

주거용 건물에 대한 공기열원 Heat pump와 전열교환기가 융복합된 HVAC 시스템의 난방 에너지성능 비교 분석

최민호¹ · 이광호^{2*}

¹한국건설생활환경시험연구원 에너지본부, 주임연구원

²고려대학교 건축학과, 부교수

Comparison of Heating Energy Performance of HVAC System that Combines Air Source Heat Pump and Energy Recovery Ventilation (ERV) for Residential Buildings

Choi Minho¹ · Lee Kwangho^{2*}

¹Junior Research Engineer, Energy Dept, Korea Conformity Laboratories

²Professor, Department of Architecture, Korea University

†Corresponding author: kwlee@korea.ac.kr

Abstract

The purpose of this study is to compare the energy performance of a convergence high-efficiency HVAC module developed for application to residential buildings. The developed HVAC module is a system that combines a heat pump and an energy recovery ventilation system (ERV). The developed system is designed to recover energy using the ERV and heat-exchanged air passing through the heat exchanger of the heat pump. The study was conducted in a demonstration-house test building located at the LHI Housing Performance Research and Development Center. General equipment (cooling, heating, ventilation) was installed based on the common area of the demonstration house and compared with the condition of maintaining the same indoor temperature and humidity relative to the outdoor temperature in winter. The test results showed that, compared to the general equipment, the convergence HVAC module consumed less power, while maintaining a comfortable indoor environment. It consumed approximately 33% less electricity compared to the general equipment.

Keywords: 공조 시스템(HVAC), 실증(Field test), 히트펌프(Heat pump), 난방(Heating), 에너지 절감(Energy saving), COP(Coefficient of performance)

기호 및 약어 설명

SA : 급기

RA : 환기

 OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.42, No.6, pp.147-155, December 2022
<https://doi.org/10.7836/kjes.2022.42.6.147>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 19 September 2022

Revised: 15 November 2022

Accepted: 14 December 2022

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- OA : 외기
- EA : 배기
- η_l : 전열 교환 효율(%)
- I_{OA} : 외기 엔탈피[kcal/kg(DA)]
- I_{SA} : 급기 엔탈피[kcal/kg(DA)]
- I_{RA} : 환기 엔탈피[kcal/kg(DA)]
- ϕ_{hr} : 실내측 열량계에서 결정한 전 난방 능력(W)
- Q_{vr} : 에어컨의 실내측 공기 유량 측정값(m^3/s)
- C_{pa} : 공기의 비열(J/kg·k)
- t_{a1} : 실내측 흡입 공기의 건구 온도($^{\circ}C$)
- t_{a2} : 실내측 토출 공기의 건구 온도($^{\circ}C$)
- v_n : 공기 유량 측정 위치에서의 공기의 비체적(m^3/kg)
- x_n : 공기 유량 측정 위치에서의 공기의 절대 습도(kg/kg(DA))
- ϕ_{r2} : 측정 장치에서의 열 누설(W)

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

우리나라는 건물에서 소비되는 에너지가 전체 에너지 소비 중 25%를 차지하는 만큼 건물에너지 관련한 정책을 지속적으로 강화하고 건물에 적용되는 기술 발전을 통해 건물에서 소비되는 에너지를 줄이고자 노력하고 있다. 그중 건물의 냉난방을 위해 적용된 공조시스템(HVAC)은 실내환경을 쾌적하게 할 목적으로써 에너지를 소비할 수밖에 없고 이 공조시스템에 사용되는 에너지 사용량은 건물 전체 에너지 소비의 40 ~ 50%로 상당 부분을 차지한다¹⁾. 또한 최근 전 세계적으로 COVID-19의 확산으로 인해 건물의 환기시스템은 필수 요소로 인식되고 있으며, 무분별한 외기도입은 외부 영향에 따라 건물에너지 사용량을 증가시키는 요인이기 때문에 건물에서 효율적인 제습 및 환기시스템 적용이 필요하다²⁾. 일반적으로 열회수형환기장치와 냉난방장치는 설치와 제어가 개별로 되어 비효율적인 제어로 인해 불필요한 에너지 소비가 발생하게 된다. 최근 유럽에서는 냉방, 난방, 열회수환기가 복합된 공조시스템을 적용하여 건축물의 에너지 사용량을 줄이는 시도가 많이 이루어지고 있고, 국내에서도 많은 중소기업과 정부 차원에서의 노력이 이루어지고 있는 상황이다. 이에 본 연구에 앞서 열회수형환기장치(HRV)와 냉난방시스템을 통합하여 융복합 고효율 HVAC 모듈을 제안하였다.

