

진공관형 태양열집열기의 성능분석

Analysis of the Performance of Solar Collector with Evacuated Tubes

이귀현* 임대식*
정희원
G.H.Lee D.S.Lim

1. 서론

현재, 우리나라의 농업은 에너지 집약형 산업으로 변하고 있다. 그 동안 농업의 생력화를 위해 농업생산 시설의 자동화 시책을 추진해 오면서 온실, 축사, 버섯 재배사, 건조 저장실 등을 중심으로 하여 농업도 에너지 소비형 산업으로 변모하였다. 그러나, 에너지원이 한정되어 있는 우리나라의 현실로 볼 때 자본구조가 취약한 농업부문에서는 에너지 가격의 상승이 농업생산비의 증가로 이어져 농업시설물의 유지 및 운영에 큰 어려움 주고있다.

우리나라의 일반적인 에너지 소비 추세를 보면 석유, 가스, 전기 등의 고급에너지 소비가 급증하는 반면 석탄소비의 감소로 에너지의 해외 의존도 및 석유 의존도가 점차 증가추세로 1998년 통계에 의하면 국내 에너지 사용량의 97%이상이 수입에 의존하고 있는 실정이며, 환경문제와 관련하여 지구 온난화의 원인 중 화석연료(화석에너지의 단위 열량당 CO₂ 발생량은 석탄 0.098g/kcal, 석유 0.079g/kcal, 천연가스 0.056g/kcal)에 따른 영향이 55% 이상을 차지하고 있다(에너지관리공단, 2000). 특히 이 중에서 화석연료에서 발생하는 이산화탄소에 의한 지구온난화현상(지구 온난화에 대한 온실가스의 기여도 CO₂ 55%, CFC-11 17%, CFC-12 7%, CH₄ 15%, N₂O 6%)이 가장 심각하다고 할 수 있다. 이러한 문제 해결의 일환으로 각 국에서는 에너지 절약 기술과 아울러 대체에너지의 개발에 중단 없는 노력을 경주하고 있다. 특히 무한한 양을 지니고 있는 청정 에너지원인 태양열의 이용에 대한 세계적 관심이 집중되고 있다.

태양열을 직접 효율적으로 이용하는 방법으로 태양열 건조기, 태양열집열기 또는 집광기, 태양 연못(Solar Pond) 등이 있다. 현재 이용되고 있는 판 방식의 태양열집열기는 열효율이 너무 낮아서 이용도가 매우 떨어지고 있는 실정이다(Haris, 1980; 정, 1980). 그러나, 진공관형 태양열집열기는 진공관속의 매질(공기 또는 물 등의 유체)에 태양열을 가하여 진공관속에 에너지를 모으고 다시 빠져나가는 열을 최소화시킴으로써 열효율을 높이는 방법이다(Duffie와 Beckman, 1974). 진공관형 태양열집열기는 태양복사광에서 직달성분과 산란성분을 모두 유효하게 이용 가능함으로 여름철 산란성분이 많은 우리나라의 경우 매우 유리하다. 진공관형 태양열집열기는 진공을 이용함으로 인해 흡수판에서의 열손실을 획기적으로 줄일 수 있어, 설치면적을 약 30%정도 줄일 수 있고, 중온 활용에서 높은 집열효율을 유지한다(Fisk와 William Anderson, 1982; Howell 등, 1982; Richard와 Ryan, 1981). 또한, 경량이고, 설치가 용이하며 기존 건물의 외관과 친화적일 수 있다는 점에서 진공관형 태양열집열기는 전 산업으로 유용하게 사용될 것으로 전망된다(곽, 1999).

따라서, 본 연구에서는 진공관형 태양열집열기의 집열성능 평가 및 집열기에 대한 슬라시 플레이터의 경사각에 따른 집열특성을 조사하였다.

