



RESEARCH ARTICLE

유기랭킨사이클을 결합한 제습증발냉각 기반 공동주택 중앙 환기 시스템의 에너지 성능 분석

김범준 · 동혜원 · 정재원*

한양대학교 대학원 건축공학과

Energy Performance Analysis of Liquid Desiccant Assisted-Dedicated Outdoor Air System with Organic Rankine Cycle to an Apartment Central Ventilation System

Kim, Beom-Jun · Dong, Hye-Won · Jeong, Jae-Weon*

Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

*Corresponding author: Jeong, Jae-Weon, Tel: +82-2-2220-2370, E-mail: jjwarc@hanyang.ac.kr

ABSTRACT

A liquid desiccant-assisted dedicated outdoor air system (LDADOAS) with organic Rankine cycle (ORC) was proposed as a centralized ventilation system applicable to high-rise apartment buildings. The LDADOAS consists of a liquid desiccant dehumidifier and an indirect evaporative cooler for conditioning the minimum required outdoor air ventilation. The ORC considered in this research is a combined heat and power system to accommodate common electricity demand of the apartment building. The heat released from the ORC is used for regeneration of the desiccant solution in the proposed system. Energy performance of the proposed system was compared with existing dedicated outdoor air systems via detailed energy simulation. The result showed that the LDADOAS consumed 48% less primary energy consumption compared with conventional dedicated outdoor air system considered in this work because most of regeneration heat required for the proposed system was supplied by the waste heat recovered from the ORC.

주요어 : 유기랭킨사이클, 액체식 제습 시스템, 외기전담 시스템, 중앙 환기, 공동주택

Keywords: Organic Rankine cycle, Liquid desiccant system, Central ventilation system, Dedicated outdoor air system, Apartment building

서론

유기랭킨사이클(organic Rankine cycle, ORC)은 전기와 열을 생산하는 열병합발전 시스템으로서 기존 랭킨사이클과 달리 태양열, 지역 열원, 산업 폐열원 등의 저열원으로 발전이 가능하여 최근 많은 연구가 진행되었다. 저열원들은 기존 건물들에서도 다수 사용되고 있기 때문에, ORC역시 고층 공동주택의 열병합발전 시스템으로서 적용 가능성이 있다. ORC와 같은 열병합발전 시스템의 에너지 사용 효율을 극대화하기 위해서는 열원구동공조기 또는

OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2019 October, 13(5): 394-402
<https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20190034>

pISSN : 1976-6483
eISSN : 2586-0666

Received: October 7, 2019

Revised: October 22, 2019

Accepted: October 24, 2019

© 2019 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

열원구동환기시스템이 적합할 수 있다(Wang et al., 2011a).

최근 액체식 제습증발냉각 환기시스템은 건물 공조 및 환기에 디커플링(decoupling) 시스템으로 제안되었다. 현열냉각기능과 잠열냉각기능의 분리는 디커플링의 핵심개념으로 시스템의 과부하를 방지하며, 효율적인 에너지 사용이 가능하다(Xiao et al., 2011). 액체식 제습시스템은 제습부에서 외기의 제습이 이루어지고, 묶어진 제습수용액은 재생부로 이동하여 재생이 이루어지는데, 이때 재생 효율을 증가시키기 위해 제습수용액을 55-60°C로 가열한다(Fumo and Goswamim, 2002). 선행연구에서는 보일러, 태양열 시스템, 지역열원등의 다양한 열원들이 제습수용액의 재생열원으로 연구되었으며, 고분자 전해질 연료전지(Jo and Jeong, 2015), 태양광 발전 및 태양열 시스템(Buker et al., 2015), 천연가스 연소 내연 엔진(Fu et al., 2009)등의 열병합발전 시스템에서 방출되는 폐열원 역시 액체식 제습시스템의 재생열원으로 연구된 바 있다. 그러나, 현재까지 ORC를 액체식 제습시스템에 접목시킨 사례는 매우 미흡하며, 바이오매스를 열원을 사용한 사례가 있으나 해당 연구는 ORC의 증발 열원과 액체식 제습시스템의 재생 열원 모두 바이오매스열원을 사용하였으며, ORC의 폐열원은 대기중으로 방출하였다(Jradi and Riffat, 2014).

