

수열원 열펌프 적용 건물에서 수열시스템 통합 설계 프로그램과 ECO2 프로그램의 에너지 성능 예측 결과 비교

Comparative Analysis of the Energy Performance Simulation for a Building with a Hydrothermal Heat Pump by the Hydrothermal System Integrated Design Program and the ECO2 Program

홍정택(Jeong Taek Hong), 윤린(Rin Yun)*, 박창용(Chang Yong Park)**†

서울과학기술대학교 일반대학원 석사과정, *한밭대학교 기계공학과 교수,

**서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 교수

Master Course of Graduate School, Seoul Nat'l Univ. of Sci. & Tech., Seoul 01811, Korea

**Professor, Dept. of Mechanical Eng. Hanbat Nat'l Univ., Daejeon 34158, Korea*

***Professor, Dept. of Mech. Sys. Design Eng., Seoul Nat'l Univ. of Sci. & Tech., Seoul 01811, Korea*

Abstract

Building energy analysis is crucial for the application of a hydrothermal heat pump in a building's HVAC system. In this study, two building energy analysis programs, ECO2 and HSID (Hydrothermal System Integrated Design), were used to simulate the energy performance of a non-residential building, and their results were compared. The HSID program predicted a 38.9% higher building cooling and heating load than the ECO2 program. Regarding annual heating and cooling energy consumption, the HSID and ECO2 programs calculated 107.1 kWh/m²·yr and 42.1 kWh/m²·yr, respectively, revealing a significant difference between the two. The discrepancy in simulation results was attributed to differences in the simulation methods, building input variables, and the HVAC system modeling capabilities of the two programs. Even for buildings with high insulation performance, achieving ZEB (Zero Energy Building) certification was not possible by applying only the hydrothermal heat pump HVAC system. While improvements in COP and reductions in pump power consumption could increase the energy independence rate, it was confirmed that the additional integration of renewable energy sources is necessary to achieve ZEB certification.

Key words: Building energy analysis(건축물 에너지 분석), Energy consumption(에너지 소비), Cooling and heating load(냉난방 부하), Hydrothermal Energy(수열 에너지), ECO2 program(ECO2 프로그램)

†Corresponding author

E-mail: cypark@seoultech.ac.kr

접수일: 2024년 09월 23일; 심사일: 1차:2024년 10월 21일, 채택일: 2024년 11월 15일

1. 서 론

점점 심각해지는 기후변화에 대응하기 위해 세계 195개국은 2015년 파리기후변화협약을 체결하여 온실가스 배출 감축을 위해 노력하고 있으며, 우리나라도 2030년까지 온실가스 배출량을 2018년 대비 40%를 감축하는 것을 목표로 하고 있다. 2022 유엔 건축물 및 건설에 대한 글로벌 현황 보고서[1]는 건물 분야에서 배출되는 온실가스가 전 세계 배출량의 37%를 차지하는 것으로 평가하였으며, 이에 따라 건물 부문에서

온실가스 배출 감축은 매우 중요하게 인식되고 있다.

국내에서는 건물 에너지 소비를 절감하기 위해 건물에서 소비하는 에너지 일부를 신재생 에너지로 대체하여 에너지 소비량을 최소화하고 에너지자립률을 높이는 제로에너지 건축물(ZEB) 인증제도를 시행하고 있다. ZEB 인증제도는 단열, 기밀성능 등을 강화하여 냉, 난방 에너지요구량을 최소화하는 패시브 기술과 고효율 설비를 적용하는 액티브 기술을 적용하여 건축물의 에너지 소비량을 낮추고, 신재생 에너지를 활용한 전기와 연료 사용 절감을 통해 건물의 운영 과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 줄이는 것을 목표로 한다. 현재 ZEB 인증은 한국건설기술연구원에서 개발한 건축물 에너지 시뮬레이션 프로그램인 ECO2를 통해 수행된다. ECO2의 현실성과 정확성에 대한 다양한 의견이 존재하지만, ECO2는 ZEB 인증을 위해 사용되는 중요한 프로그램이므로 이에 관한 연구[2-4]가 존재한다.

ZEB 인증을 획득하기 위해서는 최소 20% 이상의 에너지자립률을 만족해야 하며, 이를 위해 신재생 에너지 활용이 필수적이다. ECO2 프로그램에서 고려할 수 있는 신재생 에너지는 태양열, 태양광, 열병합, 지열, 수열 등이 있으며, 이러한 신재생 에너지원 중 최근 수열 에너지에 관한 관심이 높다. 수열 에너지는 바다, 강, 호수에 존재하는 물의 온도가 대기 온도보다 여름철에 낮고 겨울철에 높으며, 공기 대비 비열이 큰 물의 특성을 이용한 에너지이다. 2019년 신재생에너지법 시행령 일부가 개정되어 시행되면서 기존 해수 표층수에서 하천수, 댐, 광역원수까지 확대되어[5] 이를 활용하기 위한 다양한 연구[6-10]가 진행되었다.

수열 에너지를 활용한 시스템은 다른 신재생 열에너지를 활용하는 시스템과 유사하게 초기 설치 비용을 운전 비용 절감을 통해 회수하는 방식으로 경제성을 확보한다. 따라서, 수열 에너지를 활용한 냉난방 시스템을 적용하기 위해 경제성 평가는 필수적이다. 그러나, 건축물의 용도와 부하특성, 수열원의 온도, 기후 등에 따라 에너지의 생산과 소비 특성은 크게 달라진다. 또한, 경제성 평가를 위해서는 기존 기술로 설치된 건축물 냉난방 시스템의 설치비용과 에너지 소비를 예측하고 이를 수열원 시스템과 비교해야 한다. 하지만, 이를 타당하게 수행하는 것은 매우 어려운 작업이며, 객관성을 확보하기도 쉽지 않다.

이러한 기술적 어려움과 현실적 필요성에 의해 환경부의 지원으로 Web을 기반으로 구동되는 수열시스템 통합 설계 프로그램이 개발되었다[11]. 이 프로그램은 건축물 에너지에 대한 동적 시뮬레이션 프로그램인 TRNSYS의 시뮬레이션 결과를 데이터베이스화하여, 건축물의 용도와 면적 등의 정보를 입력하면, 건물의 부하 및 수열원 시스템과 비교 대상 냉난방 시스템의 에너지 소요량을 예측하여 경제성 분석 결과를 제공하도록 하였다. 그러나, 수열시스템 통합설계 프로그램의 건축물 에너지 요구량 및 소요량 예측 결과에 대한 검증은 쉽지 않은 상황이며, 이는 수열원 냉난방 시스템에 대한 장시간 실측 데이터 부족에 기인한다.

따라서, 본 연구에서는 수열시스템 통합 설계 프로그램이 제공하는 건축물 부하 및 에너지 소비량 예측 결과의 타당성을 고려하기 위해 ZEB 인증에 활용되고 있는 ECO2 프로그램을 활용하여 두 프로그램의 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 이를 위해 기존 연구[12]에서 제시된 비거주용 사무실 표준건물의 정보를 두 프로그램에 입력하여 건물의 부하를 계산하였다. 이후 수열 시스템을 적용하였을 때 단위면적당 1차 에너지 소요량, 에너지 자립률 등 에너지 성능을 산출하여 분석하였다. 두 프로그램이 갖는 건축물 에너지 분석 시뮬레이션 방법에는 분명한 차이가 존재하였다. 따라서, 본 연구에서는 두 프로그램 중 어떤 것이 더 우수하거나 정확하다는 것을 논하기보다, 두 프로그램이 갖는 차이점을 확인하고 해석을 수행하여 결과의 차이가 갖는 원인을 파악하고자 하였다.

