

저부하 조건에서 열쾌적성 개선을 위한 히트펌프 증발압력 제어

박영성

경동나비엔 신재생 시스템 연구소
(park.y.s@kdiwin.com)

서론

히트펌프는 냉난방이 모두 가능하여 설치 공간의 축소 및 비용 절약적인 장점이 있어 널리 사용되고 있으며 다양한 연구개발이 이루어지고 있다. 히트펌프 관련 연구는 에너지 효율 향상에 관심을 두고 진행되어 왔다.^{1,2)} 근래에는 히트펌프의 설계 시 에너지 절약뿐만 아니라 실내공간의 쾌적성까지 고려하고 있다.³⁾

히트펌프 시스템의 에너지 효율을 높이고 재실자의 쾌적성을 높이기 위해서는 히트펌프의 증발압력을 부하에 맞게 적절히 제어해야 한다. 효과적인 증발압력 제어를 위해서는 시스템의 상태를 판별하기 위한 변수의 검출이 필요하다. 기존에는 시스템의 상태를 판별하기 위하여 압축기 입·출구에서의 냉매 온도, 냉매의 증발온도, 그리고 응축 온도 등의 온도 변수를 측정하고, 이를 이용하여 흡입 가열도를 제어함으로써 증발압력을 제어하였다. 하지만 이러한 온도 변수들은 실외 및 실내 온도 변화에 따라 민감하게 변하여 부하 변동이 심한 경우에는 신속한 증발압력의 제어가 어려웠다. 온

도이용증발압력제어(EPCT)방법의 단점을 보완하고 효율적인 증발압력의 제어를 위해 압력이용증발압력제어(EPCP)방법을 개발하였다.

본 논문에서는 EPCP방법을 제안하고 EPCP방법으로 제어되는 히트펌프의 성능을 보고한다. 그리고 각각 EPCT방법과 EPCP방법을 이용하여 가동되는 히트펌프의 성능 변화를 비교하고 분석하고자 한다.

히트펌프 제어방법

증발압력은 압축기 속도의 영향을 크게 받으므로 압축기 운전 주파수의 제어가 중요하다. 압축기는 실내의 온도 및 설정온도와 실내 온도의 차이에 따라 초기 운전 주파수가 결정된다. 초기 운전 주파수로 동작하여 시간이 지나면 실내 온도가 설정 온도에 근접하면서 냉방부하가 감소한다. 냉방부하가 감소함에 따라 압축기의 목표 주파수를 변경하여 증발압력을 제어함으로써 실내 온도가 설정 온도에 안정적으로 도달하도록 한다.

부하 계산부에서는 압축기 운전 주파수를 결정

하기 위한 실내부하의 감소 정도를 감지한다. 실내 부하는 다음의 과정으로 계산된다. 제어하고자 하는 실내공기 온도($T_{i,air}$)를 측정하고 이를 설정온도 ($T_{i,target}$)와 비교하여 오차($e(t)$)를 계산한다. 이 오차의 크기에 비례하는 비례값($K_p e(t)$)과 시간에 따른 오차의 변화율($K_D de(t)/dt$)을 고려하여 부하를 계산한다. 여기에 실내외 온도에 따른 보정값 ($F(T_i, T_o)$)을 산정하여 식 (1)과 같이 실내부하(L)를 계산한다.

$$L = (K_p e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt}) \times F(T_i, T_o) \quad (1)$$

부하가 감소함에 따라 압축기의 주파수를 저감함으로써 증발압력을 조절한다. 식 (1)로 실내부하 (L)가 계산되면 이에 해당하는 보정값($G(L)$)이 결정된다. 최종적으로 압축기 주파수($f_{comp,n}$)의 결정은 식 (2)로 표현된다.

$$f_{comp,n} = f_{comp,n-1} \times G(L) \quad (2)$$

압축기의 현재 운전 주파수($f_{comp,n}$)의 결정은 이전 운전 주파수($f_{comp,n-1}$)에 실내부하에 대한 보정값 ($G(L)$)을 곱하여 결정한다. 압축기 주파수는 설정 온도와 실내 온도의 차가 클수록 고속으로 기동함으로써 낮은 증발압력을 유지한다. 압축기의 고속 운전에 따라 실내부하가 감소되면 주파수를 낮춰 저속으로 운전함으로써 부하에 맞는 최적의 증발압력으로 제어한다.

