



제로에너지빌딩 구현을 위한 태양광열-지열 하이브리드 시스템의 성능분석

Performance Analysis of Hybrid System with PVT and GSHP for Zero Energy Building

배상무* · 정용대** · 남유진***

Bae, Sangmu* · Jeong, Yongdae** · Nam, Yujin***

* Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (trapezeb@naver.com)

** Coauthor, Energy & Environment Business Division, Korea Conformity Laboratories, South Korea (jyd@kcl.re.kr)

*** Corresponding author, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (namyujin@pusan.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: Various renewable energy technologies such as photovoltaic, solar thermal and geothermal system are being utilized for zero energy building. However, technologies using a single heat source are highly affected by external conditions such as weather and changes in underground temperature. In this study, a hybrid system with PVT and GSHP was developed to overcome the disadvantage of individual system and to improve the reliability of energy production. In addition, this paper aims to analyze the performance of the system and calculate the energy independence rate according to the design capacity. **Method:** In this study, the dynamic energy simulation was conducted to quantitatively analyze building load and heat pump seasonal performance factor of heating and cooling of the hybrid system with PVT and GSHP. In addition, power production and power consumption were calculated according to the installation area of the PVT module. The building energy independence rate was calculated using the power production and power consumption results, and the zero energy building certification level was determined. **Result:** As the simulation result, heating peak load is 6.16kW, cooling peak load is 2.37kW and annual energy independence rate of Case 1 is 44.9%.

KEYWORD

제로에너지빌딩
태양광열-지열 하이브리드 시스템
에너지 자립률

Zero energy building
Hybrid system with PVT and GSHP
Energy independence rate

ACCEPTANCE INFO

Received Oct 2, 2018
Final revision received Oct 16, 2018
Accepted Oct 21, 2018

© 2018 KIEAE Journal

1. 서론

전 세계 에너지 수요는 지속적으로 증가하고 있으며, 아시아, 남미, 중동에 위치한 개발도상국의 급격한 도시화 진행으로 인해 2040년 전 세계 에너지 수요는 현재보다 약 30% 향상될 것으로 전망하고 있다 [1]. 이러한 에너지 수요의 증가는 화석연료 고갈과 더불어 기후변화 및 환경오염 등의 문제를 야기한다. 이러한 문제들을 해결하고 나아가 지속가능한 발전을 위해, 국제사회의 노력은 지속적으로 강화되고 있다. 국제적 이슈에 따라 국내에서는 에너지 수요 절감과 오염부하를 최소화하기 위해 대체에너지원 개발 및 보급 활성화에 관한 다양한 정책을 시행하고 있다.

특히, 건물부문에서는 에너지 소요량을 최소화하고 온실가스 감축을 위해 제로에너지빌딩(Zero Energy Building, ZEB)의 개념을 도입하고 있다. 제로에너지빌딩은 단열과 기밀성을 극대화하여 외부로 손실되는 에너지를 방지하고 신재생에너지 시스템을 활용하여 건물유지에 필요한 에너지를 자급자족할 수 있는 에너지 자립 건축물이다 [2]. 이러한 제로에너지빌딩에 도입되고 있는 신재생에너지 시스템은 주로 태양광, 태양열 및 지열을 에너지원으로

로 이용하는 시스템이 적용되고 있다.

한편, 태양광열(Photovoltaic/Thermal, PVT) 시스템은 전력을 생산할 수 있는 태양광(Photovoltaic, PV) 모듈에 태양열 흡수기(Absorber)를 결합한 융합 기술이다. 이러한 태양광열 시스템은 태양광 모듈에서 전력을 생산하는 동시에 태양열 흡수기를 통해 열을 축열하고 모듈 온도 저하를 도모하여 시스템 효율을 향상시킬 수 있다. 그러나 태양광열 시스템의 전력 및 열 생산은 기상조건에 의존하기 때문에 기상조건이 열악할 경우 건물부하에 대응하지 못하거나 다른 시스템을 이용해야하는 어려움이 있다. 반면, 지열 히트펌프 시스템은 기상조건에 의한 영향이 거의 없으며 연중 일정온도를 나타내는 지중 항온층을 이용하여 안정적인 성능을 기대할 수 있다. 그러나 장기운전에 따른 지중열원 온도의 변화 및 시스템 성능저하, 높은 초기투자비용으로 인하여 보급 및 확산이 지연되고 있다.

따라서 본 연구에서 개별 시스템의 결합을 통해 기상조건이나 지중 환경에 의한 영향을 최소화하고, 건물의 다양한 에너지 소비패턴에 폭넓게 대응할 수 있는 태양광열-지열 하이브리드 시스템을 이용하였다. 태양광열-지열 하이브리드 시스템은 각 단위 기술들의 단점을 극복하고 에너지 생산에 대한 신뢰성이 증가하기 때문에 설치용량의 감소와 더불어 건물 에너지 자립을 기대

할 수 있다. 이러한 하이브리드 시스템을 대상으로 개별 시스템과 성능 비교분석을 실시하고 있으며 설계조건에 따른 성능검토 및 도입 타당성분석에 관한 연구는 다각적인 방면에서 수행되고 있다.

실증실험을 통해 태양광 모듈 및 태양열 집열기의 개별 시스템과 태양광열 융합 시스템의 전기 효율과 모듈의 온도, 집열기의 열성능을 측정하였으며 그 결과, 전기와 열에너지 총 효율은 태양광열 융합 시스템이 기존의 단일 시스템 보다 5.6배 높게 확인되었다 [3~5]. 태양광열 시스템의 최적화와 제품의 보급 활성화를 위해 설계변수에 따른 모듈의 전력효율을 비교분석하고 최적 집열기 설계조건 및 외기조건을 제시하였다 [6~8]. 또한, 시설원예능가 및 주거용 건물을 대상으로 태양열-지열 하이브리드 시스템을 설치하여 난방성능과 태양열 급탕시스템의 성능을 분석하였다 [9, 10]. 기존 유류 난방기와 태양열 단일 급탕 시스템 보다 하이브리드 시스템이 경제적이고 효율적인 것으로 분석하였으나, 성능해석 범위가 난방 및 급탕에 한정되어 시스템 전체의 연간 성능을 정량적으로 파악하기 어려운 단점이 있다. 따라서 냉난방 및 급탕에 대응할 수 있는 하이브리드 시스템의 개발 및 보급을 목적으로 제로에너지 솔라하우스(ZeSH) 도입 타당성 분석과 [11] 주택, 병원, 학교 등의 다양한 건물군에 시스템 적용을 위한 최적 용량산정에 관한 연구 [12, 13]도 수행되고 있다. 이 외에도, 신재생에너지 융복합 설비의 최적설계와 에너지 자립률 분석을 위해 실증실험을 통한 연구 [14, 15]가 수행되고 있다.