본 연구의 목적은 이전 연구를 통해 제안한 융복합 고효율 HVAC 모듈의 외기온도에 따른 에너지 성능을 일반 개별 시스템(히트펌프 + 열회수환기장치)과 실증을 통해 비교하고자 하였다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 실제 건물을 대상으로 에너지 소비량을 비교하기 위해 일반 시제품(히트펌프, 환기장치 별도)과 개발 제품(히트펌프 + 환기장치 복합)의 성능을 파악하고, 두 시스템을 중심으로 실증 주택에 적용하여 에너지 소비량을 비교 분석하는 것을 범위로 한다.

연구 방법은 선정된 실증 주택에서 실내외 온도, 습도, 일사량, 미세먼지 농도 등 기초적인 데이터를 일반적으로 사용되는 히트펌프 시스템과 환기장치가 개별로 적용된 상태에서 우선 측정하고 충분한 데이터 확보 후 히트펌프와 환기장치가 융복합 된 개발 제품을 적용하여 측정하였다. 동절기를 대상으로 기간은 11월부터 2월까지 측정하였으며 실증 주택의 한계로 동시 비교가 불가하여 동일한 공간에서 기간을 나누어 측정하였고 실외온도가 유사한 기간을 선정하여 비교하였다.

2. 본론

2.1 융복합 고효율 HVAC 모듈

융복합 고효율 HVAC 모듈은 냉방, 난방, 환기, 공기 청정, 제습 기능이 구현된 통합형 냉난방 환기 패키지 시스템으로 본 연구에서는 융복합 HVAC으로 표기하였다.

융복합 HVAC은 냉난방, 환기를 하나의 시스템을 통해 제어하여 쾌적한 실내 환경을 유지하면서 건물에서 소비되는 에너지를 최소화하기 위한 장치로 개발되었다. 구성은 공기열원 히트펌프와 환기를 위한 전열교환기, 급배기용 송풍팬으로 되어있으며 각 운영 모드 별로 각 기능들이 유기적으로 작동되도록 설계하였다. 실증에서 사용한 융복합 HVAC의 외기도입 난방 작동 메커니즘은 Fig. 1과 같다. 덕트를 통해 유입된 외기(OA)가 유닛 내부의 전열교환기를 통과하는 과정에서 환기(RA)되는 공기로부터 에너지를 회수하게 되고 이후 응축기를 통과하는 과정에서 히트펌프로부터 공급된 난방 에너지가 급기(SA)를 통해 실내로 전달된다.

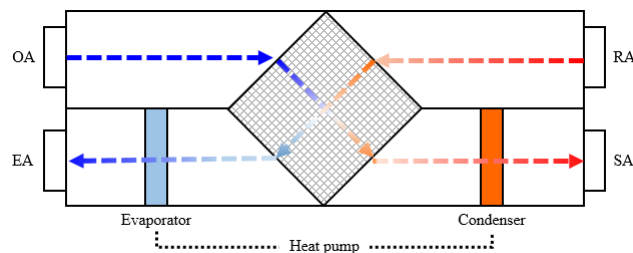


Fig. 1 Schematic diagram of convergence HVAC with air heat source heat pump and ventilation unit (heating operation)

