



암모니아 대체 자연냉매를 이용하는 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 성능예측

†노건상*

동명대학교 냉동공조공학과
(2012년 2월 22일 투고, 2012년 6월 26일 수정, 2012년 6월 26일 채택)

Performance Analysis of 2-Stage Compression and 1-Stage Expansion Refrigeration System using Alternative Natural Refrigerants

†Geon-Sang Roh*

*Dept. of Refrigeration & Air-Conditioning Engineering, Tongmyong University, Busan, Korea
(Received February 22, 2012; Revised June 26, 2012; Accepted June 26, 2012)*

요약

본 논문에서는 규제 프레온냉매 R22의 대체 자연냉매의 후보인 R290(프로판), R600(부탄), R717(암모니아), R1270(프로필렌)을 작동유체로 사용하는 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 성능 특성을 비교하였다. -20℃ ~ -50℃ 정도의 저온을 얻기 위해 사용되는 2단압축 1단팽창 냉동장치에서의 증발온도, 응축온도, 과열도 및 과냉각도의 변화에 따른 성능계수(COP) 변화를 규명하고자 하였다. 성능특성 규명 결과, 과냉각도 및 중간냉각기에서의 냉매유량 증가에 따라 시스템의 COP는 증가하였으나, 증발온도, 응축온도 및 과열도가 증가할수록 COP는 저하되는 결과를 나타내었다. 또한, 자연냉매를 사용하는 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 COP는 규제 프레온냉매 R22를 사용하는 경우보다 높기 때문에 자연냉매를 사용하고자 하는 냉동시스템의 안전성이 확보되면 충분히 대체 냉매로서의 경쟁력이 있을 것으로 판단되었다.

Abstract - In this paper, alternative natural refrigerant R290(Propane), R600(Butane), R717(Ammonia), R1270(Propylene) for freon refrigerant R22 were used working fluids for 2-stage compression and 1-stage expansion refrigeration system. The operating parameters considered in this study included evaporation temperature, condensation temperature, subcooling degree, superheating degree, mass flow rate ratio of inter-cooler. The main results were summarized as follows : The COP of 2-stage compression and 1-stage expansion refrigeration system increases with the increasing subcooling degree and mass flow rate ration of inter-cooler, but decreases with the increasing evaporating temperature, condensing temperature and superheating degree. Therefore, subcooling degree, mass flow rate ratio of inter-cooler of 2-stage compression and 1-stage expansion refrigeration system using natural refrigerants have an effect on COP of this system. The COP of natural refrigerants was higher than the COP of freon R22 in this study, so points to be considered are the security, the attached facilities for natural refrigerants than COP.

Key words : 2-stage compression and 1-stage expansion refrigeration system, Natural refrigerant, Ammonia, Propane, Butane, Propylene

†주저자:rohgs@tu.ac.kr

I. 서론

일반적으로 -20 ~ -50 °C 이하의 저온을 얻기 위해 사용되는 2단압축방식의 냉동시스템의 작동유체로 사용되던 대표적인 저온용 프레온계 냉매 R22는 지구온난화와 오존층파괴로 인해 사용이 제한되고 있다. 또한, 규제 프레온냉매의 대체냉매로서 개발된 프레온냉매의 경우에도 생산 및 사용에 상당한 규제가 예정되어 있다. 특히, 교토의정서[3] 발효로 인해 2011년부터 유럽에서 생산되는 신차에 적용될 에어컨의 냉매를 지구온난화지수(GWP) 150 이하의 냉매로 규제하기로 함에 따라 유럽을 중심으로 세계 각국은 성공적인 대체 프레온냉매로 주목받던 R134a 규제에 대응하기 위하여 보다 더욱 친환경적인 대체 냉매 연구에 박차를 가하고 있다.