2. 해석 프로그램

2.1 수열시스템 통합 설계 프로그램

수열시스템 통합 설계(Hydrothermal system integrated design(HSID)) 프로그램은 사용자가 3가지 정보(건물 개요, HVAC System, 전력 및 가스 요금)를 입력하면 건물의 냉난방을 위한 수열시스템이

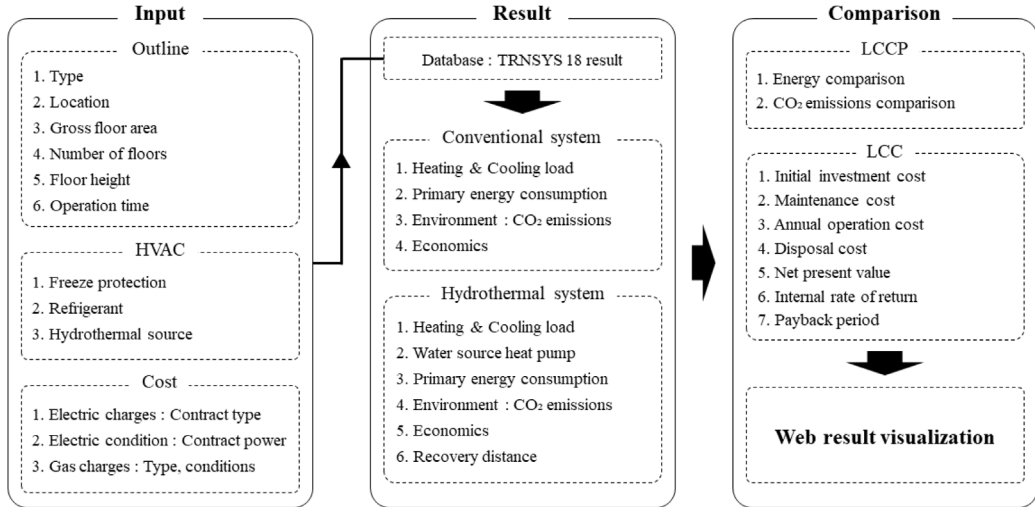


Fig. 1. Hydrothermal system integrated design(HSID) program systematic diagram.

적용되었을 때 Fig. 1과 같이 에너지 요구량, 1차 에너지 소요량, 수열 열펌프 설비 사양, 탄소 배출량, 경제성, 수운 회복 거리를 산출하고, 기존 냉난방 시스템과 수열시스템의 LCCP(Life Cycle Climate Performance), LCC(Life Cycle Cost)를 비교, 분석할 수 있다. 이때 비교 대상인 기존 냉난방 시스템은 공기 열원을 이용한 냉방, 보일러를 이용한 난방 시스템이다. 본 연구는 건축물의 열부하인 에너지 요구량과 예상되는 에너지 소비량인 에너지 소요량 예측 결과를 비교하는 연구이므로 해당 부분에 관해 서술하면 다음과 같다.

수열시스템 통합 설계 프로그램은 동적 건축물 에너지 시뮬레이션 프로그램인 TRNSYS 18을 사용하여 건물의 용도에 따른 모델링을 수행하여 에너지 요구량을 산출하였다. 사무실 건물의 모델링을 위한 정보는 Pacific Northwest National Laboratory(PNNL)에서 제공하는 Large Office 모델을 기준으로 하였다[13].

산출된 에너지 요구량을 만족시키기 위한 수열 냉난방 시스템의 에너지 소비량 예측 역시 TRNSYS 18을 이용한 수열 시스템 모델링을 통해 수행되었으며, 계산된 시뮬레이션 결과는 Web으로 구동되는 수열시스템 통합 설계 프로그램의 데이터베이스로 활용된다.

2.2 ECO2 프로그램

ECO2 프로그램은 국내에서 ZEB 인증을 위해 사용되는 건축물 에너지 분석 프로그램으로, ISO 13790 및 DIN V 18599 그리고 Monthly Calculation Method(월평균 계산 방법)에 기반한 정적 건축물 에너지 시뮬레이션 프로그램이다. Fig. 2와 같이 ECO2 프로그램이 요구하는 입력 정보로는 건물 개요, 입력존, 건축물의 열관류율, 공조처리, 난방기기, 난방공급시스템, 난방분배시스템, 냉방기기, 냉방분배시스템, 신재생 에너지 시스템 등이다. 사용자가 입력한 값과 월별 평균 기상데이터를 바탕으로 난방, 냉방, 급탕, 조명, 환기에 필요한 건물의 에너지 요구량, 소요량, 단위면적당 1차 에너지 생산량 및 소요량, 에너지 자립률의 시뮬레이션 결과를 제공한다. 여기서 에너지 요구량은 재실 인원, 조명기구, 온도 조건 등의 조건에서 실내를 쾌적하게 유지하기 위해 건축물이 요구하는 에너지양을 의미한다. 1차 에너지 소요량은 「건축물 에너지 효율 등급 인증 및 제로에너지 건축물 인증 제도 운영 규정」에서 제시한 1차 에너지 환산 계수를 에너지 소요량에 곱한 값으로, 환산 계수는 최종 소비된 에너지, 예를 들어 전기나 연료 등을 생산하기 위해 자연 상태에서 얻은 에너지를 변환하기 위해 투입된 에너지양을 고려하여 결정된다.

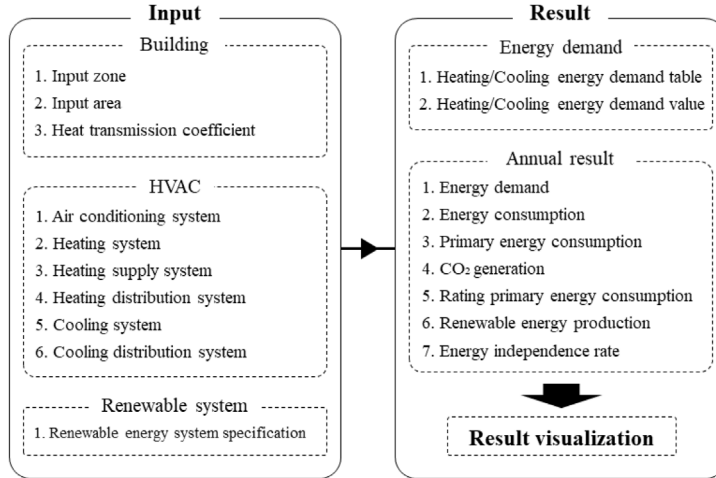


Fig. 2. ECO2 program systematic diagram.

Table 1. ZEB rating according to the EIR (Energy Independence Rate)

ZEB Rating	Energy independence rate(%)	ZEB Rating	Energy independence rate(%)
ZEB 1	100 ≤ EIR	ZEB 4	40 ≤ EIR < 60
ZEB 2	80 ≤ EIR < 100	ZEB 5	20 ≤ EIR < 40
ZEB 3	60 ≤ EIR < 80		

ZEB의 인증 등급은 ECO2 프로그램을 통해 계산된 연간 단위면적당 1차 에너지 소요량과 에너지자립률 결과에 따라 부여된다. 연간 단위면적당 1차 에너지 소요량의 경우 주거용은 90 kWh/m²·yr 미만, 비주거용은 140 kWh/m²·yr 미만을 만족해야 한다. 에너지자립률은 1차 에너지로 환산된 건축물의 신재생 에너지 생산량을 1차 에너지 소요량으로 나누어준 값으로 ZEB 등급의 획득을 위해서는 20% 이상의 값을 만족해야 한다. 각 에너지자립률에 따른 ZEB 등급은 Table 1과 같다.

