



## 동적 시뮬레이션을 이용한 태양광열 시스템의 성능특성 분석

*Study on the Analysis Performance of PVT system using the Dynamic Simulation.*

김상열\* · 남유진\*\*

Kim, Sang-Yeal\* · Nam, Yujin\*\*

\* Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ. South Korea

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

### ABSTRACT

**Purpose:** A photovoltaic/thermal system is a solar collector combining photovoltaic module with a solar thermal collector, which produces electricity and heat at the same time. PVT system removes heat from PV module through air or liquid that would help to raise the efficiency of the PV systems performance. Many innovative systems and products have been put forward and their quality evaluated by academics and professionals. However, even though various of PVT system were developed and several systems were applied to practical use, there have been few researches for the performance analysis using the dynamic simulation. **Method:** In this study, the review of recent research and development trend for PVT systems were conducted. Furthermore, in order to develop the optimum design method, the performance analysis for PVT system was conducted by a dynamic simulation. **Result:** In the results, it was found that the performance of PVT system significantly depends on the ambient temperature and solar radiation. Moreover, in the weather condition of Seoul, average efficiency of electricity and heat in heating season were 13.79 and 41.85%, and they in cooling season were 14.39% and 26.18%, respectively.

### KEYWORD

태양광/열 시스템  
동적 시뮬레이션  
열효율  
전기효율

Photovoltaic/Thermal system  
Dynamic Simulation  
Thermal Efficiency  
Electrical Efficiency

### ACCEPTANCE INFO

Received December 11, 2014  
Final revision received January 15, 2015  
Accepted January 20, 2015

© 2015 KIEAE Journal

## 1. 서론

최근 발표된 정부의 중장기 국가에너지기본계획에 따르면 저탄소 녹색성장 기반 하에 신재생 에너지의 비중을 2035년까지 현재 3.7%에서 11%까지 증가시킬 계획이다. 그 중 가장 큰 비중을 차지하는 것은 태양광과 태양열로서 전체에너지의 총 65%를 태양에너지로 공급할 계획이다. 태양에너지의 효율적 이용 기술 중 하나인 태양광열 시스템(PVT시스템)은 PV모듈의 전기생산과 동시에 발생하는 열을 효율적으로 이용하여 급탕이나 난방에 활용할 수 있는 장치이다. PVT시스템은 전기와 열을 동시에 생산하기 때문에 태양광발전시스템과 태양열 집열기를 개별적으로 설치하는 것에 비해 설치 면적을 줄일 수 있고, 설치 면적을 고려했을 때 단독적인 태양광발전이나 태양열 집열기보다 많은 양의 에너지를 동시에 생산할 수 있다고 보고되고 있다. Fig.1은 PVT시스템의 개념도로서 시스템 구성 및 원리를 나타낸다. 본 시스템은 일반적으로 PV모듈과 태양열 집열 장치를 결합한 형태로 구성되며, 열 흡수관은 PV모듈을 액체나 공기 등의 순환매체를 이용하여 태양광 패널의 온도를 낮추어 전기성능을 개선하고, 열에너지를 집열하는 두 가지 기능을 가진다. 따라서 전기뿐만 아니라 열에너지를 동시에 생산하고 기존 PV시스템에 추가적인 기능을 추

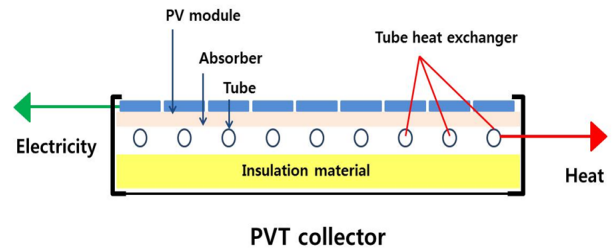


Fig 1. Concept of Photovoltaic Thermal system

가하여 전체효율을 증진시킬 수 있다.

건축에서의 신재생에너지 이용에 대한 관심이 높아짐에 따라 PVT시스템에 대한 연구도 다양하게 진행되고 있다. 특히, 공기를 열매체로 하는 공기식 PVT시스템은 국내·외에서 다양한 실험적, 해석적 연구가 수행되고 있으며, 시스템 상용화 단계에 이르렀다. 하지만, 물이나 부동액을 열매체로 이용하는 액체식 PVT시스템은 실험적 연구단계에 있어, 정량적 데이터나 설계 매뉴얼 등이 미흡한 실정이다. 액체식의 경우, 공기식에 비해 보다 많은 열교환량을 얻을 수 있으며, 타 열원시스템과의 융합이 용이하여 활용도가 높다. 따라서 본 연구에서는 태양광 발전과 태양열을 동시에 이용하는 PVT시스템의 최근 연구동향을 분석하고, 액체식 PVT의 성능 특성 분석을 위한 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션에서는 다양한 설계인자의 변화에 따른 PVT시스템의 전기효율

및 열효율을 분석함으로써 최적 설계 수법의 개발을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 연구동향분석

### 2.1. 국외연구동향

1990년대 이후 지구온난화 및 에너지 문제에 대한 관심이 증가함에 따라, 건물일체형 태양광발전시스템(BIPV), PVT시스템 등과 같은 건축에서의 태양에너지 이용에 관한 연구가 급격히 증가하였다.

