

# 공기열원 고효율 히트펌프 냉온수기 기술

가스 및 전기보일러를 대체하기 위한 공기열원 히트펌프 냉온수기의 주요기술들을 소개하고자 한다.

온수 냉난방 및 급탕을 목적으로 하는 공기열원 히트펌프 냉온수기는 효율이 높고 CO<sub>2</sub> 배출량 저감 효과도 뛰어나 전기온수기와 가스보일러의 대안으로 부각되고 있다. 냉온수 냉난방 및 급탕을 목적으로 하는 공기열원 히트펌프를 ‘ATW-HP (Air-to-Water Heat Pump)’라 한다. ATW-HP는 2005년 무렵부터 일본, 유럽 및 중국 시장을 중심으로 전기온수기 및 가스보일러를 대체하며 급성장하여 현재는 시장 규모가 연간 5조 원 이상이다. 높은 초기투자비에도 불구하고 ATW-HP가 성장할 수 있었던 이유는 보일러 대비 3배 이상 높은 효율에 따른 절전 효과로 소비자에게 제공하는 낮은 운전비용과 CO<sub>2</sub> 배출량 저감 효과에 의한 친환경성, 이로 인한 정부의 각종 인센티브 등이 있었다. 하지만 좀 더 보급을 활성화하기 위해서는 외기 온도가 낮아져도 효율과 능력을 확보할 수 있는 고효율/고온출수 능력을 갖추어야 한다. 이를 위한 가장 중요한 기술로 고속 인버터 압축기 적용 기술, 캐스케이드 사이클 기술 등을 들 수 있다. 이러한 고효율 히트펌프 냉온수기에 적용된 기술적 특성을 간략하게 소개하고자 한다.

## 고효율 고온출수 히트펌프 기술의 필요성

많은 장점에도 불구하고, ATW-HP가 전기온수기와 가스보일러를 완벽히 대체하기 위해서는 고온출수 온도, 부하에 대한 신속한 대응, 저외기온에서 효율저하 최소화를 이루어야 한다. 한편, ATW-HP는 공조실내기 난방에 비해 불리한데 그 이유는 부하 측 실내기의 열 전달 방식 차이에 있다. 공랭식 히트펌프 시스템 팬을 이용하는 실내

박노마

LG전자 CTO HAE 연구소

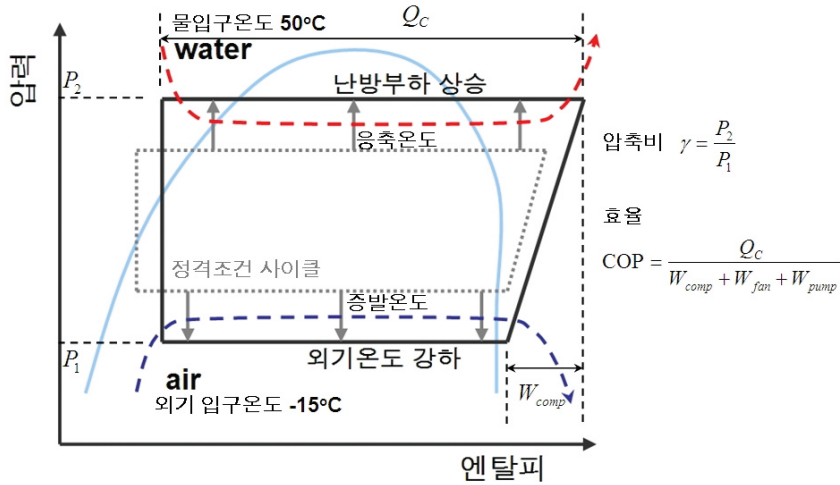
책임연구원

noma.park@lge.com

신정섭

수석연구원

jeongseob.shin@lge.com



[그림 1] 난방/급탕 부하증가에 따른 AWT-HP 사이클의 물리에 선도 변화 (R410A 사이클)

