

# 진공관형 태양열 집열기의 흡수관 형상 변화에 따른 성능 비교

김 용\*, 서태범, 윤성은, 김영민

## Performance comparisons of the glass evacuated tube solar collectors of different absorber tubes

Yong Kim, Taebeom Seo, Seongeun Yun, Youngmin Kim

**Abstract** The thermal performance of glass evacuated tube solar collectors are numerically and experimentally investigated. Four different shapes of solar collectors are considered and the performances of these solar collectors are compared. Dealing with a single collector tube, the effects of not only the shapes of the absorber tube but also the incidence angle of solar irradiation (beam irradiation) on thermal performance of the collector are studied. However, the solar irradiation consists of the beam irradiation as well as the diffuse irradiation. Also, the interference of solar irradiation and heat transfer interaction between the tubes exist in an actual solar collector. These effects are considered in this study experimentally and numerically. The accuracy of the numerical model is verified by the experimental results. The result shows that the thermal performance of the absorber used a plate fin and U-tube is the best.

**Key words** 열성능(thermal performance), 흡수관 형상(absorber tube shape), 입사각(incidence angle), 직달·산란 일사(beam and diffuse irradiation)

\* 인하대학교 기계공학과 대학원

■ E-mail : kimyong1012@hotmail.com

■ Tel : (032)874-7327

■ Fax : (032)868-1716

### Nomenclature

$k_T$  : clearness index       $I$  : irradiation [ $J/m^2$ ]  
 $I_o$  : extraterrestrial solar irradiation [ $J/m^2$ ]  
 $I_d$  : diffuse solar irradiation [ $J/m^2$ ]  
 $L$  : 집열관 사이 거리 [mm]  
 $L_p$  : 흰 한쪽 또는 duct 가로면 길이 [mm]  
 $L_p$  : 흰에 빛이 비치는 부분의 길이 [mm]  
 $L_{p2}$  : duct 세로면 길이 [mm]       $D$  : 구리관 외경 [mm]  
 $F$  : 형상계수       $\theta$  : 입사각 [°]

### subscripts

d : diffuse

## 1. 서론

진공관형 태양열 집열기는 선택 흡수 코팅과 흡수기 부분의 진공 기술을 통해 80°C 이상의 중·고온의 작동 온도에서 평판형 집열기에 비해 높은 효율을 얻을 수 있다.

진공관형 태양열 집열기의 열손실은 평판형 집열기에 비해 상당히 적기 때문에, 이에 대한 연구는 주로 집열기의 각 요소의 개선을 통한 성능 향상에 초점이 맞추어져 왔다. 그러나 집

열기의 성능이 흡수관 형상에 상당한 영향을 받는다는 사실이 여러 연구<sup>(1, 2)</sup>에서 특히, He Zinian<sup>(2)</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.

또한 태양 일사의 일사각도가 집열기의 성능에 미치는 연구 역시 여러 연구에서 진행되어져 왔다.<sup>(3, 4)</sup>

따라서 본 연구에서는 집열기의 내부 형상 변화 및 일사각도의 변화가 집열기의 성능에 미치는 영향을 수치해석을 이용해 연구하였다. 우선 Fig. 1~4와 같은 서로 다른 네 가지의 흡수관 형상을 제안하여, 이에 대한 연구를 수행하였다.

또한 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 구리 평판을 삽입한 세 개의 집열관을 사용한 집열기를 제작하였다. 그리고 실험 모델과 동일한 수치해석 모델을 만들어 시간 변화에 따른 일사 조건을 수치해석 모델에 적용해 실험 결과와 비교하였다. 실험 결과와 계산 결과의 비교를 통해 수치해석 모델의 정확성을 입증한 후, 이를 바탕으로 하여 위의 형상에 대한 성능 변화를 연구하였다.

## 2. 집열기 해석

본 연구에서는 진공관형 태양열 집열의 성능에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다. 진공관형 태양열 집열기는 기본적으로 이중 진공 유리관과 환이 부착된 흡수관으로 이루어져 있다. 작동 유체로는 공기가 사용되었다. 본 연구에서 다른 흡수관의 내부 형상은 Fig.1~4와 같다.