* 강원대학교 농업생명과학대학 농업공학부

† 본 연구는 2001년도(9차년도) 산·학·연 공동기술개발 지역 컨소시엄 사업에 의한 “고효율 태양열집열기 개발에 관한 연구” 결과의 일부임

2. 재료 및 방법

가. 실험장치

(1) 집열기

Fig. 1은 실험에 사용된 진공관형 태양열집열기의 한 모듈을 나타낸 것으로, 이중 유리관으로 제작된 진공관을 구성하는 집열체(Selective-black fluid tube)와 투과체(Glass tube), 진공관내로 유체를 순환시키기 위한 진공관 중심부의 유리관, 진공관의 출·입구와 연결되어 집열매체를 순환시키는 동관이 설치된 Manifold, 태양열을 진공관내로 반사시키는 반사체로 이루어져 있다. 투과체의 외 표면에는 태양 복사에너지가 잘 흡수되도록 흑색 코팅이 되어있으며, 반사체는 태양 복사에너지를 반사하여 집열체로의 입사량을 증가시키기 위해 반원형으로 제작하였고, Manifold내의 동관은 열 손실을 최소화하기 위해 잘 단열시켰다.

Manifold의 동관으로부터 유입되는 유체는 진공관의 중심부에 설치되어 있는 작은 유리관을 통해 진공관내의 상부로 유입되고, 열려있는 유리관의 끝 선단을 넘쳐 다시 진공관내의 하부로 순환하면서 진공관으로 투입된 복사에너지에 의해 가열된 후 Manifold의 동관을 통해 다시 물탱크나 외부로 유출되게 하였다.

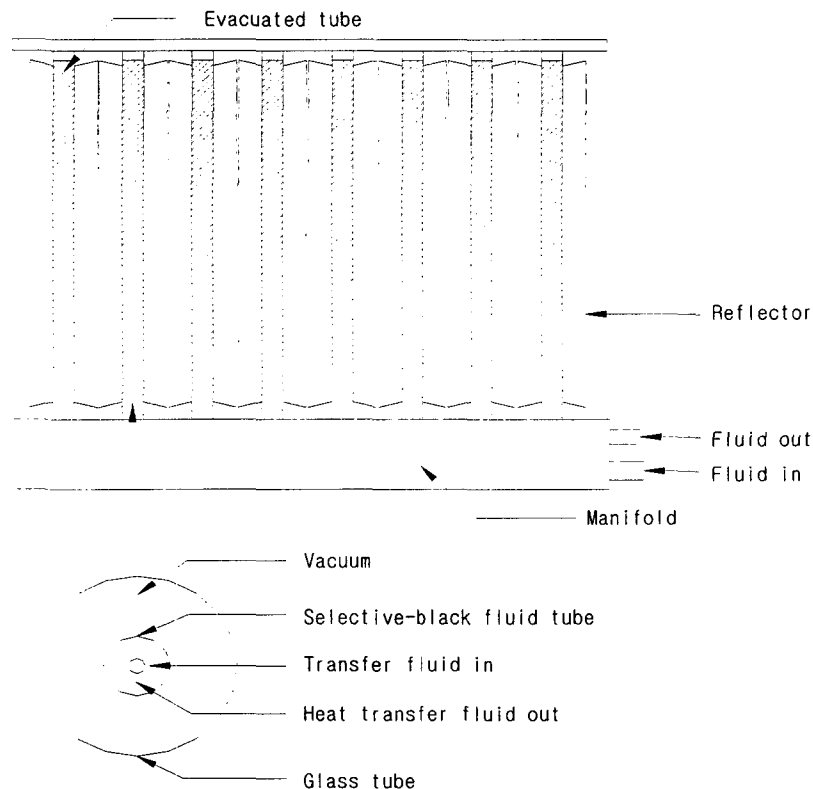


Fig. 1. Solar collector with evacuated tubes.

(2) 솔라시뮬레이터

실내에서 태양열집열기의 집열성능 실험을 수행하기 위해 태양광과 유사한 복사에너지를 방출하는 솔라시뮬레이터를 제작하였다(Fig. 2). 솔라시뮬레이터는 광 조사각도를 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 까지 조절할 수 있는 구조물에 금속판을 설치하고, 반사 갓과 함께 250W의 적외선 램프 12개를 부착하여 제작되었다.



