

# 히트 펌프용 비대칭 스크롤 압축기의 가스 인젝션 포트 설계

## Design of Gas-Injection Port of an Asymmetric Scroll Compressor for Heat Pump Systems

김용희(Yong-Hee Kim), 김현진(Hyun-Jin Kim)<sup>†</sup>

인천대학교 기계시스템공학부

Department of Mechanical Engineering, Incheon National University, Incheon, 406-772, Korea

(Received October 29, 2014; revision received March 16, 2015; Accepted: April 27, 2015)

**Abstract** For an asymmetric scroll compressor for heat pump application, a numerical simulation was carried out to investigate the effects of injection port design on the compressor's performance under gas injection. To validate the simulation, the numerical results were compared with experimental results obtained from a scroll compressor with a base injection port design. There was good agreement between simulation and experimental results, with around a 1% difference in the injection mass flow rate when the injection pressure was below  $12 \text{ kgf/cm}^2 \text{ A}$  for the heating mode. Various injection port angular positions were numerically tested to yield better injection performance. The largest improvement in heating capacity was obtained at angles of  $240^\circ$  and  $200^\circ$  inward from the scroll wrap end angle for low-temperature and standard heating conditions, respectively, while the maximum COP improvement was at  $365^\circ$  and  $280^\circ$ , respectively. A considerable improvement in cooling capacity was also found at the injection port angle of  $240^\circ$ .

**Key words** Gas injection(가스인젝션), Scroll compressor(스크롤 압축기), Injection port design(인젝션 포트 설계), Heating capacity(난방능력), Cooling capacity(냉방능력)

<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: kimhj@incheon.ac.kr

### 기호설명

$T$  : 온도 [ $^\circ\text{C}$ ]  
 $P$  : 압력 [bar], [ $\text{kgf/cm}^2$ ]  
 $\dot{m}$  : 질량유량 [ $\text{kg/s}$ ]  
 $W$  : 동력 [W]

### 하첨자

$A$  : A 체임버  
 $B$  : B 체임버  
 $c$  : 압축기  
 $cond$  : 응축기  
 $eva$  : 증발기  
 $inj$  : 인젝션  
 $s$  : 흡입

## 1. 서 론

종래에 가스 인젝션 적용은 스크롤 압축기나 다단 원심 압축기가 사용되는 대형 냉동 사이클에 국한되었다. 하지만 최근 들어 에너지기기의 효율 향상이 제품

의 경쟁력에 매우 중요한 비중을 지니게 되고 에너지 절감에 따른 CO2 배출 감소량에도 큰 가치를 두게 됨에 따라 가스 인젝션 설치에 따른 추가 비용의 영향이 상대적으로 작아지게 되었고, 또한 히트펌프 시스템 등에서 저온 난방이나 혹은 고온 냉방 운전이 필요한 경우 압축비가 높아지게 되어 가스 인젝션 적용이 효과가 있게 된다.<sup>(1)</sup> 더 나아가서 가스 인젝션 적용 시 압축기의 토출 온도가 낮아지게 되므로 압축기 신뢰성이 향상되는 추가적인 이점도 있다. 가스뿐만 아니라 액 냉매를 분사하는 경우를 포함하여 히트 펌프에서의 냉매 인젝션에 관한 논문들에 대한 전반적인 검토가 Xu et al.<sup>(2)</sup>에 나와 있다.

기본적인 에어컨 사이클에 가스 인젝션 루프가 추가적으로 설치되면 압축기와 사이클 사이의 상호 연계성이 더 높아진다. 가스 인젝션 라인의 일단은 압축기의 가스 인젝션 포트에 연결되게 되는데, 시스템에서 가스 인젝션을 통해 얻고자 하는 바에 따라 압축기의 가스 인젝션 포트가 설계되어야 한다. 가스 인젝션 포트 설계에는 포트의 위치, 크기, 열리고 닫히는 시점, 가스 인젝션 라인과 포트의 연결 방안(통로) 등의 결

정이 포함된다.

