

<論 文>

평판형 액체식 집열기의 각종 변수가 집열기의 열성능에 미치는 영향에 관한 연구

전 문 헌* · 윤 석 범** · 추 교 명***

(1983년 11월 4일 접수)

A Study of Parametric Effects on the Thermal Performance of Flat-Plate Liquid-Heating Solar Collectors

M. H. Chun, S. B. Yoon, G. M. Choo

Abstract

In the present work, a computer simulation is performed employing Hottel-Whillier-Bliss model for thermal performance of solar collectors. The major collector parameters examined in the computer simulation are: number of transparent glass covers (N), thermal emissivity of the absorbing plate surface (ϵ_p), absorptivity of absorber plate (α_p), flow rate per unit area of collector (G), L_b/k_b of insulation material, tilt angle of collector (S), and solar insolation (I). By varying numerical values of the major collector parameters around their typical values, the corresponding variations in thermal efficiency curves are examined.

In addition, an experimental investigation has been carried out with a slightly modified KAIST collector test loop under a real sun condition in order to compare with the simulation results, examine the applicability of the mathematical model of the collector thermal performance, and study the effect of variation of flow rate (G) on thermal efficiency and the range of optimum flow rate.

기 호 설 명

- A : 집열판의 넓이
- A_p : 집열기의 겉넓이
- C : 식 (4b)로 주어진 경험 계수
- C_b : 집열판과 소관 사이의 접촉 열전도도
- C_p : 전열유체의 비열
- D : 먼지의 영향을 나타내는 계수
- D_i : 소관의 내경
- e : 식 (4c)로 주어진 경험 계수

- F' : 집열기 기하학적 효율 계수
- F_R : 식 (8)로 정의된 집열기 열손실 계수
- f : 식 (4a)로 정의된 경험 계수
- G : 집열기 단위 면적당의 유량
- h_b : 집열기 밑바닥으로부터 매기로 흐르는 대류열 전달 계수
- h_w : 바람에 의해 집열기 덮개 유리로부터 흐르는 대류 열전달 계수
- I : 일사량
- k : 집열판의 열전도도
- k_b : 단열재의 열전도도
- L : 집열판의 길이

* 정회원, 한국과학기술원 핵공학과

** 정회원, 서해공업전문대학

*** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

L_b	: 단열재의 두께
N	: 덮개유리 숫자
q_a	: 집열판의 에너지 흡수율
q_l	: 집열판의 에너지 손실율
q_u	: 순환되는 전열유체의 유효에너지 흡수율
S	: 수평면으로부터 측정된 집열기 경사각
T_a	: 대기온도
$T_{f,est}$: 특정시간 간격중 초기의 집열기 출구의 유체온도
$T_{f,est}$: 특정시간에서 집열기 출구의 유체온도
$T_{f,i}$: 집열기 입구의 유체온도
T_p	: 집열판의 평균 온도
U_b	: 집열기 바닥의 열손실 계수
U_e	: 집열기 가장자리의 열손실 계수
U_i	: 집열기 전체의 열손실 계수
U_t	: 집열기 상부의 열손실 계수
V_w	: 바람의 속도
W	: 소관사이의 거리
α_p	: 집열판의 흡수율
δ	: 집열판의 두께
ϵ_e	: 덮개 유리의 열 방사율
ϵ_p	: 집열판의 열방사율
η	: 집열기 효율
θ	: 태양광선의 집열기에 대한 입사각
σ	: 스테판-볼츠만 상수
$(\tau\alpha)_e$: 유효투과율과 흡수율의 곱

1. 서 론

평판형 액체식 집열기는 태양복사 에너지를 열에너지로 바꾸는 열교환기로서 보통 물의 비등점 이하의 온도를 필요로 하는 저온시스템에 많이 사용된다.

평판형 액체식 집열기는 그 구조가 간단하고 제작이 비교적 쉬우며 추적식처럼 태양을 향해 움직일 필요가 없으므로 설치 및 운전이 간편하다. 그리고 direct solar radiation 뿐만 아니라 diffuse solar radiation도 이용할 수 있는 장점이 있다. 평판형 액체식 집열기는 집열기 상부로의 열손실을 줄이기 위한 덮개유리의 갯수에 따라, 집열판으로부터 방출되는 long wave radiation을 막아주는 선택적 투과막의 처리 유무에 따라, 그리고 집열판과 덮개 유리 사이의 자연 대류를 줄이기 위해 하니콤(honeycomb)을 사용했는가에 따라 크게 분류할 수 있다.

집열기의 열성능을 평가하는 방법은 장기 효율과 단

기 효율이 있는데, 단기효율 또는 순간효율에 대하여는 Hottel 과 Woertz(1942), Hottel 과 Whillier(1958), 그리고 Bliss(1959)⁽¹⁾에 의한 Hottel-Whillier-Bliss model(H-W-B model)이 그 formulation이 간단하면서도 비교적 정확하게 순간 효율을 결정하여 주므로 가장 많이 사용되고 있다.

집열기의 설계 변수, 운전변수 및 환경변수 등이 집열기 효율에 미치는 영향에 관한 연구는 집열기 효율을 지배하는 변수가 대단히 많고 집열기 제작에 드는 비용문제 때문에 이들 변수를 모두 고려하는 종합적인 연구에는 제약이 있다.

본 연구의 목적은 ASHRAE 표준⁽²⁾을 참고로하여 한국과학기술원(KAIST)에서 수정하여 제작한 집열기 시험장치⁽³⁾의 미흡한 점을 보완하여, 액체식 평판형 집열기의 각종 변수가 집열기의 열성능에 어떠한 영향을 미치는가를 이론 및 실험적으로 규명하는 데에 있다.

