

[논문] 한국태양에너지학회 논문집  
*Journal of the Korean Solar Energy Society*  
 Vol. 23, No. 2, 2003

## 진공관형 태양열 집열기의 열성능 해석

# An Analysis of the Thermal Performance of the Glass Evacuated Tube Solar Collector

김용\*, 서태범\*\*, 강용혁\*\*\*  
 Kim, Y. \*, Seo, T. B.\*\*, Kang, Y. H.\*\*\*

**Key words** : 열성능(Thermal performance), 진공관형 태양열 집열기(Evacuated tube solar collector), 설계변수(Design parameter), 작동변수(Operating parameter)

### Abstract

The thermal performance of the glass evacuated tube solar collector is numerically investigated. The glass evacuated tube solar collector consists of a two-layered glass tube, a copper tube, and the working fluid. The length and the diameter of the glass tube are 1,200mm and 38mm, respectively. The diameter, thickness, and length of the copper tube and the flow rate of air are considered as the important design and operating parameters of the collector. The effect of these parameters on the thermal performance of the collector are investigated. The results show that as the diameter, the thickness, and the length of the copper tube increase and the flow rate of the air decreases, the thermal performance and the outlet mean temperature increase.

#### ■ 기호설명 ■

r : radius [mm]

t : thickness [mm]

d : diameter [mm]

A : area [ $m^2$ ]

V : volume rate flow [ $m^3/h$ ]

$\dot{m}_a$  : mass flow rate [kg/s]

$P_g$  : gage pressure(pa)=0

$c_{p,a}$  : specific heat(J/kg · K)

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 인하대학교 기계공학과

\*\*\* 한국에너지기술연구원

\* Dept. Mechanical Eng, Graduate school, Inha University

\*\* Dept. Mechanical Eng., Inha University

\*\*\* Korea Institute of Energy Research

- T : temperature(K)
- $q_0$  : heat flux( $W/m^2$ )
- $q_{loss}$  : heat loss( $W/m^2$ )
- Q : energy to get(W)
- $\Delta Q$  : energy loss(W)
- $\varepsilon$  : emissivity

**하첨자**

- c : copper
- g : glass
- s : surrouding
- i : inner or inlet
- o : outer or outlet
- m : mean
- a : air
- loss : loss

**1. 서론**

태양열 집열기 중, 진공관형 태양열 집열기는 진공기술을 이용해 대류와 전도에 의한 열손실을 없애고, 선택 흡수 코팅(selective absorbing coating)을 통하여 복사 열손실 또한 줄일 수 있는 특징을 가지고 있다. 따라서, 진공관형 태양열 집열기는 중온 및 고온 상태뿐만 아니라 겨울에 추운 지역 및 비정상 상태의 날씨 조건에서도 사용될 수 있다.<sup>1)</sup>

현재까지 진공관형 태양열 집열기에 대한 많은 연구가 진행되어져 왔다. Eaton과 Blum<sup>2)</sup>은 진공관형 태양열 집열기가 대류 열손실을 없앤다는 것을 알아내었고, Eisenhammer<sup>3)</sup>는 코팅을 통해 방사율을 줄이는 방법을 제시하였고, Gui Yuzong<sup>4)</sup>는 선택 흡수 코팅면의 방사율(emittance)의 결정에 대해 연구하였다. Yin and Xue<sup>5)</sup>는 코팅면이 Al-N/Al일 때 선택 흡수 코팅면의 흡수율 및 방사율과 태양열 집열기의 효율을 구하였다. 그밖에 Bofeng<sup>6)</sup>은 중, 고온 진공관형

태양열 집열기의 현재 추이와 전망에 대해 고찰하였다.

