

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 24, No. 4, 2004

고정형과 추적형 Evacuated CPC 집열기의 열성능 비교

윤성은*, 김용**, 서태범***

*인하대학교 대학원 기계공학과(dalim3@naver.com), **인하대학교 대학원 기계공학과(adue@origio.com),
***인하대학교 기계공학과(seotb@inha.ac.kr)

Comparison of the Thermal Performance with Stationary and Tracking Evacuated CPC Collectors

Yun, Seong-Eun*, Kim Yong**, Seo, Tae-Beom***

*Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, Inha University(dalim3@naver.com),

**Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, Inha University(adue@origio.com),

***Dept. of Mechanical Eng., Inha University(seotb@inha.ac.kr)

Abstract

A numerical study is performed to investigate the effect of sun tracking on the thermal performance of the evacuated compound parabolic concentrator (CPC) collectors. The evacuated CPC collectors consist of a two-layered glass tube, a copper tube and a reflector. The collector has a copper tube as an absorber and a reflector inside a glass tube. The water is used as a working fluid. The length and the diameter of the glass tube are 1,700mm and 70mm, respectively. The length and the diameter of the copper tube are 1,700mm and 25.4mm, respectively. Ray tracing analysis is carried out in order to compare absorbed heat fluxes on the absorber surface of the stationary and tracking collectors. The collected energy is calculated and compared with that on a fixed surface tilted at 35° on the ground and facing south. The results indicate that the collected solar energy of the sun tracking system is significantly larger than that of a stationary collector. The sun tracking evacuated CPC collectors show a better performance with an increase in the thermal efficiency of up to 14% compared with an identical stationary collector.

Keywords : Evacuated compound parabolic concentrator (Evacuated CPC), Tracking (추적)
Thermal performance (열성능)

기 호 설 명

- r : radius (mm)
- d : diameter (mm)
- A : area (m²)
- V : volume flow rate (m³/s)
- P_g : gage pressure (P_a) = 0
- \dot{m} : mass flow rate (kg/s)
- c_p : specific heat (J/kg · K)
- T : temperature (K)
- q₀ : heat flux (W/m²)
- q_{loss} : heat loss (W/m²)
- θ : incidence angle (degree)
- ε : emissivity

하 첨 자

- c : copper
- g : glass
- r : reflector
- i : inner or inlet
- o : outer or outlet
- w : water

1. 서 론

현재까지 선진국에서는 이미 CPC 집열기에 대한 많은 연구가 진행되어 오고 있지만, 우리나라에서의 이에 대한 연구 수준은 기초적인 수준에 머물러 있어 아직은 미흡한 실정이다. CPC 집열기는 저온(100℃이하)을 이용하는 평판형 집열기와 비교하였을 때 집광비를 높임으로써 중·고온(80~150℃)의 온도를 얻을 수 있는 장점이 있다. 이미 시중에 상용화되어 있는 제품에서 대류 열손실을 줄이기 위해서 CPC 집열기의 개구부에 반투과성 막개를 사용하고 있지만 집열기 내부의 온도가 높아 열손실을 줄이는 데는 한계가 있기 때문에, 집열

기에서 발생하는 대부분의 전도 및 대류 열손실을 줄이기 위해서 이중 진공관을 사용하였다.⁽¹⁾ 그리고 태양추적을 통해서 효율을 높일 수 있는데 2축 제어는 높은 효율을 얻을 수 있는 반면 고가이고 유지·보수가 어렵다는 단점이 있고, 단축제어는 경제적인 면에서는 우수하지만 2축에 비해 효율이 떨어지는 단점이 있다.^(2,3)

태양 추적에 있어서 집열기의 축이 동서방향일 때는 집열기의 기울기에 대해 에너지 집열 능력에 대한 오차가 적고 흡열관의 작동이 우수하다는 장점이 있는 반면 집열 능력이 다소 떨어진다.⁽⁴⁾ 남북방향일 때는 동서 방향에 비해 에너지 집열 측면에서 더 유리하다고 알려져 있다. Salah Abdallah는 집열기를 고정시킨 것과 비교하여 태양 추적을 했을 때 동서방향으로 설치된 집열기는 19.7%, 남북방향은 24.5%의 집열 에너지가 증가함을 실험을 통해 알아내었다.⁽²⁾

