

# 태양광/열 및 지열 이용 하이브리드 시스템의 LCC 분석

## 1. 서론

최근, 국제사회에서는 급증하는 에너지 사용에 대응하기 위해서 신재생 에너지 보급 확대 및 관련 법규 제정을 시행하고 있다. 국내에서도 신재생 에너지 보급 확산을 위해 다양한 정책들이 시행되고 있으며, 특히 에너지 공급의무화(Renewable Energy Portfolio Standard), 열에너지 공급의무화(Renewable Heat Obligation) 등 에너지 생산 및 열에너지 이용에 관한 정책이 활발히 논의되고 있다. 이러한 국가적·사회적 요구에 맞추어 에너지 생산 및 열에너지를 동시에 이용할 수 있는 PVT(Photovoltaic/thermal) 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. PVT(Photovoltaic/thermal) 시스템은 전기를 생산하는 PV 모듈과 태양열 집열기를 결합한 장치로서, PV 모듈에서 전기를 생산하는 동시에 태양열 집열기로 열을 축열하고 PV 모듈의 온도를 낮추어 효율을 극대화시키는 시스템이다. 하지만 PVT 시스템의 경제성에 대한 정량적 평가 자료가 충분하지 않고, 타 시스템과의 조합 기술에 대한 경제성 평가가 이루어지지 않고 있어 상품화에 이르지 못하고 있다.

본 연구에서는 지열 및 PVT를 융합



채 호 병

청주대학교 건축공학과  
▶전공분야 : 건축환경설비  
▶이메일 : hobung2@naver.com



남 유 진

부산대학교 건축공학과 교수  
▶전공분야 : 건축환경설비  
▶이메일 : namyujin@pusan.ac.kr

한 태양광열 및 지열 이용 하이브리드 시스템(Geothermal-Photovoltaic/thermal, Geo-PVT)의 개발을 위해, Geo-PVT 시스템의 실현가능성을 평가하고, 타 시스템과의 초기투자비 및 운전비용을 비교·분석하였다. 또한, PVT의 설치 면적에 따른 경제성 분석을 실시하였다.

## 2. Geo-PVT (Geothermal-Photovoltaic/thermal) 시스템의 개요

Geo-PVT 시스템은 태양광(Photovoltaic : PV) 시스템의 과열로 인한 효율저하, 지열시스템의 지중온도 과열/과냉, 태양열 시스템의 저효율 등을 극복하기 위해, 태양광패널의 폐열 이

용, 지중 축열/축냉, 등의 개념을 도입한 융합 시스템이다. Geo-PVT 시스템의 장점은 지열 및 PVT에서 생산되는 폐열을 이용하여 지중 축열이 가능하며, 지열히트펌프의 열원으로 활용이 가능하기 때문에 히트펌프의 COP를 상승시킬 수 있다. 또한, PV 모듈의 온도를 낮추어 전기효율을 극대화할 수 있고, 히트펌프의 구동전력으로 사용이 가능하다. 따라서, 건물의 냉난방 에너지 공급에 있어서 PVT 시스템은 지중 축열 및 방열과 결합하였을 때 보다 효과적인 시스템 효율을 확보할 수 있는 가능성을 가진다. 그림 1은 PVT 패널, 히트펌프, 지중열교환기, 축열탱크 등으로 구성된 Geo-PVT 시스템의 시스템도를 나타낸다.