진공 유리관형 태양열 집열기는 내관으로 히트파이프를 이용하는 경우와 이중 유체관을 이용하는 두 가지 경우로 나뉜다. 우리나라에서는 주로 내관으로 히트파이프를 이용하는 경우에 연구가 집중되어 있다.<sup>(7,8,9)</sup>

본 연구에서는 내관으로 이중 유체관을 이용하는 경우에 대해 수치해석을 기본으로 하여 집열관의 성능을 조사·연구하여 진공 유리관형 태양열 집열기의 최적 설계기술을 도출하고자 한다. 우선, 집열관의 성능을 알아보기 위한 변수로써 구리관의 길이, 두께, 직경 및 작동 유체인 공기의 유량 등과 같은 작동 변수와 설계 변수의 변화에 따른 집열관의 열성능을 알아보고자 한다. 이를 위해 축방향 길이 변화에 따른 유리관 표면의 온도 변화, 시스템이 얻은 열량에 대한 열손실의 비 및 복사 열손실을 고려하였을 때 공기의 출구 평균 온도를 알아보았다. 그리고 이를 통해 집열 시스템의 적절한 구성을 위한 설계점에 대해 알아보았다.

**2. 수치해석 모델**

진공관형 태양열 집열기의 개략적 모델은 그림 1과 같다. 진공관형 태양열 집열기는 유리관과 구리관으로 이루어져 있고, 작동 유체인 공기는 먼저 구리관 안쪽으로 흐르다가 구리관 끝 부분에서 그 방향을 바꿔 구리관과 유리관 사이의 환형 통로를 통해 빠져 나온다. 본 논문의 계산에 사용된 유리관의 길이는 1,200mm이고, 직경은 38mm이다. 또한 여기서 유리관의 진공도  $5 \times 10^{-3} Pa$ 이다. 그림에서 진공 부분은 계산에 들어가지 않기 때문에 생략되었다. 그 외 각 물질의 물성치는 표 1에 명시하였다.

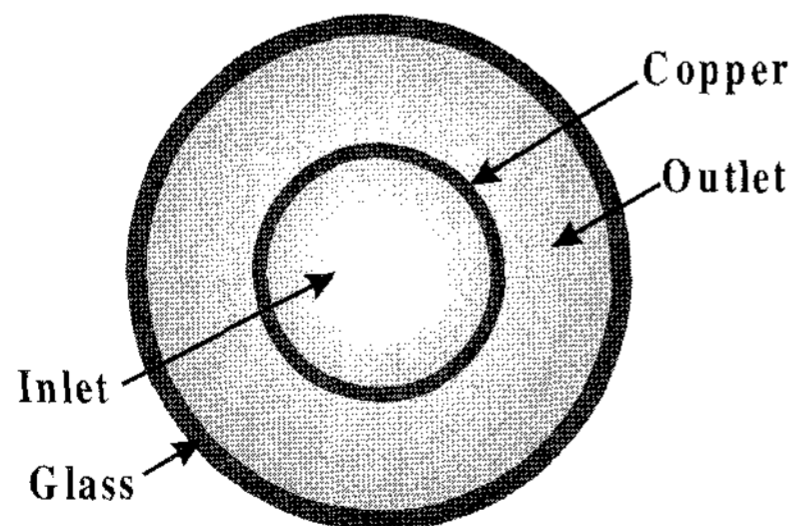
계산 결과의 정확성을 크게 잃지 않으면서 계산 과정을 간단히 하기 위해 몇 가지 가정을 하였는

표 1. The properties of the materials

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

데 우선, 모델에서 일어나는 모든 과정을 정상 상태라 가정하였다. 그리고 유리관의 바깥 표면은 진공 상태이기 때문에 대류에 의한 열손실은 없다고 가정하였다. 반면 구리관과 유리관에서 일어나는 복사 열손실은 고려하였다.

복사 열손실의 계산 시 집열기 튜브와 주변과의 형상 계수는 1로 가정하였다. 그리고 구리관이 평평하지 않기 때문에 실제 집열기의 구리관 바깥쪽 표면에 열유속이 균일하게 가해지지 않지만 여기서는 경계조건으로 균일한 열유속이 가해진다고 가정하였다. 그리고 이것은 구리관의 전도도가 매우 높기 때문에 합리적인 가정이라 할 수 있다.