본 연구에서는 이중 진공 유리관안에 CPC 집열기를 설치해서 전도 및 대류 열손실을 최소화하고⁽⁵⁾, 방위각을 변화시키는 단축 태양 추적을 통해 보다 높은 효율을 얻을 수 있도록 설계된 태양열 집열 장치의 열성능에 대하여 연구하였다. 고정형 evacuated CPC 집열기와 태양 추적형 evacuated CPC 집열기의 입사각 변화에 따른 집열량을 ray-trace 기법⁽⁶⁾을 이용해 비교하였으며, 이를 바탕으로 하여 집열기의 실제 집열 성능을 비교하였다.^(1,5)

2. 수치해석

본 연구에서는 태양 추적형 evacuated CPC 태양열 집열기의 성능을 알아보기 위해 태양 추적을 한 경우와 고정시킨 경우의 성능을 수치 해석적으로 비교·분석하였다.

여기에서 다룬 태양 추적형 evacuated CPC 태양열 집열기의 개략도는 그림 1과 같다. 모델은 이중 진공 유리관, 반사경, 흡열관으로 구성이 되어 있다. 작동 유체로는 물을 사용하였는데 흡열관을

통해 직선으로 흐르도록 하였으며 흡열관과 유리관의 사이는 공기로 차 있다고 가정하였다. 유리관의 외경은 70mm, 내경은 54.4mm이고, 길이는 1,700mm이다. 반사경으로는 유리관과 동일한 길이를 갖고, 너비 52.4mm, 길이 1,700mm, 두께 1mm인 반원 형상의 알루미늄 반사경을 사용하였다. 흡열관으로는 외경 25.4mm, 내경 23.4mm인 구리관을 사용하였고, 그 길이는 유리관과 동일하다. 반사경의 집광비는 식 (1)과 같이 계산하였으며, 그 값은 2.14이다. 본 연구에서 사용한 각 물질의 물성치는 표 1과 같다.

표 1. Properties of the materials

| | Density : $\rho(\text{kg/m}^3)$ | Specific heat : c_p (J/kg·K) | Conductivity: k(W/m·K) | Viscosity: $\mu(\text{kg/m}\cdot\text{s})$ |
|----------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|---|
| glass | 2700 | 840 | 0.78 | . |
| copper | 8939.6 | 380.72 | 387.73 | . |
| aluminum | 2703 | 895.9 | 237 | . |
| water | 998.6 | 4180 | 0.599 | 0.001 |

$$C_{\text{geo}} = \frac{A_{\text{aperture}}}{A_{\text{absorber}}} \quad \text{----- (1)}$$

태양 추적형 evacuated CPC 태양열 집열기의 성능을 알아 보기 앞서, 고정형과 추적형 집열기의 집열 능력을 비교하였다. 우선 동일한 형상과 크기를 갖는 집열기에 대해 입사각을 0°, 15°, 30°, 45°, 60°로 변화를 주면서 이에 따른 고정형과 추적형 집열기의 흡열관에 모이는 열유속을 Trace-Pro를 이용하여 비교·분석하였다. 이 때 입사각에 따른 일사량은 한국에너지기술연구원에서 측정한 자료를 사용하였다.⁽⁶⁾ 계산에서 사용한 각 시간 즉, 입사각에 따른 일사량 변화는 그림 2와 같다. 원래 시간에 따른 일사량은 정오를 기점으로 오전과 오후가 약 10% 정도의 차이가 있다. 그러나 계산 시간을 줄이기 위해 정오를 기점으로 대칭으로 가정하였고, 각각의 입사각에 따른 ray-trace 형상은

그림 3과 같다.

위에서 계산한 흡열관에 모이는 열유속과 집열기의 열손실을 고려하여 FVM 상용코드로 집열효율을 계산하였다. 집열관에서의 열전달 현상을 해석하기 위해, 계산 결과의 정확성을 크게 잃지 않으면서 계산 과정을 단순화하기 위해 몇 가지 가정을 하였다. 우선, 모델에서 일어나는 모든 과정을 정상상태라 가정하였다. 그리고 유리관 바깥 표면에서의 대류 열손실은 무시하였다. 반면 구리관, 유리관 및 반사경에서 일어나는 복사 열손실은 고려하였다. 복사 열손실의 계산에서 집열관과 주변과의 형상계수는 1로 가정하였다. 그리고 구리관이 평평하지 않기 때문에 실제 집열기의 구리관 바깥쪽 표면에 열유속이 균일하게 가해지지 않는 않지만, 여기서는 경계조건으로 구리관 표면에 균일한 열유속이 가해진다고 가정하였다. 그리고 이것은 구리관의 전도도가 매우 높기 때문에 합리적이라고 할 수 있다.

