

증기 분리식 예냉 증기압축 냉동 사이클의 성능 특성 연구

문경록¹ · 윤상국[†]

(Received January 2, 2019 ; Revised January 24, 2019 ; Accepted March 5, 2019)

Performance characteristics of vapor separation process in pre-cooled vapor compression refrigeration cycle

Kyung-Rok Mun¹ · Sang-Kook Yun[†]

요약: 증기 압축식 냉동 사이클은 압축기, 응축기, 팽창장치, 증발기 등으로 구성되며, 냉동기 용량에 따라 많은 전기 에너지가 소비되므로 지속적인 에너지 절약의 노력을 필요로 한다. 증기 압축식 냉동 사이클에서 팽창과정 중 발생하는 냉매 기체는 증발기 내부에서 냉동효과를 제공하지 못하며, 액체만이 기체로 상태가 바뀌면서 냉동 역할을 수행한다. 그러므로 본 연구에서는 증발기 유입 전에 기체 냉매를 분리하는 새로운 2단 팽창 사이클을 고안하여 성능계수 향상 효과를 분석하였다. 분석 결과, 증기 분리식 예냉 냉동 사이클은 중간 팽창 압력 5 bar에서 현재 사이클 대비 약 30 % 이상의 성능 향상을 보였다. 비교 기준 사이클은 가정용 R-134a 냉장고 냉동 공간으로 고압은 10.166 bar, 예냉이 5°C된 응축 온도 35°C, 그리고 저압은 1.064 bar, -25°C를 기준하였다. 또한, 증기 분리 2단 팽창 사이클 경우 증발기 내부에 흐르는 냉매 질량유량흐름이 15 ~ 20 %가 감소하게 되어 증발기의 규격이 크게 감소하게 되었다.

주제어: 증기 압축식 냉동 사이클, 증기 분리, 2단 팽창, 성능계수

Abstract: The purpose of this study is to improve the performance of the current vapor compression refrigeration cycle composed of a compressor, a condenser, an expansion device, and an evaporator. In the refrigeration cycle, a certain portion of the liquid refrigerant evaporates after the expansion process, and the evaporated vapor refrigerant does not play a role in the refrigeration effect in the evaporator. Therefore, a new two-stage expansion refrigeration cycle, in which the vapor is separated from the mixture after the middle expansion process, was introduced and analyzed. It was found that the new vapor-separated cycle significantly improves the coefficient of performance by ~30% compared with that of the current existing refrigeration cycle, when a middle expansion pressure of 5 bars is applied in a typical R-134a domestic freezer cycle working in the high-pressure condition of 10.166 bars, a condensation temperature of 35 °C having 5 °C of pre-cooling, and a low-pressure condition of 1.064 bars and -25°C. In addition, because the mass flow rate of the liquid phase in the evaporator decreases by ~15%-20% compared with that of the current cycle, the evaporator size can be significantly reduced.

Keywords: Pre-cooled vapor compression refrigeration cycle, Vapor separation, Two-stage expansion, Coefficient of performance

1. 서론

냉동기는 용량에 따라 많은 에너지가 소비되므로 지속적인 에너지 절약의 노력을 필요로 한다. 이 냉동기의 주된 에너지원은 전력으로 모든 열이용 기기와 마찬가지로 지구 온난화 주범이 되고 있는 CO₂를 배출하고 있다. 즉 냉동기의 가동은 화석에너지의 소비뿐만 아니라 지구 환경문제에도 영향을 미치고 있는 것이다.

현재 냉동기의 공정은 오래전에 고안된 증기 압축식 냉동 사이클로, 그 주된 구성설비는 압축기, 응축기, 팽창장치,

증발기로 이루어진다. 이러한 냉동기의 효율을 향상시키기 위하여 다양한 연구가 수행되어 왔으며 최근에는 효율 개선을 위하여 각종 열펌프의 성능 개선 연구, 고효율 흡수식 냉동기의 개발, 이젝터 팽창 냉동기 등 다양한 연구가 수행되고 있다[1]-[4]. 냉동기의 냉동 효과는 증발기 내부에서 액체 상태의 냉매가 외부 열을 흡입하여 기체상태가 되면서 얻게 된다. 그러나 증기 압축식 냉동 사이클은 팽창과정에서 압력의 저하와 함께 일부가 기체로 변하게 되며, 이미 기체가 된 냉매는 냉동기에 냉동 기능을 전혀 제공하지 않게

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5533-3986>): Professor, Division of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: skyun@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4363

¹ M.S Candidate, Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: 93munkr@naver.com, Tel: 051-410-4975

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

된다. 이 기체의 발생량은 냉매 종류별로 다르나 온도가 낮아질수록 압력강하가 클수록 발생량이 크게 된다.

