

# 액체식 평판형 태양열 집열기 성능 실험의 표준화에 관한 연구

## A Study on the Standardization of Test Method of Flat-Plate Liquid-heating Solar Collectors

윤 석 범\*  
Youn Suck Berm

### ABSTRACT

Standardization of solar collector test method is desirable for improvement solar collector quality and Valuation of collector thermal performance.

In the present work, test loop proposed by Chun,<sup>1)</sup> is modified for convenience of test and obtained accurate collector thermal performance.

An experimental investigation has\* been carried out with a modified collector test loop under a real sun condition in order to confirm the utility of modified test loop and study the effect of variation of flow rate on thermal efficiency, the range of optimum flow rate and critical incident angle.

### 1. 서 론

태양 에너지는 화석연료의 대체 에너지로서 또 환경오염이나 파괴를 일으키지않는 무공해 에너지로서 여러분야에서 이의 이용에 관한 연구가 진행되고 있다. 평판형 집열기는 태양 복사 에너지를 100℃ 이하의 비교적 저온의 열에너지로 바꾸는 열교환기로서 우리나라에서도 여러 종류의 집열기가 생산되고 있다. 그러나 이러한 집열기들은 생산자마다 자기들 나름대로의 기준치를 설정하여 집열기의 성능을 평가하여 소비자에게 제시하기 때문에 각각의 집열기에 대한 상대적 성능을 판단하기가

어렵다. 또한 최근에는 태양열을 이용한 냉방까지도 실용화 됨으로써 집열기에 사용되는 집열유체나 사용압력에 대한 규정도 마련되어야 할 것이다. 이러한 상황을 감안하여 미국에서는 NBS의 제안에 의해서 미국공기조화 학회는 ASHRAE 표준 93-77<sup>1)</sup>을 채택하여 현재 사용중에 있으며 이의 수정을 위한 연구가 계속되고 있다.<sup>2, 3)</sup> 우리나라에서는 Chun<sup>4, 5)</sup>의 연구보고는 ASHRAE 표준을 수정한 액체식 평판형 집열기의 시험루프의 설계에 관한 것으로 두개의 저장 탱크를 사용하였다. 본 연구는 Chun<sup>4, 5)</sup> 등이 제안한 시험루프의 미흡한점을 보완하고 열성능 평가에 필요한 표준 유량 및 입사각 수정이 필요한 임계 입사각도와 시험 및 운전에서 이용되는 집열유체의 성질 및 조건등을 제안하기

\*正會員 : 단국대학교 대학원

위해 실시한 연구로서 수정한 시험루프를 이용하여 집열 유체의 유량이 집열기 열성능에 미치는 영향을 검토하고 동시에 국산 집열기의 입사각에 따른 열 효율을 측정하여 집열기에 대한 입사각 수정이 필요한 한계점을 규명하였다.

## 2. 집열 효율

집열기에서 수집할 수 있는 유효집열량은 Hottel-Whillier-Bliss<sup>6-8)</sup>에 의하여

$$Q_u = F_R [I(\tau\alpha)e - UI(T_{f,i} - T_a)] \dots\dots\dots(1)$$

로 표시되며 집열 효율은 전체 입사 태양에너지에 대한 유효 집열량의 비로서 다음과 같이 표시된다.

$$\eta = \frac{Q_u}{I} \dots\dots\dots(2)$$

(2)식을 (1)식을 이용하여 표시하면

$$\eta = F_R(\tau\alpha)e - \frac{F_R UI(T_{f,i} - T_a)}{I} \dots\dots\dots(3)$$

로 되어 (3)식을 이용하여 집열기의 효율을 표시하면 편리하다. y축을  $\eta$ 로 x축을  $(T_{f,i} - T_a)/I$ 로 표시하면 y축 절편은  $F_R(\tau\alpha)e$ 로 되고 직선의 기울기는  $F_R UI$ 로 표시된다.