3. 해석 대상 건축물

본 연구에서는 수열시스템 통합 설계 프로그램과 ECO2 프로그램에서 동일한 비주거용 건축물을 대상으로 건축물 에너지 해석을 수행하였다. 국내 건축물을 대상으로 해석을 수행하기 위해 표준 건축물의 외형과 건축물 방향은 2007년부터 2011년까지 설계된 435개의 국내 비주거용 건축물을 조사하여 대푯값으로 표준건축물을 제시한 연구[12]의 정보를 활용하였다. 표준 건축물은 사무용 건물로 지하 1층, 지상 7층, 건축면적 약 4,440 m², 연면적 20,838 m²이며, 가로 길이 75.7 m, 세로 길이 39.3 m, 건물 외벽과 창문의 비율은 36.9%이다. 또한, 엘리베이터 홀, 계단실 등의 비공조 구역인 코어부는 각 층마다 기준층 중앙에 위치하고, 면적은 기준층 대비 20%로 설정하였다. 건물의 외벽 및 창호의 열관류율은 기존 연구에서 제시한 값이 아닌, 최근 기준을 적용하기 위해 국토교통부에서 제시한 「건축물의 에너지절약설계기준」 [14]을 고려하였다. 해석에 설정된 건축물의 지역은 중부 2지역(서울특별시)으로 가정하였다. 본 연구에서 고려된 사무용 표준 건축물의 외형과 추가적인 정보는 아래의 Fig. 3과 Table 2에 제시되었다.

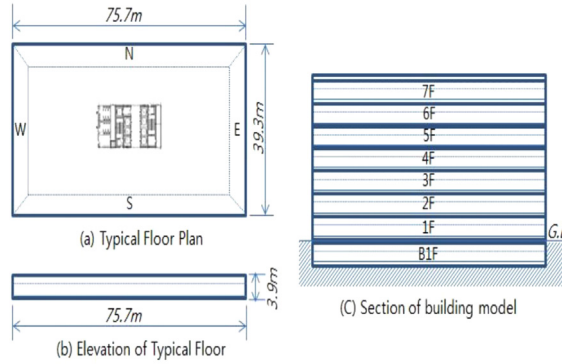


Fig. 3. Reference building modeling[12].

Table 2. Design summary of the reference building

Design element(Outline)	Conditions	Design element(Building)	Analysis condition
Building use	Office building	Region	Central region
Number of floors	7 Floors, B1 Floors	U-value of wall	0.24 W/m ² ·K
Typical floor area	2,976.9 m ²	U-value of roof	0.15 W/m ² ·K
Ceiling height	3.9 m	U-value of window	1.5 W/m ² ·K
Aspect ratio	1 : 1.92	Shading coefficient	0.6
Window-wall ration	36.9%	Air leakage	1.5 ACH
Orientation	South		

4. 해석 조건 설정

4.1 HVAC System

수열시스템 통합 설계 프로그램과 ECO2 프로그램 시뮬레이션 결과를 비교하기 위해 동일한 건축물과 용도에 관한 운영 스케줄 및 냉난방 시스템을 입력해야 한다. 하지만 본 연구에서 두 프로그램에 입력된 냉난방 시스템 정보는 약간 상이하며, 그 이유는 ECO2 프로그램이 수열 냉난방 시스템을 모델링하는 과정에서 축열조를 고려할 수 없고, 용도에 따른 운영 스케줄의 파악과 변경이 어렵기 때문이다. 두 프로그램이 각각 고려한 수열 냉난방 시스템의 개략도는 Fig. 4와 Fig. 5에 제시되었다.

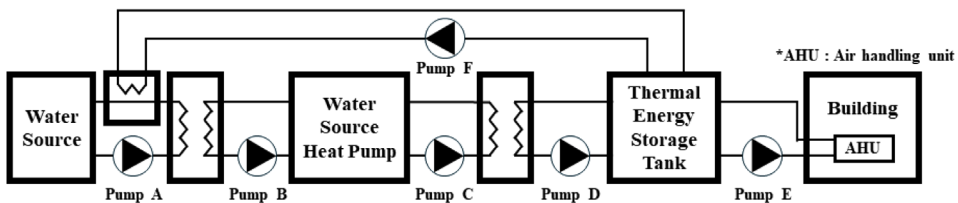


Fig. 4. Schematic diagram of hydrothermal heat pump HVAC system at the HSID program.

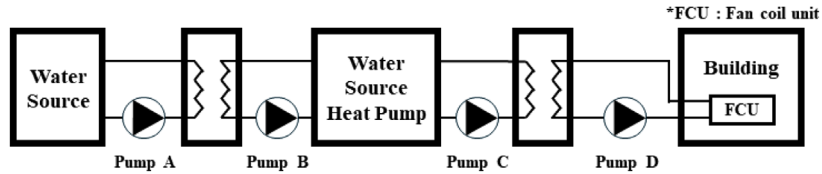


Fig. 5. Schematic diagram of the hydrothermal heat pump HVAC system at the ECO2 program.

Table 3. HSID, ECO2 program input values for the HVAC system

Design element	Input value(HSID)	Input value(ECO2)
Heating, Cooling equipment / Capacity	Water source heat pump / 1950 kW	
Heating COP	5°C : 5.11 / 15°C : 5.3	
Cooling COP	25°C : 5.84 / 35°C : 4.96	
Circulating pump total power	200 kW	160 kW
Air conditioning type and power	Air handling unit(50 kW)	Fan coil unit(50 kW)

Fig. 4에서 제시된 수열시스템 통합설계 프로그램이 고려한 시스템은 좌측부터 원수를 도입하기 위한 원수측 펌프(Pump A), 원수와 히트펌프의 원수 측 브라인과 열교환을 위한 열교환기, 원수 측 브라인 펌프(Pump B), 수열원 히트펌프, 히트펌프의 축열조 측 브라인 펌프(Pump C), 브라인과 축열조의 작동 유체의 열교환을 위한 열교환기, 축열조 순환 펌프(Pump D), 축열조, 부하 측 순환 펌프(Pump E) 그리고, 공조 공간에 열을 공급 또는 흡수하기 위한 공기조화기(Air handling unit) 등으로 구성되어 있다. 추가적으로 겨울철 원수 측 열교환기의 동파를 방지하기 위한 추가적인 루프가 고려되었으며, 축열조의 물을 동결방지 펌프(Pump F)를 이용하여 원수 측 출구부분에 열을 공급하여 동파를 방지하는 개념을 적용하였다. 다만 동결방지 루프를 작동시키는 시간은 수온이 매우 낮은 혹한기이고 상대적으로 짧은 시간이므로 전체적인 에너지의 소비에 대한 영향은 미미하였다.

ECO2 프로그램에서 고려한 수열원 냉난방 시스템의 구성은 Fig. 5에 제시되었다. 전술한 것과 같이 수열시스템 통합설계 프로그램에서 모델링한 시스템과 비교하여 축열조가 포함되어 있지 않으며, 동결방지 루프 역시 고려되지 않았다. 두 프로그램의 입력값을 최대한 유사하게 맞추기 위해 통합설계 프로그램의 시스템 정보에 근거하여 ECO2 프로그램의 시스템 입력변수를 결정하였다. HSID, ECO2 프로그램에서 고려된 설비들의 사양은 Table 3에 요약되었다.

4.2 스케줄, 플러그인 부하 비교

ECO2 프로그램에서는 20가지 항목의 건축물 용도를 설정할 수 있으며, 용도에 따라 인체 발열, 기기 발열, 연간 사용 일수 등이 각기 다른 설정값이 구성되어 있다. 본 연구에서 건축물 용도는 대규모 사무실(30 m² 이상)로 설정하였으며, 해당 용도 프로파일에 대한 정보[15]는 Table 4에 요약되었다. 수열시스템 통합 설계 프로그램 내에서 환기에 대한 소요량은 침기에 의한 자연 환기로 고려하였기 때문에 ECO2도 동일한 조건으로 1.5 ACH를 입력하여 냉난방 요구량에 포함되도록 고려하였다. 여기서 ACH(Air Change per Hour)는 1시간당 실내 공기 체적만큼의 실외공기가 교체된 횟수를 의미한다.