가스 인젝션을 통해 얻고자 하는 주목표가 시스템의 능력 증대인지 아니면 효율 향상인지에 따라 가스 인젝션 포트의 설치 위치가 달라지게 된다. 능력 증대를 목표로 하는 경우 가스 인젝션 포트 위치는 압축 포켓에서 가스 흡입이 완료되는 시점에 포트가 열리기 시작하도록 하면 유리하다. 즉 주어진 인젝션 압력에 대해 인젝션 포트가 노출되는 압축실 압력이 상대적으로 낮게 설정되면 인젝션 유량이 증가하게 되고, 이에 따라 능력이 증가하기 때문이다. 가스 인젝션을 통해 시스템 효율을 향상시키는 것이 목표인 경우에는 압축이 어느 정도 진행된 시점에 포트가 열리기 시작하도록 가스 인젝션 포트 위치를 선정해야 한다. 가스 인젝션 포트를 압축 초기에 열리게 할 경우 많은 인젝션 유량을 얻을 수는 있지만 동시에 압축기 일도 이에 비례하여 증가하므로 효율 향상 면에서는 그리 큰 효과를 얻기 어렵다. 인젝션 포트 위치를 너무 늦추는 경우에는 포트가 닫히기 전에 압축실 압력이 인젝션 압력보다 높아져서 압축실 내의 가스가 인젝션 포트를 통해 인젝션 라인 쪽으로 역류해 들어가는 일이 발생하여 효율 증대 효과가 감소하게 된다. 따라서 포트 위치를 적절하게 선정하여 포트 여단힘 시점을 잘 조절하게 되면 인젝션 유량에 따른 능력 증가 대비 추가적인 압축기 일의 비가 최대가 되는 상태를 얻을 수 있게 된다.

인젝션 포트의 크기는 인젝션 유량 측면에서는 포트가 클수록 좋지만 포트가 열리고 닫히는 시점을 정확히 조절하기 위해서는 크기의 제한이 따른다. 포트가 너무 커서 2개의 압축 포켓에 동시에 연통되는 경우는 없어야 한다.

비대칭 스크롤인 경우 압력 손실을 줄여주기 위해 1개의 큰 포트와 양 쪽의 압축 포켓에 번갈아 가스를 인젝션 해주도록 하는 설계도 가능하다. 한편 가스 인젝션 포트를 압축실에 설치하는 경우 발생하는 사체적, 역류, 압축실 압력 상승 등의 문제를 피하고자 배압실에 가스를 인젝션 하는 방안도 있으며,<sup>(3)</sup> 또한 가스 인젝션 포트를 스크롤 경관면에 설치하는 대신 랩 선단에 설치하여 짧은 시간 내에 최대의 인젝션량을 분사하는 방법도 제안되었다.<sup>(4)</sup>

본 연구에서는 R410A 히트 펌프용 비대칭 스크롤 압축기에서 인젝션 포트의 위치와 크기에 따른 가스 인젝션 성능 변화를 수치해석적인 방법을 통해 살펴보고자 한다.

## 2. 가스 인젝션 스크롤 기본 모델

Fig. 1은 고정 스크롤과 선회 스크롤이 형성하는 복수의 압축실 내에서 가스 인젝션 포트의 위치를 보여

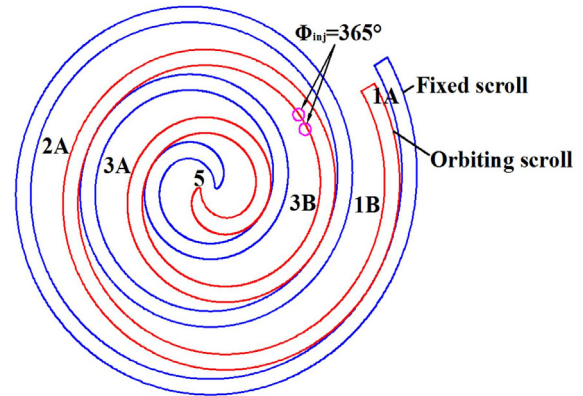


Fig. 1 Injection holes of BM model.

Table 1 Operating conditions

| Notation | Condition         | $t_{eva}$<br>(°C) | $t_{cond}$<br>(°C) | $t_s$<br>(°C) | $P_{eva}$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> A) | $P_{cond}$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> A) |
|----------|-------------------|-------------------|--------------------|---------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| HS       | Heating Standard  | -2.8              | 36.0               | 2.2           | 7.43                                 | 22.0                                  |
| HL       | Low Temp. Heating | -27.7             | 34.6               | -22.7         | 3.03                                 | 20.63                                 |
| ARI      | Cooling Standard  | 7.2               | 54.4               | 18.3          | 10.24                                | 34.53                                 |

준다. 스크롤 랩 두께는 3.9 mm로 일정하고, 랩 끝 각은 1200° 정격 냉동능력은 ARI 조건에서 74,000 Btu./hr이다.

가스 인젝션 포트 기본 모델(BM, base model)의 사양은 직경  $d_{inj} = 3$  mm인 인젝션 홀 2개가 랩 끝 각에서 365° 안쪽으로 들어온 위치( $\Phi_{inj} = 365^\circ$ )에 있고 A 체임버와 B 체임버에 교대로 연통되도록 랩과 랩 사이 피치의 중앙부에 설치되어 있다.

