

정수장 내 축열조 설치 원수열원 히트펌프의 성능분석

오선희* · 윤 린† · 조 용**

* 한밭대학교 기계공학과, ** 한국수자원공사

Studies on Raw-Water Source Heat Pump Equipped with Thermal Storage Tank in Water Treatment Facility

Sun Hee Oh*, Rin Yun**† and Yong Cho**

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat Nat' Univ.,

** K-water Institute, Korea Water Resources Corporation.

(Received October 15, 2012 ; Revised February 7, 2013 ; Accepted February 19, 2013)

Key Words: Raw Water Source Heat Pump(원수열원 히트펌프), Thermal Storage Tank(축열조), TRNSYS Simulation(트랜시스 시뮬레이션), Water Treatment Facility(정수장)

초록: 정수장 내 축열조 설치 원수열원 히트펌프시스템의 동적 특성을 TRNSYS 프로그램을 이용하여 모델링 하였다. 원수열원 히트펌프의 실증평가를 위해 성남정수장 내 축열조가 설치된 히트펌프 실험결과를 이용하여 검증하였고, 본 설비는 2010년 11월부터 운전되고 있다. 모델링 결과 원수열원 히트펌프의 평균 COP는 냉·난방 시 각각 4.97과 3.17을 나타냈다. 축열조 용량은 5 m³에서 20 m³로 변화시킬 때, 축열조 용량 10m³ 에서 가장 높은 COP와 소비전력이 나타났다. 설치지역으로 서울, 인천, 강릉, 그리고 광주를 고려하였고, 지역에 따른 COP와 소비전력은 큰 변화가 없었으나 소비전력량에 있어서 난방 시에 위도가 높은 서울의 소비전력량이 가장 높으며, 냉방 시에 가장 낮게 나타났다. 본 시스템을 동일한 용량의 물-공기방식의 히트펌프와 비교할 때 평균 25%정도 낮은 소비전력량을 나타냈다.

Abstract: A raw-water source heat pump equipped with a thermal storage tank was dynamically simulated by TRNSYS, and the results were verified by using the data from a heat pump installed in the Seongnam water treatment facility. The average coefficient of performance (COP) of the raw-water source heat pump based on simulation was 4.97 and 3.17 in the cooling and heating season, respectively. When the volume of the thermal storage tank was changed from 5 to 20 m³, the highest COP was found at a size of 10 m³. Considering the regional locations of raw-water source heat pumps at Seoul, Incheon, Gangneung, and Gwangju, Seoul showed the lowest electric power consumption in the cooling season and the highest in the heating season. When a comparison of the performance between the present system and that of a water-air heat pump was conducted, the present system showed lower electric power consumption by 25% than that of a water-air heat pump.

기호설명

- COP : 성능계수(-)
- W_{hp} : 소비전력(kW)
- Q_{h,c} : 냉난방능력(kW)
- m : 질량유량(kg/h)
- C : 비열(J/Kg·K)
- ΔT : 원수 온도차(°C)

1. 서론

최근 우리나라에서는 미활용에너지 자원의 실요성이 점차 대두되고 있다. 친환경에 대한 관심도가 높아지면서 저가 비용으로 고효율의 성능을 산출하는 히트펌프시스템 개발에 대한 관심 또한 높아지고 있다. 일반적으로 우리나라에서 사용되고 있는 공기열원 히트펌프는 건물 실내온도와 실외온도의 차이가 큰 경우에 운전효율이 떨어져 난방 역할을 제대로 수행하지 못하게 된다. 이러한 문제점에서 시스템 효율을 보완해 줄 해결책 중 하나로 정수장 내 원수

