

## 친환경 프레온 냉매를 이용하는 2단압축 2단팽창 냉동시스템의 성능예측

노건상 · 김종열<sup>†</sup>  
(동명대학교)

## Performance Analysis of Two-stage Compression and Two-stage Expansion Refrigeration System using Freon Refrigerants

Geun-Sang ROH · Jong-Ryeol KIM<sup>†</sup>  
(Tongmyong University)

### Abstract

In this paper, cycle performance analysis of two-stage compression and two-stage expansion refrigeration system using alternative freon refrigerants is presented to offer the basic design data for the operating parameters of the system. Alternative freon refrigerant for freon refrigerant R22 were used as working fluids in this study. The operating parameters considered in this study included evaporation temperature, condensation temperature, subcooling degree, superheating degree, and mass flow rate ratio of inter-cooler. The main results were summarized as follows : The COP of two-stage compression and two-stage expansion refrigeration system increases with the increasing subcooling degree and mass flow rate ratio 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 two-stage compression and two-stage expansion refrigeration system using alternative freon refrigerants have an effect on COP of this system.

*Key words : COP, Natural Refrigerant, Two-stage Compression, Two-stage Expansion*

### I. 서론

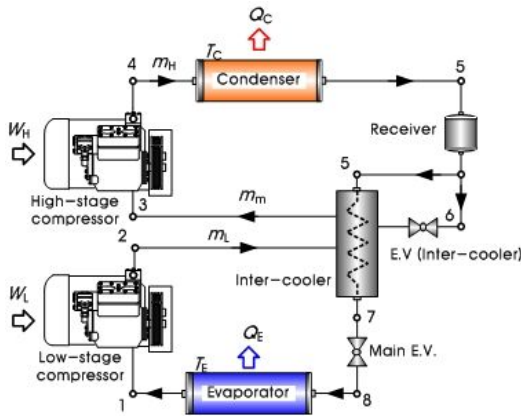
-30 °C 이하의 낮은 증발온도를 얻기 위해 사용되는 냉동시스템에는 2단압축 냉동시스템, 3단압축 냉동시스템, 2원 냉동시스템(노건상 외, 2011, 2010) 등이 사용된다. 2원 냉동시스템의 사용은 저원시스템용 대체냉매 선정이 늦어지고 있

을 뿐만 아니라, 증발온도 -70 °C ~ -120 °C의 초저온영역의 온도를 얻기 위한 범위가 한정되어 있어 있으므로 일반적으로 -40 °C 이하의 F3급 ~ F4급 냉동창고용 냉동시스템으로는 2단압축 냉동시스템이 사용되고 있다.

2단압축 냉동시스템에는 저단축 및 고단축 압축기, 열교환기, 팽창밸브, 중간냉각기(inter-cooler)

<sup>†</sup> Corresponding author : 629-1684, k jy804@tu.ac.kr

로 구성된 2단압축 1단팽창 냉동시스템과 2단압축 2단팽창 냉동시스템이 있다. 2단압축 1단팽창 냉동시스템에서는 응축기에서 응축된 고압의 냉매액의 일부가 중간냉각기로 흡입되는 데 비해, [Fig. 1]의 2단압축 2단팽창 냉동시스템에서는 2단압축 1단팽창 냉동시스템과 달리 응축기에서 응축된 고압 냉매액(점 5)을 전부 제1팽창밸브에서 중간압력까지 팽창시켜 중간냉각기로 흡입(점 6)시키고, 중간냉각기에서 분리된 냉매증기는 저단압축기에서 토출된 증기와 같이 고단압축기(점 3)로 흡입되나, 중간냉각기 하부의 냉매 포화액(점 7)은 제2팽창밸브를 거쳐 증발압력까지 팽창시켜 증발기로 흡입시키고 있다.

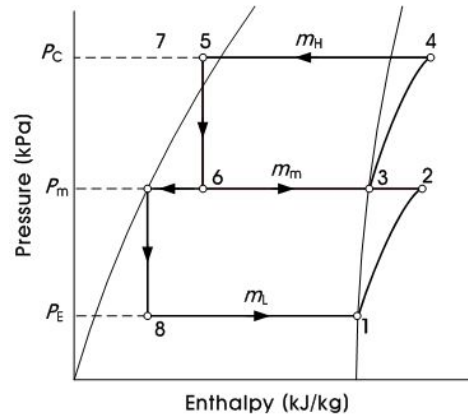


[Fig. 1] Schematic diagram of 2-stage compression and 2-stage expansion refrigeration system

2단압축 2단팽창 냉동시스템에서는 중간압력의 냉매 포화액을 증발압력까지 팽창시키므로 증발기입구의 냉매엔탈피는 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 경우보다 커지기 때문에 증발기에서의 냉동효과가 증가되고, 따라서 COP도 약간 상승하는 장점이 있다.