## 3. 실험

### 3-1. 집열기 성능 시험장치

Fig. 1은 본연구에서 수정하여 제시한 시험 루프의 열개도이다. Chun<sup>1)</sup>등이 제안한 시험 루프와 본시험 루프와의 차이점은 다음과 같다.

1) 펌프 출구의 유량조절 밸브앞에 바이패스 라인 (by pass line)을 설치하여 저장탱크의 입구측과 연결하였다. 이것은 유량 조절을 용이하게 하고 저장탱크 내의 집열 유체를 가열시킬 때 일정온도로 유지시키기 위한 순환라인으로 사용할 수 있게 하기 위함이다.

2) 집열기에서 순환된 집열 유체가 저장탱크로 들어가는 라인을 각각의 저장탱크에 밸브와 같이 설치하고 탱크 출구측 즉 펌프와 입구측에도 각탱크에 밸브와 같이 라인을 설치하여 저장탱크 2개를 개별적으로 사용할 수 있도록 수정하였다.

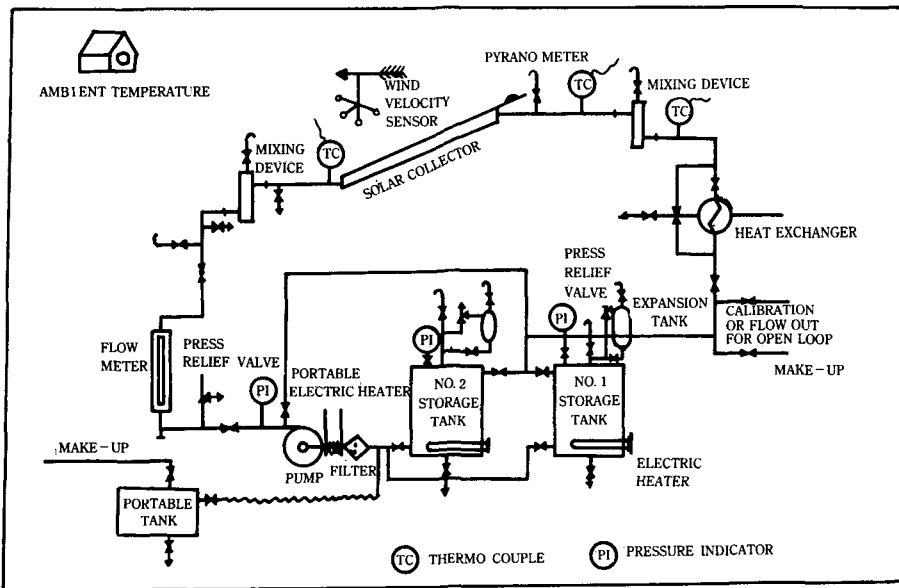


Fig. 1 Schematic diagram of test loop for liquid-heating solar collectors

3) 집열기 입구측의 집열유체의 온도를 일정하게 유지시키기 위하여 이동식 전기 히터를 여과기와 펌프사이에 설치하였다.

집열기 시험 루프는 집열기를 임의의 경사각 및 입사각으로 조절할 수 있도록 되어있다. 집열기 성능시험시 측정되어야 하는 값은 온도, 일사량, 유량, 입사각 등으로 집열기 입출구 온도는 T type 열전대를 이용하였으며, 일사량은 epplery pyrano meter를 집열기 좌측 중앙에 설치하였다. 일사량 변화와 집열기 입출구 온도 변화를 계속적으로 기록하기 위해 strip chart recorder를 사용하였으며 유량계는 rotameter(0.25~2.55gal/min)를 설치하여 측정하였다.

3-2 실험절차 및 방법

본 연구에서 수정한 집열기 실험 장치의 유용성과 집열기 성능에 영향을 미치는 집열 유체의 유량을 표준화하고 집열기에 입사되는 태양 복사광선의 한계 입사각 규명 및 기상 조건등의 영향을 조사하기 위해 Table 1과 같은 국산 집열기를 사용하여 여러 가지 변수에 따른 실험을 실시하였다.