공기 순환 강제 대류 열전달방식의 공간 난방방식인데 비하여, ATW-HP에서는 부하 측 실내기가 라디에이터나 바닥 패널이므로, 주로 자연대류와 복사의 형태로 열전달이 이루어진다. 따라서 강제 대류에 비해 부하 대응 응답특성이 저하하는 단점이 있다. 즉 ATW-HP에서 외기온도별로 응답특성 개선은 성능특성 개선과 타제품(보일러, EHP 등) 대비 성능 경쟁력 강화를 위하여 매우 중요하다. 응답 특성을 개선하기 위해서는 출수온도를 높이는 것이 응답시간을 단축하는 가장 좋은 방법이다. 실제로 전열면적이 좁은 라디에이터나 고밀도 마감재를 통과해야 하는 바닥난방의 경우, 흔히 출수온도를 70°C 이상으로 운전한다. 라디에이터나 바닥난방과 마찬가지로, 축열식 난방/급탕운전에서도 저탕조의 사이즈가 고정되어 있으므로 부하가 커질수록 고온 축열이 필요하게 된다.

일반적으로 낮은 외기온도와 난방/급탕 부하증가는 상호비례관계에 있다. 그림 1과 같이 외기온도가 떨어질수록 사이클의 증발온도는 낮아지고 응축온도는 높아지게 되므로, 시스템의 효율

이 낮아지게 된다. 뿐만 아니라, 현재 대부분 히트펌프 시스템의 주력 냉매인 R410A는 임계온도가 72°C이므로 70°C 이상의 고온출수를 하기에 근본적인 제한이 따른다. 실제 운전에서는 압축기의 보호와 오일탄화를 방지하기 위해 고저압 압축비, 토출온도 및 소비전력의 제한 제어가 가동되므로, 출수 가능 온도는 이보다도 떨어진다.

예를 들어 외기온도를 영하 15°C, 입구온도를 50°C라고 가정하면 고저압 압축비를 10에 가깝게 올리고 압축기 토출 냉매온도가 110°C 전후로 높여야 하는데, 대부분 압축기가 감당하기에는 압축비와 토출 온도가 지나치게 높아서 신뢰성을 보장할 수 없다. 이때의 능력치는 정격의 60% 이하이고 COP는 1.5 수준에 머무르게 되므로, 가스난방에 비해 효율의 우위를 주장하기 어렵다. 따라서, 주 난방기로서 ATW-HP의 시장을 확대하려면 효율이 높고 70°C 이상의 고온출수가 가능한 제품이 반드시 필요하다.

반면 냉수생성을 위한 공랭식 칠러 사이클은 크게 단순히 냉매 사이클의 사방향밸브회전으로 냉방 모드 운전이 가능하다. 따라서 본 연구에서

는 저외기온 하에서 고온출수를 위한 사이클 기술에 초점을 맞추었다.

## 캐스케이드 사이클의 특성 및 장점

R410A 냉매 사이클을 채택한 실외기를 이용하면서 고온출수를 실현하려면, 물-냉매 열교환을 하는 실내기에 보조 전기 히터를 사용하는 방법과 실내기에 단순 물-냉매 열교환기 대신 캐스케이드 사이클을 적용하는 방법이 있다.

초기의 ATW-HP 제품들은 보조히터를 쓰는 방법을 채택하고 있는데, 50℃까지는 히트펌프가 담당하고 그 이상의 온도는 전기히터가 담당하는 식으로 운전한다. 이로 인해 제품 비용을 크게 늘리지 않고도 고온출수가 가능해졌지만, 바닥난방이나 급탕 재가열 운전과 같이 고온영역 내에서 운전할 경우 효율이 떨어져 운전비용이 증가하는 문제가 있다.