수열시스템 통합 설계 프로그램은 Pacific Northwest National Laboratory(PNNL)[13]에서 제공하는 스케줄로 고려되었으며, ECO2 프로그램과는 상이한 부분이 존재한다. ECO2 프로그램에서 정해진 시간에서 On/

Table 4. Usage profile of large office(larger than 30 m²) in the ECO2 program

Profile	Value
Usage time / Operating time	09:00 ~ 18:00 / 07:00 ~ 18:00
Minimum ambient air	6 m ³ /hm ²
Internal heat gain (People / Device)	55.8 Wh/m ² day / 126 Wh/m ² day
Set point temperature	Heating 20°C / Cooling 26°C
Use day	261 days

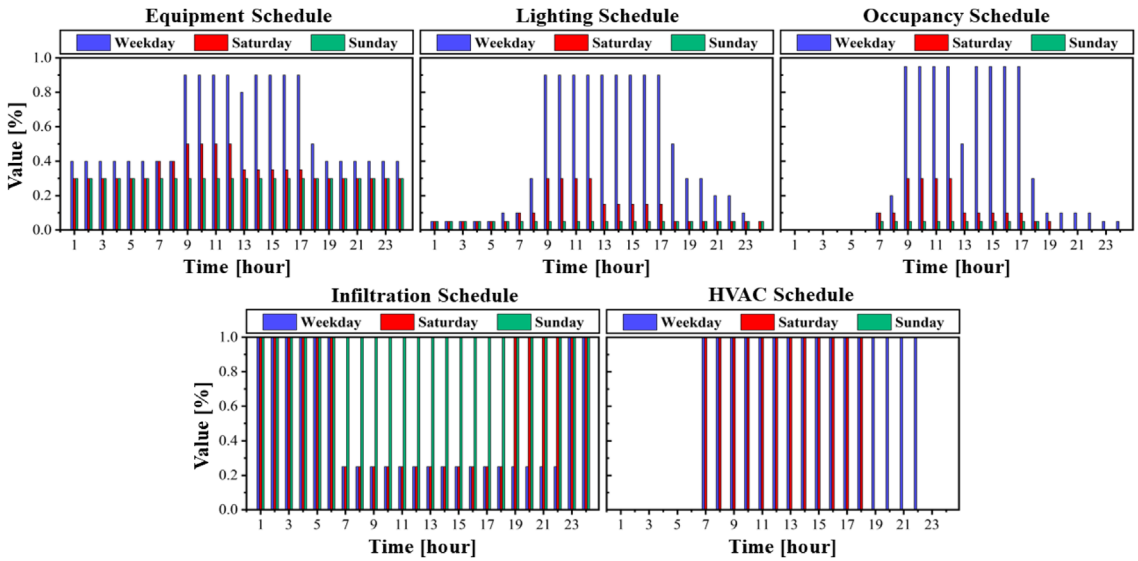


Fig. 6. Schedules at the HSID program.

Off 형식으로 스케줄을 제공하며, 주말 및 야간 운전방식을 설정할 수 있지만, 데이터베이스 결과를 산출한 TRNSYS 프로그램이 요구하는 수준의 상세한 스케줄 정보는 제공되지 않는다. 수열시스템 통합 설계 프로그램에서는 Fig. 6과 같이 상세한 가동 시간 및 가동률이 고려되었으며, 주간과 주말, 야간에도 최소 가동 스케줄이 고려되었다. 수열시스템 통합 설계 프로그램의 내부발열량은 ASHRAE Standard 90.1-2004[16]를 기반으로, 인체발열량 130 W/person, 기기발열량 8.07 W/m², 조명 부하는 11.84 W/m²로 설정되었다.

5. 해석 결과

5.1 에너지 요구량 시뮬레이션 결과 비교

Fig. 7과 Fig. 8은 비주거용 표준건물을 대상으로 ECO2 프로그램과 수열시스템 통합 설계(HSID) 프로그램을 이용하여 산출된 에너지 요구량을 보여준다. Fig. 7과 같이, ECO2 프로그램의 경우 내장된 월별 평균 기상데이터를 통해 준 정적 에너지 해석 방법을 통해 계산되어 월별 값으로 산출되며, 동적 에너지 해석 방법인 TRNSYS 프로그램의 계산 방식과 차이를 보인다. 수열시스템 통합설계 프로그램의 근거가

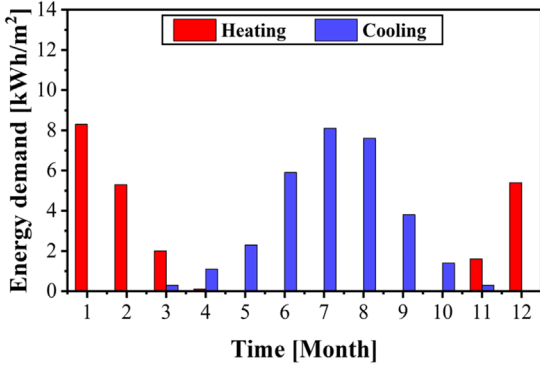


Fig. 7. Monthly heating and cooling energy demand of the ECO2 program.

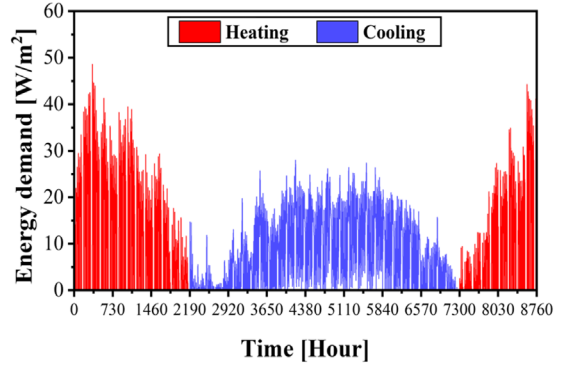


Fig. 8. Hourly heating and cooling energy demand of the HSID program.

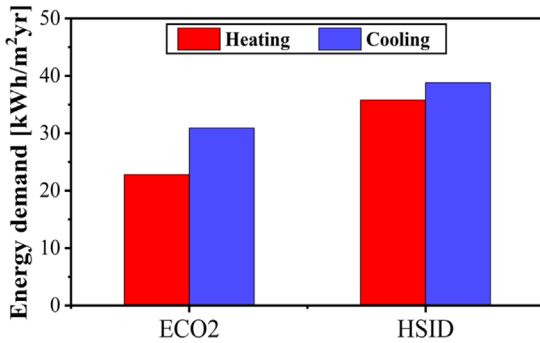


Fig. 9. Comparison of energy demand between the ECO2 and HSID program.

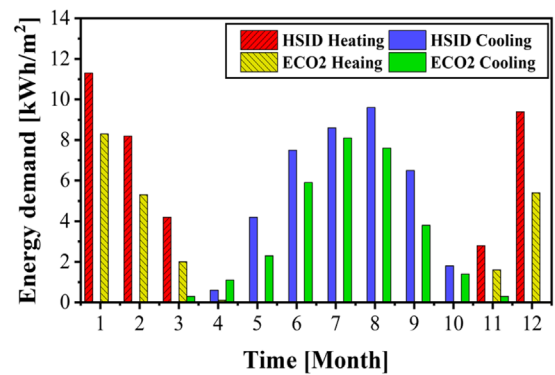


Fig. 10. Comparison of monthly energy demand between the ECO2 and HSID program.

되는 TRNSYS 프로그램의 시간당 냉난방 부하(에너지 요구량) 해석 결과는 아래 Fig. 8에 제시되었으며, Fig. 6에서 제시된 스케줄이 반영되었다. 시간당 난방 피크 부하는 48.57 W/m^2 , 냉방 피크 부하는 27.96 W/m^2 으로 계산되었다.

