

초임계 CO₂ 사이클에서 가스 인젝션이 압축기 성능에 미치는 영향

김우영* · 심재휘* · 이용호* · 김현진**

Effects of Vapor Injection on a Compressor in a Transcritical CO₂ Cycle

Wooyoung Kim*, Jaehwi Shim*, Yongho Lee*, Hyunjin Kim**

Key Words : Twin rotary(트윈 로타리), Vapor injection(가스인젝션), Cooling capacity(냉동능력), Compressor work(압축기일), COP(성능계수)

ABSTRACT

Potential advantages of using vapor injection in a two stage rotary compressor for a CO₂ heat pump water heater system were addressed in this paper by numerical simulation. Vapor separated from a flash tank in the middle of the expansion process can be used for injection into the second stage suction plenum of the compressor to improve the system performance. Vapor injection increases the intermediate pressure between the two stages, thus increasing the first stage compressor work and reducing that of the second stage. As a whole, however, the compressor input power increases due to injected mass flow rate for the second stage. Computer simulation showed that increment of the cooling capacity by vapor injection exceeded that of the compressor work, thus improving the system performance. COP improvement by vapor injection was calculated to be about 5-14% for normal operating conditions. With vapor injection, a maximum COP was found when the displacement volume of the second stage becomes 90-95% of that of the first stage of the compressor.

1. 서론

자연 냉매인 CO₂는 지구온난화 지수와 오존층파괴 지수가 낮고 비가연성 및 무독성으로 인해 관심이 모아지고 있다. 하지만 이를 냉매로 적용한 시스템의 효율이 기존 냉매 시스템 효율보다 낮기 때문에, CO₂ 시스템의

효율을 향상시키고자 하는 여러 가지 방법들이 제안되고 있다⁽¹⁻⁴⁾. 이러한 방법들 가운데 하나는 팽창 과정 중에 있는 이상 상태의 냉매를 기액 분리기를 통해 액상 냉매는 증발기로 보내고, 기상 냉매는 압축기의 압축과정 중의 압축실로 분사키는 '가스 인젝션'이다. 이럴 경우 인젝션으로 인한 압축일은 증가하지만 증발기를 통과하는 냉매의 냉동효과의 증가분이 압축기일의 증가분보다 더욱 크게 나타나므로 결국 COP 향상을 얻게 된다. 원래 이러한 가스 인젝션 방식은 이미 기존 냉매 시

* 인천대학교 대학원

** 인천대학교 기계공학과

책임저자 E-mail : kimhj@incheon.ac.kr

시스템에서 시스템 효율 향상을 위해 시도되었던 방식이다. Siddharth et al.⁽⁵⁾은 스크롤 압축기를 사용하는 냉동 능력 3톤의 시스템에 대한 시뮬레이션을 통해 가스 인젝션이 있는 경우 용량이 16% 정도 작은 압축기로 동일한 냉동능력을 얻을 수 있으며, 시스템 COP는 6-8% 향상하는 것을 보였다. Nonaka and Kubota⁽⁶⁾는 2단 압축 2실린더 로타리 압축기를 적용한 냉방기준 2.8 kW급 열펌프의 실기 실험에서 가스 인젝션을 통해 냉방에서는 6.4%, 난방에서는 5.7%의 COP향상을 얻었으며, 이는 동일한 시스템에서 스크롤 압축기를 적용한 가스 인젝션 사이클보다 평균 3% 정도 효과가 더 높아진 결과임을 보였다.

가스 인젝션이 냉매 압축기 성능에 미치는 영향에 대한 연구는 Wang et al.⁽⁷⁾에 의해 수행되었는데, 냉매 압축기로 사용된 스크롤 압축기에서 가스 인젝션의 위치와 운전조건에 따라 압축기 지시효율이 다양하게 변화

하는 것을 보였다. CO₂ 시스템에 대해서는 2개의 압축기를 사용하여 2단 압축 사이클을 구성하고 1단과 2단 사이에 가스 인젝션을 적용한 사이클의 성능 향상에 대해 연구한 사례가 있다⁽⁸⁾.

