

## 흡수관 형상과 일사 각도에 따른 진공관형 태양열 집열기의 성능 변화

김 용, 서 태 범<sup>\*</sup>, 강 용 혁<sup>\*\*</sup>

인하대학교 대학원 기계공학과, <sup>\*</sup>인하대학교 기계공학과, <sup>\*\*</sup>한국에너지기술 연구원

### Thermal Performance Variations of Glass Evacuated Tube Solar Collectors Depending on the Absorber Shape and the Incidence Angle of Solar Ray

Yong Kim, Tae-Beom Seo<sup>\*</sup>, Yong-Heack Kang<sup>\*\*</sup>

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Inha University, Incheon 402-751, Korea*

*\*Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea*

*\*\*Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea*

*(Received January 25, 2005; revision received June 1, 2005)*

**ABSTRACT:** The thermal performances of glass evacuated tube solar collectors are numerically investigated. Four different shapes of solar collectors are considered and the performances of these solar collectors are numerically investigated. Dealing with only collecting tube, the effects of not only the shape of the absorber tube but also the incidence angle of solar irradiation on the thermal performance of the collector are studied because the energy obtained by the absorber can be varied according to the incidence angle of solar radiation. However, the solar irradiation consists of the beam radiation as well as the diffuse radiation. Also, in actual system, the interference of solar irradiation and heat transfer interaction between the tubes should be considered. Therefore, this study considered these effects is carried out experimentally and numerically. The accuracy of the numerical model is verified by experiments. The result shows that the thermal performance of the absorber used a plate fin and U-tube is about 25% better than those of the other models.

**Key words:** Thermal performance(열성능), Absorber tube shape(흡수관 형상), Incidence angle(일사각), Beam and diffuse radiation(직달 및 산란 일사)

#### 기 호 설 명

$A$  : 면적 [ $m^2$ ]

$c_p$  : 정압비열 [ $kJ/kgK$ ]

$D$  : 구리관 외경 [ $mm$ ]

$d$  : 직경 [ $mm$ ]

$F$  : 형상계수

$G$  : 일사량 [ $W/m^2$ ]

$I$  : 태양 일사량 [ $J/m^2$ ]

$I_d$  : 산란 일사량 [ $J/m^2$ ]

$I_o$  : 천공 일사량 [ $J/m^2$ ]

$L$  : 집열관 사이 거리 [ $mm$ ]

† Corresponding author

Tel.: +82-32-860-7327; fax: +82-32-868-1716

E-mail address: seotb@inha.ac.kr

- $L_p$  : 흰 한쪽 또는 duct 가로면 길이 [mm]
- $L_p'$  : 흰에 빛이 비치는 부분의 길이 [mm]
- $L_{p2}$  : duct 세로면 길이 [mm]
- $\dot{m}$  : 질량유량 [kg/s]
- $P_g$  : 측정압 [Pa]
- $q$  : 열유속 [ $W/m^2$ ]
- $r$  : 반경 [mm]
- $T$  : 온도 [K]
- $V$  : 속도 [m/s]

그리스 문자

- $\epsilon$  : 방사율
- $\eta$  : 효율
- $\theta$  : 입사각 [ $^\circ$ ]
- $\sigma$  : Stefan-Boltzmann 상수

하첨자

- $a$  : 공기
- $c$  : 구리
- $g$  : 유리
- $i$  : 안쪽 또는 입구
- $loss$  : 손실
- $o$  : 바깥쪽 또는 출구
- $s$  : 흡열관 표면

1. 서 론

진공관형 태양열 집열기는 선택 흡수 코팅과 흡수기 부분의 진공기술을 통해 80℃ 이상의 중·고온의 작동온도에서 평판형 집열기에 비해 높은 효율을 얻을 수 있다.<sup>(1)</sup>

진공관형 태양열 집열기의 열손실은 평판형 집열기에 비해 상당히 적기 때문에, 이에 대한 연구는 주로 집열기의 각 요소의 개선을 통한 성능향상에 초점이 맞추어져 왔다. 그러나 집열기의 성능이 흡수관 형상에 상당한 영향을 받는다는 사실이 여러 연구<sup>(2,3)</sup>에서, 특히 Zinian<sup>(3)</sup>의 연구에서는 평판 형상과 반원 형상의 흡수기의 성능을 비교한 결과 반원 형상의 집열 능력이 평판 형상에 비해 15.9%가 뛰어남을 밝혔다. 그럼에도 불구하고 이런 흡수기 형상에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 집열기의 내부 형상 변화가 집열기의 성능에 미치는 영향을 수치해석을 이용해 연구하였다. 이에 대한 기초 연구로서 하나의 집열관에 대해 집열관의 형상 변화가 실제로 성능에 어느 정도의 영향을 미치는가를 알아보았다.

우선 Fig. 1~4와 같은 서로 다른 네 가지의 흡

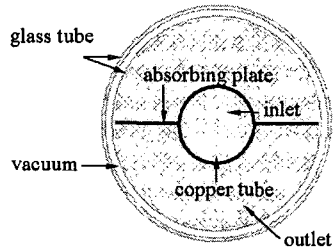


Fig. 1 Model I.

