

이산화탄소를 이용한 냉동·냉장 시스템의 성능연구

Performance of Carbon Dioxide System for Freezing and Refrigeration

김윤섭(Yoonsup Kim), 윤 린(Rin Yun)[†]

한밭대학교 기계공학과

Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 305-719, Korea

(Received September 24, 2014; revision received December 1, 2014; Accepted: December 3, 2014)

Abstract Performance of freezing and refrigeration systems in supermarket, which utilized CO₂ as a refrigerant, was investigated by using the Pack Calculation II. The configuration of simulated systems was basic parallel refrigeration system, cascade system, and two-stage system. The CO₂ cascade system showed higher COP than basic parallel R404A system by 13% for MT and 62% for LT, respectively. Among the CO₂ cascade systems, R717(MT)-CO₂(LT) showed the highest performance. Open-type intercooler method showed higher performance than liquid injection for the two-stage CO₂ systems.

Key words CO₂ cascade system(이산화탄소 캐스케이드 시스템), CO₂ two-stage system(이산화탄소 이단 압축 시스템), Pack Calculation II(팩 컬큘레이션), Liquid injection(액분사), Intercooler(중간 냉각기)

[†] Corresponding author, E-mail: yunrin@hanbat.ac.kr

기호설명

COP : 효율계수

IHX : 내부열교환기

1. 서 론

CO₂ 냉동 시스템은 다양한 응용범위를 가지고 있다. 히트펌프의 용도로서는 급탕기전용, 실내난방과 급탕기 결합 시스템용, 건조기 등이 활용되고 있고, 가정용 및 자동차용 에어컨디셔너로도 이용되고 있다. 최근 브라인을 대신하여 2차 유체로도 널리 활용되고 있는데 이는 낮은 압력강하로 인한 펌프동력의 감소와 상변화를 이용하기 때문에 냉각용량이 커서 질량유량을 1/6로 줄일 수 있는 장점 때문이다. 최근에는 마이크로콜러(CPU)의 작동유체로도 이용되고 있다. CO₂는 저온 냉동·냉장시스템으로도 이용되는데 자판기 시스템의 냉장용으로, 그리고 슈퍼마켓용으로 CO₂-R717 혹은 CO₂ 이단 압축시스템 등이 있다.

기존연구로는 Likitthammanit⁽¹⁾가 CO₂-R717 캐스케이드 시스템과 CO₂ 냉동 시스템에 대해 실험 연구를 수행하였다. 실험결과에 따르면 CO₂-R717 캐스케이드 시스템의 성능이 R404A 시스템이나 중간냉각기를 가진 CO₂ 이단 압축 기본 시스템에 비해 높게 나타났다. Silva et al.⁽²⁾은 CO₂-R404A 캐스케이드 시스템과 R404A-R404A 병렬 시스템을 실험적으로 비교하였다. 캐스케이드 시

스템이 병렬 시스템보다 22% 적은 연간 소비전력을 보였다. Yukinobu⁽³⁾는 편의점, 슈퍼마켓 지하 CO₂-R410A 캐스케이드 시스템의 성능평가를 수행하였다. 이 실험에서 CO₂ 캐스케이드 시스템이 기존 시스템보다 연간 34%의 소비전력량의 절감을 보였다. Anatoli et al.⁽⁴⁾은 Pack Calculation II를 통한 자연 냉매 시스템의 효율을 연구하였다. 자연냉매로는 R290, R717, 그리고 CO₂를 사용하였고, 그들은 세 가지 기후 조건의 도시인 퀘벡, 뉴욕, 그리고 애틀랜타에서의 계산을 진행한 결과, 자연냉매 시스템이 다른 냉매를 사용한 시스템보다 18%의 전력 절감을 나타내며 우수한 환경 성능을 나타냈다. 기존 연구 내용을 종합할 때 아직까지 다양한 냉매를 상부 사이클에 적용한 CO₂ 캐스케이드 시스템과 중간 단 냉각기법을 적용한 CO₂ 이단 압축 시스템에 대한 연구는 부족하였다.

