

[논문] 한국태양에너지학회 논문집  
Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol. 24, No. 1, 2004

# 내관에 환을 부착한 진공관형 집열기의 열성능 해석

김용\*, 서태범\*\*, 강용혁\*\*\*

\*인하대학교 대학원 기계공학과(adue@orgio.net)

\*\*인하대학교 기계공학과(seotb@inha.ac.kr)

\*\*\*한국에너지기술연구원

## Thermal Performance Analysis of Glass Evacuated Solar Collector with a Finned Tube

Kim, Yong\*/ Seo, Tae-Beom\*\*/ Kang, Yong-Hyuk\*\*\*

\*Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, Inha University(adue@orgio.net),

\*\*Dept. of Mechanical Eng., Inha University(seotb@inha.ac.kr),

\*\*\*Korea Institute of Energy Research

### Abstract

The thermal performance of glass evacuated tube solar collectors with finned tubes is numerically modelled with code and investigated to see the effect of the inner tube diameter and incidence angle. The solar collector consists of a two-layered glass tube and an inner tube. Finned tubes are used as the inner tube of the collector in order to improve the performance of the solar collector. Two strip-type fins are attached on the opposite sides of the inner tube surface. The fin is wide enough to be tightly fitted inside the glass tube. The results show that if the incidence angle is small, the effect of the tube diameters is not significant on the thermal performance and the outlet air temperature. If the incidence angle is large, however, the outlet air temperature and the performance increases as the inner tube diameter increases.

**Keywords** : 환이 부착된 관(finned tube), 진공관형 집열기(glass evacuated tube solar collector), 입사각(incidence angle)

기 호 설 명			
		d	: 직경[mm]
		A	: 면적[m <sup>2</sup> ]
r	: 반경[mm]	V	: 유량[m <sup>3</sup> /h]

- $\dot{m}_a$  : 질량유량[kg/s]
- $P_g$  : 측정압[Pa]
- $C_{p,a}$  : 정압비열[kJ/kg°C]
- $q_o$  : 열유속[W/m<sup>2</sup>]
- $q_{loss}$  : 열손실[W/m<sup>2</sup>]
- $Q$  : 열량[W]
- $\eta$  : 효율
- $\epsilon$  : 방사율
- $G$  : 일사량[W/m<sup>2</sup>]

**하 첨 자**

- c : 구리 또는 집열기
- g : 유리
- I : 안쪽 또는 입구
- o : 바깥쪽 또는 출구
- m : 평균
- a : 공기
- loss : 손실
- f : 환

**1. 서 론**

중·고온 태양열 집열기 중 진공관형 태양열 집열기는 진공기술을 이용해 일반적인 평판형 집열기의 열손실 중 가장 큰 비중을 차지하는 대류와 전도에 의한 열손실을 줄일 수 있고, 내관 표면에 선택적 흡수 코팅(selective absorbing coating)을 하여 복사 열손실도 줄일 수 있기 때문에 중온 및 고온을 얻는데 사용되고 있다. 또한, 계절의 영향을 거의 받지 않고 비정상 상태의 날씨 조건에서도 사용할 수 있다는 점에서 우리나라의 실정에 맞는 시스템이라 할 수 있다.<sup>1)</sup>

진공관형 태양열 집열기는 내관으로 히트파이프를 이용하는 경우와 이중 유체관을 이용하는 두 가지 경우로 나뉜다. 우리나라에서는 내관으로 히트파이프를 이용하는 경우에 대한 연구가 주를 이루

고 있다.<sup>2)3)4)</sup>

본 연구에서는 내관으로 이중 유체관을 이용하는 경우에 대해 수치해석을 바탕으로 하여 집열관의 성능을 분석하여 진공관형 태양열 집열기의 최적 설계기술을 도출하고자 한다. 집열관의 성능을 알아보기 위한 변수로서 구리관의 길이, 두께, 직경 및 작동 유체인 공기의 유량 등과 같은 작동 변수와 설계 변수의 변화에 따른 집열관의 성능을 알아본 결과 구리관의 직경이 집열관의 성능에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있었다<sup>5)</sup>. 또한 집열관 내관의 형상에 따라 집열관의 성능에 차이가 있다.<sup>6)</sup>

따라서 본 연구에서는 집열관 내관에 환을 부착할 경우 내관의 직경 변화 및 입사각 변화에 따른 집열관의 성능 변화를 알아보았다.