초기의 PVT관련 연구로서, A.A Hegazy et al.<sup>1)</sup> (2000)는 열전달계수에 따라 4가지의 공기식 PVT 모듈을 이용하여 열, 전기, 유압 등의 종합적인 성능에 대한 연구를 수행하였다. 또한, Y. Tripanagnostopoulos et al.<sup>2)</sup> (2002)은 액체식과 공기식 PVT, 그리고 유리커버의 유·무에 따른 4가지의 모델을 디자인하여 실외 실험을 통하여 시스템의 열적, 전기적인 에너지 효율을 각각 비교분석하였다. M.J.M jong et al.<sup>3)</sup> (2002)은 가정에서 이용될 수 있는 PVT 패널을 이용하여 전기 생산, 공기를 예열원으로 하는 환기시스템, 히트펌프를 결합한 서로 다른 3가지의 시스템에 대하여 시뮬레이션(TRNSYS)을 통해 에너지 성능과 경제성을 비교 분석하였다. 한편, PVT의 전기 및 열효율에 있어 유체가 이동하는 집열부의 형상이나 열교환 방식은 중요한 성능인자가 된다. H.A Zondag et al.<sup>4)</sup> (2003)는 Sheet-and-tube, channel, free flow, two-absorber(insulated) type 등의 7가지 디자인의 PVT컬렉터를 제안하고, 실험을 통해 각각 PVT컬렉터의 에너지 성능을 비교분석하였다. 그 결과로, two-absorber(insulated) type에서 가장 높은 평균 열효율 39%를 보였고, 평균 전기 효율은 커버가 하나인 sheet-and-tube type이 7.6%로 가장 높은 결과를 얻었다. J.S Coventry et al.<sup>5)</sup> (2005)는 단결정 태양전지와 2개 중심축의 추적장치와 함께 파라볼릭의 형태로 집광률을 높인 CHAPS 컬렉터를 개발하여 성능 실험을 하였다. M.Y Othman et al.<sup>6)</sup> (2006)은 개발된 태양열을 이용한 건조 시스템 4가지 디자인(V-groove 태양열 집열기, double-pass 태양열 집열 저장고, 태양열 제습 시스템, PVT 시스템)에 대하여 각각의 디자인과 성능에 대하여 소개하고 농업 발전을 위한 PVT시스템의 활용에 대하여 소개하였다. 한편, T.T Chow et al.<sup>7)</sup> (2007)는 아열대 기후에 적용이 가능한 새로운 액체식 PVT(태양광-열사이펀)컬렉터에 대한 실험 및 경제성 평가를 실시하였고, 또한 유리 커버의 유·무에 따른 PVT시스템에 에너지 성능을 열역학적 관점에서 여섯 가지 작동 파라미터들의 영향에 대해 연구하였다<sup>8)</sup> (2009). J.K Tonui et al.<sup>8)</sup> (2007)는 공기식 PVT 컬렉터를 일반, 이중 시트와 방열 핀이 설치된 3가지 모델을 대상으로 실험하여 에너지와 엑서지 성능을 비교분석하였고, 그 중 방열 핀을 공기층 부분에 부착하여 냉각효과를 높이고 또한 시스템의 열효율을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. Table 1에 해외의 PVT시스템 연구동향을 정리하여 나타냈다.

대부분의 연구들은 지역 기후나 설치 조건에 적합한 시스템 사양 개발을 위한 실험적 연구에 주목하고 있으나, 최적 설계를 위

Table 1. Research Review of PVT system.

Author	contents of research
A.A Hegazy (2000)	Comparative analysis of the performance of various PV/T models along with heat transfer coefficients
Y. Tripanagnostopoulos (2001)	Experimental performance comparison of various PVT models (PV/WATER type, PV/WATER+GL type, PV/AIR type, PV/AIR+GL type)
M.J.M jong (2001)	Comparative analysis of the economic and performance of Three different PVT systems using the simulation
H.A Zondag (2003)	Comparison analysis of the total efficiency of seven different design types of PVT collectors (sheet-and-tube, channel, free flow, two-absorber(insulated) types.)
J.S Coventry (2005)	Experimental thermal and electrical performance of a ANU CHAPS PVT collectors (Thermal efficiency:58%, Electrical efficiency: 11%, Total efficiency: 69%)
M.Y Othman (2006)	Introduce design and performance of four advanced solar assisted drying system
T.T Chow (2007)	Performance and economic evaluation of a new water-type PVT collector system
J.K Tonui (2007)	Experimental performance comparison of various PVT models(PVT/AIR-REF, PVT/AIR-TMS, PVT/AIR-FIN)
T.T Chow (2009)	Comparative analysis of the performance of energy and exergy of PVT collector with-without glass cover

한 해석적 연구는 드물다.

### 2.2. 국내연구동향

국내에서도 최근 BIPV시스템과 함께 PVT시스템에 대한 관심이 증가하고 있으며 다양한 연구가 진행되고 있다. Table 2는 국내의 액체식 PVT시스템의 연구동향을 나타냈다.

