

# 태양 열 전기 복합생산 PVT Water and PVT Air 모듈의 실험적 성능비교 연구

## An Experimental Comparison Study of PVT Water and PVT Air Modules for Heat and Power Co-Generation

이광섭(Kwang-Seob Lee)<sup>1</sup>, 앤드류(Andrew Putrayudha S.)<sup>1</sup>, 강은철(Eun-Chul Kang)<sup>2</sup>, 이의준(Euy-Joon Lee)<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>과학기술연합대학원대학교 재생에너지공학과, <sup>2</sup>한국에너지기술연구원 에너지효율연구본부

<sup>1</sup>Department of Renewable Energy Engineering, University of Science and Technology, Daejeon 305-350, Korea

<sup>2</sup>Energy Efficiency Research Division, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

(Received July 4, 2014; revision received September 24, 2014; Accepted: September 25, 2014)

**Abstract** The development of photovoltaic-thermal (PVT) technology has been introduced in recent years specifically to increase PV efficiency. One of the characteristics of PV systems is that the electricity generation increases as the solar radiation increases whereas the efficiency decreases because of high surface temperatures. Using a photovoltaic-thermal system, the surface temperature can be decreased by capturing the excess heat and the efficiency can be increased due to these characteristics. In this paper, three cases are introduced : 1) PV\_r as the reference case, 2) PVT\_a, which uses air as a heat source, and 3) PVT\_w, which uses water as a heat source. Experiments were performed, analyzed, and compared to examine the effect of the PVT type on the efficiency of the system. The results showed that ETC(%/°C) efficiency of the PVT cases was increased versus the reference case due to decreasing surface temperature. Total efficiencies, which are electrical efficiency and thermal efficiency, for each PVT are tested and found to be 12.22% for PV\_r, 29.50% for PVT\_a, and 68.74% for PVT\_w.

**Key words** Photovoltaic(태양광), Photovoltaic-thermal(태양광열), Efficiency temperature coefficient(온도효율계수), Power efficiency(전력효율), Thermal efficiency(열효율)

† Corresponding author, E-mail: ejlee@kier.re.kr

### 기호설명

STC : 표준실험조건 [일사량 1000 W/m<sup>2</sup>, 25°C]  
Gr : 총 일사량 [W/m<sup>2</sup>]  
QE : 총 발전량 [W]  
Ac : 집열기 면적 [m<sup>2</sup>]  
Cp : 열매체 비열 [J/g°C]  
Wp : 전기에너지 [W]  
Wi : 열에너지 [W]  
PV\_r : 태양광(PV) 실험  
PVT\_a : 공기열원 태양광열(PVT) 실험  
PVT\_w : 수열원 태양광열(PVT) 실험  
Ta : 외기온도 [°C]  
Ts : 표면온도 [°C]  
CMH : 시간당 통과한 유량 [m<sup>3</sup>]  
LPM : 분당 통과한 유량 [L]  
ETC : 온도성능계수 [%/°C]

### 그리스 문자

$\eta_e$  : 광 효율 [%]  
 $\eta_t$  : 열 효율 [%]  
 $\eta_{total}$  : 복합 효율 [%]

## 1. 서 론

### 1.1 연구배경

신재생에너지에 대한 수요와 관심이 급증하면서 우리나라의 신재생에너지 총발전량이 최근 10년간 58배나 증가하였다.<sup>(1)</sup> 총 연간 태양광 발전량은 최근 10년 사이 약 124배나 증가<sup>(1)</sup>하면서 태양열 발전은 새로운 전력생산 에너지원으로 자리 잡았다. 아직까지 국내 태양광 발전 시장규모는 세계 시장대비 5%에 불과하나, 신

재생에너지 공급의무화(RPS : Renewable Portfolio Standard)<sup>(2)</sup>제도 같은 정부의 정책적인 지원으로 최근 5년간 연평균 145.3%의 고 성장세를 보이고 있다.<sup>(3)</sup> 하지만 다른 신재생에너지 설비와 비교했을 경우 태양광 설비는 투자비 대비 높지 않은 수익이 큰 단점으로 나타난다. 이에 따른 단점을 해결하기 위해서 태양에너지를 이용하여 태양광(PV : Photovoltaic)발전과 열을 동시에 생산하는 다양한 방법의 태양광열(PVT : Photovoltaic Thermal) 기술이 연구되어 왔다.<sup>(4, 5, 6)</sup> 또한 우리나라의 주거용 건물의 총 에너지 소비량의 40% 이상이 난방부하로 이용되고 있으며,<sup>(7)</sup> 따라서 전기에너지만이 아닌 열에너지의 생산 역시 주목받고 있다. 더불어 우리나라에서도 신재생에너지를 통한 열에너지생산을 장려하는 신재생 열에너지 공급의무화(RHO : Renewable Heat Obligation)<sup>(8)</sup> 제도가 시행 예정이다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 태양에너지를 이용하여 열과 전기를 복합생산하고, 발전 효율까지 상승하는 태양광열(PVT) 모듈을 제작하여 실험을 수행하였고, 성능비교 연구가 수행되었다.