† Corresponding Author, yunrin@hanbat.ac.kr

열원을 사용하는 것이다. 정수장 내 원수의 특성상 원수의 온도는 외기온도에 비하여 동절기에는 높고, 하절기에는 낮은 특성을 가진다. 또한 계절에 따라 온도차가 확연하게 나타나 대규모의 열수요처가 많은 도심지 부근의 다양한 건물에 냉·난방으로 편리하게 사용될 수 있으며, 최소한의 에너지를 흡수하여 냉·난방에 필요한 냉·온열을 생산함으로써 물로부터 얻어진 열량만큼 에너지 사용을 절감할 수 있는 이점이 있다. 또한 이러한 원수열원 히트펌프에 축열조를 도입하는 시스템은 물의 밀도차를 이용한 것으로 고온의 물은 축열조 상부에, 저온의 물은 축열조 하부에 유지하는 특성을 활용하기 때문에 건물부하의 급격한 상승 시에 순간 부하 공급능력을 향상시키며, 에너지 관리에 있어서 매우 효율적이다. 그러나 현재까지 설치된 수온차를 이용한 원수열원 히트펌프의 경우, 원수열원의 특성을 크게 반영하고 있지 않기 때문에 그 성능을 보다 향상시킬 수 있는 여지가 있으므로 이에 대한 연구가 진행되고 있다. Baek 등⁽¹⁾은 온천 폐수를 이용한 축열식 히트펌프 급탕시스템에 대해 설계 및 에너지 분석을 수행하여 온수급탕은 히트펌프 부하의 90% 이상을 공급 가능케 하며, 동절기와 주말을 제외하고는 100% 부하를 충족시킬 수 있다는 결론을 얻었다. Baik 등⁽²⁾은 해수열원을 이용한 히트펌프 시스템의 성능 해석을 수행하였고, 해수열원 케이스케이드 히트펌프 시스템의 운전 특성에 대한 실증적 연구⁽³⁾를 진행하였다. 또한 Park 등⁽⁴⁾은 하천수 열원 히트펌프 시스템의 성능 특성을 분석하고 이것의 경제성 평가를 수행하였다.

본 연구에서는 정수처리장 내 축열식 원수열원 히트펌프를 TRNSYS 시뮬레이션을 통하여 시스템 성능을 분석하였고, 이를 실험 자료와 비교해 검증하였다. 또한, 본 시스템의 설치지역 및 축열조 용량 변화에 따른 성능계수와 소비전력을 산출하여 정수장 내 설치된 물-공기 방식의 히트펌프와 성능을 비교하였다. 본 연구를 통하여 수열원 히트펌프의 적용범위를 확대하고, 이에 대한 개선 방향을 마련하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 축열조 설치 원수열원 히트펌프 모델링

본 연구에서 사용한 히트펌프는 축열조가 설치된 물-물 방식으로써 모델링은 성남정수장 내 실측자료를 바탕으로 수행하였다.⁽⁵⁾ 정수장에 설치된 축열식 수열원 히트펌프의 냉·난방 특성은 COP에 의해 평가 되는데, COP는 히트펌프 자체의 소비전력인 W_{hp}

대비 실내에 공급되는 히트펌프의 냉·난방능력인 Q 의 비로써 식 (1)과 같다. 히트펌프의 냉·난방능력은 식 (2)로부터 산출되며, 히트펌프에서 측정된 생산열량을 이용하여 COP를 계산하였다.

$$COP = \frac{Q}{W_{hp}} = \frac{mc\Delta T}{W_{hp}} \quad (1)$$

$$Q_{h,c} = mc\Delta T \quad (2)$$

성남정수장은 한강수계 상수도 원수를 열원으로 사용하고 있으며, 시스템 구성도는 Fig. 1과 같다. 축열식 물-물 히트펌프는 열교환기를 통해 원수로부터 열에너지를 흡수하고 히트펌프에서 생산된 냉수 및 온수는 축열조에 공급한다. 축열조에 유입된 물은 건물 내 설치된 F.C.U(Fan coil unit)로 순환되어 실내에 열을 공급하고 축열조로 회수한다. Fig. 2는 성남정수장에서 운전되고 있는 30RT급 히트펌프시스템을 TRNSYS⁽⁶⁾의 시뮬레이션 스튜디오를 이용하여 모델링한 과정을 나타낸 것이며, 히트펌프의 상세사양은 Table 1과 같다. 원수(Type9c)는 열교환기(Type652)를 통하여 히트펌프에 열을 공급한 후 배출된다. 순환수(Type9c-2)는 펌프를 통하여 열교환기와 히트펌프 사이를 순환하게 된다. 축열조(Type38-2) 내부는 제거기(Type2d)의 영향을 받아 냉방 시 10~15℃, 난방

