

R410A용 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 성능 분석

Performance Comparison of Two-stage Compression

Refrigeration System Using R404A

윤정인* · 최광환* · 손창효**† · 조환**

Jung-In Yoon*, Kwang-Hwan Choi*, Chang-Hyo Son**† and Hwan Jo**

(접수일 : 2013년 09월 25일, 수정일 : 2013년 11월 12일, 채택확정 : 2013년 11월 12일)

Abstract: This paper present the performance characteristics of R404A two-stage compression refrigeration system. The operating parameters considered in this study include evaporating and condensing temperature, subcooling and superheating degree, compressor efficiency. The main results were summarized as follows: The COP of two-stage compression refrigeration system using R404A has an effect on the variation of evaporation temperature, condensation temperature, subcooling degree and compressor efficiency, but not an effect on the superheating degree. R404A two-stage compression refrigeration system is unstable because COP of this system is significantly changed when evaporating temperature and compressor efficiency decreased. In particular, when compressor efficiency decreased, COP is significantly decreased. This is inefficient for long-term use.

Key Words : Two-stage compression refrigeration system, COP, R404A, Performance analysis

1. 서 론

참치 등의 식품을 동결 저장하는데 필요한 -30℃ ~-50℃ 범위의 저온 증발온도를 얻기 위해서는 2 단 압축 1단 팽창 냉동시스템이 필요하다.¹⁻²⁾ 지금까지 2단 압축 1단 팽창식 냉동 시스템에 사용되어 왔던 프레온계 냉매는 지구온난화와 오존층 파괴로 인해 사용이 제한되어 있다. 따라서 이에 대한 대체 냉매로는 R717(암모니아), R1270(프로필

렌), R290(프로판), R744(이산화탄소)와 같은 단일 냉매와 R404A와 같은 냉매들이 거론되고 있다.³⁻⁴⁾ 이들 냉매 중에 R717은 독성이 강하여 인체에 해롭고, R1270과 R290은 탄화수소계 냉매로서 폭발성이 강하기 때문에 위험하다. 그리고, R744는 고압이므로 높은 내구성이 요구된다. 따라서 지구환경 문제 해결에 대한 방안으로서 혼합 냉매인 R404A의 사용은 반드시 필요하다.

R404A용 2단 압축 1단 팽창식 냉동 시스템의

*† 손창효(교신저자) : 부경대학교 냉동공조공학과
E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6183

*윤정인, 최광환 : 부경대학교 냉동공조공학과

**조환 : 부경대학교 냉동공조공학과 대학원생

*† Chang-Hyo Son(corresponding author) : Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, PuKyung National University.

E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6183

*Jung-In Yoon, Kwang-Hwan Choi : Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, PuKyung National University.

**Hwan Jo : Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, PuKyung National University, Graduate student.

성능 분석에 대한 종래 연구⁵⁻⁶⁾를 살펴보면, R404A용 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 성능 분석에 대한 연구 결과는 거의 전무한 상태이며, 이와 관련된 이론이 명확하게 확립되어 있지 않은 실정이다.

따라서 본 논문에서는 R404A용 2단 압축 1단 팽창식 냉동시스템의 COP가 증발온도, 응축온도, 과냉각도, 과열도, 압축효율 등에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 R404A용 2단 압축 1단 팽창식 냉동시스템의 최적 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 성능 분석

본 논문에서 사용되는 냉매의 열역학적 물성치 (엔탈피, 압력, 온도 등)와 성능 분석은 EES (Engineering Equation Solver)⁷⁾ 소프트웨어를 이용하여 계산하였다. Fig. 1은 본 연구에서 적용하는 R404A용 2단 압축 1단 팽창식 냉동시스템의 상세도를 나타낸 것이다.

분석에 필요한 식들은 Table 1에 나타내었다. 2단 압축 1단 팽창식 냉동시스템의 전체 성능 계수 (COP)는 아래의 식(1)으로 계산한다.