본 논문은 ORC의 폐열원을 제습시스템의 재생열원으로 사용하는 제습증발냉각 환기시스템(liquid desiccant assisted-dedicated outdoor air system, LDADOAS)을 초고층 공동주택의 중앙환기시스템에 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 성능 비교를 위해 기존의 전열교환기를 사용하는 외기전담 환기시스템(dedicated outdoor air system, DOAS)을 함께 시뮬레이션 하였다. 본 연구 결과는 ORC에서 생산된 전기와 열에너지가 공동주택에서 소비되는 에너지 절감에 대한 정보제공 및 ORC 사이징에 대한 전략도출에 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 2030년부터 모든 건축물이 제로에너지건축물 인증이 의무화 되는 만큼 설비실무자에게 공동주택건물에 중앙환기시스템과 신재생에너지를 도입하였을 때 취득 가능한 이익에 대한 인식 제고와 필요한 정보들을 제공하고자 한다.

시스템 개요

제습증발냉각 환기시스템

본 연구에서 제안된 LDADOAS는 외기를 100% 사용하는 공동주택의 중앙 환기시스템으로서 액체식 제습시스템과 간접식 증발냉각기로 구성되었다(Figure 1). 급기 풍량은 환기기준에 따라 최소환기량만큼 유입된다(ASHRAE Standard 62.2, 2016). 제안된 환기시스템에 여름철 덥고 습한 외기가 제습부 측으로 유입된다. 30-40%의 LiCl 제습수용액이 제습부에서 뿌려져 습공기와 만나 외기 측의 수증기가 수증기 분압차에 의해 제습수용액에 흡수된다. 이때의 제습 과정은 발열과정이기 때문에, 제습부에 뿌려지기 전 제습수용액은 제습 성능을 위해 20-28°C로 냉각 되어야 한다(Gommed and Grossman, 2004). 본 연구에서는 냉각탑을 사용하여 제습수용액을 냉각시키는 것으로 시뮬레이션 하였다. 제습후 묶어진 제습수용액은 이후의 제습을 위해 재생부로 이동하여 재생부에 뿌려지면서 외부공기와 만나 재생이 이루어지게 된다. 이때 제습수용액은 재생 효율을 증가시키기 위해 55-60°C로 가열되는데, 이때의 재생 열원은 ORC에서 버려지는 폐열을 사용하여 제습수용액을 가열하였다.