## 1.2 연구목적

태양광 모듈은 일사량이 증가함에 따라 발전량이 많아지는 반면에 표면온도가 증가하며 그에 따라 전력효율은 감소하는 특성을 가지고 있다.<sup>(4)</sup> 하지만 전기와 열을 동시에 생산하는 태양광열(PVT) 모듈의 경우 열을 회수함과 동시에 표면온도를 낮게하여 태양광(PV)의 전력효율을 상승시킨다. 본 연구에서는 태양에너지를 이용해 전기만을 생산하는 기존 태양광(PV)발전인 PV\_r 실험과 태양광 발전과 더불어 공기를 순환 하여 발생한 열에너지를 얻는 PVT\_a 실험 그리고 물을 열원으로 하여 태양광(PV)패널 후면에 순환하여 열에너지를 얻는 PVT\_w 실험으로 나누어 각 실험에서 얻는 데이터를 비교 분석한다. 실험데이터 분석을 통한 연구 목적은 다음과 같다.

- (1) 동일 외기온도와 동일사량에 따른 각 실험의 발전량을 계산하고 비교해본다.
- (2) 태양광(PV) 패널의 단위 온도에 따른 전력효율 상승분인 온도효율계수(ETC : Efficiency Temperature Coefficient)를 계산한다.
- (3) 복합생산 시스템의 총 효율<sup>(10)</sup>을 각 실험에 대하여 계산하고, 이를 PV 실험 결과와 비교하여 효율상승분을 정량적 수치로 비교한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험 장치는 크게 태양광 패널과 공기열원 집열 장치



Fig. 1 KIER PVT SET Module.

그리고 수열원 집열 장치로 구성된다. 이 세 가지 장치를 태양광열(PVT)로 모듈화 하였으며, Fig. 1과 같이 모든 장치가 하나의 모듈로 통합되어 있다.

#### 2.1.1 태양광 패널(PV\_r) 실험장치

본 연구에서 사용한 태양광 패널은 H社의 I3A214-235P이다. 제조사에서 제공하는 사양에 따르면, 이 패널은 STC에서 최대출력 235 Wp와 효율은 14.4%을 나타낸다. 패널의 크기는 너비 990 mm, 높이 1650 mm, 두께 38 mm, 전면유리 3.2 mm로 구성되어 있다. 더 자세한 전기적 특성은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 PV panel characteristics

Electrical characteristic at STC		
Maximum power	235	W <sub>p</sub>
Maximum voltage	30.72	V
Maximum current	3.65	A
Open circuit voltage	37.33	V
Short circuit current	8.3	A
Module efficiency	14.4	%
Cells efficiency	16.1	%
Fill factor	75.8	%
Maximum system voltage	1000	VDC
Power tolerance	0/+5	W

### 2.1.2 공기열원 PVT\_a 실험장치

공기열원 태양열 집열장치는 태양열(PV) 패널의 공기를 순환시키는 덕트와 송풍기를 장착하여 태양열을 회수한다. Fig. 2의 (a)와 같이 좌측과 우측에 출입구가 연결된 공기덕트는 내부에서 단열과 기밀을 유지하게 설계되었다. 송풍기를 통해 PV 패널의 후면에서 일정 유량(59.35 CMH)이 지나가며 열교환을 하고, 송풍기를 통해 공급되는 덕트의 직경은 100 mm이다. 송풍기는 On/Off 제어가 가능하며 소비전력은 90 W이다. 더 자세한 공기식 태양열 집열장치에 대한 성능은 Table 2에 나타내었다.

