

온실 난방을 위한 모세관형 태양열 집열기의 성능에 미치는 유량의 효과에 관한 연구

유영선 · 장유섭 · 홍성기 · 윤진하 · 정두호 · 강영덕*
농업기계화연구소 시설기계과, *솔라월드 주식회사

The Effects of Water Flow Rates on the Performance of a Capillary Tube Solar Collector for Greenhouse Heating

Ryou, Young-Sun · Chang, Yu-Seob · Hong, Seong-Gi
Yun, Jin-Ha · Jung, Du-Ho · Kang, Yeoung-Duk

National Agricultural Mechanization Research Institute, RDA, Suweon, 441-707
*SIE WORLD LTD, 280 Walpyung-Dong, Seo-Gu, Taejon, 302-280

Abstract

To use effectively the solar energy in greenhouse heating, a high performance solar collector should be developed. And then the size of the solar collector and thermal storage tank should be determined through the calculation of heating load. The solar collector must be set in the optimum tilt angle and direction to take daily solar radiation maximally, and the flow rate of heat transfer fluid through the solar collector should be kept in the optimum range.

In this research, the performance tests of a capillary tube solar collector were performed to determine the optimum water flow rate and the results summarized as follows.

1. The regressive equations for efficiency estimations of the capillary tube solar collector in the open loop were modeled in the water flow rate of 700~1,000 l/hr.
2. The optimum water flow rate of the solar collector was estimated by the second order polynomial regression and the maximum efficiency was 80% at the water flow rate of 850 l/hr.
3. The solar thermal storage system consisted of a capillary tube solar collector and a water storage tank was tested at the water flow rate of 850 l/hr in the closed loop, and obtained the solar thermal storage efficiency of 55.2%.
4. As the capillary tube solar collector engaged in this experiment was made of non-corrosive polyolefin tubes, its weight was as light as 1/30 of the flat plate solar collector made of copper tubes. Therefore it was considered to be suitable for the greenhouse heating system.

키 워 드 : 태양에너지, 태양열 집열기, 축열조

Key words : solar energy, solar collector, thermal storage tank

서 론

태양에너지의 이용 기술은 주로 냉·난방 및 급탕 시스템의 보조 열원으로 개발되어 이용되고 있으나, 고가의 시설 투자비와 유지 보수 및 사후 관리의 문제점 등이 보급의 촉진에 커다란 장애 요인이 되고 있다. 따라서 태양 에너지 이용 시스템의 개발에는 우선적으로 가격이 저렴하고, 시공이 간편하며, 집열 효율이 우수한 태양열 집열기의 개발이 선행되어야 한다.

태양열 집열기는 크게 집광형과 평판형으로 분류할 수 있으며, 집광형 보다는 제작비가 저렴한 평판형 집열기가 주로 이용되고 있다.

본 연구에 사용된 집열기는 폴리에틸렌 계열의 고분자 물질인 폴리올레핀(polyolefin)으로 제작되어 기존의 동판(copper plate)으로 제작된 평판형 집열기에 비하여 대단히 가볍고, 설치가 간편하며, 시설비가 저렴한 장점이 있다. 집열기의 열흡수 방식은 전열면 보호커버가 없는 직접 접촉식이며, 열전달 매체(물)는 모세관 형태의 병렬로 연결된 튜브층을 통과하면서 열을 흡수하도록 설계되어 있다.

태양열 집열기를 난방 등의 목적으로 사용하는 경우 기존의 화석 에너지와 경제적인 면에서 경쟁하기 위해서는 집열기의 효율을 최대한으로 높이는 것이 중요하며, 집열기로부터 열을 흡수하는 열전달 매체의 순환량을 최적으로

로 하는 것도 집열기의 효율을 높이는 방법 중의 하나이다.