Fig. 2. Solar Simulator.

(3) 실험장치

진공관형 태양열집열기의 집열성능 실험을 위한 실험장치의 실제 사진을 Fig. 3에 나타내었으며, 실험장치내의 유체 순환 경로를 표시한 유체 흐름도를 Fig. 4에 나타내었다. 집열기 내에 공급되는 집열매체인 물의 유량을 일정하게 유지하기 위해 유량계(FKK 1768-4, Japan)를 물탱크와 집열기 입구 중간에 있는 순환펌프(CS-0125E, Chung Suk Co. Ltd., Korea)의 바로 위 부분에 설치하였다. 여기서, 순환펌프는 집열매체를 물탱크로부터 집열기를 통과하여 다시 물탱크로 순환시키는 역할을 하게 하였다. 부가적으로, 집열기에 의해 가열된 물탱크의 물을 펌프에 의해 열교환기로 순환시키고, 열교환기로 공급되는 냉수로 열을 전달하여 온수를 얻을 수 있도록 하였다. 저장용량이 1 tone인 물탱크는 주위의 온도변화에 영향을 받지 않도록 잘 단열된 FRP로 제작하였고, 집열매체의 순환통로 이외에는 완전히 밀폐시켰다. 집열기의 출·입구에는 온도측정을 위해 열전대를 설치하였다.

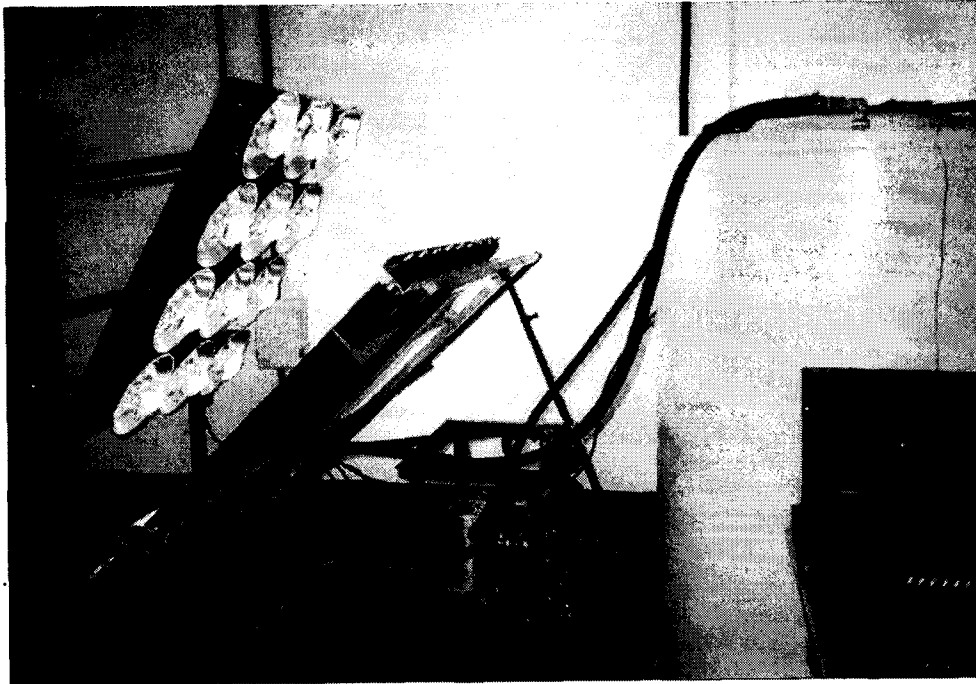


Fig. 3. Experimental apparatus for the performance test of solar collector.