인젝션 성능 해석은 Table 1과 같이 난방 성능은 저온 난방 및 난방 표준 조건, 그리고 냉방은 ARI 조건에서 수행되었다.

인젝션 라인의 냉매 과열도는 모든 경우에 5°C로 고정하였다. 가스의 성능 해석의 정확도를 판단하기 위해 기본 모델에서 인젝션 압력에 따른 인젝션 유량비 계산과 실험 결과의 비교를 Fig. 2에 나타내었다. 저온 난방의 경우  $Pinj = 12$  kgf/cm<sup>2</sup>A에서 오차 1.05%이며, 인젝션 압력이 작아질수록 오차가 줄어들어  $Pinj = 7$  kgf/cm<sup>2</sup>A에서는 0.26% 정도가 된다. 표준난방에서는  $Pinj = 12$  kgf/cm<sup>2</sup>A에서 0.7%의 오차를 보인다.

Fig. 3은 난방 표준 조건에서 인젝션 압력이  $Pinj = 12$  kgf/cm<sup>2</sup>A일 때, BM 모델에 대해 A, B 체임버의 압력선도 및 인젝션 질량 유량을 크랭크 각도에 따라 보여준다. 여기서 각 체임버에 대한 이상적인 압력 선도

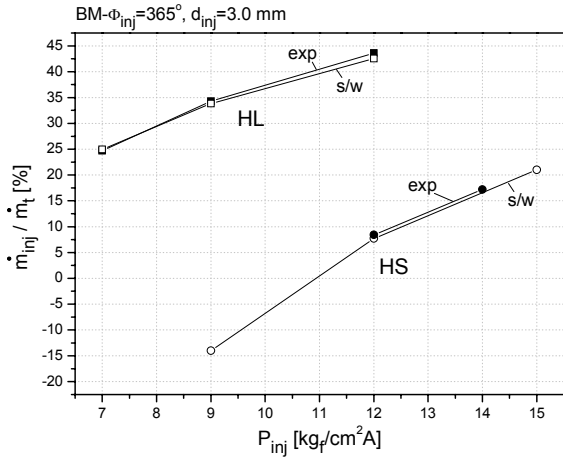


Fig. 2 Injection mass flow rate : exp. vs. s/w.

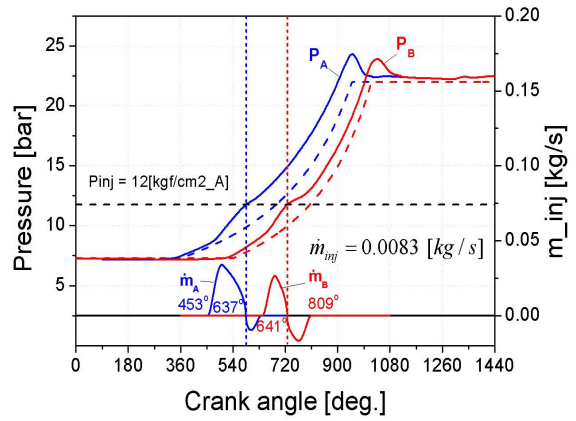


Fig. 3 Chamber pressure and injection mass flow rate with BM injection ports.

