

## 복합식 태양광 발전 및 난방장치 개발<sup>§</sup>

이 동 일\* · 백 승 욱\*\*

\* 한국과학기술원 항공우주공학과

### Development of Hybrid Device for Photovoltaic Power Generation and Heating

Dong Il Lee\* and Seung Wook Baek\*\*

\* Dept. of Aerospace Engineering, KAIST.

(Received March 7, 2014 ; Revised July 28, 2014 ; Accepted July 30, 2014)

**Key Words:** Hybrid Device(복합장치), CPV(집광형 태양전지), Heat Pipe(히트파이프)

**초록:** 본 연구는 센서식 및 프로그램식의 태양추적장치를 이용하여 집광형 태양전지의 발전효율을 증가시키는 연구를 진행하였다. 또한 집광형 태양전지에서 발생된 열은 히트파이프를 포함한 흡열기로 회수함으로써 온수나 난방에 사용할 수 있었다. 실험 결과 집광형 태양전지의 평균 전기효율은 16%, 히트파이프를 포함한 흡열기의 열효율은 62%로 복합효율이 78%를 나타내었다. 태양위치에 따른 실시간 추적, 일몰 이후 난방장치의 동쪽방향 원상복귀, 원상복귀후 자동종료는 Simulink 프로그램으로 구현하였다. 히트파이프 유무, 집광비, 흡열기 입구 속도에 따른 집광형 태양전지 및 흡열기 온도를 해석하였으며 실험결과와 일치하였다.

**Abstract:** The objective of this study was to increase the generating efficiency of concentrated photovoltaics (CPV) by using hybrid solar tracking. Further, the proposed system was demonstrated to have the ability to extract thermal energy from a concentrated photovoltaic system by using thermal absorbers containing heat pipe, which could then be used for a heating system or hot-water supply. The average electrical efficiency was 16 during the day, and the average thermal efficiency was 62. Therefore, this system demonstrated a total efficiency (electrical thermal) of 78. All the processes, i.e., tracking of the sun, calculation of the sun's position, reinstatement of the heating device toward the east for tracking on the next day, and system shutdown, were programmed using Simulink. A parametric analysis of the heat pipe, concentration ratio, and inlet velocity was also performed in terms of the operating temperature of the CPV and the outlet temperature. The simulation and experimental results for the thermal absorber were found to be in good agreement.

- 기호설명 -

$A_o$  : 집광형 태양전지의 면적 [ $m^2$ ]  
 $C_p$  : 비열 [ $J/kgK$ ]  
 $d$  : 조도센서의 지름 [ $m$ ]  
 $h_a$  : 남중고도시각과 현재시각의 차이값 [hour]  
 $H$  : 원기둥의 높이 [ $m$ ]  
 $k$  : 열전도율 [ $W/mK$ ]

$\dot{m}$  : 유량 [ $kg/s$ ]  
 $n$  : 절대좌표계에서의 회전각 [ $rad$ ]  
 $q_{irr}$  : 일사량 [ $W/m^2$ ]  
 $T_{in}$  : 흡열기 입구 온도 [ $K$ ]  
 $T_{out}$  : 흡열기 출구 온도 [ $K$ ]

그리스문자

$\alpha$  : 태양전지의 흡수율  
 $\tau$  : 프레넬 렌즈의 투과율  
 $n_{elec}$  : 전기 효율 [%]  
 $n_{th}$  : 열효율 [%]  
 $u$  : X 축 유속 [ $m/s$ ]  
 $v$  : Y 축 유속 [ $m/s$ ]

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 열공학부문 춘계학술대회(2014. 4. 23.-26., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, swbaek@kaist.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

w : Z 축 유속 [m/s]

하첨자

- CR : 집광비
- dec : 적위 [rad]
- HA : 시간각 [rad]
- LST : 지방표준시 [deg]
- T<sub>e</sub> : 균시차 [min]
- T<sub>m</sub> : 남중고도시각 [hour]

### 1. 서 론

태양전지는 기존 화석 연료를 대체할 수 있는 재생에너지로 각광받고 있다.<sup>(1)</sup> 그 중에서도 집광형 태양전지(Concentrated Photovoltaic, CPV)는 여러 태양전지를 적층한 구조이며 여러 파장대를 흡수할 수 있기 때문에 가장 효율이 높은 태양전지로 알려져 있다.<sup>(2)</sup>

하지만 집광형 태양전지는 입사광이 수직이 되도록 실시간 태양추적을 해야 한다. 기존에는 센서식의 태양추적장치를 이용하였기 때문에 날씨의 영향을 많이 받는 단점이 있었다.<sup>(3)</sup> 또한 집광형 태양전지는 집광에 따른 태양전지의 온도상승으로 발전효율이 저하되기 때문에 냉각을 시켜주어야 한다.<sup>(4,5)</sup> 기존에는 냉각핀을 집광형 태양전지의 뒷면에 부착하여 냉각을 하였으나, 이러한 방식은 집광형 태양전지에 의해 생성된 열을 대기중에 방출해 버리기 때문에 활용이 불가능하다는 점에서 비효율적이었다.

