

2단 증기 압축식 냉동시스템을 적용한 해상용 제빙장치의 냉매에 따른 성능 분석

Performance Analysis of a Seawater Ice Machine Applied Two-stage vapor compression refrigeration system for Various Refrigerants

윤정인* · 손창효***† · 허성관* · 전민주* · 전태영*

Jeong-In Yoon*, Chang-Hyo Son***†, Seong-Kwan Heo*,
Min-Joo Jeon* and Tae-Young Jeon*

(Received 24 March 2016, Revision received 5 April 2016, Accepted 5 April 2016)

Abstract: Coefficient of performance (COP) for two-stage compression system is investigated in this paper to develop seawater ice machine. The system performance is analyzed with respect to degrees of superheating and subcooling, condensing and evaporating temperatures, compression and mechanical efficiencies and mass flow ratio in an inter-cooler. The main results are summarized as follows : The COP of the system grows when the mass flow ratio, subcooling degree and evaporating temperature edge up. Contrariwise, the system performance descends in case that superheating degree and condensing temperature increase. The most effective factor for the COP is the mass flow rate ratio. Each refrigerant has different limitation for a value of the mass flow ratio in the inter-cooler because of difference in material property.

Key Words : Two-stage refrigeration system, Various Refrigerants, Seawater Ice Machine, Intercooler mass flow rate ratio

— 기 호 설 명 —

그리스 문자

h : 엔탈피 [kJ/kg]

η : 효율 [-]

T : 온도 [°C]

P : 압력 [kPa]

하첨자

*** 손창효(교신저자) : 부경대학교 냉동공조공학과

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

*윤정인 : 부경대학교 냉동공조공학과

***허성관, 전민주, 전태영 : 부경대학교 냉동공조공학과 대학원

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

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

*Jung-In Yoon : Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

***Seong-Kwan Heo, Min-joo Jeon, Tae-Young Jeon : Graduate School, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

- c : 응축기
- e : 증발기
- H : 고단축
- L : 저단축
- m : 중간냉각기
- suc : 과냉도
- suh : 과열도

시스템의 성능예측¹⁾, 한국수산해양교육학회의 수산해양교육연구에서 노건상 외 1명의 친환경 프레온 냉매를 이용하는 2단 압축 2단 팽창 냉동시스템의 성능예측²⁾ 등이 있다. 냉매의 개별적인 성능을 분석한 연구는 몇몇 있지만 프레온 냉매와 자연냉매를 동시에 분석한 연구 결과는 전무한 상태이다. 본 논문에서는 2단 증기 압축식 냉동시스템에서 프레온 단일냉매(R22, R32, R134a), 혼합냉매(R404A, R410A, R507A), 자연냉매(R600a, R717) 등을 같은 조건하에서 여러 변수들에 대한 시스템의 성능을 비교분석하였다. 변수들에는 과냉각도, 과열도, 응축온도, 중간냉각기 유량비, 증발온도 등이 있다. 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 설계에서 주어진 조건과 시스템에서 최상의 성능을 발휘하기 위한 냉매 선택의 기초자료를 제공하고자 한다.

1. 서 론

어획물의 선도유지를 위해 어선에 탑재할 해상용 제빙장치를 구성하기 위해서는 단단 냉동시스템으로는 성능적인 측면에서 그 한계가 있다. 해수를 얼려 좋은 빙질을 얻기 위해서는 최소 -30℃ 이하의 증발온도가 필요하다. 단단 냉동시스템에서 증발온도가 -30℃ 이면 응축온도와 증발온도의 압축비가 커져 압축 일량이 증가하여 성능계수가 상당히 나빠지고, 압축기 토출 온도와 압력이 높아진다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 저온을 얻기 위한 냉동시스템인 2단 압축 1단 팽창 시스템에 대한 성능분석을 실시하였다. 2단 압축 1단 팽창 냉동 시스템에 이용되어 온 냉매들은 오존층을 파괴하고 지구온난화를 초래하는 환경오염 물질로 분류되어 규제가 강화되고 있는 실정이다. 이에 대해 R717, R600a와 같은 자연냉매가 대체 냉매로써 활발한 연구가 진행되고 있다. 종래에 2단 증기 압축식 냉동 시스템의 성능에 대한 연구에는 한국 가스학회지에 실린 암모니아 대체 자연냉매를 이용하는 2단 압축 1단 팽창 냉동시

2. 성능분석

본 논문에서 냉동시스템의 성능분석을 위해 EES(Engineering Equation Solver)³⁾를 이용하여 계산하였다. 총 8가지의 냉매가 적용된 냉동시스템의 성능 분석을 위한 가정들은 다음과 같다.