2.2 융복합 고효율 HVAC 모듈 관련 기존 연구

Lee et al.³⁾의 연구에서는 다중이용시설을 대상으로 청정한 공기환경을 유지하면서, 환기에 따른 냉난방 에너지비용을 최소화 할 수 있는 환기 병용형 냉난방 시스템을 제안하고 시범 설치하여 시운전 평가를 통해 에너지

절감 특성 등을 평가하였다. 그 결과 기존의 전공기 환기방식 냉방시스템에 비하여 개량된 환기 병용형 냉방시스템이 시스템 전체 에너지 소비량이 16% 감소함을 확인하였다.

Choi et al.⁴⁾의 연구에서는 선행연구를 통해 통합형 HVAC 유닛의 기본 모델을 제안한바 있으며 히트펌프 기반 통합형 냉난방-환기 시스템 성능 평가에 관한 실험적 연구를 통하여 전열교환기의 온도교환효율 및 HVAC 패키지의 운전성능을 평가하였다.

국외 연구 사례로 Feist⁵⁾ 등은 유럽의 패시브 하우스 기준의 환기 및 난방 시스템 기준을 제시하였고, Baxter 등은 nZEH (Net Zero Energy Homes)에 적용하기 위한 냉난방, 환기를 통합한 IHP (Integrated Heat Pump) 시스템을 제안해 환기와 공조시스템의 결합을 통한 에너지절감 연구가 수행되었다.

이와같이 Heat pump와 환기장치가 결합된 시스템에 대한 에너지성능을 평가할 필요가 있으며 기존 연구에서는 시뮬레이션 및 실험적 평가가 수행되었다. 본 연구에서는 표준 시험 방법을 통한 정량적 성능을 우선 평가한 후 비교 제품을 선정하여 실증을 통해 에너지성능을 비교 평가하고자 한다.

2.3 융복합 고효율 HVAC 모듈 표준 성능 시험

실증하기에 앞서 융복합 HVAC은 환기와 난방이 복합적으로 운영되는 시스템으로 외기가 유입되는 조건에서 난방 성능을 측정하는 표준 시험 방법이 존재하지 않으므로 각 항목별(난방, 환기)로 제정되어있는 표준 시험 방법을 통해 각 운영모드에서의 성능을 측정 하였다. 먼저 전열 교환 효율을 KS B 6879:2020 열회수형 환기 장치의 9.6 열교환 효율과 에너지 계수 시험 방법⁶⁾에 따라 환기운영모드에서 다음 식(1)과 같이 측정하였다.

$$\eta_I = \frac{I_{OA} - I_{SA}}{I_{OA} - I_{RA}} \times 100 \quad (1)$$

난방 능력은 KS C 9306:2017 에어컨디셔너의 A.3.2.4 히트펌프 난방 능력 산출 방법⁷⁾에 따라 난방운영모드에서 다음 식(2)와 같이 측정하였다. 측정방법은 융복합HVAC의 실내측 및 실외측에 흡입되는 공기의 온도·습도와 토출되는 공기의 온도·습도를 측정하고, 그때의 공기 유량을 측정함으로써 능력을 구하는 공기 엔탈피법을 통해 산출하였다.

$$\phi_{hr} = \frac{Q_{vr} C_{pa} (t_{a2} - t_{a1})}{v_n (1 + x_n)} + \phi_{r2} \quad (2)$$

국내 표준 시험방법을 준용하여 측정된 결과는 다음 Table 1과 같다. KS B 6879:2020 열회수형 환기 장치 시험방법에 따라 측정된 전열교환효율은 76%로 산출되었고, KS C 9306:2017 에어컨디셔너 시험방법에 따라 측정된 난방능력은 1,886 W, 난방 소비전력은 512 W, 난방 COP는 3.68로 산출되었다. 일반 제품의 경우 별도의

표준 시험을 수행하지 않고 제조사에서 제공한 성능 자료를 활용하였다.