CO₂를 이용한 저온냉동 및 냉장 시스템은 냉장과 냉동 각각 별도로 운전되는 기존 병렬 시스템을 대체하여 이단 압축 시스템 혹은 캐스케이드 시스템의 형태로 대형 슈퍼마켓 및 냉동 창고에 적용되고 있다. 설치지역의 기후에 따라 CO₂ 이단 압축 시스템과 캐스케이드 시스템의 성능에 있어 우열이 다르지만 두 시스템 모두 CO₂ 저온 냉장·냉동 시스템으로 인정되고 있다. 본 연구의 목적은 실제 압축기 성능 데이터를 기반으로 외기의 영향도 고려할 수 있는 Pack Calculation II를 활용하여 캐스케이드 시스템의 경우에는 상단 냉매의 영

향, 그리고 이단 압축 사이클의 경우에는 세 가지 서로 다른 형식의 비교를 통해 각 시스템 성능을 평가하는데 있다. 또한, 캐스케이드 시스템과 이단 압축 시스템의 경우 설치지역의 기후에 큰 영향을 받기 때문에 우리나라를 포함한 다양한 기후조건에서 CO₂ 적용 기존 병렬 시스템, 캐스케이드, 그리고 이단 압축 시스템의 평가를 수행하였다. 한편, 대형 슈퍼마켓에 적용되는 경우 수에서 수십 미터의 장비관이 되기 때문에 과열도가 시스템에 미치는 영향이 중요하고 이에 대한 영향도 살펴보고자 한다.

2. Pack Calculation II의 모델링 방법

Pack Calculation II는 단일 시스템, 단단 시스템, 캐스케이드 시스템 그리고 이단 압축 시스템과 같은 냉동·냉장 시스템의 형식들 중에서 LT(low temperature)측과 MT(medium temperature)측의 압축기 선정, 과열도와 증발 온도 등을 선정하여 서로 다른 시스템의 소비전력, COP, 그리고 경제성 평가 등을 수행 할 수 있는 프로그램이다. Pack Calculation II의 사용 방법으로는 비교할 시스템의 형식을 선택한 후 시스템의 냉매와 압축기를 선정한다. 그리고 시스템의 외기온도, 과열도, 열교환기 효율, 응축기 온도 제어 등을 설정한 후 필요에 따라 열회수도 설정할 수 있다. 그리고 계산을 진행할 도시를 설정한다. 계산 결과는 매 달별로 COP와 소비전력 값 등이고 장비 비용과 설치비용, 전력 요금 등을 입력하면 경제성까지도 평가할 수 있다.

Table 1은 본 Pack calculation II 계산에서 사용한 시

스템과 냉매 그리고 비교 용량을 나타낸 표이다. Case 1은 먼저 Pack calculation II의 검증을 위해 Silva et al.⁽²⁾의 실험을 비교한 내용이고, case 2는 병렬 시스템과 캐스케이드 시스템의 비교를 나타낸 항목이다. Case 3과 case 4는 각각 냉매 변화에 따른 캐스케이드 시스템 비교와 이단 압축 시스템(two stage)의 이단 압축 초임계 시스템(two-stage Transcritical), 이단 압축 개방형 중간 냉각 시스템(open intercooler), 이단 압축 액주입 시스템(liquid injection)의 사용에 따른 비교를 나타낸다.

2.1 병렬 시스템 모델링

Fig. 1은 기본 병렬 시스템을 나타낸다. 모델링 방법은 Pack calculation II에 있는 두 대의 단단 시스템(two one-stage) 시스템을 이용하였고 MT측 용량을 16.5 kW로, LT측 용량을 6.5 kW로 설정하였다. 여기서 MT측은 중온도(medium temperature)로 냉방용으로 사용하는 증발기를 말하며 병렬 시스템의 MT측 증발온도는 -8℃로 설정하였다. 또한 LT측은 저온도(low temperature)로 냉동용 증발기를 말하며 증발온도는 -35℃로 설정하였다. 과열도는 각각 20.0 K으로 동일하게 설정하였다. 응축기는 공랭식으로 설정하여 외기온도보다 9℃ 높게 설정하였다.