Table 1. Specifications of the solar collector

Type	Flat-plate liquid Type(one cover)
Gross area	2.43m <sup>2</sup> (900×2700×95)
Absorber Plate	Black Ni-Cr selective surface $\alpha > 0.93, \epsilon_p < 0.1$
Tube	aluminum roll bonded copper tube
Glazing	3mm thick glass
Back insulation	50mm thick glass wool

ASHRAE 표준<sup>1)</sup>에 의하면 태양열 집열기의 열성능을 평가하기 위해서는 먼저 일사량, 주위 대기온도 및 집열기 입구의 집열유체의 온도들의 여러가지 값에 대한 순간효율을 측정하여 집열기의 열성능을 결정하도록 하고있다. 따라서 정상상태 또는 준정상 상태하에서 집열기에 입사되는 일사량의 세기와 집열유체가 집열기 내부를 흐르면서 얻게되는 에너지의 증가율등을 측정해야 한다. 이밖에도 집열

기의 시간상수와 집열기에 입사되는 태양광선의 입사각이 변할때 정상 상태의 집열기 열효율이 어떻게 변화하는가를 결정하기위한 실험을 하도록 되어있다.

본 실험에서는 집열기 효율 및 입사각 수정계수 실험에 앞서 집열기의 시간 상수를 결정하기 위한 실험을 실시하였다. 시간상수 실험은 집열기의 동적특성을 알아보는 것으로 처음의 상태에서 외부 조건이(주로 일사량)변화할때 새로운 평형 상태에 도달하는데 요하는 시간을 알아보는 실험이다. 집열기 입구측의 집열유체의 온도를 대기온도와 같게 유지시키고 운전하다가 흰페인트를 칠한 합판으로 갑자기 집열기 위에 입사되는 일사량을 차단하여 일사량이 영이되게 한후 집열기 입출구의 온도를 연속적으로 기록하여 출구 온도와 입구온도의 차가 입사광선을 차단하기 전의 36.8% 즉,

$$\frac{T_{f, e, t} - T_{f, i}}{T_{f, e, initial} - T_{f, i}} = 0.368 \dots\dots\dots(4)$$

가 될때까지의 시간을 측정하여 집열기의 시간상수를 결정하였다.

집열 효율은 집열기에 입사되는 태양광선이 수직일때의 효율을 의미하므로 집열판을 입사각이 영이되게 설치한 후 일사량이 거의 일정하게 유지되면 저장탱크의 전열기 및 이동식 전열기에 의해 집열기로 들어가는 집열유체의 온도를 일정하게 원하는 온도로 유지시켜 집열유체를 순환시켰다. 이때 일사량을 기록하여 일정시간(5분이상)의 값을 적분하여 집열기의 순간 효율을 구하였다. 집열기의 순간 효율을 측정하기 위해 사용한 매회 측정 시간은 시간 상수 보다 큰 5분을 택하였다.

집열에 입사되는 태양광선의 입사각이 변화하게 되면 유리의 투과율, 흡수율 등이 변화하게 되어 집열기 성능에 변화를 가져오게 된다. ASHRAE 표준<sup>1)</sup>에 의하면 집열기에 대한 태양 광선의 입사각이 0, 30, 45, 60도 등의 4가지의 실험조건하에서 4개의 다른 효율값을 결정하도록 권고하고 있다. 따라서 본실험에서는 시험대가 회전식이므로 먼저 집열기에 대한 태양광선의 입사각이 수직인 경우의 효율을

측정한 후 즉시 시험대를 원하는 입사각이 되도록 회전시켜 효율을 측정하여 입사각 수정계수를 구하였다. 매회 측정시마다 집열기 입구의 집열유체의 온도를 대기 온도와 같게 유지하였다. 실험은 0, 30, 40, 50, 60도의 입사각에서 실시하였다.