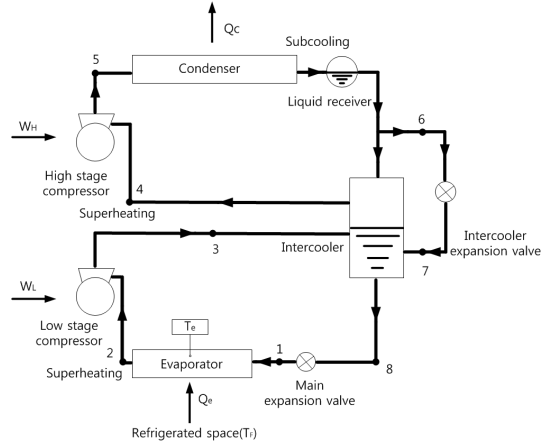


Fig. 1 Schematic diagram of R404A two-stage compression refrigeration system

$$COP = \frac{Q_e}{W_L + W_H} \quad (1)$$

Table 2에는 본 연구에서 사용되는 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 성능 분석범위를 나타내었다. 중간냉각기내의 중간 압력(P_M)의 경우 다음의 식 (2)와 같이 구할 수 있다. 여기서, P_L 은 저단축 압력 P_H 는 고단축 압력이다. Fig. 2는 2단 압축 1

Table 1 Balance equations for each component of R404A two-stage compression refrigeration system

Component	Energy	Mass
Low stage Compressor(1→2)	$W_L = m_L(h_2 - h_1)/\eta_{cL}\eta_{mL}$	$m_H = m_M + m_L,$ $m_M = m_L \left[\frac{(h_5 - h_7) + (h_2 - h_3)}{(h_3 - h_6)} \right],$ $m_H = m_L \left[\frac{(h_2 - h_7)}{(h_3 - h_6)} \right]$
(2→3)	-	
High stage Compressor(3→4)	$W_H = m_H(h_4 - h_3)/\eta_{cH}\eta_{mH}$	
Condenser (4→5)	$Q_{gc} = m_H(h_4 - h_5)$	
Intercooler expansion valve(5→6)	$h_5 = h_6$	
(6→3)	$Q_m = m_M(h_3 - h_6)$	
(5→6)	-	
Main expansion valve (7→8)	$h_7 = h_8$	
Evaporator(8→1)	$Q_e = m_L(h_1 - h_2)$	

단 팽창 냉동시스템의 P-h선도이다.

$$P_m = \sqrt{P_L \times P_H} \quad (2)$$

Table 2의 분석 조건으로부터 과열도, 과냉각도, 증발온도, 응축온도, 압축효율 등의 인자들이 COP에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

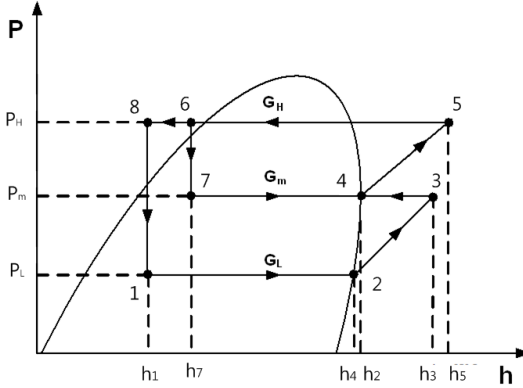


Fig. 2 P-h diagram of R404A two-stage compression refrigeration system

Table 2 Performance analysis ranges of R404A two-stage compression refrigeration system

Refrigerant	R404A
$T_c, [^{\circ}\text{C}]$	20 ~ 40
$T_e, [^{\circ}\text{C}]$	-50 ~ -30
$\Delta T_{\text{suc}} = \Delta T_{\text{suc,L}} = \Delta T_{\text{suc,H}}, [^{\circ}\text{C}]$	10
$\Delta T_{\text{suh}} = \Delta T_{\text{suh,L}} = \Delta T_{\text{suh,H}}, [^{\circ}\text{C}]$	10
$\eta_c = \eta_{\text{cl}} = \eta_{\text{ch}}, [l]$	0.5 ~ 1
$\eta_m = \eta_{\text{mL}} = \eta_{\text{mH}}, [l]$	0.5 ~ 1
$\Delta T_{\text{cas}} = T_{\text{cas,c}} - T_{\text{cas,e}}, [^{\circ}\text{C}]$	5