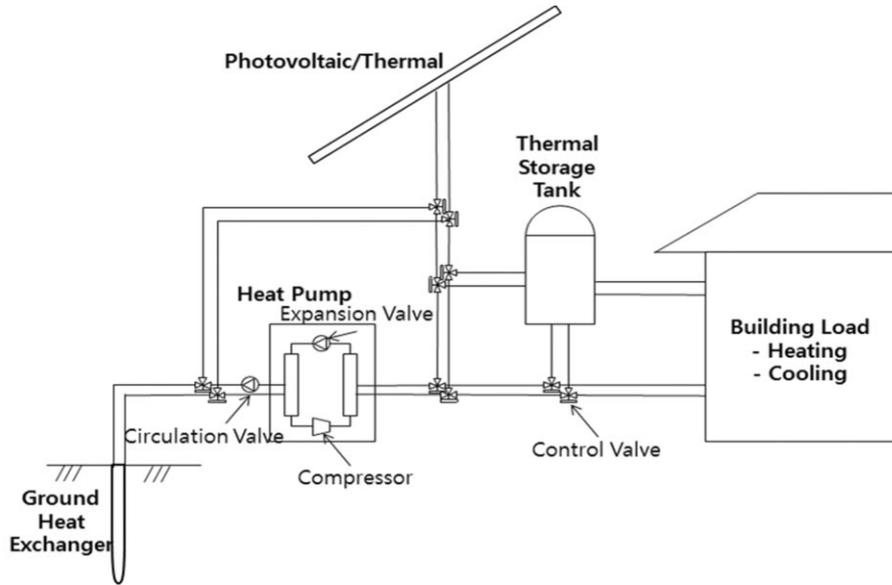


그림 1. Geo-PVT 시스템의 개략도

### 3. 해석모델 개요

#### 3.1 해석개요

PVT 시스템의 설치면적에 따른 경제성 분석을 실시하기 위해서, Geo-PVT 시스템을 표준주택모델<sup>[1]</sup>에 적용하였을 경우 경제성을 분석하였다. 표준주택모델의 냉난방 부하를 계산하

기 위해서 상용 부하해석 프로그램인 TRANSYS17을 이용하여 냉난방 부하를 계산하였다. 표준주택모델의 개요는 그림 2와 같으며 냉방기, 난방기는 11~4월, 6~9월, 중간기는 5월 10월로 설정하였고, 실내조건은 하계 실내 온도 26℃, 상대습도 50% 동계 실내 온도 22℃, 상대습도 50%로 일정하게 유지할 수 있도록 설정하였다. 표 2와

표 3은 표준주택 모델의 개요와 시뮬레이션 조건을 나타낸다.

#### 3.2 표준주택의 냉·난방, 급탕 부하량 및 전력생산량

본 연구에서 표준주택의 냉·난방 및 급탕 부하량을 계산한 결과, 외기 온도에 따른 표준주택의 최대 부하량은 약 4.7 kW로 계산<sup>[2]</sup>되었으며 PVT

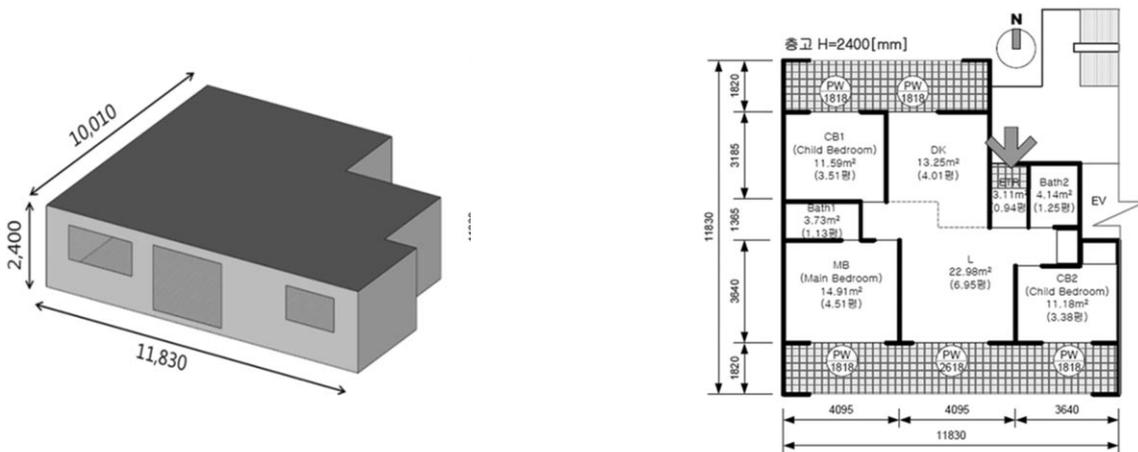


그림 2. 표준주택 모델

표 1. 표준주택 모델의 개요

용도	표준 주택	
연면적	100.3 m <sup>2</sup>	
건축규모	1개층	
용적	240 m <sup>3</sup>	
열관류율	지붕	0.336 W/m <sup>2</sup> K
	벽체	0.471 W/m <sup>2</sup> K
	바닥	0.331 W/m <sup>2</sup> K