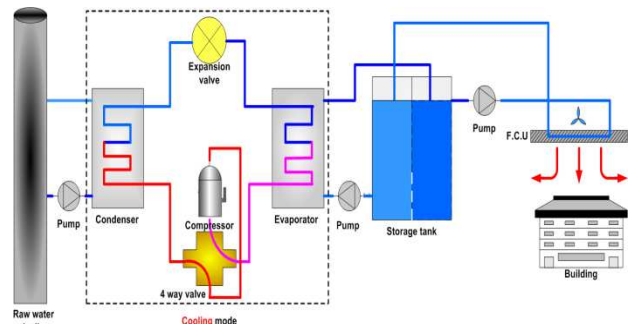


Fig. 1 Schematics of raw-water source heat pump having thermal storage tank

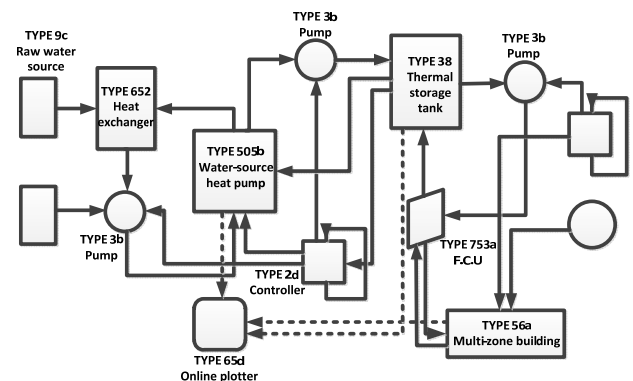


Fig. 2 TRNSYS modeling of raw-water source heat pump having thermal storage tank

Table 1 Specifications of installed heat pump at Seongnam water treatment facility

Heat pump	Water to water heat pump, 30RT
Heat exchanger type	Brazed plate heat exchanger
Storage tank	Plate separation, 10 m ³
Compressor	Digital/fixed scroll compressor(3 units)
Refrigerant	R22
Water flow rate	190 l/m

시 38~43℃의 상태로 유지되며, F.C.U(Type753a: fan coil unit)을 통하여 건물의 공조공간으로 열을 공급한다. 축열조가 온도범위를 벗어날 경우, 물-물 방식의 히트펌프(Type668)를 가동하여 축열조의 원수 온도가 일정하게 유지되도록 제어한다. 원수와 순환수 온도 및 유량은 성남정수장의 실측 데이터를 가공하여 입력하였으며, 기상데이터 또한 성남에서 가장 근접하게 위치해 있는 서울 지역의 데이터를 입력하였다.

2.2 성남정수장 내 대상건물

냉·난방 열이 공급되는 대상건물⁽³⁾은 축열식 물-물 히트펌프가 설치된 성남정수장으로 약 1838 m²이며, 본 대상건물의 모델링을 위해 TRNSYS 내 건물 모델링 프로그램인 TRNBuild를 이용하여 모델링 하였다. Fig. 3은 성남정수장 내 축열식 수열원 히트펌프의 공조공간인 중앙조정실과 통신실을 나타낸다. 공조공간인 중앙조정실과 비공조공간인 6개의 실로 구성되며 총 7개의 준으로 나누어 모사하였다. 공조건물의 벽체 및 유리 물성 값은 TRNBuild 라이브러리를 사용하여 Table 2에 나타난 바와 같이 입력하였다.