집열기의 변수중 설계 변수는 집열기 설계시에 그 값이 결정되는 것이고 환경변수는 외부 기상 조건에 좌우되는 것이므로 본실험에서는 운전중 인위적으로 그값을 조절할 수 있는 운전 변수중 유량 변화에 따른 집열기 효율의 변화와 동시에 최적 유량의 범위를 조사하였다. 유량 변화 범위는 0.01, 0.02, 0.03, 0.04kg/s-m<sup>2</sup>으로 택하였다.

순환 유체는 인체에 무해하며 열용량이 큰 물을 이용하였으며 시스템의 순환 압력은 대기압과 같게 하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

앞에서 기술한 실험 방법과 절차에 따라 실시한 실험 결과는 다음과 같다. Table 2는 집열기 시간 상수의 실험 결과이다. 이것은 동일한 유량 조건에서 4회씩 집열기 시간 상수를 측정하여 평균치를 취한 것이다. Table 2에 나타난 결과를 보면 집열기의 시간상수는 유량이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 이것은 유량이 증가하면 열전달이 촉진되기 때문이다.

Table 2. Collector time constants for various flow rate

(720 ≤ I ≤ 860W/m<sup>2</sup>)

Collector flow rate(kg/s-m <sup>2</sup> )	0.01	0.02	0.03	0.04
Collector time constant (second)	128	92	64	48

Fig. 2는 입사각과 집열효율과의 관계를 밝히기 위한 실험 결과이다. 입사각이 수직 일때의 효율을 100%로 할때 30도에서는 99.8% 40도에서는 97.5%, 50도에서는 94.5%, 60도에서 87.8%로 입사각이 30

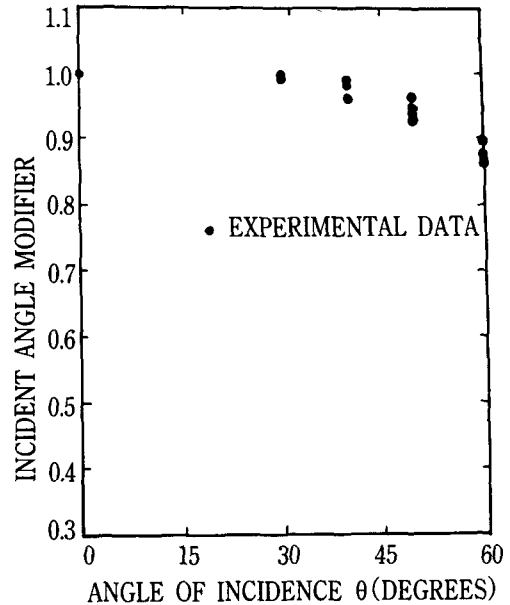


Fig. 2 Incident angle modifier test results

도까지는 입사각의 영향이 적으나 30도를 넘으면 효율이 점차 큰폭으로 감소하고 있다.

Table 3은 집열기의 유량을 변화시켜 가면서 측정한 효율곡선의 수직 절편과 기울기이다. 여기서 보는바와 같이 집열기의 효율은 측정시마다 다소 변화함을 알 수 있다. 이것은 집열기 효율에 영향을 미치는 인자가 많기 때문에 몇개의 변수를 고정시켜 놓고 실험을 하여도 다른 변수들이 변하기 때문이라고 본다.

따라서 보다 정확한 효율을 측정하기 위해서는 유량은 물론이지만 일사량, 대기온도, 바람 등 외부 조건도 표준화하여야 하며 측정치는 여러번 반복하여 얻은 값의 평균치를 사용하는 것이 바람직하다.

Fig. 3은 유량 변화에 따른 순간 효율을 측정한 것이다.