그 외에 주어진 본 계산에서 사용된 경계조건들은 다음과 같다.

1) 입구 조건 ($z=0, r < d_{ci}/2$)

$$T_{iw} = 20.05^\circ\text{C}, u=0, v=0, \\ w = V/A_c \quad (V = 2.89 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})$$

2) 출구 조건 ($z=1.7\text{m}, d_{co}/2 < r < d_{gi}/2$)

$$P_g = 0$$

3) 벽면 조건 ($r = d_{ci}/2, d_{co}/2, d_{gi}/2$)

$$\text{Velocity : } u=0, v=0, w=0$$

4) 구리관 표면에 가해지는 열유속 ($r = d_{co}/2$)

$$q = q_0 \quad (\text{일정})$$

5) 구리관, 유리관 및 반사경에서의 복사 열손실

$$\text{At } r = d_{co}/2, \quad q_{co, loss} = \epsilon_c \sigma (T_c^4 - T_s^4) \quad \text{--- (2)}$$

$$\text{At } r = d_{go}/2, \quad q_{g, loss} = \epsilon_g \sigma (T_g^4 - T_s^4) \quad \text{--- (3)}$$

$$\text{At } r=d_{ro}/2, \quad q_{r, loss} = \epsilon_r \sigma (T_r^4 - T_s^4) \quad \text{----- (4)}$$

$$T_s = 15^\circ\text{C}$$

여기서 구리관의 방사율은 0.06, 흡수율은 0.93 이고, 유리관의 투과율은 0.91, 흡수율은 0.018, 반사경의 반사율은 0.9로 가정하였다.