본 연구에서는 냉동기 효율을 높일 수 있는 새로운 방법으로 냉동 효과를 제공하지 않는 팽창과정 중 이미 증발되어진 냉매 기체를 증발기에 유입되기 전에 분리하여 제거하는 2단 팽창 공정을 고안하였다. 이는 중간 팽창의 과정 후 생성된 기체를 액기분리기에서 분리하고, 중간압력의 냉매액체는 최종 압력까지 추가 팽창시키는 것이다. 압축기 유입은 중간압력의 분리된 기체와 저압의 증발기 출구기체를 합체되는 공정을 구성하였다. 이의 효과는 증발기에 유입되는 냉매액량은 증가하고 유입되는 기체량은 감소하게 되며, 압축기에 유입되는 냉매기체의 압력을 상승시켜 압축기의 일이 감소하게 됨으로써 효율이 크게 증가하게 된다. 냉동기에 2단 팽창 공정의 적용 연구는 S. K. Yun *et al.*의 CO₂ 오토캐스케이드 공정 효율 개선 연구 등이 있다[5].

이 효율 향상 효과를 분석하기 위하여 다양한 냉동기 중 대표적으로 냉장고의 냉동 공간을 기준하였으며 냉매는 R-134a로 하여 분석하였다. 해석에 적용 기준한 온도로는 저압 측 증발기 온도 -25 °C, 고압 측 응축 포화온도 40 °C, 과냉각 5 °C, 질량유량흐름은 1 kg/s로 하여 증기 분리식 2단 팽창 냉동사이클의 효율 향상과 성능에 미치는 인자들을 파악하고 분석하였다. 모든 공정 해석은 열손실과 압력손실이 없는 이론적 사이클로 기준하여 해석하였고 열역학물성값은 Refprop[6]을 사용하여 산정하였다.

2. 새로운 증기 분리식 2단 팽창 냉동 사이클

2.1 비교 기준 현재의 냉동 사이클

본 분석에서 비교 기준한 냉장고의 냉동 증기 압축식 1단 팽창 예냉 냉동 사이클은 Figure 1과 같으며, Table 1의 표는 공정을 해석한 것이다. 공정을 보면, 응축기에서는 10.166 bar로 압축된 고온 고압의 기체가 응축온도 40°C 포화액체까지 응축된다. 이 고압의 포화액체는 증발기 출구의 냉기체에 의하여 5°C가 과냉각되어 35°C의 응축액이 된다. 이 액은 팽창장치인 모세관에서 증발기 압력인 1.064 bar로 강하되면서 기체가 37.825 % 발생한다. 그러므로 증발기로 유입되는 냉매 중 액체는 0.62175 kg/s, 기체는 0.37825 kg/s가 된다. 이 중 액체만이 외부 열을 흡입, 기체화되면서 냉동효과를 제공하게 된다. 증발기 출구의 포화기체는 응축기 액을 과냉각시키고 자신은 -15.6°C로 압축기에 유입된다. 이 기체는 등엔트로피 과정으로 압축되어 압력 10.166 bar, 59°C가 된다. 이 냉장고 냉동 사이클의 성능계수는 식 (1)에 의하여 2.728이 된다. 여기서 Q_e는 증발기 냉동능력이며, W는 압축기의 일이다.

$$COP = Q_e/W = m_3(h_4 - h_3) / m_5(h_6 - h_5) \quad (1)$$

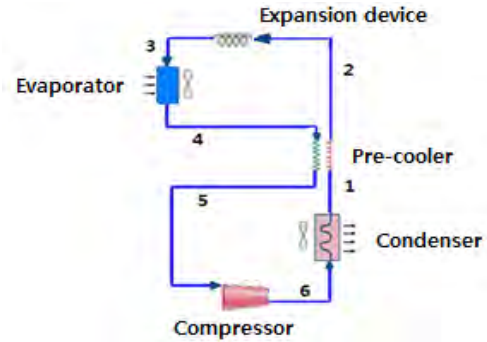


Figure 1: Current typical refrigeration cycle of domestic freezer

Table 1: Analysis conditions for Figure 1 cycle

No.	1	2	3	4	5	6
P (bar)	10.166	10.166	1.064	1.064	1.064	10.166
T (°C)	40	35	-25	-25	-15.6	59
Quality	-	-	0.37825	1.0	-	-
h (kJ/kg)	256.4	248.9	248.9	383.4	390.9	440.2
s(kJ/kgK)	-	-	-	-	1.7756	1.7756
flowrate (kg/s)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