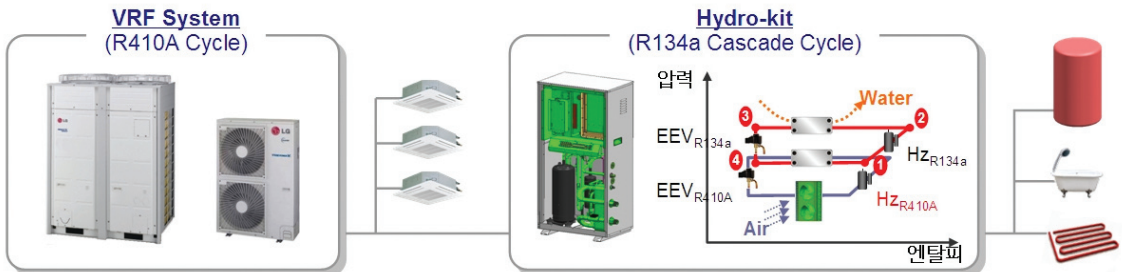
반면, R410A 사이클이 적용된 실외기와 함께 임계온도가 101℃인 R134a 등의 냉매를 적용한 사이클을 실내기로 하는 2원 냉매 캐스케이드 사이클을 구성하면, 중간 열교환기에서 실외기의 응축과 R134a 사이클의 증발이 이루어지므로 실외기 측의 응축온도를 높이지 않아도 출수온도를 80℃까지 높일 수 있다(그림 2 참조).

캐스케이드 사이클이 실제 난방운전에서 효

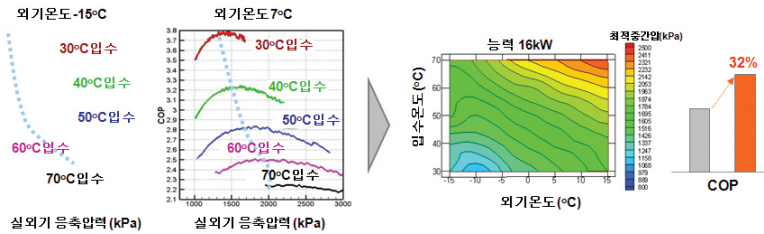
과적인 이유는 저(低) 외기온도에서 고온출수를 필요로 하는 상황에서 저단(R410A 실외기) 측이 실외부하를, 고단(R134a 실내기) 측이 실내부하를 나누어 감당할 수 있기 때문이다. 앞서 예로 들었던 외기온도 영하 15℃, 입수온도 50℃의 상황에서, 중간 열교환이 20℃ 근방에서 이루어지며 저/고단 측 모두 압축비는 4.0, 토출온도는 65℃ 전후가 되어 신뢰성이 높은 운전을 하게 된다. 특히 저/고단 측 모두 인버터 압축기를 적용할 경우, 전체 시스템 효율이 최적화되도록 중간 열교환 온도(또는 압력)를 조정함으로써 효율 향상 효과를 크게 높일 수 있다. 이 외에도 효율 최적화와 제상운전 등 캐스케이드 사이클의 상용화를 위해 해결해야 할 기술적 문제들은 다음 절에서 살펴보고자 한다.

그림 2에 나타낸 바와 같이 캐스케이드 사이클을 제어하기 위해 저단(R410A) 및 고단(R134a)의 압축기 주파수와 각 사이클의 팽창밸브를 제어인자로 삼는다. 즉, 4개의 제어인자가 있는데, 사이클에서 반드시 제어되어야 하는 요소는 출수온도와 저/고단 각 사이클의 흡입 과열도이다. 따라서 나머지 하나의 제어인자 - R410A의 목표 고압 조절을 위한 저단 측 압축기 회전수를 효율 최적화를 위해 사용할 수 있다. 이를 최적 중간압 문제라 한다.