### 2.1.3 수열원 PVT\_w 실험장치

물을 열매체로 하는 수열원 태양열 집열장치는 Fig. 2(b)와 같은 형태의 튜브식 집열 장치이다. 수열원은 공기와 마찬가지로 태양광 패널의 후면에서 열교환이 가능하게 설계되었다. 순환 유체는 물을 이용하였으며, 순환하는 물을 저장하는 수조에 히트펌프를 연결하여 일정한 온도의 물이 순환유체로 공급되게 장치하였다. 집열장치 내부에는 총 1,500 ml의 유체가 동시에 열교환이 가능하다. 실험에서는 순환 유체로 물을 이용하였다. 자세한 수열원 집열장치에 대한 성능은 Table 3에 나타내었다.

### 2.1.4 데이터 측정방법

실험 장치에서 측정된 데이터를 획득하기 위해 RTD 타입의 온도 센서와 일사량계 그리고 유량계와 전압, 전류를 측정하는 계측기를 모니터링 시스템에 설치하였다. 각각의 지점에서 획득하는 데이터는 1초 단위로 저장이 가능하며 모니터링 시스템을 통해 실시간으로 확인하고 제어가 가능하다.



(a) Air duct (b) Water tube  
Fig. 2 PVT thermal collector.

Table 2 PVT\_a characteristics

Air thermal collector		
Blower Power	90	W
Motor Form	BLDC	
Revolution	1500	RPM
Coolant	AIR	
Flow Rate	59.35	CMH
Inlet Duct Diameter	100	mm
Control	On/Off	

Table 3 Performance data of PVT\_w

Water Thermal collector		
Internal Fluid Volume	1500	ml
Pressure	2	bar
Coolant	Water	
Flow Rate	5	LPM
In/Out pipe	12	mm

실험장치의 측정 부분은 Fig. 3 다이어그램에 나타내었다. 온도센서는 외기온도 한지점(T0)을 측정하고, PV 패널 온도에 따른 특성을 보기위해 패널의 배면에서 패널의 온도를 측정한다. 각각의 배면온도는 상(T1), 중(T2), 하(T3)로 나누어 측정하게 된다. 공기열원의 열 생산량을 보기 위해 공기의 입구(T4), 출구(T5)의 온도를 측정하고, 수열원 역시 물의 출입구(T6, T7)에 각각 설치하였다. 또한 수열원 실험에서 항온조의 온도를 맞춰주기 위한 항온조 온도센서(T8)를 설치하였다. 실험 데이터에 맞는 일사량을 측정하기 위한 센서(R1)를 패널 좌측 상단부에 설치 하였고, 유량(F1)을 측정하기 위한 유량계가 워터펌프에 장착되어있다. 공기의 유량은 정풍량으로 덕트입구에서 유속 측정장비를 이용해 측정하였다. PV에서 생산되는 전력량을 알아보기 위해 전압(V0)과 전류계(I0)도 모니터링 시스템과 연계하였다. 각각의 측정지점에서 나온 데이터는 엑셀 파일 형태로 시간별로 취득이 가능하다.

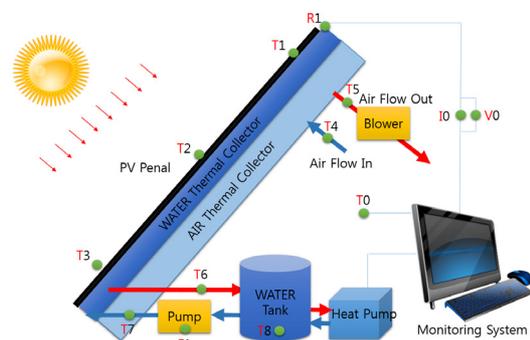


Fig. 3 PVT system diagram.

## 2.2 실험방법

실험은 대전광역시 유성구에 위치한 한국에너지기술연구원 부지에서 2013년 4월 1일~4월 20일에 걸쳐 외기조건이 비교적 좋은 조건일 때 반복 실험 하였다. 실험장치는 BIPV의 특성을 고려하여 실험기간 중에 항상 동일한 위치에서 수평면으로부터 약 80°의 동일한 패널 각도를 유지하였다. 실험의 종류는 기존의 태양광(PV)의 발전량을 측정하는 PV\_r 실험과 공기열원 태양광열(PVT) 실험인 PVT\_a와 수열원 태양광열 실험인 PVT\_w가 있다. PV\_r 실험의 경우 기존의 태양광 패널의 발전량을 기록해 PVT\_a와 PVT\_w 실험에 비교를 위한 실험으로, 여러 외기조건에 따른 많은 데이터를 수집하였다. 그리고 공기를 열원으로 이용하여 태양광 발전과 패널 냉각 및 열에너지를 생산하는 PVT\_a 그리고 물을 열원으로 이용하여 태양광 발전과 냉각 및 열에너지생산을 동시에 하는 PVT\_w 실험을 차례로 수행하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

실험 데이터는 10:00~16:00사이의 비교적 일사량이 좋은 조건에서의 데이터를 결과분석에 이용하였으며, 분석과정에서 각 실험에 대한 외기온도와 일사량 조건을 맞추어 주기위해서 발전량에 대한 함수를 도출하여 분석을 진행하였다.