본 연구에서는 평판형 집열기의 일종으로서 무광택 모세관형 폴리올레핀 튜브로 제작된 태양열 집열기의 성능에 미치는 유량의 효과를 실험적으로 분석하고, 그 연구 결과를 종합하여 시설 농업 난방에의 활용 가능성을 판정하려 한다.

실험 장치 및 방법

1. 실험장치

본 연구에 사용된 시험 장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 집열기와 물탱크, 순환 펌프, 유량계 등으로 구성되어 있으며, 실험에 사용된 계측 기기 및 센서는 Table 1에서 보는 바와 같다.

태양열 집열기의 유효 열전달 면적은 16.8 m²(4.8m×3.5m)으로 하였고, 모세관형 폴리올레핀 튜브의 외경은 6mm, 내경은 5mm였으며, 집열면의 태양에너지 흡수율은 0.96이었다. 집열면은 커버 없이 태양광의 직접 접촉에 의하여 열을 흡수하도록 하였고, 집열기로부터의 열손실을 최소화하기 위하여 집열기의 뒷면은 30mm의 압축 스티로폼을 이용하여 단열하였다. 열전달 매체(물)가 유입된 상태에

Table 1. Specification of measuring apparatus.

Measuring Item	Model	Sensor	Range	mfg.
Radiation intensity	LI-1000	Silicon photodiode	0~3000 W/m ²	USA
Water flow rate	SHK-1	Float cell	200~2000 l/hr	Korea
Temperature	DPR-500	T type	-200~400°C	Japan
Wind velocity	Testo 452	Vane type	0.2~60m/sec	Germany

서 측정된 집열기의 무게는 0.65kg/m²으로서 동판을 사용하는 평판형 집열기의 1/30 정도로 경량이었고, 집열기는 정남향으로 설치하

였으며 집열기 경사각은 45°로 고정하였다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 물탱크의 상부에 3개의 밸브를 설치하여 집열기를 통과하는

열매체의 흐름이 open loop 또는 closed loop 가 선택적으로 가능하도록 하였으며, 펌프와 유량계 사이에도 밸브를 설치하여 집열기를 통과하는 열매체의 유량을 조절할 수 있도록 하였다.

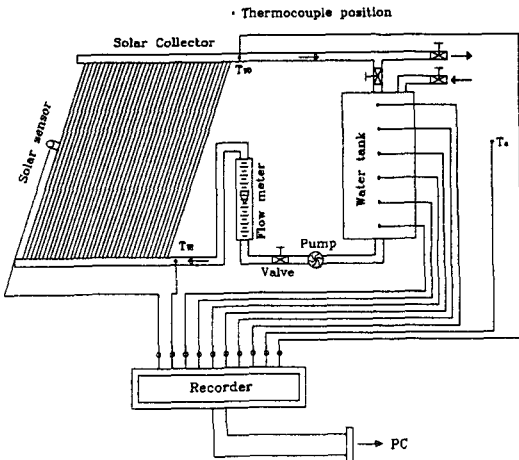


Fig. 1. Block diagram for experimental system.

2. 실험방법

주간에 태양에너지를 최대한으로 받을 수 있도록 경사각을 45°로 하여 정남향으로 설치한 집열기의 효율을 실험적으로 산정하기 위하여 집열기 입출구의 물온도와 대기 온도, 일사량 그리고 풍속을 측정하였다.

실험은 1996년 4월 8일에서 5월 2일 사이의 청명일에만 실시하였으며, open loop system으로 실험을 수행하여 최적 유량을 구하고, closed loop system으로 전환하여 최적 유량에서의 축열 효과를 분석하였다.