효과적인 증발압력 제어를 위해서는 시스템의 상태를 파악하기 위한 변수의 검출이 필요하다. 시스템의 상태 변화를 정확하게 나타내는 변수를 검출 대상으로 선택하여 시스템 정보를 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 기존에는 이러한 변수로서 압축기 입·출구에서의 냉매 온도, 응축기 온도, 증발기 온도 등의 온도를 변수로 선택하여 증발압

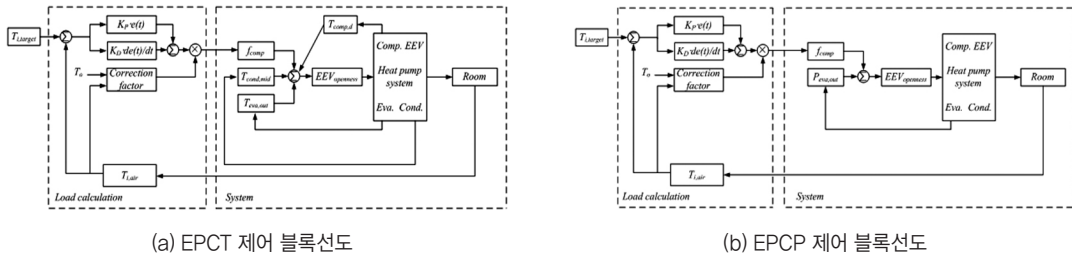
력을 제어하였다. 그림1 (a)에 EPCT방법을 이용하여 히트펌프를 제어하기 위한 블록선도를 나타낸다. 앞서 언급한 변수 중에서 압축기 출구 온도는 압축기의 주파수와 팽창밸브 개도 변화에 대해 안정적인 동특성을 보일 뿐 아니라 냉방 용량과 깊은 관계를 보여 최적 운전을 위한 제어 변수로 사용되었다. 실험을 통하여 시스템의 효율이 가장 좋은 상태에서의 변수들과 압축기 운전 주파수, 팽창밸브의 개도량에 대한 상관관계를 구하였다.

응축기의 중간온도($T_{cond,mid}$) 증발기 출구 냉매 온도($T_{eva,out}$)에 따라 EEV 개도량($EEV_{openess}$)을 조절하여 압축기의 토출 냉매 온도($T_{comp,d}$)를 목표 수준으로 제어함으로써 시스템을 효율적으로 제어하였다. 이 관계는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{comp,d} = C_0 + C_1 \times T_{eva,out} + C_2 \times T_{cond,mid} + C_3 \times f_{comp} \quad (3)$$

식 (3)은 냉방 운전에서 압축기 운전 주파수(f_{comp}), 응축기의 중간온도($T_{cond,mid}$) 및 증발기 출구의 냉매 온도($T_{eva,out}$) 변화에 대해 최적 압축기 토출 냉매 온도($T_{comp,d}$)를 정의한 식이다. 즉, 온도를 측정하여 압축기 토출 냉매 온도를 목표수준으로 제어함으로써 증발압력을 제어하는 것이다. 이러한 온도가 용증발압력제어방법은 온도센서의 값이 싸서 널리 이용되어 왔다.