2.2 캐스케이드 시스템 모델링

Fig. 2는 CO₂ 캐스케이드 시스템을 나타낸다. 기본 병렬 시스템과의 비교를 위해 캐스케이드 시스템의 모

Table 1 Specification of CO₂ system

	Validation of Pack Calculation II(case1)	Basic parallel system (case 2)	Cascade system (case 3)	Two-stage system (case 4)
Configuration	Separate MT, LT system	Separate MT, LT system	Cascade, CO ₂	Two stage transcritical Two stage liquid injection Two stage open intercooler
Refrigerants	Cascade, CO ₂	Cascade, CO ₂	Cascade, CO ₂	
	R404A R404A	R410A R404A	R410A CO ₂	
	R404A CO ₂	R410A CO ₂	R290 CO ₂ R717 CO ₂	CO ₂ CO ₂
Cooling capacity	MT : 16.5 kW LT : 6.5 kW	MT : 16.5 kW LT : 6.5 kW	MT : 47.6 kW LT : 5.3 kW	MT : 16.5 kW LT : 6.5 kW
Superheat		10℃, 20℃, 30℃		
Evaporation Temp.		MT : -8℃, LT : -33℃		
Condensing Temp.		Ambient Temp. : +9℃		

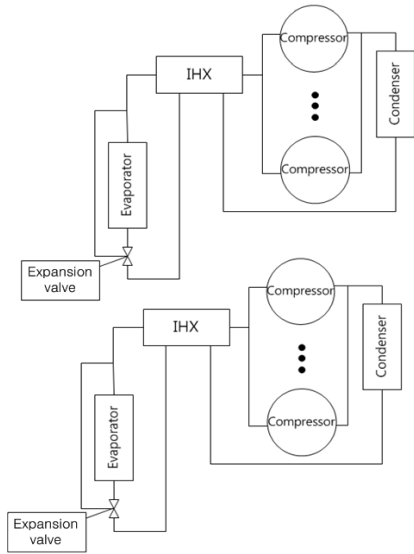


Fig. 1 Modeling of parallel system.

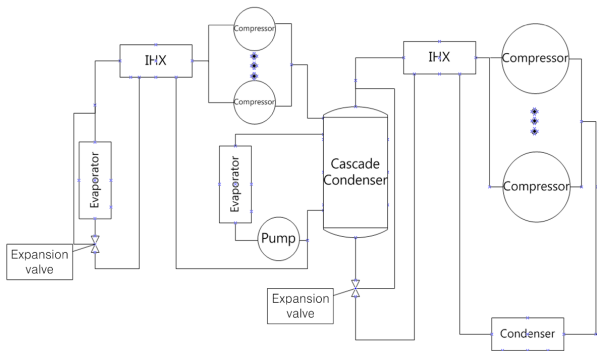


Fig. 2 Modeling of CO₂ cascade system.

모델링은 MT측 용량 47.6 kW, LT측은 동일한 압축기를 사용하며 그 용량은 5.3 kW로 설정하였고, 그리고 캐스케이드 시스템에 필요한 CO₂ 수송 동력을 0.152 kW로 설정하였다. 캐스케이드 시스템간의 비교는 CO₂-R410, CO₂-R290, 그리고 CO₂-R717 캐스케이드 시스템을 각각 비교하였다. 시스템의 비교를 위해서 냉매를 제외한 다른 설정들은 동일하게 진행하여 계산하였다. Pack calculation II는 실제 압축기 모델에 기반을 두고 있다. 본 캐스케이드 시스템 모델링의 경우 캐스케이드 하단 사이클은 CO₂를 이용하고 캐스케이드 상단측은 R410A, R290, 그리고 R717을 이용하여 각 냉매가 전체 시스템에 미치는 영향을 고찰하였다. 이 때 병렬 혹은 이단 압축 시스템과 동일한 MT측 용량을 고려하여 압축기를 선정할 때 CO₂-R717 캐스케이드 시스템의 경우 상단 사이클이 해당 압축기의 운전범위에 들지 않아 시스템의 운전율이 매우 낮았다. 세 시스템 모두 시스템의 운전율이 90% 이상인 경우를 고려하여 압축기