유량을 제외한 모든 측정 데이터는 매초 단위로 레코더의 메모리에 저장한 후 RS-232C 통신 케이블을 통하여 PC로 송신한 후 집열기의 성능 해석에 활용하였으며, open loop system에서 태양열 집열기의 순간 효율을 구하기 위하여 다음과 같은 효율 계산식을 이용하였다.

$$\eta = \frac{Q_w}{I_c(t)A} = \frac{\dot{m}_w C_{p_w} (T_{w_o} - T_{w_i})}{I_c(t)A} = B - A \frac{(T_{w_i} - T_a)}{I_c(t)} \quad \dots \dots \dots (1)$$

where,

η = Collector efficiency (dimensionless)

Q_w = Rate of heat transfer from the collector absorber plate to the working fluid (J/sec)

A_g = Gross cross-sectional area of the collector (m²)

\dot{m}_w = Mass flow rate of working fluid (kg/sec)

C_{p_w} = Specific heat of working fluid (J/kg °C)

T_{w_o} = Outlet temperature of working fluid (°C)

T_{w_i} = Inlet temperature of working fluid (°C)

T_a = Ambient air temperature (°C)

$I_c(t)$ = Solar radiation intensity (W/m²)

A = Slope of collector efficiency curve (W/m²°C)

B = Intercept of collector efficiency curve (dimensionless)

집열기를 순환하는 열전달 매체인 물의 유량을 400~1000 l/hr로 변화시켜 가면서 일사량, 집열기 입·출구의 물온도, 대기 온도 등을 측정하고, 측정된 값을 식 (1)에 대입하여 유량별 집열기의 효율을 계산하였으며, 최대 효율을 얻을 수 있는 최적 유량을 결정하였다.

결과 및 고찰

1. Open loop system의 태양열 집열기 성능

Open loop system에서 태양열 집열기의 효율을 계산하기 위하여 Table 2에서 보는 바와 같이 유량을 400~1000 l/hr까지 증가시키면서 실험을 수행하였으며, 실험시 유체의 입구

온도는 10~14℃, 대기 온도는 9~13℃였고, 풍속은 2~4m/sec였다.

실험은 1996년 4월 9일에서 4월 22일까지의 청명일에 오전 10시에서 오후 4시까지 수행하였으며, 일사량은 450~930W/m²의 범위에서 변화하였다.

Table 2. Experimental conditions for measuring solar collector efficiency.

Water Flow Rate (ℓ/hr)	Water Inlet Temp. (℃)	Ambient Air Temp. (℃)	Solar Insolation (W/m ²)	Wind Velocity (m/sec)
400~1000	10~14	9~13	450~930	2~4

Table 2에 주어진 실험 조건하에서 집열기의 효율은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 50~87%였고, $(T_{wi}-T_a)/I_c(t)$ 의 값이 일정한 경우에는 유량이 클수록 효율이 증가하였으며, 유량이 일정한 경우에는 $(T_{wi}-T_a)/I_c(t)$ 가 증가함에 따라 효율은 직선적으로 감소하였다. 그리고 Fig. 2에서 실험 데이터가 밴드를 형성하며 직선적으로 감소한 것은 유량의 변화 때문이며, 유량별로 효율을 분석하여 최적 유량을 구해야 할 것으로 판단된다.

유량의 증가에 따른 집열기의 효율 변화를 분석하기 위하여 Table 3과 Fig. 3에서 보는 바와 같이 유량별로 $(T_{wi}-T_a)/I_c(t)$ 의 변화에 따른 집열기 효율식을 유량별로 구하였다.

유량이 일정할 경우 집열기의 효율은 일사량, 집열기를 통과하는 열매체의 입구 온도, 외기 온도의 함수로 표현되며, 일사량이 클수록 그리고 열매체 입구와 외기와의 온도차가 작을수록 효율이 커지게 된다.

실험 결과 600 ℓ/hr이하의 유량에서는 집열기의 최고 효율이 70% 수준으로 낮았기 때문에 최고 효율이 80%를 상회하는 700~1000 ℓ/hr의 유량 범위내에서 회기 분석을 수행하였다.