태양광 모듈 또는 태양열 집열기와 같은 단일 시스템과 태양광열, 태양열-지열 등의 융합 시스템과의 성능 비교분석 및 태양광열-지열 하이브리드 시스템의 최적 용량산정, 도입 타당성 분석에 관한 연구는 활발히 수행되고 있다. 그러나 태양광열-지열 하이브리드 시스템의 설치용량에 따른 성능변화를 정량적으로 검토하고, 건물 에너지 자립을 위한 시스템 적정 설계용량 제안에 관한 연구는 드물다.

따라서 본 연구에서는 태양광열-지열 하이브리드 시스템을 대상으로 동적 시뮬레이션을 활용하여 시스템 설치용량에 따른 성능변화를 정량적으로 검토하고, 생산전력 및 소비전력을 분석 결과를 이용하여 제로에너지빌딩 구현을 위한 하이브리드 시스템의 적정 설계용량 제안과 건물 에너지 자립률을 분석하였다.

2. 성능예측 시뮬레이션

2.1. 시뮬레이션 개요

태양광열-지열 하이브리드 시스템은 태양열 집열기와 지열 히트펌프를 통해 생산된 열을 이용하여 냉난방 및 급탕을 수행할 수 있으며, 태양광 모듈에서 생산한 전력은 시스템 운전에서 이용하거나 역송전을 실시하여 판매가 가능하다. 또한, 태양 에너지와 지열을 에너지원으로 활용하는 하이브리드 시스템은 하나의 에너지원에 의존하는 개별 시스템의 단점을 보완할 수 있다.

특히, 피크부하 분배에 따른 태양광열 모듈과 지열 히트펌프의 설계용량 감소와 하절기 태양열 집열기를 이용한 급탕운전과

지열 히트펌프를 통한 냉방운전을 동시에 수행할 수 있어 냉-온열이 함께 발생하는 조건에서도 운전이 가능하다.

Fig. 1.은 태양광열-지열 하이브리드 시스템의 개요도를 나타낸다. 시스템은 태양광열 모듈, 지중열교환기, 히트펌프, 축열조 및 팬코일유닛 등으로 구성되어 있으며 건물 부하조건에 의해 냉난방운전을 수행한다. 다양한 열원의 효율적 이용을 위해 시스템 냉난방 운전은 열원 시스템의 입출구 온도, 축열조 설정온도, 건물 실내온도에 의해 제어된다.

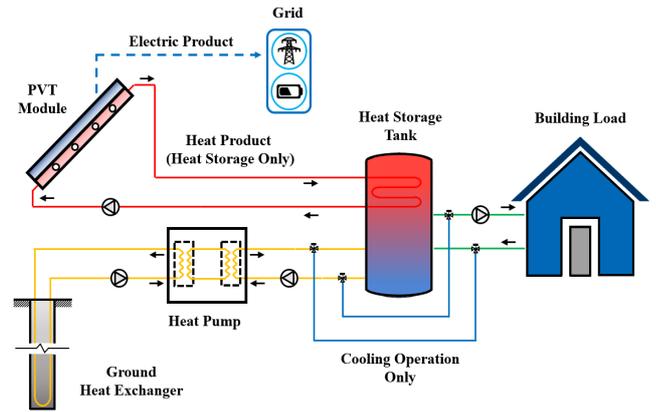


Fig. 1. Schematic diagram of the Geothermal-PVT hybrid system

본 연구에서는 이용된 태양광열-지열 하이브리드 시스템의 제어 로직은 선행연구 [16, 17]에서 개발한 태양광열-지열 융합 시스템의 운전모드를 참고하였다. 또한, 태양광열 성능 해석틀의 신뢰성은 실증실험을 통해 검증하였다 [18, 19].

하이브리드 시스템은 효율적인 열원 이용 및 건물 냉난방 공급을 위한 운전방법이 필수적이다. 따라서 개별 시스템의 효율적 이용과 열원 특성을 고려하여 냉난방운전 및 축열운전으로 구성하였다. 제어로직은 축열조를 이용하는 난방운전과 지열 히트펌프를 이용하는 냉방운전으로 구성하고, 축열운전은 태양광열 모듈과 지열 히트펌프의 두 가지 열원을 활용하도록 구축하였다.

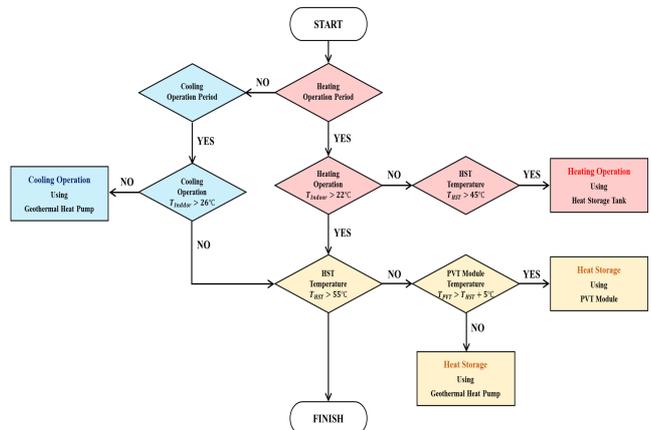


Fig. 2. Operation algorithm of Geothermal-PVT system

Fig. 2.는 태양광열-지열 하이브리드 시스템의 운전 알고리즘을 나타낸다. 시스템의 난방운전은 부하모델의 운전기간과 실내온도

에 의해서 작동된다. 난방운전의 On/Off는 운전기간 내에서 실내 온도가 22°C 미만으로 떨어지게 되면 축열조를 이용하여 난방운전을 수행하고, 난방운전으로 인해 실내온도가 24°C까지 도달하면 시스템 작동이 정지된다.

시스템 냉방운전은 태양광열 모듈을 활용하지 못하기 때문에 지열 히트펌프가 건물의 모든 냉방부하에 대응한다. 냉방운전은 난방운전과 동일하게 운전기간과 실내온도에 의해서 제어되며, 실내온도 26°C에서 시스템이 가동하여 24°C에서 정지된다.

한편, 축열운전은 난방운전과 급탕으로 인해 연중 가동되며 활용되는 열원 종류에 따라 태양광열 모듈과 지열 히트펌프 운전으로 구분된다. 태양광열 모듈을 통한 축열운전이 지열 히트펌프보다 우선적으로 실시되도록 설정하였으며, 태양광열 모듈의 출수온도가 축열조 출수온도 보다 5°C 높을 경우 태양광열 모듈에 의한 축열운전이 실시된다. 태양광열 모듈을 이용하지 못하는 운전조건에서는 지열 히트펌프를 이용한 축열운전이 수행된다.