이 때 작동 유체는 공기이며, 유리관의 길이는 1,200mm, 외경은 37mm, 내경은 33.8mm이다. 각 물질의 물성치는 Table. 1에 명시하였다.

Fig. 1은 model I의 형상으로 두 개의 평판 환이 원형 평판의 양쪽에 부착된 형상으로 환은 유리관의 내부에 꽂 끼게 되

어 있다. Model II의 형상은 Fig. 2와 같다. 외경이 12.7mm인 두 개의 구리관을 U자 관으로 연결해 외경이 33.8mm, 두께가 1mm인 환형 구리관의 내부에 용접하여 유리관에 넣은 형상이다. Fig. 3은 평판 환을 이용한 다른 형상인 model III이다. 외경이 12.7mm인 두 개의 구리관이 33.8mm의 너비를 갖고 두께가 1mm인 평판의 상하에 용접이 되어 있고, 구리관은 U자 관으로 연결되어 있다. Model IV의 형상은 Fig. 4와 같다. 사각 덕트 안에 외경 12.7mm인 구리관 두 개를 용접하여 U자 관으로 연결하였고, 이때 사각 덕트는 유리관 내부에 접하도록 하였다. 계산 시 model I의 구리관의 외경은 19.05mm로, 나머지 모델은 12.7mm로 고정하였다.<sup>(5)</sup>

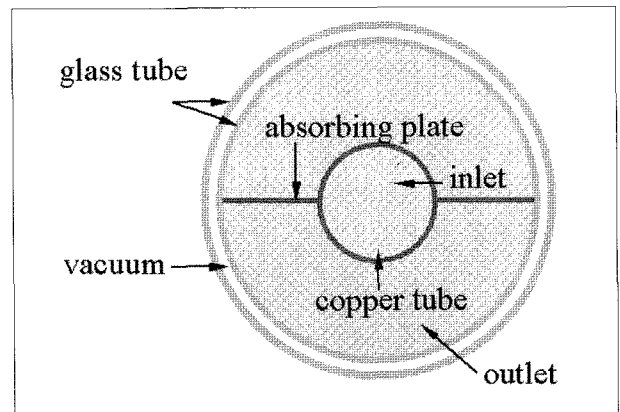


Fig. 1 Model I

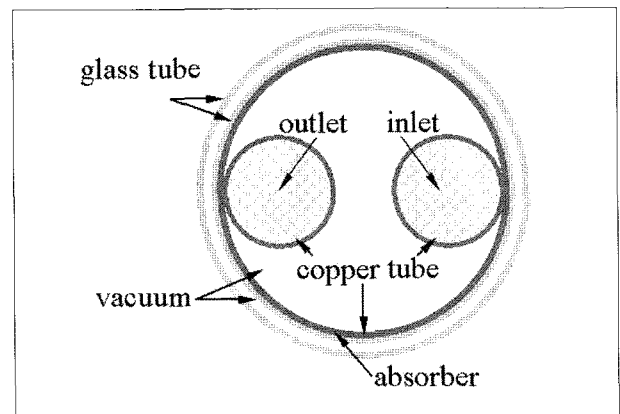


Fig. 2 Model II

Table 1. The properties of the materials (T=27℃)

property	Density : $\rho$	Specific heat : cp	Conductivity : $\lambda$	Viscosity : $\mu$
material	(kg/m <sup>3</sup> )	(J/kg · K)	(W/m · K)	(kg/m · s)
glass	2700	840	0.78	.
copper	8939.6	380.72	387.73	.
air	1.2047	1004	0.02563	0.00001817