PCT제어방법으로 증발압력을 제어하기 위해서는 각각의 온도 변수들을 읽어서 제어값을 결정한다. 그런데 각 위치에서의 온도는 관벽에 설치한 열전대를 이용하여 측정한다. 관 외벽에서 측정된 온도는 냉매의 상태를 지칭하는데 오차를 유발할 수 있다. 또한, 부하 변동이 심한 환경에서는 그 오차가 더 커지는 단점이 있다. 신속하고 정확한 증발압력의 제어를 위해서는 시스템에 미치는 영향을 고려하여 제어 인자를 최소화하는 것이 중요하다. 이 문제를 해결하기 위해 증발기 출구 측



[그림 1] 히트펌프 제어 블록선도

의 압력($P_{eva,out}$)을 직접 측정하여 이용한다(EPCP, evaporation pressure control based on evaporator exit pressure reading). 압력이용증발압력제어방법(EPCP)을 그림 1 (b)에 블록선도로 나타냈다. 그림 1 (a)의 EPCP방법과 비교하여 제어 흐름이 간단해졌다. EPCP방법의 가장 큰 장점은 압력센서를 이용해 증발압력 정보를 직접적으로 얻는 것이다. 따라서 EPCP방법을 이용한다면 약간의 계산이나 데이터를 받는 것으로도 시스템 변화를 고려한 최적화된 증발압력의 제어가 가능할 것이다.

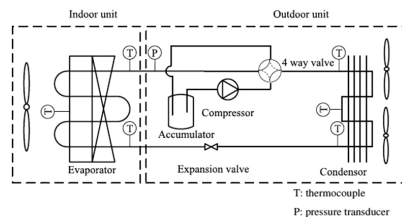
실험장치 및 실험 방법

본 연구에 사용된 히트펌프는 실내기와 실외기로 구성되어 있다. 그림 2는 실험에 사용된 인버터 히트 펌프의 냉매 순환회로를 나타내고 있다. 실내부는 열교환기, 송풍용 팬으로 구성되어 있으며 실외부는 열교환기와 팽창장치, 압축기, 4방향밸브 및 어큐뮬레이터 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 인버터 주파수로 용량 조절이 가능한 트윈로터리 압축기를 사용하였다. 냉매는 R-410a를 사용했다.

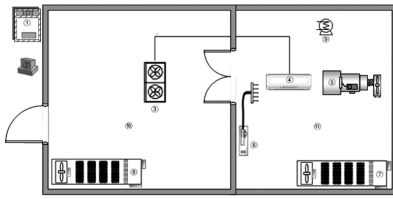
냉매의 온도 측정은 배관 표면에 T형 열전대를 부착하고 단열한 후 측정하였다. 오차범위는 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 이다. 증발기 출구 측에 압력센서를 설치하여 압력을 측정하였다. 압력센서의 측정 범위는 $0.7\sim 4.5\text{ MPa}$ 이며 EPCP방법에서 시스템의 현재

증발압력을 읽는 데 사용된다. 히트펌프는 그림 3과 같이 실내부와 실외부로 구성된 칼로리미터에 설치하여 실험을 수행하였다. 실험을 시작하기 전에 실내부와 실외부의 온도 및 습도를 표 1과 같이 에어컨의 성능 측정을 위한 Korean Standard(KS C9306)⁴⁾의 운전조건으로 조절했다. 히트펌프가 운전을 시작한 후에는 실내부의 온도조절기를 정지시키고 실내 온도의 변화를 측정하였다. 이때 실외부는 실험이 진행되는 동안 설정온도 35°C 를 유지한다. 실내공기 온도 변화는 에어샘플러를 이용하여 측정하였고, 실내기의 토출 측은 code tester에 연결하여 실내기 토출 공기 온도 및 풍량을 측정하였다.

저부하 조건에서의 냉방부하를 모사하기 위해 실내에 전기히터를 설치하였다. 전기히터를 이용하여 히트펌프의 최대 냉방 용량(15 kw)의 15%인 2.2 kw의 열부하를 지속적으로 공급하였다. 표 2는 실험에 사용된 변수들의 제어 범위를 나타낸다. 실내공간의 설정온도($T_{i,target}$)는 $20, 22^{\circ}\text{C}$ 로 변경하며 실험을 수행하였다.