(b)

그림 1. Schematic of glass evacuated tube collector

그 외에 본 계산을 위해 사용된 경계조건들은 다음과 같다.

1) 입구 조건 ( $z=0, r < d_{ci}/2$ )

$$T_{ai} = 293K, u=0, v=0, w=V/3600A_{ci}$$

2) 출구 조건 ( $z=L, d_{co}/2 < r < d_{gi}/2$ )

$$P_g = 0$$

3) 벽면 조건 ( $r=d_{ci}/2, d_{co}/2, d_{gi}/2$ )

$$\text{Velocity : } u=0, v=0, w=0$$

4) 구리관 표면에 가해지는 열유속 ( $r=d_{co}/2$ )

$$q = q_0 \text{ (일정)}$$

5) 구리관과 유리관에서의 복사 열손실

$$\text{At } r=d_{co}/2, \quad q_{\text{loss}} = \epsilon c \sigma (T_c^4 - T_s^4) \quad (1)$$

$$\text{At } r=d_g/2, \quad q_{\text{loss}} = \epsilon g \sigma (T_g^4 - T_s^4) \quad (2)$$

이 연구에서는 구리관의 길이, 두께, 직경과 같은 설계 변수와 작동 변수인 공기의 유량이 집열기의 열성능에 미치는 영향을 Cosmos/Flow라는 FEM 상용코드를 사용하여 수치 해석적으로 연구하였다. 표 2에서는 이 연구에서 기준으로 삼은 설계 조건과 작동 조건, 그리고 이 조건들의 변화를 명시하였다. 또, 구리관 표면에 선택 흡수 코팅을 하였다고 가정하여 구리관의 흡수율은 0.93, 방사율은 0.06으로 하였다. 그리고 유리관의 투과율은 0.91, 흡수율은 0.018로 가정하

였다.<sup>4,5)</sup>

표 2. Standard conditions and variation of each parameter

	parameter	nominal condition	variation
copper tube	length(mm)	1135	845, 990
	diameter(mm)	19	12.7, 25.4
	thickness(mm)	1	0.43, 1.65
air	flow rate(m <sup>3</sup> /h)	10	7.5, 15, 20