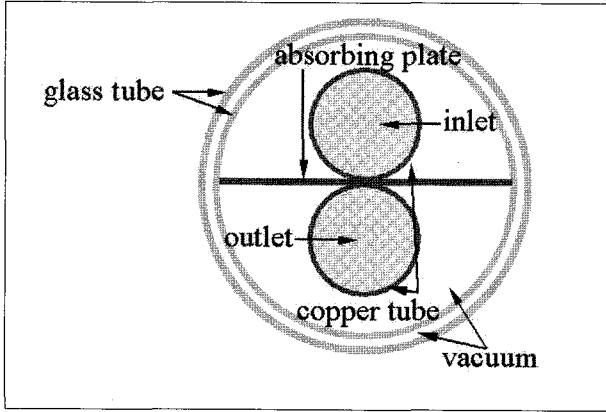


Fig. 3 Model III

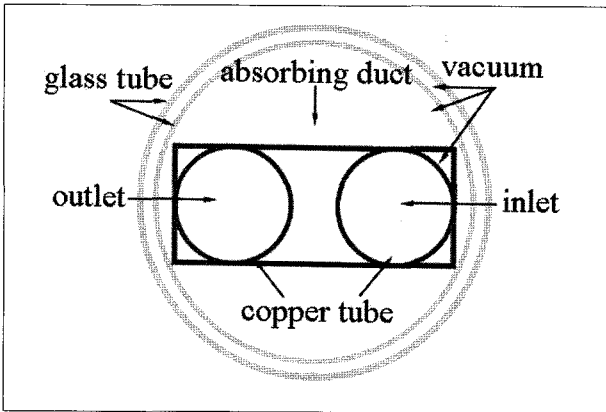


Fig. 4 Model IV

$$k_T = \frac{I}{I_0} : \text{clearness index} \quad (1)$$

(for  $0.22 < k_T \leq 0.80$ )

$$\frac{I_d}{I} = 0.95111 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 \quad (2)$$

$- 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4$

(for  $0.22 < k_T \leq 0.80$ )

각 모델의 집열 능력을 계산하기 위한 계산 과정 및 그림은 참고 문헌의 계산과정(5, 7, 8)을 바탕으로 하여 부록에 제시하였다. 각 모델에 대한 계산은 입사각의 변화에 따라 실제 태양광이 비치는 부분과 비치지 않는 부분의 면적을 각각 나누어서 수행하였다. 이 때 그림자가 생기는 부분 즉, 태양광이 비치지 않는 부분은 모델에 따라 집열기 내부 형상에 따라 집열관 자체에 의해 생기는 그림자와 옆 집열관에 의해 생기는 그림자로 구별하였다. 그 다음 집열기에서 흡수하는 에너지를 계산하기 위해 태양광과 집열관 표면과의 직접 접촉하는 부분에 대해서는 전일사량을 그대로 사용하였고, 원관에 대해서는 입사각에 대해 전일사량을 코사인한 값을 누적하여 계산하였다. 그림자가 진 부분에서 흡수하는 에너지는 식 (2)와 같이 계산된 산란 일사량을 적용하여 계산하였다. 이 때 청정계수(clearness index)는 서울의 연평균값인 0.64로 일정하다고 가정하였다.

## 2.1 수치해석

실제로 일사는 직달 일사와 산란일사로 이루어져 있고, 일반적으로 집열기 제작 시에는 몇 개의 집열관이 직렬 또는 병렬로 연결되어 있기 때문에, 집열관 사이의 열전달 및 집열관 때문에 생기는 그림자의 영향 역시 고려되어야 한다. 그러나 이러한 영향들을 고려한 연구는 그리 많지 않으며, 계산 결과 역시 원형 모델과 같은 간단한 형상에 대한 연구가 대부분이다.

따라서 본 논문에서는 다양한 형상 변화 및 입사각도 변화에 따른 집열기의 성능을 좀 더 정확히 예측할 수 있는 모델을 만들었다. 이 때 흡열관에 입사되는 일사는 실제 집열기에서 발생하는 그림자 영향 및 집열관 사이의 열전달 현상을 고려하기 위해 직달 일사와 산란 일사로 구분하여 적용된다. 산란 일사량은 아래와 같이 계산하였다.<sup>8)</sup>

## 2.2 실험

수치해석 모델의 타당성을 검증하기 위해 본 연구에서는 구리 평관을 흡수관으로 사용한 세 개의 집열관을 이용해 Fig. 5와 같은 실제 시스템을 제작하였다. 각 흡수관은 단열 처리된 박스 안에 있는 하나의 manifold 관에 연결되어 있다. 유리관의 크기는 위의 집열관에서 다른 것과 동일하다. 구리관의 길이는 1,140mm, 외경은 28.58mm이다. 그리고 각 집열관 중심 사이의 거리는 67mm로 정하였다. 작동 유체인 공기는 먼저 구리관 안쪽으로 흐르다가 구리관 끝 부분에서 그 방향을 바꿔 구리관과 유리관 사이의 환형 통로를 통해 빠져 나온다. 실험 시 공기의 유량은 200 lpm으로 고정되어 있다.