본 연구에서는 먼저 집열기의 열성능에 관한 가장 전형적인 Hottel-Whillier-Bliss의 모델을 사용하여 모의 실험을 수행하였다. 모의 실험에 사용한 집열기의 주요 변수는 덮개 유리의 수(N), 집열판의 방사율(ϵ_p), 집열판의 흡수율(α_p), 집열기 단위 면적당의 유량(G), 집열기 단열재의 L_b/k_b , 집열기 경사각(S), 일사량(I) 등이며 이들 집열기 변수의 대표치(typical values)를 중심으로 각 변수의 값을 변화시켜서 여기에 따른 집열기 효율 곡선의 변화를 조사하였다. 모의 실험결과와 비교하고, 모의 실험에 사용한 수학적 모델이 집열기의 열성능을 평가하는 데에 적합한가를 확인하고, 운전중에 인위적으로 그 값을 조절할 수 있는 운전 변수중 특히 유량(G)의 변화에 따른 집열기 효율변화와 최적유량의 범위를 동시에 실험적으로 조사하기 위하여, 액체 가열식 집열기 시험장치의 회로⁽³⁾를 보완하여 실제 태양 아래에서 실험을 수행하였다.

2. 모의실험(Computer Simulation)

2.1. 모의실험모델(Computer Simulation Model)

평판형 액체식 집열기의 열성능을 평가하는 방법은 장기효율과 단기효율이 있는데, 단기효율 또는 순간효율에 대하여는 Hottel-Whillier-Bliss model^(1,4)이 가장 많이 사용되고 있다. 집열기의 변수는 설계변수, 운전변수 및 환경 변수로 크게 나눌 수 있다. 이들 변수가 집열기 효율에 미치는 영향을 연구하려면 집열기 효율

을 지배하는 변수가 너무 많기 때문에 모든 변수를 함께 고려하는 종합적인 분석 연구에는 제약이 따른다. 따라서, 본 연구의 모의 실험 목적은 대표적인 집열기 변수만을 선정하여 이들 변수의 변화와 효율과의 관계를 조사하여 집열기 열성능에 미치는 영향을 파악하고, 집열기의 설계 및 운전에 도움이 되도록하며, 집열기 효율의 향상과 최적설계에 도움이 될 수 있는 자료를 제공하고, 한편 집열기 실험 장치를 사용하여 얻은 실험치와도 비교하는 데에 있다.

정상 상태하에서 집열판 단위 면적에 대한 에너지 평형식은

$$q_a = q_u + q_l \quad (1)$$

으로 표시할 수 있다. 한편 집열판에 흡수된 태양 복사 에너지 q_a 는 Whillier⁽⁵⁾에 의하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_a = 0.98I(1-D)(\tau\alpha)_e, \theta = 0 \left[\frac{(\tau\alpha)_e, \theta}{(\tau\alpha)_e, \theta = 0} \right] (1-S)_e \quad (2)$$

윗 식에서 $(\tau\alpha)_e$ 는 덮개 유리의 굴절율, 흡수 계수 및 두께, 그리고 집열판의 흡수율 및 방사율 등을 고려한 유효투과율과 흡수율의 곱이고, D 는 덮개 유리에 끼는 먼지를 고려하여 삽입한 것이고, S 는 그늘 효과를 고려하기 위해 삽입한 것이다.

한편 집열기 외부로 잃는 손실에너지 q_l 은 총 열손실 계수에 U_i 에 의해 결정되며, U_i 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$U_i = U_t + U_b + U_e \quad (3)$$

여기서, U_t , U_b 및 U_e 는 각각 집열기 상부의 열손실 계수, 집열기 뒷면의 열손실계수 및 집열기 옆면의 열손실 계수이다. 집열기 상부로의 열손실은 대류와 복사에 의해 일어나는데, Klein 이 제시한 U_t 식은 다음과 같다^(6,7).

$$U_t = \left[\frac{N}{\left(\frac{C}{T_p} \right) \left(\frac{T_p - T_a}{N + f} \right)^c + \frac{1}{h_w}} \right]^{-1} + \{ \sigma (T_p^2 + T_a^2) \quad (4a)$$

$$(T_p + T_a) \} / \{ (\epsilon_p + 0.00591 N h_w) - 1 + [(2N + f - 1 + 0.133\epsilon_p) / \epsilon_a] - N \}$$

윗 식에서 $f = (1 + 0.089h_w - 0.1166h_w \epsilon_p)(1 + 0.0786N)$ (4a)

$$c = 520(1 - 0.000051S^2) \quad (0^\circ \leq S \leq 70^\circ) \quad (4b)$$

($70^\circ \leq S \leq 90^\circ$ 에서는 $S = 70^\circ$ 를 사용할 것)

$$e = 0.43 \left(1 - \frac{100}{T_p} \right) \quad (4c)$$

$$h_w = 5.7 + 3.8 V_w \quad (0 \leq V_w \leq 5 \text{ m/s}) \quad (4d)$$

여기서 T_p 와 T_a 는 절대 온도이다. 그리고, U_b 와 U_e 는 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽⁷⁾.

$$U_b = \left[\frac{L_b}{k_b} + \frac{1}{h_b} \right]^{-1} \quad (5)$$

$$U_e = \frac{A_p}{A} h_e \quad (6)$$

본 논문에서 사용한 h_e 와 h_b 의 값은 각각 $h_e = 0.5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ 와 $h_b = 20 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ 이며, h_w 의 값은 풍속에 따라 식 (4d)를 이용하여 계산하였다.