Kang et al.<sup>10)</sup> (2009)은 평판형 액체식 Glazed PVT 복합모듈을 설계 및 제작하고 성능에 영향을 주는 요소 중 입구온도, 외기온도, 일사량에 변화에 따른 시스템의 에너지 성능을 분석하였다. 그 결과, 유수입구온도와 외기온도가 시스템의 집열 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, 전기성능은 일사량에 지배적인 영향을 받지만 PV모듈 후면온도를 결정하는 주요 원인은 유수입구온도와 외기온도라고 분석되었다. Kim Jin-Hee et al.<sup>11-12)</sup>는 액체식 PVT시스템에 관한 다년간의 연구를 통해 PVT복합모듈을 설계 및 시제작하고 성능실험을 수행하여 모듈의 열적, 전기적 성능에 대한 효율을 정량적으로 분석하였다. 연구 결과에 따르면, 집열 성능에서 Unglazed PVT 집열기는 Glazed PVT 집열기에 비해 평균 열효율이 매우 낮아 국내의 동계 기후와 같이 외기가 낮아 열손실이 큰 조건에서는 매우 불리한 것으로 나타났다.

한편, Park et al.<sup>16)</sup> (2013)는 태양전지 후면의 환기 구조를 갖는 공기식 PVT 컬렉터를 옥외에 설치하여 송풍팬의 환기 시, PV모듈 후면과 공기층 온도, 취출 온도 및 시스템의 성능 등을 분석하였다. 또한, Bang et al.<sup>17)</sup> (2013)은 PVT컬렉터에서 기존의 BIPV 시스템보다 전기적 성능이 1% 높게 나타난다고 분석하였다. 또한 Park et al. (2012)는 건물에 설치된 폐열회수 환기시스템과의 적용을 위한 공기식 PVT컬렉터를 제작하여 전기성능 및 집열 성

Table 2. Experimental study on performance of liquid based PVT

Experimental equipment	Thermal efficiency	Electrical efficiency	Total efficiency
Glazed PVT <sup>10)</sup> Kang et al. (2009)	27.53%	10.01%	37.60%
Glazed PVT Unglazed PVT <sup>11)</sup> Kim et al. (2009)	Glazed: 39% Unglazed: 24%	Glazed: 10.3% Unglazed: 11.8%	Glazed: 49.3% Unglazed: 35.8%
Unglazed PVT PV module <sup>12)</sup> Kim et al. (2011)	51%	PVT: 14.3% PV: 12.6%	-
Unglazed PVT <sup>13)</sup> Chun et al. (2011)	42%	Average fluid temperature 12-20°C: 15.2% 21-30°C: 14.2%	-
Unglazed PVT <sup>14)</sup> Chun et al. (2010)	32.30%	12.40%	44.70%
Water based PVT PV module <sup>15)</sup> Kim et al. (2011)	44%	PVT: 13.1% PV: 12.7%	-

Table 3. Experimental study on performance of air based PVT

Experimental equipment	Thermal efficiency	Electrical efficiency
Air based PVT <sup>16)</sup> Park et al. (2013)	Solar radiation 700w/m <sup>2</sup> : 21~23%	Solar radiation 750w/m <sup>2</sup> maximum: 16%
Air based PVT <sup>17)</sup> Bang et al. (2013)	14%	13%
Air based PVT <sup>18)</sup> Kim et al. (2008)	Base: 30% Aluminum: 37% Copper: 46%	Base: 8.7% Aluminum: 9.5% Copper: 10%

능을 분석하였고, Kim et al.<sup>18)</sup> (2008)는 공기식 PVT지붕시스템 모형을 설계 및 시제작하고 집열 효율을 높이기 위해 PV모듈에 방열 동 핀과 방열 알루미늄 핀을 부착한 개선유형에 대해 에너지 성능을 비교분석하였다.

공기식 PVT의 해석적 연구로서 Park et al.<sup>19)</sup> (2012)은 TRNSYS17을 이용하여 모델링을 수행하고 동절기 동안 외기를 도입하는 일반적인 폐열회수 환기시스템과 PVT 컬렉터를 예열원으로 이용하는 환기시스템에 대해 각각 실내 공급온도 및 온도 효율을 비교분석하고, 예열원으로 적용된 공기식 PVT컬렉터의 에너지성능을 분석했는데, 겨울철 공기식 PVT로부터 데워진 외부공기 열원으로 실내공급 측 온도를 높일 수 있으며, 공기식 PVT 컬렉터로부터 예열원을 받는 환기시스템이 평균 7% 높은 효율을 가져온다고 나타났다. 또한, Na et al.<sup>20)</sup> (2013)은 PVT모듈과 히트펌프를 융합한 형태의 PVT-히트펌프 통합기술을 제시하였다. PVT 모듈의 전기와 열 생산량은 인공태양으로 조성한 실험 조건에서 측정하고, EES(Engine-ering Equation Solver) 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 하이브리드 시스템의 성능을 예측 및 분석하였다. 실험 결과, 공기식 PVT 시스템의 성능은 아래 표와 같으며, PVT-히트펌프 통합기술은 PVT 모듈을 열원으로 활용하면 공기열원히트펌프의 COP가 1.58% 향상하고, PVT에서 생산된 전력을 자급하면 시스템의 COP는 기존 대비 13.56%가 향상한다고 분석되었다.