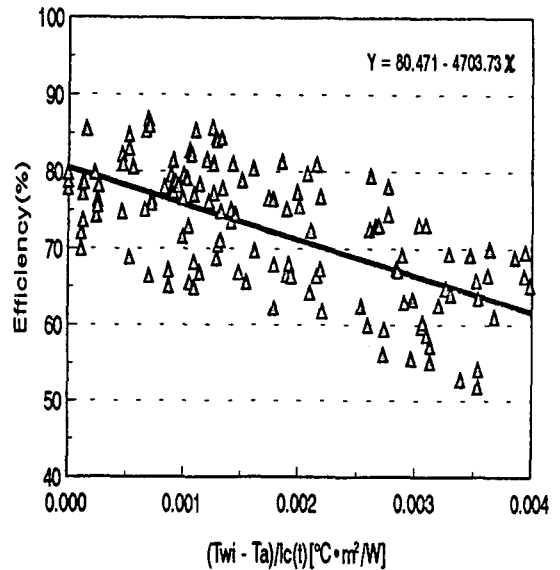


Fig. 2. Efficiency curve for the capillary tube solar collector in water flow rate of 400~1000 ℓ/hr.

Table 3. Results of regression on collector efficiency by least square fitting.

Water Flow Rate (ℓ/hr)	Constants of Regression Equation		R Squared
	A	B	
1,000	-8484.28	90.95	0.98
900	-8172.25	91.42	0.99
800	-6854.65	84.50	0.91
700	-7555.24	80.59	0.90

* 집열기 효율, $\eta = B - A \frac{(T_{wi} - T_a)}{I_c(t)}$

분석 결과 회기 방정식의 결정 계수(R²)는 Table 3에서 보는 바와 같이 0.90 이상의 높은 값을 보였으며, Fig. 3에서 보는 바와 같이 700~900 ℓ/hr까지의 유량에서는 효율이 증가하였으나, 1,000 ℓ/hr에서는 900 ℓ/hr에서 보

다 약간 감소하는 경향을 보였다. 1,000 l/hr의 유량에서 효율이 감소한 것은 집열기를 통과하는 열매체의 유속이 지나치게 커서 집열기로부터 열을 충분히 흡수하지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

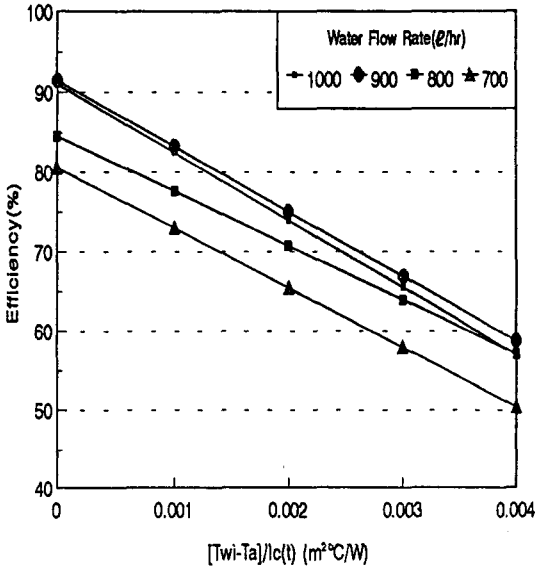


Fig. 3. Regression curves for the efficiency of the capillary tube solar collector in water flow rate of 700~1000 l/hr.

태양열 집열기는 일반적으로 청명일에 사용하게 되며, 평판형 집열기는 이용 빈도가 가장 높은 계절의 태양이 남중하는 시각에 태양 복사 에너지를 최대로 받을 수 있는 방향으로 설치하여 사용할 때 태양 에너지 이용 효율이 최대로 된다.

국내의 중부 지방에서는 집열기 경사각을 45°로 하여 정남향으로 설치하는 것이 가장 효율적이며, 청명일에 집열기가 최고의 효율에 도달하는 10시에서 14시까지의 평균 태양 강도는 800~850 W/m²이다.