집열기로부터 얻는 유용한 에너지 q_u 는 다음 식으로 표현할 수 있다⁽⁸⁾.

$$q_u = q_a - U_i(T_p - T_a) = F_R [q_a - U_i(T_{f,i} - T_a)] \quad (7)$$

여기서 F_R 는 집열기의 열제거 계수(heat removal factor)이며 F_R 는 열매체가 실제로 얻는 유효 에너지와 흡수판 온도가 집열기 입구 온도와 같다고 가정할 때의 에너지비율로서 다음과 같이 표시할 수 있다⁽⁸⁾.

$$F_R = \frac{GC_p}{U} \left[1 - e^{-\frac{U F' P}{G C_p}} \right] \quad (8)$$

윗 식에서 F' 는 집열기 효율계수(collector efficiency factor)이고, 집열기의 흡수판과 대기온도 사이의 열전달 저항과 전열매체인 유체와 대기사이의 열전달 저항과의 비로 정의된다⁽⁸⁾.

집열기 효율 η 는

$$\eta = \frac{q_u}{I}$$

이며, 먼지와 그들의 영향을 무시하는 경우에는 (9)

$$q_a = (\tau\alpha)_e I \quad (10)$$

이므로, 이 경우의 집열기 효율은 다음과 같다.

$$\eta = F_R (\tau\alpha)_e - \frac{F_R U_i (T_{f,i} - T_a)}{I} \quad (11)$$

이 식을 Hottel-Whillier-Bliss (H-W-B) 식이라고 하며, 모의 실험에 사용한 집열기 효율의 모델은 식 (11)을 사용하였다.

2.2. 집열기 변수(Collector Parameters)

집열기 변수는 크게 분류하여 설계변수, 운전변수, 환경변수로 나눌 수 있다. 설계변수는 덮개 유리의 갯수, 집열판의 흡수율, 방사율, 집열판의 두께 및 열전도율, 소관과 소관 사이의 간격, 소관의 내경 및 외경, 단열재의 열전도율과 두께, 집열판과 소관을 접촉시키는 bond의 conductance, 집열기의 폭 및 길이 등과 같이 집열기 설계시에 그 값이 결정되는 것들이다. 집열기 운전변수는 운전중에 인위적으로 그 값이 조정될 수 있는 것들이며 유량, 먼지의 정도, 집열기의 경사각 등이 여기에 속한다. 환경 변수는 기상조건을 나타내며, 일사량의 크기 및 집열기에 대한 일사각, 바람

의 속도, 대기온도 등이다.

이와 같이 집열기의 변수는 대단히 많기 때문에 이들의 모든 조합적인 경우에 대하여 일일이 조사하기는 어렵다. 덮개 유리는 기후조건과 얻고자 하는 전열매체의 온도에 따라 보통 한장에서 세장까지 사용하고, 선택적 투과막을 입힌 경우 집열판의 방사율은 0.1, 입히지 않고 검은 색칠을 한 경우에는 0.95 정도이다. 본 연구에서는 덮개 유리의 수(N), 집열판의 방사율(ϵ_p), 집열판의 흡수율(α_p), 집열기 단위 면적당의 유량(G), L_b/K_b , 집열기 경사각(S), 일사량(I) 등의 변수에 대하여 국내에 상용화 되어 있는 집열기 설계치와 핸드북, 그리고 외국 논문에서 실험 및 효율측정에 사용된 집열기의 설계치 등을 참고하여, 집열기 변수의 대표치(typical values)를 설정하고, 이 대표치를 중심으로 각 변수의 값들을 변화시켜서 여기에 따른 집열기의 효율곡선의 변화를 조사하였다. 이와 같은 모의 실험에 사용한 집열기 효율의 모델은 Hottel-Whillier-Bliss 식이다(식 (11)).

Table 1에 대표적인 변수 값과 변화시킨 변수의 값들이 제시되었다.

2.3. 모의 실험 방법

모의 실험 방법중 특히 집열기 효율(η)을 산출하는 절차를 간단히 요약하면 다음과 같다.

첫째, 일정한 일사량과 주어진 집열기의 조건에 따라 $(\tau\alpha)_a$, 먼지(D), 그늘 효과와 입사각의 영향(S)을 계산하여 식 (2)를 이용하여 q_a 를 구한다.

둘째, q_a 를 구하기 위하여 집열기 입구의 유체온도 $T_{r,i}$ 보다 약간 높게 T_p 를 가정하여 집열기의 열손실을 q_l 을 계산하고, 집열기의 Fin 효율, 접착열전도도(C_b), 열매체의 유동형태에 따른 열전달을 등에 의해서 구한 집열기 기하학적 효율계수(F') 등을 식 (8)에 대입하여 집열기 열손실계수(F_R)을 구한다.

셋째, 다시 식 (7)을 이용하여 T_p 를 계산한다. 이때 계산한 T_p 로써 위의 과정을 반복하여 오차가 적어질때까지 계산하면, 일정한 입구 온도, 대기온도, 일사량 등에서의 q_a , q_u , q_l 을 얻을 수 있다.

넷째, 상기한 과정에서 얻은 모든 값을 식 (11)에 대입하면 효율을 구할 수 있다.