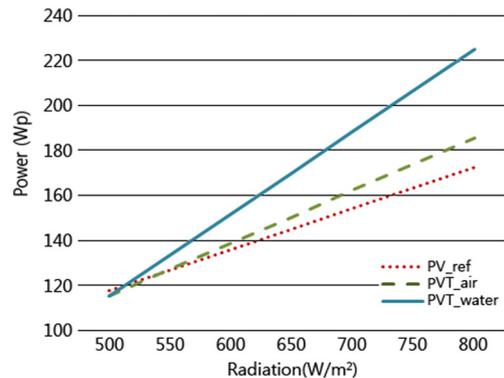
### 3.1 외기온도와 일사량에 따른 발전량

외기온도와 일사량의 발전량과의 관계를 각각 실험 데이터를 통해 확인해보았다. 각각의 실험에서의 발전량은 외기온도보다 일사량에 비교적 많이 의존적이지만, 외기온도가 패널온도에 영향을 받으므로 외기온도에 따른 전력효율을 고려하지 않을 수가 없다. 따라서 이 두 조건을 맞추기 위해 실험조건에 따른 실험데이터를 바탕으로 PV\_r, PVT\_a, PVT\_w의 전력생산량에 대한 함수를 도출하였으며 그 함수는 Table 4와 같다.

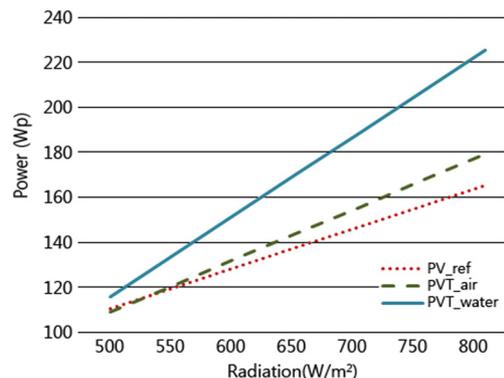
Table 4 Fitted equations for PV power

	$W_p(W) = a \times T_a(^{\circ}C) + b \times G_i(W/m^2) + C$		
	a	b	C
PV_r	-1.399	0.1837	46.0941
PVT_a	-1.2586	0.2356	15.8567
PVT_w	0.0636	0.3674	-69.7987

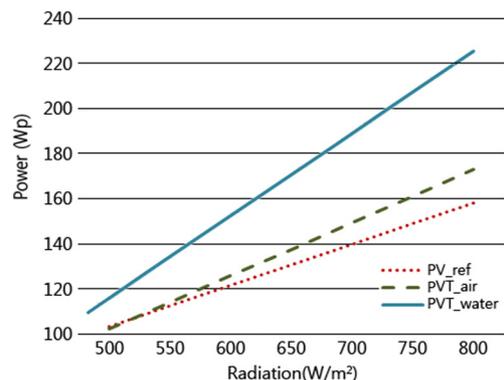
Fig. 4에서는 Table 4에서 도출해낸 식을 기준으로 일사량 500~800 W/m<sup>2</sup> 구간의 외기온도 15°C, 20°C, 25°C의 조건에서 위 함수를 이용한 발전량과의 관계를 그래프로 도식해 보았다. 기본적으로 일사량에 대한 비례관계가 성립하며 PV\_r와 PVT\_a의 경우 외기온도가 낮을 때 약간 더 높은 발전량을 보여준다. PVT\_w의 경우 각 외기온도에 따른 발전량 차이가 1 Wp 미만으로 외기온도에 크게 영향을 받지 않는다.



(a) Power generation on 15°C ambient temp.



(b) Power generation on 20°C ambient temp.



(c) Power generation on 25°C ambient temp.

Fig. 4 Power generation and radiation.