따라서 800~850 W/m²의 태양 강도 범위에서 유량별로 집열기의 효율을 분석하여 최적 유량을 구하는 것이 합리적이며, polynomial

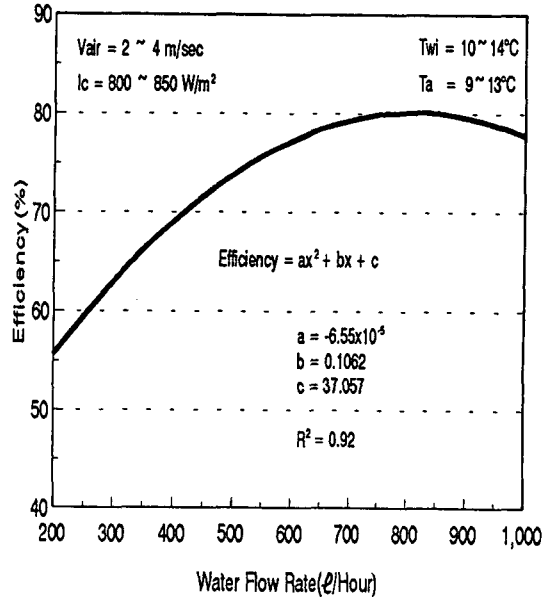


Fig. 4. Polynomial regression curves for efficiency of the capillary tube solar collector according to the water flow rates when solar radiation intensity was 800~850 W/m².

regression을 통하여 식 (2)에서 보는 바와 같이 유량의 변화에 따른 2차 방정식 형태의 효율식을 구하였다.

$$Y = -6.55 \times 10^{-5} \chi^2 + 0.1062 \chi + 37.057 \dots (2)$$

where,

Y = Efficiency (%)

χ = Water flow rate (l/hr)

식 (2)의 결정 계수는 0.92로써 높은 값을 나타냈으며, 유량의 변화에 따른 집열기의 효율은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 유량이 증가함에 따라 곡선적으로 증가하여 800 l/hr에서 80%에 도달하였으며, 850 l/hr 이상에서는 약간 감소하는 경향을 보였다. 따라서 모세관형 태양열 집열기의 최적 유량을 850 l/hr로 결정하였으며, 실제 시스템에의 응용을 위하

여 유량을 850 l/hr에 고정하고 closed loop system에서 집열기의 성능 실험을 수행하였다.

2. Closed loop system의 태양열 집열기 성능

주간에 태양 에너지를 저장하여 야간에 이용하기 위해서는 축열조가 반드시 필요하며, 태양열 집열기와 축열조로 이루어진 태양열 저장 시스템은 closed loop로 구성된다. 본 연구에 사용된 축열조의 용량은 1,000 l였으며, 열전달 매체인 물의 유량을 850 l/hr로 고정하고 실험을 수행하였다.

Table 4. Experimental results of solar thermal storage system in closed loop.

Time of day	T_w ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{se} (kcal)	Q_{es} (kcal)
10:00	16.7	772.81	662.29
10:10	17.8	1571.38	1313.96
10:20	18.9	2374.35	1958.54
10:30	20.1	3207.52	2588.96
10:40	21.4	4089.03	3198.13
10:50	22.6	4984.07	3817.92
11:00	24.0	5868.59	4420.00
11:10	25.0	6754.26	4983.13
11:20	26.1	7601.27	5532.08
11:30	27.1	8444.74	6059.79
11:40	28.5	9361.90	6594.58
11:50	29.2	10292.25	7140.00
12:00	30.4	11150.08	7628.75
12:10	31.2	11979.55	8067.92
12:20	32.3	12920.26	8556.67
12:30	33.2	13909.47	9056.04
12:40	34.1	14855.39	9502.29
12:50	35.0	15795.64	9934.38
13:00	35.7	16738.55	10348.75
13:10	36.5	17697.03	10738.33
13:20	37.6	18665.00	11106.67
13:30	38.4	19536.26	11397.08
13:40	39.0	20390.90	11666.25
13:50	39.7	21261.58	11938.96
14:00	39.9	22082.96	12186.88

실험 결과 Table 4에서 보는 바와 같이 실험 초기의 축열조내 물의 온도는 16.7 $^{\circ}\text{C}$ 였으나, 10시에서 14시까지 4시간 동안 축열 실험을 수행한 후 물의 온도는 40.0 $^{\circ}\text{C}$ 로서 23.3 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도 상승 효과를 보였다.