집열기는 경사각이 37°, 정남향으로 설치되었다. 그리고 집열기의 입·출구 온도를 측정하기 위해 T-type 열전대를 사용

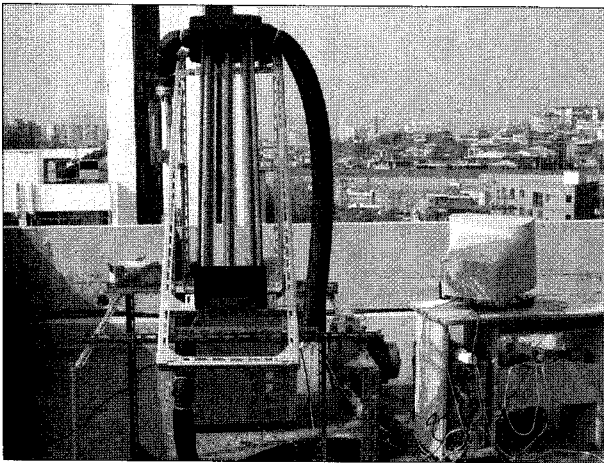


Fig. 5 Experimental Apparatus

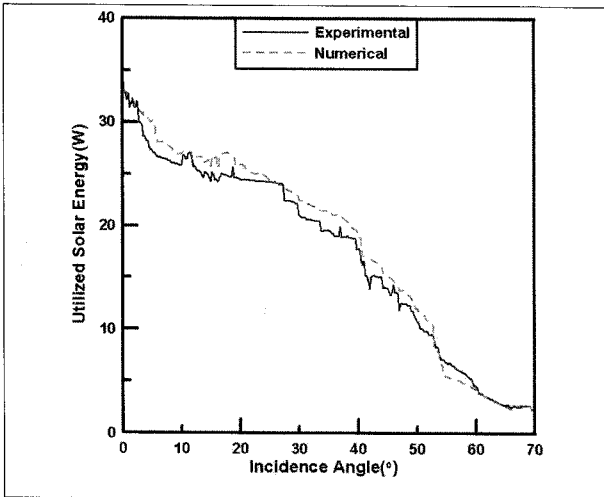


Fig. 6 Comparisons of calculated and measured utilized solar energy with the incidence angle

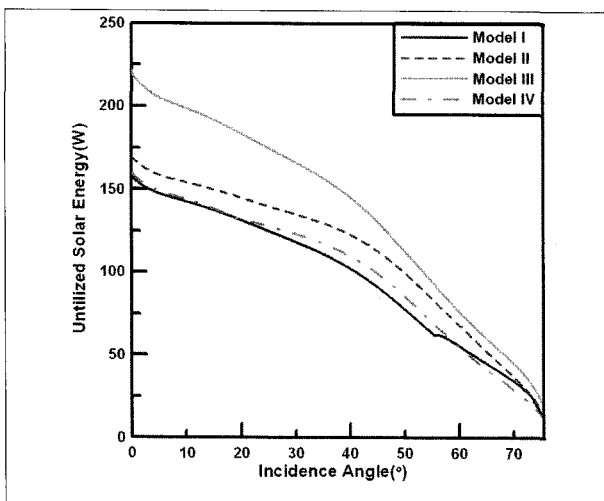


Fig. 7 Comparisons of the performance of the solar collector with each case

Table. 2 Comparisons of the performance of the solar collector with each case

Model	Absorbed Heat(MJ/m <sup>2</sup> )	Q/Qmodel III (%)
I	1.771	71.3
II	2.025	81.5
III	2.484	100
IV	1.816	73.1

하였고, 유량은 오리피스 유량계를 이용하여 측정하였다. 시간에 따른 일사량은 Eppley사에서 제작한 수평면 일사계를 이용하여 측정하였다.