단일 냉매 캐스케이드 사이클인 경우, 최적 중

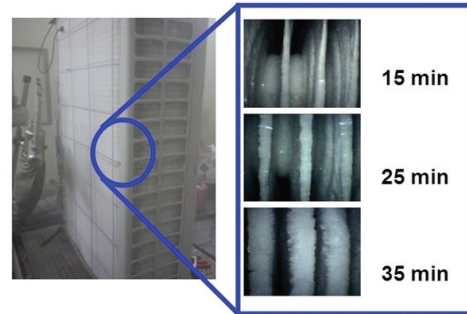
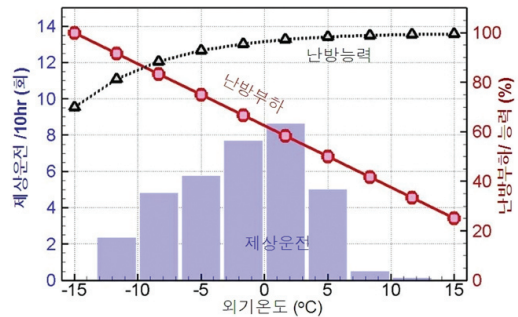


[그림 2] 이원 냉매를 이용한 캐스케이드 사이클(Cascade Cycle) 구조 및 최고효율 운전을 위한 제어인자



[그림 3] 다양한 외기온도와 입수온도에서 최적 중간압 확인 및 이로 인한 COP 증가

간압은 고단 측 응축압력과 저단 측 증발압력의 기하평균으로 간단히 주어진다. 하지만 냉매의 물성과 압축기의 특성이 다른 이원 냉매 캐스케이드 사이클은 비선형적 상호의존성이 강하므로 최적 중간압 값의 이론적 도출이 불가능하기 때문에, 수치해석적 방법을 적용했다. 이를 위해 실험데이터에 기반한 압축기 모델 및 질량분산 모델에 근거한 열교환기 모델을 채택하여 수치해석 코드를 작성했으며 기존의 실험결과로 정확성을 검증하였다. 이 코드를 활용해 그림 3의 예와 같이 총 6,000 케이스의 외기온도, 물온도 및 난방 부하에 대해 최적 COP를 갖는 중간압을 도출하였으며, 이 값들은 look-up 테이블 방식으로 실내기 및 실외기 제어 로직에 반영되었다. 실제 실험 검증 결과, 심야전기 히터보일러 대체용 히트펌프와 같이 최적 중간압이 실시간으로 변화하는 축열식 제품은 고정 중간압 방식에 비해 COP 상승효과가 최대 32%에 달하는 것이 입증되었다.

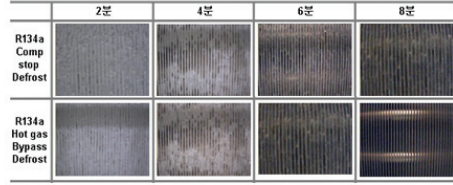
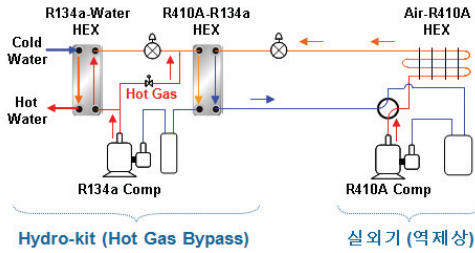


[그림 4] Hot gas valve를 적용한 히트펌프 냉온수기 제상 방식 및 기존 제상안과의 비교

## 제상운전 시 연속난방 기술

히트펌프 난방운전은 저외기온 시의 능력저하 외에 실외 열교환기의 착상 및 이로 인한 능력저하를 방지하기 위한 제상운전이 주요 이슈이다. 그림 4는 2011~2012년 동계시즌 동안 강원도 원주의 실측치를 바탕으로 작성한 외기온도에 따른 히트펌프 능력저하 및 10시간당 제상횟수를 나타낸다. 그림에서 영하 5도에서 5도 사이