표 3. 표준주택의 냉·난방 및 급탕 부하량

냉난방 부하량	최대 부하량 (kW)	4.7
	연간 냉방부하량 (kWh)	1104.3
	연간 난방부하량 (kWh)	6131.8
급탕 부하량	최대 급탕부하량 (kW)	3.7
	여름철 급탕 부하량 (kWh)	1170
	겨울철 급탕 부하량 (kWh)	3635

의 열에너지 효율과 전기에너지 효율은 선행연구<sup>3)</sup>를 참고하여, PVT 시스템과 PV 시스템의 전기효율은 14.3%, 12.6%, PVT 시스템의 열효율은 51%로 산정한 결과 그림 4와 같은 결과를 도출하였다.

본 글에서의 Case 설정은 주택모델에 도입 가능한 열원을 기준으로 Case 설정을 하였다. Case 1은 냉방 에어컨, 난방 및 급탕은 보일러를 사용하였고, Case 2에서는 에어컨과 보일러를 사용하여 냉난방 및 급탕을 사용하고 추가로 태양광 시스템을 설치하여 전력 생산이 가능하다고 설정하였다. 따라서 하계에

표 2. 시뮬레이션 조건

냉방기	11~4 월	
난방기	6~9월	
중간기	5 월, 10 월	
실내조건	하기	실내 설정온도 : 26℃, 상대습도 : 50%
	동기	실내 설정온도 : 22℃, 상대습도 : 50%
공조운전시간	평일 : 20시간, 주말: 19시간	
실내부하(재실지수)	인체부하 : 4인 (150 W/인), 기계부하(컴퓨터) : (230 w/대), 조명부하(19 w/m <sup>2</sup> )	
환기량	0.7회/h	
설치지역	서울	

### 3.3 타 시스템과의 경제성 분석을 위한 Case 설정

생산된 전력은 냉방에 이용되고 동계에 생산된 전기는 한국전력공사에 되판다고 설정하였다. Case 3은 주택의 냉난방을 지열시스템으로 이용하고, 급탕은 보일러를 사용한다고 설정하고, Case 4에서는 PVT 시스템을 이용하여 급탕부하를 담당하고 남은 폐열을 난방에 이용할 수 있다고 설정하였으며, 냉·난방 부하는 지열시스템으로 담당하도록 설정하였다. 또한 생산된 전기는 히트펌프의 구동 전력 및 한국전력공사에 되판다고 설정하였다.

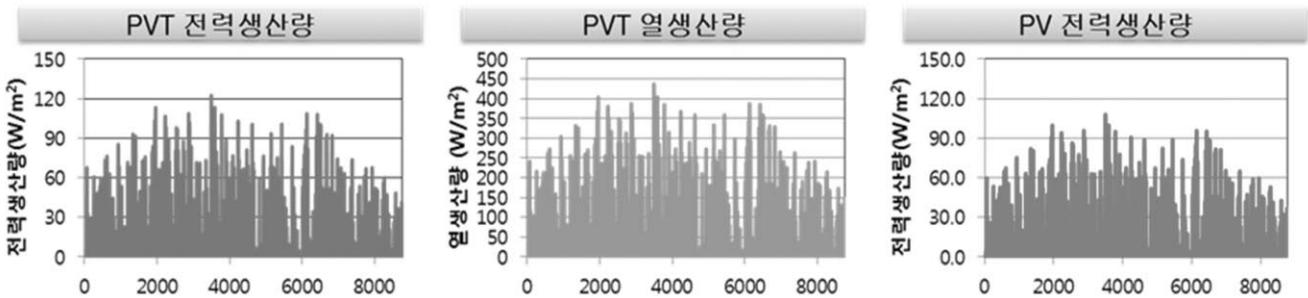


그림 3. PVT 및 PV 시스템 설치에 따른 전력 및 열 생산량 (설치면적 50 m<sup>2</sup>)