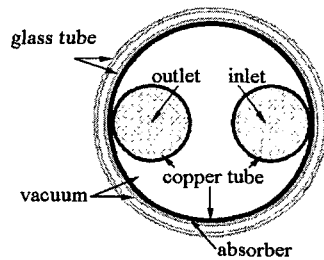


Fig. 2 Model II.

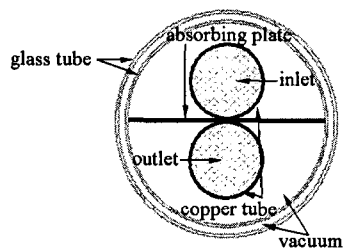


Fig. 3 Model III.

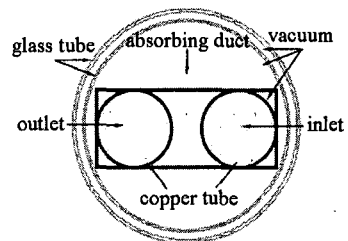


Fig. 4 Model IV.

수관 형상을 제안하여 입사각 변화(직달일사) 및 흡수관 형상 변화가 집열관의 성능에 미치는 영향을 수치해석을 통해 연구하였다. 이를 통해 집열관 내부의 형상 변화가 성능에 상당한 영향을 준다는 것을 증명한 후 이를 바탕으로 하여 좀더 정확한 결과를 얻기 위해 실제 집열기에서 발생할 수 있는 집열관 사이의 열전달 및 집열관 때문에 생기는 그림자의 영향 역시 고려한 연구를 수행하였다.<sup>(4,5)</sup>

이러한 영향을 해석하기 위해 구리 평판을 삽입한 세 개의 집열관을 사용한 집열기를 제작하였다.<sup>(6)</sup> 그리고 실험모델과 동일한 수치해석모델을 만들어 시간 변화에 따른 일사조건을 수치해석모델에 적용해 실험결과와 비교하였다. 실험결과와 계산결과의 비교를 통해 수치해석모델의 정확성을 입증한 후, 이를 바탕으로 하여 위의 형상에 대한 성능 변화를 연구하였다.

2. 집열관 해석

2.1 수치해석

본 논문에서 다룬 진공관형 태양열 집열관은 이중으로 이루어진 진공 유리관과 흰이 부착된 흡열관으로 이루어져 있고, 작동유체는 공기이다. 유리관의 길이는 1,200 mm, 외경은 37 mm, 내경은 33.8 mm이다. 각 물질의 물성치는 Table 1에 명시하였다. 본 연구에서 다룬 흡수관 형상은 평판의 양쪽에 평판 흰을 부착한 형상(model I), 환형 흰에 U자 관을 부착한 형상(model II), 평판에 U자 관을 부착한 형상(model III), 사각덕트 안에 U자 관을 부착한 형상(model IV)으로 나누었다.

Fig. 1은 model I의 형상으로 두 개의 평판 흰이 원형 평판의 양쪽에 부착된 형상으로 흰은 유리관의 내부에 꼭 끼울 수 있을 정도로 넓게 하였

다. Model II의 형상은 Fig. 2와 같다. 외경이 12.7 mm인 두 개의 구리관을 U자 관으로 연결해 외경이 33.8 mm, 두께가 1 mm인 환형 구리관의 내부에 용접하여 유리관에 넣은 형상이다. Fig. 3은 평판 흰을 이용한 다른 형상인 model III이다. 외경이 12.7 mm인 두 개의 구리관이 33.8 mm의 너비를 갖고 두께가 1 mm인 평판의 상하에 용접이 되어 있고, 구리관은 U자 관으로 연결되어 있다. Model IV의 형상은 Fig. 4와 같다. 사각덕트 안에 외경 12.7 mm인 구리관 두 개를 용접하여 U자 관으로 연결하였고, 이때 사각덕트는 유리관 내부에 접하도록 만들었다. 계산시에 model I의 구리관의 외경은 12.7, 19.05, 25.4 mm로 변화를 주었지만, 나머지 모델은 12.7 mm로 고정하였다.

본 연구에서는 결과의 정확성을 크게 잃지 않으면서 계산과정을 간단히 하기 위해 몇 가지 가정을 하였다. 우선 모든 과정은 정상 상태로 가정하였고, 공기의 온도변화 범위 및 속도변화 범위가 그리 크지 않기 때문에 비압축성 유동으로 가정하였다. 그리고 유리관 바깥 표면의 대류 열손실 계산을 위해 외기온도 20°C, 대류 열전달계수는 2 W/m<sup>2</sup>K로 정하였고, 구리관과 유리관에서 발생하는 복사 열손실 역시 고려하였다.