따라서 본 연구는 첫째, 센서식 및 프로그램식의 태양추적장치를 개발하여 실시간 태양추적이 가능하도록 하였다. 둘째, 히트파이프를 포함한 태양열 흡열기를 태양전지 후면에 부착하여 냉각을 함으로써 발전효율 및 열효율을 향상시켰다. 마지막으로, 복합식 태양광 발전 및 난방장치의 실용성을 검증하였다.

### 2. 실험구성

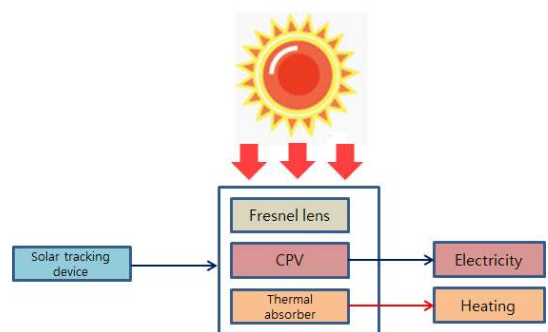
#### 2.1 전체적인 시스템

Fig. 1 은 복합식 태양광 발전 및 난방장치의 도식도를 나타낸다. 태양의 위치를 추적하는 태양추적장치, 상기 태양추적장치를 통해 태양을 추적하여 발전하는 집광형 태양전지, 상기 집광형 태양전지에서 발생하는 열을 흡수할 수 있는 태양열 흡열기로 이루어져 있다.

집광형 태양전지는 프레넬 렌즈로 태양광을 집광하여 발전하게 되는데, 입사광의 각도가 조금

**Table 1** Typical current-voltage parameters at 50W/cm<sup>2</sup>, 25°C

Parameter	Value at 25°C, 50W/cm <sup>2</sup>
Efficiency (%)	34.9
Isc (Amps)	6.48
Imp (Amps)	6.34
Voc (Volts)	3.19
Vmp (Volts)	2.76
Fill Factor	0.84



**Fig. 1** Schematic diagram of a heating system using CPV devices

만 틀어지게 되면 프레넬 렌즈의 초점이 어긋나 집광이 불가능하여 발전을 못하기 때문에 정밀한 태양추적장치를 필요로 한다.

태양추적장치는 기동형상의 하우징, 하우징 주위에 위치한 조도센서를 이용하여 태양광을 감지하는 태양광 감지부, 태양광 감지 결과에 따라 태양의 현재 위치를 산출하고, 상기 태양의 위치로 상기 하우징의 이동을 제어하기 위한 모터의 구동펄스를 산출하여 상기 하우징의 이동을 제어하는 위치 제어부 그리고 일몰후 상기 하우징의 태양추적을 종료하고 서쪽에 위치한 상기 하우징을 동쪽으로 이동시키는 복귀부로 이루어진다.

본 연구에 사용된 집광형 태양전지는 미국 emcore 사에서 InGaP, InGaAs, Ge 를 삼중접합(triple-junction)하여 제작한 것으로 가로 세로 길이는 각각 10mm 이며 사양은 Table 1 과 같다.

또한 프레넬 렌즈는 미국 fresnel factory 에서 제작한 것으로 가로 세로 길이는 200mm 이며 초점 길이는 290mm 이다. 일사량계는 tenmars electronics 회사에서 제작한 TM-207 이며 오차는 ±1W/m<sup>2</sup> 이다.

Fig. 2 는 태양열 흡열기(가로: 80mm, 세로: 50mm, 높이: 30mm)이며 알루미늄 재질로 이루어진 4 개의 측벽과 상기 측벽의 상단 개구부에 가로: 10mm, 세로: 10mm 의 집광형 태양전지가 배치된 프레임 형태