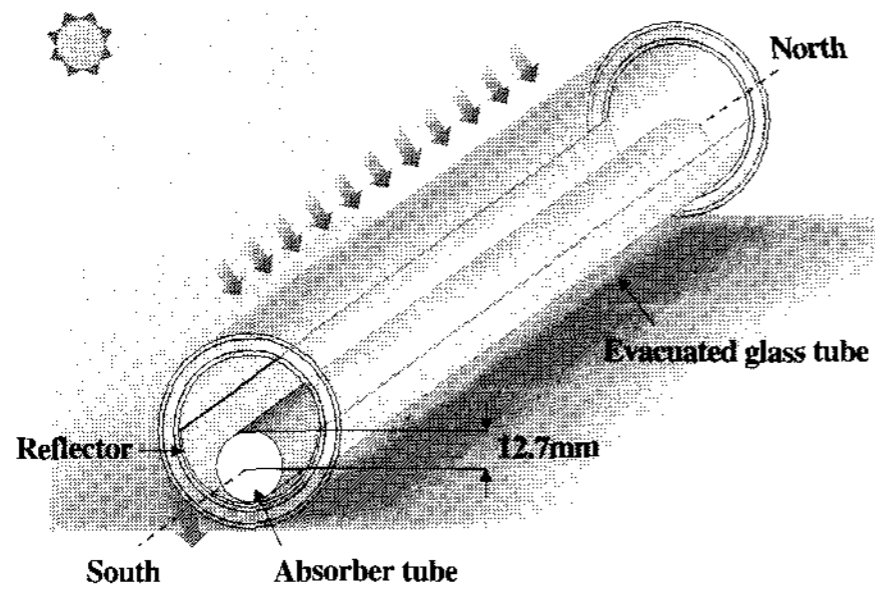


그림 1. Schematic of the CPC collector

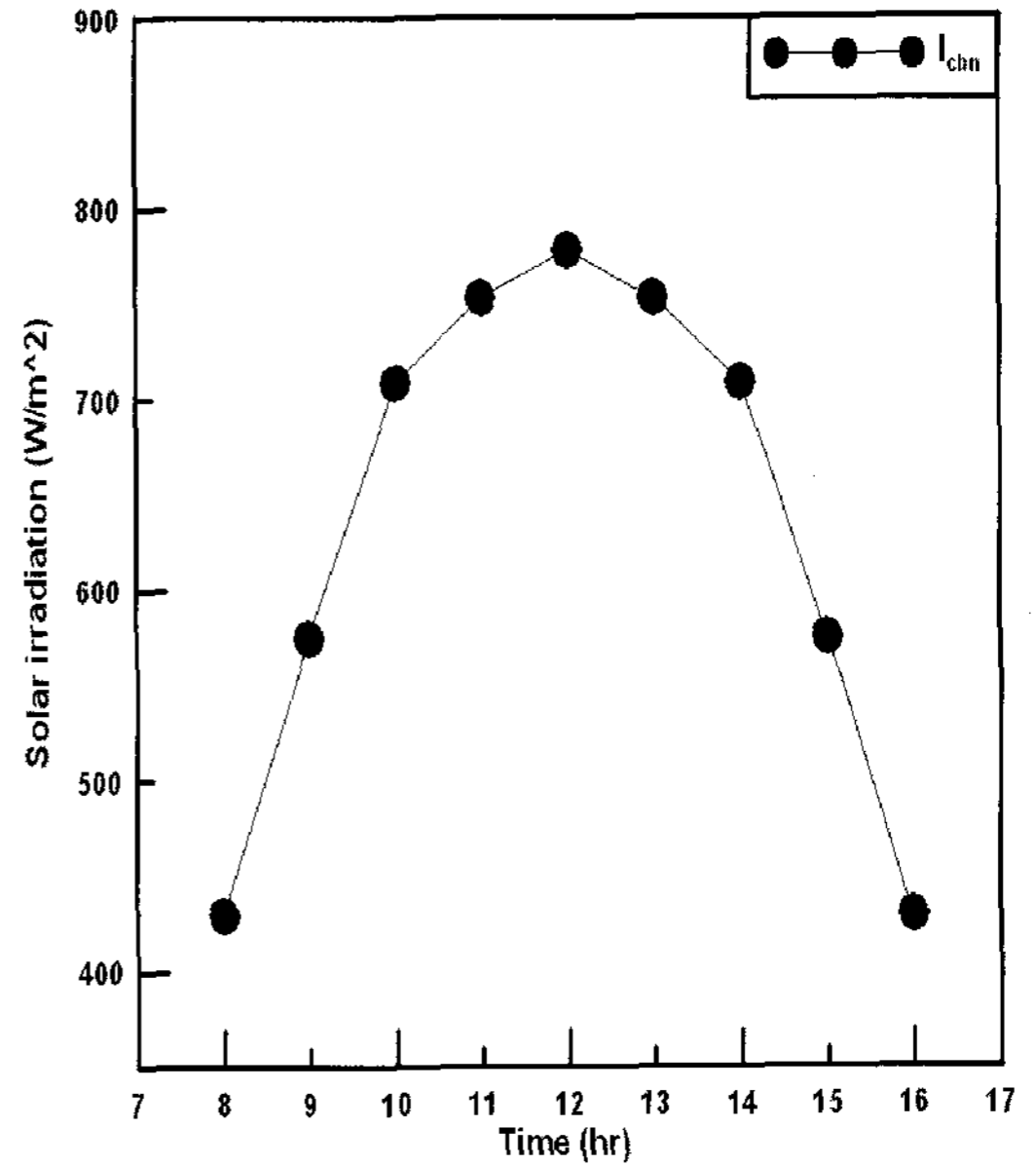


그림 2. Solar irradiation with time

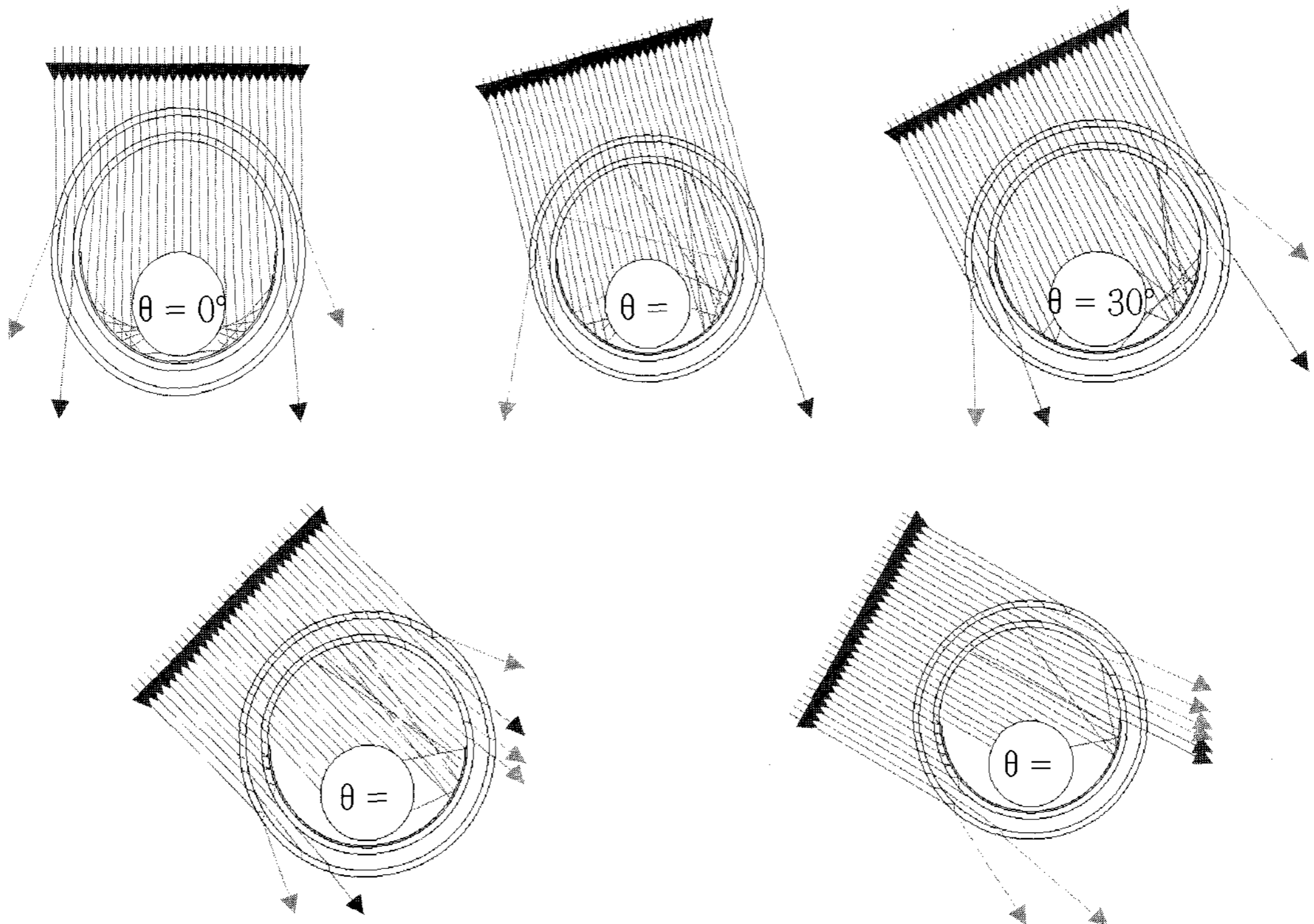


그림 3. Ray trace diagrams for 0-60°

3. 결과

본 연구에서는 태양 추적형 evacuated CPC 태양열 집열기의 성능을 수치해석적으로 연구하였다. 상용소프트웨어(TracePro)를 이용한 ray-tracing 결과를 바탕으로 입사각 변화에 따른 고정형 집열기와 태양 추적형 집열기의 흡열관에 모이는 열유속을 그림 4와 같이 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 12시 즉, 입사각이 0°일 때 똑같이 최대값을 갖고 입사각이 커짐에 따라 그 차이가 점점 더 커짐을 알 수 있다. 고정형 집열기는 설치 각도가 35°로 고정되었다고 가정했기 때문에 일사량이 적은 오전과 오후에는 태양 추적형 집열기와 비교했을 때 흡수되는 열유속의 차이가 커짐을 알 수 있다.