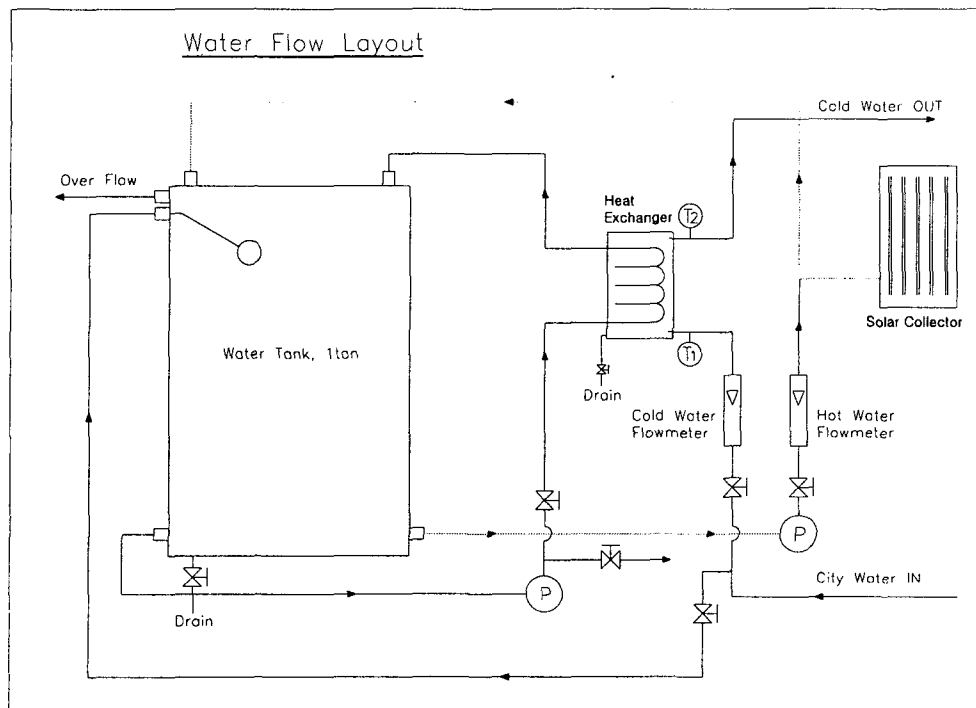


Fig. 4. Schematic diagram for fluid flow of experimental apparatus.

나. 실험방법

(1) 집열성능 실험

각도를 조절할 수 있게 제작된 구조물에 놓여진 집열기는 지면과 40° 가 되도록 조정하였고, 복사광을 조사시키는 솔라시뮬레이터와 평행을 이루도록 설치하였다. 솔라시뮬레이터에서 조사된 광 강도는 광센서를 부착한 광 강도 측정기(LI-1400, LI-COR Inc., USA)로 집열기 표면 6부분을 측정하여 평균값을 사용하였다. 물탱크로부터 순환펌프에 의해 집열기로 유입되는 물의 유량은 유량계를 통하여 $1\ell/\text{min}$ 으로 일정하게 유지시켰다. 외기의 조건과 유사하게 유지시키기 위해 송풍기를 이용하여 1.5m/s 의 미풍을 집열기 주위에 순환시켰다.

집열성능 실험은 집열기가 솔라시뮬레이터로부터 어느 정도의 복사열을 받아 정상상태로 가열된 후 시작하여 일정한 온도로 유지된 물탱크의 물을 집열기내로 유입시키고, 집열기를 한번 통과한 매체는 다시 물탱크로 유입되지 않게 외부로 배출하였다. 집열기의 출·입구 온도차는 집열성능에 큰 영향을 미치므로, 집열매체의 1회 순환 동안 집열기의 출·입구와 물탱크 및 대기중의 온도를 각 위치에 고정시킨 열전대를 이용하여 자료수집장치(Tempscan 1100, IOtech, Inc., USA)로 측정하였다.