본 연구에서는 냉매 압축기로서 고압식 2단 트윈 로타리 압축기를 사용하는 CO₂ 급탕기 겸용 열펌프 시스템에서 가스 인젝션이 압축기의 성능 자체에 미치는 영향을 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 통해 살펴보고자 한다.

2. 가스 인젝션 모델링

Figure 1은 CO₂ 초임계 사이클에서 가스 인젝션이 있는 P-h 선도를 보여주며, Fig. 2는 가스 인젝션이 있는 사이클에 고압식 2단 트윈 로타리 압축기를 적용한 모식도이다.

가스쿨러의 출구 (3)에서 팽창을 시작한 CO₂는 플래시 탱크에서 기액 분리가 이루어지고 분리된 액상의 냉매는 증발기로 유입되고 기상의 냉매 가스는 압축기 1단 출구와 2단 흡입구 사이로 주입된다. 이때 기상 냉매의 전부가 가스 인젝션에 사용된다면 가스 인젝션 질량 유량은 (3a)점의 건도를 x_{3a} 라고 할 때 식 (1)과 같다.

$$m_{VI} = x_{3a} m_{2d} \quad (1)$$

가스 인젝션이 없는 경우에는 1단 압축 완료가 (1d')에서 이루어지지만 가스 인젝션이 있는 경우 인젝션되는 추가 냉매 가스의 질량으로 인해 중간압이 높아져서 1단 압축이 (1d)에서 완료되게 된다. 또한 2단 압축의 시작점 온도도 인젝션되는 가스의 온도가 1단 토출가스의 온도보다 상당히 낮으므로 (1d)점에서 (2s)점으로 흡입 온도가 낮아진다. (2s)점은 1단에서 토출되는 가스와 플래시 탱크로부터 인젝션 되는 가스의 질량보존과 에너지 보존으로부터 다음의 식 (2)와 식 (3)과 같이 결정된다.

$$m_{1d} + m_{VI} = m_{2s} \quad (2)$$

$$m_{1d} h_{1d} + m_{VI} h_{1b} = m_{2s} h_{2s} \quad (3)$$

CO₂ 2단 트윈 로타리 압축기에 대한 성능해석은 가스압력 계산부분과 기계적 마찰손실 계산부분으로 이루어져 있다. 압축기 내부를 여러 개의 검사체적으로 나누고 각 검사체적에서 식 (4)와 같이 크랭크 각도에 따른 압력 변화를 계산한다.

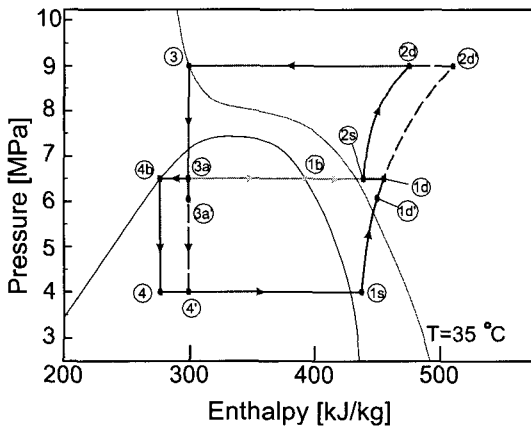


Fig. 1 Vapor injection cycle in CO₂ system

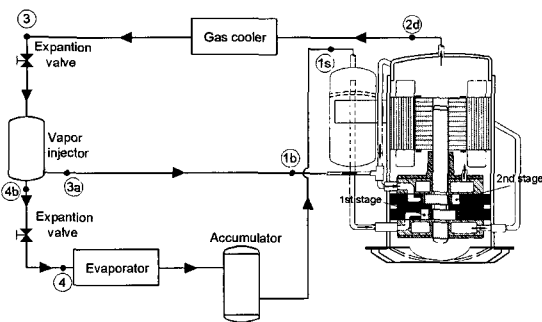


Fig. 2 Two-stage twin rotary compressor in vapor injection cycle

Table 1 Comparison on compressor performance between calculation and experiment

RPM	$\frac{Qc,cal}{Qc,exp}$	$\frac{Wc,cal}{Wc,exp}$	$\frac{COP,cal}{COP,exp}$
2100	1.062	1.006	1.056
2700	1.043	0.997	1.046
3480	0.977	0.990	0.986