**2. 연구 내용**

진공관형 태양열 집열기의 열성능을 해석하기 위한 모델의 개략도는 그림 1과 같다. 모델은 유리관과 구리관으로 이루어져 있고, 작동 유체인 공기는

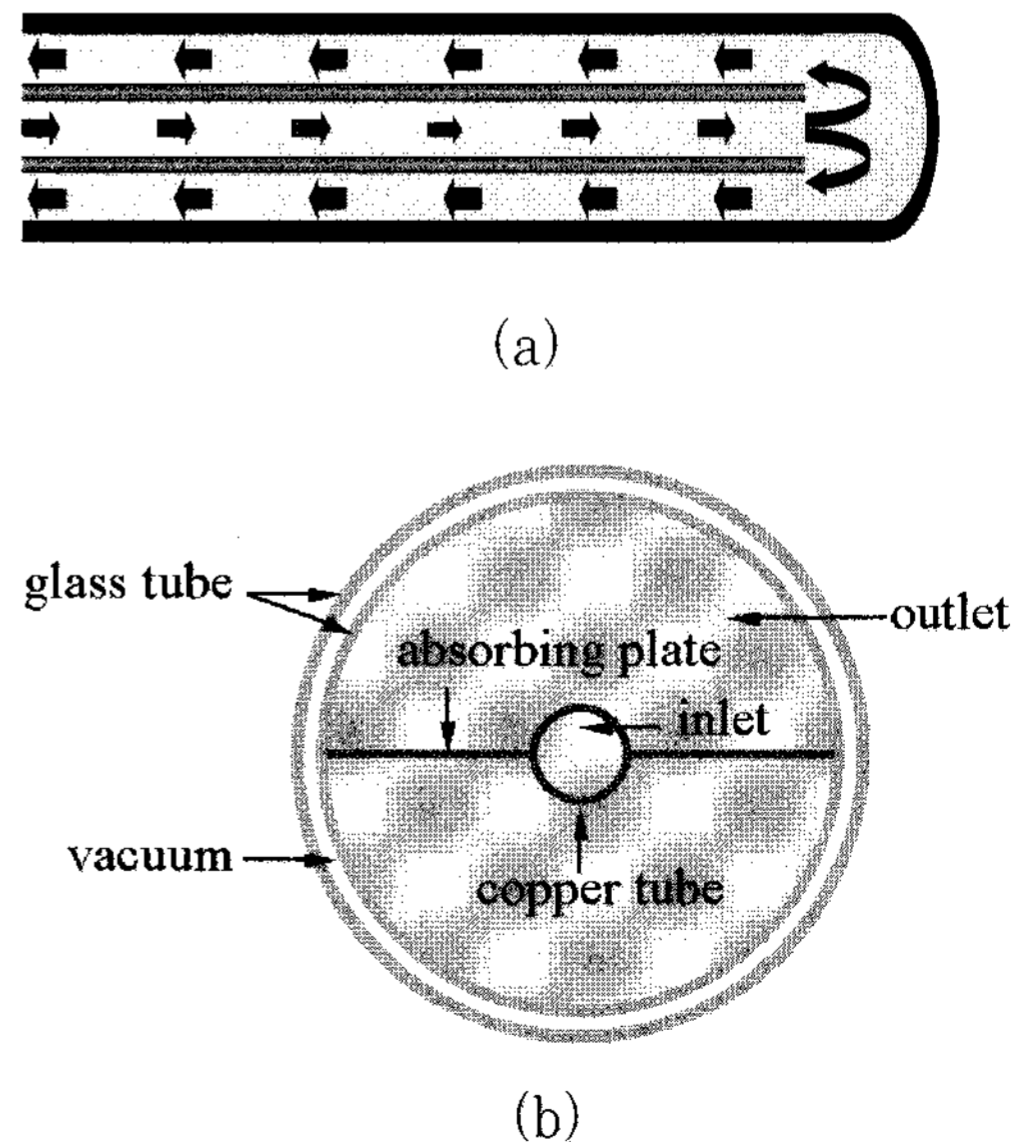


그림 1. The schematic diagram of the glass evacuated tube solar collector and model