Fig. 6은 실험 결과와 계산 결과를 비교한 그림으로 입사각 변화에 따른 집열기의 흡수 열량은 전체적으로 상당히 비슷한 경향을 보이지만, 실험결과에 비해 계산 결과가 약 5.7%정도 높은 값을 띄고 있다. 본 실험에 대한 측정상의 오차 즉, 실험 장치의 오차는 약 6% 정도<sup>(9)</sup>로 나타난다. 따라서 본 연구의 모델이 집열기의 성능을 상당히 정확히 평가한다고 할 수 있다.

이를 바탕으로 하여 위에서 제시한 네 가지 model에 대한 계산을 위와 같이 수행하였다.

### 3. 해석 결과 및 검토

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

Fig. 7에 나타난 바와 같이 입사각 변화에 따른 10개의 집열관을 사용한 각 집열기 모델에서 흡수하는 열량을 알아보았다. 이 때 계산에 사용한 일사량은 위의 실험에서 측정된 값을 식으로 보정하여 적용하였고, 산란 일사량은 식(1~2)를 이용하여 적용하였다.

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 model III의 산란 일사량을 흡수할 수 있는 흡열면적이 다른 모델에 비해 7~40% 이상 크기 때문이다. 또한 본 연구에서는 식(1)과 (2)를 통해 산란 일사량이 전일사량의 약 33%정도 된다고 구했기 때문에 전일사량에서 산란 일사량이 차지하는 비중이 상당히 크다고 할 수 있다. 따라서 Fig. 7과 같이 model III의 성능이 다른 모델에 비해 큰 경향의 그림이

나타난다고 할 수 있다.

Table. 2는 각 모델들이 각도에 따라 받은 집열량을 0.1o 간격으로 누적한 결과와 가장 집열 능력이 뛰어난 model III에 대한 열량을 비교한 결과이다. 여기서 알 수 있듯이 model I의 경우에는 model III에 비해 집열량이 28.7%, model II의 경우에는 18.5%, model IV의 경우에는 26.9%가 떨어진다.

#### 4. 결론

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

실제 상황에서 일어나는 산란 일사와 집열관 사이의 그림자 효과를 고려할 경우 평판 환의 위·아래에 구리관을 용접한 model III의 효율이 가장 뛰어나다. 이는 실제 집열기에서 산란 일사와 그림자 효과가 상당한 비중을 차지하고 있음을 보여준다. 또한 model III의 형상을 사용한 집열기가 다른 형상의 집열기에 비해 평균 약 25%정도 성능 향상을 보여주는데, 이는 산란 일사량에 대한 흡열 면적이 model III의 경우 다른 모델에 비해 7~40% 이상이 크기 때문이라고 판단된다.

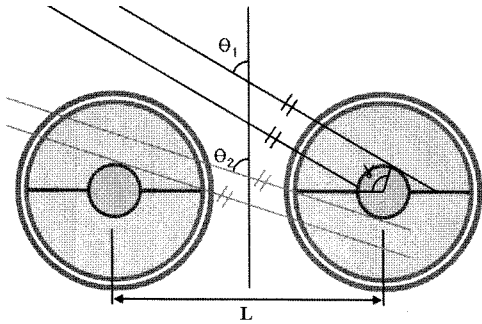
#### 후기

본 연구는 에너지관리공단의 연구비지원으로 수행되었음(과제번호: 2003-N-WA03-0-000-2003)