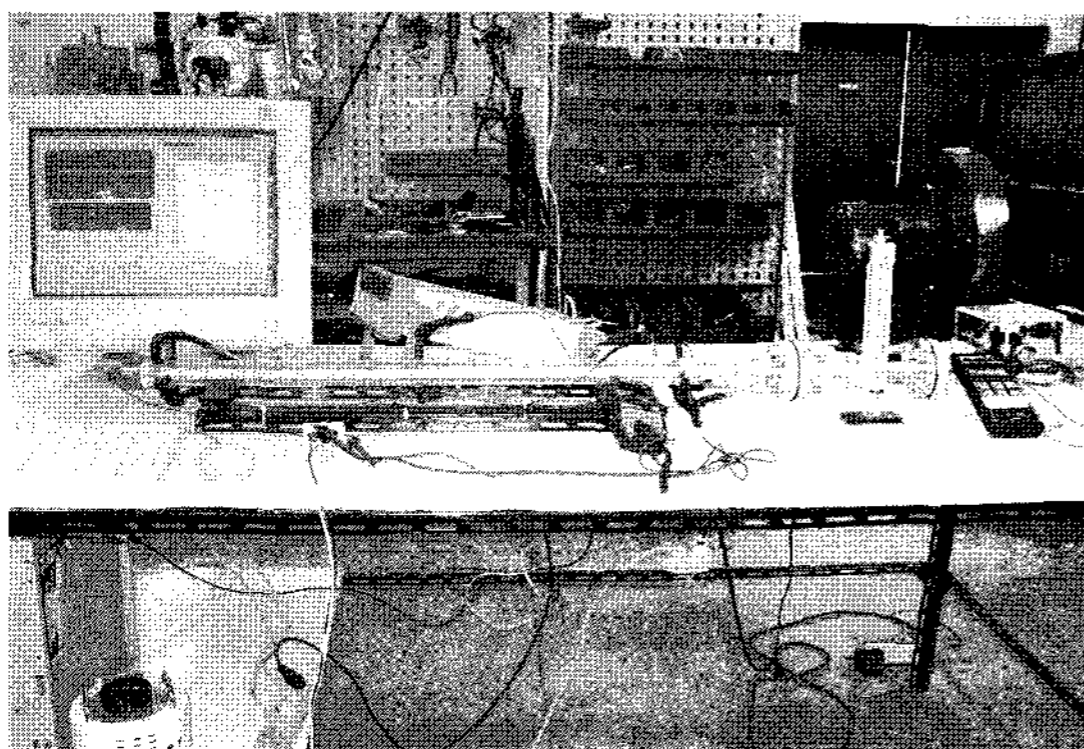


그림 2. Experimental apparatus

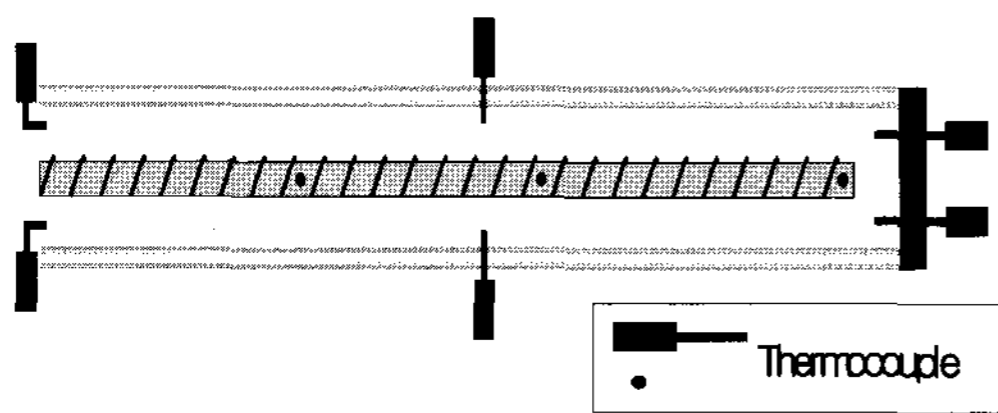


그림 3. Experimental diagram

계산을 수행하기 전에 이 수치해석 모델의 신뢰도를 검증하기 위해 그림 2, 그림 3과 같은 실험 장치를 제작하였다.

실험 장치는 우선 외관으로 아크릴관(외경 : 40mm, 두께 : 2.5mm, 길이 : 800mm)을 사용하였으며, 내관은 구리관 (외경 : 12.7mm, 두께 : 1mm, 길이 : 735mm)을 사용하였다. 그리고

작동 유체는 공기로 하였으며, 유량은 50 lpm으로 정하였다. 열원은 니크롬선 (외경:0.5mm)을 이용하였으며, 구리관의 바깥쪽 표면에 균일하게 감아 970W/m<sup>2</sup>의 열유속을 주었다. 이러한 가열 방법은 열부하의 제어가 쉽고, 균일 열유속을 줄 수 있다고 알려져 있다.<sup>(7)</sup>

그리고 실험 결과와 계산 결과를 비교하기 위해 구리관 표면 온도와 공기의 온도를 측정하였다. 구리관의 표면에 T-type 열전대를 길이 방향으로 210mm, 460mm, 710mm인 부분에 설치하여 구리관 표면 온도를 읽었으며, 공기 측 역시 T-type 봉형 열전대를 길이 방향으로 0mm, 370mm, 730mm인 부분에 설치하여 공기의 온도를 측정하였다. 그리고 계산 모델 역시 실험 장치와 같은 포인트의 온도를 알아보았다.