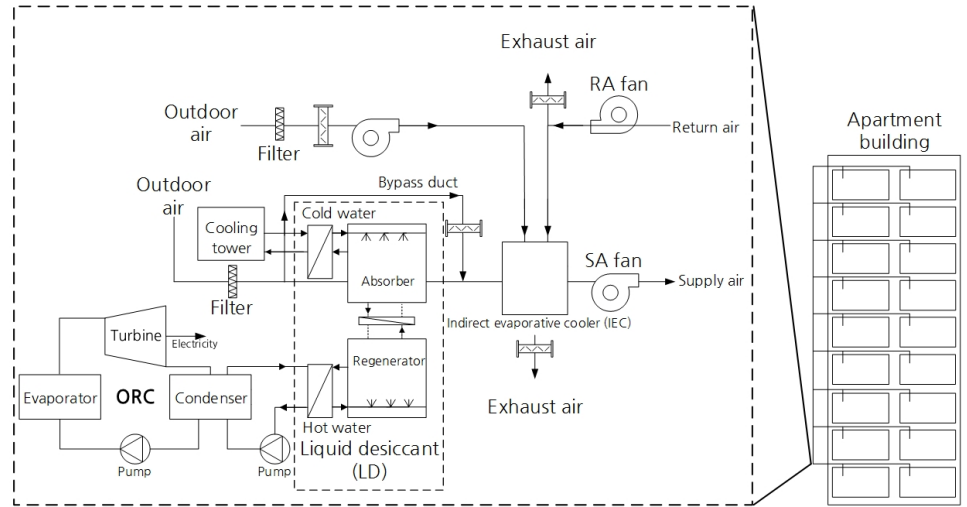


Figure 1. Schematic of liquid desiccant assisted-dedicated outdoor air system

외기의 절대 습도가 실내의 목표 절대습도보다 높으면(e.g., 0.01 kg/kg), 액체식 제습시스템이 가동되어 목표 절대 습도 이하로 외기를 제습 시키고, 그렇지 않다면 제습시스템을 가동하지 않는다. 이후 급기의 목표 온도를 맞추기 위해 간접식 증발냉각기가 가동되어 급기를 냉각시킨다. LDADOAS는 환기와 잠열부하만을 담당하기 때문에, 실내의 남은 현열 부하는 각 세대별로 병렬냉각시스템을 설치하여 해결하는 것으로 시뮬레이션 하였다.

액체식 제습시스템의 재생부와 연결된 ORC는 ORC와 재생부로 열을 전달하기 위한 water loop로 구성되어있다. 액체상태의 유기 냉매가 열원에 의해 증발하여 터빈으로 이동한다. 터빈은 고온 고압의 증기 상태의 냉매를 받아 전기를 생산하고 이후 냉매는 응축기로 이동하여 열을 방출하면서 액체 상태가 되어 펌프구동력에 의해 증발기로 이동하여 사이클을 반복한다. 방출된 열은 water loop로 이동하고 이후 액체식 제습시스템의 재생부 측에 있는 열 교환기를 통해 제습수용액에 필요한 열을 공급한다. ORC 성능을 계산하기 위한 식은 다음과 같다(Wang et al., 2011b).

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{tur} - \dot{W}_{pump} \quad (1)$$

$$\dot{W}_{tur} = \dot{m}_{orc} \eta_{tur} (h_{tur.in} - h_{tur.out}) \quad (2)$$

$$\dot{W}_{pump} = \frac{\dot{m}_{orc} (h_{pump.out} - h_{pump.in})}{\eta_{pump}} \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{Q}_{district} = \dot{m}_{orc} (h_{evap.out} - h_{evap.in}) \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{orc} (h_{cond.in} - h_{cond.out}) \quad (5)$$

여기서 \dot{W} 는 전력(kW), \dot{Q} 는 열에너지(kJ), \dot{m} 는 냉매 유량(kg/kg), η 는 시스템 효율, h 는 엔탈피(kJ/kg)이다.

외기전담시스템

에너지절감 비교를 위해 선정된 기존 DOAS를 Figure 2에 나타내었다. DOAS는 외기를 100% 사용하는 환기시스템으로 전열 교환기, 직팽식 냉각 코일, 현열교환기로 구성되어있다(Jeong et al., 2003). 급기 풍량은 환기 기준에 따라 최소환기량만큼 유입되며, 유입된 습공기가 전열교환기와 만나 제습이 이루어진다. 전열 교환기 이후 공기가 실내 목표 절대 습도(e.g., 0.01 kg/kg)에 도달하지 못하면 직팽식 냉각 코일을 사용하여 응결 제습을 통해 목표 절대 습도 조건을 만족시켜준다. 이때의 급기 온도는 실내 재실자들이 불쾌감을 줄 수 있는 7-8°C이기 때문에 현열교환기를 통과시켜 약간의 재열을 가해준다. 여름철을 기준으로 시뮬레이션 하였기 때문에 전열교환기와 현열 교환기 모두 최고스피드인 20 rpm으로 가정하였고, 이에 따라 열 교환 효율을 각각 80%로 가정하였다.