[Fig. 2]는 [Fig. 1]에서의 상태점을 적용시켜 나타낸 2단압축 2단팽창 냉동사이클로서 이상적인 건조포화 압축상태를 나타내고 있다.

이와 같이 2단압축 2단팽창 냉동시스템에서 작동유체로 사용되던 대표적인 프레온냉매 R22의



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

경우, 지구온난화와 오존층파괴 등의 문제로 인해 냉매로서의 활용도는 점차 축소될 예정이다 (UNEP, 1992). 이에 대한 방안으로 대체 프레온 냉매 및 자연냉매 등과 같은 친환경적 작동유체가 거론되고 있다(Chaichana, 2003).

따라서 본 논문에서는 2단압축 2단팽창 시스템에 대체 프레온 단일냉매 R32, R134a, 대체프레온 유사공비혼합냉매 R404A(R125/R134a/R143a, 44/4/52 wt%), R407C(R32/R125/R134a, 23/25/52 wt%), R410A(R32/R125, 50/50 wt%) 및 단일냉매와 동일한 특성을 가진 공비혼합냉매 R507A(R125/R143a, 50/50 wt%)를 적용한 2단압축 2단팽창 냉동시스템의 성능계수에 미치는 인자들을 이론적으로 분석하고, 이를 통해 대체 프레온 냉매를 이용하는 2단압축 2단팽창 냉동시스템의 최적 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## II. 성능 분석

본 논문에서 사용되는 대체 프레온냉매의 열역학적 물성치와 성능 분석은 EES(Engineering Equation Solver) 소프트웨어(fChart softwar, 2006)를 이용하여 계산하였고, 2단압축 2단팽창 냉동시스템의 성능 분석을 위한 EES 계산 과정

에서 다음과 같은 조건을 가정하였다.

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

2단압축 2단팽창 냉동시스템의 성능 분석에 사용된 계산식은 <Table 1>과 같다.

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

Component	Calculation
Low stage compressor	$W_L = m_L(h_2 - h_1)/\eta_{cL}\eta_{cL}$
High stage compressor	$W_H = m_H(h_4 - h_3)/\eta_{cH}\eta_{cH}$
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	R22, R32, R134a, R404A, R407C, R410A, R507A
Evaporating temperature( $T_E$ )	-35 ~ -55 °C
Condensation temperature( $T_C$ )	40 ~ 60 °C
Superheating temperature( $T_{SUP}$ )	10 ~ 30 °C
Subcooling temperature( $T_{SUB}$ )	10 ~ 20 °C
Flow rate	0.01 kg/s

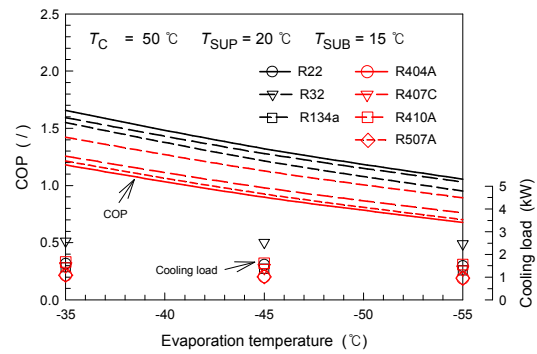
<Table 2>는 본 연구에서 일반적인 2단압축 2단팽창 냉동시스템의 운전조건을 고려한 계산 범위를 나타낸 것이다. 표 2와 같은 운전조건에서 대체 프레온냉매를 사용하는 2단압축 2단팽창 냉

동시스템의 증발온도, 응축온도, 과열도, 과냉각도 및 중간냉각기에서의 냉매유량변화에 대한 성능변화를 규명하고자 하였다.

### III. 본 론

#### 1. 증발온도의 영향

[Fig. 3]은 응축온도( $T_C$ ) 50 °C, 과열도( $T_{SUP}$ ) 20 °C, 과냉각도( $T_{SUB}$ ) 15 °C로 일정하게 유지되고 있는 상태에서 2단압축 2단팽창 냉동시스템의 증발온도( $T_E$ ) 변화에 따른 COP 및 냉각열량 변화를 나타낸 것이다.