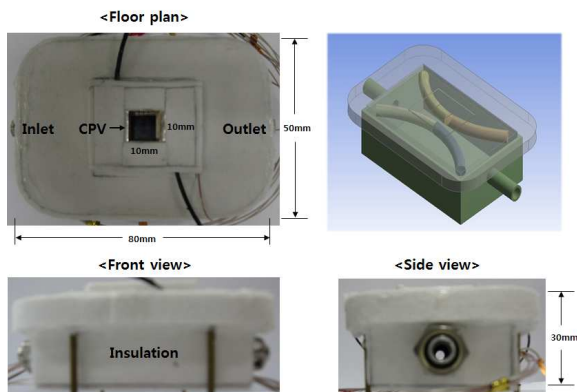


Fig. 2 Insulated thermal absorber with a CPV device

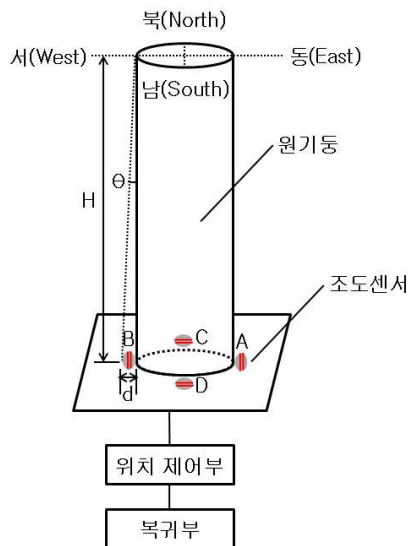


Fig. 3 Schematic diagram of the solar-tracking device

로 이루어진다. 집광형 태양전지와 흡열기는 ZEROtherm사에서 만든 thermal greece를 이용하여 부착하였다. 흡열기의 왼쪽이 입구, 오른쪽이 출구이며 직경은 6mm이다. 또한 apack에서 제작한 직경 6mm의 히트파이프 2개를 태양열 흡열기 안에 배치하여 히트파이프가 집광형 태양전지에서 발생한 열을 흡수하여 냉각수로 열전달이 이루어지도록 하였다. 냉각수 유량은 200mL/min을 사용하였으며 k-type 열전대를 이용하여 입출구 온도를 측정하였다. 흡열기 외부는 글라스울(glass wool)로 단열하였다.

2.2 태양추적장치

Fig. 3은 태양추적장치의 개략도이며 위치 제어부, 복귀부, 4개의 조도 센서로 구성되어 있다. 위치 제어부와 복귀부는 Simulink(Mathworks) 프로그램을 이용하여 태양의 위치를 계산하고 스텝핑 모터를 작동시킨다. 스텝핑 모터는 정확한 위치 제어를 위해 사용되었으며 사양은 작동전압이 24 V,

Table 2 Digital mechanism for motor control

E	W	S	N	A_M <sub>W</sub>	A_M <sub>E</sub>	E_M <sub>N</sub>	E_M <sub>S</sub>
1	0	0	0	1	0	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	0	0	1	0
0	0	0	1	0	0	0	1
1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	0	1	0	1	0	1
0	1	1	0	0	1	1	0
1	0	0	1	1	0	0	1

스텝각은 5 상으로 0.072°이다. 태양의 위치가 변함에 따라 태양추적장치의 원기둥 그림자 형상은 변하게 되고 원기둥 바깥에 동, 서, 남, 북으로 접해 있는 조도센서는 빛의 밝기를 감지하게 된다. 빛의 밝기에 따라 변하게 되는 조도센서의 전압값은 아날로그-디지털 변환기로 입력되어 제어부로 전송된다. 4개의 조도센서 중에서 A, B는 방위각 감지용이며 C, D는 고도각 감지용이다.

원기둥의 높이는 다음과 같이 계산된다. H를 원기둥의 높이, d를 조도센서의 지름이라고 가정하면 삼각함수를 이용하여  $\tan\theta = \frac{d}{H}$ 와 같이 구할 수 있다. 원기둥 그림자가 1° 이내로 생성된다면 H의 높이는  $H = \frac{d}{\tan 1^\circ} = \frac{0.003}{0.017} = 0.176m$ 에 의해서 구할 수 있다. 조도센서 R1과 저항 R2를 회로에 연결한다면, 출력 전압은  $V_{out} = \frac{R2}{R2+R1} \cdot V_{in}$ 로 계산된다. 위 식을 이용하면, 밝은 곳에서는 저항 R1의 감소로 출력 전압이 증가하고 어두운 곳에서는 저항 R1의 증가로 출력 전압이 감소하게 된다.<sup>(6)</sup>

2.3 제어 시스템

Table 2는 방위각 및 고도각 제어 알고리즘이며 1은 참값, 0은 거짓값을 나타낸다. 본 연구에 사용된 조도센서는 오차율이 0.2% 이내이고 5V 전압을 인가하여 주었다. 방위각 제어는 동, 서에 위치한 조도센서가 전압값을 감지하면, 두 조도센서의 평균값이 계산되어 문턱값으로 설정된다. 태양이 서쪽으로 이동함에 따라 동쪽에 원기둥 그림자가 생성되면 동쪽에 위치한 조도센서의 전압값이 서쪽에 위치한 조도센서의 전압값보다 작아지게 된다. 동쪽에 위치한 조도센서의 전압값이 문턱값

보다 낮고 흐림 판단기준 문턱값보다 높으면서 두 조도센서의 전압차(동-서)가 0.01(5V 의 0.2%)보다 크다면 참값을 발생하게 되어 태양추적장치의 모터를 서쪽방향으로 작동시켜 두 조도센서 A, B 전압값을 같아지게 만든다. 고도각 제어 알고리즘은 위와 동일하다.