Fig. 9는 ECO2와 수열시스템 통합 설계 프로그램에 의해 계산된 연간 냉난방 에너지 요구량을 보여준다. ECO2 프로그램은 연간 단위면적당 난방 및 냉방 에너지 요구량을 각각 $22.8 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{yr}$, $30.9 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{yr}$ 로 예측하였다. 수열시스템 통합 설계 프로그램의 경우 계산된 연간 단위면적당 난방 및 냉방 에너지 요구량은 각각 $35.8 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{yr}$, $38.8 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{yr}$ 이었다. 수열시스템 통합 설계 프로그램은 ECO2 프로그램에 비해 난방 에너지 요구량은 57.0%, 냉방 에너지 요구량은 25.6%, 연간 냉난방 에너지 요구량은 38.9% 더 높게 예측하였다.

Fig. 10은 두 프로그램의 월별 냉난방 에너지 요구량 비교 결과를 보여준다. Fig. 10에서 수열시스템 통합 설계 프로그램의 월별 에너지 요구량은 Fig. 8의 시간당 에너지 요구량을 월별로 구분하여 계산한 것이다. 전반적으로 두 프로그램이 예측한 월별 냉난방 에너지 요구량은 유사한 경향을 보여주고 있으며, 난방에서의 차이가 냉방에 비해 더 크다는 것을 알 수 있다.

두 프로그램의 냉난방 에너지 요구량 차이의 원인은 서로 상이한 기상데이터의 적용, 그리고 Table 4와

Fig. 6에서 보여주는 두 프로그램의 인체 발열, 기기 발열 등의 용도 프로파일 차이로 판단된다. 또한, 두 프로그램에 시뮬레이션 방식의 차이 역시 에너지 요구량 차이를 만든다. 수열시스템 통합 설계 프로그램의 에너지 요구량은 동적 에너지 해석 프로그램인 TRNSYS 18을 통해 실시간으로 변화하는 기상 조건과 내부 발열 및 프로파일 반영되는 것에 비해, ECO2는 월평균 계산 방법에 기반한 정적 에너지 시뮬레이션 기법을 사용한다.

5.2 에너지 소요량 시뮬레이션 결과

Fig. 11은 표준 비주거용 건축물의 에너지 소요량에 대한 ECO2 프로그램 실행 결과를 보여준다. 연간 단위면적당 난방 및 냉방 에너지 소요량은 각각 26.6 kWh/m²·yr, 11.5 kWh/m²·yr로 계산되었으며, 급탕은 1.9 kWh/m²·yr로 계산되었다. 건축물 에너지 부하에 해당하는 난방 및 냉방 에너지 요구량이 각각 22.8 kWh/m²·yr, 30.9 kWh/m²·yr인 점을 고려하면, 난방을 위한 에너지의 소비량이 냉방에 비해 상당히 크게 예측되었음을 보여주며, 이는 ECO2에서 고려하는 수열원(서울지역 하천)의 온도가 수열 열펌프 구동을 위한 펌프의 소비동력에 영향을 주기 때문으로 판단된다.

1차 에너지로 환산된 연간 단위면적당 난방 및 냉방 에너지 소요량은 각각 73.1 kWh/m²·yr, 31.7 kWh/m²·yr로 계산되었다. 냉난방을 위해 사용된 에너지는 전기 에너지이므로, 1차 에너지 환산값은 에너지 소요량에 전기 에너지의 환산계수인 2.75를 곱한 결과임을 알 수 있다. ECO2 프로그램 시뮬레이션에서 조명 밀도는 수열시스템 통합 설계 프로그램에서 고려한 조건과 일치시키기 위해 11.84 W/m²로 고려되었으며, 1차 에너지로 환산된 조명이 차지하는 에너지 소요량은 전체 에너지 소요량의 47.1%로 상당히 크게 예측되었다.

Fig. 11에서 수열 열펌프가 생산하는 신재생 열에너지는 음의 값으로 환산되어 있으며, 이 값은 냉난방에 필요한 에너지 소요량에서 감해지는 값이 된다. 열펌프에 의해 생산된 에너지는 열에너지의 형태이므로 그 자체가 자연에 존재하는 에너지의 형태로 간주하여 1차 에너지로 환산되는 경우 1이 곱해진다. 그 결과, 열펌프가 생산하는 신재생 열에너지의 크기는 1차 에너지로 환산되어도 동일한 값을 갖는다. ECO2 프로그램에서 에너지 자립률은 1차 에너지로 환산된 단위 면적당 건물에서 생산된 신재생 에너지를 단위면적당 1차 에너지 소비량으로 나누어 결정된다. 수열원 열펌프에 의해 생산된 신재생 에너지의 단위면적당 1차 에너지 생산량은 24.1 kWh/m²·yr이며, 단위 면적당 1차 에너지 소요량은 186.5 kWh/m²·yr, 에너지 자립률은 11.44%로 산출되었다. 에너지 자립률 ZEB 등급을 획득하기 위한 최소 에너지 자립률은 20% 이상을 만족해야 하므로 현재 고려된 표준 건축물과 수열원 열펌프 냉난방으로는 ZEB 등급을 만족할 수 없는

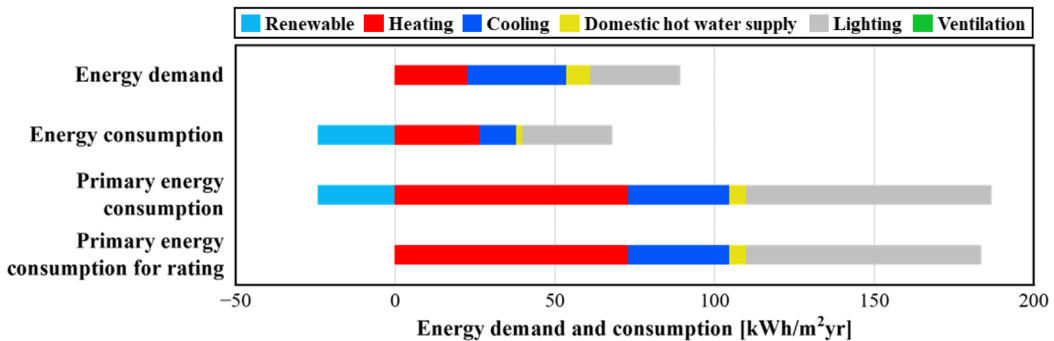


Fig. 11. Annual energy demand and consumption in the ECO2 program with the application of a hydrothermal heat pump.

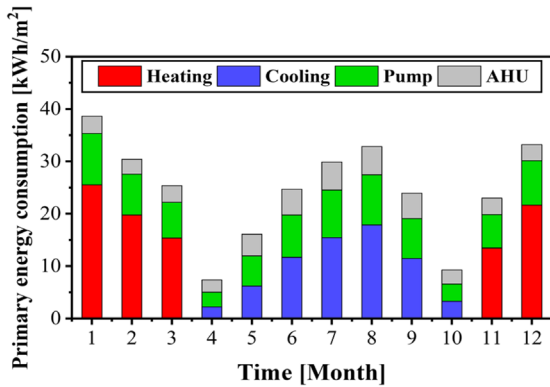


Fig. 12. Energy consumption by equipment in the HSID program.

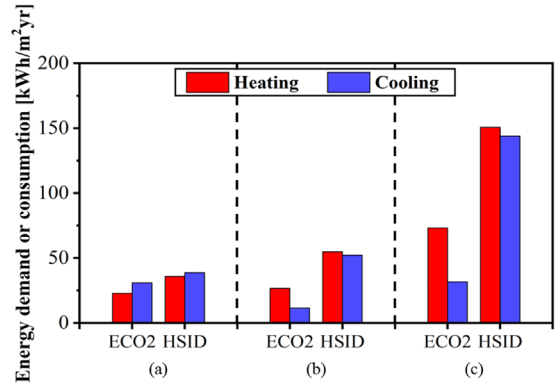


Fig. 13. Comparison of (a) energy demand, (b) energy consumption, (c) primary energy consumption.