복사 열손실 계산시 집열관과 주변과의 형상계수는 1로 정하였고, 외부온도는 20°C로 가정하였다. 구리관이 흡수부로 사용되는 경우 구리관이 평평하지 않기 때문에 실제 집열관의 구리관 바깥쪽 표면에 열유속이 균일하게 가해지지 않지만, 구리관의 전도도가 매우 높기 때문에 경계조건으로 균일한 열유속이 가해진다고 가정하였다. 그리고 구리관에 가해지는 열유속은 원주 방향으로 평균한 값을 사용하였다. 평판 흰 및 사각덕트에 가해진 열유속은 입사각의 영향과 흡열관 자체의 구리관에 의해 생기는 그림자 효과 역시 고려하였다. 그 외의 경계조건은 Table 2와 같다. 이와 같은 조건을 적용하여 FVM 상용코드를 통

Table 1 The properties of the materials ( T=27°C )

Material	Property			
	Density : ρ (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat : c <sub>p</sub> (J/kg·K)	Conductivity : λ (W/m·K)	Viscosity : μ (kg/m·s)
Glass	2700	840	0.78	-
Copper	8939.6	380.72	387.73	-
Air	1.2047	1004	0.02563	0.00001817

Table 2 Boundary condition

Inlet ( $z=0, r < d_{ci}/2$ )	$T_{ai}=27^{\circ}\text{C}, u=0, v=0, w=V$
Outlet ( $r=\text{with models}$ )	$P_g=0$
Wall ( $r = d_{ci}/2, d_{co}/2, d_{gi}/2$ )	$u=0, v=0, w=0$
Copper tube surface or fin	$q = G_c \text{ or } G_{fn}$
Radiative heat loss	At $r = d_{co}/2, q_{\text{loss}} = \epsilon_c \sigma (T_c^4 - T_s^4)$ At $r = d_{go}/2, q_{\text{loss}} = \epsilon_g \sigma (T_g^4 - T_s^4)$ At $r = d_f/2, q_{\text{loss}} = \epsilon_f \sigma (T_f^4 - T_s^4)$
Incidence angle	$=0^{\circ}, 30^{\circ} \text{ and } 60^{\circ}$

해 모델 변화 및 입사각 변화에 따른 계산을 수행하였다.

구리관 표면과 평판 흰 표면의 흡수율은 0.93, 방사율은 0.06으로 가정하였다. 그리고 유리관의 투과율은 0.91, 흡수율은 0.018로 가정하였다.

## 2.2 실험

본 연구에서는 계산의 신뢰성을 검증하기 위해 실험장치를 제작하였다. 실험장치의 시험부는 수치해석의 기준조건과 동일하게 제작하였다. 150 W 할로겐램프를 20개 사용한  $0.3\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ 의 인공광원을 제작하여 열원으로 이용하였다.

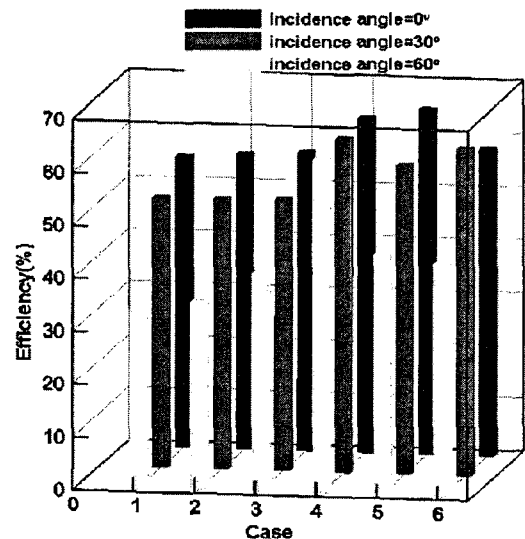
시험부에 입사되는 열유속은  $1,000\text{ W/m}^2$ 으로 조절하였다. 실험은 유량을 75 lpm, 100 lpm, 125 lpm으로 변화시켜 가면서 수행하였다. 구리관 표면온도와 공기의 온도를 측정하기 위해 구리관의 표면에 길이 방향으로 25 mm, 300 mm, 575 mm, 850 mm, 1,125 mm인 부분에 T-type 열전대를 집착시키고, 공기측 역시 T-type 열전대를 집열관 출구부분에, T-type 봉형 열전대를 구리관 출구부분에 설치하여 온도를 측정하였다.

계산결과와 실험결과 사이의 최대오차는 2.89%이며, 그 차이는  $1^{\circ}\text{C}$  안쪽에서 일치하였다.<sup>(6)</sup>

## 2.3 집열관의 효율 비교

본 연구에서는 흡수관의 형상 변화에 따른 집열관의 성능 변화를 수치해석을 통해 알아보았다.

Fig. 5는 입사각 변화에 따른 집열관의 효율을 보여준다. 집열관의 효율은 다음 식과 같이 계산하였다.



- Case 1: tube diameter 12.7 mm of model I
- Case 2: tube diameter 19.05 mm of model I
- Case 3: tube diameter 25.4 mm of model I
- Case 4: model II
- Case 5: model III
- Case 6: model IV

Fig. 5 Comparisons of efficiencies of solar collectors.