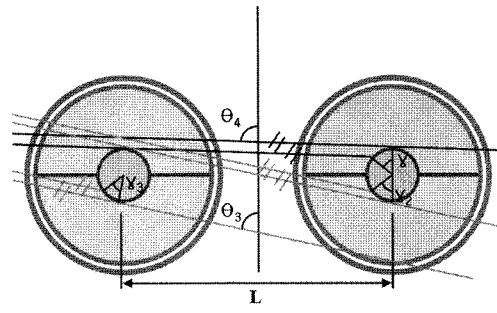
### References

- (1) R. Perez, R. Seals, J. Anderson and D. Menicucci, 1995, "Calculating solar radiation received by tubular collectors", Journal of Solar Energy Engineering 117, pp. 341-344.
- (2) He Zinian, Ge Hongchuan, Jiang Fulin and Li Wei, 1997, "A comparison of optical performance between evacuated collector tubes with flat and semicylindric absorbers", Solar Energy 60, No. 2, pp.109-117.
- (3) Qin Lin and Simon Furbo, 1998, "Solar heating systems with evacuated tubular solar collector", EuroSun98, III.2.27-1-7.
- (4) L. J. Shah and S. Furbo, 2004, "Vertical evacuated tubular-collectors utilizing solar radiation from all directions", Applied Energy, Volume 78, Issue 4, pp. 371-395
- (5) E. Y. Choi, H. D. Kang, Y. Kim, T. B. Seo, and Y.H. Kang, 2004, "Thermal performance comparisons of glass evacuated solar collectors using different absorbing tubes", Proceedings of ISES Asia-Pacific 2004, pp.637-644.
- (6) Jerzy Pyrko, 1984, "A model of the average solar radiation for the tubular collector", Solar Energy, Volume 32, Issue 4, pp.563-565
- (7) Richard Perez, Robert Seals, John Anderson and David Meincucci, 1995, "Calculating Solar Radiation Received by Tubular Solar Energy Collectors", Solar Engineering-Vol. 1, ASME, pp. 699-704.
- (8) Duffie JA, Beckman WA. Solar engineering of thermal processes, 2nd ed. New York: Wiley Interscience; 1991.
- (9) Kline SJ, McClintock FA, 1953, "Describing uncertainties in single-sample experiments", Mechanical Engineers, Vol. 75, pp.3-9.

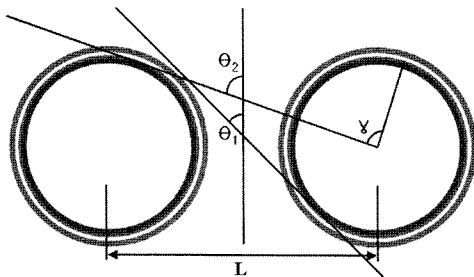
부록. 각 모델에 따른 입사각 구분



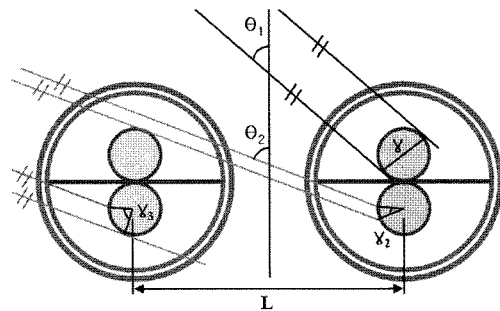
Model I ( $\theta_1 \sim \theta_2$ )



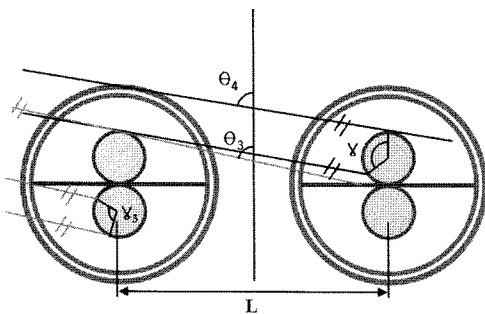
Model I ( $\theta_3 \sim \theta_4$ )



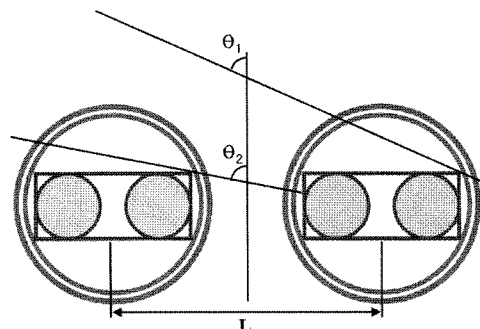
Model II



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



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



Model IV

부록. 계산에 사용된 식(model I)