에서 제상운전이 주로 발생하며, 특히 2도 전후에서는 1시간당 한 번의 빈도로 제상운전에 돌입할 수 있다. 착상에는 외기온도뿐 아니라 습도가 매우 중요한데, 건구온도 2도, 습구온도 1도에서 측정된 그림 4의 챔버 실험결과와 같이 상대습도가 높은 경우에는 30~40분 운전 만에 열교환기 유로의 절반 이상이 서리로 방해가 될 만큼 착상은 성능에 큰 영향을 미친다. 특히 가정용 히트펌프에서 제상운전은 매우 중요한데, 이는 스마



[그림 5] Hot gas valve를 적용한 히트펌프 냉온수기 제상 방식 및 기존 제상안과의 비교

트 그리드 환경이나 심야전기와 같이 외기조건이 어떠한 경우라도 제한된 시간 내에 목표한 축열 온도와 축열량을 달성해야 하는 제품인 경우 제상운전의 영향을 최소화하면서 연속난방(non-stop heating)을 할 수 있는 기술이 필요하다.

이런 요구를 만족하기 위해서는 혁신적인 제상방법이 필요하다. 공조시스템에서는 일반적으로 제상운전은 역사이클 방식과 핫가스 바이패스 (hot-gas bypass) 방식이 있는데, 짧은 제상운전시간을 중요시하느냐 혹은 연속난방(non-stop heating)을 중요시하느냐에 따라 두 방식 중 하나를 선택하게 되며 두 가지 모두를 선택할 수는 없다. 즉, 역사이클 방식은 제상시간이 단축되는 대신 난방이 중지되고, 핫가스 바이패스 방식은 토출 가스 일부를 난방에 이용하므로 연속난방이 가능하나 그만큼 제상시간이 길어지기 때문이다.

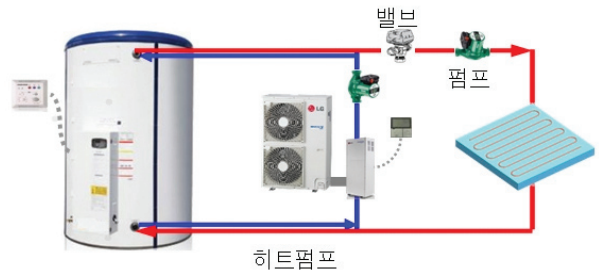
그러나 캐스케이드 사이클을 채택하면 두 가지 방식의 최적 절충안을 취할 수 있다. 그림 5와 같이, 실외기 (R410A cycle)는 역사이클 방식, 실내기 (R134a cycle)는 핫가스 바이패스 방식을 적용한다. 즉, R134a 사이클의 일부 냉매는 연속난방을 위해 쓰고, 나머지는 중간 열교환기로 보내어 실외기의 증발온도를 높여줌으로써 제상능력을 배가시킨다. 그 결과, 실외기의 역사이클 제상방식만 사용하는 기존 실외기에 비해 제상운전시간을 20% 이상 단축시켰을 뿐만 아니라, 제상 중 연속

난방으로 인해 축열운전도 지속됨을 보였다.