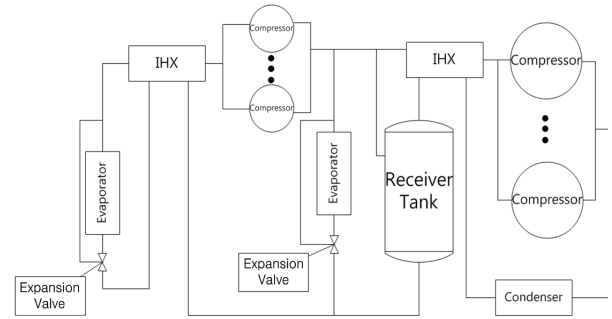


Fig. 3 Modeling of CO₂ two-stage system.

용량을 선정한 이유로 병렬 혹은 이단 압축 시스템과는 다른 용량이 되었다. 실제 슈퍼마켓 시스템의 경우 증발이 발생하는 부하부와 기계실 내 압축기 입구 사이에 수에서 수십 미터의 장배관이 되기 때문에 과열도가 시스템에 미치는 영향이 매우 크다. 따라서 실제 설치환경을 고려하여 설계를 진행할 때 과열도가 시스템에 미치는 영향을 고찰하기 위해 과열도를 Table 1에 나타낸 바와 같이 10℃, 20℃, 그리고 30℃로 변화시키며 COP의 변화를 고찰하였다.

2.3 이단 압축 시스템 모델링

Fig. 3은 CO₂ 이단 압축 시스템을 나타낸다. MT측 용량은 16.5 kW로 LT측 용량은 6.5 kW로 설정하였다. 이단 압축 시스템간의 비교를 위해 설정 값을 모두 동일하게 계산을 진행하였다. 압축기 모델, 과열도, 증발온도, 응축온도 등, 모두 같은 장치를 사용하였을 때 이단 압축 초임계 시스템(two-stage transcritical), 이단 압축 개방형 중간 냉각 시스템(open intercooler), 이단 압축 액주입 시스템(liquid injection)의 COP 변화를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Pack Calculation II의 검증

Pack calculation II의 검증은 Silva et al.⁽²⁾이 실험한 내용과 사양을 기초로 R404A-R404A 단단 시스템과 CO₂-R404A 캐스케이드 시스템을 비교 분석하였다. Silva et al.⁽²⁾은 Brazil Sao Paulo에서 CO₂-R404A 캐스케이드 시스템, R404A-R404A 단단 시스템, 그리고 R22 단일 시스템 세 가지 종류의 시스템을 실험적으로 연구하였다. Fig. 4는 Silva 등이 실험한 내용과 Pack calculation II의 계산 결과를 비교한 그래프이다. Silva 등의 연구에서는 캐스케이드 시스템의 과열도당 소비전력량이 103,234 kWh이고, Pack calculation II에서 계산한 값은

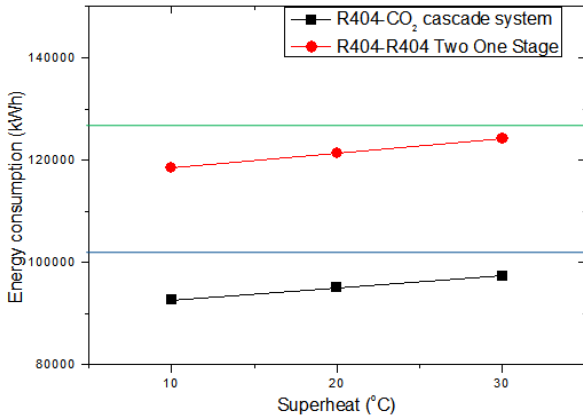


Fig. 4 Validation of pack calculation II.