2.2 새로운 증기 분리식 예냉 냉동 사이클

2.2.1 분리기체의 저온을 이용한 예냉 냉동 사이클

새로운 공정인 Figure 2는 Figure 1의 기존 공정과 달리 팽창장치를 2단 팽창인 제1 팽창장치와 제2 팽창장치로 하고 액기분리기를 이용하여 팽창 중 발생한 증기를 분리한 것이다. Table 2의 표는 이 사이클의 대표적 공정으로 제1 팽창 후 중간 압력을 5 bar, 2°C만큼 예냉하여 응축액 온도를 38°C로 해석한 것이다.

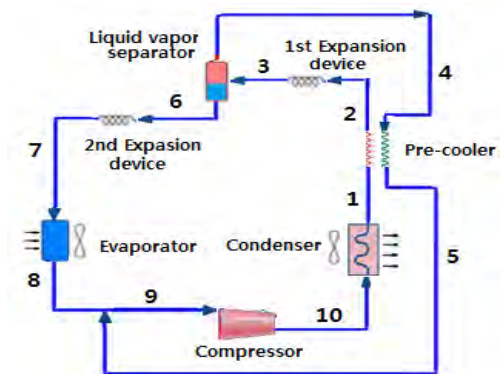


Figure 2: Vapor separation process in the two-stage expansion cycle with pre-cooling system using cold energy of the separated vapor only

공정을 보면, 압축기에서 10.166 bar로 압축된 고온 고압의 기체가 응축온도 40℃ 포화액체까지 응축된다. 이 고압의 포화액은 예냉기를 거친 후, 제1 팽창장치인 모세관에서 중간 압력인 5 bar로 강하되면서 건도 즉 기체가 0.1717이 발생하게 된다. 이 액기 혼합 냉매는 액기 분리기에서 분리되며, 이 중 액체는 제2 팽창장치에서 최종 압력인 1.064 bar, -25℃로 유입, 이 때 발생 건도는 0.25114가 되어 액체 상태의 유입냉매 총량은 0.62031 kg/s가 된다. 이는 종래 공정에서 응축온도가 38℃ 경우의 냉매량 보다 3.17 % 증가된 것이다. 이 냉매가 증발기에서 저온을 제공하면서 기화되어 1.064 bar, -25℃의 포화기체가 된다.

한편, 액기분리기 상부 지점 4의 기체는 5 bar의 상태로 0.1717 kg/s가 예냉기에서 저온을 제공하고 증발기 출구 지점 8의 기체와 혼합된다. 이는 서로 압력과 온도가 다른 냉매기체이며, 이들이 합하여지는 지점 9의 총 압력 P_9 와 총 엔탈피 h_9 의 값은 식 (2)와 식 (3)에 의하여 산정된다. 즉, 혼합 기체 각각의 압력인 P_3 , P_5 와 각각의 열량인 h_3 , h_5 는 각각의 질량인 m_3 , m_5 에 비례한 값으로 $P_3 \cdot m_3$ 과 $h_3 \cdot m_3$ 은 지점 3의 압력과 열량, $P_5 \cdot m_5$ 과 $h_5 \cdot m_5$ 은 지점 5의 압력과 열량을 나타낸다.

$$P_9 = P_3 \cdot m_3 + P_5 \cdot m_5 \quad (2)$$

$$h_9 = h_3 \cdot m_3 + h_5 \cdot m_5 \quad (3)$$

$$COP = Q_e/W = m_7(h_8-h_7) / m_6(h_{10}-h_9) \quad (4)$$

식 (2)에 의한 지점9의 혼합기체 압력과 온도는 1.739 bar, -13.5℃가 되며, 압축은 등엔트로피 과정으로 10.166 bar, 토출가스 온도는 47.1℃가 된다.