Table 5 Fitted equations for Surface temperature on each experiment

$T_s(^{\circ}\text{C}) = a \times T_a(^{\circ}\text{C}) + b \times G_t(\text{W}/\text{m}^2) + C$			
	a	b	C
PV_r	1.1397	0.0269	1.4651
PVT_a	0.7746	0.0100	10.0186
PVT_w	0.2169	0.0001	14.2328

Table 6 PV efficiency and surface temp. at 25°C, 700 W/m<sup>2</sup>

	T <sub>a</sub> (°C)	G <sub>t</sub> (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>s</sub> (°C)	η <sub>pv</sub> (%)
PV_r	25	700	48.79	12.22
PVT_a	25	700	36.38	13.06
PVT_w	25	700	19.73	13.68

### 3.2 패널 온도에 따른 전력효율

일반적으로 패널의 온도는 일사량과 외기온도에 영향을 받는다. 태양광 발전은 패널의 온도가 약 1°C 증가할 때마다 0.4~0.6%의 전력효율이 감소한다.<sup>(11)</sup> 제 3.2 절에서는 PV\_r 실험을 기준으로 PVT\_a와 PVT\_w 실험에서의 패널 온도에 따른 전력효율을 분석해 보았다. 분석에 사용한 패널 온도는 패널 뒷면에서 측정된 배면 온도이며 Fig. 3의 세 측정지점(T1, T2, T3)의 평균 값이다. 패널의 전력효율은 Solar Engineering of Thermal Processes<sup>(12)</sup>를 참조하여 식(1)에 의해 계산되었다.

$$\eta_{pv} = \frac{Q_E}{G_T A_c} \quad (1)$$

Table 5는 실험데이터를 이용하여 계산한 표면온도에 대한 함수이다. 이 식을 통해 일사량과 외기온도에 대한 각 실험의 표면온도를 계산 할 수 있다.

Table 6에서는 외기온도 25°C, 일사량 700 W/m<sup>2</sup>일 때의 표면온도와 전력효율을 함수를 이용하여 계산한 결과이다. 이 결과를 통해 위 조건에서 PVT\_w의 경우 기존의 태양광 보다 29.06°C 낮은 온도를 유지했으며 전력효율은 1.46% 상승하였다. PVT\_a의 경우에는 12.41°C 낮은 온도를 유지했으며 전력효율은 0.84% 상승하는 결과를 보여준다. 이에 따른 패널 배면온도와 발전 효율변화를 나타내는 계수인 온도효율계수(ETC)는 PVT\_a에서 -0.55%/°C, PVT\_w에서 -0.41%/°C로 계산된다.

### 3.3 열에너지 생산과 총 에너지 효율

태양광열(PVT) 실험에서 열 에너지 생산은 각 열원의 출입구 온도를 기반으로 계산하였다.

Table 7 Fitted equations for thermal energy

$W_t(\text{W}) = a \times T_a(^{\circ}\text{C}) + b \times G_t(\text{W}/\text{m}^2) + C$			
	a	b	C
PVT_a	0.3020	0.1551	71.8399
PVT_w	16.4893	0.7259	-290.8343

Table 8 Total efficiency of each cases

	η <sub>pv</sub> (%)	η <sub>pvt</sub> (%)	η <sub>total</sub> (%)
PV_r	12.22	0	12.22
PVT_a	13.06	16.44	29.50
PVT_w	13.68	55.05	68.74

$$Q_t = C_p \times \dot{m} \times \Delta T \quad (2)$$

위 식(2)에서 물과 공기가 얻을 열량을 계산하기 위해 열매체 비열(C<sub>p</sub>)값은 물 4.184 J/g·°C, 공기 1.005 J/g·°C를 사용하였다. 유량( $\dot{m}$ )은 실험 유량인 공기 59.35 CMH (21.1 g/s), 물은 5 LPM(83 g/s)을 적용하였다. 계산결과 실험 유량에서 공기열원은 출입구의 온도차 1°C당 15.69 W<sub>t</sub>를 보여주었고, 수열원은 1°C당 348.32 W<sub>t</sub>를 보여준다. Table 7는 실험 데이터를 이용하여 도출한 외기온도와 일사량에 관한 열에너지 생산량의 함수이다. 위 식을 사용하여 외기온도 25°C, 일사량 700 W/m<sup>2</sup>의 조건에서 PVT\_a는 187.95 W<sub>t</sub>, PVT\_w는 629.53 W<sub>t</sub>의 열 에너지를 생산한다.

세 가지 실험의 외기온도 25°C, 일사량 700 W/m<sup>2</sup>의 조건에서 전기에너지와 열에너지 생산효율은 Table 8과 같이 정리된다. 전기효율과 열효율의 합을 총 효율로 정의하며, 그 효율은 PV\_r 실험에서 12.22%, PVT\_a 실험에서 29.50%, PVT\_w 실험에서 68.74%로 계산되었다.