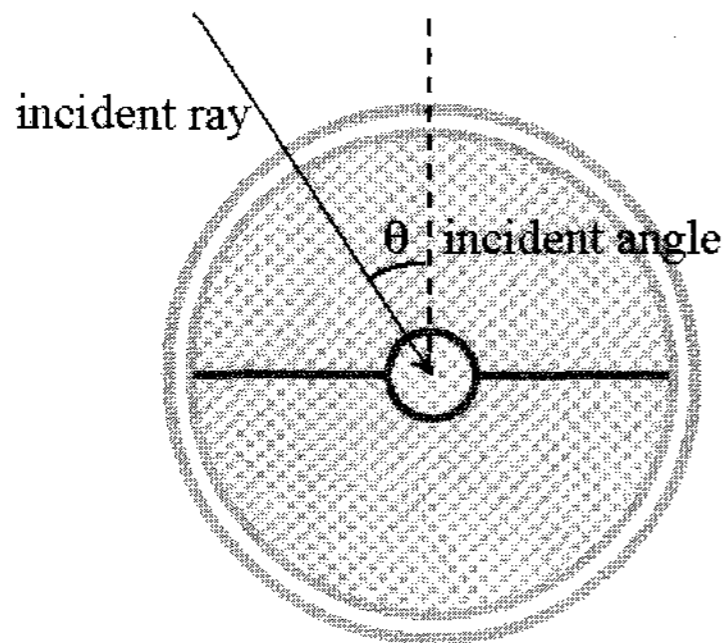


그림 2. The schematic diagram of the incident angle

먼저 구리관 안쪽으로 흐르다가 구리관 끝 부분에서 그 방향을 바꿔 구리관과 유리관 사이의 환형 통로를 통해 빠져 나온다. 본 연구에 사용된 유리관은 길이 1,200mm, 외경 37mm, 내경 33.8mm이다. 내관인 구리관의 길이는 1,135mm, 외경은 12.7mm, 19.05mm, 25.4mm로 변화를 주었고, 두께는 1mm로 정하였다. 구리관에 부착된 평판 환은 길이는 구리관과 같게 하였고, 너비는 환이 유리관에 완전히 밀착되게 하였고, 두께는 1mm이다. 각 물질의 물성치는 표 1에 나타내었다.

또한 본 연구에서는 결과의 정확성을 크게 잃지 않으면서 계산 과정을 간단히 하기 위해 몇 가지 가정을 하였다. 우선, 모델에서 일어나는 모든 과정은 정상 상태로 가정하였다<sup>(7)</sup>. 또, 공기의 온도 변화 범위가 그리 크지 않고 속도 역시 빠르지 않기 때문에 비압축성 유동으로 가정하였다. 그리고 계산 과정에 사용된 모든 물성치는 27°C일 때를 기준으로 하였다. 난류 유동 해석 모델은 k-ε 모델을 사용하였다. 그리고 유리관 바깥 표면에서의 대류 열손실은 무시하였지만, 구리관과 유리관에서 일어나는

복사 열손실은 고려하였다.

복사 열손실 계산 시 집열기 튜브와 주변과의 형상 계수는 1로 가정하였고, 외부 온도는 27°C로 가정하였다. 그리고 구리관이 평평하지 않기 때문에 실제 집열기의 구리관 바깥쪽 표면에 열유속이 균일하게 가해지지 않는 않지만, 구리관의 열전도도가 매우 높기 때문에 경계조건으로 균일한 열유속이 가해진다고 가정하였다. 이 때 가해진 구리관에 입사되는 열유속은 1000W/m<sup>2</sup>인데, 유리관의 투과율을 고려해 실제로 가해지는 열유속은 910W/m<sup>2</sup>로 정하였다. 본 연구에서는 입사되는 열유속을 구리관의 원주방향으로 적분하여 실제 구리관에 가해지는 열유속을 330W/m<sup>2</sup>로 가정하였다. 또한 환에 가해지는 열유속은 입사각이 0°일 때는 910W/m<sup>2</sup>, 30°일 때는 780W/m<sup>2</sup>, 60°일 때는 455W/m<sup>2</sup>로 정하였고, 그림자 효과 또한 고려하였다.

그 외에 본 계산을 위해 사용된 경계조건들은 다음과 같다.

- 1) 입구 조건 ( $z=0, r < d_{ci}/2$ )  
 $T_{ai}=27^{\circ}\text{C}, u=0, v=0, w=100\text{rpm}$
- 2) 출구 조건 ( $z=L, d_{co}/2 < r < d_{gi}/2$ )  
 $P_g=0$
- 3) 벽면 조건 ( $r=d_{ci}/2, d_{co}/2, d_{gi}/2$ )  
 Velocity :  $u=0, v=0, w=0$
- 4) 구리관 표면( $r=d_{co}/2$ ) 및 환 표면에 가해지는 열유속

표 1. The properties of the materials

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

$$q = q_0 \text{ (일정)} (q_{0,c} = 330 \text{ W/m}^2)$$

$$q = q_0 \text{ (일정)} (q_{0,f} = 910, 780 \text{ and } 455 \text{ W/m}^2)$$

5) 구리관과 유리관 및 흰에서의 복사 열손실

$$\text{At } r = d_{co}/2, \quad q_{loss} = \epsilon_c \sigma (T_c^4 - T_{surr}^4) \dots\dots (1)$$

$$\text{At } r = d_g/2, \quad q_{loss} = \epsilon_g \sigma (T_g^4 - T_{surr}^4) \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{At fin,} \quad q_{loss} = \epsilon_f \sigma (T_f^4 - T_{surr}^4) \dots\dots\dots (3)$$