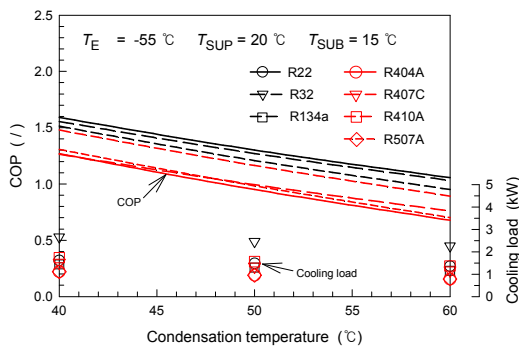
[Fig. 3] The effect of evaporation temperature for 2-stage compression and 2-stage expansion system COP

그림에서 알 수 있는 바와 같이 증발온도가 저하될수록 COP가 저하되고 있으며, 이는 증발온도가 내려갈수록 흡입압력 저하에 따른 냉매증기의 비체적 증가 및 압축기 체적효율 저하 등에 따른 압축일량이 증가하기 때문이다. 따라서 COP 측면에서 증발온도를 높게 유지하는 것이 유리하나, 일반적으로 2단압축 2단팽창 냉동시스템이 적용되는 냉각대상 공간의 온도를 -30 ~ -50 °C 정도로 고려할 때, 냉동시스템의 증발온도는 -40 ~ -60 °C가 유지되어야 한다. 즉, 일반적으로 냉동시스템의 증발온도와 냉각대상 공간 온도의 온도차가 7 ~ 10 °C임을 고려하면, 2단압

축 2단팽창 냉동시스템이 적용되는 증발온도  $-40 \sim -60 \text{ }^\circ\text{C}$  영역에서 단일냉매 R32의 COP는 R22에 비해 약 5 % 전후로 저하되고 있으나, 냉각열량의 경우에는 최대 60 % 이상 증가하고 있다. 또한, 대체 프레온 혼합냉매를 사용하고자 하는 경우, R410A는 R22에 비해 약 15 %의 COP가 감소되고 있으나, 냉각열량은 약 5 % 증가를 보이고 있다. 나머지 대체프레온 혼합냉매의 경우에는 COP 및 냉각열량 측면에서 R22보다 열악한 성능을 보이고 있기 때문에 2단압축 2단팽창 냉동시스템에서의 사용은 피하는 것이 바람직할 것으로 고려된다.

## 2. 응축온도의 영향

[Fig. 4]는 증발온도( $T_E$ )  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ , 과열도( $T_{SUP}$ )  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 과냉각도( $T_{SUB}$ )  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지되고 있는 상태에서 2단압축 2단팽창 냉동시스템의 응축온도( $T_C$ ) 변화에 따른 COP 및 냉각열량 변화를 나타낸 것이다.



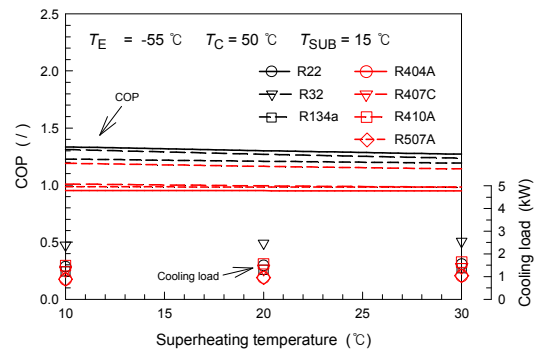
[Fig. 4] The effect of condensation temperature for 2-stage compression and 2-stage expansion system COP

그림에서 알 수 있는 바와 같이 응축온도가 상승할수록 COP가 저하되고 있으며, 이는 응축온도 상승에 의한 응축압력 상승에 따른 압축비 증대, 저단축 및 고단축 압축일량이 증가하기 때문이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 대체 프레

온 단일냉매 R32, R134a의 COP는 0 ~ 10 % 감소되고 있으나, 혼합냉매의 경우에는 응축온도가 상승할수록 최대 36 %의 COP 감소를 나타내고 있다. 또한, 냉각열량의 변화에 대해서도 증발온도의 결과와 비슷한 경향을 나타내고 있으므로, 2단압축 2단팽창 냉동시스템에서 R22 대체냉매로서 대체 프레온 혼합냉매의 활용도는 높아질 것으로 판단된다.