3. 실험장치 및 실험 내용

실험의 목적은 앞에서 실시한 모의 실험(computer simulation) 결과와 비교하고, 모의 실험에 사용한 수

Table 1 Collector parameters for simulation

Parameter	Typical values	Varied values
N	1, 2, 3	1, 3,
ϵ_p	0.10, 0.50, 0.95	0.1, 0.95
α	0.95	0.85, 0.90, 0.98
$k\delta(w/C^\circ)$	0.2	0.2
$L_b/k_b(C^\circ/w)$	1.337	0.668, 1.337, 2.0, 2.674
$C_b(w/mC^\circ)$	1,000	1,000
$W(m)$	0.125	0.125
$L(m)$	2.0	2.0
$D_o(\text{inch})$	4/8	4/8
$G(\text{kg/m}^2\text{S})$	0.02	0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.1
$S(\text{degree})$	45	30, 45, 60
$D(\text{dust})$	0	0
$I(\text{w/m}^2)$	720	300, 500, 720, 900
$T_a(C^\circ)$	10	10
$V_w(\text{m/s})$	0	0
$\theta(\text{degree})$	0	0, 15, 30, 45, 60

학적 모델이 집열기의 열성능을 평가하는데 적합함을 확인하고, 유량과 일사량 및 집열기에 대한 태양광선의 입사각 등이 집열기의 열성능에 미치는 영향을 실험을 통해 조사·평가하는 데에 있다.

3.1. 실험 장치

집열기의 열효율 측정에 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같으며, 이 실험 장치는 한국과학기술원에서 완성한 test loop⁽³⁾를 약간 수정한 것이다. 시험대 및 측정기구를 Photo 1과 Photo 2에 보여주고 있다. Chun 등⁽³⁾이 제안한 test loop과의 차이점은 다음과 같다.

첫째, 펌프 출구의 유량조절 밸브앞에 우회로(bypass line)를 설치하여 저장탱크의 입구측과 연결하였

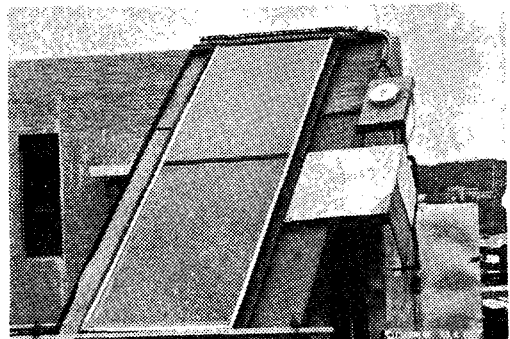


Photo 1 Test stand for liquid solar collector

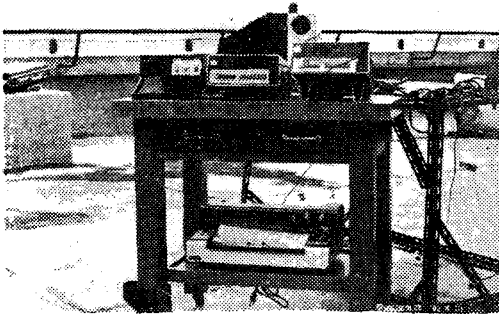


Photo 2 Measuring instrument for various quantities

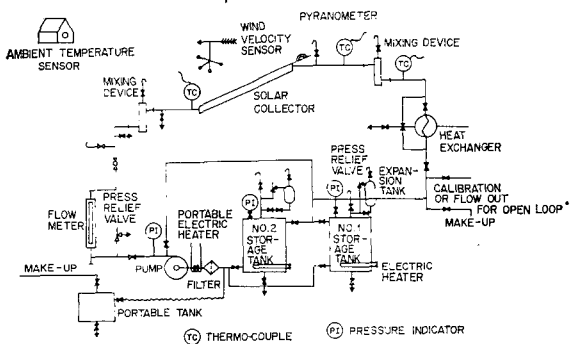


Fig. 1 Schematic diagram of KAIST test loop for liquid-heating solar collectors

다. 이것은 유량 조절을 용이하게 하고 저장 탱크의 전열매체를 가열할 때 일정 온도를 유지하기 위한 순환 회로로 사용할 수 있다.

둘째, 집열기로부터 순환된 전열매체가 저장탱크로 들어가는 회로를 각각의 저장탱크 입구측에 연결하고, 또 각 저장 탱크로부터 직접 펌프의 입구측에 회로를 연결하여 저장탱크 두 개를 개별적으로 사용할 수 있도록 보완하였다.

셋째, 집열기로부터 들어가는 전열매체의 입구 온도를 일정하게 유지하기 위하여 이동식 전열기를 여과기(filter)와 펌프 사이에 설치하였다.

실험을 통해서 측정해야 할 것은 온도, 일사량, 유량, 입사각 등이며 집열기 입구와 출구의 온도 측정은 T형의 열전대를 사용하였고, 저장탱크 안의 온도와 열교환기 입구 및 출구의 온도 측정에는 수온온도계를 사용하였다. Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 집열기의 입구와 출구측에는 유체의 정확한 온도 측정을 위하여 혼합장치(mixing device)를 설치하여 유체를 충분히 혼합시킨 후에 온도를 측정할 수 있게 하였다. 실험 회로의 모든 관(pipe)은 2.5cm 두께의 유리섬유로 단열

하였다. 일사량은 eppley pyranometer와 digital multimeter로 측정하였다. 일사량과 집열기 출·입구의 온도차를 계속적으로 기록하기 위해서 strip chart recorder를 사용하였고, 유량은 Brooks의 tube rotameter(측정범위: 0.25-2.55gal/min)로 측정하였다. 이 실험에 사용된 집열기의 명세는 Table 2에 제시한 내용과 같다.