그림 5는 입사각 변화에 따른 각각의 집열기에서 흡수하는 열량을 보여준다. 위의 경우와 거의 흡사한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이는 진공관의 사용과 흡열관 표면의 선택흡수코팅으로 인해 열손실이 최소화되기 때문으로 판단된다.

그림 6은 각각의 집열기에서 입사각 변화에 따른 효율 변화를 나타내고 있다. 집열기의 효율은 식 (5)와 같이 계산하였다. 집열기의 효율 변화는 위의 그림들과는 상당히 다른 경향을 보인다. 태양 추적을 하는 경우에는 입사각 변화에 따른 효율이 거의 일정하게 나타나는 반면, 고정형 집열기의 경우에는 그림 2와 같이 일사량의 변화에 따라 효율의 차이를 보이고 있다. 이는 태양 추적형의 경우 입사각이 변화하더라도 태양광이 집열면에 항상 수직하게 입사하기 때문이다. 다시 말해서 입사각이 0°인 경우처럼 집열할 수 있기 때문이다. 이 때 입사각이 큰 경우의 효율이 입사각이 작은 경우에 비해 효율이 약간 높는데 이는 흡수되는 열량이 클수록 손실 또한 커져서 효율의 감소로 이어지기 때문이다. 반면, 고정형의 경우 입사각이 변하는 경우 일사량의 감소뿐만 아니라 반사경에 입사되는 일사량이 흡열관의 그림자 때문에 줄어들고, 흡열관 역시 반사경의 그림자 때문에 집열 면적이 줄어들게 된다. 따라

서 고정형의 경우 입사각이 커짐에 따라 집열 능력이 현저히 떨어지게 되고 이에 따라 효율 또한 감소한다.