것으로 예상되었다.

Fig. 12는 수열시스템 통합 프로그램의 데이터베이스 구축을 위해 활용된 TRNSYS 프로그램의 각 주요 설비가 차지하는 시간당 에너지 소요량 예측 결과를 월별로 합산한 결과이다. TRNSYS 프로그램에서 고려된 전체 냉난방 시스템에서 주요 설비는 크게 수열원 열펌프, 펌프, 공조 시스템으로 구분할 수 있다. 난방과 냉방을 위한 수열원 열펌프의 소비 에너지가 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 환절기를 제외하고 펌프의 소비동력이 두 번째로 큰 비중을 차지한다. Fig. 4와 Fig. 5가 보여주는 것과 같이 수열시스템 통합 설계 프로그램에서 고려한 시스템이 ECO2 프로그램에서 모델링한 시스템보다 많은 펌프를 구동하고 시스템이 다소 복잡하여 수열시스템 통합 설계 프로그램이 예상한 에너지 소요량이 ECO2 프로그램의 결과에 비해 다소 클 수 있음을 예상할 수 있다.

Fig. 13은 두 프로그램에서 계산된 (a) 연간 단위 면적당 냉난방 에너지 요구량, (b) 에너지 소요량, (c) 1차 에너지 소요량의 비교 결과를 보여준다. 수열시스템 통합 설계 프로그램에서 단위면적당 난방 에너지 소요량은 54.8 kWh/m²·yr, 냉방 에너지 소요량은 52.3 kWh/m²·yr로 계산되었으며, ECO2 프로그램에서 단위면적당 난방 에너지 소요량은 26.6 kWh/m²·yr, 냉방 에너지 소요량은 11.5 kWh/m²·yr였다. 수열시스템 통합 설계 프로그램은 ECO2에 비해 에너지 소요량을 난방에 대해 106.0%, 냉방에 대해 354.8%, 전체 냉난방에 대해 181.1% 더 크게 산출하여 그 차이가 상당히 크다는 것을 보여준다.

Fig. 13(a)에서 보여주는 것과 같이, 수열시스템 통합 설계 프로그램은 ECO2 프로그램에 비해 건물의 부하에 해당하는 난방 및 냉방을 위한 에너지 요구량을 각각 57.0%, 25.6% 더 높게 예측하였으며, 연간 냉난방 에너지 요구량을 38.9% 더 높게 예측하였다. 에너지 소비 예측값인 에너지 소요량과 비교해 보면, 수열시스템 통합 설계 프로그램의 연간 냉난방 에너지 소요량 계산 결과가 ECO2 프로그램 결과보다 181.1% 더 높아, 두 값에 상당한 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 에너지 소요량 차이를 난방과 냉방으로 분리해 보면 수열시스템 통합 설계 프로그램은 ECO2 프로그램에 비해 각각 106.0%와 354.8% 더 크게 산출하고 있어, 냉방에 필요한 에너지 소요량의 차이가 매우 컸다. 두 프로그램이 동일한 COP를 갖는 수열원 열펌프를 입력값으로 고려했다는 점을 고려하면, Fig. 13은 ECO2가 냉방을 위해 예측한 에너지 소요량이 상대적으로 작게 계산되었음을 확인할 수 있다. 열펌프의 COP가 1보다 크기 때문에 냉난방에 필요한 열펌프 자체의 에너지 소요량을 고려하면 에너지 요구량보다 작게 계산되는 것이 일반적이다. 다만, 본 연구에서 ECO2 프로그램과 수열시스템 통합설계 프로그램은 열펌프가 소비하는 에너지 이외에 냉난방에 필요한 펌프와 팬이 요구하는 동력을 냉난방 에너지 소요량에 추가되도록 하였다. 따라서, Fig. 13에서 ECO2의 냉방

에너지 소요량을 제외하고, 다른 에너지 소요량은 에너지 요구량에 비해 큰 값을 보여준다. 난방조건에서 ECO2 프로그램은 열펌프, 팬, 펌프 등의 소비 동력을 모두 포함하여 에너지 소요량을 계산하여 그 값이 에너지 요구량에 비해 큰 값을 갖는다. 하지만, 냉방조건에서 ECO2 프로그램이 입력된 펌프의 동력값을 에너지 소요량에 반영하는 계산 방법이 난방과 달라 요구량에 비해 낮은 에너지 소요량을 예측하는 것으로 파악되었다.

두 프로그램의 에너지 소요량 차이의 원인은 수열 열펌프의 가동 스케줄과 축열조의 유무, 그리고 시뮬레이션 기법의 차이를 들 수 있다. 수열시스템 통합 설계 프로그램은 전체 냉난방 시스템에 축열조가 함께 고려되어, 축열조를 기준으로 수열 열펌프 측과 건물 측의 스케줄이 다르게 설정되어 계산된다. 수열 열펌프는 축열조 내 수온을 난방 시 55°C, 냉방 시 7°C 설정온도의 $\pm 2.5^\circ\text{C}$ 이내를 유지하도록 작동한다. 건물 측의 공기조화기는 1시간 단위로 계산된 냉난방 에너지 요구량에 따라 가동되어 축열조에 축열된 에너지를 사용하며 냉난방을 실시하도록 설정되어 있다. 반면, ECO2 프로그램은 수열 시스템에서 축열조를 고려할 수 없게 설계되어 있으며, 월평균 계산 방법에 근거하여 계산되므로 두 프로그램은 시뮬레이션 기법에서 큰 차이를 보인다. 따라서, 두 프로그램의 에너지 소요량 예측 결과의 차이는 이러한 시뮬레이션 대상 시스템의 구성 및 계산 방법의 차이에 기인한 것으로 보인다.

5.3 ECO2 설계변수 변화에 따른 에너지 요구량, 소요량 및 자립률 변화

위에서 언급한 것과 같이 본 연구에서 고려된 건축물과 수열원 열펌프 시스템에 대한 ECO2 프로그램의 시뮬레이션 결과는 ZEB 등급 기준을 만족하지 못함을 보여주었다. 따라서 ECO2 프로그램을 이용하여 시뮬레이션에서 고려된 설계변수 변화에 따른 에너지 요구량과 소요량 및 에너지 자립률 변화 경향을 분석하여 ZEB 등급 만족 여부를 조사하였다.

Fig. 14는 ECO2 프로그램에서 고려된 수열원 열펌프의 냉난방 COP 변화에 따른 에너지 소요량과 에너지 자립률 변화 결과를 보여준다. 건축물의 에너지 요구량은 열펌프의 COP 변화와 무관하며, ZEB 등급을

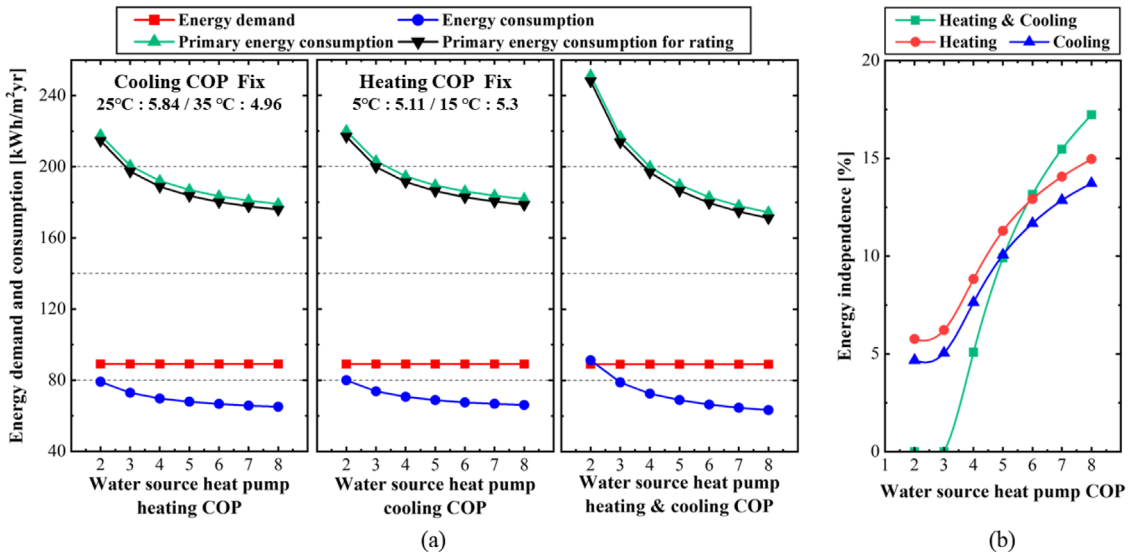


Fig. 14. (a) Energy load and consumption change, (b) Energy independence ratio change with respect to the change of hydrothermal heat pump COP.