Table 2 Specifications of the solar collector used in the test

Collector type	Flat-plate liquid type(single-glass cover)
Cross collector area(m ²)	2.43 (900×2700×95)
Aperture area	2.25
Absorber plate	Black Ni-Cr selective surface ($\alpha \geq 0.93, \epsilon_s \leq 0.1$)
Tube	Aluminium roll bonded copper tube
Glazing	3mm thick glass
Back insulation	50mm thick glass wool

3.2. 실험 절차, 방법 및 실험변수

ASHRAE 표준 93-77⁽²⁾에 의하면, 태양열 집열기의 열성능을 평가하기 위해서는 먼저 일사량(I), 주위 매체의 온도(T_a) 및 집열기 입구의 전열유체온도(T_{f,i})들의 여러가지 값에 대한 순간 효율을 측정하여 집열기의 열성능을 결정하도록 요구하고 있다. 따라서, 모든 정상 상태(steady-state) 또는 준정상상태(quasi-steady-state) 하에서 집열기 위에 떨어지는 일사량의 세기와 전열유체가 집열기 속을 흐르면서 얻게 되는 에너지의 증가를 등을 실험적으로 측정해야 한다. 이 밖에도 집열기의 시간 상수와 집열기에 떨어지는 태양광선의 입사각이 변할 때 정상상태의 집열기 열효율이 어떻게 변화하는가를 결정하기 위한 실험을 하도록 되어 있다.

본 실험에서는 집열기효율 및 입사각 수정 계수 실험에 앞서 집열기의 시간 상수를 결정하기 위한 시간상수(time constant) 측정실험을 하였다. 시간상수 실험은 집열기의 동적 특성을 알아보는 실험으로 차음의 상태에서 외부조건(주로 일사량)이 변화할 때, 새로운 평형 상태에 도달하는 데에 요하는 시간을 알아보는 실험이다. 시간상수는 두 가지 방법으로 측정할 수 있으나, 본 실험에서는 집열기 입구에서의 전열유체 온

도를 대기온도와 같게 유지시키고 운전하다가 흰 페인트를 칠한 합판으로 갑자기 집열판에 떨어지는 태양광선을 차단하여 일사량이 영이 되게 한 후, 집열기 입·출구의 온도 변화를 계속 기록하여 출구온도와 입구온도의 차가 입사광선을 차단하기 전의 입·출구 온도차의 36.8% 즉

$$\frac{T_{f,e,t} - T_{f,i}}{T_{f,e, \text{initial}} - T_{f,i}} = 0.368 \quad (12)$$

가 될 때까지 시간을 측정하여 집열기의 시간상수를 결정하였다.

ASHRAE 표준⁽²⁾에 의하면 집열기 열효율곡선(efficiency curve)를 그리기 위해서는 여러 가지 다른 전열유체와 주위 대기와의 온도차에 대하여 최소한 16개의 정상 상태의 순간 효율값(steady-state efficiency values)을 취득하도록 권고하고 있다. 집열기의 효율은 집열기에 입사되는 태양광선이 수직일 때의 효율을 의미하므로, 본 실험에서는 집열판을 입사각이 영이 되게 설치한 후 일사량이 거의 일정하게 유지되면 저장 탱크의 전열기 및 이동식 전열기에 의해 집열기로 들어가는 전열유체의 온도를 일정하게 원하는 온도로 유지시켜 전열유체를 순환시켰다. 이때 strip chart recorder를 이용하여 집열기 출·입구 온도 및 일사량을 기록하여 일정시간(5분이상)의 값을 적분하여 집열기의 순간 효율을 구하였다. 집열기의 순간 효율을 측정하기 위해 사용한 매회 측정 시간은 시간상수보다 큰 5분을 택하였다.

입사각이 변화하면 유리의 투과율과 흡수율이 변하게 되어 집열기 성능 곡선에 오차를 발생시킬 수 있으며, 이론적으로는 30도 미만에서는 그 영향이 없는 것으로 밝혀지고 있다. ASHRAE 표준⁽²⁾에 의하면, 집열기에 대한 태양광선의 평균 입사각이 0, 30, 45 및 60도 등의 네가지의 실험조건하에서 4개의 다른 효율값을 결정하도록 권고하고 있다. 따라서, 본 실험에서는 실험대가 회전 이동식이므로, 먼저 집열기에 대한 태양광선의 입사각이 수직인 경우의 효율을 측정후 즉시 시험대를 원하는 입사각이 되도록 회전시켜 효율을 측정하여 입사각 수정 계수를 구하였다. 매회 측정시마다 집열기 입구의 전열유체 온도를 대기온도와 같게(±1°C 범위안에서) 유지하였다. 실험은 0, 30, 40, 50, 60도의 입각에서 실시하였다.

집열기 변수 중 설계변수는 집열기 설계시에 그 값이 결정되는 것이고, 환경변수는 외부기상 조건에 좌우되는 것이므로, 본 연구에서는 운전중에 인위적으로 그 값을 조절할 수 있는 운전 변수중 특히 유량(G) 변

화에 따른 집열기효율의 변화와 최적유량의 범위를 동시에 실험적으로 조사하기 위하여, 주 실험변수는 유량(G)으로 택하였다. ASHRAE 표준⁽²⁾이 권고하고 있는 집열기의 유량은 0.02kg/s-m²이므로, 본 연구에서 택한 유량 변화의 범위는 0.01, 0.02, 0.03, 및 0.04 kg/s-m²으로 택하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 모의 실험 결과

집열기의 변수는 대단히 많기 때문에 이들의 모든 조합적인 경우에 대하여 일일이 조사하기는 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 덮개 유리가 한정인 경우(N=1)와 세장인 경우(N=3)를, 집열판의 방사율(ε_p)이 0.1과 0.95의 두 가지 경우를 모두 고려하고, 나머지 변수에 대해서는 국내에 상용화되어 있는 집열기 설계치와 핸드북, 그리고 외국 논문에서 실험 및 효율 측정에 사용된 집열기의 설계치를 참고하여, Table 1에 제시한 바와 같은 집열기 변수의 대표치를 중심으로 중요한 변수의 값들을 변화시켜 이에 따른 집열기효율 곡선의 변화를 조사하여 Figs. 2~6에 제시하였다.