표 4. Case 설정 조건

Case 조건		냉 방	난 방	급 탕	기 타
Case 1	에어컨+보일러	에어컨	보일러	보일러	
Case 2	태양광+에어컨+보일러	에어컨	보일러	보일러	전기 생산
Case 3	지열 + 보일러	지열 냉방	지열 난방	보일러	
Case 4	Geo-PVT	지열 냉방	지열 난방	태양광	전기 생산

표 5. 신재생에너지 원별 기준단가

구분		기준단가		
태양광	일반건물	고정식	4,972/kW	
		추적식	5,604/kW	
		BIPV	9,553/kW	
	주택	고정식	3,913/kW	
		추적식	4,647/kW	
태양열	일반건물	평판형 · 이중진공관형	1,012/㎡	
		단일진공관형	1,160/㎡	
	주택	평판형 · 이중진공관형	10㎡이하	1,189/㎡
			10㎡초과~30㎡이하	1,012/㎡
		단일진공관형	10㎡이하	1,359/㎡
			10㎡초과~30㎡이하	1,160/㎡
지열	일반건물	수직밀폐형	1,260/kW	
	주택	수직밀폐형	10.5 kW이하	1,981/kW
			10.5 kW초과~17.5 kW이하	1,690/kW

(단위 : 천원, VAT 포함)

## 4. 경제성 분석

### 4.1 초기투자비 설정

각 시스템의 초기투자비용은 신재생에너지 월별 표준단가 및 시공업체의 견적서 등을 토대로 산정하였고, Geo-PVT의 초기비용은 정량적인 기준이 없기 때문에 태양광 시스템의

부하를 토대로 2RT로 설정하였다. Case 별 PV 및 PVT 시스템의 초기투자비를 산출한 결과, PV 및 PVT 설치면적 50㎡일 경우, Case 1(에어컨+보일러)에서 약 4,000천원, Case 2(태양광+에어컨+보일러)에서 약 31,174천원, Case 3(지열 냉·난방+보일러)에서 약 13,867천원, Case 4(Geo-PVT 시스템)에서 약 46,475천원으로

표 6. Case 별 PV 및 PVT 설치 면적에 따른 초기투자비

PV, PVT 설치면적 (㎡)		20	30	50
Case 1	에어컨+보일러	4,000	4,000	4,000
Case 2	태양광+에어컨+보일러	14,869	20,304	31,174
Case 3	지열 냉난방 + 보일러	13,867	13,867	13,867
Case 4	Geo-PVT	26,910	33,432	46,475

(단위 : 천원)

1.2배로 PVT 비용을 산정하고 지열시스템 초기비용과 합산하여 Geo-PVT 시스템의 초기투자비를 산정하였다. 지열 시스템의 설계용량은 표준주택 모델의 냉난방

나타났다.

### 4.2 운전비용 산출

운전비용을 산출하기 위해서, 각 시스템의 월별 냉난방 소비전력 및 생산전력량을 분석하였고, 난방 및 급탕에 이용되는 유류 사용량을 산정하였다. 운전비용의 산출은 한국전력공사의 요금 산정기준과 한국석유공사의 유가정보를 활용하였다. 또한 태양광 모듈에서 생산되는 전력은 한국전력공사로부터 매입이 가능하다고 가정하였다. 소비전력을 분석하기 위해, 에어컨과 히트펌프의 냉난방 COP는 각각 1.5, 4.0으로 설정하였다. 한편, PVT 시스템의 최적설계를 위해 PVT 설치면적에 따른 운전비용을 산출하였다.