2.2. 시뮬레이션 조건

본 연구에서는 동적해석이 가능한 TRNSYS 17을 이용하여 태양광열-지열 하이브리드 시스템의 냉난방 및 축열운전 제어모듈을 구축하고, 시스템의 연간 냉난방 성능과 건물 에너지 자립률을 정량적으로 분석하였다. 시스템 연간 냉난방 성능은 태양광열 모듈과 지열 히트펌프 시스템의 월별 생산 열량과 소비전력을 이용하여 산출하였으며, 건물 에너지 자립률은 태양광열 모듈의 생산전력과 시스템 소비전력 분석 결과를 통해 분석하였다.

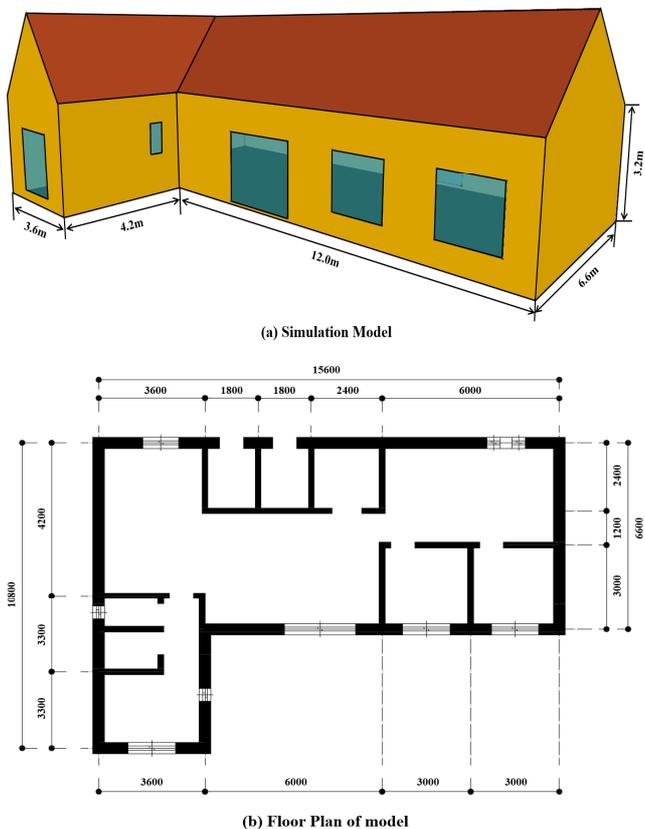


Fig. 3. Simulation model and floor plan

Fig. 3.은 본 연구에서 이용된 건물 부하해석 모델과 평면도를 나타낸다. 건물 부하해석 모델은 귀농귀촌종합센터에서 제공하고 있는 농촌주택 표준설계도서 [20]의 ‘농림-10-33-다-1’을 참고하여 모델링하였다.

Table 1.은 건물 부하해석 모델의 입력조건을 나타낸다. 건물 모델은 서울에 위치하는 것으로 가정하여 기상데이터를 입력하였다. 실내 냉난방 설정온도 및 건물 구조체의 열관류율 기준은 국토교통부에서 고시하고 있는 ‘건축물의 에너지절약설계기준’ [21, 22]을 참고하였다.

Table 1. Condition of Building Load analysis

Location	Seoul, South Korea
House Model	Low Energy Housing Model (농림-10-33-다-1)
Indoor Set Temp. (°C)	Heating : 22°C
	Cooling : 26°C
Floor Area (m ²)	118
Ventilation (1/h)	0.5
Operation Period	Heating : Jan. ~ Jun. & Sept. ~ Dec.
	Cooling : May ~ Sept.
Operation Time (hour)	24
Internal Heat gain (W)	Person : 150
	Equipment : 140
U-Value (W/m ² ·K)	Ground Floor : 0.170
	External Wall : 0.241
	Roof : 0.151
	Window : 1.4

실내 냉방 설정온도는 26°C, 난방 설정온도는 22°C로 입력하였으며, 건물 구조체의 열관류율은 서울이 포함된 중부2지역의 단열기준으로 설정하였다. 또한, 실내 환기횟수는 국토교통부에서 제공하고 있는 ‘건축물의 설비기준 등에 관한 규칙’ [23]을 참고하여 시간당 0.5회로 설정하였다.

시뮬레이션 운전기간 및 운전시간을 나타낸다. 난방운전기간은 1월~6월, 9월~12월로 총 10개월로 설정하였으며 냉방운전기간은 5월부터 9월까지 산정하였다. 또한, 운전시간은 한국에너지공단에서 제공하고 있는 ‘건축물 에너지효율등급 인증제도 운영규정’ [24]을 참고하여 24시간으로 설정하였다.

내부발열량은 ASHRAE 핸드북과 ISO 7730 [25, 26]을 참고하여 재실자가 실내에서 간단한 문서작업을 할 때 생기는 발열량을 입력하였으며, 재실인원은 4명으로 가정하였다. 조명 및 기기에 대한 발열량은 대한설비공학회에서 제공하고 있는 ‘설비공학 편람’ [27]을 통해 산정하였다.

Table 2.는 TRNSYS 17 시뮬레이션에서 이용된 주요 컴포넌트의 입력조건을 나타낸다. 태양광열 모듈은 Unglazed형으로 높이 1.937m, 너비 0.994m, 두께 0.04m의 모듈 10장을 연결하였다. 집열기(외경:0.0127m, 내경:0.0109m)는 동관재질로 구성되어있으며, 하나의 태양광열 모듈에 21개 설치된다. 또한, 흡열판은 두께 0.0003의 알루미늄 재질로 구성되어 있으며, 태양광 패널의 전력효

율은 16.1%, 최대전력 생산량은 290W로 설정하였다. 태양 복사열과 태양광열 모듈 표면의 입사각은 0°, 태양광열 모듈의 기울기는 45°로 입력하였다.

Table 2. Component condition in TRNSYS 17

Component	Name	Value
PVT Collector	Collector Length	4.97 m
	Collector Width	3.874 m
	Number of Tubes	210
	PV Efficiency	16.1 %
	Max Power	290 W
	Incidence Angle	0 °
	Collector Slope	45 °
Ground Heat Exchanger	Borehole Depth	150 m
	Number of Boreholes	1
	Thermal Conductivity	3.5 W/m·K
	Heat Capacity	2520 kJ/m ³ ·K
Heat Pump	Type	water-to-water
	Capacity	10 kW
	Source/load Specific Heat	4.19 kJ/kg·K
Heat Storage Tank	Tank Volume	0.5 m ³
	Fluid Specific Heat	4.19 kJ/kg·K
	Set Point Temperature	50 °C
	Deadband	5 °C
Fan Coil Unit	Volumetric Air Flow Rate	0.3 m ³ /s
	Power Consumption	0.15 kW
Pump	Maximum Flow Rate	1500 kg/hr
	Maximum Power	0.22 kW

지중열교환기(외경:0.016m, 내경:0.013m)의 길이는 150m, 보어홀 직경은 0.1016m로 가정하였으며, 토양과 보어홀, 파이프의 열물성 조건은 선행연구 [28]를 참고하여 열전도도 및 열용량, 초기 지중온도 등을 설정하였다. 또한, 히트펌프는 태양광열 모듈과 지중열교환기의 설계용량과 순환수 매체를 고려하여 열용량 10kW 규모의 Water to Water 방식으로 설정하였다.