Table 4. Simulation study on performance of air based PVT

Simulation Tool	equipment	Electrical efficiency	Thermal efficiency
TRNSYS <sup>19)</sup> Park et al. (2012)	Air type PVT (Type 567) Heat Recovery Device (Type 667)	18%	25%
EES <sup>20)</sup> Na et al. (2013)	Air type PVT AAHP (Air to Air Heat pump)	13.2%	47.7%

최근에는 PVT의 건물적용에 초점을 둔 건물일체형 태양광열복합시스템 (BIPVT: Building Integrated PhotoVoltaic/Thermal system)나 타 열원에너지 시스템과 결합하여 시스템 효율향상을 도모하는 태양광열-지열(Geo-PVT) 하이브리드 시스템에 대한 연구가 보고되고 있다. 하지만 이러한 연구들은 실험적 레벨에 그치고 있으며, 실제 건물 적용을 위해서는 동적에너지 시뮬레이션에 근거한 최적설계수법이 정립되어야 한다. 특히, 타 열원시스템과의 활용도가 높은 액체식 PVT시스템에 대해서는 시스템 설계를 위한 해석적 연구가 드물다. 따라서 본 연구에서는 PVT시스템의 최적 설계 수법을 개발하기 위해 동적 에너지 시뮬레이션을 이용한 성능 특성 분석을 실시하였다.

### 3. PV/T 시스템의 모델링과 해석 방법

#### 3.1. 시뮬레이션 모델링 개요

Fig. 2는 액체식 PVT 시스템의 시뮬레이션 모델링 개요로서 PVT 컬렉터와 축열조, 차온제어 시스템, 펌프 등으로 구성된다.

PVT 컬렉터는 유리커버가 없는 Unglazed형으로서 높이는 1.644m, 넓이는 0.992m, 두께는 0.04m로 설정하였고, 흡열판은 알루미늄 재질로(두께 0.003m, 열전도율 238W/mK) 하였다. 축열조는 태양열 시스템에서 급탕 및 난방부하에 사용하는 소형 모델로서 용량은 300L이고, 축열조의 온도 계산포인트(node)는 0.1m 간격으로 6개로 설정하였고 부하 측 공급온도는 60°C로 설정하였다. 또한 순환수의 차온제어는 집열기 출구온도와 집열기 입구부측 온도가 10°C 이상이 되면 펌프가 작동하여 유체가 흐르고, 온도차이가 2°C 일 경우는 작동을 멈춰 유체를 흐르지 않게 제어하도록 설정하였다. 펌프는 최대 유량 100kg/hr, 동력 소비량은 60kg/hr로 하였고, 순환탱크의 최고온도는 20°C로 설정하였다. 시뮬레이션에서 이용된 액체식 PVT시스템 주요 컴퍼넌트의 설

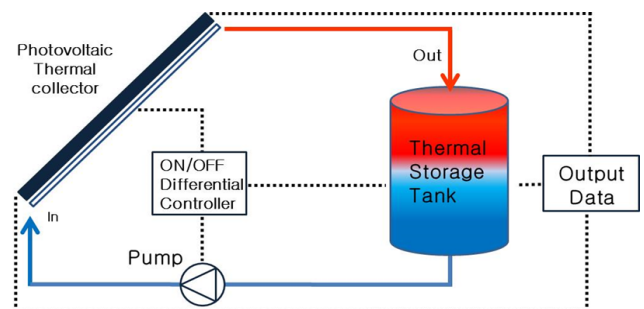


Fig. 2 PVT system of simulation modeling

Table 5. Design parameters in TRNSYS 17

Component	Description	Value
PV/T collector (Type 560)	collector length	1.644m
	collector width	0.992m
	Absorber plate thickness	0.003m
	Thermal conductivity of the absorber	238W/mK
	Number of tubes	14
	Tube diameter	0.008m
	PV efficiency at reference condition	15.33%
Storage tank (Type 4c)	Tank volume	0.3m <sup>3</sup>
	Fluid specific heat	4.19kJ/kgK
	Set point temperature	60°C
	Deadband	5°C
	Flow rate to load	100kg/hr
ON/OFF Differential controller (Type 2b)	Upper dead band dT	10°C
	Lower dead band dT	2°C
Pump (Type 3d)	Maximum flow rate	100kg/hr
	Maximum power	60kJ/hr
	Inlet fluid temperature	20°C

정 조건은 아래 Table 5와 같다.

식 (1)~(4)는 PVT시스템의 전기효율 및 열효율 계산식을 나타낸다. PVT시스템의 전기효율은 식 (2)처럼 PVT모듈 집열면적의 일사량에 대한 전력생산량의 비율로 계산된다.

$$Q_1 = A_{pvt} \times G \quad (1)$$

$$Q_2 = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \quad (2)$$

$$\eta_{th} = Q_2 / Q_1 = \dot{m} C_p (T_o - T_i) / A_{pvt} \times G \quad (3)$$

$$\eta_{el} = (I_m V_m) / (A_{pvt} G) \quad (4)$$

한편, PV 모듈의 효율 및 취득열량은 식(5)~(8)에 의해 결정된다.

$$\eta_{PV} = \eta_{nominal} \times X_{CellTemp} \times X_{Radiation} \quad (5)$$

$$X_{CellTemp} = 1 + Eff_T (T_{PV} - T_{ref}) \quad (6)$$

$$X_{Radiation} = 1 + Eff_G (G_T - G_{ref}) \quad (7)$$

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_{fluid,out} - T_{fluid,in}) \quad (8)$$

$G$  : 일사량 [W/m<sup>2</sup>]