표 2와 3은 입사각에 따른 고정형과 태양 추적형 집열기의 흡수된 열유속과 효율을 나타내고 있다. 표에서와 같이 입사각이 작을 때는 비슷하다가 30° 이상에서는 열유속과 효율이 확연히 차이가 나는 것을 알 수 있고 고정형보다 태양 추적형의 효율이 평균 14.2%만큼 더 높게 나왔다.

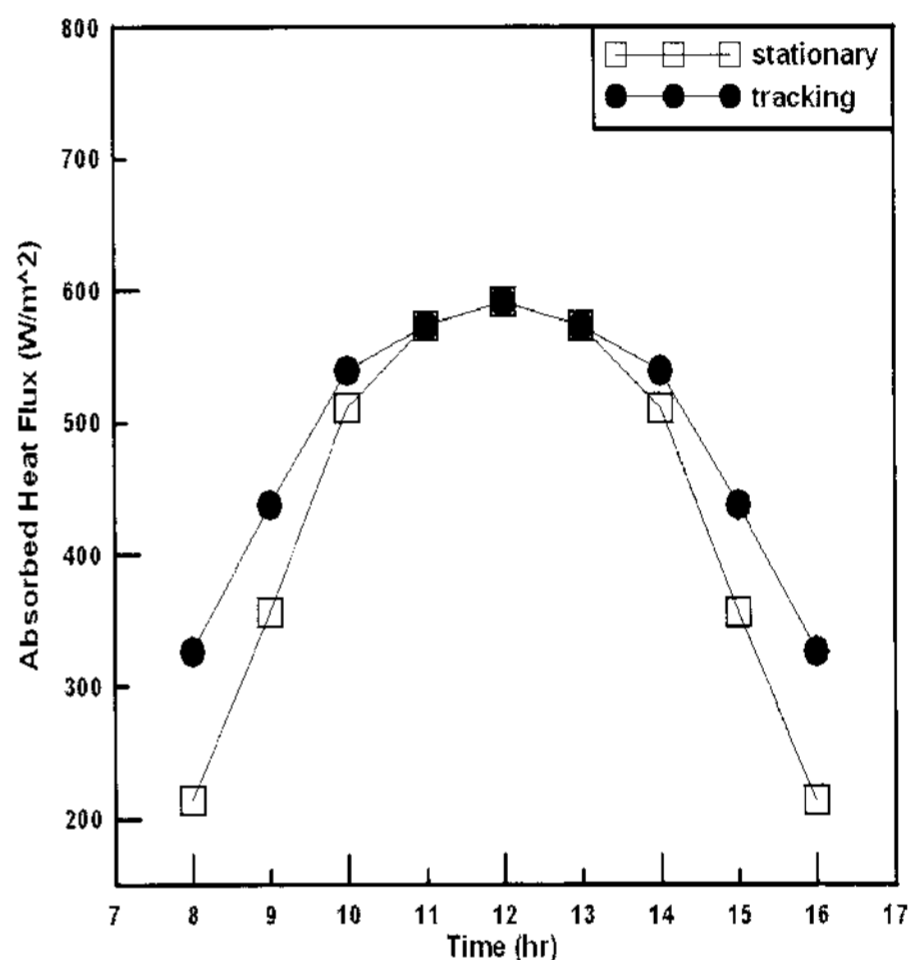


그림 4. Absorbed heat flux variations of stationary and tracking collectors

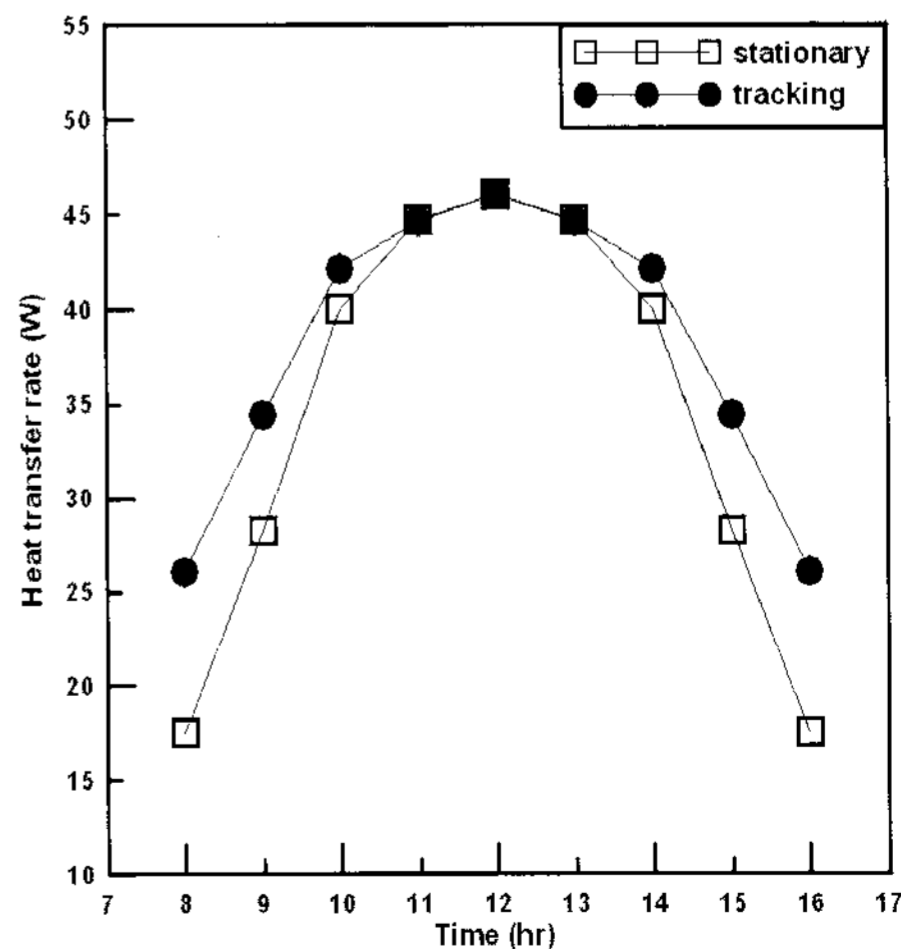


그림 5. Heat transfer rate variations of stationary and tracking collectors

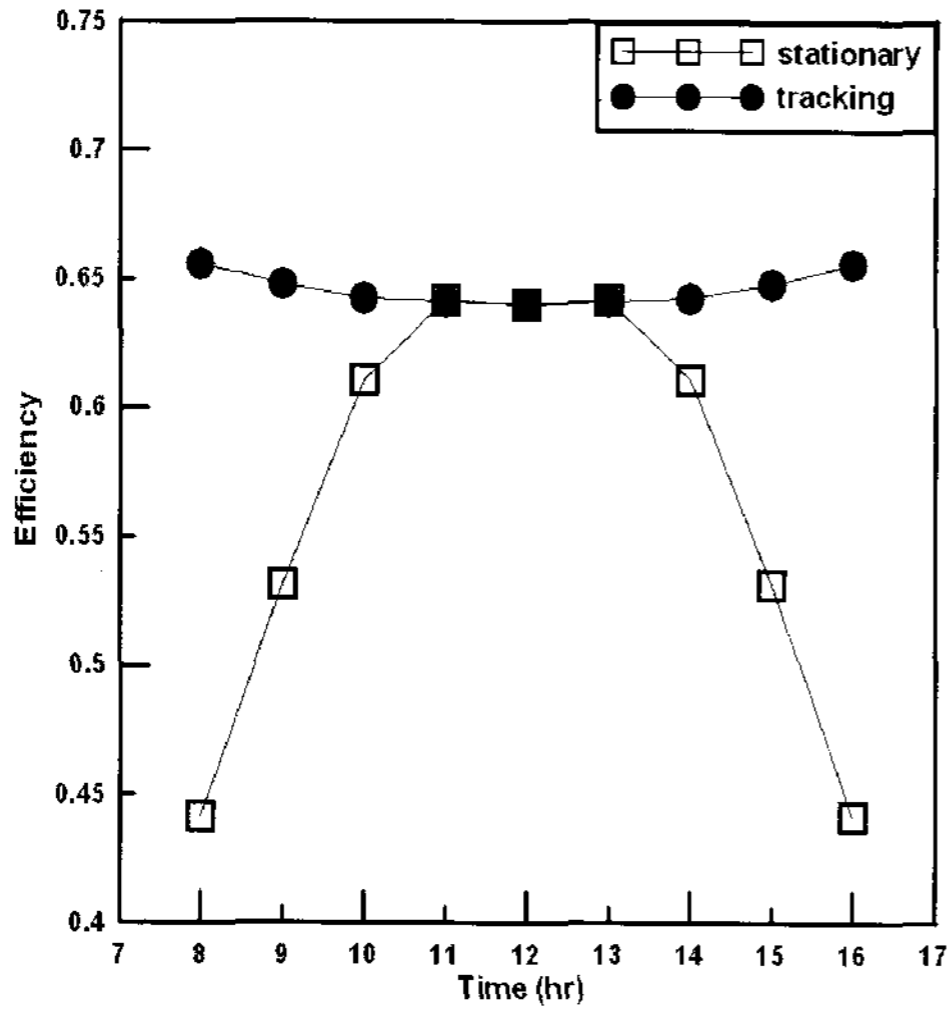


그림 6. Thermal efficiencies of stationary and tracking solar thermal collectors

$$\eta = \frac{\dot{m}_u \cdot c_{p,u} \cdot (T_{o,w} - T_{i,w})}{A \cdot G} \quad \text{----- (5)}$$

표 2. Absorbed heat flux on the surfaces of stationary and tracking collectors

| Incidence angle | Absorbed heat flux (W/m ²) | |
|-----------------|--|----------|
| | Stationary | Tracking |
| 0° | 591.16 | 591.16 |
| 15° | 537.09 | 573.13 |