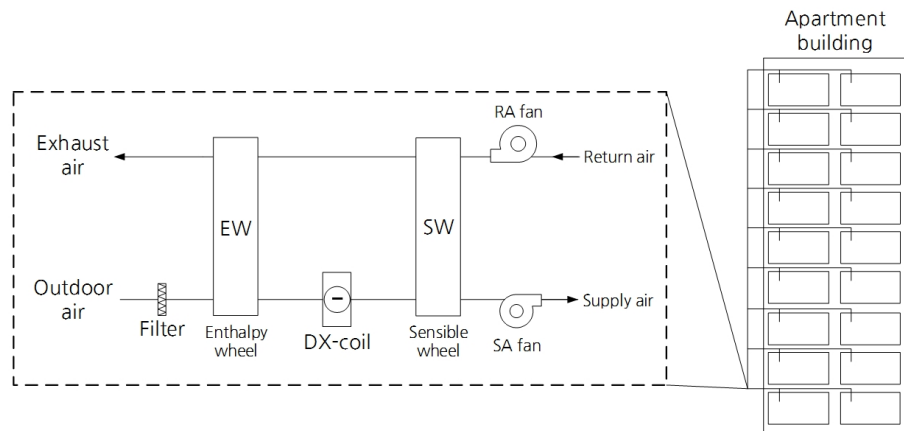


Figure 2. Schematic of reference dedicated outdoor air system

시뮬레이션 개요

건물 부하 산출

시뮬레이션에 사용된 모델 건물은 대한민국 서울 성동구에 위치한 30층 높이의 공동주택을 사용하였으며, 시간당 열 부하는 TRNSYS 18 프로그램을 사용하여 산정하였다. Figure 3은 모델 공동주택의 한 층을 도식화한 것이며, 각 층 높이는 3 m이고, 각 세대 면적은 170-m² 1세대, 150-m² 2세대, 140-m² 1세대이다. U-value값은 대상 건축물이 2018년에 완공되었기 때문에 에너지절약설계기준을 충족한것으로 가정하였다. 자세한 건물 정보는 Table 1에 나타내었다.

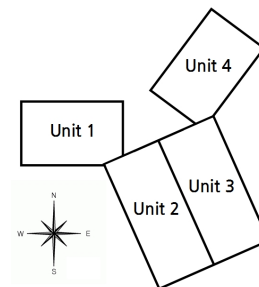


Figure 3. Schematic of model building floor plan

Table 1. Model building information for determining thermal loads

Location	Occupants	Room set point	Supply air set point	Heat gain	U-value
Seoul, South Korea	4 people / unit	Summer 26°C 50%	Neutral temperature 20°C	Person	Exterior wall
				75 W/person	0.359 W/m ² K
				Equipment	Floor
				8 W/m ²	0.352 W/m ² K
Light	Window				
2.7 W/m ²	1.12 W/m ² K				

각 세대별 최소 환기량 기준과 실내 잠열 부하에 대한 식은 ASHRAE Standard 62.2와 ASHRAE Handbook에 따라 다음과 같이 나타내었다(ASHRAE Handbook, 2017).

$$\dot{V}_{tot} = 0.15A_{floor} + 3.5(N_{br} + 1) \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{lat} = 20 + 0.22A_{floor} + 12N_{oc} \quad (7)$$

여기서 \dot{V} 는 체적 유량(m³/s), A 는 세대 넓이(m²), N 는 침실 개수, \dot{Q} 는 열에너지(kJ)이다.

유기랭킨사이클 발전용량 산정

본 연구에서 고려된 ORC의 발전용량은 모델 공동주택의 공용 전기를 담당하는 것을 기준으로 산정하였다. 즉, 주차장 및 엘리베이터, 복도 조명, 커뮤니티 시설 운영에 필요한 전기수요등을 담당하는 것으로 가정하였다. Choi et al. (2012)은 한국의 아파트 평면 타입 별 연간 세대전 기소비량 및 공용전기소비량을 조사한 바 있다. 그 중 본 연구에서 선택한 모델 공동주택 평면 타입의 공용전기소비량은 연간 9.07 kWh/m²으로 나타났다. 따라서, 선행연구의 해당 공용전기소비량을 본 연구의 모델 공동주택에 적용하여 공동주택 한 동의 시간당 공용전기소비량을 산정하였다. 공동주택의 공용 면적은 건설회사에서 제공하는 데이터를 Table 2에 나타내었다. 그 결과, 한 층당 공용전기소비량은 0.47 kWh이며, ORC 한 대의 발전용량을 0.5 kW로 산정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 따라서 공동주택 한 동을 위한 총 ORC 발전용량은 15 kW 이다.