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot c_{p,a} \cdot (T_{o,a} - T_{i,a})}{A \cdot G} \quad (1)$$

그림에서 좌우 수평축은 다음과 같이 각 경우의 번호를 나타낸다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 입사각이 작은 경우에는 model III의 효율이 가장 높음을 알 수 있다. 반면 입사각이 큰 경우에는 model II의 효율이

가장 좋아지고, 나머지 모델은 효율이 전체적으로 상당히 감소함을 알 수 있다. 따라서 하나의 집열관에 대해서는 model II의 성능이 가장 뛰어나다고 할 수 있다.<sup>(6)</sup>

### 3. 집열기 해석

#### 3.1 수치해석

실제로 입사는 직달일사와 산란일사로 이루어져 있지만, 위의 계산에서는 직달일사량만을 고려하였다. 또한, 일반적으로 집열기 제작시에는 몇 개의 집열관이 직렬 또는 병렬로 연결되어 있기 때문에, 집열관 사이의 열전달 및 집열관 때문에 생기는 그림자의 영향 역시 고려되어야 한다. 위의 계산에서는 이러한 영향이 고려되지 않았다. 따라서 위의 영향을 고려한 계산이 있어야 할 필요가 있다.

본 절에서는 위에서 언급한 영향들을 고려해 실제 집열기에 대해 좀더 정확한 결과를 얻을 수 있는 모델을 만들었다. 이때 흡열관에 입사되는 입사는 실제 집열기에서 발생하는 그림자 영향 및 집열관 사이의 열전달 현상을 고려하기 위해 직달일사와 산란일사로 구분하여 적용된다.<sup>(5,7,8)</sup> 산란일사량은 아래와 같이 계산하였다.<sup>(11)</sup>

$$k_T = \frac{I}{I_0} : \text{clearness index} \quad (2)$$

$$\frac{I_d}{I} = 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4 \quad (3)$$

(for  $0.22 < k_T \leq 0.80$ )

각 모델의 집열 능력을 계산하기 위한 계산과정 및 그림은 참고문헌의 계산과정<sup>(5,7,8)</sup>을 바탕으로 하였으며, 양이 많기 때문에 부록에 따로 명시하였다.

각 모델에 대한 계산은 입사각의 변화를 0.1° 간격으로 나누어 입사각 변화에 따른 실제 태양광이 비치는 부분과 비치지 않는 부분의 면적을 각각 나누어서 구별하였다. 이때 그림자가 생기는 부분, 즉 태양광이 비치지 않는 부분은 모델에 따라 집열기 내부 형상에 따라 집열관 자체에 의해 생기는 그림자와 옆의 집열관에 의해 생기는 그림자 영향 역시 구별하였다. 그 다음 집열기에서

흡수하는 에너지를 계산하기 위해 태양광과 집열관 표면과의 직접 접촉하는 부분에서 흡수되는 에너지는 평판에 대해서는 전일사량을 그대로 사용하였고, 원관에 대해서는 입사각에 대해 전일사량을 코사인한 값을 누적하여 계산하였다. 그림자가 진 부분에서 흡수하는 에너지는 식(3)과 같이 계산된 산란일사량을 곱하여 계산하였다. 이때의 산란일사량은 서울의 평균 청명도인 0.68<sup>(12)</sup>을 기준으로 하여 계산하여 전일사량의 약 28%라고 가정하였다.

#### 3.2 실험

수치해석모델의 타당성을 검증하기 위해 본 연구에서는 구리 평판을 흡수관으로 사용한 세 개의 집열관을 이용해 Fig.6과 같은 실제 시스템을 제작하였다. 각 흡수관은 단열처리된 박스 안에 있는 하나의 manifold 관에 연결되어 있다.<sup>(9,10)</sup> 유리관의 크기는 위의 집열관 해석에서 다룬 것과 동일하다. 구리관의 길이는 1,140 mm, 외경은 28.58 mm이다. 그리고 각 집열관 중심 사이의 거리는 67 mm로 정하였다. 구리관의 표면에는 선택 흡수 코팅을 하여 구리관 표면의 흡수율은 0.93, 방사율은 0.06이다. 작동유체인 공기는 먼저 구리관 안쪽으로 흐르다가 구리관 끝부분에서 그 방향을 바꿔 구리관과 유리관 사이의 환형 통로를 통해 빠져 나온다. 이때의 공기의 유량은 200 lpm으로 고정하였다.

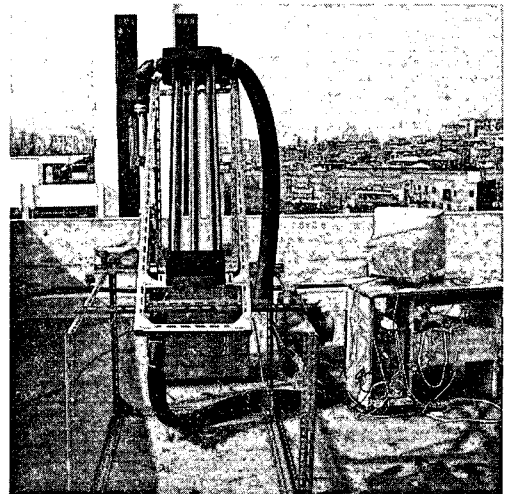


Fig. 6 Experimental apparatus.