Table 2 Effects of vapor injection on compressor performance: Pd=9.0 MPa/Ps=4.0 MPa

	W/O V.I.	With V.I.	%
Pm [MPa]	5.542	6.456	
Wad [W]	2740	2874	4.9
Wc [W]	3802	3993	5.0
Qc [W]	10,727	12,315	14.8
\dot{m} [kg/s]	0.0760	0.0937	23.3
COP	2.82	3.08	9.2

$$P = \frac{P_s}{\rho_s^n} \left(\frac{M_{gas}}{V - M_{oil}/V_{oil}} \right)^n \quad (4)$$

기계적 마찰 손실은 1단과 2단의 베인과 롤러 그리고 크랭크 축에 대한 운동방정식을 세우고 이로부터 얻은 베어링 하중을 비롯한 각 부재간의 반력을 통해 구한다. 자세한 성능해석 내용에 대해서는 김우영 등⁽⁹⁾에 나와있다.

본 연구에서는 가스 인젝션이 여러 가지 운전조건에서 CO₂ 트윈 로타리 압축기의 성능에 미치는 영향을 살펴보기 위해 기존의 CO₂ 트윈 로타리 압축기 성능해석 프로그램⁽⁹⁾에 가스 인젝션으로 인한 식 (1)~식 (3)과 같은 추가적인 사항들을 반영하였다. 해석 대상인 압축기는 냉방기준 10.5 kW급 냉난방 겸용 급탕기에 설치되는 2단 트윈 로타리 압축기로서 2단과 1단의 행정체적비는 $V_2/V_1=0.8$ 이다.

3. 계산결과 및 고찰

Table 1 및 Fig. 3은 가스 인젝션이 없는 CO₂ 급탕기 겸용 열펌프 사이클에서 토출압 9MPa, 흡입압 4.5 MPa 일 때, 압축기 운전속도 변화에 따른 냉동능력 (Qc), 압축기 입력 (Wc), 그리고 COP에 대한 시뮬레이션 계산 결과와 실험 데이터와의 비교를 보여준다. 실험 결과는

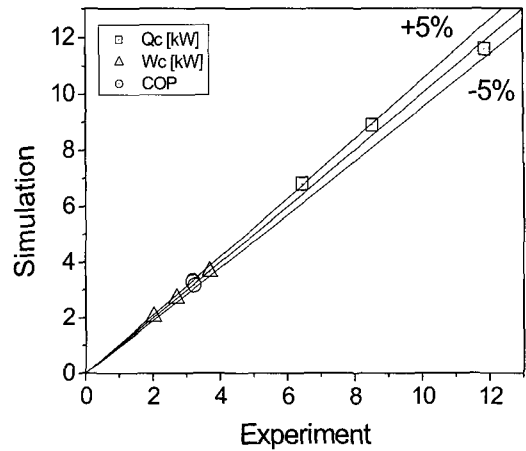


Fig.3 Simulation vs. experiment

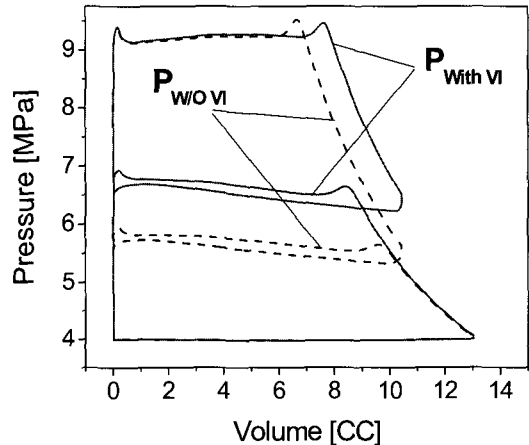


Fig. 4 P-V diagram of two-stage twin rotary compressor

CO₂ 전용 압축기 칼로리미터를 통해 얻었다. 운전 압력은 ±0.5% 내에서 설정 가능하며 냉동능력 측정은 ±0.5%~2%의 재현성을 갖는다. 측정 데이터는 30초 내지 1분 간격으로 10분 동안 적산하여 평균하였다. 실험치와 성능해석 계산치가 대략 5% 오차 범위 내에서 잘 일치한다.