Figure 3은 본 사이클의 응축기 과냉도에 따른 성능계수

Table 2: Analysis conditions for Figure 2 cycle

No.	1	2	3	4
P (bar)	10.166	10.166	5	5
T (℃)	40	38	15.7	15.7
x(Quality)	-	-	0.1717	1.0
h (kJ/kg)	256.4	253.4	253.4	407.5
s (kJ/kg·K)	-	-	-	-
flow rate (kg/s)	1.0	1.0	1.0	0.1717

5	6	7	8	9	10
5	5	1.064	1.064	1.739	10.166
33.6	15.7	-25	-25	-13.5	47.1
	-	0.25114	1.0	1.0	-
424.8	221.5	221.5	383.4	390.5	427.3
-	-	-	-	1.736	1.736
0.1717		0.8283		1.0	1.0

의 변화를 나타낸 것으로, 중간 팽창 5 bar 경우 38℃이하에서는 과냉각을 얻을 수 없고, 3 bar에서는 과냉각은 형성시킬 수 있으나 성능계수가 감소함을 보여준다. 5 bar 경우 38℃ 이하가 되면 지점5의 온도가 33.8℃보다 높게 되어 응축기 출구액체의 온도인 40℃에 근접하게 되므로 이 온도 이하의 과냉각은 형성되지 않게 되는 것이다. 그러므로 종래 냉동기와 동일한 5℃ 정도의 과냉각 효과를 얻기 위하여 중간 팽창 압력을 저하시키거나, 증발기 출구 저온 기체를 사용하여야 함을 알 수 있다. 이들 중 중간 팽창 압력을 저하시키는 방법은 성능계수의 저하 문제가 있으므로 증발기 출구 저온을 이용하는 방법이 바람직하게 된다.

이 Figure 2 사이클의 성능계수를 보면 식 (4)에 의하여 3.644가 된다. 이는 종래 냉동기 공정인 Figure 1 보다 COP가 33.5 % 증가한 값이다. 그럼에서 과냉각이 크게 발생할수록 성능계수가 감소하는 것은, 냉동능력이 5 % 증가한데 비하여 압축기 일량은 입구 측 기체가 갖는 엔트로피 값의 증가 때문에 6.29 %로 더 크게 증가되기 때문이다.

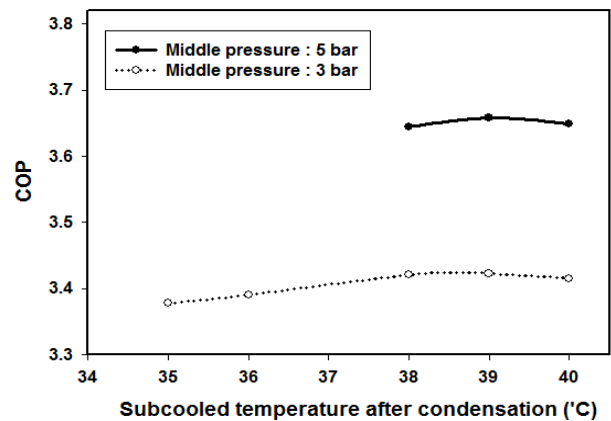


Figure 3: COP variation with sub-cooled temperature of the vapor separation process in pre-cooled two-stage expansion cycle using cold energy of separated vapor only

2.2.2 분리기체 및 증발기체의 저온을 이용한 예냉 공정

Figure 4는 Figure 3의 사이클을 개선한 것으로 중간팽창 후 분리된 저온의 기체와 증발기 출구의 -25℃ 저온 기체를 합하여 예냉에 이용하는 사이클(VSPEC)이다. 이 공정의 해석인 Table 3을 보면, 이 공정은 예냉에 필요한 에너지가 충분하여 종래 공정과 동일한 응축온도인 35℃를 얻게 됨을 알 수 있다. 이 공정의 성능계수는 3.529로 종래 공정보다 29.4 % 향상된다.

Figure 5는 Figure 4의 사이클을 Mollier 선도에 도시한 것으로, R-134a의 Mollier 선도는 Refprop를 이용하여 작성하였다. 지점 3은 액기 분리기 내부 냉매 중 상부 포화기체의 상태이고 지점 4는 하부의 포화액체의 상태이다. 또한 선도에서 지점 7은 지점 6과 지점 3의 기체가 혼합된 상태를 나타낸다.