3. 결론 및 고찰

3.1 축열식 물-물 히트펌프 성능평가

Fig. 4는 난방 시 TRNSYS 내 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 좌측으로부터 0~4수치부분은 COP, 24~25℃ 수치는 제어되는 실내온도, 그리고 윗부분에 위치한 39~43℃ 수치는 축열조 온도를 보여주고 있다. 시뮬레이션을 통해 도출된COP는 냉·난방일 때 각각 평균 4.97과 평균 3.17을 보여 주며, 실측데이터의 COP는 냉·난방일 때 각각 평균 5.33과 평균 3.91을 나타낸다. Fig. 5와 Fig.6은 본 모델링을 통해 계산된 COP와 실측데이터의 COP, 그리고 소비전력량을 1월부터 12월까지 비

Table 2 Thermal properties of wall materials

Material	Thermal conductivity [kJ/m·h·K]	Capacity [kJ/kg·K]	Density [kg/m ³]
Concrete	5.50	0.90	2,300
Board	0.60	100	800
Insulation	0.12	1.47	40

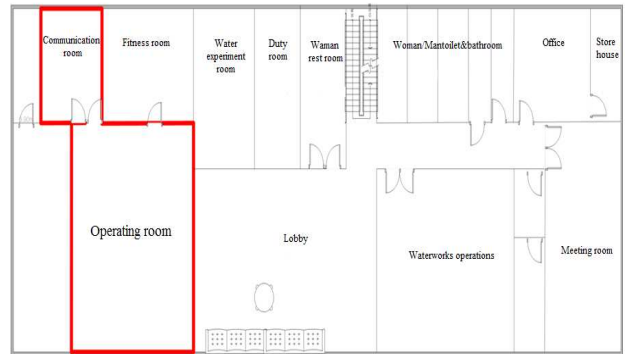


Fig. 3 Air conditioning spaces in Seongnam water treatment facility by raw-water source heat pump

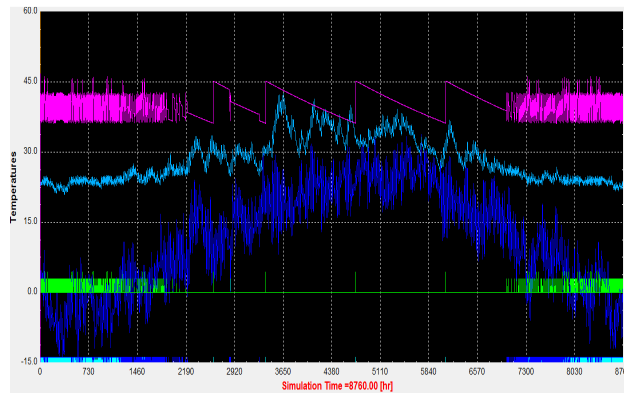


Fig. 4 Variation of the ambient temperature, room temperature, COP, storage tank temperature and controller signal with time from TRNSYS simulation

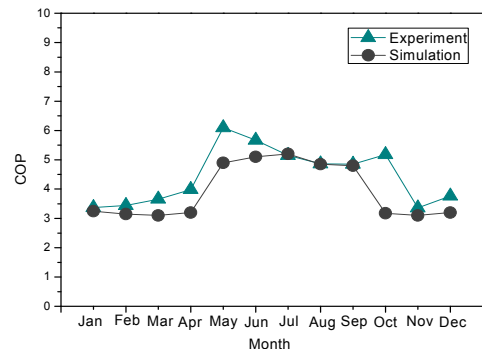


Fig. 5 Comparison of COP between TRNSYS simulation and experimental data

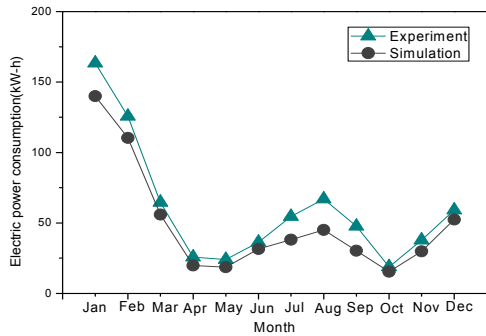


Fig. 6 Comparison of electric power consumption between TRNSYS simulation and experimental data