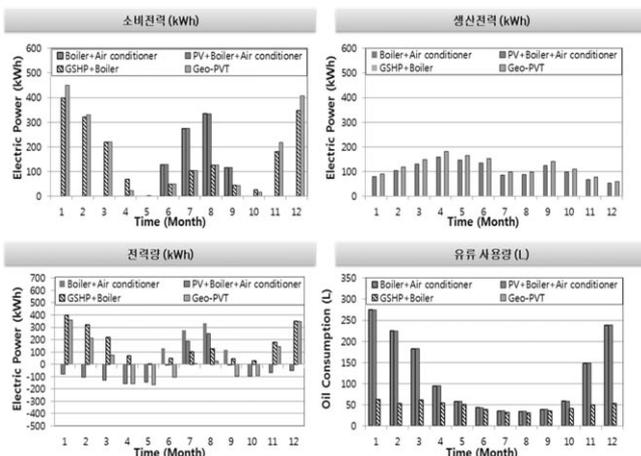


그림 4. 소비 전력 및 생산 전력량 검토 (PV 및 PVT 설치면적 20㎡)

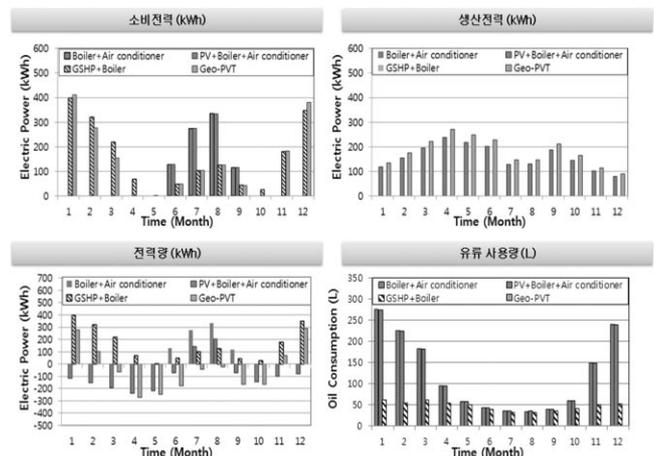


그림 5. 소비 전력 및 생산 전력량 검토 (PV 및 PVT 설치면적 30㎡)

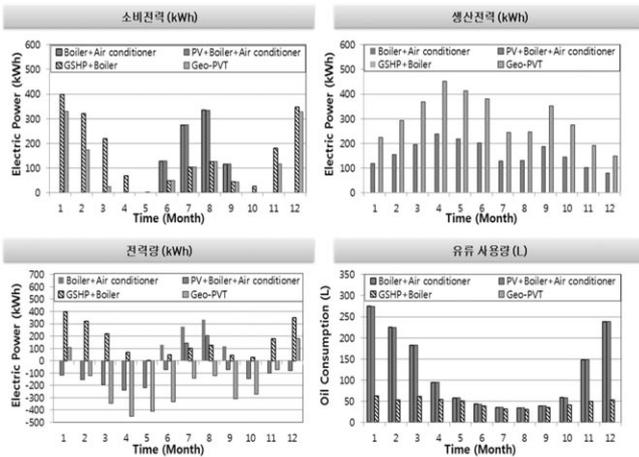


그림 6. 소비 전력 및 생산 전력량 검토 (PV 및 PVT 설치면적 50 m<sup>2</sup>)

