63%로 영향을 가장 많이 받고, 특히 0°C에서 5°C로 증가할 때, 4.92%로 가장 큰 결과를 보였다.

3.3 고온 사이클의 증발온도의 영향

Fig. 4는 동일한 운전조건에서 캐스케이드 열교환기 내 고온 사이클의 증발온도($T_{cas, e}$)의 변화에 따라 고온 냉매에 따른 이원 냉동시스템의 총 성능계수(COP)와 질량유량비(m_{ratio})를 나타낸 것이다.

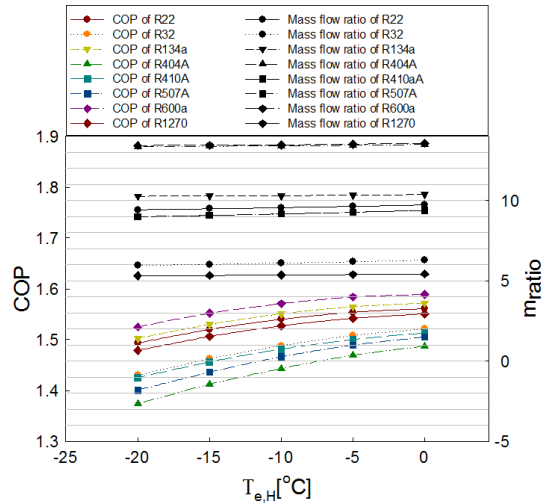


Fig. 4 COP and mass flow ratio curve for cascade refrigeration system with variation of evaporating temperature at high temperature cycle

Fig. 4에서 고온 사이클의 증발온도가 0°C에서 20°C로 증가함에 따라 COP가 증가하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 고온 사이클의 증발온도가 상승하면서 사이클이 바뀌면서 고온 사이클의 질량유량(m_H)이 증가하고, 각 점의 엔탈피 값이 변하기 때문이다. 이러한 이유로 고온 사이클의 h_9 , h_{12} 값의 변동이 생기고, 고온 사이클의 압축일량(W_H)이 감소한다. 식 (3)을 통해서 COP가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 중에서, R404A가 총 7.60%로 영향을 가장 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

마찬가지로 질량유량비도 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, R32가 총 5.25%로 가장 많이 영향을 받고, 특히 -5°C에서 0°C로 증가할 때, 1.51%로 가장 큰 결과를 보였다.

3.4 고온 사이클의 응축온도의 영향

Fig. 5는 동일한 운전조건에서 응축온도($T_{c, H}$)의 변화에 따라 고온 사이클의 냉매에 따른 이원 냉동시스템의 총 성능계수(COP)와 질량유량비(m_{ratio})를 나타낸 것이다.

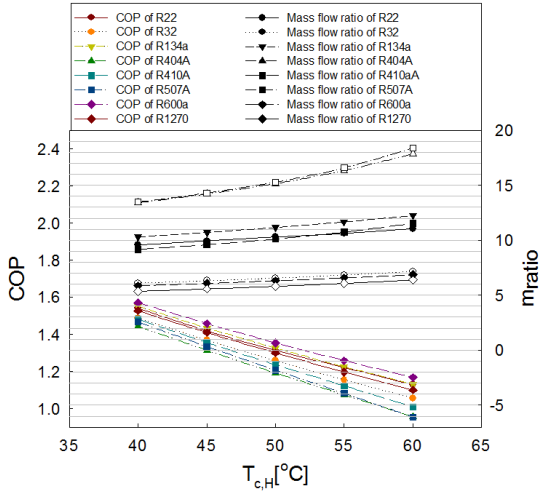


Fig. 5 COP and mass flow ratio curve for cascade refrigeration system with variation of condensing temperature at high temperature cycle.

Fig. 5에서 응축온도가 증가함에 따라 COP는 감소하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 고온 사이클의 응축온도($T_{c,H}$)가 증가함에 따라 고온 사이클의 압축일량(W_H)이 증가하기 때문이다. 식 (3)을 통해서 COP가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 중에서, R507A가 총 34.97%로 영향을 가장 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

COP와는 반대로 질량유량비는 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, R507A가 총 36.53%로 가장 많이 영향을 받고, 특히 55°C에서 60°C로 증가할 때, 10.92%로 가장 큰 결과를 보였다.

3.5 고온 사이클의 내부 열교환기 유용도의 영향

Fig. 6은 동일한 운전 조건에서 고온 사이클의 내부 열교환기 유용도(ϵ_H)의 변화에 따라 고온 사이클의 냉매에 따른 이원 냉동시스템의 총 성능계수(COP)와 질량유량비(m_{ratio})를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 고온 사이클의 내부 열교환기 유용도가 증가함에 따라 COP는 R22, R32 두 냉매에서는 감소하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 고온

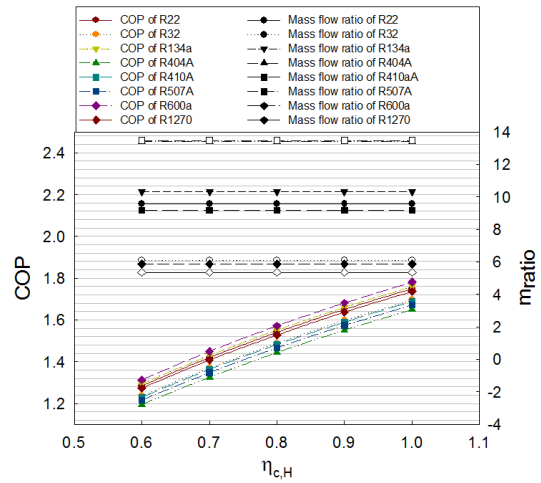


Fig. 6 COP and mass flow ratio curve for cascade refrigeration system with variation of internal heat exchanger effectiveness at high temperature cycle.