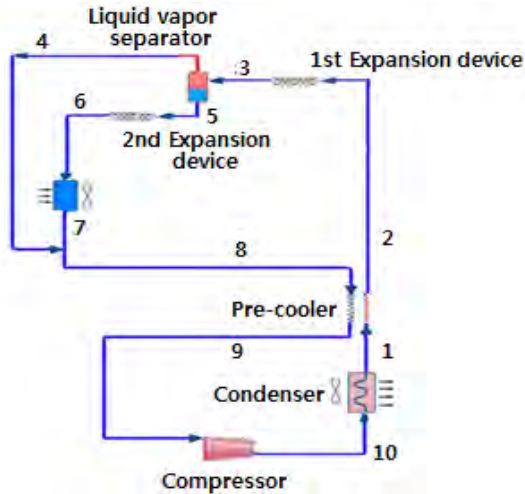


Figure 4: New vapor separation pre-cooled two-stage expansion cycle (VSPEC) using cold energy of separated vapor and evaporator outlet vapor

Table 3: Analysis conditions for **Figure 4** cycle

No.	1	2	3	4
P (bar)	10.166	10.166	5	5
T (°C)	40	35	15.7	15.7
x(Quality)	-	-	0.14781	1.0
h (kJ/kg)	256.4	249.0	249.0	407.5
s (kJ/kg-K)	-	-	-	-
flow rate (kg/s)	1.0	1.0	1.0	0.14781

5	6	7	8	9	10
1.064	1.064	1.064	1.6458	1.6458	10.166
15.7	-25	-25	-14.5	-4.9	52.8
0	-	1.0	-	-	-
221.5	221.5	383.4	387.0	389.4	433.5
-	-	-	-	1.7552	1.7552
0.14781			1.0		

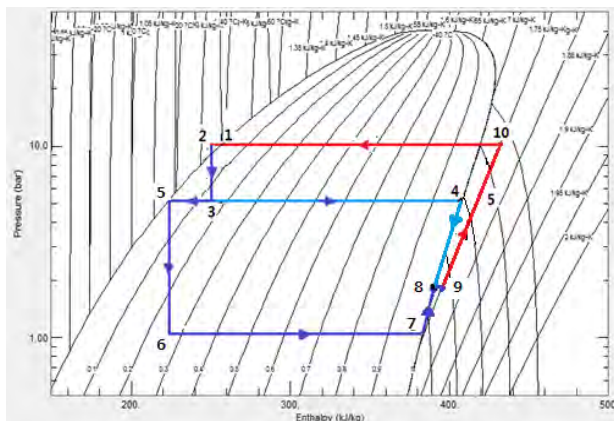


Figure 5: Mollier diagram of VSPEC

3. 증기 분리식 2단 팽창 사이클의 성능 분석

3.1 중간 팽창 압력에 따른 성능계수의 변화

Figure 6은 VSPEC 공정에서 중간 팽창 압력이 변화될 때의 성능계수 변화를 보여준다. 고압은 10.166 bar, 저압 1.064 bar 그리고 응축온도는 40°C와 35°C의 COP 비교 결과이다. 과냉각이 없는 응축온도 40°C 중간 팽창압력 5 bar에서 최대 성능계수인 3.649를 나타내었으며, 과냉각이 5°C 되는 경우도 5 bar에서 3.529로 가장 높게 되었다. 즉, 중간 팽창의 최적 설계압력은 1/2정도의 압력임을 알 수 있다.

중간 팽창 압력 5 bar를 기준하여 과냉각에 따른 성능계수의 변화를 보면, 과냉각이 클수록 COP가 감소함을 보여준다. 이는 종래 냉동기의 과냉 효과에 반하는 현상으로 과냉각이 증가할수록 성적계수가 감소하는 것은 **Figure 3**과 동일하게 냉동능력은 증가하나 압축기 일량이 더 크게 증가하기 때문이다. 그러나 이들 모두 종래 냉동기 공정인 **Figure 1** 보다 29.4% ~ 33.7% 향상된 성능계수가 매우 큰 사이클이 됨을 알 수 있다.