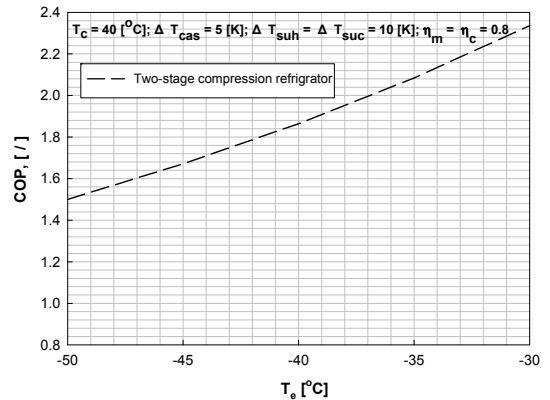
3. 결과 및 고찰

3.1 증발온도의 영향

응축온도(30°C), 캐스케이드 온도차(5°C), 과열도

(10°C), 과냉각도(10°C), 압축효율(0.8), 기계효율(0.8) 등이 일정한 운전 조건에서 증발기의 온도를 -30°C~50°C까지 증가시키면서 R404A용 2단 압축 1단 팽창식 냉동 시스템의 성능계수를 분석하였다.

Fig. 3에 나타난 것처럼 2단 압축 1단 팽창 냉동 사이클의 증발온도(T_e)가 증가함에 따라 성능계수가 약 53.3% 정도 증가하였다. 그 이유는 식(1)과 (2)에서와 같이 증발열량과 전체 압축 일량이 관련되기 때문이다. 수치적으로 살펴보면, 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 저단축 일량은 28.03% 감소하고, 고단축 일량은 34.73% 감소하였다. 그에 비해 증발 열량(Q_e)은 4.3% 정도 증가하였다. Messineo⁵⁾과 Hiren 등⁸⁾은 R404A용 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 증발온도에 대한 유사한 연구 결과를 각각 발표하였다, 즉, 그들은 증발온도 상승시 압축비 감소로 인하여 압축 일량이 감소하게 되고, 이로 인해 성능계수는 증가한다고 하였다. 이러한 그들의 결과는 본 연구와 동일한 결과이다.



$T_e, [^{\circ}\text{C}]$	$W_L, [\text{kW}]$	$W_H, [\text{kW}]$	$Q_e, [\text{kW}]$
-50	5.005	14.660	29.500
-45	4.635	13.210	29.820
-40	4.279	11.890	30.140
-35	3.935	10.680	30.460
-30	3.602	9.569	30.770

Fig. 3 COP, compressor work and evaporation capacity with respect to variation of evaporation temperature

3.2 응축온도의 영향

R404A용 2단 압축 1단 팽창식 냉동시스템의 응축온도 증가시 성능 계수(COP)의 변화를 파악하기 위해 증발온도(-50°C), 캐스케이드 온도차(5°C), 과열도(10°C), 과냉각도(10°C), 압축효율(0.8), 기계효율(0.8)인 조건으로 분석하였다.

Fig. 4와 같이 응축온도 증가시 성능계수가 약 28.5% 정도 감소하였다. 그 이유는 식(1)과 식(2)에서와 같이 압축 일량과 증발열량이 성능계수에 관계하기 때문이다. 즉, 2단 압축 1단 팽창식 시스템의 경우 저단축 일량은 20.86% 증가하고, 고단축 일량은 45.72% 증가하며, 증발 열량은 3.08% 감소하였다. 따라서 냉동시스템의 성능계수는 감소한다.

3.3 과냉각도의 영향

Fig. 5는 증발온도(-50°C), 응축온도(40°C), 캐스케이드 온도차(5°C), 과열도(10°C), 압축효율(0.8), 기계효율(0.8)인 조건에서 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 과냉각도 증가시 성능 계수의 영향을 파

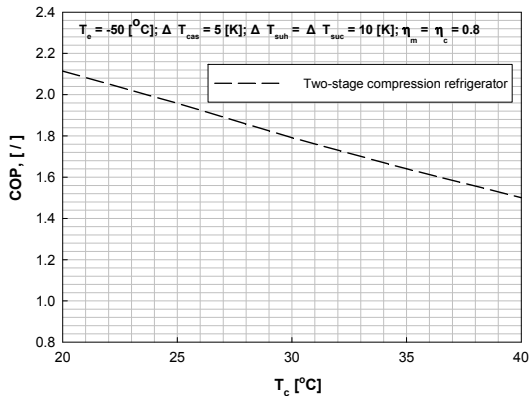
악하기 위해 분석한 것이다.

Fig. 5에서, 과냉각도 증가시 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 성능계수는 약 18.5% 정도 증가하였다. 그 이유는 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 경우 과냉각도가 증가함에 따라 고단축 일량은 23.9% 감소하였고, 저단축 일량과 증발 열량은 일정하기 때문이다. 그러므로 식(1)에 의해 성능 계수가 증가한다.