- 저단과 고단의 압축기내 냉매는 단열압축 과정이고, 압축, 기계효율은 각각 0.8이다.
- 냉매배관의 압력강하, 열손실은 무시한다.
- 열교환기(증발기, 응축기) 내 냉매 압력 강하와 열손실은 무시한다.

Table 1 Mass and energy equation for each component of refrigeration system

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

- 팽창밸브 내의 냉매는 단열팽창인 등엔탈피 과정이다.
- 운동에너지와 위치에너지의 변화는 없으므로 가정한다.

Fig. 1은 2단 압축 냉동시스템의 계략도를 나타낸 것이고, 분석에 필요한 에너지와 질량유량에 관련된 식들은 Table 1에 정리하였으며, Table 2는 냉동시스템의 성능 분석을 하기 위한 변수의 조건들이다. 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 COP는

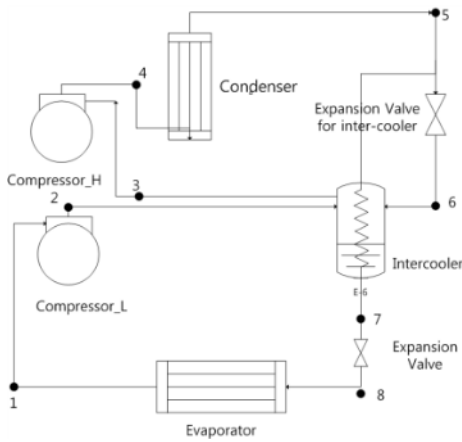


Fig. 1 Schematic diagram 2-stage compression and 1-stage expansion refrigeration system

Table 2 Analysis conditions

Refrigerants	R600a, R717, R410A, R404A, R507A, R134a, R22, R32
$T_c, [^{\circ}\text{C}]$	35*, 40, 45, 50, 55
$T_e, [^{\circ}\text{C}]$	-55, -50, -45, -40, -35*
$\Delta T_{suc}, [^{\circ}\text{C}]$	0, 5*, 10, 15, 20
$\Delta T_{suh}, [^{\circ}\text{C}]$	0, 5*, 10, 15, 20
$\eta_c = \eta_{cL} = \eta_{cH}, [/]$	0.7, 0.75, 0.8*, 0.85, 0.9
$\eta_m = \eta_{mL} = \eta_{mH}, [/]$	0.7, 0.75, 0.8*, 0.85, 0.9
$\frac{G_m}{G}, [/]$	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3*

*Standard conditions

식 (1)로 계산한다.

$$\begin{aligned} \text{COP} &= \frac{Q_e}{W_H + W_L} \\ &= \frac{(h_1 - h_{10})}{(h_3 - h_2) + \frac{(h_3 - h_9)}{(h_4 - h_8)}(h_5 - h_4)} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, COP는 냉동시스템의 성능계수 (Coefficient of Performance), Q_e 는 증발열량, W_H, W_L 는 고단과 저단의 압축 일량, h 는 각 지점의 엔탈피이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 과열도의 영향

Fig. 2는 2단 증기 압축식 냉동시스템에 대한 과열도 영향을 파악하기 위해 증발온도(T_e) -35 $^{\circ}\text{C}$, 응축온도(T_c) 35 $^{\circ}\text{C}$, 과냉각도(T_{suc}) 5 $^{\circ}\text{C}$, 고단 및 저단 압축기의 기계효율(η_m) 및 압축효율(η_c) 0.8, 중간냉각기 냉매 유량비($\frac{G_m}{G}$) 0.3 으로 일정하게 유지되고 있는 상태에서 과열도 증가에 따른 8가지 냉매별 COP를 나타낸 것이다. Fig. 2에서