본 연구에서는 집열관 내관에 흰을 부착할 경우 내관의 직경 변화 및 입사각 변화에 따른 집열관의 성능 변화를 FVM 상용코드를 사용하여 알아보았다. 구리관 표면과 평판 흰 표면에는 Al-N/Al 선택 흡수 코팅을 하였다고 가정하여 흡수율은 0.93, 방사율은 0.06으로 가정하였다.<sup>8)9)</sup> 유리관의 투과율은 0.91, 흡수율은 0.018로 가정하였다.<sup>8)9)</sup> 유리관에서 발생하는 굴절율이 일사량에 미치는 영향은 무시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 내관인 구리관에 흰을 설치하여 집열 면적을 넓힌 관을 사용하였을 때, 구리관의 직경 변화 및 입사각 변화가 진공관형 태양열 집열기의 성능에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 본 연구에 앞서 실험을 통해 수치해석 모델의 정확성을 검증하였다.<sup>5)</sup> 이를 바탕으로 하여 본 연구의 계산을 수행하였다.

집열관의 성능을 알아보기 위해 구리관 안쪽과 바깥쪽의 공기 온도 분포를 길이 방향에 따라 알아보았다. 전체적으로 입사각이 클수록 온도가 낮아지고, 직경이 커질수록 작은 관에 비해 좀 더 높은 온도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 3~5는 입사각 변화에 따른 각각의 구리관에서의 구리관 내·외측의 공기 온도 분포이다.

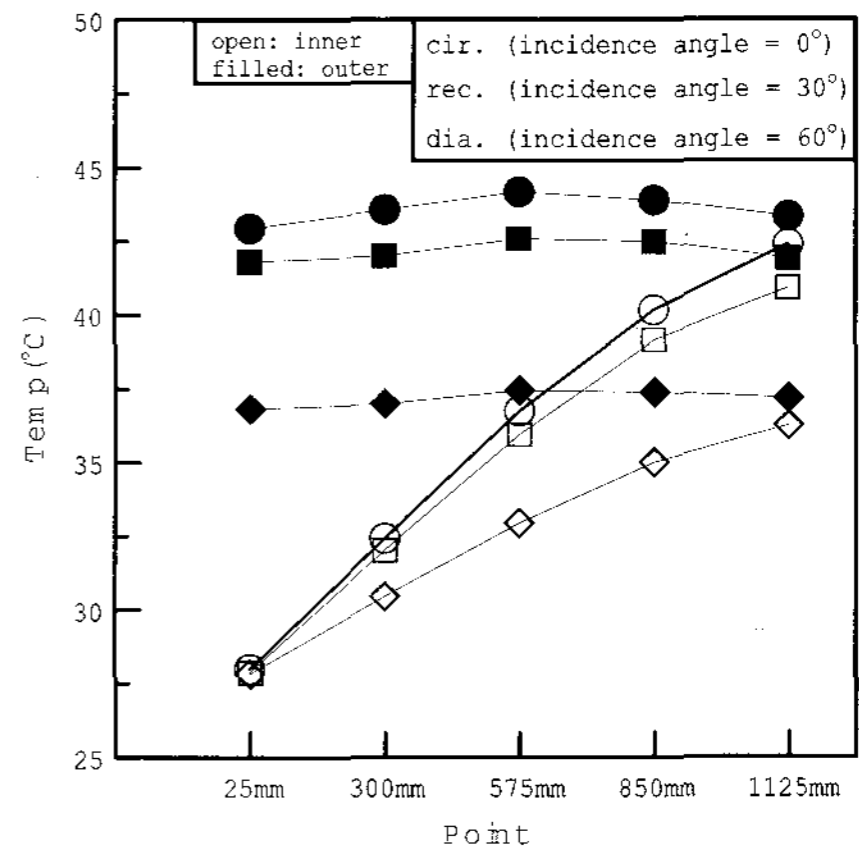


그림 3. Air temperature variations along the tube axial location for different incidence angles(O.D=12.7mm)