## 3. 과열도의 영향

[Fig. 5]는 증발온도( $T_E$ )  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ , 응축온도( $T_C$ )  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , 과냉각도( $T_{SUB}$ )  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지되고 있는 상태에서 2단압축 2단팽창 냉동시스템의 과열도( $T_{SUP}$ ) 변화에 따른 COP 및 냉각열량 변화를 나타낸 것이다.



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

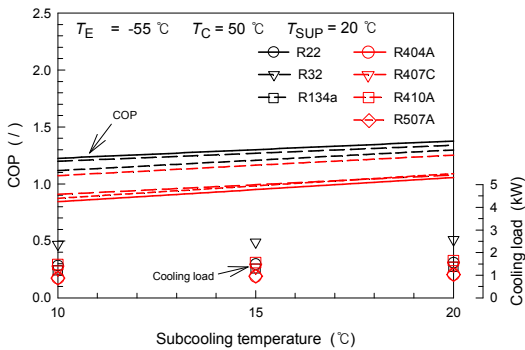
그림에서와 같이 COP가 감소되는 것은 과열도가 증가하게 되면 토출가스온도의 상승, 저단축 흡입 냉매증기의 비체적증가 때문이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 과열도가 증가할수록 단일냉매의 COP는 R22에 비해 최대 7 % 감소, 혼합냉매인 경우에는 10 ~ 29 % 감소되고 있다. 과열도 변화에 대해 단일냉매의 COP는 최대 3 % 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 혼합냉매의 경우에는 과열도  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  및  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 COP는 거

의 일정하게 나타나고 있다. 이는 과열도가 증가할수록 혼합냉매의 특성인 온도구배에 의한 것으로 해석할 수 있다. 따라서 대체프레온 혼합냉매를 사용할 경우에는 저단축 과열도를 증가시키는 것이 COP 측면에서 유리할 것으로 고려된다.

#### 4. 과냉각도의 영향

[Fig. 6]은 증발온도( $T_E$ )  $-55\text{ }^\circ\text{C}$ , 응축온도( $T_C$ )  $50\text{ }^\circ\text{C}$ , 과열도( $T_{SUP}$ )  $20\text{ }^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지되고 있는 상태에서 2단압축 2단팽창 냉동시스템의 과냉각도( $T_{SUB}$ ) 변화에 따른 COP 및 냉각열량 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 과냉각도 변화에 대해 COP는 거의 일정하다는 것을 알 수 있다. 이는 2단압축 1단팽창 냉동시스템의 경우와 달리 2단압축 2단팽창 냉동시스템에서는 응축된 냉매액이 전부 중간냉각기로 들어감으로 인해 저단축 및 고단축 압축일량과 냉각효과의 평형이 유지되기 때문으로 고려된다.



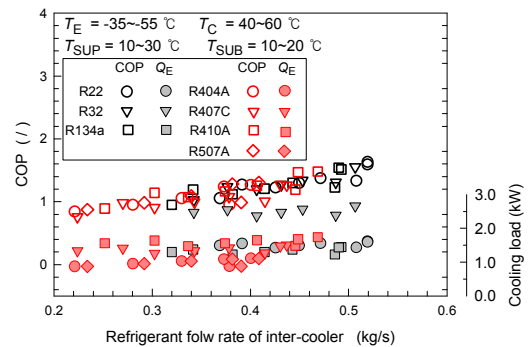
[Fig. 6] The effect of subcooling temperature for 2-stage compression and 2-stage expansion system COP

과냉각도가 증가할수록 혼합냉매 R404A 및 R507A의 COP는 최대 8 % 증가하고 있으며, 이는 혼합냉매 특성인 온도구배에 의한 것으로 고려할 수 있으며, 혼합냉매를 사용하는 냉동시스템에 있어서는 과냉각도를 높게 유지하는 것이

유리할 것으로 판단된다.

#### 5. 중각냉각기의 냉매유량 영향

[Fig. 7]은 증발온도  $-35\text{ }^\circ\text{C}$  ~  $-55\text{ }^\circ\text{C}$ , 응축온도  $40\text{ }^\circ\text{C}$  ~  $60\text{ }^\circ\text{C}$ , 과냉각도  $10\text{ }^\circ\text{C}$  ~  $30\text{ }^\circ\text{C}$ , 과열도  $10\text{ }^\circ\text{C}$  ~  $20\text{ }^\circ\text{C}$ 로 유지한 상태에서 중간냉각기에서의 냉매유량변화에 따른 냉동시스템의 COP 변화를 나타낸 것이다.