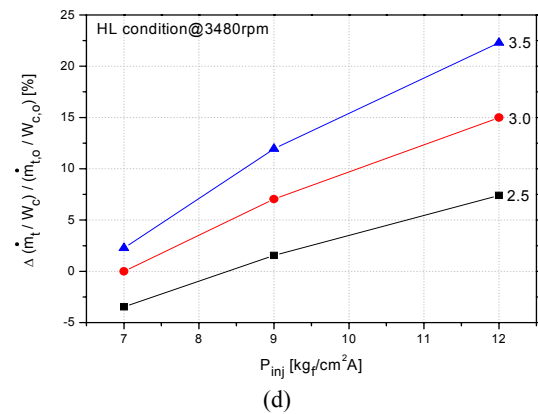
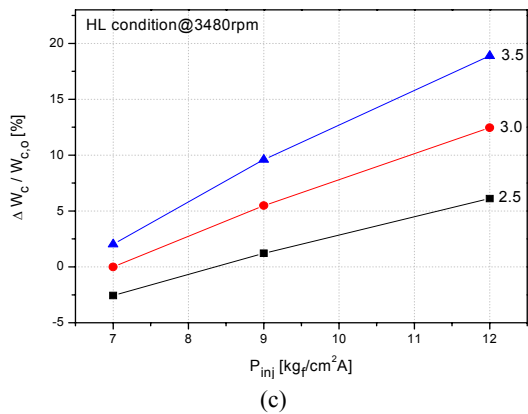
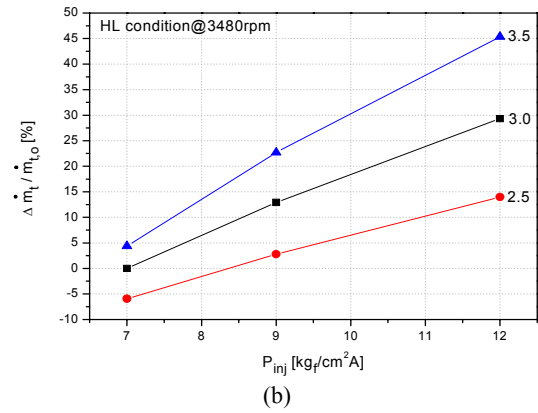
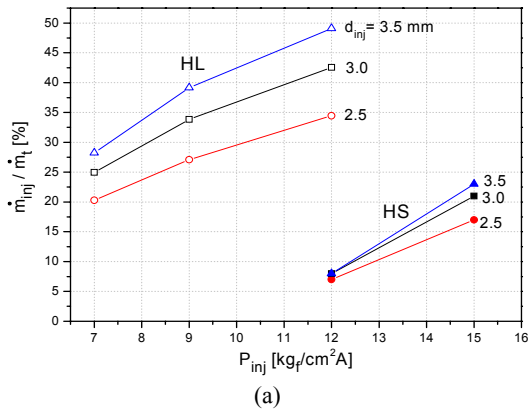


Fig. 4 Effects of injection port diameter on injection performance : (a) injection mass flow rate, (b) total mass flow rate, (c) compressor input, (d) COP-equivalent.

는 점선으로 나타내었다. 인젝션 질량 유량 선도에서 음(-)으로 표시되는 부분은 인젝션 포트가 닫히기 전에 체임버에서 인젝션 포트로의 역류가 발생하는 것을 보여준다. 이는 체임버 내 압력이 인젝션 압력보다 높아

지기 때문이다. 따라서 이 경우 인젝션 포트가 더 일찍 닫히도록 설계하는 것이 더 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이러한 인젝션 스크롤 기본 모델로부터 개선된 인

젝션 포트 설계를 위해 인젝션 포트의 직경은 스크롤 랩 두께를 넘지 않는 범위인  $d_{inj} = 2.5 \text{ mm} \sim 3.5 \text{ mm}$  에서, 포트 위치는  $\Phi_{inj} = 160^\circ \sim 400^\circ$  의 범위 내에서 변화시켜가며 이러한 인젝션 포트 설계 변화가 인젝션 성능에 미치는 영향을 해석적으로 수행해 보았다.

### 3. 인젝션 포트 직경 변화

먼저 인젝션 포트의 위치는 기본모델의 위치인  $\Phi_{inj} = 365^\circ$  에 고정하고, 인젝션 포트 직경을 변화시켜가며 인젝션 성능 계산을 수행하였다.

인젝션 압력( $P_{inj}$ )에 따른 인젝션 유량비( $\dot{m}_{inj}/\dot{m}_t$ ), 총질량유량( $\dot{m}_t$ ), 압축기 입력( $W_c$ ), 그리고 압축기 입력 당 총질량유량( $\dot{m}_t/W_c$ )에 대한 계산 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(b)의 총질량유량과 Fig. 4(d)의 압축기 입력당 총질량유량은 각각 난방능력과 COP에 상응하는 지표가 된다. Fig. 4의 각 y축 표기에서  $\dot{m}_{t,0}$  및  $W_{c,0}$  는 각각 인젝션 기본 모델(BM)에서의 총질량유량 및 압

축기 입력이며, Fig. 4의 각 y축 항목들은 기본 모델에서의 인젝션 성능 값들을 기준치로 하여 그 증감분을 %로 나타낸 것이다.

인젝션 포트의 직경이 클수록 난방능력과 COP가 더 많이 향상되는 것으로 나타났다. 저온 난방에서 인젝션 압력  $P_{inj} = 7 \sim 12 \text{ kgf/cm}^2\text{A}$ 에서 직경을 3.0 mm에서 3.5 mm로 크게 한 효과는 난방능력은 4.36%~16.06%, 그리고 COP는 2.29~7.30% 각각 향상되었다.