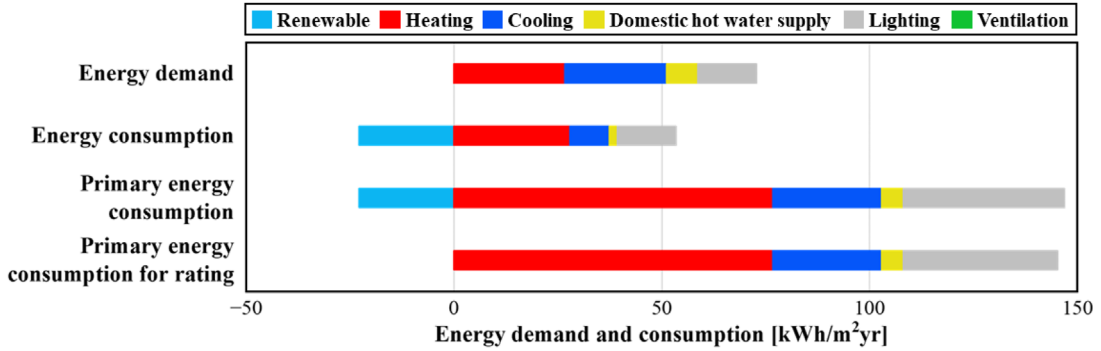


Fig. 15. Annual energy load and consumption (Lighting density: 6 W/m²) estimated by the ECO2 program.

만족하기 위해 비거주용 건축물의 연간 단위면적당 1차 에너지 소요량은 140 kWh/m²·yr 미만과 에너지 자립률 20%를 만족해야 한다. 수열원 열펌프의 난방 COP는 부하 5°C와 15°C 조건에서 각각 5.11, 5.3; 냉방 COP는 부하 25°C와 35°C 조건에서 각각 5.84, 4.96이다. Fig. 14는 열펌프의 COP를 8까지 높여도 연간 단위면적당 1차 에너지 소요량과 에너지 자립률을 ZEB 등급 요구 조건으로 만족시키기 어려움을 보여준다. 이러한 원인으로 높은 조명밀도와 펌프 소비동력을 고려해 볼 수 있다.

본 연구에서 조명밀도는 수열시스템 통합 설계 프로그램과 동일 조건을 고려하기 위해 11.84 W/m²로 입력하였다. 최근의 기준 [공공기관 에너지이용 합리화 추진에 관한 규정]의 제11조(고효율에너지기자재 사용) 2항[17]에 따르면, 공공기관은 실내 조명기기를 고효율 LED 조명기기 제품으로 설치해야 한다고 규정하고 있으며, 일반적인 비주거용 건물의 고효율 LED 조명기기의 평균 조명 밀도는 6 W/m² 이하[18]이다. 이는 본 ECO2 프로그램 시뮬레이션 조건이 최근 에너지 절약형 건물의 요구와 일치하지 않음을 보여준다.

Fig. 15는 ECO2 프로그램 해석 조건에서 조명 밀도만 6 W/m²로 변경한 해석 결과를 보여준다. 조명 에너지는 내부 현열 발생 원인이 되므로, Fig. 11의 결과와 비교해 보면, 난방을 위한 에너지 요구량 및 소요량은 증가하게 되며, 냉방을 위한 에너지 요구량과 소요량은 감소하게 된다. 조명 밀도의 감소로 인해,

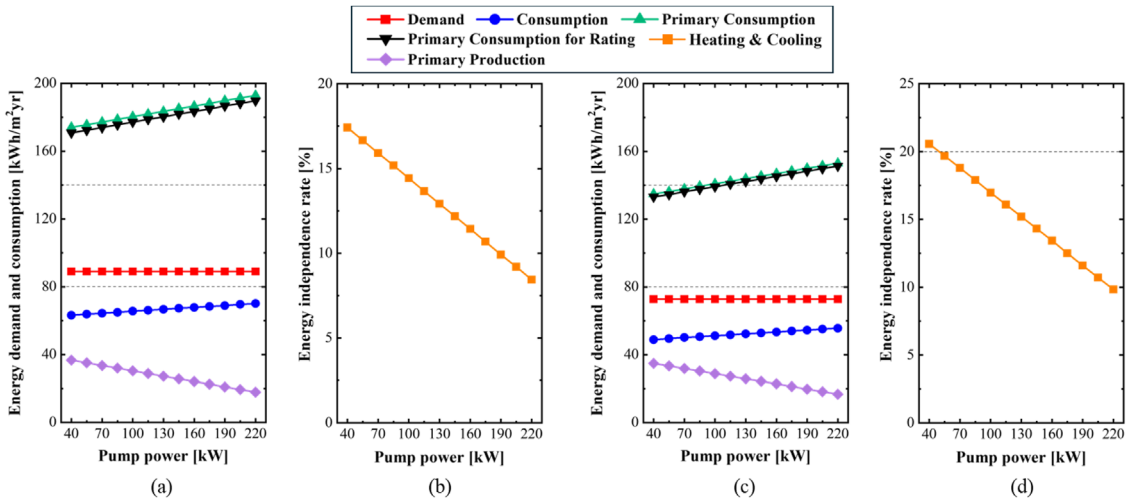


Fig. 16. Changes in energy demand and consumption; energy independence rate estimated by the ECO2 program: (a) and (b) for the lighting density of 11.84 W/m²; (c) and (d) for the lighting density of 6 W/m².

단위 면적당 1차 에너지 소요량은 $146.9 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{yr}$, 에너지 자립률은 13.44%로, 기존 조명 밀도 11.84 W/m^2 해석 조건과 비교하여, 1차 에너지 소요량은 $39.6 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{yr}$ 가 감소하고, 에너지 자립률은 2% 증가한 것으로 확인되었다. ZEB 등급을 만족하기 위한 1차 에너지 소요량 역시 $140 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{yr}$ 미만을 만족하지는 않지만, 조명 밀도가 에너지 소요량에 큰 영향을 주어, 등급 획득을 위한 고효율 조명기기의 사용이 필요함을 확인할 수 있다.

수열원 열펌프를 이용한 공조 시스템은 열원수를 수요처까지 운반하고, 다시 환수시키기 위한 펌프의 동력이 요구된다. 따라서 기존 연구[6, 7]에서 언급한 것과 같이 수열원과 소비처의 이격거리는 시스템의 소비동력과 경제성에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 수열시스템 통합 설계 프로그램이 고려한 500 m의 이격거리 및 건축물의 규모에 따른 펌프 총 용량을 160 kW로 고려하였다. 이격거리가 변하는 경우 펌프의 소비동력도 변하게 된다.