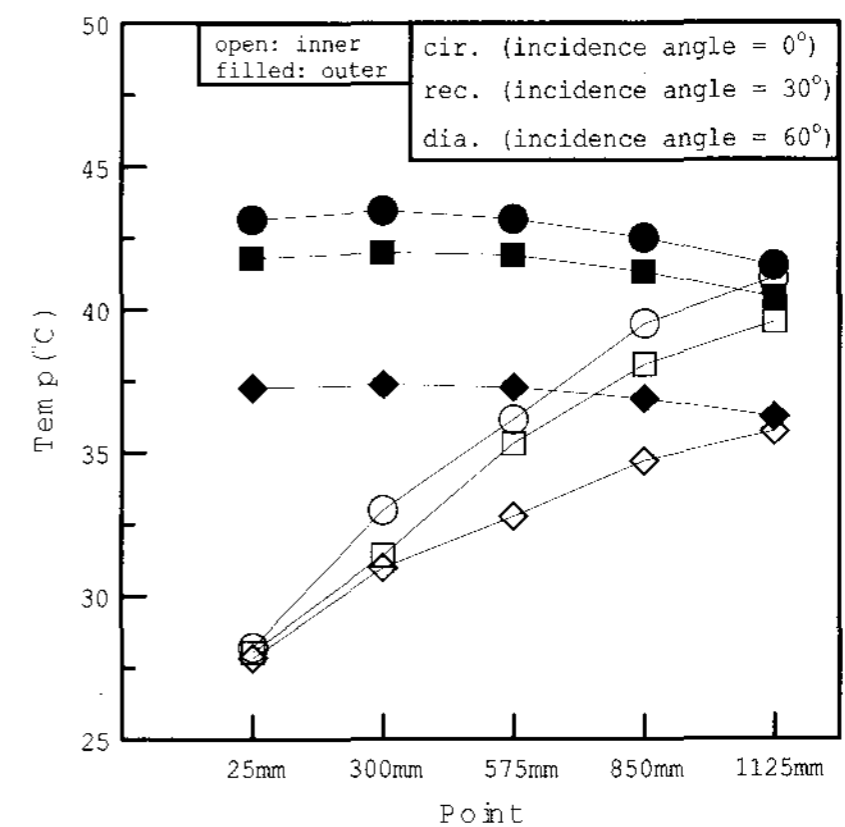


그림 4. Air temperature variations along the tube axial location for different incidence angles(O.D=19.05mm)

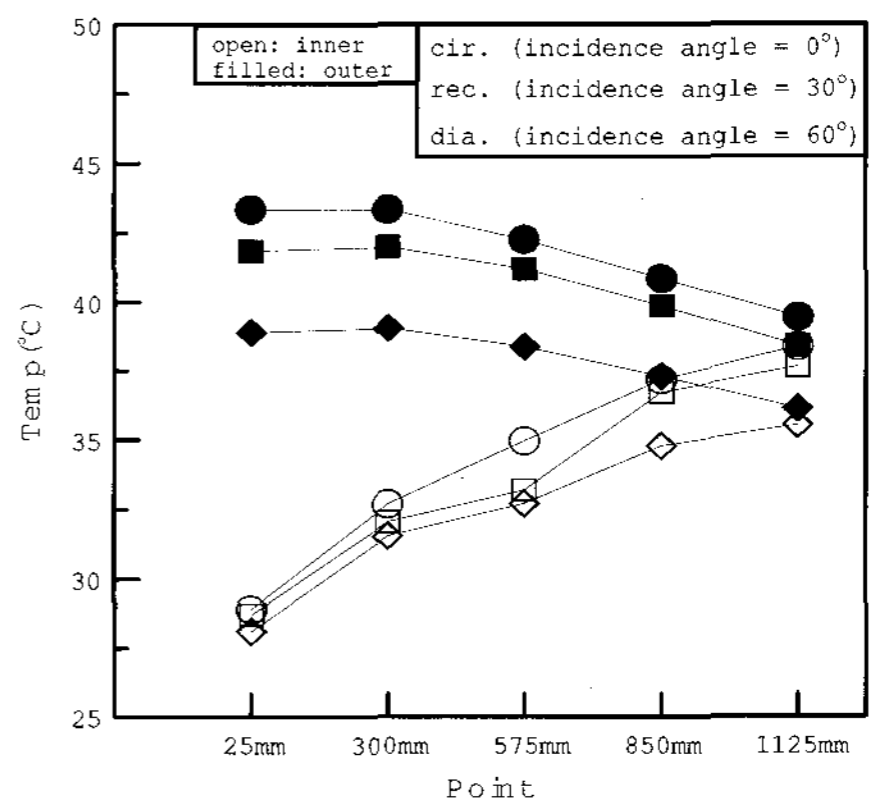


그림 5. Air temperature variations along the tube axial location for different incidence angles(O.D=25.4mm)

그림에서 알 수 있듯이 입사각이 커질수록 공기의 온도가 떨어짐을 알 수 있다. 그리고 입사각이 0°일 때와 30°일 때의 온도는 크게 차이가 없으나 입사각이 60°로 커지게 되면 온도가 급격히 떨어짐을 알 수 있다. 즉, 입사각이 커짐에 따라 집열기는 입사각의 영향을 많이 받게 되고 그에 따라 효율 역시 떨어짐을 알 수 있다. 또한, 구리관 안쪽의 공기 온도는 길이 방향에 따라 증가하는 경향을 띄지만 바깥쪽의 온도는 직경 변화에 따라 구리관의 직경이 12.7mm인 경우에는 575mm 부근에서, 19.05mm인 경우에는 300mm 부근에서, 25.4mm인 경우에는 25mm 부근에서 최고 온도가 나타난다.