### 4. 인젝션 포트 위치 변화

#### 4.1 난방성능

인젝션 포트의 위치가 인젝션 성능에 미치는 영향을 보기 위해 인젝션 포트의 직경을  $d_{inj} = 3.5 \text{ mm}$ 에 고정하고, 인젝션 포트의 위치를 변화시켜 보았다.

Fig. 5는 저온난방(HL) 조건 및 표준난방(HS) 조건에서 인젝션 포트 위치에 따른 인젝션 성능 변화를 보여준다.

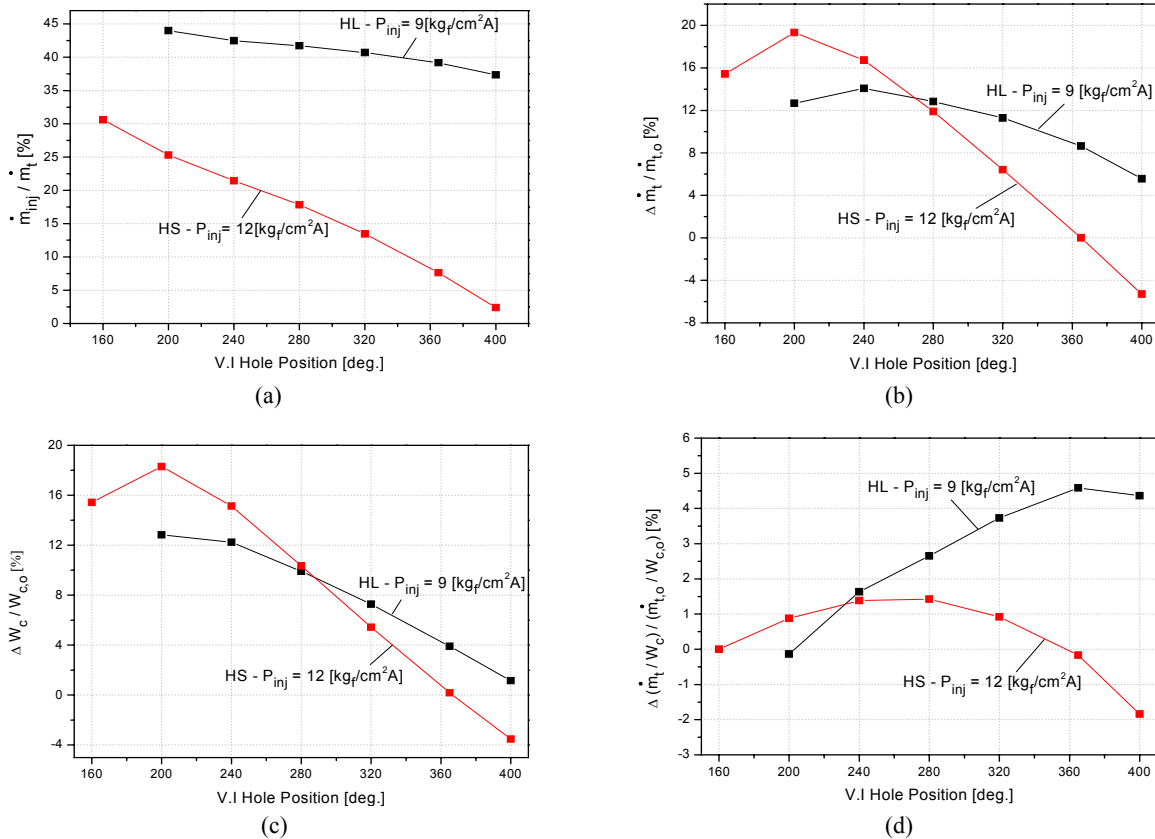


Fig. 5 Effects of injection port angle on injection performance : (a) injection mass flow rate, (b) total mass flow rate, (c) compressor input, (d) COP-equivalent.

Fig. 5(a)에서 인젝션 포트 위치각  $\Phi_{inj}$ 이 커질수록 즉, 포트가 스크롤 안쪽으로 들어갈수록 인젝션 유량 비가 감소하는 것은 Fig. 6(a)(b)에서와 같이  $\Phi_{inj}$ 가 커지면 인젝션 개시가 늦어져서 압축실 압력이 높아진 상태에서 인젝션이 수행되므로 인젝션 후반에는 압축실에서 인젝션 포트로의 역류가 발생하기 때문이다. 따라서 인젝션 포트가 스크롤 외곽부에 위치할수록 인젝션 유량 증가에 유리하지만, 너무 외곽에 위치하게 되면 흡입이 완료되지 않은 상태에 인젝션이 진행되어 흡입실로 역류되어 빠져 나가는 손실분이 발생한다. 이러한 이유로 인해 Fig. 5(b)에서 난방능력에 상응하는 총질량유량은 감소세로 돌아서는 위치가 나타나는데, 저온난방에서는  $\Phi_{inj} = 240^\circ$ 에서 표준난방에서는  $\Phi_{inj} = 200^\circ$ 에서이다. 이러한 인젝션 포트 위치에서 저온난방 및 표준난방 능력은 기본설계에 대비하여 각각 14.06% 및 19.33% 향상 되었다.