incidence angle	view factor	irradiation per absorber tube length
$0 < \theta_1 \leq \arccos\left(\frac{D/2}{D/2 + L_F}\right)$	$F = \frac{\sum_{i=0}^{\gamma} \cos(i)}{\gamma}$	$Q = q\left[F\frac{D}{2}\gamma + (L_f + L_f')\cos\theta\right]NP$ $+ q\frac{H}{H_0}\left\{(2\pi - \gamma)\frac{D}{2} + (3L_f - L_f')\right\}NP$
$\arccos\left(\frac{D/2}{D/2 + L_F}\right) < \theta_2 \leq \arccos\left(\frac{D/2}{L - D/2 - L_F}\right)$	$F = \frac{\sum_{i=0}^{\gamma} \cos(i)}{\gamma} + \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_2}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_2}$ $F_1 = \frac{\sum_{i=0}^{\gamma} \cos(i)}{\gamma} + \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_3}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_3}$	$Q = q\left[F_1\frac{D}{2}(\gamma + \gamma_3) + L_f\cos\theta\right]$ $+ \left(F\frac{D}{2}(\gamma + \gamma_2) + L_f\cos\theta\right)(NP - 1)$ $+ q\frac{H}{H_0}\left\{(2\pi - \gamma - \gamma_3) + 3L_f\right\}$ $+ \left\{(2\pi - \gamma - \gamma_2)\frac{D}{2} + 3L_f\right\}(NP - 1)$
$\arccos\left(\frac{D/2}{L - D/2 - L_F}\right) < \theta_3 \leq \arccos\left(\frac{D/2}{L - D/2}\right)$	$F = \frac{\sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i) + \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}-\gamma} \cos(i)}{\gamma}$ $F_1 = \frac{\sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i) + \sum_{i=0}^{\gamma-\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma} + \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_3}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_3}$	$Q = q\left[F_1\frac{D}{2}(\gamma + \gamma_3) + L_f\cos\theta\right]$ $+ \left(F\frac{D}{2}\gamma + L_f'\cos\theta\right)(NP - 1)$ $+ q\frac{H}{H_0}\left\{\frac{D}{2}(2\pi - \gamma - \gamma_3) + 3L_f\right\}$ $+ \left\{(2\pi - \gamma)\frac{D}{2} + (4L_f - L_f')\right\}(NP - 1)$
$\arccos\left(\frac{D/2}{L - D/2}\right) < \theta_4 \leq \frac{\pi}{2}$	<p>(1) <math>\gamma &lt; \frac{\pi}{2}</math>     <math>F = \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma}</math></p> <p>(2) <math>\gamma \geq \frac{\pi}{2}</math></p> $F = \frac{\sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i) + \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}-\gamma} \cos(i)}{\gamma}$ $F_1 = \frac{\sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i) + \sum_{i=0}^{\gamma-\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma} + \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_3}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_3}$	$Q = q\left[F_1(\gamma + \gamma_3)\frac{D}{2} + L_f\cos\theta + F\frac{D}{2}\gamma\right]$ $+ q\frac{H}{H_0}\left\{(2\pi - \gamma - \gamma_3)\frac{D}{2} + 3L_f\right\}$ $+ \left\{(2\pi - \gamma)\frac{D}{2} + 4L_f\right\}(NP - 1)$

## 부록. 계산에 사용된 식(model II)

incidence angle	view factor	irradiation per absorber tube length
$0 \leq \theta_1 \leq \operatorname{acos}\left(\frac{D}{L}\right)$	$F = \frac{2 \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi}$	$Q' = q\left(F + \frac{H}{H_0}\right) \pi \frac{D}{2} NP$
$\operatorname{acos}\left(\frac{D}{L}\right) < \theta_2 \leq \frac{\pi}{2}$	<p>(1) <math>\gamma &lt; \frac{\pi}{2}</math>, <math>F = \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma}</math></p> <p>(2) <math>\gamma \geq \frac{\pi}{2}</math></p> $F = \frac{\sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i) + \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}-\gamma} \cos(i)}{\gamma},$ $F_1 = \frac{2 \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi}$	$Q' = q\left[F_1 \pi \frac{D}{2} + F(NP-1) \frac{\gamma D}{2}\right]$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[\frac{\pi}{2} + (NP-1)(2\pi - \gamma) \frac{D}{2}\right]$