(2) 집열특성 실험

집열기로 조사되는 광 강도를 변화시키기 위해 지면과 40° 로 설치되어 있는 집열기에 대해 솔라시뮬레이터의 경사각을 0° , 10° , 20° 로 변화시키면서 일정시간 동안 집열매체를 집열기와 물탱크 사이를 연속 순환시키면서 진공관형 태양열집열기의 집열특성 실험을 수행하였다. 본 실험의 정확성을 위해 경사각 이외의 실험조건은 각 실험 모두 같게 유지시켰다. 즉, 순환하는 집열매체의 유량은 순환펌프 위 부분에 설치된 유량계를 이용하여 $2\ell/\text{min}$ 으로 일정하게 유지하였고, 실험장치 주위의 대기온도는 22.9°C , 풍속은 1.5m/s 로 각 실험 모두 같은 조건을 유지시켰다. 또한, 실험 시작 전에 물탱크의 집열매체 온도가 23.2°C 로 각 실험 모두 같게 하기 위해 한번 실험이 끝나 가열된 집열매체는 탱크에서 완전히 배출시키고 새로운 집열매체를 유입시켜 같은 조건과 온도를 유지시켰다. 솔라시뮬레이터로부터 집열기로 조사되는 광 강도는 광 강도 측정기로 집열기 표면 6부분을 측정하여 평균값을 사용하였다. 여기서 모든 실험에 이용된 물의 용량은 132ℓ , 실험장치의 가동시간은 5시간 24분으로 동일한 조건에서 경사각에 따른 물탱크내의 집열매체 온도변화를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 집열성능

대기온도, 물탱크 내의 물 온도, 집열기 출구 및 입구의 온도 변화를 1분 간격으로 측정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 솔라시뮬레이터로부터 집열기로 조사된 광 강도의 평균값은 $630\text{W}/\text{m}^2$ 이었고, 집열기 출·입구의 물 온도차는 6.27°C (출구: 29.82°C , 입구: 23.55°C)였으며, 집열기 주위의 풍속은 1.5m/s 였다. 물의 정압비열은 $4.17\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ 이고, 집열매체 질량유량은 $1\text{kg}/\text{min}$ 이었으며, 사용된 집열기의 크기는 $1.16\text{m}^2(1.05\text{m}\times 1.15\text{m})$ 이었다. 집열기의 순간집열효율은 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\eta = Q/(IA) \quad \text{----- (1)}$$

$$Q = m C_p \theta_d \quad \text{----- (2)}$$

여기서,

C_p = 집열매체 정압비열(kJ/kg · K), η = 순간집열효율

I = 시험체 집열면 일사강도(W/m²), Q = 시간당 집열량(W)

A = 집열기 총면적(m²), m = 집열매체 질량유량(kg/s)

θ_d = 시험체 출입구 집열매체 온도차(K)

위의 식에 의해 계산된 진공관형 태양열집열기의 순간집열효율은 60%로 비교적 높은 것으로 나타났다.

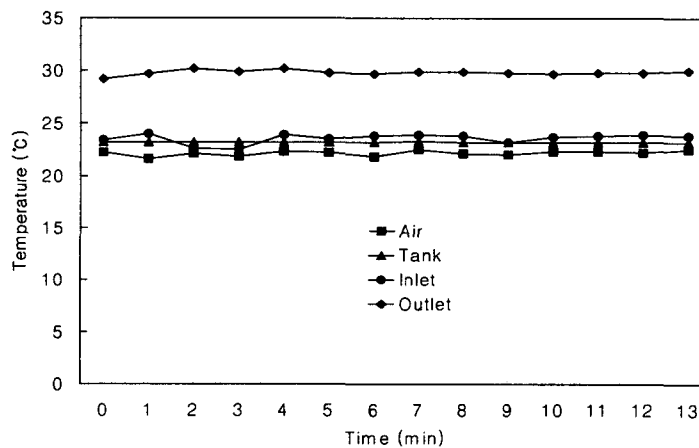


Fig. 5. Temperature change during the performance test of solar collector.