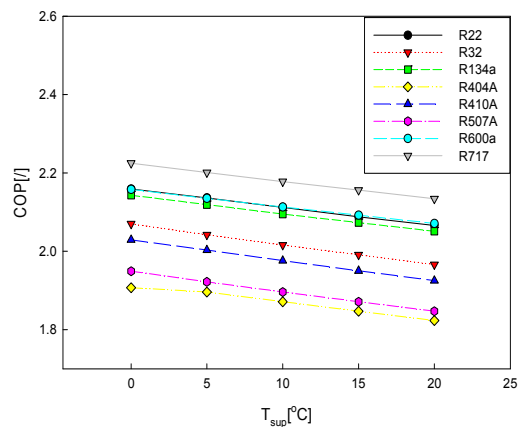


Fig. 2 The effect of superheating degree for COP of 2-stage compression refrigeration system

확인할 수 있듯이 과열도가 증가함에 따라 모든 냉매의 COP가 감소하는 경향을 보인다. 그것은 과열도가 증가함에 따라 압축기 토출가스온도 상승, 흡입 냉매증기의 비체적 증가에 따른 압축 일량 증가 때문이다. 동일한 과열도 상에서 R600a와 R717, R22가 높은 성능을 보이고, 그 변화량은 0.58~1.35%로 감소하였다.

3.2 과냉각도 영향

Fig. 3은 2단 증기 압축식 냉동시스템에서의 과냉각도의 영향 분석을 위해 증발 온도 -35°C , 응축 온도 35°C , 과열도 5°C , 기계, 압축효율 0.8, 중간냉매 유량비($\frac{G_m}{G}$) 0.3로 일정하게 유지시킨 상태에서 과냉각도의 변화를 주며 COP를 분석하였다. 과냉각도의 증가에 따라 2.34~8.22%까지 COP가 증가되고 있다. 과냉각도 증가에 따라 팽창밸브로 들어가는 냉매의 온도가 낮아지고 교축작용 이후 증발기로 들어가는 냉매의 건도 또한 작아져 냉동효과 증가, COP가 증가의 결과를 초래한다. 하지만 과냉각도가 증가할수록 COP의 증가량, 즉 변화량은 감소한다. 전반적으로 R22, R600a, R717의 COP가 높다. 하지만 과열도가 10°C 이상이 되면 R717보다 R600a, R404A, R22의 COP가

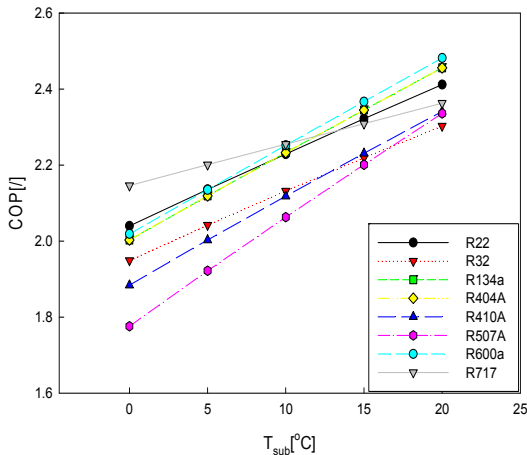


Fig. 3 The effect of subcooling degree for COP of 2-stage compression refrigeration system

앞서게 된다. 과냉각에 따른 COP의 변화량은 R507A가 가장 크고 R717가 가장 작다.

3.3 증발온도의 영향

Fig. 4는 2단 증기 압축식 냉동시스템에서의 증발온도의 영향 분석을 위해 응축 온도 35°C , 과냉각도 5°C , 과열도 5°C , 기계, 압축효율 0.8, 중간냉매 유량비 0.3인 동일한 조건에서 증발온도를 -55°C ~ -35°C 까지 증가시키며 COP 변화를 나타내었다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 증발온도가 낮을수록 COP는 8.54%~15.42% 감소한다. 이는 증발온도가 낮아져 압축비가 커지고, 압축 일량이 증가하여 COP가 감소한다.