만약 문턱값(동-서 평균 전압값)이 흐림 판단 기준 문턱값보다 낮게 된다면 현재시각과 태양추적장치의 위도, 경도를 바탕으로 태양의 위치를 계산하여 추적하게 된다. 태양위치계산을 통한 프로그램식 방법은 다음과 같다. 먼저, 현재 시각정보를 받는다. 둘째, 태양의 절대좌표계에서의 회전각(n)을 구한다.

$$n = \frac{2\pi}{365} \left( da - 1 + \frac{h}{24} + \frac{mi}{1440} + \frac{s}{86400} \right) \quad (1)$$

여기에서 da 는 1 월 1 일부터 오늘까지 일수를 센 것이다.<sup>(7)</sup> 셋째, 적도좌표계에서 태양의 위치(적위(dec), 시간각(H))를 구한다. 적위는 다음과 같다.<sup>(8)</sup>

$$\begin{aligned} dec &= 0.006918 - 0.399912\cos(n) \\ &+ 0.070257\sin(n) - 0.006758\cos(2n) \\ &+ 0.000907\sin(2n) - 0.002697\cos(3n) + 0.00148\sin(3n) \end{aligned} \quad (2)$$

시간각은 다음과 같다.

$$HA = \frac{\pi}{180} \cdot 15 \cdot 24 \left( \frac{ha}{24} - \text{floor}\left(\frac{ha}{24}\right) \right) \quad (3)$$

여기에서, ha 는 남중고도시각과 현재시각의 차이값을 의미한다.

$$ha = 24 + \left( h + \frac{mi}{60} + \frac{s}{3600} - Tm \right) \quad (4)$$

여기에서, Tm 은 남중고도시각을 의미한다.

$$Tm = 12 + \frac{4L - Te}{60} \quad (5)$$

$$L = LST - \text{longitude(actual)} \quad (6)$$

여기에서, LST 는 지방표준시를, longitude(actual) 는 태양추적장치가 위치한 경도를 의미한다. Te 는 균시차를 의미하고, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A = \frac{360}{365.24} (d + 9) \quad (7)$$

$$B = \frac{\pi}{180} \left( A + \frac{360 \cdot 0.0167}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{180} \cdot \frac{360}{365.24} \cdot (d - 3)\right) \right) \quad (8)$$

$$C = \left( A - \frac{180}{\pi} \cdot a \tan(\tan(B) / \cos\left(\frac{\pi \cdot 23.44}{180}\right)) \right) / 180 \quad (9)$$

$$Te = 720(C - \text{floor}(C + 0.5)) \quad (10)$$

마지막으로, 지평좌표계에서 태양의 위치(고도각, 방위각)를 계산한다.<sup>(7)</sup> 고도각은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} alt &= \text{asin}(\sin(lat) \cdot \sin(dec) \\ &+ \cos(lat) \cdot \cos(dec) \cdot \cos(H)) \end{aligned} \quad (11)$$

방위각은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (h < Tm) \text{ azi} &= \text{acos}((\sin(dec) \cdot \cos(lat) \\ &- \cos(dec) \cdot \sin(lat) \cdot \cos(H)) / \cos(alt)) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} (h \geq Tm) \text{ azi} &= \text{acos}((\sin(alt) \cdot \sin(lat) - \sin(dec) \\ &/ (\cos(alt) \cdot \cos(lat))) + \pi \end{aligned} \quad (13)$$

여기에서, lat 는 태양추적장치가 위치한 위도를 의미한다.

방위각과 고도각 계산 알고리즘은 다음과 같다. 첫째, 모터가 서쪽방향으로 움직일 때마다 발생하는 펄스 개수를 덧셈한다. 둘째, 서쪽방향으로 움직인 각은 위에서 계산한 총 펄스 개수에 펄스당 움직이는 모터의 각을 곱하여 계산한다. 셋째, 서쪽방향으로 움직인 각에서 동쪽방향으로 움직인 각을 뺄셈한다. 넷째, 최종적으로 움직인 방위각은 초기 설정한 각을 덧셈 함으로써 계산된다. 고도각 계산 알고리즘 역시 위와 동일하다.

시스템 종료는 동, 서, 남, 북 방향의 조도센서 평균값이 종료판단 기준 문턱값보다 낮게 되면 원상복귀 펄스수를 발생시켜 태양추적장치를 원상복귀 시킨 다음 태양추적장치를 종료시킨다. 태양추적장치를 동쪽으로 원상복귀 시키게 되면 다음날 태양추적을 용이하게 할 수 있다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 태양추적장치 검증

Fig. 4(a)는 초기에 동쪽방향으로 향해있던 복합식 태양광 발전 및 난방장치가 일출 이후 태양추적을 함에 따라 시간에 따른 위치 변화를 나타낸다. 사진의 오른쪽이 동쪽, 왼쪽이 서쪽을 가리킨다. 오전 9 시부터 고도각이 상승하게 되며 오후 12 시 부근에서 남중고도 함에 따라 고도각이 가장 높아졌다가 이후에는 감소함을 알 수 있다.