$\eta_{th}$  : 열효율

$\eta_{el}$  : 전기효율

$\eta_{pv}$  : PV cell의 효율

$A_{pvt}$  : 집열기의 면적 (m<sup>2</sup>)

$T_i$  : 집열매체의 입구온도 (°C)

$T_o$  : 집열매체의 출구온도 (°C)

$\dot{m}$  : 집열매체의 유량 (kg/h)

$C_p$  : 집열매체의 비열 (J/kg°C)

$I_m$  : 최대 전류 [A]

$V_m$  : 최대 전압 [V]

### 3.2. 해석조건

본 연구에서는 표준기상 조건하의 PVT시스템 성능특성 분석을 위해, 서울 지역의 표준기상데이터를 이용하여 연간 시뮬레이션을 실시하였다. 또한, 시스템 성능 검토에서는 전기 효율과 집열 효율로 구분하여 평가하였고, 집열 효율의 경우, 신재생에너지 설비심사 세부기준인 KS B ISO 9806 태양열집열기 열효율시험을 참고하여 일사량 300~1000W/m<sup>2</sup>의 범위에서의 집열효율을 산출하여 평가하였다. 결과 값으로 PTV모듈의 표면온도, 입/출구 온도, 유체평균온도와 열획득량, PV전력생산량, 전기효율, 집열 효율, 외기온도, 일사량 등을 산출하였으며, 계절별 대표일별로 또한 월별로 에너지 성능 특성을 비교분석하였다.

### 4. 시뮬레이션 해석 결과 및 분석

Fig. 3은 하절기 중 대표일인 8월 9일의 시뮬레이션 결과를 나타낸 그래프이다. 외기온도와 일사량의 증가에 따라 모듈온도와 평균유체온도, 집열 효율, 취득열량, 전력생산량이 상승하지만 반대로 전기효율은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 전기효율은 외기온도가 낮은 아침, 저녁 시간에 비교적 큰 값을 보였으며, 전력 생산량과 취득열량은 일사량이 가장 큰 오전 12시경에 각각 147.29W/h, 596.83W/h로 가장 큰 값이 나타났다.

이것은 외기온도 및 패널의 표면온도가 높은 기간에는 열손실이 적어져 일사량 대비 취득열량이 많아지게 되어 나타난 결과로 판단된다. 이 날의 평균 전기효율 및 집열 효율은 각각 13.58% 및 42.60%로 나타났다. 한편, 오전 8시와 오후 5시에 PV모듈의 입구 온도와 출구온도의 차이가 10°C 이상 발생하였고, 시뮬레이션의 차온 제어를 통해 펌프가 작동하여 시스템의 온도를 낮춰주는 것을 확인할 수 있다. 오후 5시에 모듈온도와 유체평균온도가 각각 44.89°C, 44.81°C로 가장 높았으며, 이것으로 인해 가장 낮은 전기효율 12.64%의 값을 보였다.

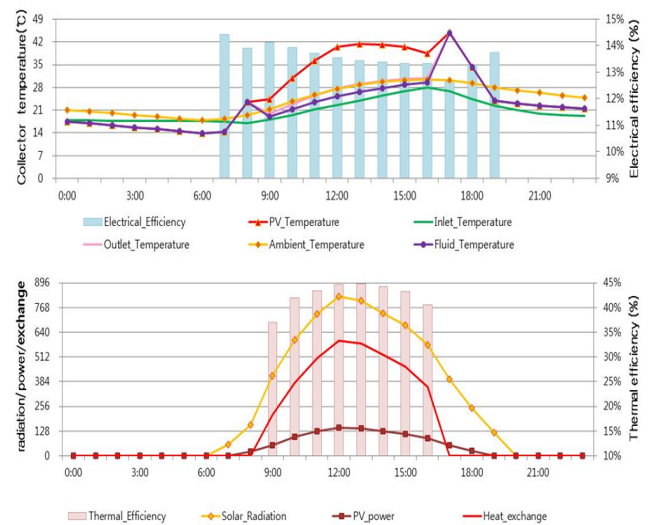


Fig. 3. Result of Energy performance during summer season.

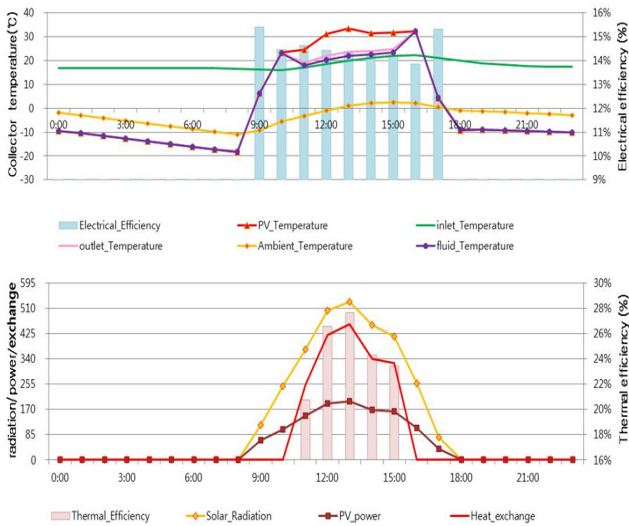


Fig. 4 Result of Energy performance during winter season.