그림 6~8은 직경 변화에 따른 각각의 입사각에서의 구리관 내·외측의 공기 온도 분포이다. 구리관 안쪽에서의 전체적인 공기 온도는 입사각이 0°인 경우에는 구리관의 직경이 12.7mm일 때 가장 온도가 높고, 직경이 25.4mm인 경우 가장 온도가 낮다. 그러나 이러한 경향은 입사각이 커질수록 줄어들어 60°인 경우에는 온도분포가 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 구리관 바깥쪽에서의 공기 온도는 직경에 따라 큰 차이를 보이는데 입사각이 0°인 경우나 30°인 경우에는 전체적인 온도 분포가 큰 차이가 있다. 그러나 집열관의 출구 부근에서의 온도는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 입사각이 60°인 경우에는 입사각이 작은 경우에 비해 전체적인 온도분포에서는 차이가 덜하나 집열관 출구 부근의 온도는 직경이 커질수록 높다는 것을 알 수 있다. 즉, 입사각이 클 경우에는 구리관의 직경이 클 때 좀 더 높은 효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

표 2~4에서는 복사 열손실을 고려했을 때의 입사각 변화에 따른 공기의 출구 평균 온도와 집열관의 효율을 보여주고 있다. 집열관의 효율은 식 (4)와 같이 나타내었다.

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p(T_{a,o} - T_{a,i})}{A_c \cdot G} \dots\dots\dots (4)$$

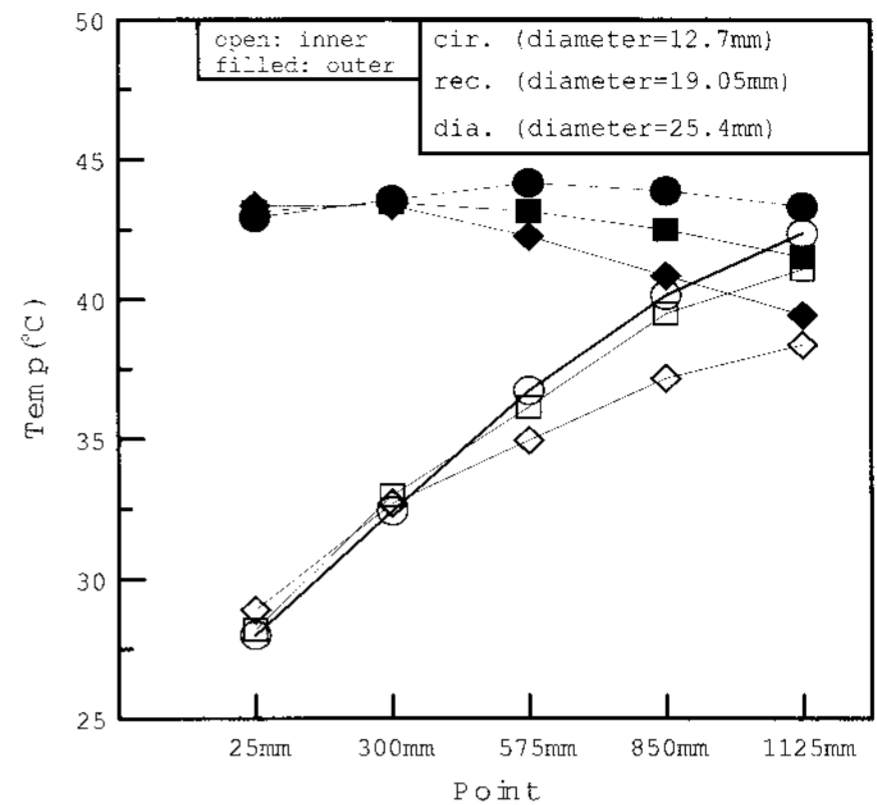


그림 6. Air temperature variations along the tube axial location for different diameters(incidence angle=0°)