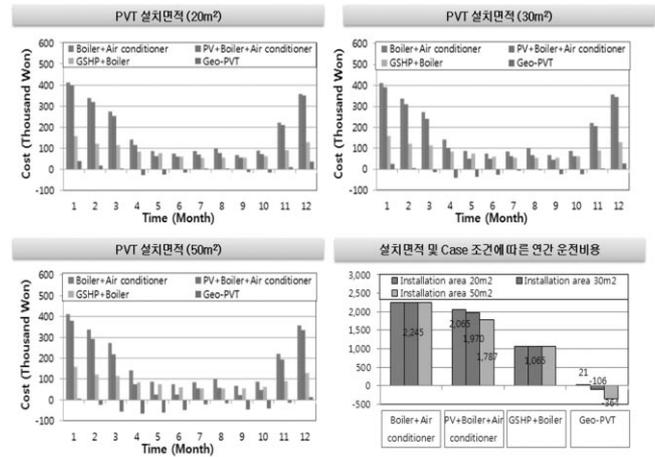


그림 7. PVT 설치 면적에 따른 월별 운전비용

#### 4.2.1 소비전력 및 생산 전력량 검토

소비전력은 PVT 설치 면적에 상관 없이 일정하지만, 20 m<sup>2</sup>, 30 m<sup>2</sup>, 50 m<sup>2</sup> PVT 설치면적이 커질수록 Geo-PVT 시스템의 동계 소비전력은 감소한다. 또한, PVT에서 얻은 열에너지를 급탕에 사용하고 남은 폐열로 난방을 하기 때문에 PVT 설치면적이 커질수록 난방부하의 소비전력이 감소한다. 생산 전력은 설치면적이 커질수록 상승하며 일사량이 가장 많은 4월달에 전력생산량이 가장 크게 나타났다. 특히 PVT 설치면적 50 m<sup>2</sup>일 경우, 12월 1월을 제외한 모든 달에서 전력소비량보다 전력생산량이 더 크게 나타났다. 유류 사용량은 설치면적에 관계없이 일정하게 나타났으며, PVT 설치면적이 가장 작은 20 m<sup>2</sup>일 경우에도 급탕 부하를 모두 담당할 수 있었다.

량을 산정하고 생산 전력을 되파는 가격을 모두 합산하여 계산하였다. Geo-PVT 시스템에서 PVT 설치면적 30 m<sup>2</sup>와 50 m<sup>2</sup>에 서는 연간 약 10만 원, 36만원의 이윤을 얻을 수 있었다.

#### 4.3 PVT 설치 면적에 따른 ROI(Retune on Investment) 분석

초기투자비 회수기간 및 운전기간 동안 비용을 구하기 위해 한국은행 기준 금리의 10년간 평균한인율 3.66%를 적용하여 현재법으로 계산하였다. 또한, Boiler, Air Conditioner는 10년 주기로 교체한다고 가정하였다. 초기비용 등의 비반복 비용은 식 (1)을 이용하였고, 운전비용 등의 반복 비용은 식 (2)를 이용하였으며, 두 계산치의 합(식 (3))으로 LCC 분석을 실시하였다.

여기서,  $P_F$  = 비반복비용의 현재가치의 합,  $A$  = 연간 증가발생비용,  $I$  = 실질이자율,  $P_A$ =반복비용의 현재가치의 합,  $F$  = 미래가,  $n$  = 분석기간,  $P$  = 현재환산이다.

그림 9는 초기투자비 및 운전비용을 적용하여 각 시스템에서 25년간 발생되는 비용을 분석하였다. 에어컨과 보일러는 10년 주기로 교체하였고, PV, PVT시스템과 지열시스템은 사용기간 25년 동안 교체비용이 발생되지 않는다고 설정하였다. PVT 설치면적에 20 m<sup>2</sup>를 기준으로 Case 2에서 10년, Case 3에서 6.3년, Case 3에서 13.5년으로 나타났고, PVT 설치면적에 따른 초기투자비 회수기간을 분석한 결과, 설치면적이 클수록 초기투자비 회수기간은 늘어났다. 시스템의 운전비용 감소에 비해 초기투자비 비용 증가가 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

#### 4.2.2 PVT 설치 면적에 따른 월별 운전비용

PVT에서 얻은 열에너지를 급탕에 사용하고 남은 폐열로 난방을 하기 위한 운전비용은 월별 전기요금 및 유류 사용

$$P_F = F \frac{1}{(1+i)^n} \quad (1)$$

$$P_A = A \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (2)$$

$$P = P_F + P_A \quad (3)$$

#### 5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 지열 및 PVT를 융합한 태양광열 및 지열 이용 하이브리드 시스템(Geothermal-Photovoltaic/thermal, Geo-PVT)의 개발을 위해,