## 4. 결론

본 논문에서는 실험적 데이터를 기반으로 물 공기식 태양광열 복합생산 시스템의 성능을 비교하여 수치적 데이터로 제공한다. 각각의 실험 데이터를 이용하여 패널 온도에 따른 동일 조건에서의 전력생산량 비교, 전력효율 비교, 열에너지 생산과 총 에너지 효율 비교한 결과는 다음과 같다.

- (1) 실험데이터를 통해 동일외기온도, 동일사량에 대한 태양광의 발전량을 함수화 하여 나타내었다. 전력생산량은 표면냉각 효과가 가장 큰 PVT\_w가 가장 높았고, PVT\_a, PV\_r순으로 정리되었다. 또한 전력생산량은 외기온도가 낮을수록 약간의 상승을 보였다.

- (2) 실험 데이터로 분석한 기존의 태양광 패널의 발전효율은 12.22%이고, PVT의 전기효율은 PVT\_a 13.06%, PVT\_w 13.68%로 계산되었다. 패널 냉각효과에 따른 온도효율계수(ETC)는 외기온도 25°C, 일사량 700 W/m<sup>2</sup>의 조건에서 PVT\_a에서 -0.55%/°C, PVT\_w에서 -0.41%/°C로 계산되었다.
- (3) 전기에너지와 열에너지 생산을 합산한 총 효율은 각 실험에서 PV\_r은 12.22%, PVT\_a는 29.50%, PVT\_w는 68.74%으로 계산되었고, 기존의 전기만 생산하는 태양광패널 대비 PVT\_a는 2.2배, PVT\_w에서는 5.6배의 효율향상이 나타난다.

본 연구에서 실험을 바탕으로 데이터 비교분석을 수행하여 나타난 수치들은 향후 태양광열(PVT)이용 복합 장치의 특성데이터로 이용이 가능하며, 향후 연구에서는 다양한 패널각도와 입력온도의 차별화를 두어 태양열실험 기준에 부합한 많은 실험데이터를 확보할 예정이고, 실용화를 위한 소재와 형상을 시뮬레이션을 하여 경제성과 타당성 연구를 진행할 예정이다. 또한 지열시스템과 연계한 PVT\_GHP와 건물통합형 시스템인 BIPVT등 태양광열(PVT) 복합생산시스템의 열에너지의 활용기술의 연구를 할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(과제번호 : 20133030110900).

## References

1. Heo, J. S., 2012, 2012 Handbook of energy and economic statistics in Korea, Korea Energy Management Corporation, pp. 121-122.
2. Lee, S. H., 2014, Policy challenges for promoting renewable energy in Korea, Environment Law and Policy, Vol. 12, pp. 63-82.
3. New and Renewable Energy Data Center Website, <http://www.kredc.net/>, Korea Institute of Energy Research.
4. Na, S. I., Kang, E. C., and Lee, E. J., 2013, The PVT air integrated air to air heat pump system performance simulation study, Proceedings of the SAREK 2013 Summer Annual Conference, pp. 963-967.
5. Baek, N. C., Jeong, S. Y., Yoon, E. S., and Lee, K. H., 2012, The development and performance analysis of compact type solar thermal/ground coupled heat pump hybrid system for heating, cooling and hot water, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 32, No. 5, pp. 60-67.
6. Nam, Y. J., 2012, Study on the optimum design of a heat pump system using solar and ground heat, Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 6, pp. 509-514.
7. Kim, Y. H., Cho, Y. S., LEE, E. J, Hyun, M. T., Kang, E. C., 2005, The performance evaluation study of PV-Solarwall unit module solar thermal-electric energy, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 25, No. 3, pp. 69-75.
8. Minister of Trade, Industry and Energy, 2014, The Secondary Energy Basic Plan, p. 106.
9. IEA, PV/Thermal solar systems, IEA Solar Heating and Cooling Programme, IEA SHC Task 35.
10. IEA, 2002, Photovoltaics/thermal solar energy systems, Status of the technology and roadmap for future development, Task 7 Report IEA PVPS T7-10.
11. Kim, Y. H., Cho, Y. S., LEE, E. J, Hyun, M. T., and Kang, E. C., 2005, The performance evaluation study of PV-Solarwall unit module solar thermal-electric energy, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 25, No. 3, pp. 69-75.
12. Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons, NY, p. 232.