

# 냉매 인젝션 기술을 이용한 히트펌프의 성능향상 기술

노철우

서울대학교 냉동시스템 및 콘트롤 실험실(rohchulwoo@gmail.com)

## 서론

냉매 인젝션 기술을 히트펌프 시스템에 도입하여 성능향상을 위한 기술 개발을 진행함에 있어, 크게 두 가지의 접근 방식, 즉 히트펌프 사이클 측면에서의 접근과 히트펌프 시스템 내 부품 측면에서의 연구가 수행되었다.

사이클 측면에서의 냉매 인젝션 개념은 증기냉매 인젝션 사이클을 중심으로, 멀티 히트펌프 시스템 등에서 주로 이용될 수 있는 이단팽창 VI 사이클의 중간압이 난방성능에 미치는 영향을 집중적으로 분석하였다.

기본적으로 VI 사이클은 한랭지역이나 열대지역 등과 같이 히트펌프가 좋은 성능을 내기 어려운 환경에서 널리 사용되는 기술로서, 응축기 출구측 냉매를 일부 분리하여 플래시탱크나 내부열교환기를 통해 증기냉매를 압축기의 인젝션 포트에 주입하는 방법으로 구현된다. VI 사이클은 한랭지역이나 열대지역에서와 같이 압축 효율과 냉매 유량이 감소하는 히트펌프의 특성을 보완해주는 기술로, 최근 들어서는 특히 저외기온 한랭지향 히트펌프에 주로 이용되고 있다. 증기 냉매를 압축기 인젝션 포트에 공급함으로써 압축기 효율을 향상시키고, 응축기 측 냉매 유량을 증가시킴으로써 응축기

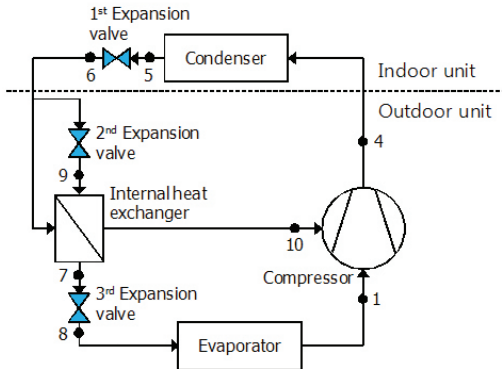
용량을 증가시키는 VI 사이클은 내부열교환기에서 응축기 토출측 냉매의 과냉도를 더욱 확보할 수 있기 때문에, 증발기 측 용량 또한 증가시킨다.

VI 사이클은 특히 외기온이 영하 이하인 저온 영역에서 그 효과가 두드러지는데, 이는 외기온이 떨어짐에 따라 압축기 효율이 감소하고 냉매 유량이 감소함에 따라 용량과 COP가 감소하는 히트펌프 사이클의 취약점을 VI 기술이 적절하게 보완해 줄 수 있기 때문이다.

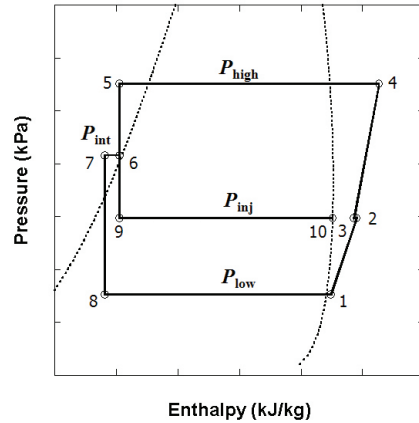
## 이단팽창 VI 사이클의 중간압(P<sub>int</sub>)이 성능에 미치는 영향

그림 1은 이단팽창 VI 사이클의 개념도이다. 멀티 히트펌프 시스템은 2개 이상의 응축기가 설치되므로, 각 실내기의 냉매유량을 제어하기 위해 응축기 출구측에 팽창밸브(EXV)가 설치되고 이로 인해 중간압 개념인 P<sub>int</sub>가 등장하게 된다. 그림 2는 인젝션 압력(P<sub>inj</sub>)과 중간압(P<sub>int</sub>)이 존재하는 이단팽창 VI 사이클의 압력-엔탈피 선도를 보여주고 있다. 멀티 히트펌프에서는 통상적인 VI 사이클에서는 볼 수 없는 P<sub>int</sub>가 존재하게 되고, 이로 인해 시스템 성능이 영향을 받는다.