축열조는 건물의 난방부하와 급탕에 이용되는 소형모델로 용량은 0.5m³이며, 축열조 유지온도는 50°C로 설정하였다. 또한, 축열조의 On/Off는 차온제어를 통해 작동되며 내부온도가 50°C가 되면 축열운전이 실시되고, 60°C가 되면 정지한다.

팬코일유닛의 공기유량은 정격조건에서 0.3m³/s이고, 냉난방 용량은 12kW, 소비전력은 0.15kW로 입력하였다. 순환펌프는 총 4개로 구성되어 있으며, 순환유량은 1500kg/hr, 소비전력은 0.22kW로 설정하였다.

Table 3. Case study condition

	PVT Module Area
Case 1	3.874 m × 4.97 m (19.25m ²)
Case 2	7.748 m × 4.97 m (38.51m ²)
Case 3	11.622 m × 4.97 m (57.76m ²)

Table 3.은 시뮬레이션 Case Study 조건을 나타낸다. 본 연구에서는 태양광열-지열 하이브리드 시스템의 설치용량에 따른 성능변화를 정량적으로 분석하고, 제로에너지빌딩 구현을 위한 시스템 적정 설계용량을 검토하고자 하였다. 따라서 태양광열 모듈 설치면적을 설계변수로 설정하여 설치면적에 따른 에너지 자립률을 분석하였다. Case 1의 태양광열 모듈 설치면적은 모듈 10장을 설치한다고 가정하여 19.25m²로 설정하였으며 Case 2와 Case 3은 Case 1에서 모듈 개수를 2배, 3배로 증가시켰다.

3. 시뮬레이션 결과

3.1. 대표일 냉난방 부하 및 히트펌프 COP

Fig. 4.는 냉난방 대표일의 피크부하 및 외기온도를 나타낸다. 피크부하는 냉난방 운전기간 동안 외기온도 조건이 가장 열악할 때 확인되었다. 난방 피크부하는 1월 16일(외기온도 -8.8°C), 냉방 피크부하는 8월 17일(외기온도 33.4°C)에 확인되었으며 각각 6.16kW, 2.37kW로 확인되었다. 한편, 난방부하의 합계는 12,576kWh, 냉방부하는 584kWh로 확인되었다.

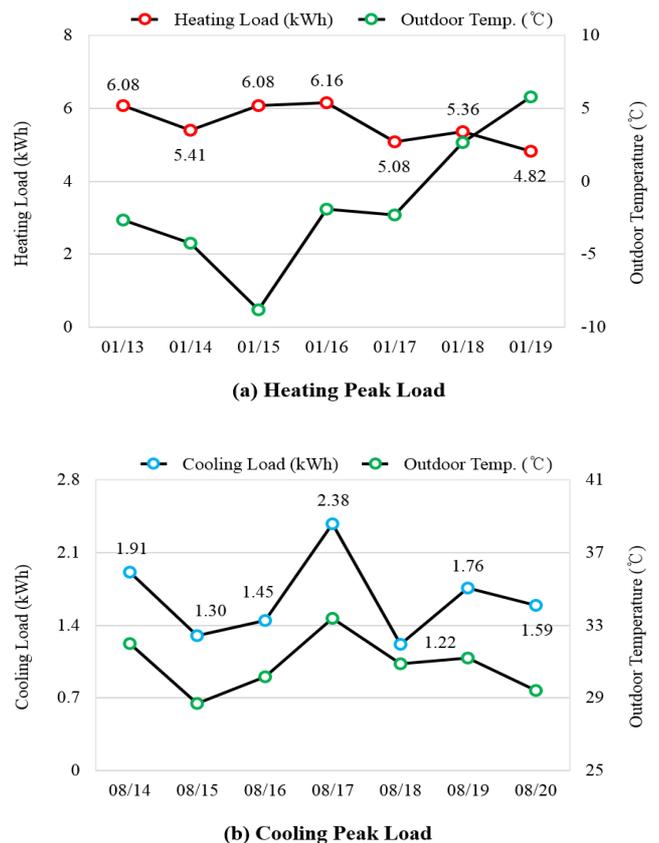


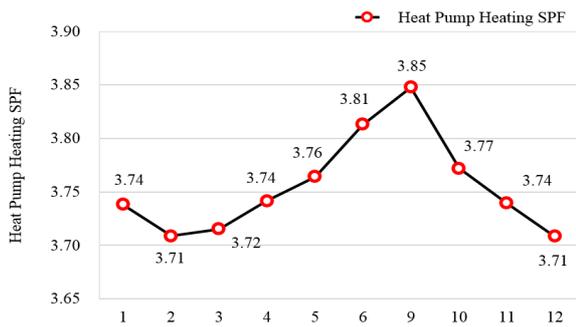
Fig. 4. Peak load of heating and cooling representing day

시뮬레이션 해석결과를 바탕으로 난방 피크부하에 안전율을 고려하여 지열 히트펌프의 용량을 10kW(2.8RT)로 산정하였다. 하이브리드 시스템의 히트펌프 성능을 산출하기 위해 태양열과 히트펌프 시스템을 융합한 IEA Task44 & Annex38(Solar and Heat Pump Systems) [29]의 성능평가 부분을 참고하였다.

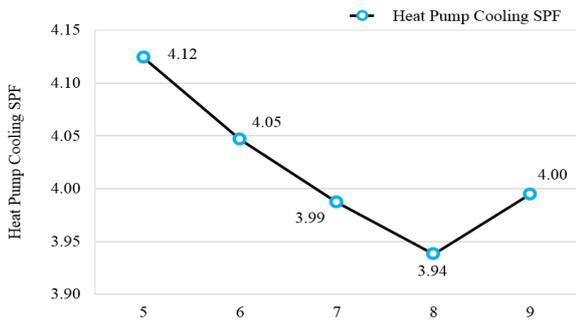
지열 히트펌프 성능 평가계수인 SPF(Seasonal Performance Factor)는 냉난방 운전기간 동안 생산된 열량의 합과 발생하는 소비 전력의 합의 비를 통해 산출된다(식1).

$$SPF_{HP} = \frac{Q}{P} \dots\dots\dots (식1)$$

여기서, SPF_{HP} 는 지열 히트펌프 성능계수, Q 는 지열 히트펌프의 생산열량(kW), P 는 지열 히트펌프의 소비전력(kW)를 나타낸다.