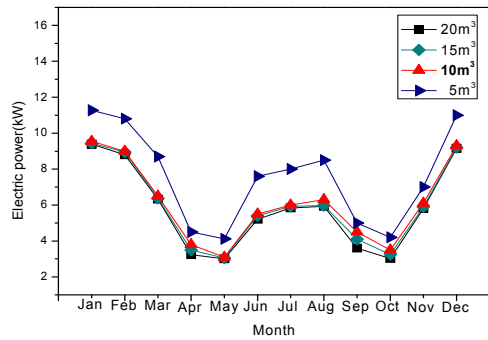


Fig. 8 Variation of electric power with size of thermal storage tank

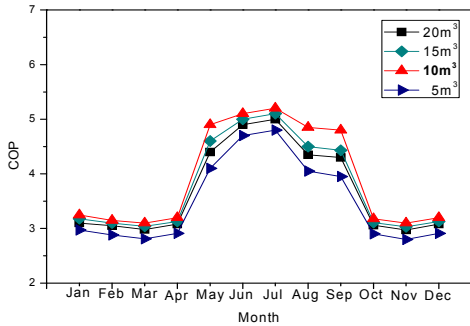


Fig. 7 Variation of COP with size of thermal storage tank

교한 것이며, COP는 평균 약 13%, 소비전력량은 평균 약 19%의 오차가 나타났다. 간절기인 10월의 수치를 제외하고는 냉·난방일 때 모두 비슷한 경향으로 진행되는 것을 볼 수 있다. 간절기 10월의 경우, 시뮬레이션일 때에는 입력한 외기온도 데이터에 의해서만 온전히 운전된다. 반면, 실제에서는 날이 춥거나 따뜻해지는 간절기의 특성상 냉방과 난방을 조절하기 때문에 시뮬레이션 결과와 실측자료의 비교에 대해서 많은 편차를 보이는 것으로 생각된다. TRNSYS 시뮬레이션 결과값과 실측데이터를 바탕으로 COP와 소비전력량을 비교함으로써 본 모델링의 타당성을 검증하였다. 한편, 축열조는 그 크기에 따라서 소비전력에 많은 영향을 줄 수 있는데, 가장 적합한 축열조의 크기를 산출하기 위하여 TRNSYS 내 축열조 모델링에 4가지로 용량 값 변화를 주면서 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 축열조 용량에 따른 COP와 소비전력을 비교한 것이다. COP의 경우, 축열조의 용량이 10m³ 일 때 가장 높은 수치를 보이는 것으로 나타났는데, COP는 실내측 부하변동에 따른 축열조의 대응능력에 큰 영향을 받기 것으로 판단된다. 소비전력의 경우, 축열조의 용량이 증가할수록 감소하며, 용량이 5m³일 때 ON/OFF

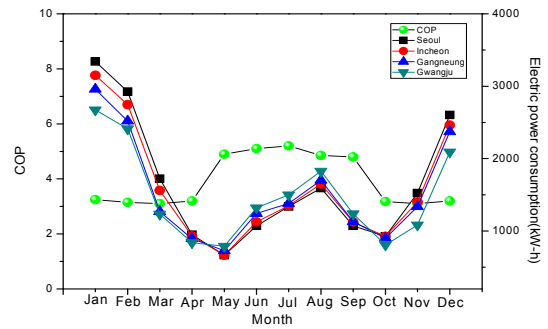


Fig. 9 Comparison of COP and electric power consumption with regional location of heat pump installation

제어도 가장 빈번하게 발생함을 확인할 수 있었다. 이렇듯 축열조 용량 변화에 대한 결과들을 미루어 볼 때, 특정 용량을 가진 축열조가 COP와 소비전력 등에서 최대값을 나타내므로 최적의 축열조 용량이 존재함을 확인할 수 있다. 한편, 국내 정수장은 전국적으로 분포하기 때문에 지역에 따른 원수열원 히트펌프의 COP와 소비전력의 영향을 알아보기 위해 동일한 모델링에 지역별 외기조건에 대한 변화를 주어 모델링을 수행하였다. 지역별 히트펌프의 COP와 소비전력의 수치에는 큰 변화가 없었으나, 지역마다 축열식 물-물 히트펌프의 가동횟수가 다르므로 소비전력량을 산출하면 Fig. 9과 같이 나타났다. 난방 시에는 위도가 비교적 높은 지역인 서울, 인천, 강릉, 그리고 광주 순으로 서울의 소비전력량이 가장 높으며, 냉방 시에는 반대로 광주, 강릉, 인천, 그리고 서울 순으로 광주의 소비전력량이 가장 높은 것으로 나타났다.