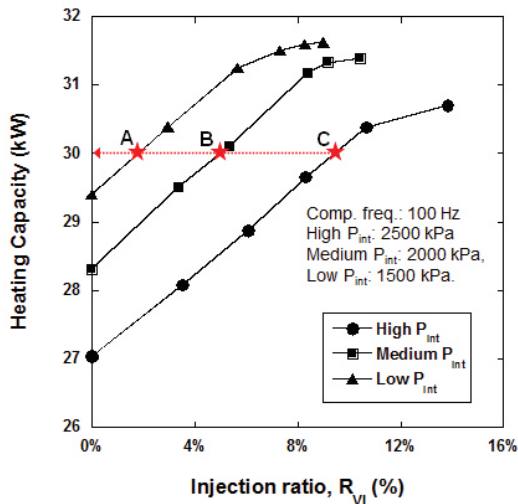
그림 3은 중간압의 변화에 따른 난방용량의 변



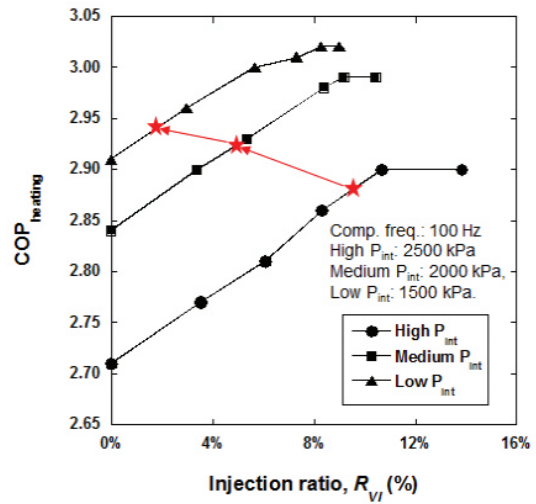
[그림 1] 이단팽창 Vapor-injection 사이클



[그림 2] 이단팽창 VI 사이클의 압력-엔탈피 선도



[그림 3] 중간압( $P_{int}$ )변화에 따른 난방용량 변화



[그림 4] 중간압( $P_{int}$ )변화에 따른 COP변화

화를 보여주고 있다. 이단팽창 VI 시스템은 injection ratio (RVI)를 제어함으로써 난방용량을 조절할 수 있으나,  $P_{int}$ 를 변화시켜 난방용량을 조절할 수도 있다. 따라서, 그림 3에서와 같이 A, B, 그리고 C의 운전전략을 서로 다르게 구사하면서 난방용량인 30 kW를 공급할 수 있다. 재밌는 점은, 이 세 개의 운전 전략에서 COP (Coefficient of Performance)가 서로 다르기 때문에, 그림 4의 경우처럼 운전전략 A를 선택하여 높은 COP로 운전하는 방식이 선호될 수 있다. 그러나 중간압( $P_{int}$ )을 높여 운전함으로써,

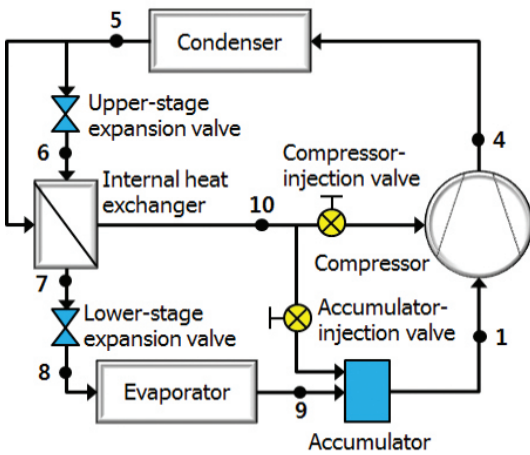
injection ratio를 통해 난방용량을 폭넓게 조절할 수 있는 VI 사이클 본래 장점이 감소하므로, 시스템의 목적을 고려한 운전전략의 신중한 선택이 필요하다. 따라서 압축기 주파수 및 필요난방 부하에 따라 ‘부하중심 운전’ 또는 ‘효율중심 운전’으로 분리하여 운전하는 시스템 운전전략의 고도화가 필요함을 알 수 있다.

### 어류물레이터 VI를 이용한 기존 압축기에서의 VI 사이클 응용

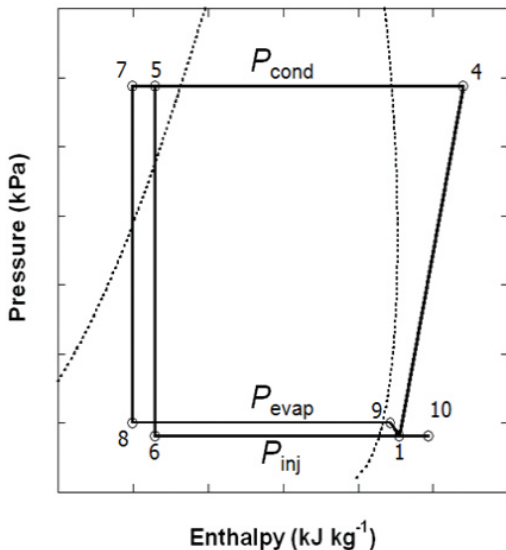
압축기가 아닌 어큐플레이터로 냉매를 인젝션하여 극한 한랭 상황에서, 토출 냉매 온도를 낮춰 시스템을 보호하고, 과냉도의 추가 확보 및 응축기 측 냉매 유량의 일정한 증대를 통한 성능 향상 결과를 얻을 수 있다. 특히, 본 연구에서는 VI 사이클에 특화된 고가의 압축기를 사용하지 않아도, VI의 일부 사이클 적 장점을 기존 압축기에서도 유사하게 사용할 수 있음을 확인하는 데 의의를 두었다. 어큐플레이터로 인젝션한 냉매는 기존 증발기 측 냉매

유량을 대체하는 특성이 있는데, 이는 기존 VI 사이클에서 볼 수 없던 현상이고, 시스템 설계 시 반드시 고려해야 할 요소이다.