Fig. 2는 집열판의 흡수율 α_p가 변할 경우의 효율 곡선들이다. 집열판에 흡수된 에너지 q_a에 관계하는 변수인 집열판의 흡수율은 Fig. 2에서 보는 것과 같이 그 변수값이 변할 때 효율값이 고르게(각 효율 곡선이 서로 평행하게) 변함을 알 수 있다. 이것은 식 (2)에서 q_a(또는 식 (11)에서 η)가 α_p에 대해 선형적인 관계에 있기 때문이다.

Fig. 3은 집열기 단위 면적당 유량이 변할 때 효율 곡선이 변하는 것을 보여주고 있다. 식 (11)에서 보는 바와 같이 G의 변화는 F_R와 T_{f,i}의 값에 직접 영향을 주게 되므로 결국 효율(η)에 영향을 주게 된다. 유

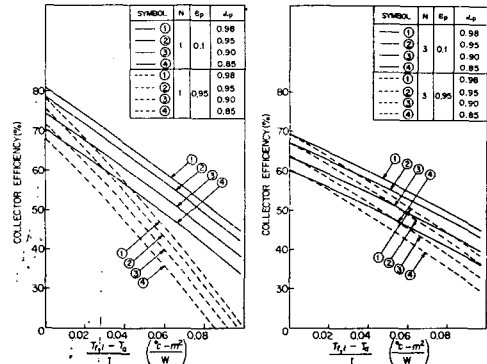


Fig. 2 Efficiency curves obtained via simulation for various values of α_p

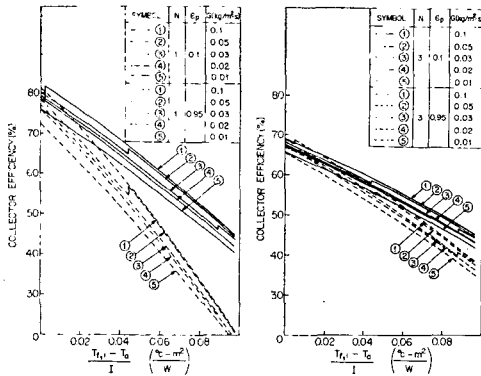


Fig. 3 Efficiency curves obtained via simulation for various values of G

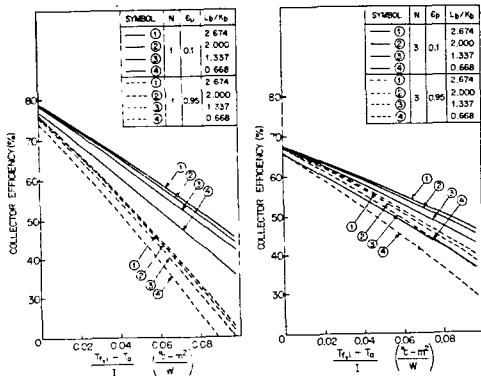


Fig. 4 Efficiency curves obtained via simulation for various values of L_b/k_b

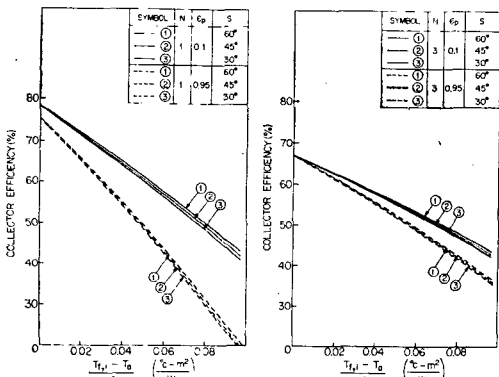


Fig. 5 Efficiency curves obtained via simulation for various values of S

량이 증가하면 소관내의 전열유체의 대류 열전달 계수가 커지고, 난류 유동인 경우에는 열전달 계수가 더욱 커진다. 전열유체가 소관을 지나는 시간도 짧아지므로 집열기 출구 온도가 낮아지고 집열판 평균 온도도 낮아지므로 매기로 잃게되는 열손실도 적어진다. 모의실험에서 사용한 임계 레이놀드 수(critical Reynolds

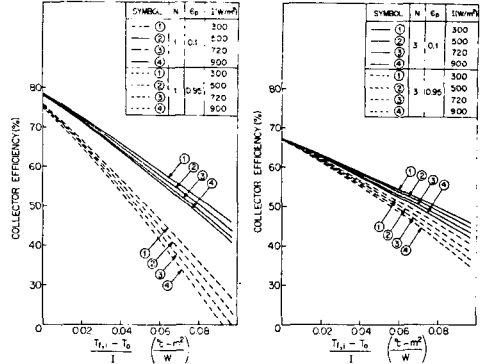


Fig. 6 Efficiency curves obtained via simulation for various values of I

number)는 2300으로 하였다. 천이상태에 대해서는 따로 열전달 관계식을 쓰지 않았다. Fig. 3의 효율곡선 중 불연속점은 층류에서 난류로 변하는 곳이다. Fig. 3에서 유량이 증가하면 효율이 증가함을 볼 수 있다. 설치된 집열기를 운전하는 데 있어 효율을 높일 수 있는 인위적인 한 방법은 유량을 증가시키는 것이나, 이것은 출구 온도를 변화시켜 온도를 낮게하고, 펌프에 더 많은 동력이 소요되며, 또 압력 증가도 수반하므로 몇 개의 변수를 함께 고려하여야 할 것이다. 따라서, 장기적 효율 증가의 관점에서 최적 유량을 결정하여야 할 것이다. Fig. 3에서 한가지 더 관찰할 수 있는 점은 집열기 입구의 전열유체 온도가 높을수록 효율곡선들이 서로 가까이 접하고 있는데, 이것은 집열기가 고온에서 작동할 때 G 값의 변화가 저온에서 작동할 때보다 상대적으로 덜 중요함을 의미한다.