평균 95,036 kWh로 계산되었다. 병렬 시스템의 과열도 당 소비전력은 126,295 kWh이고, Pack calculation II 에서는 121,332 kWh로 평균 소비전력량이 계산되었다. 본 계산과 실험값의 평균 오차는 5.5%로 매우 낮게 계산 되어 Pack calculation II 계산의 타당성을 확인하였다.

3.2 다양한 CO₂ 시스템구성 비교

3.2.1 기준 병렬 시스템과 캐스케이드 비교

기준 병렬 시스템과 캐스케이드 시스템의 비교는 MT 측과 LT측의 동일한 용량조건에서 수행하였다. Fig. 5 에서 캐스케이드 시스템의 MT측과 LT측의 COP가 기준 병렬 시스템의 COP에 비해 높은 것을 볼 수 있다. 이는 캐스케이드 시스템의 LT측 압축기 압력비가 기준 병렬 시스템의 LT측에 비해 현저히 작기 때문이다. 수치적으로 캐스케이드 시스템의 MT측 평균 COP는 3.37 이고, LT측 평균 COP는 3.04이고, 기준 병렬 시스템의 MT측과 LT측 평균 COP는 각각 2.93과 1.16으로 캐스케이드 시스템이 MT측은 13%, LT측은 62%의 차이를 보였다. MT측의 경우 같은 냉매지만 캐스케이드 시스템이 13%의 효율이 높은 결과로 보았을 때, MT 측 시스템에 있어서도 병렬 시스템보다 캐스케이드 시스템이 더 좋은 효율을 보이고 있다. 그리고 LT측은 62%라는 큰 차이를 보임으로써 CO₂ 냉매와 캐스케이드 시스템의 큰 장점을 볼 수 있다.

3.2.2 캐스케이드 시스템 비교

Fig. 6은 캐스케이드 시스템의 동일 용량 간 서로 다른 냉매를 설정하였을 때의 결과를 나타낸 것이다. 과열도에 따른 COP는 R717-CO₂ 캐스케이드 시스템의 COP가 평균 3.39으로 가장 높은 COP를 보였고, 이는 R410A 시스템과 비교하였을 때 8.5% 높은 값이다. LT측은 동일한 압축기를 설정하여 같은 시스템의 같은 용량을 설

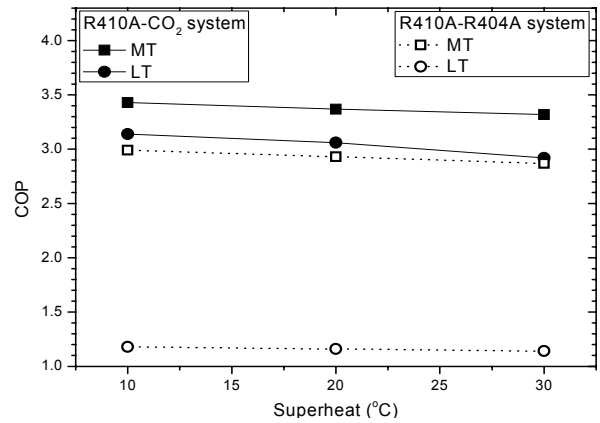


Fig. 5 Comparison of COP between basic system and CO₂ cascade system.

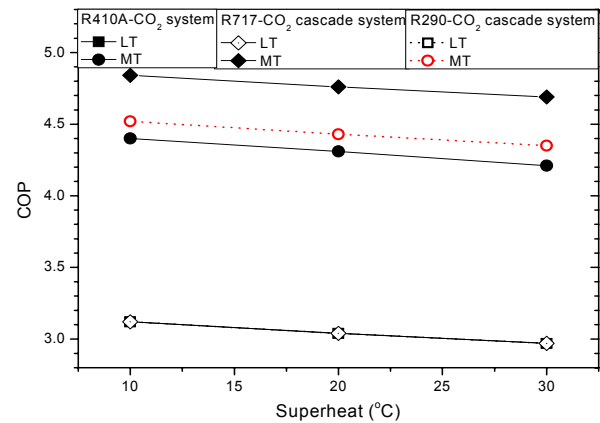


Fig. 6 Comparison of COP among CO₂-cascade systems.