Figure 4는 시뮬레이션을 통해 토출압 9MPa, 흡입압 4MPa, 그리고 압축기 운전속도 3480 rpm에서 가스 인젝션이 있는 경우 (P_{with v.i.})와 없는 경우 (P_{w/o v.i.})에 대해 얻은 압력 선도이다. 가스 인젝션으로 인해 중간압 (Pm)이 높아지고 이로 인해 2단 압축 시작점이 1단 압축 과정에서 멀어지는 결과가 얻어졌다. Table 2에는 가스 인젝션으로 인한 압축기 성능 변화를 나타내었다. 가스 인젝션으로 인해 유효압축일(Wad)은 4.9% 증가 하

초임계 CO₂ 사이클에서 가스 인젝션이 압축기 성능에 미치는 영향

Table 3 Compressor loss breakdown:
Pd=9.0 MPa/Ps=4.0 MPa
(Useful work with no vapor injection counted as 100)

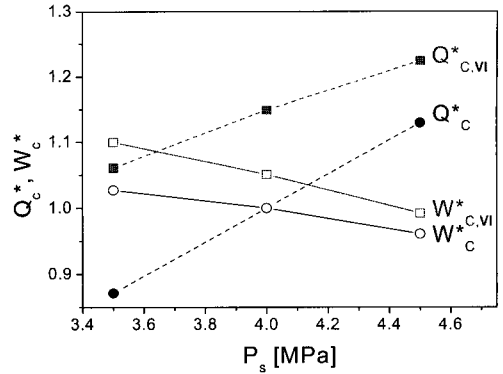
	W/O V.I.		With V.I.	
	1st	2nd	1st	2nd
Useful work	100		104.9	
Stage				
Useful work /stage	37.3	62.7	55.6	49.3
Gas compression loss	7.6		8.3	
Suction loss	0.44	0.32	0.43	0.15
Over-compression	3.22	3.12	3.47	3.87
Re-expansion	0.06	0.46	0.30	0.09
Mechanical loss	10.75		10.93	
Upper journal	1.81		1.59	
Lower journal	1.40		1.56	
Eccentric journal	2.30	2.77	2.47	2.54
Vane/Slot	0.82	0.89	1.20	0.71
Vane/Roller	0.42	0.29	0.49	0.33

였고 압축기 입력은 5.0% 증가 하였으며 냉동능력은 14.8% 증가하여 결국 COP는 9.2% 향상되었다.

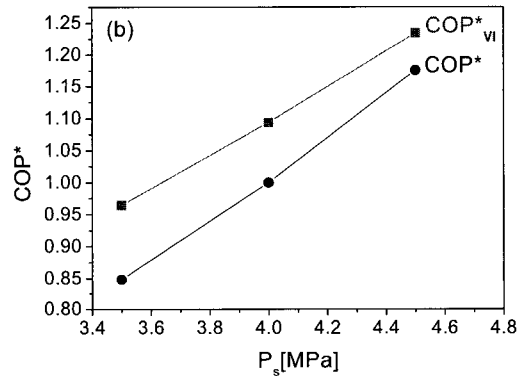
가스 인젝션으로 인해 질량유량은 23.3% 증가하였으나 압축기 입력은 단지 5.0%만 증가한 것은 증가된 질량유량이 2단 실린더만을 통과하고 또한 가스 인젝션으로 인해 중간압이 높아져서 2단 압축의 부담이 감소하였기 때문이다.