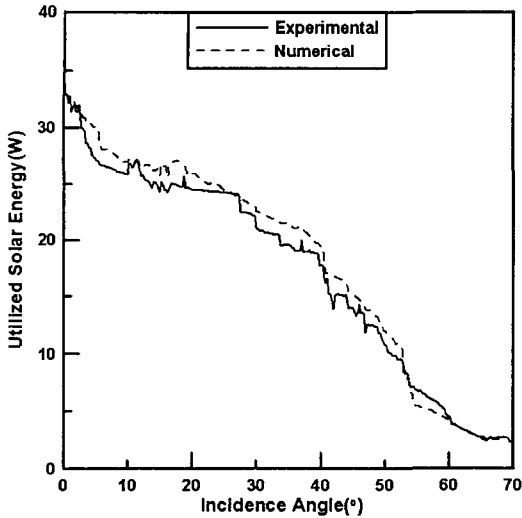


Fig. 7 Comparisons of calculated and measured utilized solar energy with the incidence angle.

집열기는 경사각이 37°, 정남향으로 설치되었다. 그리고 집열기의 입·출구 온도를 측정하기 위해 T-type 열전대를 사용하였고, 유량은 오리피스 유량계를 이용하여 측정하였다. 시간에 따른 일사량은 Eppley사에서 제작한 수평면 일사계를 이용하여 측정하였다.<sup>(11)</sup>

Fig. 7은 실험결과와 계산결과를 비교한 그림으로 입사각 변화에 따른 집열기의 흡수 열량은 상당히 비슷한 경향을 보이며, 실험결과에 비해 계산결과가 평균적으로 약 5.7% 정도 높은 값을 띠고 있다. 따라서 계산모델이 집열기의 성능을 상당히 정확하게 평가할 수 있을 것이라 판단된다.

위와 같은 실험결과와 계산결과를 비교를 바탕으로 하여 위에서 제시한 네 가지 model에 대한 계산을 수행하였다.

### 3.3 집열기 해석결과 및 검토

본 연구에서는 진공관형 태양열 집열기의 흡수관 형상 변화에 따른 성능을 비교·분석하였다.

위에서 살펴본 결과와 같이 하나의 집열관만을 생각할 경우에는 model II의 성능이 가장 뛰어나다고 할 수 있다. 그러나 위에서 언급한 여러 가지 실제로 발생할 수 있는 영향을 고려한다면 좀더 정확한 결과를 얻을 수 있다.

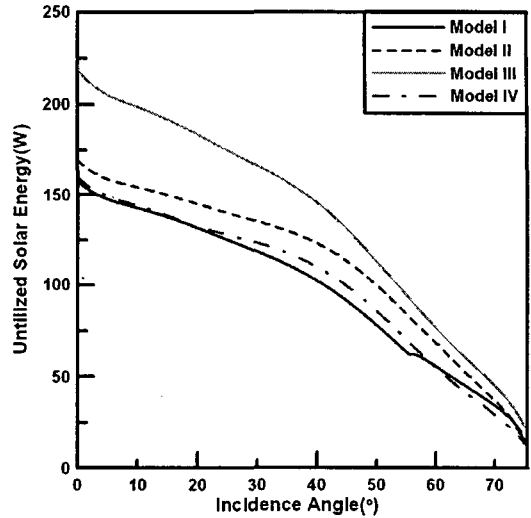


Fig. 8 Comparisons of the performance of the solar collector with each case.

따라서 부록과 같이 계산을 수행한 결과를 다음과 같이 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에 나타낸 바와 같이 입사각 변화에 따른 10개의 집열관을 사용한 각 집열기 모델에서 흡수하는 열량을 알아보았다. 이때 model I에서 사용된 구리관의 직경은 19.05 mm이다. 그리고 계산에 사용한 일사량은 위의 실험에서 측정한 값을 동일하게 적용하였고, 산란일사량은 식(3)을 이용하여 위의 경우와 같이 약 28%로 가정하였다. 이때의 모든 모델에 관련된 수치 및 조건은 위의 실험과 동일하다.

그림에서 볼 수 있듯이 model III의 성능이 모든 입사각에 대해 성능이 가장 뛰어남을 알 수 있다. 그 다음이 model II이고 model I과 model IV는 전체적으로 거의 비슷한 성능을 가지고 있다. 이는 앞서 살펴보았던 집열관 하나에 대한 결과와는 상당한 차이가 있다. 즉, 앞서 언급했던 산란일사와 관 사이의 그림자 효과로 인한 영향이 집열기의 성능에 상당한 영향을 끼침을 보여준다.