Fig. 4(b)에서는 태양추적장치를 통해 계산한 방위각과 고도각을 한국천문연구원에서 얻은 값과 비교하였다. 오전 9 시부터 오후 5 시까지 비교한 결과 평균 오차는 0.04° 이내였다.<sup>(9-11)</sup> 이를 통해 집광형 태양전지를 이용한 난방장치의 태양 추적장치에 사용된 알고리즘의 타당성을 검증하였다.



Fig. 4(a) Transient motion of the heating system as a function of time

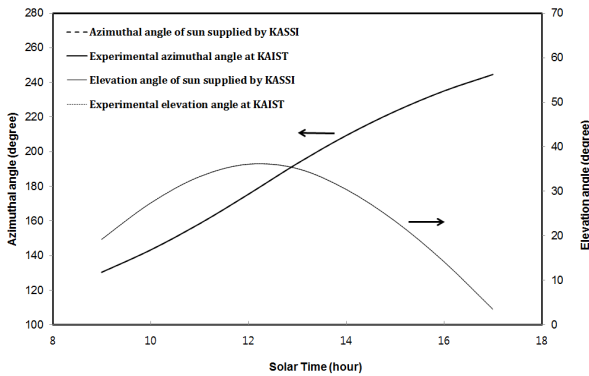


Fig. 4(b) Comparison of the actual values obtained from KASSI with experimental data (\*KASSI: Korea Astronomy and Space Science Institute, KAIST: Korea Advanced Institute of Science and Technology)

### 3.2 전기 및 열효율

식 (14)는 집광형 태양전지가 태양으로부터 받는 총 에너지를 나타낸다. 여기에서,  $A_0$ 는 태양전지의 면적, CR은 집광비(400),  $q''_{irr}$ 는 집광형 태양전지가 받는 복사 열유속으로  $1,230 \text{ W/m}^2$ 이다. 식 (15)는 최대출력이며 최대 전압과 최대 전류의 곱이다.

$$Q_1 = A_0 \cdot CR \cdot q''_{irr} \quad (14)$$

$$P = VI \quad (15)$$

$$Q_2 = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (16)$$

식 (16)은 태양열 흡열기에서 회수한 열량이며 입구유량은  $200\text{mL/min}$ ,  $T_{out}$ 은 흡열기 출구 온도,  $T_{in}$ 은 흡열기 입구 온도를 나타낸다. 식 (17)과 (18)은 각각 전기 효율과 열효율을 의미한다.

$$n_{elec} = \frac{P}{Q_1} \times 100(\%) \quad (17)$$

$$n_{th} = \frac{Q_2}{Q_1} \times 100(\%) \quad (18)$$

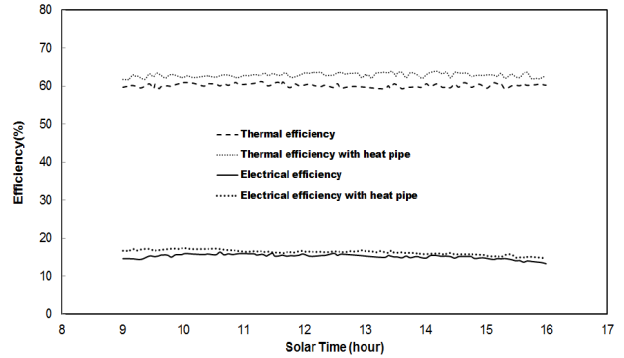


Fig. 5 Electrical and thermal efficiencies of a CPV device and thermal absorber with and without heat pipes as a function of solar time

Fig. 5는 히트파이프 유무에 따른 전기효율 및 열효율을 시간에 따라 나타낸 것이다. 히트파이프를 포함하는 태양전지는 하루 동안의 전기 효율 평균이 약 16% 정도로 히트파이프를 포함하지 않는 태양전지의 효율 15% 보다 높았다. 또한 히트파이프 유무에 따른 열효율의 평균은 각각 62%와 60%였다. 따라서 히트파이프를 이용함으로써 태양전지의 전기효율 및 흡열기의 열효율이 상승함을 확인하였다. 이는 복합(전기+열)효율이 78%로 태양전지에서 발생한 열을 회수하여 이용할 수 있기 때문에 다른 신재생에너지 효율보다 높음을 알 수 있다.

시간의 변화에 따른 전기효율 변화는 미미하였다. 또한 글라스울로 흡열기를 단열하였기 때문에 외부온도 변화에 관계없이 열효율은 일정하였다.