Table 3에는 가스 인젝션이 없을 경우의 유효압축일, 즉 단열압축일을 100으로 놓고 각종 손실을 이에 대한 비례치로 나타내었다. 가스 인젝션이 없을 경우 1단과 2단의 유효압축일이 각각 37.3과 62.7로 불균형을 이루었는데 가스 인젝션이 있는 경우에는 이것이 각각 55.6과 49.3으로 어느 정도 균형을 이루었다. 가스 인젝션이 있는 경우 각 단의 과압축 손실이 증가하였고 특히 2단에서의 증가가 더 크게 나타났는데 이는 증가한 유량 때문이다. 기계적 마찰손실에서는 가스 인젝션으로 인해 상단 저널베어링과 2단의 편심 베어링에서의 손실이 감소하였는데 이는 중간압의 증가로 인해 2단에서의 부하가 감소하였기 때문이다. 마찬가지로 이유로 베인과 슬롯 사이 마찰도 1단에서는 증가하였고 2단에서는 감소하였다.

Figure 5는 토출압을 9.0 MPa에 고정하고, 흡입압을 Ps=3.5~4.5 MPa의 범위에서 변화시킬 때 가스 인젝션이 압축기 성능에 미치는 영향을 보여준다. 각 값들은 가스 인젝션이 없고 흡입압은 Ps=4.0 MPa인 경우의 값으로 무차원화 되었다. 예를 들면, Q_{c,vi}*는 가스 인젝션이 있는



(a) cooling capacity and compressor input power



(b) COP

Fig. 5 Effects of vapor injection at Pd = 9 MPa

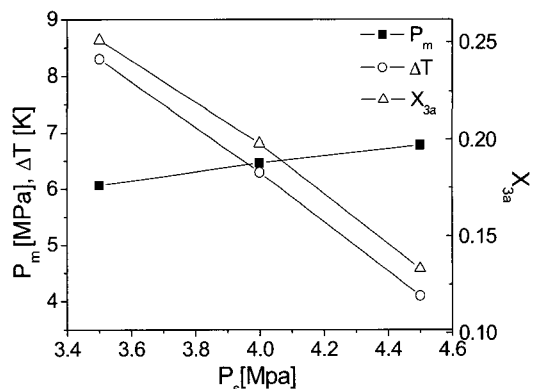
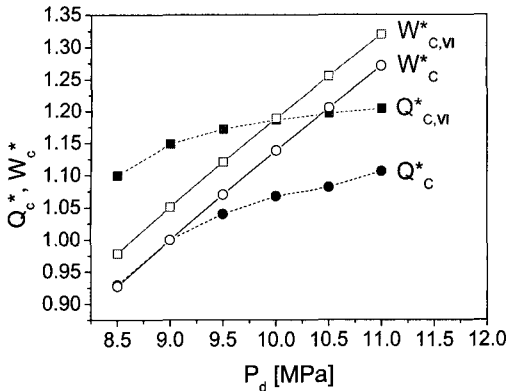
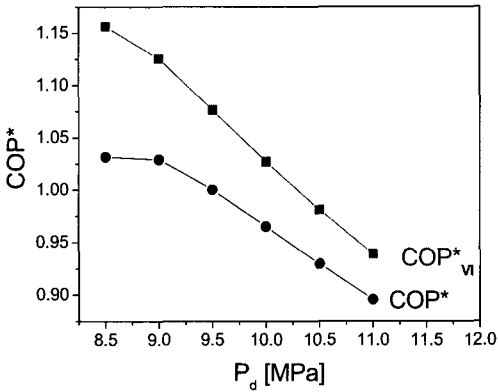


Fig. 6 Intermediate pressure, inter-cooling effect, and vapor quality in vapor injection system vs. suction pressure

경우의 냉동능력을 가스 인젝션이 없고 흡입압이 4.0 MPa일 때의 냉동능력으로 나눈 값이다. 가스 인젝션에



(a) Cooling capacity and compressor input power



(b) COP

Fig. 7 Effects of vapor injection at $P_s = 4\text{MPa}$

의해 냉동능력과 압축기 입력 모두 상승하는데 냉동능력 상승분이 압축기 입력 증가분보다 상대적으로 크기 때문에 결국 COP는 상승하는 효과를 가져온다. 이러한 COP 향상 효과는 흡입압이 높아질수록 감소한다. 이는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 흡입압이 높아지면 중간압도 높아져서 기액분리 시의 건도 (X_{3a})가 낮아지기 때문에 가스 인젝션 질량이 상대적으로 줄어들기 때문이다. 흡입압이 높아지면 2단 흡입가스의 냉각 효과(ΔT)도 감소한다.