이러한 방법으로 실험을 통해 얻어진 결과와 수치해석을 통해 계산한 결과를 비교하였다. 우선 그림 3과 같이 실험 결과와 계산 결과를 비교하였으며, 이 결과를 다시 표 3, 표4에서 숫자로 비교하였다.

아래의 결과에서 볼 수 있듯이 최대 3%의 오차 범위 안에서 실험 결과와 계산 결과가 일치함을 알 수 있다.

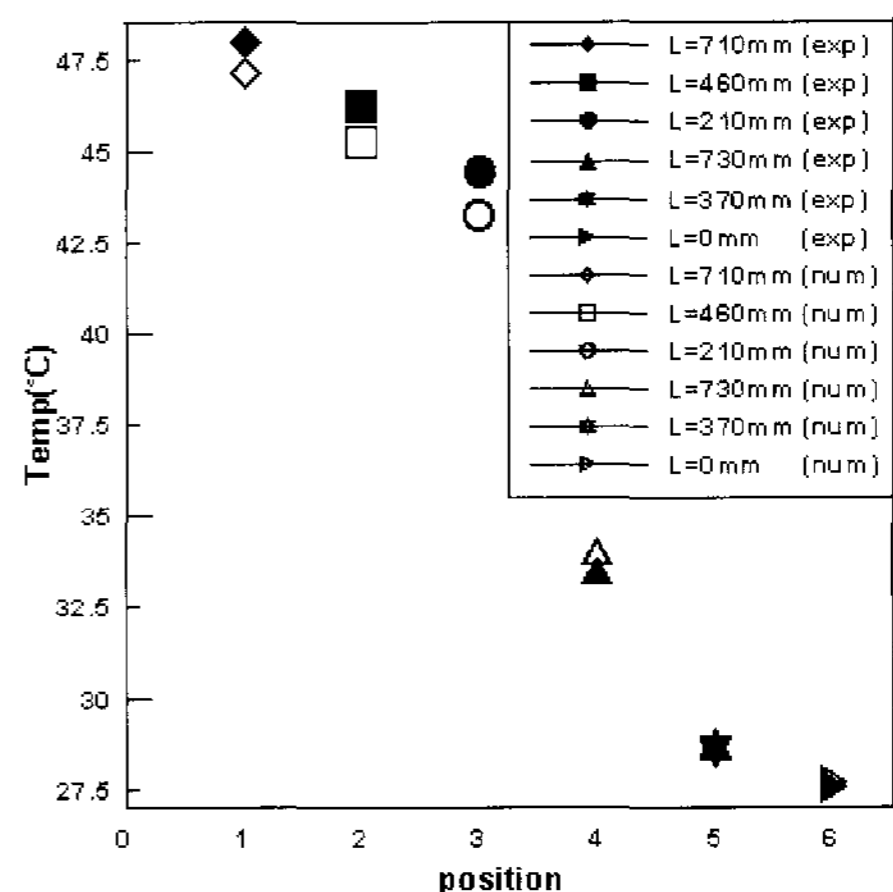


그림 4. Comparison of the experimental and the numerical results

표 3. Comparison of the numerical and the experimental results of the copper tube surface temperatures

측정 위치	계산 결과(°C)	실험 결과(°C)	오차(%)
210mm	43.28	44.44	2.61
460mm	45.28	46.20	2.00
710mm	47.12	47.92	1.66

표 4. Comparison of the numerical and the experimental results of the air temperatures

측정 위치	계산 결과(°C)	실험 결과(°C)	오차(%)
0mm	27.68	27.57	0.39
370mm	28.62	28.69	0.24
730mm	34.08	33.53	1.62

### 3. 결과

그림 5~8에서 볼 수 있듯이 유리관의 표면 온도는 축방향에 따라 높아지는데, 구리관의 끝부분에서 최고 온도가 나타난 후 감소한다. 이는 구리관 끝부분과 유리관 끝부분 사이에서 정체 영역이 생겨 열전달 없이 열손실만 생기기 때문이다.