Table 2. Common area information of model building

	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4
Residential common area	36.89 m ²	32.04 m ²	32.04 m ²	31.61 m ²
Extra common area	8.76 m ²	7.42 m ²	7.42 m ²	7.43 m ²
Underground parking lot area	82.05 m ²	69.47 m ²	69.47 m ²	69.54 m ²
Unit total area	127.7 m ²	108.93 m ²	108.93 m ²	108.58 m ²
A floor total area	454.14 m ²			

ORC에 사용된 냉매는 지역 열원을 사용할 수 있으면서 제습수용액에 충분한 열을 전달해 줄 수 있는 Novec 649를 선택하였다. Novec 649의 증발 온도는 104.6°C, 응축 온도는 60.8°C이다. Water loop의 물 순환 유량은 ORC의 폐열을 모두 수용하면서 제습수용액에 열을 전달해 줄 수 있도록 1.5 kg/s로 가정하였다.

에너지 소비량 계산

LDADOAS와 기존 DOAS의 각 구성요소에 대한 에너지 시뮬레이션은 EnergyPlus 모델을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 전열교환기에 대한 에너지 해석은 Jeong et al. (2003)이 제안한 전열교환기의 속도 제어를 통한 실험식을 사용하였다. 액체식 제습시스템의 제습효율식과 재생효율식은 각각 Chung and Luo (1999)모델과 Martin and Goswami (2000)모델을 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

결과 및 토의

에너지 수요량 및 1차 에너지소비량 비교

Figure 4는 전체 시스템에 필요한 에너지 수요량을 계산한 결과이다. 각 시스템에 필요한 에너지 수요량은 기존 DOAS가 676.6 MWh, LDADOAS가 1161.6 MWh 이다. 그 중, 제습 수용액의 재생을 위한 에너지 수요가 LDADOAS 전체 에너지 수요량의 60%에 해당하는 것으로 나타났다. 따라서 각 시스템의 총 에너지 수요량을 비교하였을 때 LDADOAS가 더 많은 에너지가 필요한 것으로 나타났다. 그러나, LDADOAS는 ORC에서 발전 후 버리는 폐열을 재활용하여 재생부 측 제습수용액에 열을 공급하므로 실질적인 에너지 소비량은 발생하지 않으며, 재생을 위한 수용액 목표 온도인 60°C를 맞추지 못할 경우 전기 히터를 가동하기 때문에 약간의 전기에너지가 소비된 것으로 나타났다. 두 시스템의 1차 에너지 소비량을 비교하기 위해 연료와 전기에너지에 대해 한국에너지공단에서 제공하는 1차에너지 변환 계수 (e.g., fuel 1.1, electricity 2.75)를 적용하였다. 그 결과, 최종 1차 에너지 소비량은 기존 DOAS가 1109.2 MWh, LDADOAS가 532 MWh로 본 연구에서 제안된 LDADOAS가 여름철 에너지를 적게 소비하는 것으로 나타났다.