(a) Heat Pump Heating SPF



(b) Heat Pump Cooling SPF

Fig. 5. Heat pump SPF of heating and cooling season

지열 히트펌프 냉난방 성능계수는 9월과 5월에 가장 높았으며 각각 3.85, 4.12로 확인되었다. 반대로 12월과 8월에는 냉난방 성능계수가 가장 낮았으며 각각 3.71, 3.94로 나타났다.

건물의 냉온열 부하에 대응하기 위해 하이브리드 시스템에서 생산된 열량은 대부분 지열 히트펌프가 담당하였으며 이로 인해, 히트펌프 성능이 기존의 지열 단독 이용 시스템과 비교하여 획기적으로 향상되지 않는 것으로 판단된다.

3.2. 일사량 및 시스템 생산/소비전력

태양광열-지열 하이브리드 시스템의 설계용량에 따른 건물 에너지 자립률을 분석하기 위해 태양광열 모듈의 생산전력 및 소비전력을 산출하였다. 태양광열 모듈의 생산전력은 (식2)를 통해 계산된다.

$$P_{pvt} = (\pi\alpha)_n IAM \times G_t \times A_{pvt} \times \eta_{pvt} \dots\dots\dots (식2)$$

여기서, P_{pvt} 는 태양광열 모듈의 생산전력(kW), $\pi\alpha$ 는 태양광열 모듈의 투과율, IAM 은 태양광열 모듈 입사각($^\circ$) G_t 는 전천 일사량(kW/m²), A_{pvt} 는 태양광열 모듈의 면적(m²), η_{pvt} 는 태양광열 모듈의 전력효율을 나타낸다. 한편, 태양광열 모듈의 생산전력 산출을 위한 모듈의 효율은 (식3~5)에 의해 산출된다.

$$\eta_{pvt} = \eta_n \times X_t \times X_r \dots\dots\dots (식3)$$

$$X_t = 1 + E_t (T_{pvt} - T_{ref}) \dots\dots\dots (식4)$$

$$X_r = 1 + E_g (G_t - G_{ref}) \dots\dots\dots (식5)$$

여기서, η_{pvt} 는 태양광열 모듈의 전력효율, η_n 는 태양광열 모듈의 전력효율 조건, X_t 는 태양광열 모듈의 온도함수(1/°C), X_r 은 태양 복사함수(h·m²/kJ), T_{pvt} 는 태양광열 모듈의 표면온도(°C), G_t 는 전천 일사량(kW/m²)을 나타낸다.

Fig. 6.은 Case 1의 연간 생산전력 및 월별 일사량을 나타낸다. 태양광열 모듈의 생산전력은 4월에 304.7kW로 가장 높게 나타났으며, 12월에 184.0kW로 가장 낮게 확인되었다. 태양광열 모듈의 생산전력은 일사량에 많은 영향을 받은 것을 확인하였다.

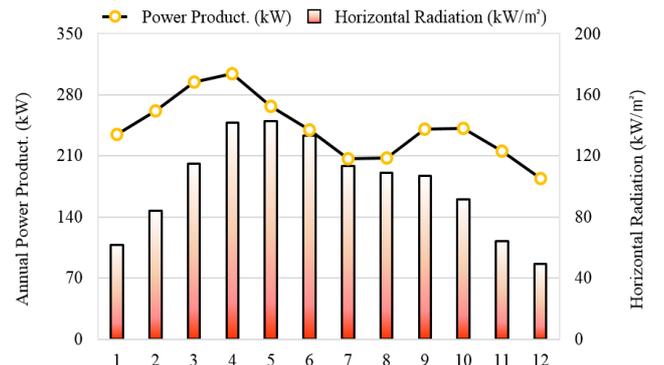


Fig. 6. Annual power production and radiation of Case 1

7월과 8월에는 동절기 보다 일사량이 높게 확인되었으나, 일사 및 외기온도에 의해 태양광열 모듈의 온도가 상승하여 전력효율이 감소되는 것으로 판단되며 이에 따라, 하절기 모듈의 생산전력이 동절기에 비해 비교적 낮게 생산된 것으로 사료된다.

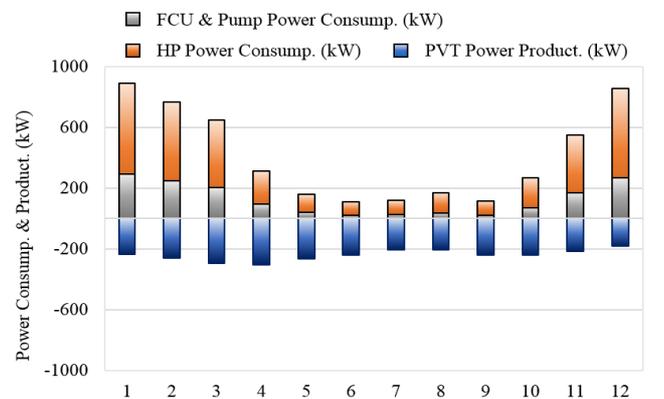


Fig. 7. Power production and consumption of Case 1

Fig. 7.은 Case 1의 월별 시스템 생산전력 및 소비전력을 나타낸다. 동절기(1월, 2월, 11월, 12월)의 시스템 소비전력 대비 태양광열 모듈의 생산전력 비율은 최대 35%로 확인되었으며, 일사량이 적고 난방부하가 많은 12월의 생산 및 소비전력 비율은 약 16%로 나타났다. 이에 관해, 동절기에 난방부하가 크기 때문에 태양광열 모듈 설치면적 19.25㎡으로 발생하는 시스템 소비전력을 모두 담당하기 어려운 것으로 확인되었다.

그러나 하절기(6월, 7월, 8월)에는 냉방부하가 작기 때문에 시스템 소비전력 대비 태양광열 모듈의 생산전력 비율은 최대 178%로 태양광열 모듈의 전력이 초과 생산되었다. 또한, 태양광열 모듈 설치면적 20㎡으로 하절기 동안 냉방부하에 대응하기 위해 발생하는 시스템 소비전력을 모두 담당할 수 있었다.

4. 건물 에너지 자립률 분석

4.1. 제로에너지건축물 인증등급

주거용 건축물을 대상으로 제로에너지빌딩 구현을 위해 태양광열-지열 하이브리드 시스템의 성능을 분석하고, 시스템 소비전력 대비 태양광열 모듈의 생산전력의 산출결과를 이용하여 적정 설치면적을 제안하고자 하였다.