Table 1 Specification of a general products (heat pump + ERV) and Convergence HVAC module

구분	Heat pump + ERV		Convergence HVAC module
Size	ERV	550 mm x 550 mm x 250 mm	700 mm x 700 mm x 900 mm
	Indoor unit	798 mm x 293 mm x 240 mm	
	Outdoor unit	800 mm x 630 mm x 300 mm	
Ventilation capacity	ERV	150 CMH	150 ~ 400 CMH
Heating capacity		5,600 W	1,886 W
Power consumption	ERV	100 W	512 W
	heat pump	1.65 KW	
Heat exchange rate (ventilation operation)		70%	76%
COP (heating)		3.39	3.68

*For general products, the performance data provided by the manufacturer.

*For convergence HVAC module, the performance data were measured according to the standard test method.

*The performance of general products was determined based on the test area.

2.4 실증 실험 개요

(1) 실증 건물 선정

본 연구에서는 주거용 건물에 적용하기 위해 개발된 융복합 고효율 HVAC 모듈의 에너지 소비량을 비교하기 위해 실증 건물을 선정하였다. 주택 성능에 관한 실증 연구를 위해 지어진 대상 건물(Fig. 2)은 지상 5층 규모의 벽식구조로 각 층별로 59 m², 84 m² 2세대씩 총 10세대로 구성되어 있다. 실제 공동주택(아파트)의 구조와 유사하게 설계되었으며 일반적으로 사용되는 바닥난방, 위생기구, 싱크대 및 쿡탑이 설치되어 있고 실내는 벽지 및 바닥이 모두 마감되어 있다. 측정은 5층에 위치한 59 m²의 기본형(비확장 3bay)에서 수행되었고, 실증 주택 내 덕트 설치로 인한 파손 문제 때문에 실증 공간은 방을 제외한 거실, 주방으로 제한하였다.

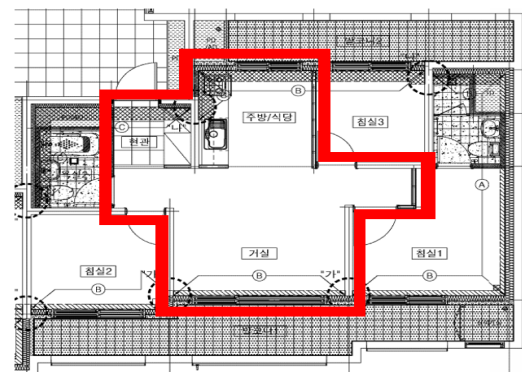


Fig. 2 Overview of the demonstration building

(2) 측정 개요

외기온도 대비 실내환경을 동일하게 유지하는 조건에서 융복합 HVAC과 같은 용량의 일반 시제품(히트펌프, 환기장치)을 설치하여 에너지 소비량을 비교하였다. 측정 항목은 각 취출구(SA, RA, OA, EA) 별 온습도, 실내외 온습도, 일사량, 전력량, 미세먼지로 두 비교 군 동일한 위치에 센서 및 계측기를 설치하였다(Fig. 3). 실내 온도는 측정 센서 기준으로 23°C로 설정하였으며, 별도의 실내 부하는 모사하지 않았다.

온도 측정 센서는 -270 ~ 400°C의 측정 범위를 갖는 T-type 열전대를 기본으로 사용하였으며 덕트 내 온습도 측정은 -20 ~ 80°C, 습도 5 ~ 95% 범위를 갖는 덕트용 온습계, 외부 일사는 0 ~ 1,600W/m²의 측정 범위를 갖는 웨더스테이션을 사용하고 데이터 수집은 NI (National Instrument) 사의 DAQ를 사용하였다. 전력량은 별도로 HIOKI 사의 전력량계를 제품 전원 공급부에 직접 연결하여 측정하였다.