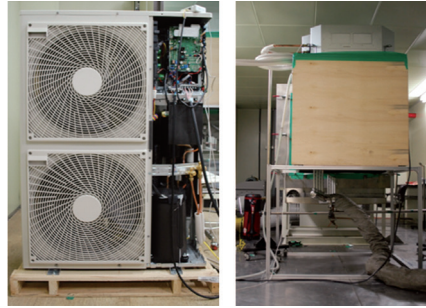


[그림 2] 히트펌프 시스템 개략도



- ① Control panel ② Data acquisition system ③ Outdoor unit
- ④ Indoor unit ⑤ Code tester ⑥ Air sampler
- ⑦ Air handling unit ⑧ Air handling unit ⑨ Electric heater
- ⑩ Outdoor chamber ⑪ Indoor chamber

(a) 칼로리미터 개략도



(b) 히트펌프 시스템

[그림 3] 실험 장치

[표 1] 히트펌프 운전조건(KS C9306)

Test condition	Indoor temperature	Outdoor temperature
Cooling condition(°C)	DB:27	DB:35
	WB:19	WB:24

[표 2] 히트펌프 제어 변수 및 운전 범위

Target temperature(°C)	variation	
	Compressor frequency (Hz)	Evaporation pressure control point ($\Delta T(^{\circ}C)$)
20	20	0
	22	1
22	24	
	26	2

실험 결과 및 고찰

압축기 주파수 변화에 따른 시스템 성능

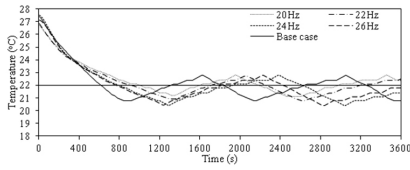
실내 온도가 설정온도에 근접하면 실내 온도를 설정온도에 안정적으로 수렴시키기 위하여 압축기 주파수를 낮은 값으로 변경시킨다.

그림 4는 실내공기의 목표 온도($T_{i,target}$)가 22°C 일 때 압축기의 주파수 변경에 따른 실내 온도의 변화와 소비전력의 변화를 나타낸다. 압축기는 초기에 60 Hz로 운전되다가 실내 온도가 24°C에 도달하면($\Delta T=2^{\circ}C$) 주파수를 20, 22, 24, 혹은 26 Hz로 변경하여 운전한다. 압축기의 주파수를 초기 주

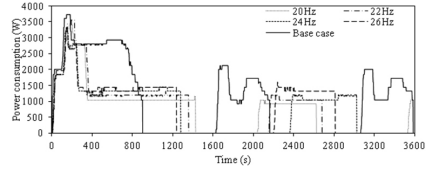
파수 60 Hz로 고정하고 계속 운전하는 base case와 비교하여, 주파수가 낮아질수록 온도 강하 기울기가 감소해 설정온도까지 도달하는데 시간이 길어졌다. Base case의 경우 674초로 가장 빠른 시간에 설정온도에 도달하지만, 과잉냉방으로 인하여 실내 온도를 설정온도 이하까지 급격히 낮춘다. 이후 온-오프 동작을 반복해 설정온도를 맞추게 된다. 주파수를 제어하면 base case에 비해 상대적으로 적은 횟수로 온-오프 운전을 반복한다. 주파수 제어를 하는 경우 압축기 주파수는 base case보다 낮은 주파수에서 운전되므로, 에너지 소비도 낮은 수준으로 나타난다. 실내 온도의 안정성을 비교하기 위하여 comfortable period ratio를 정의하였다. Comfortable period ratio는 전체 가동 시간 동안 실내 공기 온도가 설정온도의 이내로 유지되는 시간의 비로 정의된다. 압축기의 주파수를 20 Hz로 제어했을 때 comfortable period ratio는 82.4%로 가장 높게 나타났다. 평균 소비전력은 압축기의 주파수를 제어하였을 때 base case보다 최소 20%에서 최대 30% 가량 감소되었다.