그림 5는 어큐플레이터에 vapor-injection이 가능한 히트펌프의 개략도를 보여주고 있으며, 그림 6은 Accumulator-vapor-injection이 수행되는 히트펌프 사이클의 압력-엔탈피 선도를 보여주고 있다. 특징적인 점은 인젝션 압력( $P_{inj}$ )이 기존 VI 사이클과는 달리, 증발기 압력보다 낮아질 수 있다는 점이다. 이로 인해 응축기 측 과냉도를 기존 VI보다 더욱 낮출 수 있으나, 증발기 측 유량이 인젝션 유량으로 대체되는 측면이 동시에 존재한다. 따라서, Accumulator-VI 사이클은 기존 VI 사이클의 일부 장점(압축기 토출 온도 감소, 저외기온 운전 상황에서 성능 향상 등)을 인젝션 포트가 없는 압축기에 전용(轉用)할 수 있으나, 인젝션 유량이 증발기 측 유량을 대체함으로써 성능이 낮아질 수 있음을 고려하여 적정하게 사용되어야 한다.



[그림 5] Accumulator-VI 히트펌프

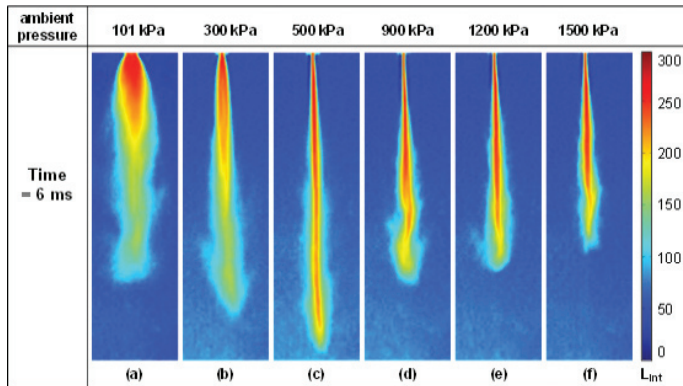


[그림 6] Accumulator-VI 사이클의 압력-엔탈피 선도

### 인젝터를 이용한 팽창과정에서의 냉매 물질 전달 특성

내연기관 및 로켓 분야 등 연소 분야에서 널리 이용되고 있는 인젝터를 히트펌프 사이클 및 시스템에 적용할 수 있다. 해당 연구는 히트펌프 시스템 및 산업계에서 인젝터를 세계 최초로 적용한 사례이다. 인젝터와 냉매의 기초연구 측면에서, 대표적인 공조용 냉매인 R22와 R410A의 특정 압력 분위기 내 인젝션 형상, 미립화 특성, 관통 특성 등을 초고속 카메라로 촬영하여 표면장력, 점도, 밀도, 건도 데이터를 기반으로 분석하였다. R22와 R410A의 인젝션 이미지 분석을 통해, 팽창과정의 냉매 물질 전달의 새로운 이해의 관점을 제시하고 있으며, 나아가 열교환기 최적설계방향 등에 대한 제안 또한 가능하다고 판단된다.

그림 7은 R22 냉매가 3000 kPa에서 500 kPa로



[그림 7] Spray images of R22 according to ambient pressures ( $P_{inj}=3000$  kPa)

팽창할 때 가장 빠른 침투속도를 갖는 것을 보여주고 있는데, 일반적으로 R22 시스템이 500 kPa의 증발압에서 운전될 때 COP가 상대적으로 높게 나오는 특성과 깊은 상관관계가 있을 것으로 예측된다. 특히, 냉매의 열전달 특성뿐만 아니라, 물질전달 특성은 시스템 내 냉매 유동에서 발생하는 비가역성의 증가와 밀접히 연관되어 있기 때문에 그림 7과 같은 냉매 유동 image visualization은 향후 히트펌프 사이클의 성능향상은 물론 냉매유동에 대한 실질적인 인사이트를 제공하는데 기초자료로 활용될 수 있다.

### 참고문헌

1. Roh, C.W. and Kim, M.S., 2011, International

Journal of Refrigeration, Comparison of the heating performance of an inverter-driven heat pump system using R410A vapor-injection into accumulator and compressor.

2. Roh, C.W. and Kim, M.S., 2011, International Journal of Refrigeration, Effects of intermediate pressure on the heating performance of a heat pump system using R410A vapor-injection technique.

3. Roh, C.W. and Kim, M.S., 2012, International Journal of Heat and Mass Transfer, Macroscopic spray behavior and atomization characteristics of refrigerant R22 injection under increased ambient pressure 