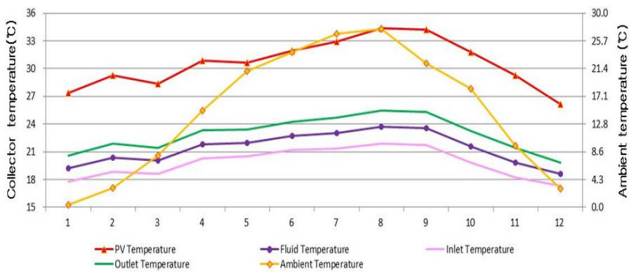


Fig. 5 Temperature of PVT collector by ambient temperature.

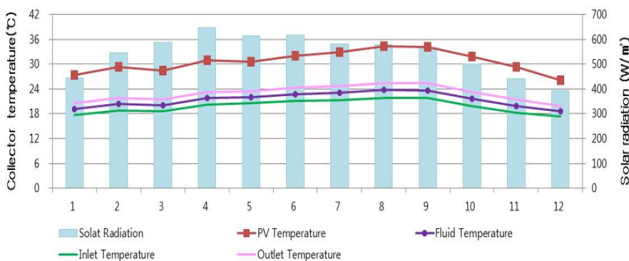


Fig. 6 Temperature of PVT collector by solar radiation.

한편, Fig. 4은 동절기 중 대표일 12월 10일의 시뮬레이션 결과이다. 외기온도가  $-10.85^{\circ}\text{C} \sim 2.65^{\circ}\text{C}$ 로 낮게 나타내는데, 동절기에는 시스템에 미치는 영향이 외기온도보다 일사량이 더 큰 것으로 확인된다. 일사가 시작되는 시점으로 모듈온도와 유체평균온도, 입/출구온도가 올라가며, 일사량의 증가로 집열 효율과 전력생산량, 취득열량은 상승하지만 전기효율은 조금씩 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 평균 전기효율은 14.55%였고, 평균 열효율은 24.53%로 나타났다. 일사량이 가장 큰 오후 1시에 열효율, 취득열량이 가장 컸으며 각각 27.66%, 456.45W/h의 값을 나타냈다. 오후 4시에 모듈온도와 유체평균온도가 각각  $32.31^{\circ}\text{C}$ ,  $32.27^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높았으며, 전기효율은 13.86%로 가장 낮았다.

Fig. 5은 외기온도에 따른 PVT 시스템의 온도 특성(모듈온도, 입/출구온도, 유체평균온도)의 월평균 값을 나타냈다. 모듈온도

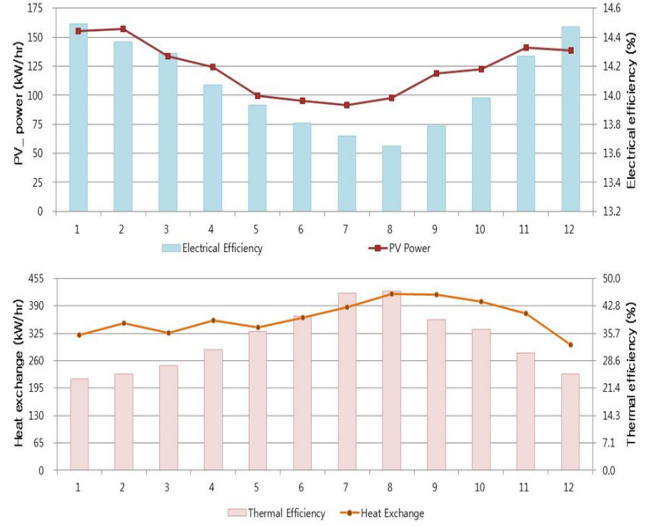


Fig. 7 Energy performance of PVT system.

는 특히 외기 온도에 따라 변했는데 그 중, 외기온도가 가장 높은 8월에 최고온도  $34.36^{\circ}\text{C}$ 이고, 12월에는 최저온도  $26.18^{\circ}\text{C}$ 의 값이 나타났다.

Fig. 6는 일사량에 따른 변화를 나타낸 그래프이다. 외기온도와 일사량에 따라 시스템의 모듈온도, 입/출구온도, 유체평균온도가 함께 변화하며 이것은 시스템의 에너지 성능과 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 PVT 시스템의 전기효율과 발전량 그리고 집열 효율과 취득열량을 월별로 나타냈다. 계절에 따라 외기온도가 높은 하절기에 비교적 전기효율과 발전량이 낮고, 반대로 동절기에 높은지만 전기효율과 발전량과 반대로 하절기에는 높지만 동절기에는 낮은 것을 확인할 수 있다.