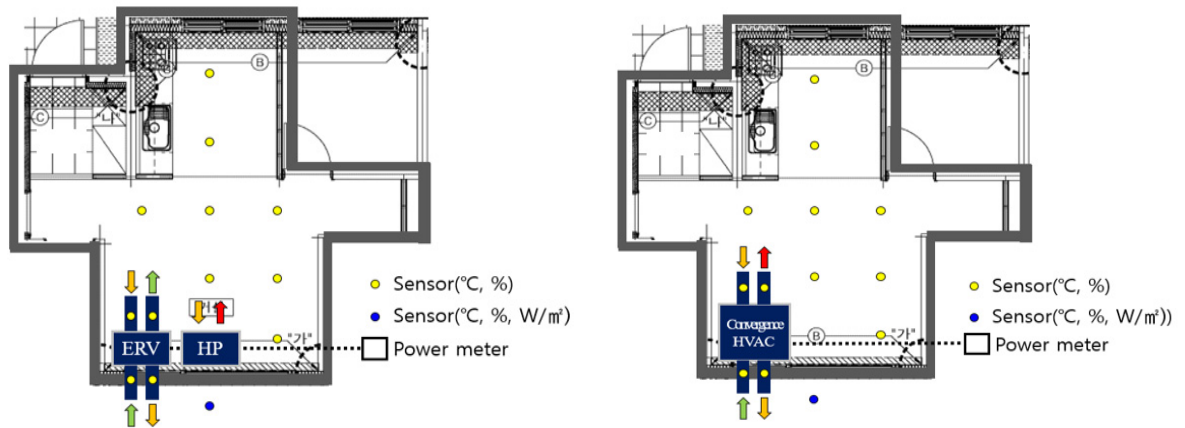


Fig. 3 Overview of measurement

3. 실증 결과

3.1 외기 온도 비교

모든 데이터 수집은 1분 단위로 24시간 측정하였으며, 외기조건이 동일한 상태로 측정할 수 없기 때문에 비교 군의 절대 비교는 불가능하므로 먼저 각각의 측정 기간 중 외기 조건이 유사한 기간을 선정하기 위해 외기온도 및 일사량을 비교하였다.

1월부터 2월 동안 최저기온 -8 ~ -10°C, 최고기온 3 ~ 7°C를 나타내는 기간을 선정하였고 다음 Fig. 4와 같다. 실증의 한계로 장기간 유사한 외기조건을 선정하는데 어려움이 있어 측정 기간 중 실제 에너지 소비량을 비교한 기간은 3일로 선정 기준은 최저기온, 최고기온, 평균온도 그리고 일사량 및 기타 기상조건(강설)으로 하였다.