따라서, 이에 대한 대처방안으로서 프레온계 냉매가 개발되기 이전에 선박냉동 등의 냉동장치에서 냉매[1~2]로 널리 사용되던 자연냉매가 다시 주목을 받고 있다. 특히, 자연계에 존재하는 자연냉매로서 암모니아(R717), 탄화수소계(프로판, 부탄 등) 냉매, 이산화탄소(R747) 등은 지구환경에 대해 무해성이 검증되었으며, 이들 자연냉매를 냉동공조장치의 작동유체로 적용하기 위한 연구[4~8]도 활발히 진행되고 있다.

또한, -20 ~ -50 °C 이하의 저온을 얻기 위해 1단 압축 냉동시스템을 적용할 경우, 일반적으로 -30 °C 이하의 증발온도에서는 증발압력이 저하되면서 압축기의 압축비가 증대되고, 또한 압축효율이 낮아지면서 냉동장치의 성능계수도 저하되게 된다. 또한 압축기 토출가스온도가 높아지면서 압축기 윤활유가 열화되면서 장치에 심각한 손상을 일으킬 우려가 있다.

따라서, -30 °C 이하의 증발온도를 얻기 위해서는 Fig. 1과 같이 압축과정을 2회로 분할하면, 저단측 압축기의 압축비가 작아지면서 압축효율이 저하되는 것을 방지할 수 있고, 저단측 압축기의 토출가스를 냉각시켜 고단측 압축기에서 압축하게 되면 고단측 압축기의 토출가스 온도를 낮게 할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 1은 2단압축 1단팽창 냉동장치의 개략도를 나타낸 것이고, Fig. 2는 p-h 선도에서 표시된 냉동사이클을 나타낸 것이다. Fig. 1의 증발기에서 증발된 냉매증기(점 1)는 저단압축기로 흡입되어 중간압력까지 압축(점 2)되고, 중간압력의 냉매증기는 중간냉각기에서 건조포화증기상태(점 3)까지 냉각된 후 고단압축기로 흡입압축되어 토출(점 4)된다. 저단측 압축기 토출증기는 중간냉각기용 팽창밸브(점 5)을

통과한 중간냉각기에서 냉각시키게 되고, 여분의 냉매증기는 메인 팽창밸브(점 7) 상태를 거쳐 증발기로 흡입되게 된다.

따라서, 본 논문에서는 지구환경에 무해한 자연냉매[8] 중에서 현재 사용되고 있는 R717(암모니아) 및 대체 자연냉매후보인 R290(프로판), R600(부탄), R1270(프로필렌)을 이용하는 2단압축 1단팽창 냉동시스템에서의 증발온도, 응축온도, 과열도, 과냉각도, 중간냉각기의 냉매유량 변화에 대한 냉동장치의

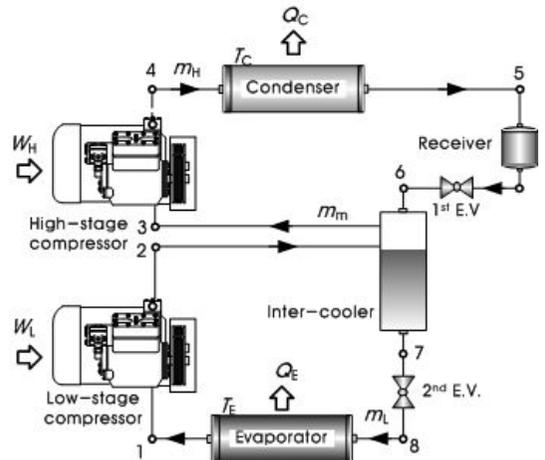


Fig. 1. Schematic diagram of 2-stage compression and 1-stage expansion refrigeration system.