Table 3은 각 모델들이 각도에 따라 받은 집열량을 0.1° 간격으로 누적한 결과와 가장 집열능력이 뛰어난 model III에 대한 열량을 비교한 결과이다. 여기서 알 수 있듯이 model I의 경우 model III에 비해 집열량이 28.7%, model II는 18.5%, model IV는 26.9%가 떨어진다.

Table 3 Comparisons of the performance of the solar collector with each case

Model	Utilized solar energy (MJ/m <sup>2</sup> )	Q/Q <sub>model III</sub> (%)
I	1.771	71.3
II	2.025	81.5
III	2.484	100
IV	1.816	73.1

4. 결 론

본 연구에서는 흡수관 형상 변화가 진공관형 태양열 집열기의 성능에 어떠한 영향을 미치는지를 수치해석을 통해 연구하였다.

집열관 하나에 대한 성능은 원형 튜브를 사용한 model II의 효율이 가장 뛰어남을 알 수 있었다. 그러나 실제상황에서 일어나는 산란일사와 집열관 사이의 그림자 효과를 고려할 경우에는 평판 튜브의 위·아래에 구리관을 용접한 model III의 효율이 가장 뛰어나다. 이는 실제 집열기에서 산란일사와 그림자 효과가 상당한 비중을 차지하고 있음을 보여준다. 또한 model II의 형상을 사용한 집열기가 다른 형상의 집열기에 비해 평균 약 25% 정도 성능 향상을 보여준다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원의 지역대학우수과학자 지원연구사업(R05-2004-000-10220-0)의 연구비 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

- Harding, G. L., Zhiqiang, Y. and Mackey, D. W., 1985, Heat extraction efficiency of a concentric glass tubular evacuated collector, *Solar Energy*, Vol. 35, No. 1, pp. 71-79.
- Perez, R., Seals, R., Anderson, J. and Menicucci, D., 1995, Calculating solar radiation received by tubular collectors, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 117, pp. 341-344.
- Zinian, H., Hongchusan, G., Fulin, J. and Wei, L., 1997, A comparison of optical performance between evacuated collector tubes with flat and semicylindric absorbers, *Solar Energy*, Vol. 60, No. 2, pp. 109-117.

- Lin, Q. and Furbo, S., 1998, Solar heating systems with evacuated tubular solar collector, *EuroSun 98*, III.2.27-1-7.
- Shah, L. J. and Furbo, S., 2004, Vertical evacuated tubular-collectors utilizing solar radiation from all directions, *Applied Energy*, Vol. 78, Issue 4, pp. 371-395.
- Kim, Y., Seo, T., Kang, Y. and Yim, C., 2004, Numerical analysis on the thermal performance of the glass evacuated tube solar collector adopting a finned tube, *National Solar Energy Conference*.
- Pyrko, J., 1984, A model of the average solar radiation for the tubular collector, *Solar Energy*, Vol. 32, Issue 4, pp. 563-565.
- Perez, R., Seals, R., Anderson, J. and Menicucci, D., 1995, Calculating solar radiation received by tubular solar energy collectors, *Solar Engineering*, Vol. 1, ASME, pp. 699-704.
- Zhiqiang, Y., Harding, G. L. and Window, B., 1984, Water-in-glass manifold for heat extraction from evacuated solar collector tubes, *Solar Energy*, Vol. 32, No. 2, pp. 223-230.
- Zhiqiang, Y., Harding, G. L., Craigand, S. and Collins, R. E., 1985, Comparative study of fluid-in-metal manifolds for heat extraction from single ended evacuated glass tubular collectors, *Solar Energy*, Vol. 35, No. 1, pp. 81-91.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, *Solar Engineering of Thermal Process*, 2nd ed., Wiley Interscience, New York.
- Jo, D. K., Kang, Y. H. and Auh, C. M., 2003, A study on the analysis of solar radiation characteristics on a high elevated area, *Journal of the Korea Solar Energy Society*, Vol. 23, No. 3, pp.23-28.