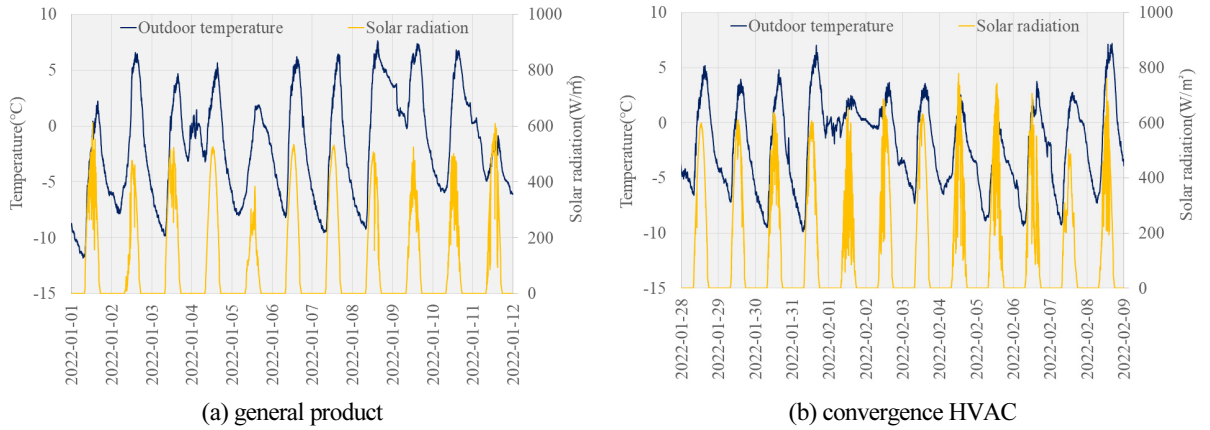


Fig. 4 Daily solar radiation and outdoor temperature

3.2 외기 조건에 따른 에너지소비량 비교

Fig. 5는 비교 군의 외기온도 변화에 따른 에너지 소비량을 나타낸 그래프로 기존 시제품이 설치된 측정 기간 3일 동안 외기 최고온도는 6.4°C, 외기 최저온도 -9.5°C, 외기 평균온도 -약 2.6°C로 나타났고 실내온도는 평균 22.6°C를 유지하였다. 융복합 HVAC이 설치된 측정 기간 3일 동안의 외기 최고온도는 5.2°C, 외기 최저온도 -9.5°C, 외기 평균온도 -약 2.3°C로 나타났고 실내온도는 평균 23.1°C를 유지하였다. 소비전력의 경우 외기온도 변화에 따라 증가, 감소되는 추세를 나타내고 있다. 최대 소비전력은 기존 제품이 861 W, 융복합 HVAC이 731 W으로 측정되었으며, 비교 군 모두 최저 외기 온도 구간(-8 ~ -10°C)에서 나타내었고 평균 소비전력은 기존 제품이 527 W, 융복합 HVAC이 353 W으로 측정되었다. 비교군의 3일간 누적소비전력량을 분석한 결과, 기존 제품이 38 kWh, 융복합 HVAC이 25.4 kWh로 약 33%의 소비전력량 절감을 나타내고 있다. 비교 군의 소비전력 차이가 크게 나타난 이유로는 융복합 HVAC이 전열교환기와 히트펌프가 패키지 되면서 급기온도가 송풍팬이 줄어들어 송풍팬 소비전력의 감소와 개발 제품의 특성상 에너지효율 극대화를 위해 고효율의 가변형 압