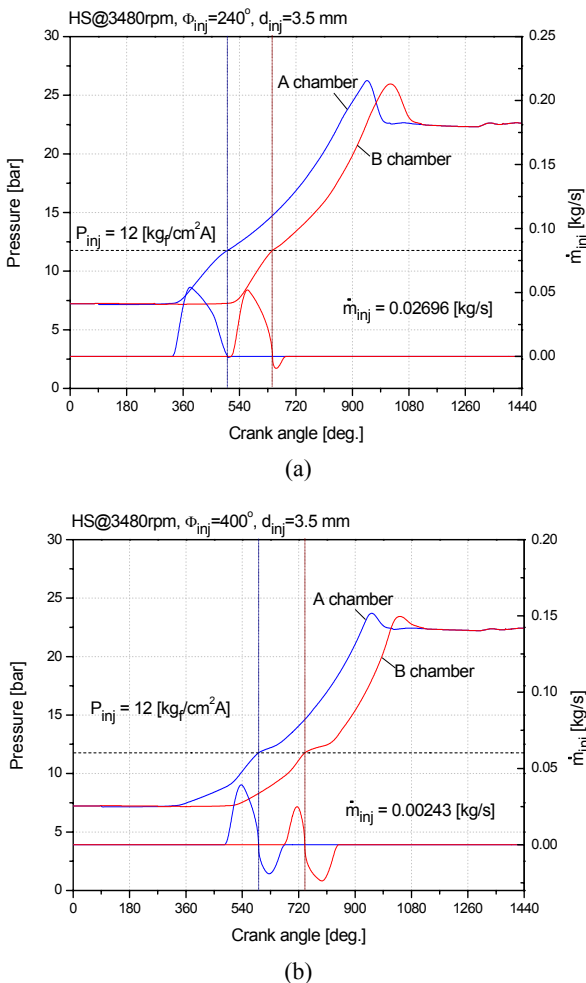


Fig. 6 Chamber pressure and injection mass flow rate : (a)  $\Phi_{inj} = 240^\circ$ , (b)  $\Phi_{inj} = 400^\circ$ .

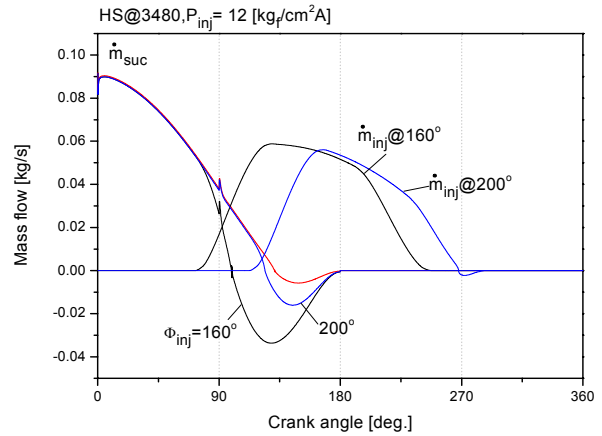


Fig. 7 Suction mass flow rate :  $\Phi_{inj} = 160^\circ$  vs.  $\Phi_{inj} = 200^\circ$ .

실지적인 역류 발생이  $\Phi_{inj} < 360^\circ$ 에 위치한 인젝션 포트가 아닌 더 작은 위치각에서 일어나는 것은 선회 스크롤이 선회 운동하면서 스크롤 랩으로 인젝션 포트를 덮는 크랭크 각도 구간이 존재하므로 역류를 발생시키는 시작이 지연되기 때문이다.

Fig. 7은  $\Phi_{inj} = 160^\circ$  및  $200^\circ$ 일 때, 흡입 과정에서 흡입실로부터 1A 체임버로의 흡입 유량과 인젝션 유량을 보여준다. 흡입 과정 후반에 역류 현상( $m_{suc,A} < 0$ )이 발생하는데,  $\Phi_{inj} = 200^\circ$  때보다  $\Phi_{inj} = 160^\circ$ 에서 더 크게 일어난다. 흡입실로부터 B 체임버로의 역류 현상도 이와 유사하다.