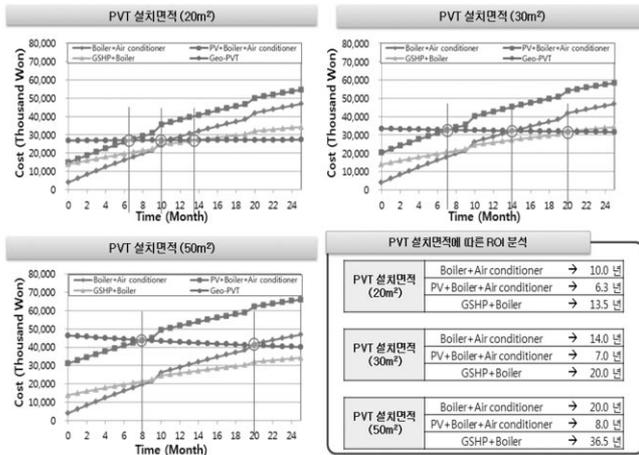


그림 8. PVT 설치 면적에 따른 ROI 분석

Geo-PVT 시스템의 실현가능성을 평가하고, 타 시스템과의 초기투자비 및 운전비용을 비교·분석하였다. 또한, PVT의 설치 면적에 따른 경제성 분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 소비전력은 PVT 설치 면적에 상관없이 일정하지만, PVT 설치면적이 커질수록 Geo-PVT 시스템의 동계 소비전력은 감소한다. 그 이유는 PVT에서 얻은 열에너지를 급탕에 사용하고 남은 폐열로 난방 이용하기 때문이다.
- (2) 생산 전력은 설치면적이 클수록 상승하며 일사량이 가장 많은 4월에 전력생산량이 가장 크게 나타났다. 또한, 표준주택의 월별 전력량을 확인한 결과, PVT 설치면적 50 m<sup>2</sup> 일 경우, 12월 1월을 제외한 모든 달에서 전력소비량 보다 전력생산량이 더 크게 나타났다.
- (3) 유류 사용량은 설치면적에 관계없이 일정하게 나타났으며, PVT 설치면적 20 m<sup>2</sup> 일 경우에도 급탕부하를 모두 담당할 수 있었다.
- (4) Geo-PVT 시스템에서 PVT 설치

면적 30 m<sup>2</sup>와 50 m<sup>2</sup>에 서는 연간 약 10만원, 36만원의 이윤을 얻을 수 있었다.

- (5) PVT 설치면적에 따른 초기투자비 회수기간을 확인한 결과, PVT 설치면적이 클수록 초기투자비 회수기간은 늘어났다. 그 이유는 시스템의 운전비용 감소에 비해 초기투자비 비용 증가가 더 큰 것으로 확인하였다.

향후, Geo-PVT 시스템의 개발을 통해 시스템 효율 및 실증실험을 실시하여 본 기술의 보급을 위한 기초자료를 구축할 계획이다.

### 참고문헌

1. 김영탁, 공동주택의 에너지 소비량을 예측하기 위한 대표일 난방부하모델 개발에 관한 연구, 대한건축학회논문집계획계, (2005)
2. 채호병, 이상준, 남유진, 공기열원과 지열원을 이용한 Dual-Source 히트펌프 시스템의 경제성 분석, 한국건축환경설비학회 추계발표대회, (2013)
3. 이진희, 천진아, 김준태, 전면 액체

식 흡열판을 적용한 Unglazed PVT(태양광·열) 모듈의 성능 실험 연구, (2011)

4. 어승희, 이정빈, 최윤성, 김대현 PVT 시스템의 PV 모듈 및 태양열 집열기 대비 성능 및 효율 비교분석, 한국태양에너지학회 논문집, 32(2), (2014)
5. 남춘, 정선영, 윤응상, 이경호, 콤팩트형 태양열/지열히트펌프 하이브리드 냉난방 및 급탕 시스템 개발 및 성능분석, 한국태양에너지학회 논문집, (2012)
6. 남유진, 태양열 및 지중열원을 이용한 히트펌프 시스템의 최적이용법에 관한연구, 설비공학회 논문집, (2012)
7. Thirugnanasambandam M, Iniyan S, Goic R, A review of solar thermaltechnologies. Renew Sust Energy Rev, Vol. 14(3) pp. 312–322, (2010)
8. Garcia MCA, Balenzategui JL, Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on nominal operation cell temperature calculations. Renew Energy, Vol. 29(12) pp. 1997–2010, (2004)
9. Tonui JK, Tripanagnostopoulos Y, Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements. Solar Energy, Vol. 81(4) pp. 498–511, (2007)
10. Zondag HA, de Vries DW, van Helden WGJ, van Zolingen RJC, van Steenhoven AA, The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector. Solar Energy, Vol. 72(2) pp. 113–128, (2002)