4시간 동안 집열기에 조사된 태양에너지량 (Q_{se})은 22,082.96 kcal였고, 집열기를 통하여 축열조에 저장된 에너지량(Q_{es})은 12,186.88 kcal로서 태양에너지량의 55.2%가 축열조에 저장된 것으로 나타났다.

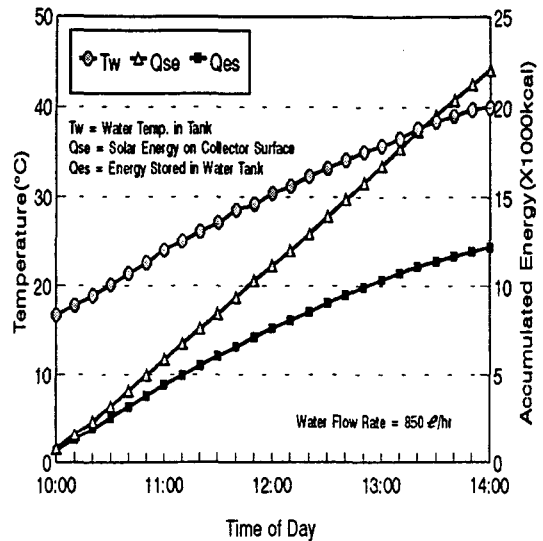


Fig. 5. Experimental results of solar thermal storage system in closed loop.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 시간이 경과함에 따라 축열 효율이 점차로 낮아지는 원인은 축열조내의 수온이 상승하여 집열기로 유입되는 물의 온도가 높아지기 때문이며, 축열 효율을 높이기 위해서는 집열기의 면적에 대응하는 축열조의 용량을 결정하기 위한 보다 더 체계적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

Closed loop system에서는 열매체의 유량을 850 l/hr로 고정하여 실험을 수행하였으며, 집열기의 효율을 분석한 결과 Fig. 6에서 보는 바와 같이 집열기 입구의 열매체 온도와 외기 온도, 태양 강도를 변수로 하는 효율식

을 구할 수 있었다. 식 (3)의 결정 계수는 0.943으로서 closed loop 시스템의 효율 예측에 유용하게 쓰일 것으로 판단된다.

$$\eta = 87.903 - 2145.22 \frac{T_w - T_a}{T_a} \dots\dots (3)$$

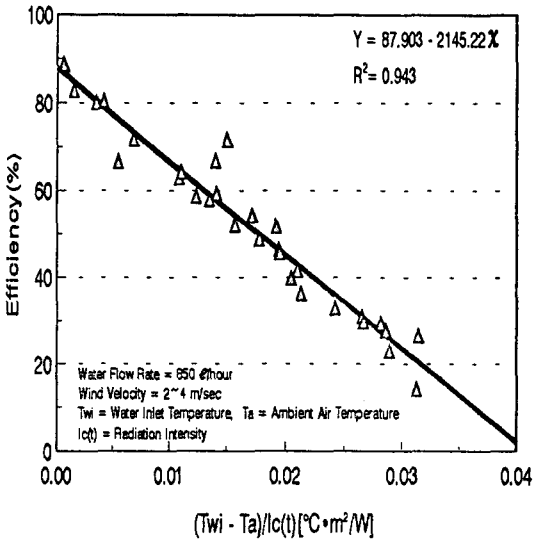


Fig. 6. Efficiency curve for the capillary tube solar collector in closed loop system.