### 3.3 해석 및 검증 실험

집광형 태양전지는 렌즈를 이용하여 복사에너지인 태양광을 집광하게 된다. 입력에너지인 복사에너지가 출력에너지인 전기에너지, 열에너지와 같아지게 되면 온도는 정상 상태에 도달하게 된다. 열평형에 도달하게 되면 다음과 같은 보존 방정식을 만족하게 된다.

$$\tau\alpha A_0 CR q''_{irr} - \eta_{elec} \tau\alpha A_0 CR q''_{irr} - \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) = 0 \quad (19)$$

위 식에서 첫번째 항은 태양전지가 렌즈투과율  $\tau(0.9)$ , 태양전지 표면 흡수율  $\alpha(0.9)$ , 태양전지 면적  $A_0$ , 렌즈 집광비 CR(400), 일사량  $q''_{irr}$ 만큼 태양으로부터 받는 총 복사에너지를 나타낸다. 두번째 항은 효율  $\eta_{elec}$ 만큼 변환된 전기 에너지를 나타낸다. 세번째 항은 흡열기에서 회수한 열량을 나타낸다.

흡열기 안의 유동은 비압축성, 정상 상태로 고



려되었으며, 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (20)$$

위 식에서  $\rho$ 는 물의 밀도,  $u, v, w$ 는  $x, y, z$  방향에서의 유속을 나타낸다.

$x, y, z$  방향의 모멘텀 방정식은 다음과 같다.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (21)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (22)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (23)$$

위 식에서  $p$ 는 물에 작용하는 압력이며,  $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$ 는 점성력,  $F_x, F_y, F_z$ 는 체적력을 나타낸다.

에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right] + S_r \end{aligned} \quad (24)$$

위 식에서  $C_p$ 는 비열,  $T$ 는 온도,  $k$ 는 열전도율 그리고  $S_r$ 는 내부 열원으로 태양전지가 받는 복사 에너지를 나타낸다.

해석에 사용한 경계조건은 다음과 같다. 입구 유량은 200mL/min, 입구온도는 9.6°C, 집광형 태양전지가 받는 복사 열유속은 일사량 1,230W/m<sup>2</sup>, 집광비 400, 프레넬 렌즈의 투과율 90%, 태양전지의 흡수율 90%를 고려해 주었다. 히트파이프는 높은 열전도율을 가진 고체로 가정하였으며 실험을 토대로 15,000W/m·K를 적용하였다. 사용한 격자수는 340,260 개이다.

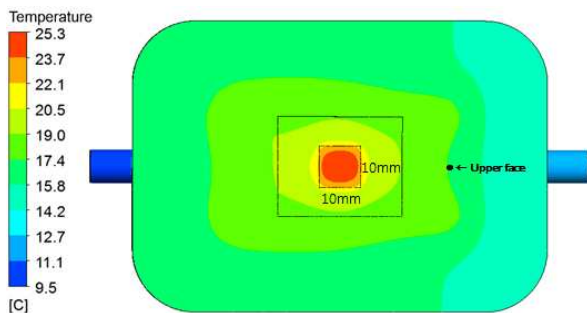


Fig. 6 Temperature distribution on the interface of a CPV device and thermal absorber with heat pipes

Fig. 6은 히트파이프를 포함한 태양열 흡열기를 해석한 결과이다. 해석 결과 태양전지의 최고온도는 25.3°C, 흡열기 상단(집광형 태양전지로부터 출구 방향으로 10mm 떨어진 지점)은 17.7°C, 출구 평균온도는 11.9°C를 나타내었다. 실험 온도는 k-type 열전대를 이용하여 측정하였으며 흡열기 상단은 16.9°C, 출구는 11.8°C의 온도를 나타내었다. 해석과 실험 결과의 일치를 통해 태양열 흡열기의 해석 검증이 완료하였다.

Table 3은 집광비 변화에 따른 집광형 태양전지의 최고온도와 히트파이프를 포함한 흡열기의 출구 평균온도를 해석한 결과이다. 집광비가 500에서 800으로 증가함에 따라 출구온도는 12.5°C에서 14.2°C로 증가하였다. 이는 같은 입구 온도 조건에서 집광비가 높을수록 흡열기가 더 많은 온수를 시간당 생산함을 의미한다. 하지만 식 (16), (18)에 의해 열효율의 변화는 미미하였으며 평균 열효율은 64%였다. 또한 집광비가 증가함에 따라 복사량이 증가하여 태양전지의 최고온도는 29.3°C에서 41.2°C로 증가하였다.

Fig. 7은 유량 증가에 따른 열효율과 태양전지의 온도 변화를 나타낸다. 열효율은 식 (16), (18)에 의해 유량이 200mL에서 800mL로 증가함에

Table 3 Simulated temperatures of the CPV device and the thermal absorber with heat pipes for different lens concentration ratios

Concentration ratio	Max. temp. of CPV (°C)	Average temp. at the outlet (°C)
500	29.3	12.5
600	33.3	13
700	37.2	13.6
800	41.2	14.2

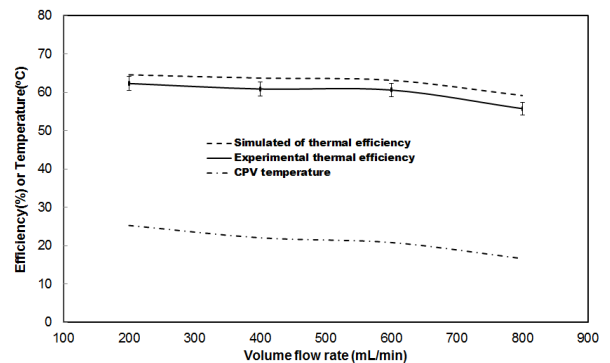


Fig. 7 Simulated and experimental values for thermal efficiency and CPV temperature as a function of the volume flow rate.