Table 6 및 7는 전체 해석 결과를 정리하여 나타낸 표로서 시스템의 열적 인자와 월별 성능 분석 결과를 평균값으로 각각 나타냈다. 연중 외기온도가 낮은 1월에 가장 높은 전기효율 14.49%, 가장 낮은 집열 효율 23.83%가 나타났다. 또한 외기온도가 높은 8월에

Table 6. Simulation Result (Thermal factors)

Month	Ambient Temp (°C)	PV Temp (°C)	Fluid Temp (°C)	Inlet Temp (°C)	Outlet Temp (°C)
1	0.37	27.37	19.19	17.78	20.55
2	2.95	29.27	20.38	18.85	21.85
3	7.99	28.36	20.05	18.63	21.43
4	14.89	30.85	21.79	20.24	23.30
5	20.99	30.62	21.98	20.50	23.41
6	23.98	31.97	22.75	21.16	24.27
7	26.77	32.90	23.03	21.34	24.66
8	27.50	34.36	23.70	21.87	25.46
9	22.18	34.21	23.57	21.75	25.33
10	18.24	31.76	21.57	19.82	23.26
11	9.49	29.30	19.82	18.20	21.40
12	2.90	26.18	18.58	17.28	19.84

Table 7. Simulation Result (System performance)

Month	PV Power (W/hr)	Heat Exchange (W/hr)	Electrical Efficiency (%)	Thermal Efficiency (%)
1	155.62	321.44	14.49	23.83
2	157.37	349.14	14.37	25.02
3	133.73	326.45	14.29	27.34
4	124.09	355.48	14.07	31.47
5	99.46	338.86	13.93	36.18
6	95.29	361.93	13.81	40.22
7	91.47	387.24	13.72	46.20
8	97.67	418.51	13.65	46.61
9	118.53	417.17	13.79	39.22
10	122.62	400.17	13.98	36.63
11	141.26	372.24	14.27	30.57
12	138.85	298.60	14.47	25.10

가장 낮은 전기효율 13.65%, 가장 높은 열효율 46.61%을 보였다. 전력생산량은 비교적 외기온도가 낮고 일사량이 높은 2월에 가장 높은 값을 보였다. 취득열량은 외기온도가 높은 8월에 가장 많았고 또한, 모듈온도, 입/출구온도, 평균유체온도 모두 높게 나타났다. 하절기인 5, 6, 7, 8월 동안 평균 집열 효율은 연평균보다 8.27%가 높았고 평균 전기효율은 0.29%가 낮게 나타났다. 평균 전기생산량은 연평균보다 27.02W/hr가 작았고, 취득열량은 14.37W/hr 많았다. 한편, 동절기의 기간 평균 집열 효율은 전체 평균보다 7.90%가 낮았고, 평균 전기효율은 0.33% 높았다. 또한 전기생산량은 27.02W/hr가 작아졌고, 취득열량은 14.37W/hr 증가했다.

### 5. 결론

본 연구에서는 태양광 발전과 태양열을 동시에 이용하는 PVT 시스템의 최근 연구동향을 분석하고, 액체식 PVT의 성능 특성 분석을 위한 시뮬레이션을 실시하였다.

- (1) 시뮬레이션 결과, 외기온도와 일사량은 PVT 시스템의 열적 특성에 큰 영향을 주며, 각 외기조건과 PVT 시스템의 열적 특성은 시스템의 에너지 성능과 효율에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (2) 외기온도와 일사량이 높은 하절기에 모듈온도, 입/출구온도, 평균유체온도 등이 높았으며 이로 인해 전기효율과 전력생산량은 낮았지만 집열 효율과 취득열량은 높았다. 하절기의 평균 열효율과 전기효율은 각각 13.79%, 41.85%, 평균 전력 생산량과 취득열량은 96.20W/hr, 373.99W/hr로 나타났다. 반면 외기온도와 일사량이 낮은 동절기에 모듈온도, 입/출구온도, 평균유체온도 등이 낮았으며 이로 인해 전기효율과 전력생산량은 평균보다 높았고, 집열 효율과 취득열량은 평균보다 낮았다. 동절기의 평균 열효율과 전기효율은 각각 14.39%, 26.18%, 그리고 평균 전력 생산량과 취득열량은 149.60W/hr, 339.51W/hr로 나타났다.

향후, PVT 시스템의 최적 설계 수법의 개발을 위해 다양한 설

계인자의 변화에 따른 케이스 스터디를 통해 정확한 시스템의 에너지 성능에 대하여 비교분석할 예정이다.

### Acknowledgement

This work was supported by the New & Renewable Energy Core Technology Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea. (NO. 20133030110900)