결 론

태양에너지를 난방의 목적으로 이용하기 위해서는 우선적으로 고효율의 태양열 집열기가 개발되어야 하고, 그 다음으로는 난방 부하에 적합한 집열기 및 축열조의 용량이 결정되어야 한다. 그리고 집열기는 태양에너지를 최대한 수용할 수 있는 방향과 경사각으로 설치해야 하며, 집열기에 축적되는 태양에너지를 충분히 흡수하기 위해서는 집열기를 통과하는 열전달 매체의 순환량을 최적 상태로 유지해야 한다.

본 연구에서는 폴리올레핀 튜브로 제작된 새로운 형태의 모세관형 태양열 집열기의 성능 실험을 수행하였으며, 집열기의 성능에 미치는 유량의 효과를 분석하여 다음과 같은 결

과를 얻었다.

1. Open loop system에서 $(T_{wi} - T_a)/I_c(t)$ 를 독립 변수로 하는 열매체 유량별 집열기의 효율 예측식을 모델링하였다.

2. 모세관형 태양열 집열기의 효율을 최대한 유지할 수 있는 열매체의 최적 유량을 결정하기 위하여 polynomial regression을 수행한 결과 R^2 가 0.92로서 신뢰도가 높은 유량(x)과 효율(Y)과의 관계식을 구하였다. 이와 같은 유량을 독립 변수로 하는 효율식에 근거한 열매체의 최적 유량은 850 l/hr였으며, 최적 유량에서 집열기의 순간 효율은 80%였다.

3. 집열기의 열매체 유량을 최적 유량으로 결정된 850 l/hr로 고정하고, closed loop system에서 태양에너지 축열 실험을 수행한 결과 모세관형 집열기에 의한 태양에너지 축열 효율은 55.2%였다.

4. 본 연구에서 실험에 사용된 모세관형 태양열 집열기의 무게는 동관으로 제작된 평판형 집열기의 1/30 정도로 경량이고, 폴리올레핀으로 제작되었기 때문에 부식의 우려가 없으며, 저온(50°C이하)의 온수가 대량으로 요구되는 시설 농업 분야에 적합할 것으로 판단된다.

인 용 문 헌

1. 문 성 흥. 1986. 공기 가열 태양열 집열기의 성능에 미치는 송풍량 효과에 관한 연구. 농촌에너지연구보고논문집 2(1): 64-65.
2. Japanese Solar Energy Society. 1979. Solar Energy Fundamentals & Applications.
3. 송 현 갑, 유 영 선. 1990. 잠열재를 이용한 태양에너지 저장 시스템. 농촌에너지연구보고논문집 6(1): 37-102.
4. 백 남 순. 1991. 태양열 및 지중열을 이용한 다목적 복합 비닐하우스 시스템 개발. 한국동력자원연구소.
5. 김 부 호. 이 동원. 1990. 유하식 집열기를

이용한 저가 집열 시스템의 성능 해석.
한국태양에너지학회지 10(3): 19-26.
6. 조 서 현. 1985. 집광형 태양열 집열기의

순간 효율 측정 및 일일 효율 산출에 관
한연구. 한국태양에너지학회지 5(1): 22
-27.

학 회 광 고

한국생물생산시설환경학회에서는 본 학회의 취지에 찬동하는 개인 및 단체(구독, 찬조)회원을 아래와 같이 접수하고 있사오니 많은 참여를 바랍니다.

- 아 래 -

1. 회원가입접수 : 수시접수
2. 회원가입방법 : 학회지에 삽입된 입회원서에 기재
3. 회비(입회비) : 정회원 10,000원(준회원은 제외)
(년회비) : 정회원 20,000원, 준회원 10,000원
구독회원 40,000원, 종신회원 200,000원
찬조회원 1구좌 이상 「1구좌 150,000원」
4. 접 수 처 : 본 학회 사무국