| 30° | 511.40 | 538.70 |
| 45° | 356.33 | 437.50 |
| 60° | 214.44 | 326.56 |

표 3. Efficiency of stationary and tracking collectors

| Incidence angle | Efficiency(%) | |
|-----------------|---------------|----------|
| | Stationary | Tracking |
| 0° | 64.0 | 64.0 |
| 15° | 64.2 | 64.2 |
| 30° | 61.1 | 64.3 |
| 45° | 53.2 | 64.8 |
| 60° | 44.2 | 65.6 |

5. 결 론

태양 추적형 evacuated CPC 태양열 집열기의 성능을 알아보기 위해 태양 추적을 한 경우와 고정시킨 경우의 성능비교를 수치해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 흡열관에 흡수되는 열량과 열유속은 입사각이 커질수록 고정형과 태양 추적형의 차이가 커짐을 알 수 있다. 이는 입사각이 커질수록 일사량이 줄어들는데 태양 추적형은 태양광이 항상 수직으로 입사되므로 고정형 집열기에 비해 집열 효율이 높기 때문이다.
2. 효율에 있어서 입사각이 클수록 고정형 집열기는 흡수하는 일사량도 줄어들 뿐 아니라 입사되는 태양광도 그림자에 의해 방해받아 집열능력이 현저히 떨어진다.
3. Evacuated CPC 집열기의 열성능은 고정형 집열기의 효율과 비교해서 평균적으로 약 14.2% 정도 높음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 지역대학우수과학자 지원연구사업의 연구비지원을 받아 수행되었음. (과제번호 : R05-2004-000-10220-0)

참 고 문 헌

1. Keith A. Snail, Joseph J. O'Gallagher, Roland Winston (1984), A Stationary Evacuated Collector with Integrated Concentrator, Solar Energy Vol. 33
2. Salah Abdallah, Salem Nijmeh (2003), Two Axes Sun Tracking System With PLC Control, Energy Conversion and Management Vol. 45 1931-1939

3. R. Zogbi, D. Laplaze (1984), Design and Construction of a Sun Tracker, Solar Energy Vol. 33
4. M. J. Carvalho, M. Collares-Pereira, J. M. Gordon (1987), Economic Optimization of Stationary Nonevacuated CPC Solar Collectors, Transactions of the ASME Vol. 109
5. C. Grass, W. Schoelkopf, L. Staudacher, Z. Hacker (2004), Comparison of the Optics of Non-tracking and Novel Types of Tracking Solar Thermal Collectors for Process Heat Applications up to 300°C, Solar Energy Vol. 76
6. Trace-pro manual
7. 조덕기, 강용혁, 오정무 (2003), 고지대 일사량 특성분석에 관한 연구, 한국태양에너지학회 논문집 Vol. 23