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

그림에서 알 수 있는 바와 같이 2단압축 2단팽창 냉동시스템에서 냉매의 종류에 상관없이 중간냉각기로의 냉매유량이 증가할수록 COP는 증가하고 있으나, 냉매유량 변화와 냉각열량 변화의 상관관계는 중간냉각기로의 냉매유량의 영향보다 운전조건 영향이 큰 것으로 판단되었다.

2단압축 2단팽창 냉동시스템의 작동유체인 규제냉매 R22의 대체냉매 R32의 COP는 2 ~ 3 % 감소되고 있으나, 냉각열량은 61 ~ 65 % 증가하고 있으므로 냉동장치에 있어서 R32의 고압에 대한 안전장치가 선행되면 충분히 경쟁력이 있을 것으로 고려된다.

또한, 혼합냉매 R410A의 COP는 R22에 비해 9 ~ 16 % 감소되고 있으나, 냉각열량은 R22에 비해 3 ~ 7 % 증가하고 있기 때문에 장치의 운전 특성, 냉매 특성 등을 고려할 때 R22 대체냉매로서 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 고려된다.

#### IV. 결 론

-30 ~ -60°C 정도의 초저온을 얻기 위한 2단압축 2단팽창 냉동시스템에서 사용되는 규제냉매 R22의 대체냉매로서 단일냉매인 R32, R134a, 혼합냉매 R404A, R407C, R410A, R507A를 사용하는 2단압축 2단팽창 냉동시스템의 성능에 영향을 미치는 증발온도, 응축온도, 과열도, 과냉각도 및 중간냉각기에서의 냉매유량에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 2단압축 2단팽창 냉동시스템의 성능은 증발온도가 높을수록, 응축온도가 낮을수록 COP가 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한, 실제 2단압축 2단팽창 냉동장치가 운전되는 온도범위를 고려하면 R22의 대체냉매로서 프레온 단일냉매 R32 및 유사공비혼합냉매 R410A가 유리한 것으로 고려할 수 있다.

2. 2단압축 2단팽창 냉동시스템의 COP 변화는 과열도 및 과냉각도에 의한 영향이 크지 않은 것을 알 수 있었다.

3. 동일한 운전조건에서 2단압축 2단팽창 냉동시스템의 COP는 냉매종류에 상관없이 중간냉각기로 유입되는 냉매유량이 증가할수록 크게 나타나고 있었다. 따라서 2단압축 2단팽창 냉동시스템의 실제 운전과정에서는 중간냉각기로 유입되는 냉매유량을 증가시키는 것이 유리할 것으로 판단된다.

#### Reference

Chaichana, C. · Aye, L. & Charters, W. W. S.(2003). Natural working fluids for solar-boosted heat pumps. *Int. J. Refrigeration* Vol. 26, 637~643, fChart Software Inc(2006). *Engineering Equation Solver*

LIM, Tae-Woo · YOU, Sam-Sang & KIM, Hwan-sung(2008), Nucleate Boiling Heat Transfer from Micor Finned Surfaces with subcooled FC-72, *Jour. fish. Mar. Sci. Edu*, Vol. 20, No. 3, 410~415

Roh, Geon-sang(2010). Prediction on performance of Cascade Refrigeration System using Natural Refrigerants, *Jour.of Korean Soc. of Mechanical Technology*, Vol. 12, No. 3, 45~51

Roh, Geo-nsang(2011). Prediction on performance of Cascade Refrigeration System using alternative freon Refrigerants, *Jour.of Korean Soc. of Mechanical Technology*, Vol. 13, No. 1, 73~79

UNEP(1992). Copenhagen, Decision, The Fourth Meeting of the Parties to the Montreal Protocol

YOU, Sam-Sang · LIM, Tae-Woo · JEONG, Seok-Kwon & PARK, Jong-Un(2007), A Study on gem microcooling Fing Fabrication Process for Enhancing Boiling Heat Transfer, *Jour. fish. Mar. Sci. Edu*, Vol. 19, No. 3, 366~372

- 
- 논문접수일 : 2012년 11월 22일
  - 심사완료일 : 1차 - 2013년 01월 21일
  - 게재확정일 : 2013년 02월 03일