Fig. 4는 단열재의 L_b/k_b 가 변할 경우의 효율곡선들이다. L_b/k_b 는 집열판으로부터 손실에너지 q_l , 즉 $U_l(T_b - T_a)$ 에 관계하는 변수이고, 식 (5)와 식 (3)으로부터 알 수 있듯이 L_b/k_b 가 감소하면 U_b 와 U_l 이 증가하여 결국 q_l 이 증가하므로 집열기의 효율은 감소하게 된다. 이러한 사실은 Fig. 4로부터 확인할 수 있다. 즉 집열기곡선 (4)번은 (1)번보다 효율이 적은데 (4)번의 L_b/k_b 의 값도 (1)번보다 작다. 여기서 한가지 특기할 것은 집열기 온도가 높을수록 L_b/k_b 의 변화에 효율곡선들이 서로 멀어지고 있는데, 이것은 집열기가 고온에서 작동할 때 L_b/k_b 의 차이가 중요해지는 것을 의미하며, 이는 집열판온도가 높을 때 이들 변수 값의 변화에 따른 U_l 또는 q_l 의 변화가 크기 때문이다. Fig. 4의 표속에 표시한 L_b/k_b 의 값 0.668은 유리섬유 2.54cm 두께의 단열을, 1.337은 5.08cm, 2.0은 7.62cm, 2.674는 10.06cm 두께의 단열을 각각 나타낸다.

Fig. 5는 집열기 경사각 S 가 변할 경우의 효율곡선

이다. 여기서 알 수 있는 것은 집열기의 경사각이 변해도(30도에서 60도 사이) 순간효율은 거의 변하지 않는다는 점이다. 집열기 경사각은 집열기 순간효율 실험의 경우를 제외하고는 대개 장기효율과 관련되므로, 실제 응용상으로는 최적 경사각을 택하고 있다.

Fig. 6은 입사량 I 가 변하는 경우의 효율곡선이다. 이 그림에서 한가지 알 수 있는 것은 동일한 $(T_{f,i} - T_a)/I$ 에서도 입사량(I)과 대기 온도(T_a)의 크기에 따라 효율의 값이 조금씩 다르게 된다는 것이다. 이것은 식 (11)이 집열기 효율을 세 변수를 한데 묶어 $(T_{f,i} - T_a)/I$ 를 한 개의 독립변수로 표시하였기 때문이다.

4.2. 실험 결과와 모의실험 결과와의 비교

앞에서 이미 기술한 실험방법과 절차에 따라 실시한 실험결과를 요약하면 다음과 같다. Table 3은 시간상수의 실험 결과이다. 이것은 동일한 유량에서 4회씩 집열기 시간상수를 측정하여 평균치를 취한 것이다. Table 3에 나타난 결과를 보면 집열기의 시간 상수는 유량의 증가에 따라 감소함을 알 수 있다. 이것은 유량이 증가하면 열전달이 촉진되기 때문이다.

Fig. 7은 입사각과 효율과의 관계를 밝히기 위한 실험결과이다. Fig. 7에 나타낸 한 개의 점은 4번 측정하여 얻은 평균치이다. 입사각이 수직일 때의 효율을 100%로 할 때 입사각이 30도일 때는 99.8%, 40도에서는 97.5%, 50도에서는 94.5%, 60도에서는 87.8%로 입사각이 30도까지는 입사각의 영향이 적으나 30도를 넘으면 효율이 점차 감소하여 60도부터는 변화폭이 크게 됨을 알 수 있다.

Table 4는 집열기의 유량을 변화시키면서 추정한 효율곡선의 수직절편과 기울기이다. 이 표에서 보는 바와 같이 집열기의 효율은 추정시마다 다소 변화함을 알 수 있다. 이것은 집열기 효율에 미치는 인자가 많기 때문에 몇 개의 변수를 고정시켜 놓고 실험을 하여도 다른 변수들이 변하기 때문이라고 본다. 따라서, 보다 정확한 효율을 측정하고 서로 비교하기 쉽게 하려면 $G, I, T_{f,i}$ 등 몇가지의 변수를 고정시키고 여러 번 반복하여 얻은 값의 평균치를 사용하는 것이 바람직하다.

실험적으로 얻은 집열기 유량변화에 따른 효율 곡선의 변화와 모의 실험으로 얻은 이론적 효율과의 비교

는 Fig. 8에 종합적으로 보여주고 있다. Fig. 8의 직선들은 Table 2와 같은 집열기에 대하여 식 (11)로 구한 이론적 효율이고, 실측효율은 유량에 따라 각각 다

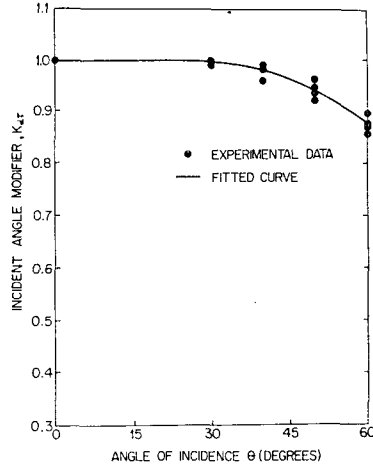


Fig. 7 Incident angle modifier test results

Table 4 Experimentally obtained y-intercept ($F_R(\tau\alpha)_0$) and the slope ($F_R U_i$) of the collector efficiency curve for various flow rates (G)