나. 집열특성

집열특성 실험은 일반적인 집열기 효율에 관련되는 인자들을 변화시켜 집열매체의 온도 변화를 조사하는 것이다. 인자들을 구분해보면 설계인자와 기상인자로 크게 나눌 수 있다. 설계인자는 진공관의 크기 및 형태, 진공관의 물성치 등이 있으며, 기상인자에는 태양 복사강도, 풍속, 대기온도, 습도 등이 있다. 본 실험에서는 동일한 집열기를 사용하였기 때문에 설계인자는 동일하며, 기상인자인 광 강도만을 변화시켰다. 즉, 실내의 풍속과 대기온도, 습도를 일정하게 유지시킨 상태에서 집열기와 솔라시뮬레이터가 이루는 각도를 바꾸어 광 강도를 변화시키면서 실험을 수행하였다. Figs. 6, 7, 8은 집열기에 대한 솔라시뮬레이터의 경사각을 0°, 10°, 20°로 변화시켰을 때 132ℓ의 물로 채워진 물탱크, 집열기 출·입구 및 대기온도의 변화를 나타낸 것이다.

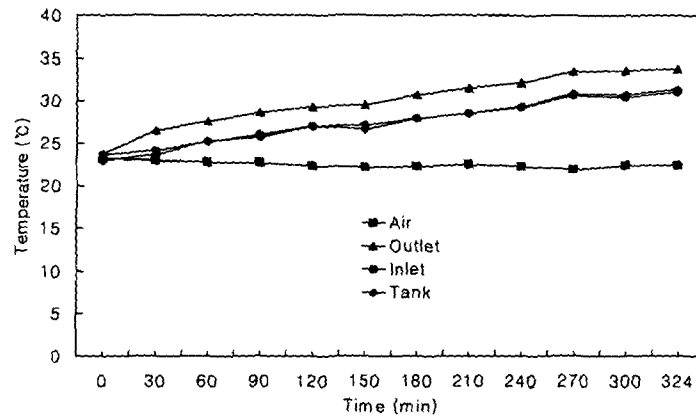


Fig. 6. Temperature change for the angle of 0° between collector and solar simulator.

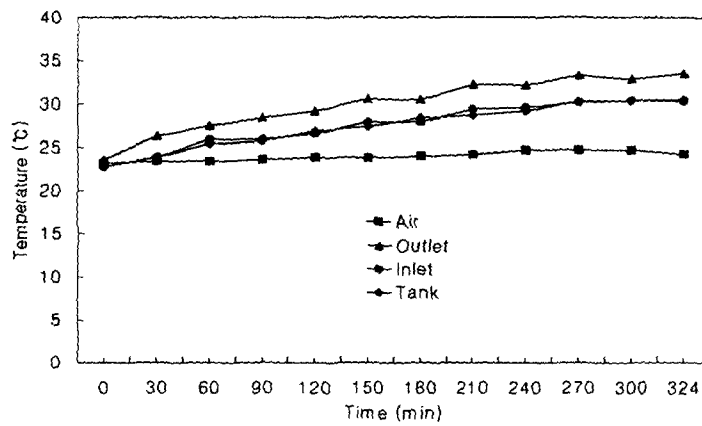


Fig. 7. Temperature change for the angle of 10° between collector and solar simulator.

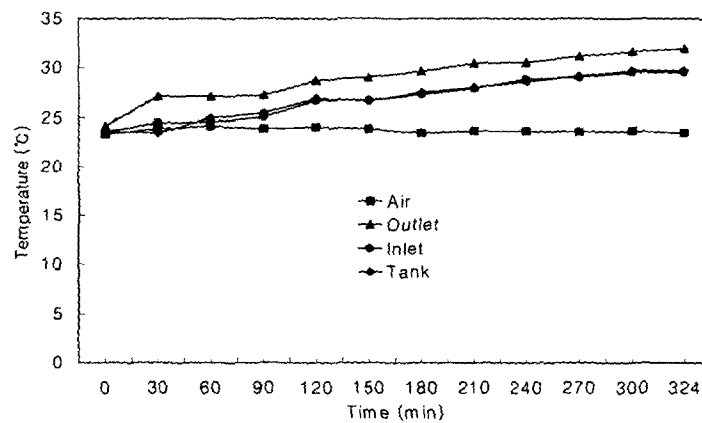


Fig. 8. Temperature change for the angle of 20° between collector and solar simulator.