Fig. 5(d)에서 COP 향상 최대치는 저온 난방에서는  $\Phi_{inj} = 365^\circ$ , 표준난방에서는  $\Phi_{inj} = 280^\circ$ 에서 얻어진다. 이러한 인젝션 포트 위치에서 저온난방 및 표준난방에서 기본 모델 대비 각각 4.58% 및 1.42%의 COP 향상을 얻었다. 히트 펌프에서 가스 인젝션을 통해 달성하고자 하는 최우선 순위를 저온 난방에서의 난방능력 증대라고 한다면 현 스크롤 압축기 모델에서는 인젝션 포트의 위치를  $240^\circ$ 에 정하는 것이 가장 유리하다.

## 4.2 냉방성능

인젝션 포트의 직경은  $d_{inj} = 3.5$  mm에 고정하고, 포트 위치는 저온 난방 조건에서 가장 큰 난방 능력을 얻을 수 있는 조건인  $\Phi_{inj} = 240^\circ$ 와 일반적인 인젝션 포트 위치로 알려진 스크롤 랩이 닫힌 직후인  $\Phi_{inj} = 365^\circ$ 의 2곳의 경우에 대해 가스 인젝션이 냉방 성능에 미치는 영향을 계산하였다.

Fig. 8에 ARI 조건에서 인젝션 압력에 따른 인젝션 성능 변화를 나타내었다. Fig. 8(b)~Fig. 8(d)의 각 항목들은 모두 기본 모델(BM)에서  $P_{inj} = 16$  kg/cm<sup>2</sup>A 일

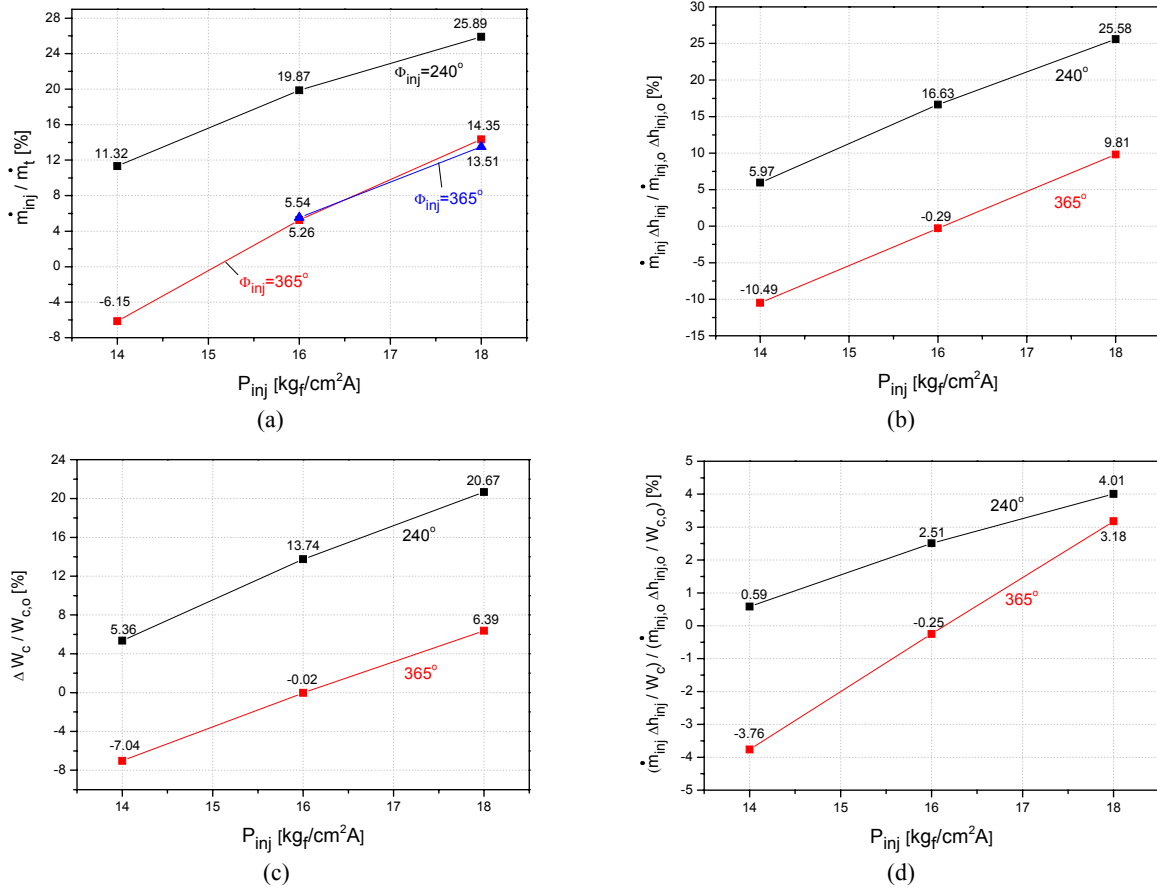


Fig. 8 Injection performance at cooling mode : (a) injection mass flow rate, (b) total mass flow rate, (c) compressor input, (d) COP-equivalent.