3.2 물-물 방식 및 물-공기 방식 히트펌프 비교

정수장 내 원수를 열원으로 하는 원수열원 히트펌프 사이의 성능 분석을 위해 동일한 사양의 청주정수장 내 물-공기 방식⁽⁷⁾과 본 축열식 물 대

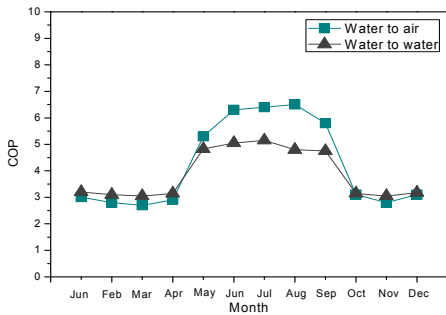


Fig. 10 Comparison of COP between water to air and water to water heat pump

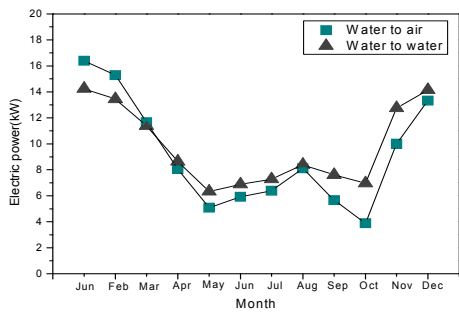


Fig. 11 Comparison of electric power between water to air and water to water heat pump

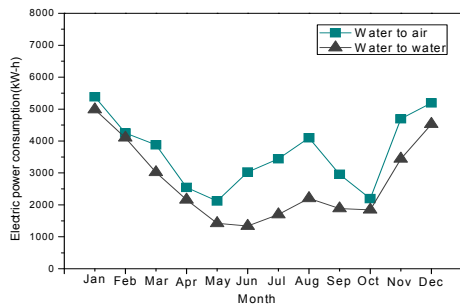


Fig. 12 Comparison of electric power consumption between water to air and water to water heat pump

물 방식의 히트펌프를 비교하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 물-물 히트펌프와 물-공기 히트펌프의 COP 그리고 소비전력을 비교한 것이다. 물-물 히트펌프의 평균 COP는 냉·난방일 때 각각 약 4.97과 3.17을 나타내었고, 물-공기 히트펌프의 평균 COP는 냉·난방일 때 각각 약 6.06과 2.92로, 물-물 히트펌프 기준으로 평균 약 9%의 차이를 보였다. 물-물 히트펌프의 평균 소비전력은 냉·난방 일 때 각각 약 7.3 kW와 11.7 kW를 나타내고, 물-공기 히트펌프의 평균 소비전력은 냉·난방 일 때 각각 약 6.23 kW와 11.23 kW를 나타내며, 물-물 히트펌프 기준으로 평균 약 7%의 차이를 보였다. 이와는