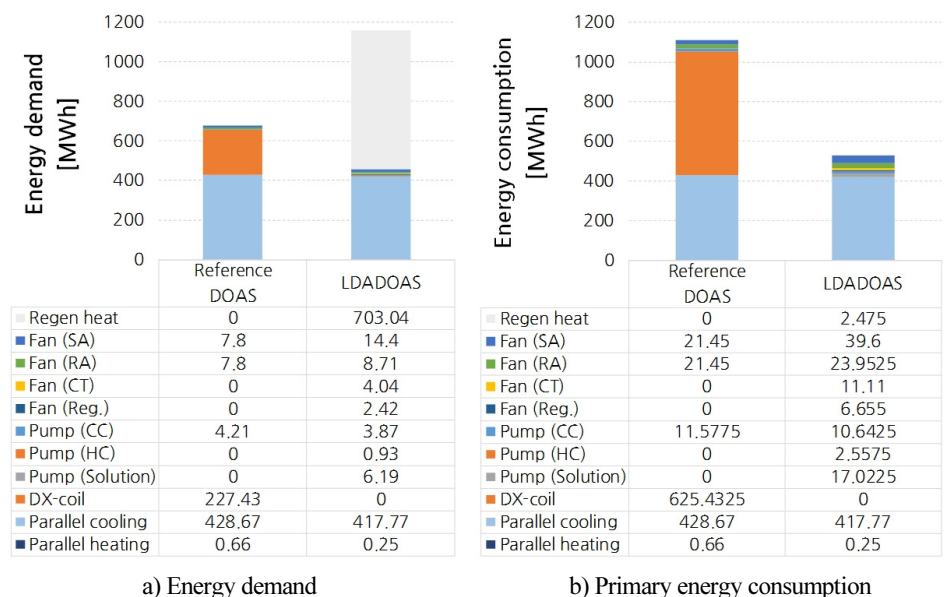


Figure 4. Energy demands and total primary energy consumption in summer

에너지 사용 효율

Figure 5는 여름철 ORC 가동에 사용된 열에너지 대비 공동주택 공용 전기와 LDADOAS에 사용된 ORC 에너지 사용 효율을 시간별로 나타낸 그래프이다. ORC의 증발기 측에 사용된 지역 열원 에너지는 231 kWh이며, 모델 공동주택 한 동의 공용 전기 소비량은 14.1 kWh이다. LDADOAS 외 다른 시스템에 열에너지를 사용하지 않았을 경우 전기에너지 사용에 대한 효율은 6.09%이다. 그러나 여름철 LDADOAS가 급기의 제습을 위해 가동되어 ORC의 폐열을 회수하여 전기에너지와 열에너지를 모두 사용하였을 경우 60.19-88.83%의 에너지 사용 효율을 보인 것으로 나타났다.

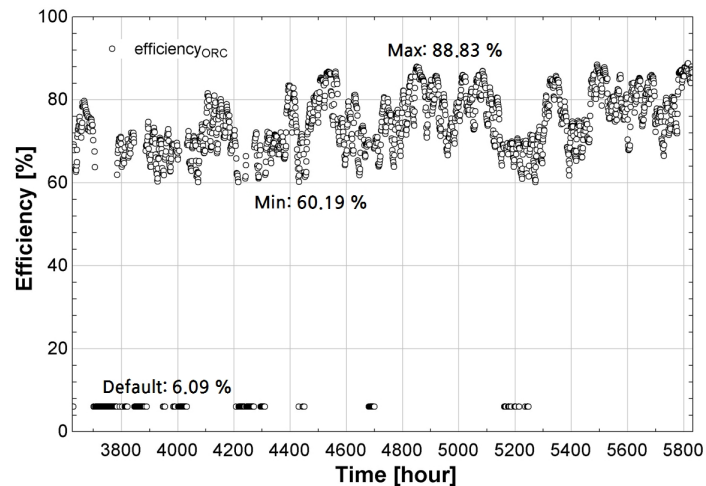


Figure 5. Energy efficiency of ORC in summer

결론

- (1) ORC를 결합한 LDADOAS의 공동주택 중앙 환기 적용에 대한 에너지 절감 분석을 진행하였다. ORC의 발전용량을 산정하기 위해 공동주택에서의 공용 전기 소비량을 담당할 수 있는 양으로 설정하였으며, 이때 발생하는 폐열을 LDADOAS의 재생부 제습수용액의 재생열원으로 활용하였다. 이는 ORC를 결합한 LDADOAS가 공동주택의 공용전기 에너지와 열구동 제습시스템의 재생열원까지 모두 담당할 수 있음을 시사한다.
- (2) 에너지 수요측면에서는 LDADOAS가 기존 DOAS보다 1.72배 더 많이 필요한 것으로 나타났으나, 1차 에너지 소비량을 비교한 경우 LDADOAS가 기존 DOAS보다 48%의 여름철 1차 에너지 절감효과를 보인 것으로 나타났다. 또한, LDADOAS에서 ORC의 폐열을 회수하여 가동할 시 ORC의 에너지 사용 효율이 60.19-88.83%로 나타났다.
- (3) 본 연구에서 제안된 환기시스템은 여름철 공동주택의 중앙 환기시스템으로 사용 시 기존 환기시스템에 비해 에너지 절감효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 또한 ORC 시스템을 액체식 제습시스템과 함께 사용할 경우 여름철에도 열에너지를 충분히 활용할 수 있어 공동주택에 본 환기시스템을 도입할 시 건물운영단계에서 효율적인 에너지 사용이 가능할 수 있다.