정하여 LT측 COP는 동일함을 볼 수 있다. Table 2는 R717, R290 및 R410A 냉매의 특성을 비교한 표이다. 이 표에서 알 수 있듯이 R717이 이론상의 COP가 가장 높은 것을 볼 수 있다. 이소코지⁽⁶⁾에서도 R717을 직팽식으로 사용하면 시스템 COP가 가장 높은 냉동 시스템을 구축할 수 있다고 밝히고 있다.

3.2.3 이단 압축식 이산화탄소 시스템 비교

Fig. 7은 이단 압축 초임계 시스템(two-stage transcritical), 이단 압축 개방형 중간 냉각 시스템(open intercooler), 이단 압축 액주입 시스템(liquid injection) 각각의 시스템이 같은 조건하에 과열도에 따른 COP를 계산한 결과이다. 그림에서 개방형 중간냉각 시스템과 초임계 시스템의 LT측은 상대적으로 높은 COP로 평균 5.5 이상 나타내고 있지만, MT측은 초월임계 작동으로 인하여 평균적으로 4.0의 COP를 보이고 있다, 그와 반면에 액주입 시스템의 평균 COP가 LT측은 4.2, MT측

Table 2 Characteristics of refrigerant

Refrigerant	COP ratio	Refrigeration capacity ratio/kg	High pressure (MPa)	Compressor outlet temperature(°C)
R410A	0.93	1.04	2.41	57.2
R717	1.05	6.98	1.55	93.3
R290	0.97	1.74	1.37	44.2

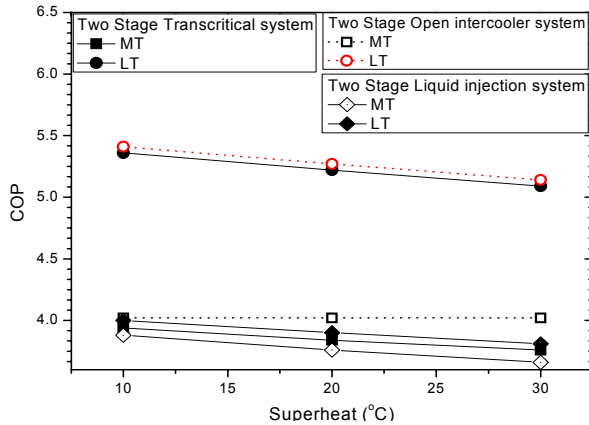


Fig. 7 Comparison of two-stage systems.

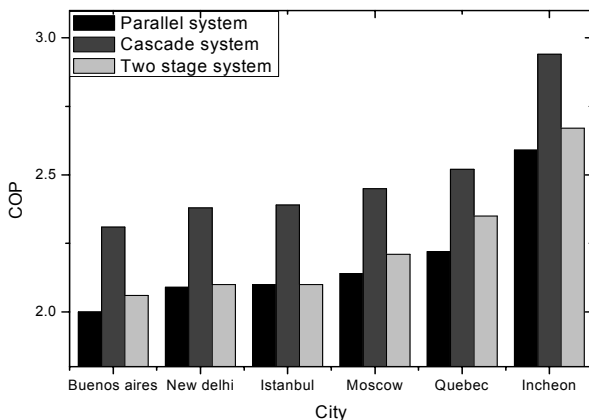


Fig. 8 Comparison of COP among Parallel system, cascade system and two-stage system.

은 3.7로써 낮은 COP를 나타냄을 알 수 있었다. 액주입 시스템의 경우 시스템의 신뢰성에는 기여를 하나 실제 증발기의 냉매순환량의 감소로 인해 효율이 감소한 것으로 판단된다.

3.2.4 병렬 시스템, 캐스케이드 시스템, 이단 압축 시스템 비교

Fig. 8은 병렬 시스템과 캐스케이드 시스템 그리고 이단 압축 초임계 시스템의 성능을 설치지역에 따라 나타낸다.