Appendix A1 The equation used for the calculation

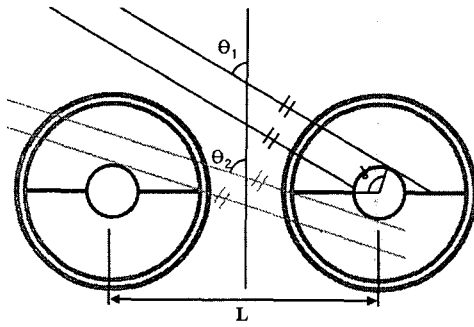
	$0 < \theta_1 \leq \text{acos}\left(\frac{D/2}{D/2 + L_F}\right)$ $F = \frac{\sum_{i=0}^{\gamma} \cos(i)}{\gamma}$	$\text{acos}\left(\frac{D/2}{D/2 + L_F}\right) < \theta_2 \leq \text{acos}\left(\frac{D/2}{L - D/2 - L_F}\right)$ $F = \frac{\sum_{i=0}^{\gamma} \cos(i)}{\gamma} + \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_1}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_2}$ $F_1 = \frac{\sum_{i=0}^{\gamma} \cos(i)}{\gamma} + \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_3}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_3}$
	$Q = q \left[ F \frac{D}{2} \gamma + (L_f + L_f') \cos \theta \right] NP$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[ (2\pi - \gamma) \frac{D}{2} + (3L_f - L_f') \right] NP$	$Q = q \left[ F_1 \frac{D}{2} (\gamma + \gamma_3) + L_f \cos \theta \right.$ $\left. + \left[ F \frac{D}{2} (\gamma + \gamma_2) + L_f \cos \theta \right] (NP - 1) \right]$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[ (2\pi - \gamma - \gamma_3) + 3L_f \right.$ $\left. + \left[ (2\pi - \gamma - \gamma_2) \frac{D}{2} + 3L_f \right] (NP - 1) \right]$
I	$\text{acos}\left(\frac{D/2}{L - D/2 - L_F}\right) < \theta_3 \leq \text{acos}\left(\frac{D/2}{L - D/2}\right)$ $F = \frac{\sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i) + \sum_{i=0}^{\gamma-\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma}$ $F_1 = \frac{\sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i) + \sum_{i=0}^{\gamma-\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma} + \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_3}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_3}$	$\text{acos}\left(\frac{D/2}{L - D/2}\right) < \theta_4 \leq \frac{\pi}{2}$ $(1) \gamma < \frac{\pi}{2} : F = \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma}$ $(2) \gamma \geq \frac{\pi}{2} : F = \frac{\sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i) + \sum_{i=0}^{\gamma-\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma}$ $F_1 = \frac{\sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i) + \sum_{i=0}^{\gamma-\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma} + \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_3}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_3}$
	$Q = q \left[ F_1 \frac{D}{2} (\gamma + \gamma_3) + L_f \cos \theta \right.$ $\left. + \left[ F \frac{D}{2} \gamma + L_f' \cos \theta \right] (NP - 1) \right]$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[ \frac{D}{2} (2\pi - \gamma - \gamma_3) + 3L_f \right.$ $\left. + \left[ (2\pi - \gamma) \frac{D}{2} + (4L_f - L_f') \right] (NP - 1) \right]$	$Q = q \left[ F_1 (\gamma + \gamma_3) \frac{D}{2} + L_f \cos \theta + F \frac{D}{2} \gamma \right]$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[ (2\pi - \gamma - \gamma_3) \frac{D}{2} + 3L_f \right.$ $\left. + \left[ (2\pi - \gamma) \frac{D}{2} + 4L_f \right] (NP - 1) \right]$
	$0 \leq \theta_1 \leq \text{acos}\left(\frac{D}{L}\right)$ $F = \frac{2 \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi}$	$\text{acos}\left(\frac{D}{L}\right) < \theta_2 \leq \frac{\pi}{2}$ $(1) \gamma < \frac{\pi}{2} : F = \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma}$ $(2) \gamma \geq \frac{\pi}{2} : F = \frac{\sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i) + \sum_{i=0}^{\gamma-\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma}$ $F_1 = \frac{2 \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi}$
II	$Q = q \left( F + \frac{H}{H_0} \right) \pi \frac{D}{2} NP$	$Q' = q \left[ F_1 \pi \frac{D}{2} + F (NP - 1) \frac{\gamma D}{2} \right]$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[ \frac{\pi}{2} + (NP - 1) (2\pi - \gamma) \frac{D}{2} \right]$