매의 인젝션 성능 값들을 기준한 증감분을 %로 나타낸 것이다. 즉,  $\dot{m}_{inj,0} \Delta h_{inj,0}$  은 기본모델에서 인젝션으로 인한 냉동 능력 향상분에 해당하고,  $\dot{m}_{inj} \Delta h_{inj}$  는 새로운 포트의 인젝션 냉방 능력 향상분을 나타낸다.

포트 위치가  $\Phi_{inj} = 240^\circ$  일 때가  $\Phi_{inj} = 365^\circ$  의 경우보다 더 우수한 성능을 보인다. 인젝션 압력이  $P_{inj} = 14 \sim 18 \text{ kgf/cm}^2 \text{A}$  로 증가함에 따라 냉방 능력은  $\Phi_{inj} = 365^\circ$  보다  $\Phi_{inj} = 240^\circ$  에서 기본모델 대비 15.77~16.46%의 증가를 보였고, COP 상승치는 0.83~4.35%의 증가를 보인다.

실제 사이클에서는 인젝션 압력에 제한이 따른다. 응축기 출구에서 인젝션 라인이 주 라인으로부터 분리되어 나가는데 인젝션 유량이 증가 할수록 인젝션 되는 냉매의 상태를 기상으로 만들어 주기위한 가열량이 점점 증가하고 이 가열량은 응축기 출구에서 메인 팽창 밸브로 향하는 주 냉매 라인과 열교환을 통해 얻는다. 이러한 열교환이 성립되려면 주 냉매 라인의 온도가 인젝션 라인의 온도보다 낮아서는 안되므로 이로

인해 인젝션 압력이 제한을 받게 된다.

## 5. 결론

히트 펌프용 비대칭 스크롤 압축기에서 가스 인젝션 성능 해석 프로그램을 활용하여, 인젝션 포트 기본 모델(직경 3 mm×2개,  $\Phi_{inj} = 365^\circ$ ) 대비 향상된 성능을 얻을 수 있는 인젝션 포트 설계를 수행함에 있어,

- (1) 인젝션 포트 직경을 3.0 mm에서 3.5 mm로 증가시키면 저온난방에서 난방능력은 4.36~16.06%, COP는 2.29~7.30%의 증가를 가져온다.
- (2) 인젝션 포트 위치에 대해서는, 난방 운전에서는 인젝션 포트 기본설계에 대비하여 저온난방에서는  $\Phi_{inj} = 240^\circ$  에서, 표준난방에서는  $\Phi_{inj} = 200^\circ$  에서 각각 14.06% 및 19.33%의 난방 능력이 향상 되었다. COP의 경우, 저온난방에서는  $\Phi_{inj} = 365^\circ$  에서, 표준난방에서는  $\Phi_{inj} = 280^\circ$  에서 기본 모델 대비 각각 4.58% 및 1.42%의 COP 향상을 얻었다.

- (3) 저온난방에서 최대 난방 능력을 얻을 수 있는 포트 설계안인  $\Phi_{inj} = 240^\circ$ 의 경우, ARI 조건에서 인젝션 압력  $P_{inj} = 16 \text{ kg/cm}^2\text{A}$ 에서 난방 능력은 기본 모델 대비 16.92%의 증가를 보였고, COP는 2.76%의 증가를 보였다.

## References

1. Beeton, W. L. and Pham, H. M., 2003, Vapor-injected scroll compressor, ASHRAE Journal, Vol. 45, pp. 22-27.
2. Xu, X., Hwang, Y., and Radermacher, R., 2011, Refrigerant injection for heat pumping/air conditioning systems : Literature review and challenges discussions, International J. of Refrigeration, Vol. 34, pp. 402-415.
3. Masatsugu, J., 2006, Scroll compressor and Refrigeration Cycle Using the Same, JP-P-2006-00285659.
4. Lifson, A., 2005, Novel vapor injection method for scroll compressors, Inter. Conf. on Compressors and their Systems, City University, London, pp. 381-390.