반대로, Fig. 12는 물-물 히트펌프와 물-공기 히트펌프의 소비전력량을 비교한 것인데, 물-공기가 물-물보다 물-공기 기준 약 25% 더 많은 소비전력량을 요하는 것으로 나타났다. 물-물과 물-공기 방식 히트펌프는 계절에 따라 비교적 비슷한 운전경향을 보였으며, COP는 물-공기 방식의 히트펌프가 더 높은 수치를 나타냈고, 소비전력은 물-물 방식의 히트펌프가 더 많은 전력을 필요로 하고 있다. 물-물 히트펌프는 축열조 부하에만 의존하여 작동하기 때문에 대부분 전부하로 운전되어 운전조건에 따른 COP의 변화폭이 작은 편이고, 물-공기 히트펌프는 실내 온도부하에 따라 잦은 운전횟수를 보이며 운전조건에 따른 COP 변화폭도 상대적으로 크게 나타났다. 물-공기 히트펌프의 COP가 높게 나타난 이유는 본 모델링이 현재 각 정수장에 설치되어 있는 각 히트펌프의 실제 시스템 사양을 토대로 수행됐기 때문이고, 보다 계절성능이 우수한 히트펌프가 물-물 방식으로 적용된다면 현재보다 더 낮은 소비전력량을 나타낼 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 정수장 내 축열식 물-물 히트펌프의 동적 특성을 분석하기 위해 TRNSYS를 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다. TRNSYS 시뮬레이션과 실측데이터를 1월부터 12월까지의 COP와 소비전력량을 월별로 비교하여 이를 검증 하였다. 축열조의 크기와 지역별 외기온도에 따른 변화, 그리고 물-공기 방식의 원수열원 히트펌프와의 차이를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) TRNSYS 시뮬레이션과 실측데이터를 비교할 때, 평균 COP는 약 13%, 평균 소비전력량은 약 19%의 오차가 나타났다.
- (2) 축열조 크기에 변화를 줄 경우에 용량이 10 m³ 일 때 COP의 수치가 가장 높았으며, 용량이 5 m³ 일 때 가장 높은 소비전력을 요하는 것으로 나타났다. 축열조 용량이 작을 경우에는 운전횟수가 빈번하게 일어나 가장 높은 소비전력량을 나타내었다.
- (3) 지역에 따른 히트펌프의 COP와 소비전력을 지역별 외기온도의 영향을 받지 않지만, 소비전력량은 비교적 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.
- (4) 정수장 내 물-물 히트펌프와 물-공기 히트펌프의 소비전력량은 물-공기방식이 물-물 방식보다 물-공기 기준 약 25% 더 많은 소비전력량을 요하는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(10 기술혁신 C01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Baek, N. C. and Sin, U. C., 2003, "An Analysis of Heat Pump System for Hot Water Supply Using Hot Spring Wastewater as a Heat Source," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 19, No. 4, pp. 187~194.
- (2) Baik, Y. J., Chang, K. C., Park, S. R., Ra, H. S., and Kim, J. Y., 2006., "Performance Analysis of a Sea Water Heat Source Heat Pump," *Proceedings of the KSME 2006 Spring Annual Conference*, pp. 2342~2347.
- (3) Kim, J. T., Baik, Y. J., Chang, K. C., Park, S. R., Ra, H. S., Lee, J. H., 2007., "An Experimental Study on the Performance of a Sea Water Heat Source Cascade Heat Pump," *Proceedings of the KSME 2007 Spring Annual Conference*, pp. 1081~1085.
- (4) Park, C. S., Jeong, T. H., Park, H. H. and Kim, Y. C., 2009, "Performance Characteristics and Economic Assessment of a River Water: Source Heat Pump System," *Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol. 21, No. 11, pp. 621~628.
- (5) Oh, S. H., Yun, R., Cho, Y., 2012, "Modeling and Verification of the Storage Tank Equipped Water Source Heat Pump in Water Treatment Facility," *Proceedings of the KSME 2012 Spring Annual Conference*, pp. 61~62.
- (6) Choi, B. S., and Hong, H. K., Lee, J. S., 2006, "Verification in RTS method by Applying TRNSYS," *Proceedings of the SAREK 2006 Summer Annual Conference*, pp. 531~535.
- (7) Oh, S. H., Yun, R., Cho, Y., 2011., "Analysis of the Cooling and Heating Operation Characteristics for the Raw-Water Source Heat Pump and the Air Source Heat Pump in Water Treatment Facility," *Proceedings of the SAREK 2011 Autumn Annual Conference*, pp. 1575~1579.