- (4) 초고층 건물의 경우 높이가 증가함에 따라 공동주택의 고층부에서는 풍압이 증가하여 환기시스템의 팬 작동에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 향후 연구에서 초고층건물의 고층부 풍압을 고려할 시 시스템 에너지 소비량이 본 연구 결과와 상이할 가능성이 있다.

후기

본 연구는 2019년도 국토교통과학기술진흥원의 재원으로 국토교통기술촉진연구사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.19CTAP-C141826-02).

References

1. Buker, M.S., Mempo, B., Riffat, S.B. (2015). Experimental investigation of a building integrated photovoltaic/thermal roof collector combined with a liquid desiccant enhanced indirect evaporative cooling system. *Energy Convers. Manag.*, 101, 239-254.
2. Choi, I.Y., Cho, S.H., Kim, J.T. (2012). Energy consumption characteristics of high-rise apartment buildings according to building shape and mixed-use development. *Energy Buildings*, 46, 123-131.
3. Chung, T.W., Luo, C.M. (1999). Vapor pressures of the aqueous desiccants. *J. Chem. Eng. Data.*, 44, 1024-1027.
4. Fu, L., Zhao, X.L., Zhang, S.G., Jiang, Y., Li, H., Yang, W.W. (2009). Laboratory research on combined cooling, heating and power (CCHP) systems. *Energy Conversion and Management*, 50(4), 977-982.
5. Fumo, N., Goswami, D.Y. (2002). Study of an aqueous lithium chloride desiccant system: Air dehumidification and desiccant regeneration. *Solar Energy*, 72(4), 351-361.
6. Gommed, K., Grossman, G. (2004). A Liquid Desiccant System for Solar Cooling and Dehumidification. *Journal of Solar Energy Engineering*, 126(3), 879-885.
7. Jeong, J.W., Mumma, S.A., Bahnfleth, W.P. (2003). Energy conservation benefits of a dedicated outdoor air system with parallel sensible cooling by ceiling radiant panels. *ASHRAE Transactions*, 109(PART 2), 627-636.
8. Jo, S.Y., Jeong, J.W. (2015). Analysis of primary energy saving for PEM fuel cell with a liquid desiccant and evaporative cooling-assisted all outdoor air system. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 9(4), 292-297.
9. Jradi, M., Riffat, S. (2014). Experimental investigation of a biomass-fuelled micro-scale tri-generation system with an organic Rankine cycle and liquid desiccant cooling unit. *Energy*, 71, 80-93.
10. Martin, V., Goswami, D.Y. (2000). Effectiveness of heat and mass transfer processes in a packed bed liquid desiccant dehumidifier/regenerator. *HVAC&R Research*, 6(1), 21-39.
11. Wang H., Peterson R., Herron T. (2011a). Design study of configurations on system COP for a combined ORC (organic Rankine cycle) and VCC (vapor compression cycle). *Energy*, 36, 4809-4820.

12. Wang H., Peterson R., Harada K., Miller E., Ingram-Goble R., Fisher L., Yih J., Ward C. (2011b). Performance of a combined organic Rankine cycle and vapor compression cycle for heat activated cooling. *Energy*, 36, 447-458.
13. Xiao F., Ge G., Niu X. (2011). Control performance of a dedicated outdoor air system adopting liquid desiccant dehumidification. *Appl. Energy*, 88, 143-149.
14. ASHRAE Handbook. (2017). Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
15. ASHRAE Standard 62.2. (2016). Ventilation and acceptable indoor air quality in low-rise residential buildings. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.