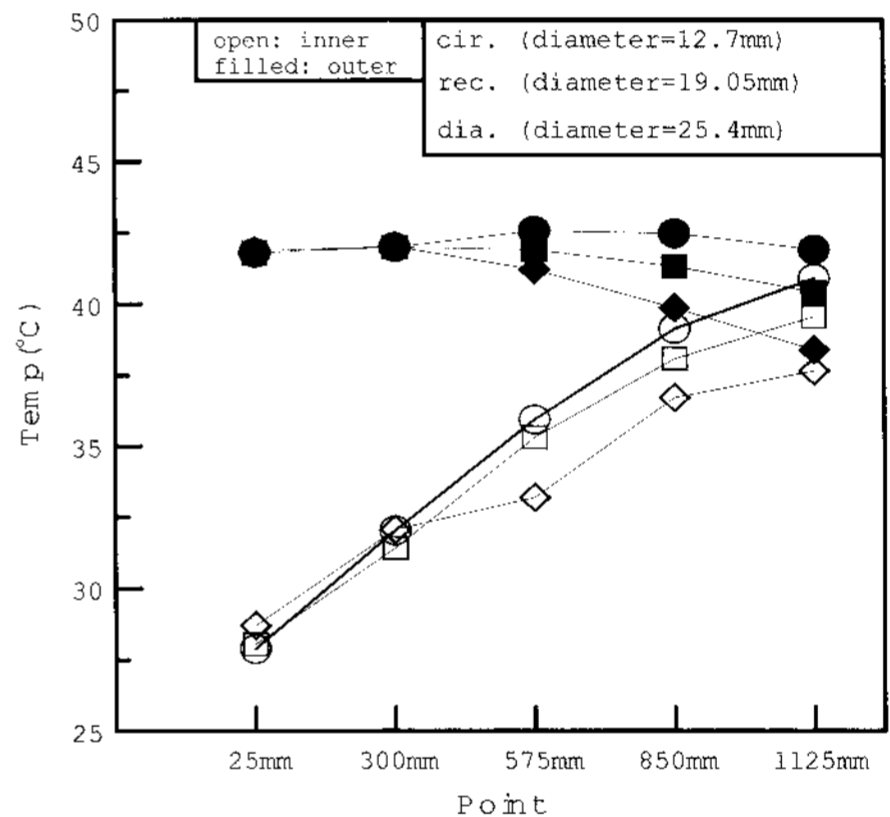


그림 7. Air temperature variations along the tube axial location for different diameters(incidence angle=30°)

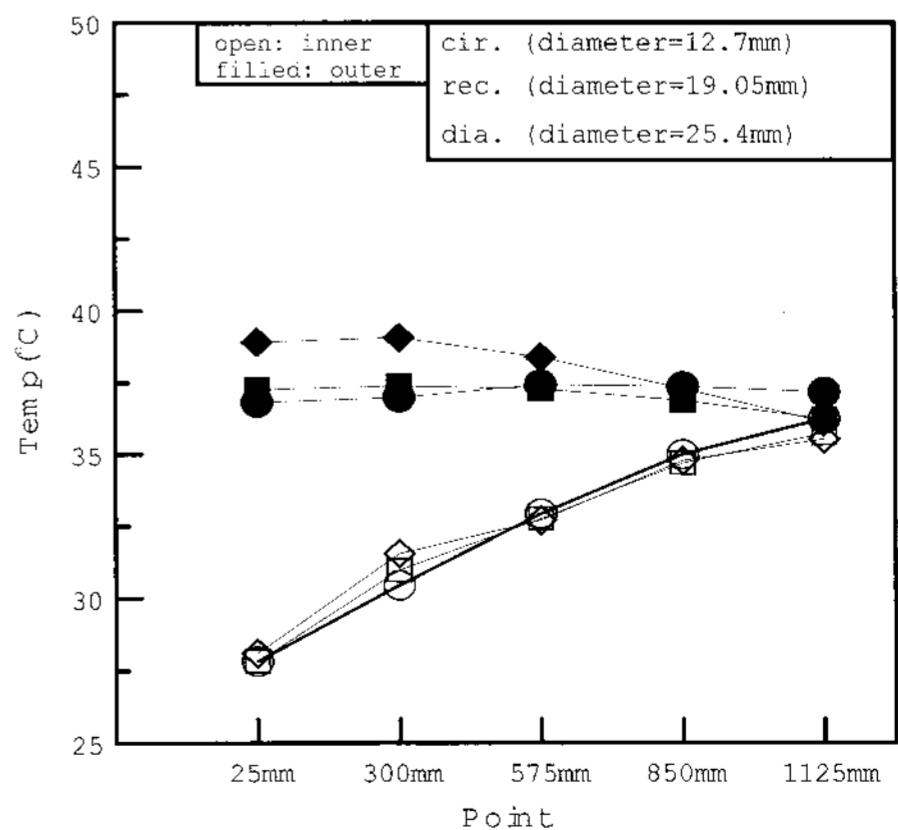


그림 8. Air temperature variations along the tube axial location for different diameters(incidence angle=60°)

표에서 알 수 있듯이 입사각이 커질수록 집열관에서 얻을 수 있는 공기 온도가 낮아지고, 직경이 클수록 공기 온도가 높음을 알 수 있다. 입사각이 0°, 30°일 때는 구리관의 직경 변화가 집열관의 출구 온도 및 효율에 거의 영향을 미치지 않는다. 그러나 입사각이 60°인 경우에는 구리관의 직경 변화에 따라 출구 온도의 경우 최대 2.1°C, 효율은 최대 7.3%의 차이가 있다. 이는 집열관의 집열 면적 중 직경이 작은 관에서 대부분을 차지하는 환의 집열량이 입사각이 커짐에 따라 작아지는 반면, 구리관의 집열량은 각각의 직경에서 입사각의 영향에 따른 차이가 크지 않기 때문이다.