따라서 본 연구에서는 한국에너지공단에서 제공하고 있는 제로에너지건축물의 인증등급 [30]을 참고하여 태양광열 모듈 설치면적에 따른 에너지 자립률 산출결과를 바탕으로 제로에너지건축물 등급을 산정하였다. 그러나 플러그 부하, 조명전력 부하 등 건축물의 에너지 이용에 대한 실시간 데이터가 부족하여 모든 에너지 소비패턴을 고려한 에너지 자립률 분석에는 한계점이 있다. 따라서 본 연구에서는 건축물 냉난방 에너지 사용에 대한 에너지 자립률을 평가하였다.

Table 4. Case study condition [30]

ZEB Level	Energy Independence Rate (%)
ZEB 1	Energy Independence 100%
ZEB 2	Energy Independence 80% ~ 99%
ZEB 3	Energy Independence 60% ~ 79%
ZEB 4	Energy Independence 40% ~ 59%
ZEB 5	Energy Independence 20% ~ 39%

Table 4.는 제로에너지건축물 인증등급을 나타낸다. 제로에너지건축물 인증등급은 건축물 에너지 자립률에 따라 ZEB 1부터 ZEB 5까지 5가지 등급으로 구분되며, ZEB 5등급의 에너지 자립률은 20% 이상 40%미만, ZEB 1등급은 에너지 자립률 100%이상으로 정의하고 있다.

4.2. 건축물 에너지 자립률

건축물 에너지 자립률은 건물 냉난방 부하에 대응하기 위해 이용된 총 에너지 소비량 대비 외부 에너지 공급량을 통해서 계산된다

[31]. 본 연구에서는 총 에너지 소비량을 시스템의 소비전력의 합계, 외부 에너지 공급량을 태양광열 모듈의 생산전력 합계로 설정하여 건축물 에너지 자립률을 계산하였다. 건축물 에너지 자립률은 (식6)을 통해 산출된다.

$$E = \left(1 - \frac{P_{pvt}}{C_{sys}}\right) \times 100 \dots\dots\dots (식6)$$

여기서, E는 건축물 에너지 자립률(%), P_{pvt}는 태양광열 모듈의 생산전력(kW), C_{sys}는 시스템의 소비전력(kW)을 나타낸다.

Fig. 8.은 Case 1(태양광열 모듈 설치면적 20㎡)의 에너지 자립률 및 소비전력을 나타낸다. 소비전력 합계는 4,964kW, 태양광열 모듈의 생산전력 합계는 2,898kW로 확인되었다.

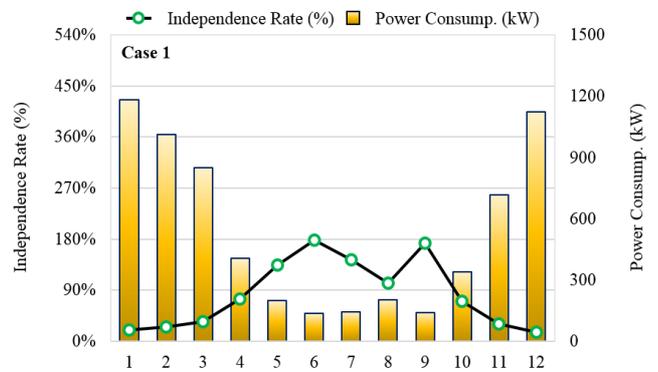


Fig. 8. Independent Ratio and Power Consumption of Case 1

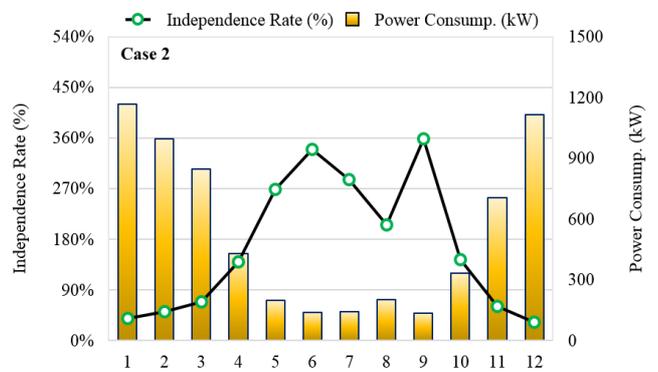


Fig. 9. Independent Ratio and Power Consumption of Case 2

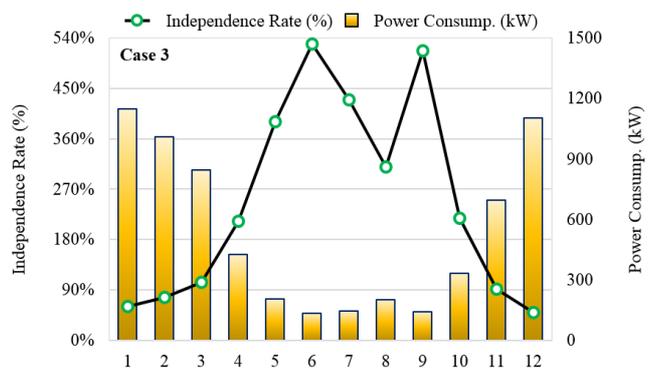


Fig. 10. Independent Ratio and Power Consumption of Case 3

Case 1의 연간 에너지 자립률은 44.4%로 산출되었다. 이에 따라, 태양광열 모듈 설치면적 19.25㎡로 시스템 전체 소비전력에 대응하기 어려운 것으로 확인되었다. 그러나, 5월부터 9월까지의 시스템에서 소비되는 전력 보다 태양광열 모듈에서 생산되는 전력이 많았으며, 시스템 소비전력 대비 생산전력이 각각 134%, 178%, 143%, 103%로 확인되었다.

Fig. 9.와 Fig. 10.은 Case 2(태양광열 모듈 설치면적 38.51㎡) 및 Case 3(태양광열 모듈 설치면적 57.76㎡)의 건축물 에너지 자립률 및 소비전력을 나타낸다. Case 2와 Case 3의 연간 에너지 자립률은 각각 89.8%, 135.0%로 확인되었다.

Case 2와 Case 3의 에너지 자립률 변화는 Case 1과 유사한 양상을 나타냈으며, 모든 Case에서 하절기에 에너지 자립률이 높게 확인되었다. 이는, 태양광열 모듈이 생산하는 열량이 크고 건물의 냉난방 부하가 다른 날 보다 작기 때문에 이러한 5월부터 9월까지의 에너지 자립률이 높은 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 제로에너지빌딩 구현을 위해 태양광열-지열 하이브리드 시스템의 성능을 검토하고, 태양광열 모듈의 설치면적 변화에 따른 생산전력 및 소비전력을 산출하였다. 산출 결과를 바탕으로 건축물 에너지 자립률을 산정하고, 시스템 적정 설계용량을 제안하였다.