### 히트펌프 냉온수기의 경제성

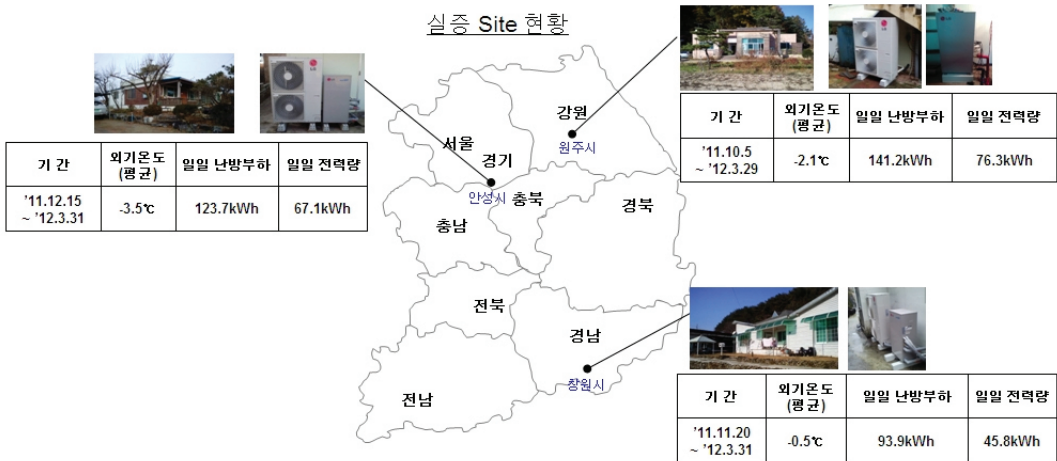
앞서 언급한 기술들을 포함하여 전기히터에 비해 압도적으로 높은 효율과 기존 히트펌프의 한계를 극복한 높은 성능에도 불구하고, 히트펌프 냉온수기는 실외기와 동등한 사이클/제어부와 높은 열교환기 가격 등으로 인해 초기투자비가 높은 편이다. 따라서 고객관점에서 볼 때 제품의 경제성은 에너지 요금 절감액으로 초기투자비를 상쇄하는 투자비 회수기간 (payback period)으로 알 수 있다.

국내의 경우 누진제가 없는 심야전기를 이용하고 있는 심야전기 히터보일러 대체용으로 히트펌프 냉온수기의 적용이 가능하며, 원가 이하의 심야전기 과다사용으로 인한 누적적자를 해소하기 위해 한국 전력에서도 이의 보급을 추진하



[그림 6] 심야전기 보일러 대체 히트펌프 시스템

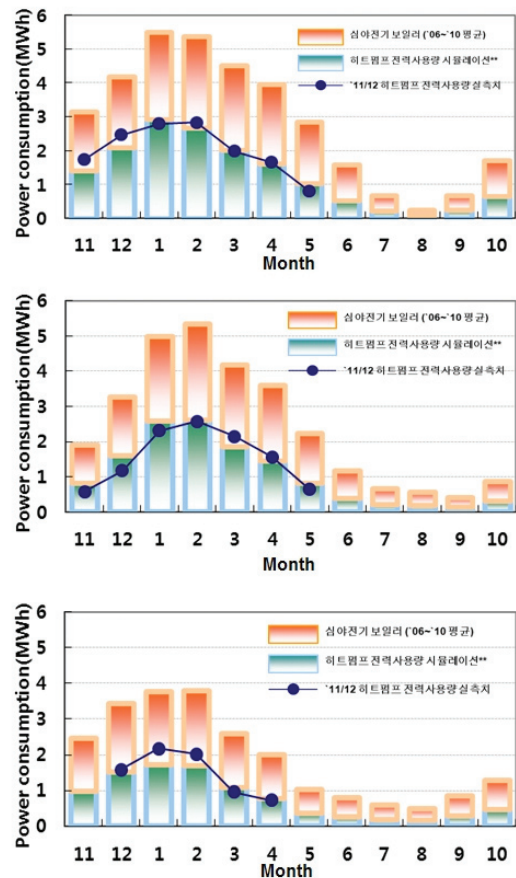




[그림 7] 심야전기 히터 보일러 대체 hydro-kit 설치 사이트 현황 및 운전요약

고 있다. LG전자의 경우 이 시스템(그림 6 참조)을 원주, 안성 및 창원 3곳에서 연간 운전상황을 모니터링하고 있다(그림 7 참조). 선택된 사이트는 모두 30평 대의 단독주택으로 기존에 30 kW의 전열히터가 내장된 2,700 리터의 축열조가 설치되어 있었다. 이를 한전규격 기준 정격용량 25 kW (건구 7도/습구 6도의 외기온도 및 40도의 입수온도)인 히트펌프 온수기로 대체하였다.