경사각이 0° 인 경우 집열기에 조사된 광 강도의 평균값이 630W/m²이었고, 5시간 24분의 집열실험 후 물탱크내의 집열매체 온도가 31.3℃로 나타났으며, 초기 물의 온도 23.2℃에 비해 8.1℃의 온도가 상승하였다(Fig. 6). 경사각 10° 에서는 집열기에 조사된 광 강도의 평균값이 615W/m²이었으며, 실험 말기에 물탱크의 물 온도가 30.5℃로 초기온도인 23.2℃에 비해 7.3℃가 상승하였다(Fig. 7). 경사각 20° 에서는 광 강도의 평균값이 605W/m²이었고, 물탱크의 물 온도가 실험 말기에 29.8℃로 물의 초기온도인 23.2℃에 비해 6.6℃ 상승하였다. 이와 같은 실험결과를 요약하면 Table 1과 같다. 집열기와 솔라시뮬레이터 사이의 경사각이 작을수록 집열기에 조사되는 광 강도가 크기 때문에 집열기를 순환한 물의 상승온도가 경사각이 큰 조건보다 크게 나타났다. 즉, 경사각 0° 와 10° 의 물 상승온도 차는 0.8℃였고, 경사각 0° 와 20° 의 물 상승온도차는 1.5℃로 집열기와 솔라시뮬레이터가 이루는 경사각이 작을수록 집열기에 조사되는 광 강도가 커 집열효과가 큰 것으로 나타났다.

Table 1 Heat collecting efficiency according to the angle between collector and solar simulator

Angle	Initial Water Temperature (°C)	Final Water Temperature (°C)	Increased Water Temperature (°C)
0°	23.2°C	31.3°C	8.1°C
10°	23.2°C	30.5°C	7.3°C
20°	23.2°C	29.8°C	6.6°C

4. 결론 및 요약

진공관형 태양열집열기의 집열성능 및 집열특성 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 집열성능 실험을 통하여 진공관형 태양열집열기의 순간집열효율이 60%로 높게 나타났다.
- 2) 진공관형 태양열집열기의 집열특성 실험에 의해 얻어진 결론은 다음과 같다.
 - ① 경사각 0° 일 때 집열기에 조사된 광 강도는 630W/m²이었으며, 5시간 24분의 광 조사 후 초기온도에 비해 물탱크내의 물 132ℓ를 8.1℃ 상승시켰다.
 - ② 경사각 10° 일 때 광 강도는 615W/m²이었으며, 5시간 24분의 광 조사 후 초기온도에 비해 물탱크내의 물의 온도를 7.3℃ 상승시켰다.
 - ③ 경사각 20° 일 때 광 강도는 605W/m²이었으며, 5시간 24분의 광 조사 후 초기온도에 비해 물탱크의 물 132ℓ를 6.6℃ 상승시켰다.

집열기에 대한 솔라시뮬레이터의 경사각이 작을수록 광 강도가 커 물탱크내의 물 온도를 크게 상승시키는 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

1. 곽희열. 1999. 산업용 진공관형 태양열 집열기 연구개발. 한국에너지기술연구소 대체 에너지연구부.
2. 에너지관리공단. 2000. 기술세미나 자료집.
3. 정현채. 1980. 태양에너지 -이론과 실제-. 경희대학교 출판부.
4. Duffie, J. A. and Beckman, W. A. 1974. Solar Energy Thermal Process. John Willy and Sons, Inc., New York.
5. Fisk, M. J. and H. C. William Anderson, 1982. Introduction to solar technology. Addison-Wesley Publishing Company.
6. Haris, N. C. 1980. Solar Energy system design. John Wiley and Sons, Inc., New York.
7. Howell, J. R., R. B. Bannerot and G. C. Vliet. 1982. Solar-thermal energy system. McGraw-Hill Book Company, New York..
8. Richard C. S. and L. D. Ryan. 1981. Fundamentals of solar heating. Prentice-Hill, Inc., New Jersey.