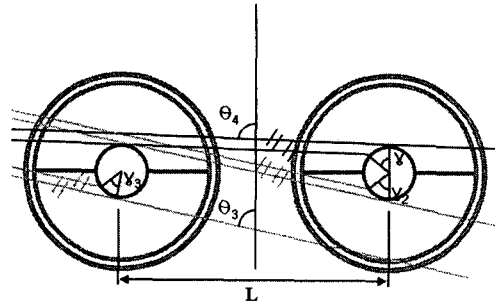
	$0 \leq \theta_1 \leq \frac{\pi}{2} - 2 \operatorname{atan} \left( \frac{D/2}{L_f} \right)$	$\frac{\pi}{2} - 2 \operatorname{atan} \left( \frac{D/2}{L_f} \right) < \theta_2 \leq \frac{\pi}{2} - 2 \operatorname{atan} \left( \frac{D/2}{L - L_f} \right)$
	$F = \frac{2 \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi}$	$F = \frac{2 \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi} + \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_2}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_2}$ $F_1 = \frac{2 \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi} + \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_3}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_3}$
	$Q' = q \left[ F \frac{D}{2} \pi + (L_f' + L_f'') \cos \theta \right] NP$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[ 3\pi \frac{D}{2} + 4L_f - L_f' - L_f'' \right] NP$	$Q' = q \left[ F_1 \frac{D}{2} (\pi + \gamma_3) + L_f \cos \theta \right]$ $+ \left\{ F \frac{D}{2} (\pi + \gamma_2) + L_f \cos \theta \right\} (NP - 1)$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[ (3\pi - \gamma_3) \frac{D}{2} + 3L_f \right]$ $+ \left\{ (3\pi - \gamma_2) \frac{D}{2} + 3L_f \right\} (NP - 1)$
III	$\frac{\pi}{2} - 2 \operatorname{atan} \left( \frac{D/2}{L - L_f} \right) < \theta_3 \leq \operatorname{acos} \left( \frac{D}{L} \right)$	$\operatorname{acos} \left( \frac{D}{L} \right) < \theta_4 \leq \frac{\pi}{2}$
	$F = \frac{2 \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi}$ $F_1 = \frac{2 \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi} + \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_3}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_3}$	$(1) \gamma < \frac{\pi}{2} : F = \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma}$ $(2) \gamma \geq \frac{\pi}{2} : F = \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma}$ $F_1 = \frac{3 \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi} + \frac{\sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}-\gamma_3} \cos(i)}{\gamma_3}$
	$Q' = q \left[ F_1 (\pi + \gamma_3) \frac{D}{2} + L_f' \cos \theta \right]$ $+ \left( F \frac{D}{2} \pi + L_f' \cos \theta \right) (NP - 1)$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[ \left\{ (3\pi - \gamma_3) \frac{D}{2} + 4L_f - L_f' \right\} \right]$ $+ \left( 3\pi \frac{D}{2} + 4L_f - L_f'' \right) (NP - 1)$	$Q' = q \left[ \left\{ F_1 \frac{D}{2} (\pi + \gamma_3) + L_f \cos \theta \right\} \right]$ $+ \left( F \frac{D}{2} \pi \right) (NP - 1)$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[ \left\{ (3\pi - \gamma_3) \frac{D}{2} + 3L_f \right\} \right]$ $+ \left\{ (4\pi - \gamma) \frac{D}{2} + 4L_f \right\} (NP - 1)$
IV	$0 \leq \theta_1 \leq \operatorname{atan} \left( \frac{L - W}{H} \right)$	$\operatorname{atan} \left( \frac{L - W}{H} \right) < \theta_2 \leq \frac{\pi}{2}$
	$F = w \cos \theta + h \sin \theta$	$F = w \cos \theta + (L - w) \sin \theta, \quad F_1 = w \cos \theta + h \sin \theta$
	$Q' = q \left( F + \frac{H}{H_0} \right) NP$	$Q' = q [F_1 + F(NP - 1)]$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[ (NP - 1)(w + 2h) - \frac{L - w}{\tan \theta} + (w + h) \right]$

\* If  $\cos \theta \leq \frac{H}{H_0}$ ,  $\cos \theta \leftarrow \frac{H}{H_0}$ . NP: Number of Pipes.

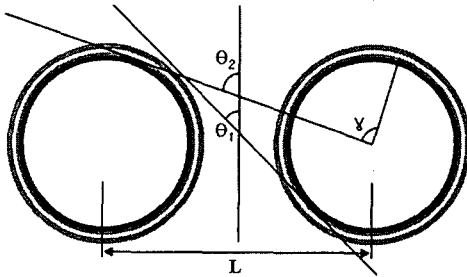
Appendix A2 The diagram used for the calculation



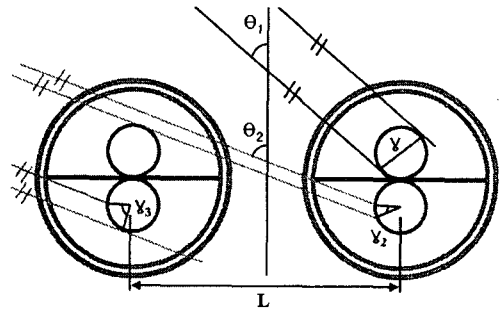
Model I ( $\theta_1 \sim \theta_2$ )



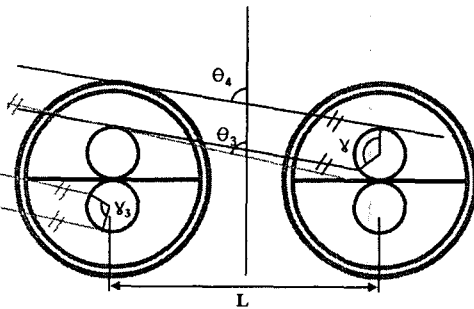
Model I ( $\theta_3 \sim \theta_4$ )



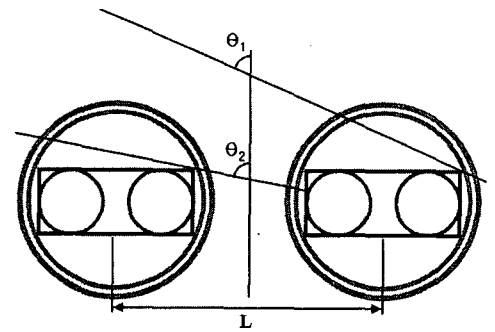
Model II



Model III ( $\theta_1 \sim \theta_2$ )



Model III ( $\theta_3 \sim \theta_4$ )



Model IV

where, is the angle of the part that the beam radiation insulates the circular absorber.