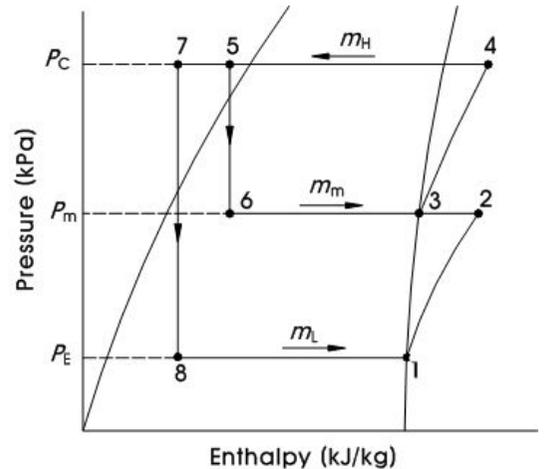


Fig. 2. P-h diagram of 2-stage compression and 1-stage expansion refrigeration system.

성능변화특성을 규명하여 이를 통해 자연냉매를 이용하는 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 최적 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 성능 분석

본 논문에서 사용되는 자연냉매의 열역학적 물성치와 성능 분석은 EES[9] 소프트웨어를 이용하여 계산하였고, 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 성능 분석을 위한 EES 계산 과정에서 다음과 같은 조건을 가정하였다.

- 저단축 및 고단축 압축기내 냉매는 단열압축과정이고, 저단축 및 고단축 압축기의 압축효율과 기계효율은 각각 0.8로 가정하였다.
- 사이클내 열교환기내 및 사이클내 배관에서의 냉매 압력강하와 열손실을 무시하였다.
- 저단과 고단 시스템에서의 운동에너지와 위치에너지 변화는 없는 것으로 가정하였다.

Table 1은 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 성능

Table 1. Balance equation of 2-stage compression and 1-stage expansion refrigeration system

Component	Calculation
Low stage compressor work	$W_L = m_L(h_2 - h_1) / \eta_{cL} \eta_{cL}$
High stage compressor work	$W_H = m_H(h_4 - h_3) / \eta_{cH} \eta_{cH}$
Cooling capacity	$Q_E = m_L(h_1 - h_2)$
Heating capacity	$Q_C = m_H(h_4 - h_5)$
Inter-cooler capacity	$Q_m = m_m(h_3 - h_6)$
COP	$COP = \frac{Q_E}{W_H + W_L}$

Table 2. Performance analysis range of 2-stage compression and 1-stage expansion refrigeration system

Refrigerants	R290, R600, R717, R1270
Evaporating temperature(T_E)	-30 ~ -50 °C
Condensation temperature(T_C)	30 ~ 50 °C
Superheating temperature(T_{SUP})	0 ~ 20 °C
Subcooling temperature(T_{SUB})	10 ~ 20 °C
Flow rate(m_L)	0.01 kg/s

분석에 사용된 계산식을 정리한 것이다.

Table 2는 본 연구에서 일반적인 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 운전조건을 고려한 계산 범위를 나타낸 것이다. Table 2와 같은 운전조건에서 자연냉매를 사용하는 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 증발온도, 응축온도, 과열도, 과냉각도 및 중간냉각기에서의 냉매유량변화에 대한 성능변화를 규명하고자 하였다.

III. 본 론

3.1. 증발온도의 영향

Fig. 3은 응축온도(T_C) 40 °C, 과열도(T_{SUP}) 10 °C, 과냉각도(T_{SUB}) 15 °C로 일정하게 유지되고 있는 상태에서 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 증발온도(T_E) 변화에 따른 COP 및 냉각열량 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 증발온도가 저하될 수록 냉각열량은 거의 일정하게 유지되고 있으나, COP가 저하되고 있다. 이는 COP 계산식에 있어서 냉각열량은 일정하나, 압축기 흡입압력 저하에 따른 냉매증기의 비체적 증가, 압축기 체적효율 저하 등에 따른 압축일량이 증가하기 때문이다. 따라서, COP 측면에서 증발온도를 높게 유지하는 것이 유리하나, 2단압축 1단팽창 냉동시스템이 적용되는 증발온도 -40 ~ -50 °C 영역에서는 R600 및 R717을 사용하는 것이 유리할 것으로 고려된다. 특히, COP 뿐만 아니라 냉각열량을 기준으로 대체냉매를 선택하고자 하는 경우, 증발온도 -30 °C ~ -50 °C의 영역에서 R717의 냉각열량은 R22에 비해 약 6배정도의 냉각열량이 높기 때문에 R717을 선택하는 것이 경쟁력이 있을 것으로 기대된다.