모니터링 사이트에서 얻어진 히트펌프의 성능 및 효율의 정량적인 비교를 위해 2006년부터 2010년까지의 심야전기 히터 보일러의 평균 전력사용량과 함께 비교하였다. 또한, 실측되지 않은 기간 동안의 히트펌프와 보일러의 비교를 위해 그동안의 실험 및 모니터링 데이터를 종합해 얻은 온도-COP 회귀식을 이용하여 2006~2010년 외기온도에 대입하여 예측된 전력 사용량도 함께 나타내었다. 그림 8에서 나타낸 바와 같이 히트펌프 적용으로 월간 전력 사용량이 모니터링 기간 동안 50% 이상 줄어든 것을 확인할 수 있다. 또한, 전력사용량 실측치는 시뮬레이션값과 비교적 잘 일치한다. 히트펌프 실증 운전 결과 예측한 가구당 연간 전력 절감량은 16,262 kWh으로 기



[그림 8] 원주 (위), 안성 (가운데), 창원 (아래) 사이트의 심야전기 보일러 및 히트펌프의 월별 전력 사용량 비교

존대비 57%가 절감되었으며, 고객의 연간 심야 전기요금 절감액은 105만 원이다. 이는 소비자가 충분히 체감할 수 있는 정도의 요금 절감액으로, 실제 사용자 인터뷰 결과도 절감요금에 대해 매우 만족하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 심야 전기 히트펌프의 경우, 기존 심야전기 보일러와 비교해 에너지 사용량 및 요금이 절반 이하로 매우 경쟁력이 있다는 것을 알 수 있다.

설치비 등을 포함한 초기 투자비용을 감안하면, 투자비 회수에는 5년 정도 소요될 것으로 파악되었다. 그런데 투자비 회수기간 3년을 확보하여, 전기 히터 등 비효율적 저가형 제품을 사용하고 있는 기존 소비자들이 보다 쉽게 설치하도록 하여 전력문제 해결의 방법이 되려면 반드시 정부의 보조금 지급과 같은 정책적 보조가 필요하다고 판단된다.

## 결론

지금까지 살펴본 바와 같이 전기히터, 가스보일러를 히트펌프로 대체하고, 한전의 만성적 적자를 감소하기 위해서는 고효율/고온출수 히트펌프 온수기가 필요하다. 이런 목적 하에서 현재 가장 유력한 기술적인 대안이 캐스케이드 사이클을 적용한 ATW-HP 시스템이며, 여기에 적용된 시스템, 사이클, 최적 인버터 압축기 운전 기술 및 연속난방을 위한 제상과 같은 기술적 특성을 간략히 설명하였다. 또, 에너지 소비량 모니터

링 및 운전비용 분석 결과, 모든 모니터링 사이트에서 기존 히터대비 50% 이상의 전력사용량 절감과 요금 절감을 실증하였다. 이와 같은 고효율 ATW-HP의 보급을 위해서는 초기 보급을 장려하기 위한 정부의 지원금 정책이 반드시 필요할 것으로 보인다.

## 참고문헌

1. 박노마, 박희웅, 정승현, 신정섭, 정백영, 정훈, 2012, “국내 현장기반 공기열원 축열식 열펌프의 계절 성능에 대한 연구”, 대한설비공학회 하계 학술발표대회 논문집
2. Park, N., Park, H., Jung, S., Shin, J., Chung, B., Kang, D., Na, B., Jung, H., 2012, “On the optimal inverter operation of air-source heat pump water heater with thermal energy storage,” the proceeding of the eighth KSME-JSME Thermal and Fluid Engineering Conference, Incheon, Korea, March 18-21.
3. Park, N., Woo, H., Ha, J. Lee, D., Chin, S., July 12-15, 2010, “On the optimal water discharge temperature of air-to-water heat pump for space heating and domestic hot water,” the proceeding of International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue.
4. 한국 전력공사, 2012, “축열식 히트펌프 기술 기준 개정안” 