Table 5. Result of energy independence ratio

	Power Product. (kW)	Power Consump. (kW)	Annual Energy Independence Rate (%)
Case 1	2,898	6,453	44.9 %
Case 2	5,767	6,423	89.8 %
Case 3	8,628	6,390	135.0 %

태양광열 모듈 설치면적에 따른 생산전력 및 소비전력 분석결과 설치면적이 증가함에 따라 태양광열 모듈의 생산전력은 Base Case(Case 1) 보다 각각 98.9%, 197.7% 향상되었다. 또한, 태양광열 모듈의 설치면적 증가할수록 태양열원을 이용한 생산열량 비중이 향상되어 히트펌프의 소비전력이 감소하였으나 그 영향은 아주 작은 것으로 확인되었다.

Case 3(태양광열 모듈 설치면적 57.76㎡)의 경우 건축물 에너지 자립률이 100%를 초과하여 시스템이 과대설계된 것을 확인하였다.에너지 자립률 100%구현과 과대설계를 방지하기 위해서는 태양광열 모듈의 설치면적을 57.76㎡ 보다 감소시키고 설치면적 38.51㎡ 보다 크게 설계되어야 할 것으로 사료된다.

한편, 동적 시뮬레이션 해석결과 지열 히트펌프의 난방 평균 SPF는 3.75로 확인되어, 기존 공기열원, 보일러 대비 높은 에너지 절감효과를 얻을 수 있을 것으로 판단되며 이에 따라, 태양광열 모듈의 설치용량 저감 및 시스템 소비전력을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 태양열에 의한 생산열량 비중이 지열

에 비해 낮은 수준으로 계산되었으나 이는, 축열조의 설치방법에 따른 결과로서 향후 히트펌프 열원측의 추가 축열조 설치 등의 검토가 필요하다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “국제공동 기술개발사업(N062000014_태양광열-지열 이용 Trigenation 시스템 개발 및 사업화)”의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

Reference

- [1] International Energy Agency, World Energy Outlook 2017, 2017
- [2] 장호진, 박창봉, 박진철, 제로에너지빌딩의 에너지효율 성능평가에 관한 연구, 한국건축환경설비학회 논문집, 제 4권, 제 3호, 2010, pp.149-156 // (Jang, Ho-Jin, Park, Chang-Bong, Park, Jin-Chul, A Study on Energy Efficiency Evaluation of Zero Energy Building, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Korea, Vol.4, No.3, 2010, pp.149-156)
- [3] 어승희, 이정빈, 최윤성, 김대현, PVT 시스템의 PV 모듈 및 태양열 집열기 대비 성능 및 효율 비교분석, 한국태양에너지학회 논문집, 제 32권, 제 2호, 2012, pp.1-10 // (Euh, Seung-Hee, Lee, Jeong-Bin, Choi, Yun-Sung, Kim, Dae-Hyun, The Performance and Efficiency Analysis of a PVT System Compared with a PV Module and a Solar Collector, Journal of the Korean Solar Energy Society, Korea, Vol.32, No.2, 2014, pp.1-10)
- [4] 이광섭, 앤드류, 강은철, 이의준, 태양 열 전기 복합생산 PVT Water and PVT Air 모듈의 실험적 성능비교 연구, 설비공학논문집, 제 26권, 제 12호, 2014, pp.559-564 // (Lee, Kwang-Seob, Putrayudha, S. Andrew, Kang, Eun-Chul, Lee, Euy-Joon, An Experimental Comparison Study of PVT Water and PVT Air Modules for Heat and Power Co-Generation, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Korea, Vol.26, No.12, pp.559-564)
- [5] Joe S. Coventy, Performance of a concentrating Photovoltaic/Thermal Solar Collector, Solar Energy, Netherlands Amsterdam, Vol.78, 2005, pp.211-222
- [6] Adnan Ibrahim, M. Y. Othman, M. H. Ruslan, M. A. Alghoul, M. Yahya, A. Zaharim, K. Sopian, Performance of Photovoltaic Thermal Collector (PVT) with Different Absorbers Design, WSEAS Transactions on Environment and Development, Greece Athens, Vol.5, Issue.3, 2009, pp.321-330.
- [7] 정용대, 남유진, 외기 및 순환수 온도조건을 고려한 PVT-water 시스템의 성능실험, 한국생태환경건축학회 논문집, 제 15권, 제 5호, 2015, pp.83-88 // (Jeong, Yong-Dae, Nam, Yujin, Performance Test of PVT-water System considering Ambient Air and Circulating Water Temperature, The International Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, Korea, Vol.15, No.5, 2015, pp.83-88)
- [8] 이광섭, 이의준, 강은철, PVT 모듈에서의 유입수 온도에 따른 전력 효율 특성에 관한 실험적 연구, 신재생에너지, 제 12권, 제 3호, 2016, pp.31-35 // (Lee, Kwang-Seob, Lee, Euy-Joon, Kang, Eun-Chul, Experimental Study on the PVT Inlet Water Temperature Dependant Power Efficiency Characteristics, New & Renewable Energy, Korea, Vol.12, No.3, pp.31-35)
- [9] 전종길, 이동건, 백이, 김형권, 시설원예용 지열 및 태양열 이용 하이브리드 히트펌프 시스템의 난방성능에 관한 연구, 한국태양에너지학회 논문집, 제 35권, 제 5호, 2015, pp.49-56 // (Jeon, Jong-Gil, Lee, Dong-Geon, Paek, Yee, Kim, Hyung-Gweon, Study on Heating Performance of Hybrid Heat Pump System using Geothermal Source and Solar Heat for Protected Horticulture, Journal of the Korean Solar Energy Society, Korea, Vol.35, No.5, 2015, pp.46-56)
- [10] 백남준, 한승현, 이왕제, 신우철, 단독주택용 태양열/지열 융복합시스템의 태양열 급탕성능 평가, 설비공학논문집, 제 27권, 제 11호, 2015, pp.581-586 // (Baek, Namchoon, Han, Seunghyun, Lee, Wang-Je, Shin, Ucheul, An Evaluation of the Solar Thermal Performance of the Solar/Geo Thermal Hybrid Hot Water System for