증발압력 제어 지점의 영향

어느 온도까지 낮은 증발압력을 유지할 것인지 결정하기 위해 설정온도와 실내 온도의 차이 ΔT 를 0, 1, 2°C 3가지로 나누어 실험하였다. 실내 온도



(a) 실내 온도



(b) 소비전력

[그림 4] Response to compressor frequency change ($T_{i,target} = 22^{\circ}\text{C}$)

가 각 설정온도 차(ΔT)에 도달하였을 때 증발압력을 변화시키고 시스템의 성능 특성을 확인하였다.

그림 5는 실내공기의 목표 온도가 20°C 일 때 증발압력의 변화, 그리고 증발압력 제어 지점에 따른 실내 온도의 변화 및 소비전력의 변화를 나타낸다.

히트펌프는 초기에 낮은 증발압력으로 운전되어 실내 온도가 빠르게 감소하다가 22°C ($\Delta T = 2^{\circ}\text{C}$), 21°C ($\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$), 그리고 20°C ($\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$)에 도달하면 압축기를 최저 주파수인 20 Hz로 운전하여 증발압력을 증가시켰다. 실내 온도 20°C ($\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$)에서 증발압력을 증가시킨 경우에는 증발압력을 증가시켰음에도 불구하고 실내 공기 온도는 설정온도 이하까지 급격히 냉각된다. 이후 온-오프 동작을 반복해 설정온도를 맞추게 된다. 실내 온도 22°C ($\Delta T = 2^{\circ}\text{C}$), 21°C ($\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$)에서 증발압력을 증가시키면 설정온도 도달시간은 늦어지지만, 실내 공기 온도가 큰 변동 없이 안정적으로 설정온도로 유지된다.

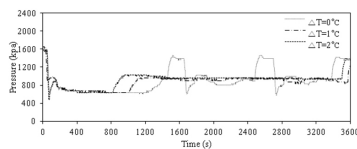
실내 온도 20°C ($\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$)에서 증발압력을 증가시킨 경우에만 온-오프 운전을 반복한다. 압축기가 정지했을 때는 소비전력이 '0'이 되지만, 압축기의 재기동 시에는 소비전력이 높은 수준으로 나

타난다. 실내 온도 21°C ($\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$), 실내 온도 22°C ($\Delta T = 2^{\circ}\text{C}$)에서 증발압력을 증가시키면 압축기는 저주파수로 연속 운전하여 소비전력은 낮은 수준으로 나타난다.

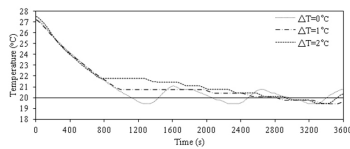
EPCP와 EPCT의 비교

앞선 실험 결과를 기초로 하여 EPCP방법에 적용하였다. 동일한 환경조건에서 EPCP방법과 EPCT방법으로 히트펌프를 운전하여 시스템 성능을 측정, 비교 분석했다.

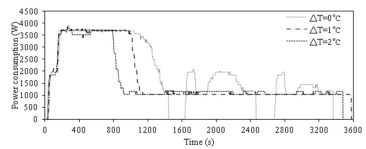
그림 6 (a)는 실내 온도의 목표 온도($T_{i,target}$)가 20°C 일 때 증발압력 제어방법에 따른 실내 온도 변화를 나타낸다. EPCT방법으로 히트펌프를 운전한 경우 실내 공기 온도는 설정온도보다 높은 온도를 유지한다. 반면 EPCP방법으로 운전한 경우 실내 공기 온도는 설정온도에 안정적으로 수렴함을 알 수 있다. 그림 6 (b)는 소비전력의 변화를 보여주고 있다. EPCP방법으로 제어한 경우의 냉방 운전 초기 에너지 소비는 EPCT방법보다 작았다. 하지만 실내 온도가 설정온도에 근접하였을 때는 EPCT방법으로 운전한 경우보다 높게 나타난다. 이는 EPCT방법으로 제어된 증발압력이 EPCP