3.4 과열도의 영향

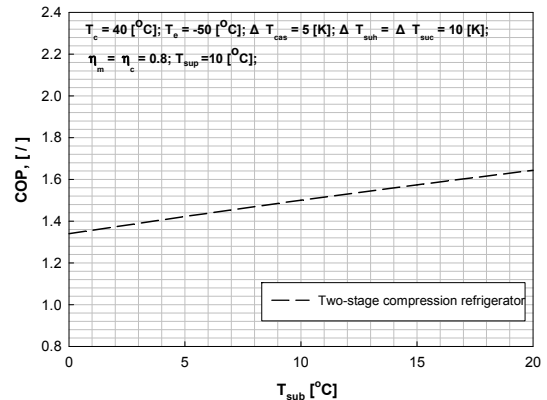
2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 과열도 증가시 성능 계수의 영향을 파악하기 위해 증발온도(-50°C), 응축온도(40°C), 캐스케이드 온도차(5°C), 과냉각도(10°C), 압축효율(0.8), 기계효율(0.8)인 조건에서 분석하였다.

Fig. 6과 같이 과열도가 증가함에 따라 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 성능계수는 거의 동일하다. 그 이유는 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 경우 과열도 증가시 저단축 일량은 10.1% 증가, 고



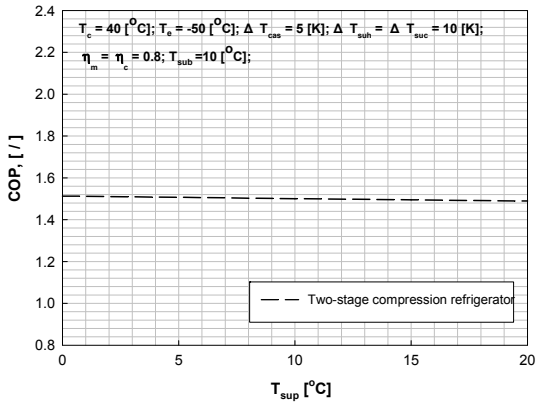
T_c [°C]	W_L [kW]	W_H [kW]	Q_e [kW]
20	4.141	10.060	30.440
25	4.366	11.070	30.220
30	4.585	12.160	29.990
35	4.797	13.340	29.750
40	5.005	14.660	29.500

Fig. 4 COP, compressor work and evaporation capacity with respect to variation of condensation temperature



T_{sub} [°C]	W_L [kW]	W_H [kW]	Q_e [kW]
0	5.005	17.01	29.5
5	5.005	15.73	29.5
10	5.005	14.66	29.5
15	5.005	13.74	29.5
20	5.005	12.94	29.5

Fig. 5 COP, compressor work and evaporation capacity with respect to variation of subcooling degree



$T_{sup}, [^{\circ}C]$	$W_L, [kW]$	$W_H, [kW]$	$Q_e, [kW]$
0	4.762	14.23	28.74
5	4.884	14.44	29.12
10	5.005	14.66	29.5
15	5.124	14.87	29.88
20	5.243	15.09	30.27

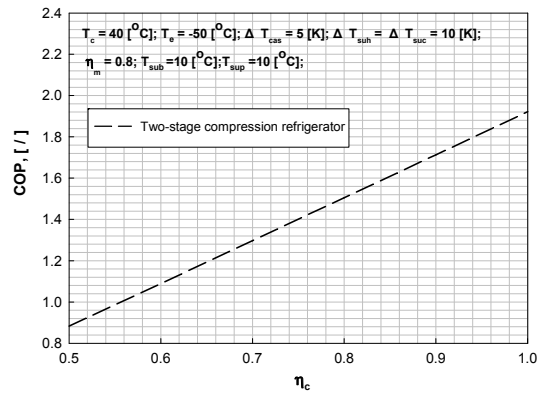
Fig. 6 COP, compressor work and evaporation capacity with respect to variation of superheating degree

단축 일량은 6% 증가하였다. 또한, 증발 열량은 5.32% 증가하였고 식 (1)에 의해 성능계수를 구해보면 과열도 증가시 소폭 감소하였지만 거의 동일하다. 이는 증발기 입구와 출구의 엔탈피 차는 증가하지만, 압축 일량의 증가율이 엔탈피 차이의 증가율과 거의 동일하기 때문으로 판단된다. Bingming 등⁹⁾은 응축온도 40°C, 증발온도 -35°C, 캐스케이드 응축온도 -10°C, 캐스케이드 온도차 5°C, 고단축 과열도 5°C, 고단축 과냉각도 5°C, 저단축 과냉각도 5°C의 조건으로 과열도 증가시 성능계수를 분석하였다. 그 결과 본 논문과 동일한 경향을 나타내었다.