- a Detached House, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Korea, Vol.27, No.11, 2015, pp.581~586)
- [11] 백남준, 정선영, 윤운상, 이경호, 콤팩트형 태양열/지열히트펌프 하이브리드 냉난방 및 급탕 시스템 개발 및 성능분석, 한국태양에너지학회 논문집, 제 32권, 제 5호, 2012, pp.59~67 // The Development and Performance Analysis of Compact Type Solar Thermal/Ground Coupled Heat Pump Hybrid System for Heating, Cooling and How Water, Journal of the Korean Solar Energy Society, Korea, Vol.32, No.5, pp.59~67)
- [12] 정용대, 남유진, 여성구, 태양광열·지열 하이브리드 시스템의 적정 용량 설계를 위한 동적 에너지 시뮬레이션, 대한건축학회 논문집 - 구조계, 제 33권, 제 7호, 2017, pp.53~61 // (Jeong, Yong-Dae, Nam, Yujin, Yeo, Seong-Gu, Dynamic Energy Simulation for Suitable Capacity Decision of GSHP-PVT Hybrid System, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Korea, Vol.33, No.7, 2017, pp.53~61)
- [13] Yong-Dae Jeong, Min Gyung Yu, Yujin Nam, Feasibility Study of a Heating, Cooling and Domestic Hot Water System Combining a Photovoltaic-Thermal System and a Ground Source Heat Pump, Energies, Switzerland Basel, Vol.10, Issue.8, 2017, pp.1243~1271
- [14] 최민주, 백영민, 윤종호, 100% 에너지자립 제로에너지주택을 위한 비용효과적 신재생 설비시스템 최적구성에 관한 연구, 한국생태환경건축학회 논문집, 제 18권, 제 3호, 2018, pp.41~46 // (Choi, Min-Joo, Beak, Yeong-Min, Yoon, Jong-Ho, Cost-Effective Optimal Configuration of Renewable Energy Equipment System for 100% Self Sufficient Zero Energy, KIEAE Journal, Vol.18, No.3, 2018, pp.41~46)
- [15] 김득원, 이동원, 허재혁, 김민휘, 진천 친환경에너지타운의 냉방기간 실증운전결과 및 에너지 자립도 분석, 한국건축환경설비학회 논문집, 제 12권, 제 3호, 2018, pp.202~211 // (Kim, Deuk-Won, Lee, Dong-Won, Heo, Jae-Hyeok, Kim, Min-Hwi, Empirical Results and Energy Self-sufficiency Analysis of Jincheon Eco-friendly Energy Town in Cooling Season, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Vol.12, No.3, 2018, pp.202~211)
- [16] 정용대, 태양광열-지열 하이브리드 시스템의 성능예측 및 경제성 분석에 관한 연구, 석사학위논문, 부산대학교, 2017 // (Jeong, Yong-Dae, Study on the Performance and Feasibility Analysis of PVT-GSHP Hybrid System, Master Thesis, Pusan National University, Korea, 2017)
- [17] 남유진, 정용대, 건물에너지 자립화를 위한 태양광열-지열 하이브리드 시스템의 개발과 타당성 검토, 대한설비공학회 학술발표대회논문집, 2016.11, pp.245~246 // (Nam, Yujin, Jeong, Yong-Dae, The Development and Feasibility Study of the Geo-PVT Hybrid System for the Building Energy-Independence, Conference Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 2016.11, pp.245~246)
- [18] 정용대, 남유진, 솔라시뮬레이터를 이용한 PVT 모듈의 성능실험, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 2016.04, pp.243~244 // (Jeong, Yong-Dae, Nam, Yujin, Performance Test of PVT Module using a Solar Simulator, Conference Journal of Architectural Institute of Korea, 2016.04, pp.243~244)
- [19] 정용대, 남유진, 이영모, 강은철, 이광섭, 인공 태양광을 이용한 액체식 PVT 모듈의 성능실험, 대한설비공학회 학술발표대회논문집, 2016.11, pp.195~196 // (Jeong, Yong-Dae, Nam, Yujin, Lee, Young-Mo, Kang, Eun-Chul, Lee, Kwang-Seob, Performance Test of PVT-water Module using Artificial Sun Light, Conference Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 2016.11, pp.195~196)
- [20] 귀농귀촌종합센터, “농촌주택표준설계자료 - 농촌주택 표준설계도서”, <http://www.returfarm.com>, 2018.10.02.
- [21] 국가법령정보센터, “건축물의 에너지절약설계기준 - 별표 1 지역별건축물 부위의 열관류율표”, <http://www.law.go.kr>, 2018.10.02.
- [22] 국가법령정보센터, “건축물의 에너지절약설계기준 - 별표 8 냉·난방설비의 용량계산을 위한 실내 온·습도 기준”, <http://www.law.go.kr>, 2018.10.02.
- [23] 국가법령정보센터, “건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 - 별표 1의5 신축공동주택등의 기계환기설비의 설치기준”, <http://www.law.go.kr>, 2018.10.02.
- [24] 한국에너지공단, “건축물 에너지효율등급 인증제도운영규정 - 별표 2 주거 및 주거용 이의 건축물 용도프로파일”, <http://www.kemco.or.kr>, 2018.10.02.
- [25] ASHRAE, 2013 ASHRAE Handbook Fundamentals (SI), USA Atlanta: ASHRAE, 2013, pp.9.6~9.9
- [26] ISO(the International Organization for Standardization), ISO 7730 Ergonomics of the Thermal Environment - Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria, Switzerland: ISO, 2005, pp.13~26
- [27] 대한설비공학회, 설비공학 편람 제1권 기초, 한국: 대한설비공학회, 2018, pp.3.12-23~3.12-31
- [28] 남유진, 오진환, 수치 시뮬레이션을 이용한 수직밀폐형 지열시스템의 채열특성에 관한 연구, 한국태양에너지학회 논문집, 제 34권, 제 2호, 2014, pp.66~72 // (Nam, Yujin, Oh, Jin-Hwan, Study on the Characteristic of Heat Exchange for Vertical Geothermal System using the Numerical Simulation, Journal of the Korean Solar Energy Society, Korea, Vol.34, No.2, 2014, pp.66~72)
- [29] Jean-Christophe Hadorn, IEA Solar and Heat Pump Systems Solar Heating and Cooling Task 44 & Heat Pump programme Annex 38, Energy Procedia, Vol.30, 2012, pp.125~133
- [30] 제로에너지빌딩, “ZEB 소개 - 제로에너지건축물 인증제도기준”, <http://zeb.energy.or.kr>, 2018.10.02
- [31] 정선영, 백남준, 윤종호, 신우철, 김용경, 강승훈, 제로에너지 솔라하우스(KIER ZeS-II)의 에너지성능 측정 및 에너지자립도 분석, 대한건축학회 논문집 - 계획계, 제 27권, 제 12호, 2011, pp.307-314 // (Jeong, Seon-Yeong, Baek, Nam-Choon, Yoon, Jong-Ho, Shin, U-Cheul, Kim, Yong-Kyoung, Kang, Seung-Hoon, The Study on Energy Performance Measurement and Energy Self-Sufficiency Analysis of KIER Zero Energy Solar House II, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Korea, Vol.27, No.12, 2011, pp.307~314)