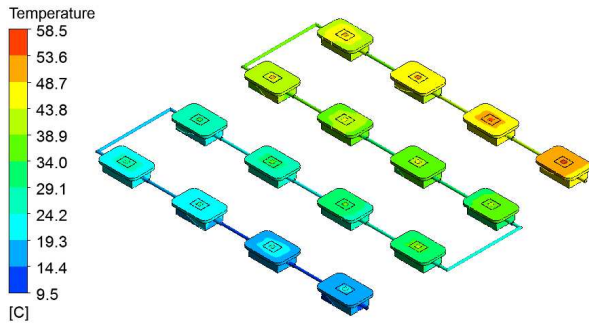


Fig. 8 Heating system using a CPV grid



Fig. 9 Validation of the heating system using a CPV grid

따라 출구온도가 11.8°C 에서 10.1°C 로 감소하게 되지만 유량이 증가하였기 때문에 열효율의 변화는 크지 않았다. 열효율 해석과 실험 결과의 차이는 평균 3.5%이내였으며 유량 증가에 따른 태양열 흡열기의 열효율 경향성이 해석과 일치함을 통해 검증을 완료하였다. 또한 유량 증가에 따라 태양전지의 온도가 25.3°C 에서 16.6°C 로 감소함을 통해 냉각수의 대류열전달이 증가함을 확인하였다.

3.4 난방장치 해석

Fig. 8 은 Fig. 6 에서 해석하였던 히트파이프를 포함한 태양열 흡열기를 가로 4 개, 세로 4 개로 총 16 개 연결하여 해석한 것이다. 냉각수 입구와 출구는 좌우 아래에 각각 위치한다. 사용한 경계조건은 Fig. 6 에서 해석한 것과 같이 입구유량 200mL/min, 집광비 400, 입구온도 9.6°C 로 설정하였다.

해석결과 태양전지의 최고온도는 58.5°C, 흡열기 출구 평균온도는 45.2°C 를 나타내었다. 위의 결과는 태양전지가 작동할 수 있는 온도를 만족하며 출구온도 또한 난방 및 온수에 적합하다. 하지만 흡열기를 단열시키지 않게 되면 복사와 대류로 인한 열손실이 생겨 난방장치의 출구온도는 감소하

Table 4 List of fixed costs for a heating system using CPV devices

Component	Cost(\$)	Component	Cost (\$)
Aluminum frame	200	Battery	30
Controller	50	CPV (#16)	320
Pump	20	Fresnel lens	180
Insulator	50	Motor (#2)	50
Solar-tracking device	15	Thermal absorber (#16)	240
Water tank	20	Heat pipe	35
Total cost (\$)		1210	

게 된다. 여름 조건을 해석한 결과 여름의 입구온도가 겨울에 비해 높기 때문에 유량을 여름에는 겨울에 비해 늘려주어야 한다. 따라서 여름에 더 많은 온수를 시간당 이용할 수 있다.

3.5 복합식 태양광 발전 및 난방장치 검증

Fig. 9 는 Fig. 8 에서 해석한 복합식 태양광 발전 및 난방장치를 검증한 것이다. 난방장치의 윗부분에 부착된 태양추적장치는 태양추적을 함에 따라 동쪽에서 서쪽으로 이동하게 된다. 냉각수 입구와 출구는 좌우 아래에 각각 위치한다.

실험결과 하루 동안의 전기효율 평균은 16%, 열효율 평균은 58% 로 복합효율이 74% 였다. 시간의 변화에 따른 전기효율 변화는 미미하였으며 위치에 따른 태양전지의 전기효율 차이는 1% 미만이었다. 또한 글라스울로 흡열기를 단열하였기 때문에 외부온도 변화에 관계없이 열효율은 일정하였으며 흡열기 출구 평균온도는 40.8°C 를 나타내었다. 해석과 실험 결과의 일치성을 통해 태양열 흡열기의 해석 검증을 완료하였다.

3.6 경제적 실행가능성 연구

Table 4 는 복합식 태양광 발전 및 난방장치의 비용을 나타낸다. 본 장치는 일사량 1,200W/m<sup>2</sup> 에서 약 124W (전압 11.7V, 전류 10.6A)의 전기를 생산한다. 모터 2 개의 소비전력 18W 와 펌프의 소비전력 6W 를 빼면 100W 정도를 배터리에 충전할 수 있으며, 배터리는 모터와 펌프를 구동시킨다. 회수기간은 (복합식 태양광 발전 및 난방장치 설치 비용) < (보일러 설치 비용 + 사용 비용 x 월수) 이며, 보일러의 사용 비용은 복합식 태양광 발전 및 난방장치가 생산하는 열량으로 계산하였다. 시스템을 하루 5 시간 운행한다고 가정하면, 회수기간은 3 년이내로 본 연구에서 개발한 장치는 현실 가능성이 높음을 확인하였다.