3.5 압축 효율의 영향

2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 압축효율 영향에 따른 성능 계수 변화를 파악하기 위해 증발온도(-50°C), 응축온도(40°C), 캐스케이드 온도차(5°C), 과냉각도(10°C), 과열도(10°C), 기계효율(0.8)인 조건으로 분석하였다.

Fig. 7과 같이 압축효율이 증가함에 따라 2단 압



$\eta_c, [^{\circ}C]$	$W_L, [kW]$	$W_H, [kW]$	$Q_e, [kW]$
0.5	7.984	25.440	29.52
0.6	6.653	20.450	29.52
0.7	5.703	17.060	29.52
0.8	4.990	14.630	29.52
0.9	4.435	12.790	29.52
1.0	3.992	11.360	29.52

Fig. 7 COP, compressor work and evaporation capacity with respect to variation of compressor efficiency

축 1단 팽창 냉동시스템의 성능계수가 약 110% 정도 증가하였다. 그 이유는 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 경우, 압축효율이 증가함에 따라 저단축 일량은 50% 감소하고, 고단축 일량은 55.35% 감소한다. 그러나 증발 열량은 일정한 값이 나타난다. 그러므로 식 (1)에 의해 성능계수는 증가한다.

4. 결 론

지금까지 Table 2의 운전조건에서 R404A용 2단 압축 1단 팽창식 냉동시스템의 성능 특성 파악 및 성능 비교를 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

R404A용 2단 압축 1단 팽창식 냉동시스템의 성능계수는 증발온도, 응축온도, 과냉각도, 압축효율 등에 영향을 받는다. 그러나, 과열도에 대한 영향을 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있었다. 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 경우 증발온도와 압축

효율 감소시에 성능계수의 변화가 커서 안정적이지 못하다. 특히, 압축효율 감소시에 성능계수가 크게 감소하는데 이는 장기간 냉동시스템의 사용시에 단점이 될 수 있다.

References

1. S. Sawalha, 2005, "Theoretical evaluation of trans-critical CO₂ systems in supermarket refrigeration. Part I: Modeling, simulation" and optimization of two system solutions". ASHRAE J., Vol. 47, No. 8, pp. 26-30.
2. S. N. Park and M. S. Kim, 1999, "Experiment and simulation on the performance of an aut cascade refrigeration system using carbon dioxide as a refrigerant", School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, South Korea.
3. J. A. Dopazo, J. Fernandez-Seara, Sieres, F. J. Uria, 2009, "Theoretical analysis of a CO₂-NH₃ cascade refrigeration system for cooling applications at low temperatures". Applied Thermal Engineering, Vol. 29, No. 8-9, pp. 1577-1583.
4. A. Messineo, G. Panno, 2011, "LNG cold energy use in agro-food industry: a case study in Sicily". Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 356-363.
5. A. Messineo, 2012, "R744-R717 Cascade Refrigeration System: Performance Evaluation compared with a HFC Two-Stage System", Engineering and Architecture Faculty, University of Enna Kore, Cittadella Universitaria, Italy, Vol. 14, pp. 56-65.
6. R. Liopis, E. Torrella, R. Cabello, D. Sanchez, 2010, "Performance evaluation of R404A and R507A refrigerant mixtures in an experimental double-stage vapour compression plant", Department of Mechanical Engineering and Construction Campus de Riu Sec, Jaume I University, E-12071 Castellon, Spain, Vol. 87, No. 5, pp. 1546-1553.
7. EES: Engineering Equation Solver, 2006. fChart Software Inc.
8. A. Hiren, A. Shah, B. Ragesh G. Kapadia, 2011, "Comparative Assessment of a Cascade refrigeration cycle with different refrigerant pair", Institute of Technology, NIRMA University, AHMEDABAD - 382 481, 08-10.
9. W. Bingming, W. Guagen, L. Jianfeng, X. Ziwen, 2009, "Experimental investigation on the performance of NH₃/CO₂ cascade refrigeration system with twin-screw compressor", School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shannxi 710049, China, Vol. 32, No. 6, pp. 1358-1365.