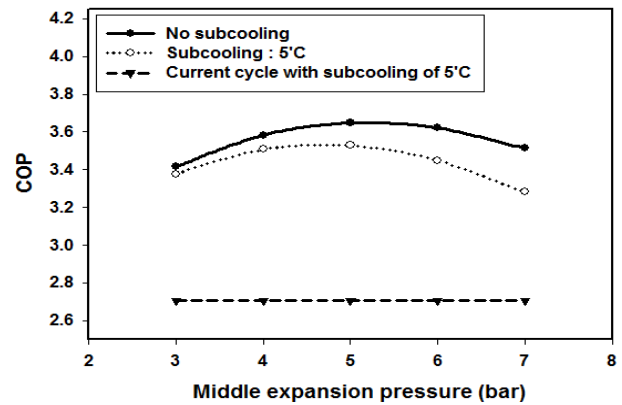


Figure 6: COP analysis of VSPEC with middle expansion pressure

3.2 응축 후 예냉 온도에 따른 성능계수 변화

Figure 7은 VSPEC 공정에서 응축 과냉각 온도가 변화될 때 중간 팽창 압력별 성능계수 변화를 보여준다. 응축온도 40°C를 기준으로 증발기 출구가스의 저온과 액기분리기에서 분리된 가스의 저온을 이용한 과냉각이 클수록 성능계수가 감소함을 보여준다. 이 또한 **Figure 6**과 동일하게 과냉각에 따라 냉동능력은 증가하나 압축기 일량의 증가가 더 크게 증가하기 때문이다.

종래 사이클인 **Figure 1**과 비교를 위하여 과냉각 5°C가 된 35°C 응축액을 기준하여 성능계수 변화를 보면, 중간 팽창 5 bar에서 성능계수가 3.529로 29.4% 향상되고 3 bar에서는 23.8% 증가된다. 과냉각도가 클수록 성능계수 값이 미약하게 감소하게 되는 반면에 증발기에 유입되는 냉매액량이 증가하게 되어 냉동 공간의 온도저하를 촉진시키는 효과를 제공하게 된다.

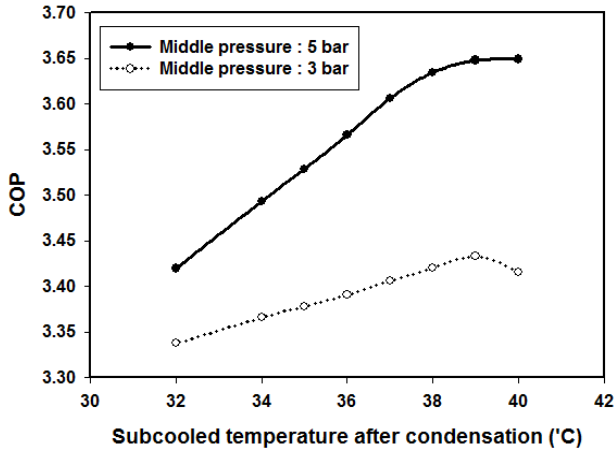


Figure 7: COP variation of VSPEC with sub-cooled condensation temperature

3.3 예냉 공정의 증발온도에 따른 성능계수의 변화

Figure 8은 동일한 조건을 기준하여, 증발기 온도가 변화될 때 성능계수의 변화를 보여준다. 증발기 온도가 높을수록 압축기 입구 측 혼합기체의 압력이 높아지면서 성능계수가 증가하게 된다. 중간 압력 5 bar, 과냉각 4°C를 기준한 증발기 온도 -5°C에서는 성능계수가 5.356로 -25°C 경우보다 50.2% 크게 되며, 증발압력이 낮은 -35°C의 경우는 3.082로 13.6%가 감소한다. 중간 압력 3 bar, 과냉각 4°C를 기준한 경우도 동일한 추세를 나타내었다.

그러므로 본 연구의 VSPEC 공정은 Figure 1의 종래 증기 압축식 냉동 사이클에 액기분리기와 1개의 팽창장치만을 추가하여 발생하는 냉매증기를 분리 제거하는 방법으로 압축기의 일량을 감소시킴으로써 매우 큰 효율 증대를 얻게 됨을 알 수 있다. 또한 중간 팽창과정에서 발생한 냉매증기를 제거함으로써 종래 공정보다 증발기 내부에 흐르는 냉매 질량유량흐름이 15~20%가 감소하게 되어 증발기의 전열면적의 감소로 증발기 규격이 감소하는 효과도 제공하게 된다.