## 4. 결 론

센서식 및 프로그램식을 통합한 태양추적장치를 이용하여 집광형 태양전지의 발전효율을 높이고 동시에 집광에 따른 태양전지에서 발생한 열을 히트파이프를 포함한 흡열기로 회수함으로써 열효율을 높이는 연구를 진행하였다.

복합식 태양광 발전 및 난방장치의 태양 추적, 태양 위치 계산, 난방장치의 원상복귀, 시스템 종료는 Simulink 를 이용하여 프로그램화 하였다. 태양추적장치를 통해 계산한 방위각과 고도각은 한국천문연구원서 얻은 값과 비교 함으로써 태양추적 장치에 사용된 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

실험 결과 집광형 태양전지의 평균 전기효율은 16%, 히트파이프를 포함한 흡열기의 열효율은 62% 로 복합효율이 78%를 나타내었다. 흡열기 표면 및 출구온도 실험결과를 해석한 결과와 일치하였으며, 히트파이프를 이용함으로써 전기효율 및 열효율이 향상됨을 확인하였다.

집광비가 증가함에 따라 흡열기 출구온도 및 태양전지의 온도는 증가하였다. 하지만 집광비 증가에 따른 열효율의 변화는 미미하였다.

유량 증가에 따른 태양전지의 온도는 감소하였으며 이를 통해 냉각수의 대류 열전달 증가를 확인하였다. 또한 입구 유량 증가에 따라 흡열기 출구온도는 감소하게 되지만 유량이 증가하였기 때문에 열효율 변화는 크지 않았다.

히트파이프를 포함한 태양열 흡열기를 16 개 연결하여 해석 및 실험을 하였다. 해석과 실험 결과의 일치를 통해 검증을 완료하였으며, 집광형 태양전지에서 발전도 하고, 동시에 태양전지에서 발생된 열을 회수하여 난방에 사용하거나 온수를 공급할 수 있음을 확인하였다.

경제적 실행가능성 연구를 통해 복합식 태양광 발전 및 난방장치의 현실 가능성이 높음을 확인하였다. 복합식 태양광 발전 및 난방장치의 장점은 지구 온난화 가스 발생을 감소시킬 수 있으며, 태양이 떠있는 한 이용할 수 있는 지속가능성이 높다.

## 후 기

본 연구는 “KUSTA-KAIST 연구원 프로젝트”의 지원으로 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌  
(References)

- (1) Timilsina, G. R., Kurdgelashvili, L. and Narbel, P. A., 2012, “Solar Energy: Markets, Economics and Policies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 449~465.
- (2) Cotal, H., Fetzer, C., Boisvert, J., Kinsey, G., King, R., Hebert, P., Yoon, H. and Karam, N. 2009, “III – V Multijunction Solar Cells for Concentrator Photovoltaics,” *Energy & Environmental Science*, Vol. 2, pp. 174~192.
- (3) Lee, D. I., Jeon, W. J. and Baek, S. W., 2012, “Development of Optimal Control of Heliostat System Using Configuration Factor and Solar Tracking Device,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 36, No. 12, pp. 1177~1183.
- (4) Anja, R., Christopher, J. D. and David, R. M., 2005, “Cooling of Photovoltaic Cells Under Concentrated Illumination: A Critical Review,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 86, pp. 451~483.
- (5) Teo, H. G., Lee, P. S., M. N. and Hawlader, A., 2012, “An Active Cooling System for Photovoltaic Modules,” *Applied Energy*, Vol. 90, pp. 309~315.
- (6) Lee, D. I. and Baek, S. W., 2014, “Development of Heating Device Using Concentrator Solar Cells,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 38, No. 1, pp. 49~56.
- (7) Walraven, R., 1978, “Calculating the Position of the Sun,” *Solar Energy*, Vol. 20, pp. 393~397.
- (8) Karakoti, I., Das, P. K. and Bandyopadhyay, B., 2013, “An Analytical Study on Daily Solar Radiation Data,” *Current Science*, Vol. 105, pp. 215~224.
- (9) Meeus, J., 1998, “*Astronomical Algorithms*. William-Bell,” Second Edition.
- (10) Bretagnon, P., 1982, “Theory for the Motion of all the Planets - The VSOP82 solution,” *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 114, pp. 278~288.
- (11) Bretagnon, P. and Francou, G., 1988, “Planetary Theories in Rectangular and Spherical Variables - VSOP 87 Solutions,” *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 202, pp. 309~315.