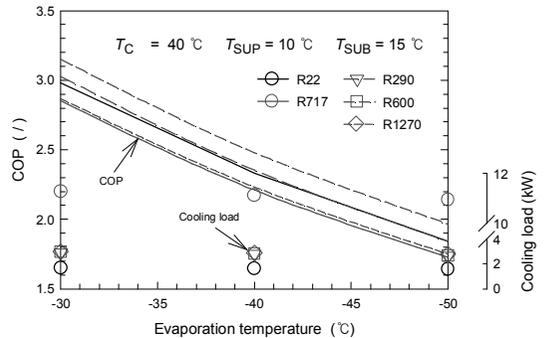


Fig. 3. The effect of evaporation temperature for 2-stage compression and 1-stage expansion system COP.

3.2. 응축온도의 영향

Fig. 4는 증발온도(T_E) $-40\text{ }^\circ\text{C}$, 과열도(T_{SUP}) $10\text{ }^\circ\text{C}$, 과냉각도(T_{SUB}) $15\text{ }^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지되고 있는 상태에서 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 응축온도(T_C) 변화에 따른 COP 및 냉각열량 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 응축온도가 상승할 수록 COP는 증가하고 있으나, 냉각열량의 차이는 없다. 이는 응축압력 상승에 따른 압축비 증대, 저단축 및 고단축 압축일량이 증가하기 때문이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 자연냉매의 냉각열량은 R22에 비해 65% ~ 70%까지 증가하고 있기 때문에 대체냉매로서의 경쟁력은 충분한 것으로 고려된다. COP의 경우에는 R600, R717의 COP는 R22에 비해 1% ~ 10%의 증가, R290, R1270의 COP는 R22에 비해 3% ~ 8%의 감소를 보이고 있으나, COP와 냉각열량을 고려하면 R22의 대체냉매로서

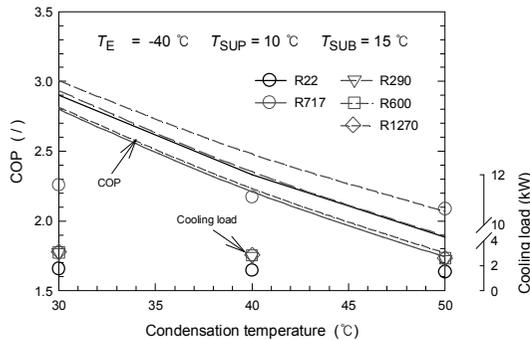


Fig. 4. The effect of condensation temperature for 2-stage compression and 1-stage expansion system COP.

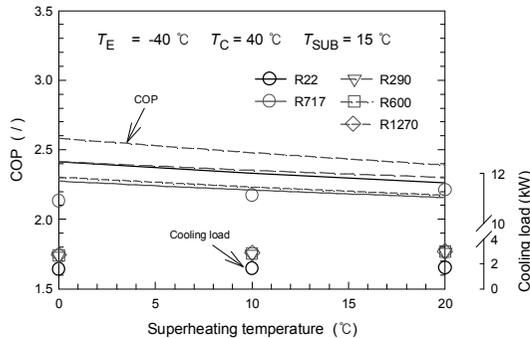


Fig. 5. The effect of superheating temperature for 2-stage compression and 1-stage expansion system COP.

자연냉매를 사용하는 것에는 큰 장애물이 되지 않을 것으로 고려된다.