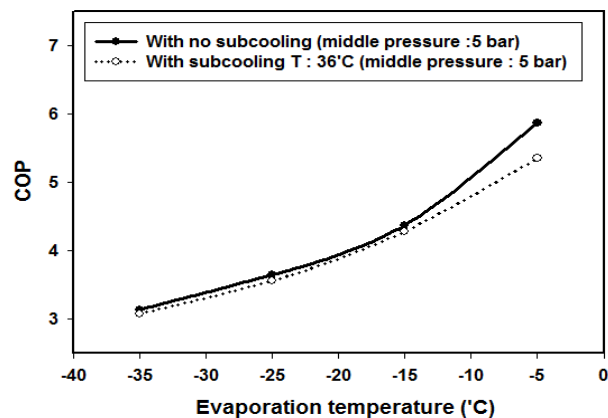


Figure 8: COP variation of VSPEC with evaporation temperature

4. 결 론

본 연구에서는 종래 증기 압축식 냉동 사이클의 팽창 후 냉동효과를 제공하지 않는 냉매기체를 분리 제거하는 2단 팽창 냉동 사이클을 고안하여, R-134a를 적용하는 냉장고 냉동실을 기준한 시스템을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 2단 팽창 증기 분리식 냉동기는 중간팽창 압력 5 bar에서 성능계수가 종래의 증기 압축식 공정보다 29.4 % ~ 33.7 % 향상된 매우 큰 사이클이 되었다. 이는 에너지를 절약할 수 있는 새로운 고효율 냉동 사이클이 될 수 있음을 밝혔다.
- (2) 중간 팽창 압력이 고압과 저압 사이 중간의 압력이 성능계수가 제일 크게 된다.
- (3) 증발기 온도 -5°C ~ -35°C 범위에서 중간 팽창 압력 5 bar, -25°C를 기준하여 성능계수의 값의 변화는 50.6 % 증가 및 13.6 %로 감소하게 되나, 이들 모두 종래 냉동기 공정보다 효율이 크게 높게 된다. 이는 증발기 온도가 높은 냉동기에 본 공정이 적용될 경우 획기적인 성능 향상을 이룰 수 있음을 알 수 있다.
- (4) 2단 팽창 사이클 경우 종래 공정보다 증발기 내부에 흐르는 냉매 질량유량흐름이 15 ~ 20 %가 감소하게 되어 증발기의 규격이 크게 감소하게 된다.

Author Contributions

The following statements should be used “Conceived of the presented idea and developed the theory, S. K. Yun; Performed the computations, K. R. Mun; Witing-original draft preparation, K. R. Mun; Writing-review & editing and supervision, S. K. Yun; Discussed the results and contributed to the final manuscript, K. R. Mun and S. K. Yun”.

References

[1] K. R. Lee, S. B. Hong, and M. S. Kim, “A study on the change of optimal refrigerant charge according to cooling operating conditions,” Proceedings of the Air-conditioning and Refrigeration Engineering Summer Annual Meeting, pp. 013-016, 2017 (in Korean).

[2] S. Rho, C. W. Baik, Y. J. Shin, H. K. Cho, J. J. Lee, B. J. Cho, and B. S. Choi, “A study on the innovative refrigeration cycle working at the coefficient of performance (COP) over 10,” Proceedings of the Air-conditioning and Refrigeration Engineering Winter Annual Meeting, pp. 036-040, 2017 (in Korean).

[3] E. S. Jang, W. J. Yoon, H. J. Chung, H. W. Jung, and Y. C. Kim, “An experimental study on the optimization of the performance characteristics of a re-

frigeration system using R-600a and R-134a,” Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, vol. 22, no. 5, pp. 268-274, 2010 (in Korean).

- [4] M. A. Redo, M. Berana, and K. Saito, “Ejector refrigeration system driven by renewable energy and waste heat,” 12th Heat Pump Conference 2017, pp. 4.9.3-4.9.15, 2017.
- [5] I. Y. Jung, K. R. Mun, and S. K. Yun, “Study on the performance of new two-stage expansion auto-cascade refrigeration system with CO₂-R134a mixed refrigerants,” Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, vol. 30, no. 11, pp. 526-532, 2018 (in Korean).
- [6] Refprop program, National Institute of Standards and Technology, [Online]. Available: <https://www.nist.gov/publications/nist-standard-reference-database-23-reference-fluid-thermodynamic-and-transport>, Accessed December 21, 2018.