$G(\text{kg/s-m}^2)$	Test No.	$F_R(\tau\alpha)_0$	Mean $F_R(\tau\alpha)_0$	$F_R U_i$	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	

Table 3 Experimentally obtained collector time constants for various flow rates (when $720 \leq I \leq 860 \text{ W/m}^2$)

Collector flow rate (kg/ms-m^2)	0.01	0.02	0.03	0.04
Collector time constant (second)	120	92	64	43

른 모양의 점으로 나타내었다. Fig.8에서 알 수 있는 것은 유량이 0.04kg/s-m²일 때 실측치와 이론치가 가장 가깝고, 0.04kg/s-m²보다 적은 유량에서는 실측한 집열기 효율이 이론치보다 훨씬 적음을 알 수 있다. 모의 실험으로 얻은 Fig. 3의 효율곡선과 Table 4를 보면 집열기 열효율의 변화는 유량이 0.01에서 0.02kg/s-m²로 변할 때 그 변화폭이 가장 크고, 그 이상이 되면 변화량이 다소 적어짐을 알 수 있다. 즉 유량을 제외한 다른 조건이 모두 같다고 가정하면, 유량을 대략 0.02kg/s-m²으로 할 때에 열효율의 증가가 상대적으로 크다고 할 수 있는데, 이것은 ASHRAE⁽¹⁾이 권하고 있는 유량과 같은 값이다.

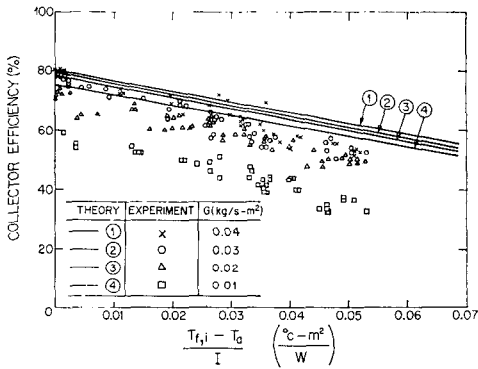


Fig. 8 Comparison of experimental efficiency data with simulation results for various values of G

5. 결 론

집열기의 열성능에 관한 Hottel-Whillier-Bliss 모델을 사용하여 집열기 변수와 효율 곡선과의 관계를 모의실험을 통해 조사 분석한 결과와 KAIST에서 제작한 집열기 열성능 시험장치로 실험한 결과를 종합하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 입사각이 30도 이상에서는 입사각 수정이 필요하다.

(2) 집열기 열효율의 변화는 유량이 0.01에서 0.02 kg/s-m²로 변할 때, 유량이 0.02에서 0.03kg/s-m²로 변할 때의 변화폭보다 약 220%이상으로 되어, 그 변화폭이 가장 크다. 그 이상이 되면 변화량이 다소 떨어진다. 따라서, 유량을 제외한 다른 조건이 모두 같다고하면, 유량을 대략 0.02kg/s-m²으로 할 때에 열효율의 증가가 상대적으로 크다고 할 수 있다, 이것은 ASHRAE 표준⁽²⁾이 권하고 있는 유량과 일치하는 값이다.

(3) 집열판의 에너지 흡수율(q_a)에 관계하는 변수인 집열판의 흡수율(α_p)이 변화할 때 효율값(η)도 고르게 변화한다. 이것은 q_a 가 α_p 에 대해 선형적인 관계에 있기 때문이다.

(4) 집열판의 에너지 손실율(q_l)에 관계하는 변수인 단열재의 L_b/k_b 가 변화할 때 집열기 입구 온도가 높을수록 효율 곡선의 간격이 서로 멀어진다. 이것은 집열기가 고온에서 작동할 때 L_b/k_b 의 값이 중요해지는 것을 의미하며, 유리섬유로 단열할 때에는 그 두께를 2.54cm 이상으로 해야 한다.

(5) 앞으로 모든 집열기의 효율은 집열기 효율 실험을 수행할 당시의 외부 기후 조건 중 특히 일사량(I), 대기온도(T_a), 바람속도(V_w) 등에 대한 자료도 함께 제시하도록 표준화하는 것이 바람직하다.

Reference

- (1) R.W. Bliss, Jr., "The Derivations of Several Plate-Efficiency Factors Useful in the Design of Flat-Plate Solar Heat Collectors", Solar Energy 3, 55, 1959.
- (2) "Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors", ASHRAE Standard 93-77, ASHRAE, 345 East 47th Street, New York, 10017, 1977.
- (3) M.H. Chun, S.B. Han, and K.C. Cha, "A Thermal Performance Test Loop Design for Liquid-Heating Solar Collectors", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers Vol. 7, No. 1, pp.110-121, 1983.
- (4) H.C. Hottel and A. Whillier, "Evaluation of Flat-Plate Collector Performance", Trans. Conf. on the Use of Solar Energy, Vol. 2, Part I, p. 74, University of Arizona Press, 1958.
- (5) A. Whillier, "Prediction of Performance of Solar Collectors", Applications of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings, Section 2. VIII, pp.1-14, ASHRAE GRP 170, 1977.
- (6) V.K. Agarwal and D.C. Larson, "Calculation of the Top Loss Coefficient of a Flat-Plate Collector", Solar Energy, Vol. 27, pp.69-71, 1981.
- (7) S.A. Klein, "Calculation of Flat-Plate Collector Loss Coefficients Solar Energy, Vol. 17, pp.79-80, 1975.
- (8) J.A. Duffie and W.A. Beckman, "Solar Energy Thermal Processes", John Wiley and Sons, Inc., 1974.