3.3. 과열도의 영향

Fig. 5는 증발온도(T_E) $-40\text{ }^\circ\text{C}$, 응축온도(T_C) $40\text{ }^\circ\text{C}$, 과냉각도(T_{SUB}) $15\text{ }^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지되고 있는 상태에서 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 과열도(T_{SUP}) 변화에 따른 COP 및 냉각열량 변화를 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 COP가 감소되는 것은 과열도가 증가하게 되면 토출가스온도의 상승, 저단축 흡입 냉매증기의 비체적증가에 따른 압축일량이 감소하기 때문이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 과열도가 증가할 수록 자연냉매를 사용하는 경우의 COP는 최대 6% 정도 감소되고 있다. 그러나, 자연냉매 R290, R1270을 사용하는 시스템의 냉각열량은 최대 70% 정도 증가하고 있기 때문에 대체 자연냉매를 선택하는 경우에는 COP 측면과 냉각열량 측면을 동시에 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3.4. 과냉각도의 영향

Fig. 6은 증발온도(T_E) $-40\text{ }^\circ\text{C}$, 응축온도(T_C) $40\text{ }^\circ\text{C}$, 과열도(T_{SUP}) $10\text{ }^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지되고 있는 상태에서 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 과냉각도(T_{SUB}) 변화에 따른 COP 및 냉각열량 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 과냉각도가 증가할 수록 냉각열량 및 COP가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 저단축 및 고단축 압축일량은 거의 일정한 반면, 과냉각도 상승에 따른 중간냉각기에서의 냉각열량 증가 때문으로 고려된다.

증발온도 $-30\text{ }^\circ\text{C}$ ~ $-50\text{ }^\circ\text{C}$ 의 영역에서 자연냉매 R717의 COP는 R22에 비해 최대 10%의 증가를 보이

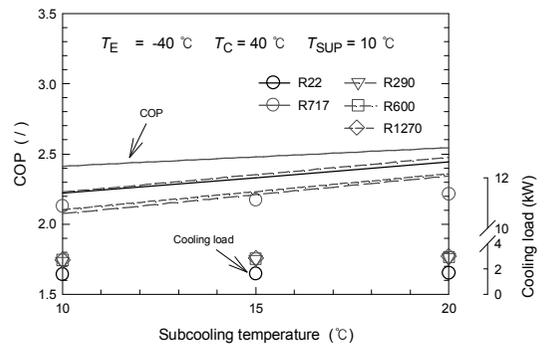


Fig. 6. The effect of subcooling temperature for 2-stage compression and 1-stage expansion system COP.

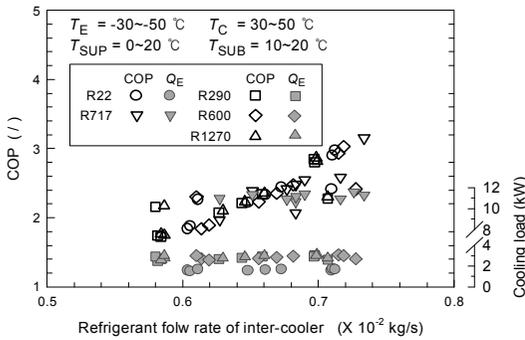


Fig. 7. The effect of refrigerant flow rate of inter-cooler for 2-stage compression and 1-stage expansion system COP.

고 있으나, R600의 COP는 R22와 거의 비슷한 COP를 나타내고 있다. 이에 반해 R290 및 R1270의 COP는 R22에 비해 최대 7%의 COP 감소를 나타내고 있다. 따라서, 일반적인 2단압축 1단팽창 냉동시스템에서 규제냉매 R22의 대체냉매로서는 R717 및 R600를 선정할 필요가 있을 것으로 고려된다.