Figure 7은 토출압 $P_d=8.5\sim 11.0\text{MPa}$ 의 범위에서 가스 인젝션이 압축기 성능에 미치는 영향을 보여준다. 가스 인젝션으로 인한 압축기 일은 토출압 증가에 따라 5.5%~3.8%의 증가율 변화를 보이고, 냉동능력의 증가율은 18.3%~8.9%로 변화하여, 결국 COP 증가율은 12.1%~4.8%가 된다. 토출압 증가에 따른 냉동능력의 증가가 완만해 지는 이유는 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 압축기 토출압 즉, 가스쿨러 압력이 올라갈수록 팽창변 입구 온

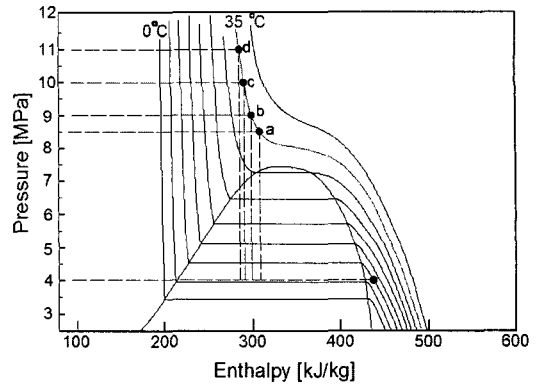


Fig. 8 Enthalpy variation at expansion valve outlet for expansion valve inlet temperature of 35°C with increasing discharge pressure

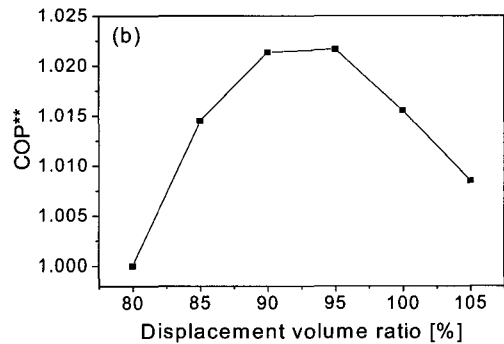
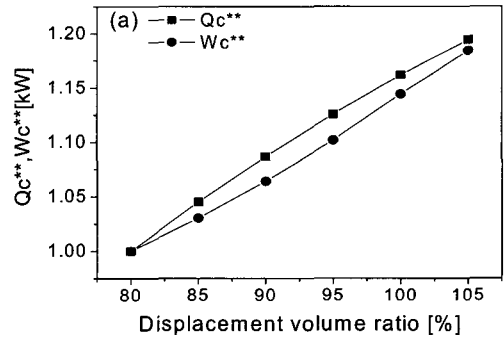


Fig. 9 Effects of displacement volume ratio on the compressor performance

도가 35°C 이 되는 점이 팽창기 출구의 건도가 작아지는 쪽으로 이동하기 때문이다.

앞서 가스 인젝션으로 인해 중간압이 높아지고 이로 인해 2단 압축 시작점이 1단 압축 과정에서 멀어지는 결과를 보였는데, 이는 가스 인젝션을 적용하면 1단과 2단의 행정체적비(V_2/V_1) 적정점이 변화한다는 것을 의미

한다. 이를 더 구체적으로 살펴보기 위해 2단의 행정체적을 변화시켜가며 성능해석을 수행하였다. 이때 2단 실린더의 다른 치수들은 고정하고 단지 2단의 롤러 외경만을 바꾸어 행정체적을 변화시켰다.

Figure 9에 행정체적비를 변화시켜가며 계산한 압축기 성능을 나타내었으며 각 값들은 $V_2/V_1=0.8$ 일 때의 냉동능력, 압축기 입력, 성적계수를 기준으로 무차원화되었다. 행정체적비가 증가하면 냉동능력과 압축기 입력은 모두 거의 선형적으로 증가하되 냉동능력은 불룩한 증가양상을, 압축기 입력은 오목한 증가양상을 보여 결국 COP는 최대치를 갖게 된다. COP 최대치는 $V_2/V_1=0.9\sim 0.95$ 에서 $V_2/V_1=0.8$ 일 때에 비해 약 2% 정도 증가한 값을 보인다.