사이클의 질량유량(m_H)이 감소하면 ($h_9 - h_{12}$)가 증가하고, R22와 R32의 경우 고온 사이클의 압축일량(W_H)이 증가하기 때문이다. 식 (3)을 통해서 COP가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이와 반대로 다른 냉매에서는 고온 사이클의 압축일량(W_H)이 감소하기 때문에 COP가 증가한다. 이 중에서, R507A가 총 3.00%로 영향을 가장 많이 받는다는 것을 알 수 있다. 특히 유용도가 0.1에서 0.2로 증가할 때, 0.77%로 가장 큰 결과를 보였다.

질량유량비는 모두 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, R507A가 총 15.12%로 영향을 가장 많이 받는 것을 알 수 있다. 특히 유용도가 0.1에서 0.2로 증가할 때, 4.32%로 가장 큰 결과를 보였다.

3.6 고온 사이클의 압축효율의 영향

Fig. 7은 동일한 운전조건에서 고온 사이클의 압축효율($\eta_{c,H}$)의 변화에 따라 고온 사이클의 냉매에 따른 이원 냉동시스템의 총 성능계수(COP)와 질량유량비(m_{ratio})를 나타낸 것이다.

Fig. 7에서 고온 사이클의 압축효율이 증가함에 따라 COP는 증가하는 것을 알 수 있다. 그

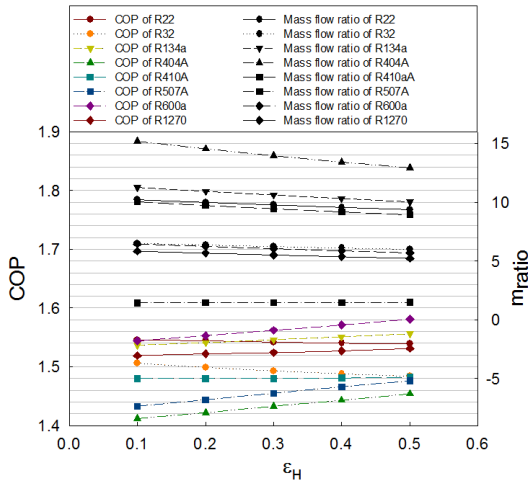


Fig. 7 COP and mass flow ratio curve for cascade refrigeration system with variation of compressor efficiency at high temperature cycle.

이유는 고온 사이클의 압축효율이 클수록, 고온 사이클의 압축일량이 감소하기 때문이다. 식 (3)을 통해 COP가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 중에서, R404A가 총 37.99%로 영향을 가장 많이 받는다는 것을 알 수 있다. 특히 0.6에서 0.7로 증가할 때, 10.88%로 가장 큰 결과를 보였다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 질량유량비는 압축효율의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 이것을 통해 압축효율과 질량유량비는 상관관계가 없음을 알 수 있다.

4. 결 론

앞서 진행한 저온부에 R717을 사용하는 이원 냉동사이클의 고온측 냉매에 따른 성능 분석에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 과열도가 증가할수록 R22와 R32를 제외한 냉매들은 COP가 증가하고 질량유량비가 감소한다. R22와 R32의 경우 COP가 감소하고 질량유량비는 증가한다.
- 2) 과냉각도가 증가할수록 COP가 증가하는 반면에 질량유량비는 감소한다.
- 3) 압축효율이 증가할수록 COP가 증가하며 질

량유량비는 압축효율과 상관관계가 없다.

4) 증발온도가 증가할수록 COP와 질량유량비 모두 증가한다.

5) 응축온도가 증가할수록 COP는 감소하는 반면에 질량유량비는 증가한다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비 (2016년)에 의하여 연구되었음.

References

1. C. H. Son, 2010, "Performance Analysis of Ammonia(R717) and Carbon Dioxide(R744) Two-Stage Cascade Refrigeration System", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 14, No. 1, pp. 1-7.
2. D. H. Lee, M. J. Jeon, C. H. Son and H. K. Oh, 2009, "Maximum Performance Prediction of an Ammonia(R717) and Carbon Dioxide(R744) Cascade Refrigeration System", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 5, No. 3, pp. 531-537.
3. A. Messineo, 2011, "R744-R717 Cascade Refrigeration System: Performance Evaluation compared with a HFC Two-Stage System", Energy Procedia, Vol. 1, No. 1, pp. 144-153.
4. P. K. Bansal and S. Jain, 2007, "Cascade Systems: Past, Present, and Future", ASHRAE Trans, Vol. 113, No. 1, pp. 245-252.
5. H. K. Oh and C. H. Son, 2011, "Exergy Analysis of R744-R404A Cascade Refrigeration System", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 35, No. 8, pp. 1001-1008.
6. 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 for Power System Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 38-43.
7. EES: Engineering Equation Solver, fChart Software Inc., 2010.