집열기 열효율의 변화는 유량이 0.01에서 0.02 kg/s-m<sup>2</sup>로 변할때 그 변화폭이 가장 크고 그 이상이 되면 변화량이 다소 작아짐을 알 수 있다. 즉 유량을 제외한 모든 조건이 모두 같다고 하면 유량을 대략 0.02kg/s-m<sup>2</sup>로 할 때 열효율의 증가가 상대적으로 크다고 할 수 있는데 이것은 ASHRAE 표준<sup>11)</sup>이 권하고 있는 유량과 같은 값이다.

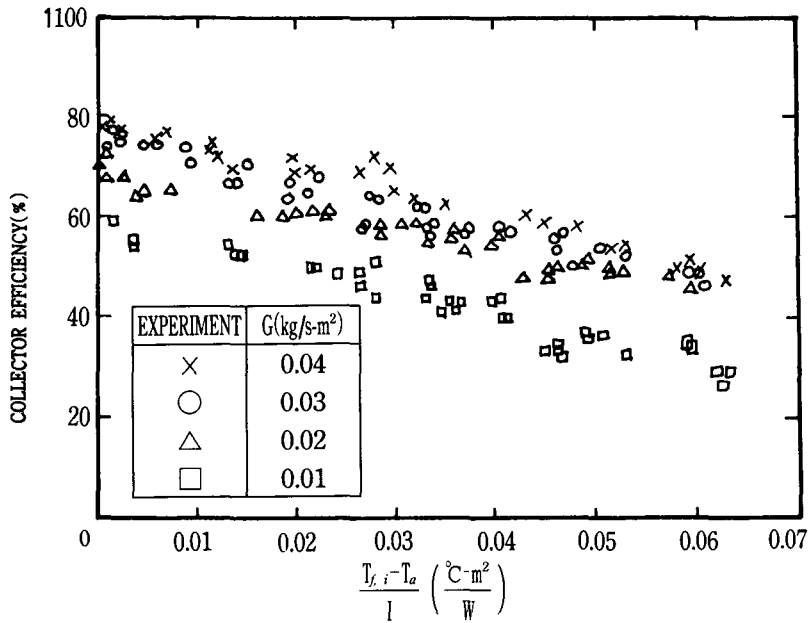


Fig. 3 Experimental efficiency data for various flow rate

Table 3. Experimentally obtained y-intercept( $F_R(\tau\alpha)e$ ) and the slope( $F_R U_i$ ) of the collector efficiency curve for various flow rates( $G$ )

G(kg/s·m <sup>2</sup> )	Test No.	$F_R(\tau\alpha)e$	Mean $F_R(\tau\alpha)e$	$F_R U_i$	Mean $F_R U_i$
0.01	1	0.61041	0.60532	-5.30262	-5.06757
	2	0.58567		-4.77566	
	3	0.61134		-5.02610	
	4	0.61385		-5.16591	
0.02	1	0.69577	0.72153	-4.50406	-4.38526
	2	0.72105		-4.74405	
	3	0.72592		-4.67931	
	4	0.72080		-4.08876	
	5	0.74412		-3.91012	
0.03	1	0.76952	0.77428	-4.76865	-4.93732
	2	0.77173		-4.74020	
	3	0.78606		-5.00402	
	4	0.76983		-5.23638	
0.04	1	0.81136	0.80681	-5.55422	-5.34763
	2	0.79304		-5.08462	
	3	0.81857		-5.60849	
	4	0.80429		-5.14320	

Fig. 1과 같이 시험루프를 수정하여 실험을 실시하여 본바, 저장탱크 2개를 분리하여 사용할 수 있어서 한단계 실험중에 다음 단계의 실험을 준비할 수 있고 또 2개의 탱크를 같이 연결하여 사용함으로써 발생하는 실험중 온도 상승영향이 없어 효율 측정에 정확성을 기할 수 있었다. 또 바이패스 라인 은 탱크내의 유체를 가열시에 유체를 순환시킬 수 있어 편리하였다.