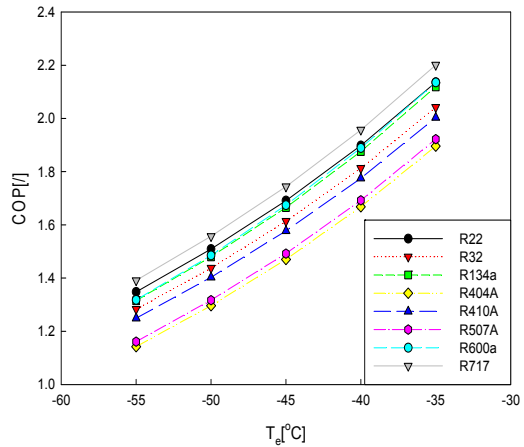


Fig. 4 The effect of evaporation temperature for COP of 2-stage compression refrigeration system

3.4 응축온도의 영향

Fig. 5는 2단 증기 압축식 냉동시스템에서의 응축온도의 영향 분석을 위해 증발 온도 -35°C , 과냉각도 5°C , 과열도 5°C , 기계, 압축효율 0.8, 중간냉매 유량비 0.3인 동일한 조건에서 응축온도를 35°C 에서 55°C 까지 증가시키며 COP변화를 나타내었다. 해상에서 해수를 이용한 수냉식 응축기라 생각하고 35°C 부터 60°C 까지의 COP를 나타내었다. 응축온도가 증가하면 압축비가 증가, 압축 일량이 증가하여 COP가 감소한다. Fig. 5에서 확인

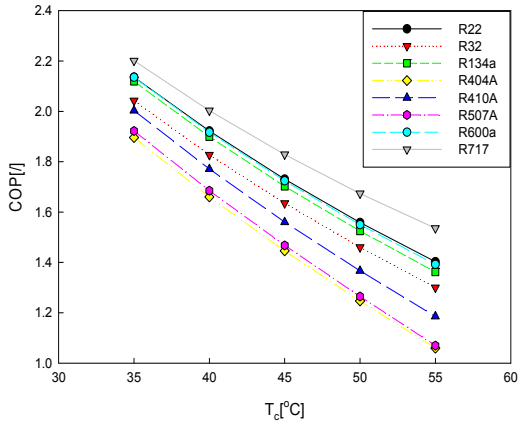


Fig. 5 The effect of condensing temperature for COP of 2-stage compression refrigeration system.

할 수 있듯이 응축온도 변화에 따라 11.94%~13.59% 정도로 COP가 감소하였다. 가장 큰 COP 감소량을 보이는 것은 혼합냉매인 R507A이고, 가장 작은 COP 감소량을 보이는 것은 R717이다.

3.5 중간냉각기 냉매유량의 영향

Fig. 6은 2단 증기 압축식 냉동시스템에서의 중간냉각기의 냉매유량비의 영향 분석을 위해 증발 온도 -35°C, 응축 온도 35°C, 과열도 5°C, 과냉각

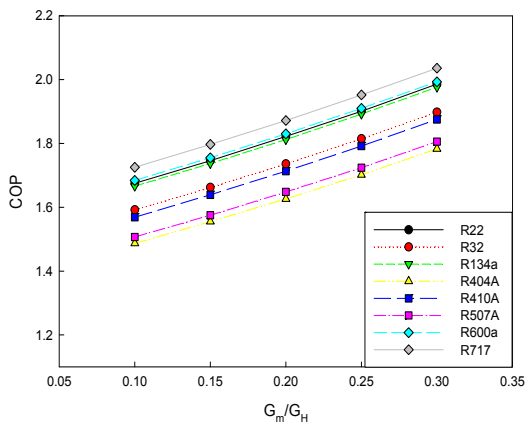


Fig. 6 The effect of mass flow ratio of inter-cooler for COP of 2-stage compression refrigeration system.

도 5°C, 기계, 압축효율 0.8로 일정하게 유지시킨 상태에서 응축기 토출 냉매에서 중간냉각기로 by-pass되는 냉매 유량비를 0.1~0.3까지 증가시키며 COP의 변화를 나타내었다. 2단 압축 시스템에서 가장 중요한 부분인 중간냉각기로의 냉매유량 by-pass이다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 냉매유량비가 증가할수록 COP는 9.07~10.75%로 증가하였다. 냉매유량비가 증가하면 저단 압축기의 흡입 냉매유량이 감소되어 압축 일량이 감소하여 COP가 증가한다.