부록. 계산에 사용된 식(model III)

incidence angle	view factor	irradiation per absorber tube length
$0 \leq \theta_1 \leq \frac{\pi}{2} - 2\text{atan}\left(\frac{D/2}{L_f}\right)$	$F = \frac{2 \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi}$	$Q = q \left[ F \frac{D}{2} \pi + (L_f' + L_f'') \cos \theta \right] NP$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[ 3\pi \frac{D}{2} + 4L_f - L_f' - L_f'' \right] NP$
$\frac{\pi}{2} - 2\text{atan}\left(\frac{D/2}{L_f}\right) < \theta_2 \leq \frac{\pi}{2} - 2\text{atan}\left(\frac{D/2}{L-L_f}\right)$	$F = \frac{2 \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi} + \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_2}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_2}$ $F_1 = \frac{2 \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi} + \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_3}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_3}$	$Q = q \left[ F_1 \frac{D}{2} (\pi + \gamma_3) + L_f \cos \theta \right.$ $\left. + (F \frac{D}{2} (\pi + \gamma_2) + L_f \cos \theta) (NP - 1) \right]$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[ (3\pi - \gamma_3) \frac{D}{2} + 3L_f \right.$ $\left. + ((3\pi - \gamma_2) \frac{D}{2} + 3L_f) (NP - 1) \right]$
$\frac{\pi}{2} - 2\text{atan}\left(\frac{D/2}{L-L_f}\right) < \theta_3 \leq \text{acos}\left(\frac{D}{L}\right)$	$F = \frac{2 \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi}$ $F_1 = \frac{2 \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi} + \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_3}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_3}$	$Q = q \left[ F_1 (\pi + \gamma_3) \frac{D}{2} + L_f' \cos \theta \right.$ $\left. + (F \frac{D}{2} \pi + L_f'' \cos \theta) (NP - 1) \right]$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[ ((3\pi - \gamma_3) \frac{D}{2} + 4L_f - L_f') \right.$ $\left. + (3\pi \frac{D}{2} + 4L_f - L_f'') (NP - 1) \right]$
$\text{acos}\left(\frac{D}{L}\right) < \theta_4 \leq \frac{\pi}{2}$	<p>(1) <math>\gamma &lt; \frac{\pi}{2}</math>, <math>F = \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma}</math></p> <p>(2) <math>\gamma \geq \frac{\pi}{2}</math>, <math>F = \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma}</math>,</p> $F_1 = \frac{3 \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi} + \frac{\sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}-\gamma} \cos(i)}{\gamma_3}$	$Q = q \left[ (F_1 \frac{D}{2} (\pi + \gamma_3) + L_f \cos \theta) \right.$ $\left. + (F \frac{D}{2} \gamma) (NP - 1) \right]$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[ ((3\pi - \gamma_3) \frac{D}{2} + 3L_f) \right.$ $\left. + ((4\pi - \gamma) \frac{D}{2} + 4L_f) (NP - 1) \right]$

부록. 계산에 사용된 식(model IV)

incidence angle	view factor	irradiation per absorber tube length
$0 \leq \theta_1 \leq \text{atan}\left(\frac{L-W}{H}\right)$	$F = w\cos\theta + h\sin\theta$	$Q' = q\left(F + \frac{H}{H_0}\right)NP$
$\text{atan}\left(\frac{L-W}{H}\right) < \theta_2 \leq \frac{\pi}{2}$	$F = w\cos\theta + (L-w)\sin\theta$ $F_1 = w\cos\theta + h\sin\theta$	$Q' = q[F_1 + F(NP-1)]$ $+ q\frac{H}{H_0}[(NP-1)(w+2h$ $- \frac{L-w}{\tan\theta} + (w+h)]$

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

**김 용**

2001년 인하대학교 기계공학과 공학사  
2003년 인하대학교 기계공학과 공학석사

인하대학교 기계공학과 박사과정 재학  
(E-mail ; kimyong1012@hotmail.com)

**서 태 범**

1982년 인하대학교 기계공학과 공학사  
1985년 KAIST 기계공학과 공학석사  
1994년 Rensselaer Polytechnic Institute, 기계공학과 공학박사

인하대학교 기계공학부 교수  
(E-mail ; seotb@inha.ac.kr)

**윤 성 은**

2004년 인하대학교 기계공학과 공학사  
2006년 인하대학교 기계공학과 공학석사

LG 전자  
(E-mail ; dalim3@naver.com)

**김 영 민**

2004년 인하대학교 기계공학과 공학사  
2006년 인하대학교 기계공학과 공학석사

현재 연구원  
(E-mail ; kommissar@hanmail.net)