### Reference

- [1] Adel A Hegazy, Comparative study of the performances of four photovoltaic thermal solar air collectors, Energy Conversion and Management, 2000 Vol.41, No 8, pp. 861-881
- [2] Y. Tripanagnostopoulos, TH. Nousia, M. Souliotis, P. Yianoulis, Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar Systems. Solar Energy. 2002. vol.72, pp.217-234
- [3] M. J. M. Jong, H.A Zondag, System studies on combined PV Thermal panels. 9th International conference on solar energy high latitude. 2001. ECN-RX-01-026
- [4] H.A. Zondag, D.W. de Vries, W.G.J van Helden, R.J.C van Zolingen, The yield of different combined PV-thermal collector designs, 2003 Vol. 74, No 3, pp. 253-269
- [5] Joe S. Coventry, Performance of a concentrating photovoltaic / Thermal solar collector, Solar Energy, 2005, Vol.78, No 2, pp. 211-222
- [6] M.Y.H. Othman, K. Sopian, B. Yatim, W.R.W. Daud, Development of advanced solar assisted drying systems, Renewable Energy. 2006. vol.32, pp.623-637
- [7] T.T. Chow, W. He, J. Ji, A.L.S. Chan, Performance evaluation of photovoltaic-thermosyphon system for subtropical climate application. Solar Energy. 2007. vol.81, pp.123-130
- [8] J.K. Tonui, Y. Tripanagnostopoulos, Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation Solar Energy. Renewable Energy. 2007. vol.32, pp.623-637
- [9] T.T. Chow, G. Pei, K.F. Fong, Z. Lin, A.L.S. Chan, J. Ji, Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover. Applied Energy. 2009. vol.86, pp.310-316
- [10] 강준구, 김진희, 김준태, “평판형 액체식 PVT 모듈의 성능 실험 분석”, 대한설비공학회, pp. 0780-0785, 2009 // (Kang Jun-Gu, Kim Jin Hee, Kim Jun Tae, An Experimental study of PV/Thermal combined collector module, Journal of SAREK, pp.780-785, 2009)
- [11] 김진희, 강준구, 김준태, “실험에 의한 Glazed형과 Unglazed형 액체식 PVT 집열기의 에너지성능 비교 분석 연구”, 한국생태환경건축학회논문집, Vol. 9, No. 4 2009. 08 // (Kim Jin-Hee, Kang Jun Gu, Kim Jun Tae, Experimental performance comparison of water type glazed and unglazed PV/Thermal combined collectors, Journal of the KIEAE 38 Vol. 9, No. 4 2009. 08)
- [12] 김진희, 천진아, 김준태, “전면 액체식 흡열판을 적용한 Unglazed PVT(태양광-열) 모듈의 성능 실험연구” 한국생태환경건축학회논문집, Vol.11 No. 3, 2011 // (Kim Jin-Hee, Chun Jin Aha, Kim Jun Tae, The experimental performance of an unglazed PV-Thermal Module with Fully Wetted Absorber. Journal of KIEAE 2011. Vol.11 No. 3
- [13] 천진아, 김진희, 강준구, 김준태, “실험에 의한 액체식 Unglazed PVT 모듈의 성능 분석”, 한국태양에너지학회, Vol. 30, No 2, 2010 // (Chun Jin-Aha, Kim Jin-Hee, Kang Jun Gu, Kim Jun Tae, An experimental performance of water-type unglazed PVT Collector, Journal of the Korean solar Energy Society, Vol. 30, No 2, 2010)
- [14] 천진아, 김진희, 김준태, 조인수, 남승백, “전면 액체식 흡열판을 적용한 PVT 모듈의 성능실험”, 한국태양에너지학회, Vol. 31, No 1, 2011 // (Chun Jin-Aha Kim Jin-Hee, Kim Jun Tae, Cho In Soo, Nam Seung Baeg, A Experimental performance of PVT module with fully wetted absorber, Journal of the Korean solar Energy Society, Vol. 31,

- No 1, 2011)
- [15] 김진희, 천진아, 김준태, “Unglazed 액체식 태양광·열 복합모듈의 에너지 성능 실험연구”, 한국생활환경학회지, Vol. 18 No.2 PP. 206-211, 2011 // (Kim Jin-Hee, Chun Jin Aha, Kim Jun Tae, An experimental study of an Unglazed water-type PV-Thermal combined collector, Journal of KSLES, Vol. 18 No.2 PP. 206-211, 2011)
  - [16] 박세현, 방아영, 김진희, 김준태, “실험에 의한 공기식 태양광·열 집열기의 에너지 성능 평가에 관한 연구”, 한국태양에너지학회, Vol. 33, No 1, 2013 // (Park, Se-Hyeon, Bang A Young, Kim Jin Hee, Kim Jun Tae, An Experimental Study of air type photovoltaic/thermal collector, Journal of the Korean solar Energy Society, Vol. 33, No 1, 2013)
  - [17] 방아영, 박세현, 김진희, 김준태, “단결정 모듈을 적용한 공기식 태양광·열 컬렉터의 실험적 성능 분석”, 한국태양에너지학회, Vol. 33, No. 2, 2013 // (Bang, Ah-Yong, Park Se Hyeon, Kim Jin Hee, Kim Jun Tae, An Experimental analysis of PV/T Air collector with Monocrystalline PV module, Journal of the Korean solar Energy Society, Vol. 33, No. 2, 2013)
  - [18] 김진희, 강준구, 김준태, “핀을 부착한 공기식 태양광·열 복합모듈의 성능실험 평가”, 대한건축학회지회, V.01, 2008 // (Kim Jin-Hee Kang Jun Gu, Kim Jun Tae, Experimental Performance Analysis of Air-Type PV/Thermal Combined Collectors with Fins Attached, Journal of AIKRA, V.01, 2008)
  - [19] 박세현, 김진희, 김준태, “공기식 PVT 컬렉터를 이용한 폐열회수 환기 시스템의 시뮬레이션 성능 연구”, 한국태양에너지학회, Vol. 32, No 2, 2012 // (Park Se Hyeon, Kim Jin Hee, Kim Jun Tae, The Simulation Performance Study of Heat Recovery Ventilation System with Air Type PV/T Collector, Journal of the Korean solar Energy Society, Vol. 32, No 2, 2012)
  - [20] 나선익, 강은철, 이의준, “공기식 태양광열기 활용 공기열원 히트펌프 시스템의 성능개선 시뮬레이션 연구”, 대한설비공학회, pp.963~967, 2013 // (Na Sun-Ik, Kang Eun Chul, Lee Euy Jun, The PVT Air Integrated Air to Air Heat Pump System Performance Simulation Study. Journal of SAREK, Vol.1, No.2, 2013)