3.6 압축효율의 영향

Fig. 7은 2단 증기 압축식 냉동시스템에서의 압축기 압축효율의 영향을 분석하기 위해 증발온도 -35°C, 응축온도 35°C, 과열도 5°C, 과냉각도 5°C, 중간냉매 유량비 0.3으로 일정하게 유지시키고 있는 상태에서 압축효율 0.7에서 0.9까지 COP의 변화를 나타내었다. 압축효율은 압축기 일량에 직접적인 영향을 주는 변수이기 때문에 그 값이 증가할수록 COP값은 증가한다. Fig. 7을 보면 압축효율이 증가함에 따라 COP가 6.28~7.97%로 증가하였다.

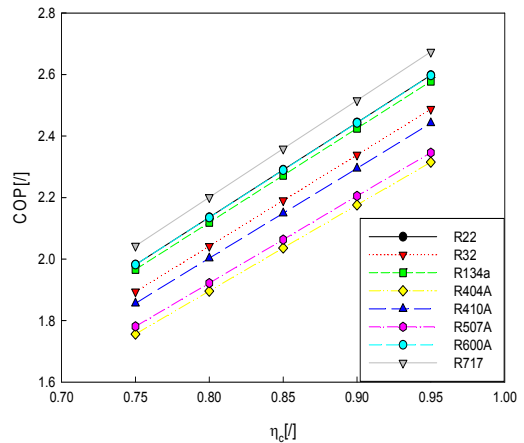


Fig. 7 The effect of compressor efficiency for COP of 2-stage compression refrigeration system.

4. 결 론

해상용 제빙장치에 $-55\sim-35^{\circ}\text{C}$ 의 저온을 얻기 위한 2단 증기 압축식 냉동시스템에서 8가지 냉매(단일냉매, 혼합냉매, 자연냉매)를 이용하여 2단 증기 압축식 냉동시스템의 성능에 영향을 미치는 변수들에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템에서 증발온도가 높고, 응축온도가 낮을수록 COP가 높음을 알 수 있다. 해상용 제빙장치에서 좋은 빙질을 얻기 위해 필요한 최소 증발온도인 -35°C 에서 R22, R600a, R717의 COP가 높다.

(2) 같은 조건에서 2단 압축 1단 팽창 냉동시스템의 COP는 냉매에 관계없이 중간냉각기로 유입되는 냉매유량비가 증가할수록 크다. 따라서 실제 운전에서는 중간냉각기로 의 냉매 유량비를 크게 설계하는 것이 COP 측면에서 유리할 것으로 고려된다. 하지만 각 냉매마다 2단 시스템에서 중간냉각기로의 by-pass되는 유량비의 한계가 있기 때문에 그에 대해 구체적인 연구가 필요하다.

(3) 해상용 제빙장치를 위한 2단 압축 냉동시스템에서는 필요한 증발온도가 정해지고, 해수를 이용하는 수냉식 응축기에서의 최소 응축온도 또한 정해지기 때문에 압축효율, 과열도와 과냉각도의

변화량이 COP를 향상시키는데 중요한 역할을 한다. 또한 보다 나은 성능을 위해 내부열교환기 부착이 고려되어야 할 사항이다.

후 기

이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(육해상용 샤베트형 해수제빙장치 개발).

References

1. K. S. Rho, 2012, "Performance Analysis of 2-Stage Compression and 1-Stage Expansion Refrigeration System using Alternative Natural Refrigerants", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 16, No. 3, pp. 42-47.
2. K. S. Rho and J. R. Kim, 2013, "Performance Analysis of Two-stage Compression and Two-stage Expansion Refrigeration System using Freon Refrigerants", Vol.25, No. 2, pp. 301-306.
3. C. W. Park, D. G. Lee, S. K. Choi and C. D. Kang, 2009, "Two-Stage compression cycle operating with alternative refrigerant using by EES program", pp. 533-538.