(a) 증발압력

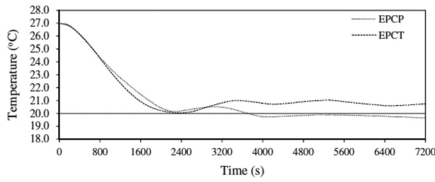


(b) 실내 온도

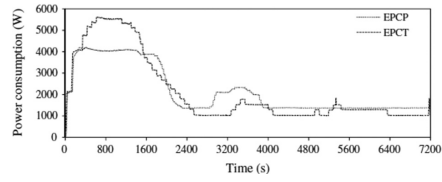


(c) 소비전력

[그림 5] 증발압력 제어 지점 변화에 따른 시스템 응답 ($T_{i,target} = 20^{\circ}\text{C}$)



(a)실내 온도



(b)소비전력

[그림 6] 히트펌프 제어방법에 따른 시스템 응답 ($T_{i,target} = 20^{\circ}\text{C}$)

방법으로 제어된 증발압력보다 높게 제어됨으로써 나타난 결과이다. 한편, 저부하 조건에서 운전되는 동안, EPCT방법으로 제어되는 경우엔 에너지 소비의 변동이 발생하지만 EPCP방법으로 제어되는 경우, 변동이 최소화되어 일정하게 유지되었다. Comfortable period ratio는 EPCP방법으로 운전하였을 때 70.0%로 높게 나타났고, EPCT방법은 15.7%로 낮게 나타났다. 이를 통해 EPCP방법으로 제어하는 경우가 부하 추종 운전(load-following operation)에 효과적임을 알 수 있다. 평균 소비전력은 EPCP방법으로 운전한 경우 2157 W, EPCT방법으로 운전한 경우 2140 W로 나타났다. 평균 소비전력은 EPCT방법으로 운전하였을 때 더 낮게 나타났지만, 그 차이가 0.8%로 무시할 만큼 작았다. 그리고 EPCT방법으로 제어 시 실내공기 온도가 설정온도보다 높게 유지되었는데 EPCP방법으로 제어했을 때의 실내 온도 수준으로 제어하기 위해서는 증발압력을 더 낮추어야 한다. 이 차이를 반영하여 소비전력을 계산한다면 EPCP방법으로 제어한 경우의 소비전력이 더 낮게 나타날 것으로 예상된다.

결론

본 연구에서는 압력이용증발압력제어방법(EPCP)을 제안하고 EPCP방법에 대한 평가와 히트펌프에 적용하기 위한 최적화 연구를 진행하였다. 냉방조

건에서 인버터 히트펌프의 설정온도 추종 성능 향상 및 절전 성능을 최적화하기 위한 실험을 실시하여 비교 분석함으로써 새로운 제어방법의 개발에 필요한 조건을 정리하였다. 실험 결과를 바탕으로 EPCP방법에 적용하여 기존의 EPCT방법과 비교하였다. 새로운 EPCP방법은 실내공기 온도의 설정온도 추종 성능을 개선하고, 전력소비를 줄일 수 있는 가능성을 보여주었다.

참고문헌

1. Tassou, S.A., Marquand, C.J., and Wilson, D.R., 1983, Comparison of the performance of capacity controlled and conventional on-off controlled heat pumps, Applied Energy, Vol. 14, pp. 241-256.
2. Chang, S.D., Shim, M.S., and Cho, K.S., 2001, The control method for inverter driven multi heat pump, SAREK summer annual Conf., pp. 812-816.
3. Park, Y.S., Jeong, J.H., and Ahn, B.H., 2014, Heat pump control method based on direct measurement of evaporation pressure to improve energy efficiency and indoor air temperature at low cooling load condition, Applied energy, Vol. 132, pp. 99-107.
4. KS C 9306, 1999, Air conditioners, Korean Agency for Technology and Standards. 