Fig. 16(a)와 16(b)는 수열 열펌프 열원 측과 부하 측의 1차 및 2차 펌프 소비동력의 변화에 따른 ECO2 프로그램 해석 결과를 보여주고 있다. 펌프의 소비동력 증가에 따라, 수열원 열펌프의 신재생 에너지 생산량이 감소하고 있으며, 에너지 소요량은 점점 증가하게 된다. 다시 말하면, 에너지 자립률을 구성하는 요소의 분모는 증가하고, 분자는 감소하는 결과를 가져오기 때문에, Fig. 16에서 보여주는 것과 같이 펌프 소비동력 증가에 따라 에너지 자립률이 감소하게 된다. 이러한 결과는 수열원 열펌프를 활용하는 경우 ZEB 등급의 획득을 위해 펌프 소비동력이 중요하게 고려되어야 함을 의미한다.

Fig. 16(c)와 16(d)는 조명 밀도를 6 W/m^2 로 낮춘 조건에서 펌프 소비동력의 변화에 따른 ECO2 프로그램 해석 결과를 보여주고 있다. 펌프의 소비동력이 108 kW 미만인 조건에서 에너지 소요량 $140 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{yr}$ 미만을 만족하였으며, 펌프의 소비동력이 50 kW 이하인 조건에서 ZEB 5등급의 조건을 만족할 수 있음을 알 수 있다. 펌프 소비동력 절감은 수열원과의 이격거리나 건축물의 형상에 따라 한계가 존재하므로, ECO2 프로그램으로 수행된 해석 결과는 수열원 열펌프 적용하는 것만으로 ZEB 등급 획득이 어려움을 보여준다. 따라서, ZEB 등급 획득을 위해서는 수열원 열펌프와 함께 태양광이나 태양열 등의 추가적인 신재생 에너지 적용이 요구됨을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 수열시스템 통합 설계 프로그램과 ECO2 프로그램의 차이를 비교하고, 두 프로그램을 이용하여 비주거용 표준건물의 에너지 요구량과 소요량에 대한 해석 연구를 수행하였으며, 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 수열시스템 통합 설계 프로그램이 계산한 난방 및 냉방 에너지 요구량은 ECO2 프로그램에서 예상한 에너지 요구량에 비해 각각 57.0%와 25.6% 더 높았다. 이러한 차이는 적용된 기상데이터 및 용도 프로파일, 상세히 입력이 어려운 입력변수의 차이에 의해 발생한 것으로 판단된다.

(2) 연간 단위면적당 에너지 소요량의 경우 ECO2 프로그램의 예측값은 수열시스템 통합 설계 프로그램 예측값의 35.6%로 큰 차이를 보였다. 이러한 에너지 소요량 결과의 차이는 고려 가능한 수열원 열펌프 냉난방 시스템 구성의 차이, 축열조 유무, 가동 스케줄 차이, 시뮬레이션 기법의 차이에 기인한 것으로 보인다.

(3) ECO2 프로그램 해석 결과는 수열원 열펌프를 이용한 냉난방 시스템 적용만으로는 ZEB 등급 획득이 어렵다는 것을 보여주었고, 등급 획득을 위해 추가적인 신재생 에너지원의 적용이 필요함을 확인하였다.

(4) 수열원 냉난방 시스템에서 펌프 소비동력의 감소는 신재생 에너지 생산을 증가시키고, 에너지 소요량을 감소시켜, 에너지 자립률을 크게 높일 수 있었다. 따라서, 펌프의 소비동력에 큰 영향을 미치는 수열원과 수요처의 이격거리는 경제성뿐 아니라 ZEB 등급에도 큰 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 ECO2 프로그램은 입력변수가 비교적 단순하여 사용이 쉽지만, 다양한 냉난방

시스템 구성에 대한 모델링과 용도 프로파일의 세부 항목 변경이 어렵다는 단점이 존재함을 확인하였다. 수열시스템 통합 설계 프로그램의 경우, 용도 프로파일과 단순한 입력값을 이용하여 에너지 해석과 경제성의 평가가 가능하다는 장점이 있었지만, 구체적 검증이 부족하고 고려된 형태 이외의 냉난방 시스템에 대한 시뮬레이션이 어렵다는 문제가 존재하였다. 따라서 수열 시스템의 활용을 높이기 위해서는, 다양한 시스템 구성에 대한 신뢰성 높은 시뮬레이션 모델의 개발과 검증에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgment

이 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원(No.202000315002)을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

References

1. Global ABC, 2020, 2020 Global Status Report for Buildings and Construction.
2. Ko, S. I., and Yee, J. J., 2022, An examination on the improvement of ECO2 by comparing sensitivity of input variables with Design Builder, J. of The Regional Association of Architectural Institute of Korea, Vol. 24, No. 6, pp. 129-136.
3. Kim, J. H., Yu, J. S., Kim, J. H., and Kim, J. T., 2022, Energy performance analysis of green-remodeling for public buildings under 500 m², J. of Korean Solar Energy Society, Vol. 42, No. 3, pp. 87-101.
4. Kim, S. H., Kwak, Y., H., and Kim, C. S., 2018, The analysis on energy performance of collective housing using ECO2 and DesignBuilder softwares, KIEAE Journal, Vol. 18, No. 5, pp. 47-54.
5. Enforcement rule of the new and renewable energy development, Use, and Dissemination promotion act, Article 2, No. 11, 「New and Renewable Energy Facilities」
6. Jung, Y. J., and Lee, H. S., 2021, Multi-criteria evaluation of river source heat pump systems in terms of life cycle performance, International High Performance Building Conference, pp. 383.
7. Oh, J. H., Bae, S. M., Kwon, Y. S., and Nam, Y. J., 2022, Performance and economic analysis of water source heat pump system according to water intake distance and capacity, J. of air-conditioning and refrigeration engineering Society, Vol. 34, No. 5, pp. 244-251.
8. Kwon, Y. S., Bae, S. M., Nam, Y. J., Yun, R., Park, C. Y., and Lee, H. S., 2021, Comparative analysis of system performance for water, ground and air source heat pump system using the dynamic energy simulation, J. of Korean Solar Energy Society, Vol. 41, No. 4, pp. 1-12.
9. Jung, H. J., Shin, J. W., and Yun, R., 2024, Comparison study of the renewable water source heat pump system with the conventional system, J. of Mechanical Science and Technology, Vol. 38, No. 3, pp. 1557-1568.
10. Moon, G. H., and Park, C. Y., 2023, The effect of a geothermal heat pump and photovoltaics application on the building energy efficiency and ZEB certification rating for a non-residential building. J. of Korean Society for Geothermal and Hydrothermal Energy, Vol. 19, No. 1, pp. 1-13.
11. Hydrothermal system integrated design program, Hanbat Nat'l Univ, Available online: <http://ecowaterhp.hanbat.ac.kr/>
12. Jeong, Y. S., Jung, H. K., Jang, H. K., and Yu, K. H., 2014, A study on the reference building based on the building design trends for non-residential buildings, J. of Korean Solar Energy Society, Vol. 34, No. 3, pp. 1-11.
13. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, U.S. Department of Energy, Available online : <http://www.energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>.
14. Ministry of Land, 2023, Infrastructure and Transport, Energy Conservation Design Criteria for Building, Asterisk 1, Heat Transmission Rate Table of Building By Region.
15. Jeon, B. K., Park, C. Y., Jang, H. I., Choi, S. W., Kang, M. G., and Kim, E. J., 2018, Comparison of ECO2

results using calibrated input data pertaining to room operating conditions, J. of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems Society, Vol. 12, No. 3, pp. 223-234.

16. White, J. W. et al., 2004, Energy standard for building except low-rise residential buildings, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
17. Regulation on the Promotion of Rationalization of Energy Use by Public Institutions, Article 11, Paragraph 2.
18. Zero energy building technology & component, Korea energy agency.