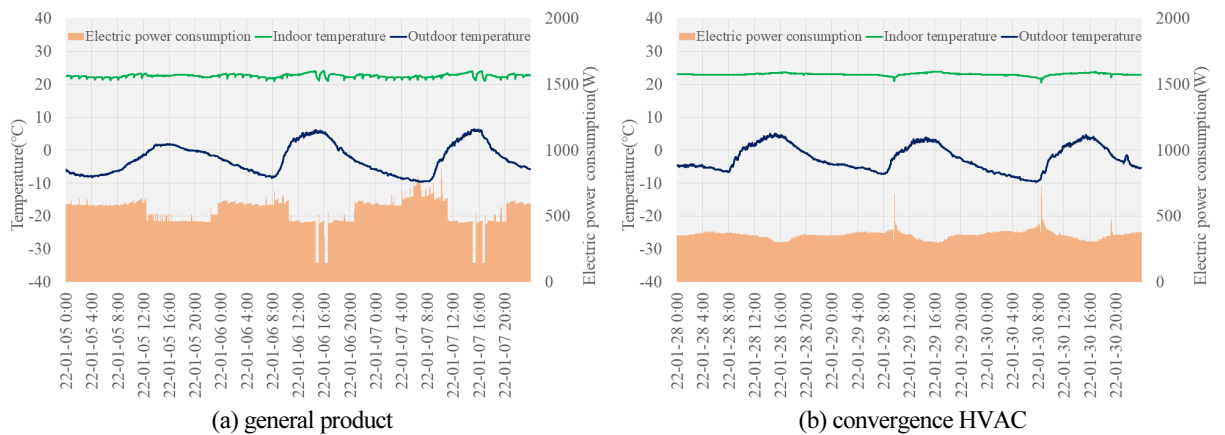


Fig. 5 Comparison of energy consumption

축기를 적용시키고 열교환된 외기가 바로 실내로 들어오는 일반 제품과 달리 히트펌프를 통해 외기가 가열되어 실내로 유입되기 때문에 온도 손실에 따른 에너지 소비를 줄인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 이전 연구를 통해 제안한 융복합 HVAC 모듈의 표준 시험 방법으로 성능을 측정하고 실제 주거용 건물을 대상으로 일반 시제품(히트펌프, 환기장치 별도)과 개발 제품(히트펌프 + 환기장치 복합)의 에너지 성능을 비교 분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 융복합 HVAC의 표준 시험 방법에 의해 측정된 성능은 환기모드에서 전열교환효율 76%, 난방모드에서 COP 3.68로 일반 제품과 비교했을 때 동급 이상의 성능을 나타냈다.
- (2) 일반 시제품(히트펌프, 환기장치 별도)에 비하여 제안된 개발 제품(히트펌프+환기장치 복합)이 실증을 통해 실내 온도 평균 $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 유지하는 조건에서 전력 소비량 약 33% 이상 저감됨을 확인하였다.
- (3) 전력 소비량의 차이가 크게 나타난 이유로는 융복합 HVAC이 전열교환기와 히트펌프가 패키지 되면서 중복되는 송풍팬의 개수가 줄어들어 팬 소비전력이 감소되었고, 열교환된 외기가 실내로 들어오는 일반 제품과 다르게 히트펌프를 통해 외기가 가열되어 실내로 직접 유입되기 때문에 실내 온도 손실이 적고 또한 열교환 후 배기(RA)되는 공기가 다시 Evaporator를 통과하면서 열교환이 이루어져 히트펌프의 열교환효율을 높여 보다 적은 전력 소비량을 보인 것으로 분석하였다.

본 연구를 통해 일반 시제품(히트펌프, 환기장치 별도)과 개발 제품(히트펌프 + 환기장치 복합)의 동절기 난방 성능을 실증 비교를 통해 비교하였다. 추후 하절기 냉방운영 환경에서의 에너지 성능을 비교하고 온습도 및 전력 측정 조건을 각 구성별(팬, 압축기 등)로 더 세분화하여 비교 분석할 경우 구체적으로 에너지 절감 및 효율 운전 방안을 제안할 수 있을 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 산업기술혁신사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (과제번호 : 20209410100080).

REFERENCES

1. Kim, C. H., Yeon, S. H., and Lee, K. H., Analysis of Thermal Environment and Energy Performance by Chilled Water Valve Stiction for AHU Fault Detection Diagnosis, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 41, No. 2, pp. 624-625, 2021, 2287-5786.
2. Yang, J. K., Lee, C. J., and Park, S. H., An Anlysis of Heating and Cooling Load for Efficient Dehumidification and Ventilation System in Small Residential Facilities, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 41, No. 1, pp. 667-668, 2021, 2287-5786.

3. Lee, H. C., Hwang, I. J., and Shin, H. J., A Case Study of Hybrid Air Conditioning and Ventilation System, Journal of the SAREK, pp. 89-94, 2008.
4. Choi, J. S., Lee, H. C., and Hwang, I. J., An Experimental Study on the Control Characteristics of IHVAC Unit with an Air Source Heat Pump, Journal of the SAREK, pp. 194-197, 2011.
5. Feist, W., Schniders, J., Dorer, V., and Hass, A., Re-inventing Air Heating Convenient and Comfortable within Frame of the Passive House Concept, Energy and Buildings, Vol. 37, pp. 1186-1203, 2005.
6. KS C 9306:2017, Air Conditioners, Korea Standards Association.
7. KS B 6879:2015, Heat-recovery Ventilators, Korea Standards Association.