표 2. Outlet temperatures and efficiency with the copper tube diameter

incidence angle (0o)	T <sub>losso,a</sub> (°C)	η(%)
12.7mm	42.93	55.1
19.05mm	43.14	55.8
25.4mm	43.34	56.5

표 3. Outlet temperatures and efficiency with the copper tube diameter

incidence angle (30o)	T <sub>losso,a</sub> (°C)	η(%)
12.7mm	41.8	51.1
19.05mm	41.83	51.2
25.4mm	41.86	51.4

표 4. Outlet temperatures and efficiency with the copper tube diameter

incidence angle (60o)	T <sub>losso,a</sub> (°C)	η(%)
12.7mm	36.81	33.9
19.05mm	37.26	35.5
25.4mm	38.91	41.2

본 결과에서는 입사각이 작은 경우에는 구리관의 직경이 집열관의 열성능에 크게 영향을 미치지 않지만, 입사각이 큰 경우에는 높은 온도와 효율을 얻고자 한다면 구리관의 직경을 크게 하는 것이 집열관 설계 시 좀 더 유리하다는 것을 알 수 있다.

그러나 일사량은 직달 일사량과 산란 일사량으로 이루어져 있다. 본 연구에서는 산란 일사량이 고려되어 있지 않다. 실제 집열기 설계 시에는 여러 개의 집열관을 직렬 배열 또는 병렬 배열을 하게 된다. 따라서 일사량의 집열관에 의한 간섭 및 열전달의 상호 작용을 고려할 필요가 있다. 그러나 본 연구에서는 이러한 영향을 고려하지 않았다. 이러한 영향을 고려한다면 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 내관인 구리관에 환을 설치하여 집열 면적을 넓힌 관을 사용하였을 때 구리관의 직경 변화 및 입사각 변화가 진공관형 태양열 집열기의 성능에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

이를 통해 환을 사용하여 집열 면적을 늘렸을 경우 입사각이 작은 경우에는 구리관의 직경에 따른 온도 차이 및 효율의 차이가 거의 없지만, 입사각이 커지게 되면 직경이 커질수록 집열관의 출구 온도 뿐만 아니라 효율 역시 좋다는 것을 알 수 있다. 따라서 구리관의 직경을 크게 하는 것이 집열관 설계 시 좀 더 유리하다는 것을 알 수 있다. 그러나 일사량은 직달 일사량과 산란 일사량으로 이루어져 있다. 본 연구에서는 산란 일사량이 고려되어 있지 않다. 실제 집열기 설계 시에는 여러 개의 집열관을 사용하기 때문에 그에 따른 일사량의 집열관에 의한 간섭 및 열전달의 상호 작용을 고려할 필요가 있다. 그러나 본 연구에서는 이러한 영향을 고려하지 않았다. 이러한 영향을 고려한다면 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

1. Yin Zhiqiang, 1997, Chinese All-Glass Evacuated Solar Collector Tubes during the Past 18 years, Chinese Journal of Solar Energy, No.1
2. 김철주, 1992, 진공 유리관 태양열 집열기에 열파이프의 적용을 위한 기초연구, 태양에너지, Vol. 12, No. 2, pp 9-17
3. 지명국, 2002, Heat pipe를 내장한 진공관 태양열 집열기의 성능 연구, 대한설비공학회 하계학술발표대회, pp. 58-63
4. 곽희열, 2003, 진공관형 태양열 집열 기술, 한국 태양에너지 학회지, Vol. 2, No. 1, pp 24-31
5. 김용, 2003, 이중 유리관형 태양열 집열기의 열전달 해석, 대한설비공학회 하계학술발표대회, pp. 1315-1320
6. HE Zinian, Ge Hongchuan, Jiang Fulin and Li Wei, 1997, A comparison of Optical Performance between Evacuated Collector Tubes with Flat and Semi-cylindrical Absorbers, Solar Energy, Vol. 60, pp. 109-117
7. G. R. Mather, Jr., 1980, ASHRAE 93-77 Instantaneous and All-Day Tests of the Sunpak™ Evacuated-Tube Collector, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 102, pp. 294-304
8. Gui Yuzong, Xue Zuqing, Zhou Xiaowen, and Yin Zhiqiang, 1998, Determination of Emittance of Selective Absorbing Surfaces, Solar Energy, Vol. 64, pp. 241-243
9. Yin Zhiqiang, Xue Zuqing, and Zhang Jian, 1999, Graded Al-N/Al Absorbing Surfaces for All-Glass Evacuated Tubular Collectors, Renewable Energy, Vol. 16, pp. 624-627