4. 결론

2단 트윈 로타리 압축기를 사용한 CO₂ 급탕기 겸용 열펌프 사이클에서 1단과 2단 사이에 가스 인젝션을 적용한 경우, 압축기 성능해석 시뮬레이션을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 2단과 1단의 행정체적비가 0.8인 기본 모델에서 흡입압 4Mpa, 토출압 9Mpa일 때 가스 인젝션으로 인해 압축기일은 5.0% 증가하고 냉동능력은 14.8% 증가하여 그 결과 COP는 9.2% 향상된다.
- 2) 가스 인젝션으로 인해 중간압이 높아져서 2단 편심부 및 상단 저널 베어링의 마찰손실, 그리고 2단 실린더의 베인과 베인슬롯 사이 마찰손실이 감소한다. 1단 측의 마찰손실은 일반적으로 증가하며 베인과 롤러 사이의 마찰손실은 1단 및 2단 모두에서 증가한다.
- 3) 흡입압을 4.5 MPa에서 3.5 MPa로 낮추면 가스 인젝션으로 인한 COP 향상 효과는 5.2%에서 13.3%로 증가한다. 이는 흡입압이 감소하면 중간압도 낮아져서 기액 분리시 건도가 증가하고 이로 인한 가스 인젝션량이 증가하기 때문이다.
- 4) 토출압을 8.5 MPa에서 11 MPa로 높이면 가스 인젝션으로 인한 COP 향상 효과는 12.0%에서 4.9%로 감소하는데 이는 토출압이 증가할수록 팽창기 출구에서의 건도가 낮아져서 가스 인젝션량이 줄어들게 되기 때문이다.
- 5) 토출압 9.0 MPa 및 흡입압 4.5 MPa의 운전조건에서 가스 인젝션이 있는 경우 압축기 최대 성능은 행정체적비 $V_2/V_1=0.90\sim 0.95$ 에서 나타났다.

참고문헌

- (1) Huff, H., Hwang, Y. and Radermacher, R., 2002, "Options for a two-stage transcritical CO₂ cycle," 5th IIR-Gustav Lorentzen on Natural Working Fluids Conference at Guangzhou, pp. 143~149.
- (2) Butrymowicz, D., 2003, "Improvement of compression refrigeration cycle by means of two-phase ejector," International Congress of Refrigeration, Washington D.C., Paper-ICR0310.
- (3) Yamasaki, H., Yamanaka, M., Matsumoto, K. and Shimada, G., 2004, "Introduction of transcritical refrigeration cycle utilizing CO₂ as working fluid," International Compressor Engineering Conference at Purdue, Paper C090.
- (4) Baek, J., Groll, E. and Lawless, P., 2002, "Effect of pressure ratios across compressors on the performance of the transcritical CO₂ cycle with two-stage compression and intercooling," International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, Paper R11-7.
- (5) Siddharth, J., Gaura, J. and Clark, B., 2004, "Vapor injection in scroll compressors," International Compressor Engineering Conference at Purdue, Paper C081.
- (6) Nonaka, M. and Kubota, A., 2004, "Performance improvement of room air conditioner with new injection system," International Symposium on New Refrigerants and Environmental Technology, pp. 97~101.
- (7) Wang, B., Li, X., Shi, W. and Yan, Q., 2006, "Effects of refrigerant injection on the scroll compressor," International Compressor Engineering Conference at Purdue, Paper C091.
- (8) 류창기, 이호성, 김용찬, 조홍현, 조성욱, 2006, "2단 압축 상분리 사이클을 적용한 이산화탄소 시스템의 성능향상에 관한 해석적 연구," 설비공학 논문집, 제18권 제8호, pp. 641~648.
- (9) 김우영, 안종민, 김현진, 조성욱, 2007, "CO₂ 2단 트윈 로타리 압축기 성능해석," 설비공학회 논문집, 제19권, 제1호, pp. 19~27.