기후에 따른 영향을 살펴보기 위해 해당 도시를 각각 Buenos aires, New delhi, Istanbul, Moscow, Quebec, Incheon로 달리하였다. 세 가지의 시스템 모두 동일한 조건으로 MT측 16.5 kW, LT측 6.5 kW의 용량으로 계산을 진행하였고, 냉대 기후인 Moscow, Incheon, Quebec에서의 시스템 COP가 열대 기후와 온대 기후인 New delhi, Buenos aires, Istanbul에서 보다 비교적 높은 결과로 나타났다. 병렬 시스템과 이단 압축 초임계 시스템은 고온 지역에서는 차이가 적었지만, 한대 기후 지역에서는 이단 압축 초임계 시스템의 COP가 병렬 시스템대비 8.3% 증가함을 보였다. 캐스케이드 시스템은 병렬 시스템과 이단 압축 초임계 시스템과 비교하여 평균 11.2% 높게 나타났다. 이러한 특성의 캐스케이드 시스템은 이단 압축 시스템에 비해서 특히 고온 지역에서 적합한 것으로 판단된다. 다만 성능이 가장 우수한 R717-CO₂ 시스템의 경우 비교적 큰 용량의 압축기가 요구되고 캐스케이드 응축기로 인해 시스템의 구성이 다소 복잡하다는 제약이 있다. 이단 압축 시스템은 외기온도가 높은 고온 지역에서는 압축기의 운전 조건이 맞지 않아 그 적용이 제한되므로 설치지역에 따라 두 시스템의 적절한 선정이 필요하다.

4. 결론

- (1) CO₂ 캐스케이드 시스템과 기본 병렬 시스템이 같은 조건일 때, 캐스케이드 시스템의 효율이 MT측은 13%, LT측은 62% 높게 나타났다.
- (2) 같은 조건의 캐스케이드 시스템 중 서로 다른 냉매를 사용할 때, R717을 사용한 시스템이 평균 COP 3.39로 최대 효율로 나타나고, CO₂-R410A 시스템보다 8.5% 높게 나타났다. CO₂를 사용한 LT측은 동일한 효율을 나타냈다.
- (3) 이단 압축 시스템에서는 동일용량 같은 조건일 때 이단 압축 개방형 중간냉각 시스템(open intercooler)의 평균 COP가 평균 3.24로 가장 높은 효율로 나타났다. 이단 압축 액주입 시스템(liquid injection)은 평균 2.77의 가장 낮은 COP를 보여 이단 압축 개방형 중간냉각 시스템이 14.5% 더 높은 효율을 나타냈다.
- (4) 캐스케이드 시스템은 동일 용량의 병렬 시스템과 이단 압축 초임계 시스템과 비교하여 평균 11.2% 높게 나타났고, 압축 시스템에 비해서 특히 고온 기후 지역에서 적합한 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2014년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원으로 수행됨(No. 201402120001).

References

1. Likitthammanit, M., 2007, Experimental investigation of NH₃/CO₂ cascade and transcritical CO₂ refrigeration systems in supermarkets, MS thesis, Stockholm, Sweden.
2. Silva, A. D., Filho, E. P. B., and Antunes, A. H. P., 2012, Comparison of a R744 cascade refrigeration system with R404A and R22 conventional systems for supermarkets, Applied Thermal Engineering, Vol. 41, pp. 30-35.
3. IKEMOTO, Y., 2010, Outline and performance evaluation of R410A/CO₂ cascade heat pump systems, Magazine of the SAREK, Vol. 39, pp. 40-49.
4. Mikhailov, A. and Matthiesen, H. O., 2013, System efficiency for natural refrigerant, Magazine of the SAREK, Vol. 42, No. 10, pp. 100-105.
5. Kozi, I., 2009, The new freezing and refrigerating systems with natural refrigerants, Magazine of the SAREK, Vol. 38, No. 4, pp. 5-13.