### 5. 집열 유체의 성질

평판형 집열기가 난방은 물론 냉방등 여러분야에 이용됨으로서 사용자의 안전과 제품의 내구를 위하여 다음의 몇가지 집열유체의 성질을 제안한다.

- 1) 어떠한 사용 온도에서도 분해를 일으키지 않으며 기름이나 가스등에 화합하지 않을것.
- 2) 인화나 폭발성이 없으며 인체에 무해무독할 것.
- 3) 철이나 구리 등 구성재료를 침식하지 않을 것.

### 6. 결 론

집열기 성능 시험의 표준화를 위하여 CHUN<sup>4, 5)</sup> 등이 제안한 집열기 성능 시험루프를 수정하여 실시한 실험 결과를 종합하면 다음과 같다.

- 1) 집열기 열효율의 변화는 유량이 0.01에서 0.02 kg/s-m<sup>2</sup>으로 변할때 유량이 0.02에서 0.03kg/s-m<sup>2</sup>로 변할때 보다 변화폭이 205% 이상이 되어 변화폭이 가장크다. 따라서 유량을 제외한 다른 조건이 같다고하면, 유량을 0.02kg/s-m<sup>2</sup>로 할때에 열효율의 증가가 상대적으로 크다고할 수 있다.
- 2) 입사각이 30도 이상에서는 입사각 수정이 필요하다.
- 3) 집열기의 집열 효율은 집열기의 효율실험을 수행할 당시의 외부 조건 즉 일사량, 대기온도, 바람속도 등도 표준화 할 필요가 있다.
- 4) 사용자의 안전을 고려하여 사용가능 순환 유체와 압력도 제시해야 한다.

### 참고문헌

- (1) "Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors", ASHRAE STANDARD, 93-77, 1977.
- (2) E. R. Streed et al., "Incident angle modifiers for flat-plate solar collectors," Journal Solar energy engineering, Vol. 104, pp 349-357, Nov., 1982.
- (3) E. R. Streed et al., "Uncertainty in determining thermal performance of liquid-heating flat-plate solar collectors," Trans ASME, Vol. 103, No. 2, pp126-135, 1981.
- (4) Moon-Hyun Chun et al., "A thermal performance test loop design for liquid-heating solar collectors," Trans-KSME, Vol. 7, No. 1, pp110-121, 1983.
- (5) 한세범, "평판형 액체식 태양열 집열기의 Test-loop 설계 및 표준화에 관한 연구" 단국대 석사학위 논문, 1982.
- (6) H. C. Hottel et al., "Performance of flat-plate solar heat collectors," Trans-ASME, pp91-104, Feb, 1942.
- (7) R. W. Bliss, "The derivations of several plate efficiency factors useful in the design of flatplate solar heat collectors"
- (8) A. Whillier, "Predictions of performance of solar collectors," ASHRAE GRP-170, 1977.

### 기호 설명

- |                     |                     |               |            |
|---------------------|---------------------|---------------|------------|
| $F_R$               | : 집열기 열제거 계수.       | $I$           | : 일사량      |
| $Q_u$               | : 유효 에너지 흡수율        | $T_a$         | : 대기 온도    |
| $T_{f, e, initial}$ | : 초기의 집열기 출구의 온도    |               |            |
| $T_{f, e, t}$       | : 특정 시간에서의 집열기 출구온도 |               |            |
| $T_{f, i}$          | : 집열기 입구 유체온도       |               |            |
| $U_l$               | : 집열기 열손실 계수        | $\eta$        | : 집열효율     |
| $(\tau\alpha)_e$    | : 유효 투과율과 흡수율의 곱    |               |            |
| $\alpha$            | : 집열판의 흡수율          | $\varepsilon$ | : 집열판의 방사율 |
| $\theta$            | : 태양광선의 집열기에 대한 입사각 |               |            |