3.5. 중각냉각기의 냉매유량 영향

Fig. 7은 증발온도 -30 ~ -50 °C, 응축온도 30 ~ 50 °C, 과냉각도 0 ~ 20 °C, 과열도 10 ~ 20 °C로 유지한 상태에서 중간냉각기에서의 냉매유량변화에 따른 냉동시스템의 COP 및 냉각열량 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 2단압축 1단팽창 냉동시스템에서 냉매의 종류에 상관없이 동일한 운전조건에 대해 중간냉각기로 유입되는 냉매유량이 증가할수록 COP가 증가되고 있으나, 냉각열량에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 중간냉각기로 유입되는 냉매유량이 증가하게 되면 저단축 압축기로 흡입되는 냉매유량이 감소됨으로 인해 저단축 압축일량이 감소하기 때문으로 고려된다. 따라서, 2단압축 1단팽창 냉동시스템을 운전하는 과정에서 중간냉각기로 유입되는 냉매유량을 증가시킬수록 COP 측면에서 유리할 것으로 고려된다.

또한, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 R22의 대체 자연냉매로서는 COP 및 냉각열량 측면에서 R717이 가장 유리할 것으로 고려되며, 또한 R600의 경우에는 R22와 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

VI. 결 론

-30 ~ -50 °C 정도의 저온을 얻기 위한 2단압축 1

단팽창 냉동시스템에서 사용되는 규제냉매 R22의 대체냉매로서 자연계에 존재하는 친환경적 자연냉매 R290, R600 R717, R1270을 사용하는 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 성능에 영향을 미치는 증발온도, 응축온도, 과열도, 과냉각도 및 중간냉각기에서의 냉매유량에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 성능은 증발온도가 높을수록, 응축온도가 낮을수록 COP가 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한, 실제 2단압축 1단팽창 냉동장치가 운전되는 온도범위에서의 R22 대체 자연냉매로서는 R600, R717이 유리한 것으로 고려할 수 있다.

(2) 자연냉매를 사용하는 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 COP는 과열도 및 과냉각도의 영향을 크게 받지 않는 것으로 판단할 수 있다.

(3) 동일한 운전조건에서 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 COP는 냉매종류에 상관없이 중간냉각기로 유입되는 냉매유량이 증가할수록 크게 나타나고 있으나, 냉각열량의 큰 변화는 없는 것을 알 수 있었다. 따라서, 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 실제 운전과정에서는 중간냉각기로 유입되는 냉매유량을 증가시키는 것이 COP 측면에서 유리할 것으로 고려된다.

참고문헌

- [1] Bodinus, W. S." The rise and fall of carbon dioxide systems". ASHRAE, pp. 29~34, (1999)
- [2] Donaldson, B. and Nagengast, B. " Heat and cold: mastering the great indoors". ASHRAE; (1994)
- [3] Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change, (2005)
- [4] Liao, S. and Jakobsen, A., " Optimal heat rejection pressure in transcritical carbon dioxide air conditioning and heat pump system", IIF-IIR-Sections B and E-Oslo, Norway-1998. pp. 301~310, (1998)
- [5] Neksa, P., Rekstad, H., Zakeri, G. R. and Schiefloe, P. A., "CO₂ heat pump water heater: characteristics, system design and experimental results", International Journal of refrigeration, Vol. 21, No. 3, pp.172~179, (1998)
- [6] Hwang, Y. and Reinhard, R., "Experimental Investigation of the CO₂ Refrigeration cycle", ASHRAE Transactions: simpogia, pp. 1219~1227, (1999)

암모니아 대체 자연냉매를 이용하는 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 성능예측

- [7] Brown, S. J., Yana-Motta, F. S. and Domanski, A. P., "Comparative analysis of an auto motive air conditioning systems operating with CO₂ and R134a", International Journal of refrigeration, 25, pp. 19~32, (2002)
- [8] 손창효, "NH₃ - CO₂ 를 사용하는 이원 냉동시스템의 성능 분석", 한국가스학회지, Vol.14, No.1, pp.1~7, (2010)
- [9] fChart Software Inc. Engineering Equation Solver, (2006)