그림 5는 공기의 유량 변화에 따른 유리관 표면의 축방향 온도다. 공기의 유량이 늘어남에 따라 유리관 표면의 온도가 낮아진다. 공기의 유량이  $7.5\text{m}^3/\text{h}$ 일 때, 유리관 끝부분의 표면 온도가 다른 경우에 비해 더 낮아진다. 이는 유량이 적으면 구리관과 유리관 끝 부분 사이의 정체 영역이 커져 복사 열손실이 커지기 때문이다. 반면에 공기의 유량이 늘어나게 되면 유리관 끝에서 표면온도의 감소폭은 작아진다. 이것은 유량이 늘어날수록 공기의 속도가 빨라져서 정체 영역이 줄어들기 때문이다.

그림 6은 구리관의 길이 변화에 따른 유리관 표면의 축방향 온도다. 구리관의 길이가 짧을수록, 유리관 표면 온도는 낮아지고 유리관 끝부분의 표면 온도 역시 크게 감소한다. 이는 구리관의 길이가 짧을수록 유리관 끝부분에서 정체 영역이 커져

열손실이 늘어나고, 얻는 열량이 줄어들기 때문이다.

그림 7은 구리관의 직경 변화에 따른 유리관 표면의 축방향 온도 변화이다. 구리관의 직경이 늘어남에 따라 구리관의 표면적이 넓어지므로 얻는 열량이 더 많아지게 되어 유리관 표면 온도가 증가하게 된다. 그리고 구리관의 직경이 25.4mm일 때, 유리관 표면 온도가 다른 경우에 비해 끝부분에서 더 많이 감소한다. 이는 직경이 커질수록 공기의 유속이 감소하기 때문에 공기가 멀리 나가지 못해 정체 영역이 커지기 때문이다.

그림 8은 구리관의 두께 변화에 따른 유리관 표면의 축방향 온도다. 구리관의 두께가 두꺼울수록 유리관 표면 온도는 높아진다. 그러나 시스템에서 받은 열량이 같기 때문에 특히 출구 즉,  $z=0$ 일 때 유리관 표면 온도는 거의 같다. 하지만 구리관의 두께가 두꺼울수록, 구리관 안쪽과 바깥쪽의 열교환이 줄어 구리관과 유리관 사이의 공기가 좀더 높은 온도를 유지한 상태로 나갈 수 있고, 구리관 전체의 온도가 좀더 균일해지기 때문에 출구 부분을 제외한 다른 부분의 온도는 구리관의 두께가 두꺼울수록 높아진다. 그리고 구리관의 두께가 두꺼울수록 공기의 유속이 빨라지므로 정체 영역이 줄어들어 유리관 끝부분의 온도 감소폭은 작아진다.

표 5~8에서는 복사 열손실을 고려했을 때의 설계변수와 작동 변수의 변화에 따른 공기의 출구 평균 온도와 시스템이 얻은 열량에 대한 열손실의 비를 보여주고 있다. 복사 열손실은 식 (3)과 같이 구하였다.

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \dot{m}_a c_{p,a} [(T_{o,a} - T_{i,a}) - (T_{loss,o,a} - T_{i,a})] \\ &= -Q_{loss} \end{aligned} \quad (3)$$

표에서 볼 수 있듯이 공기의 유량이 줄어들수록, 구리관의 길이가 길어질수록, 직경이 커질수록, 두께가 두꺼워질수록 공기의 출구 평균 온도

가 높아지게 된다. 이는 시스템에서 얻을 수 있는 온도가 높아진다는 것을 의미한다. 그러나 온도가 높아질수록 열손실 또한 커지게 된다는 것을 알 수 있다. 그러나 시스템에서 발생하는 복사 열손실은 표에서 볼 수 있듯이 최대 4% 정도로 시스템이 얻는 열량에 비해 그 값이 매우 작음을 알 수 있다. 따라서 태양열 집열기의 설계 시에는 더 많은 열량과 높은 온도를 얻는 부분에 초점을 맞춰 설계를 할 필요가 있다.

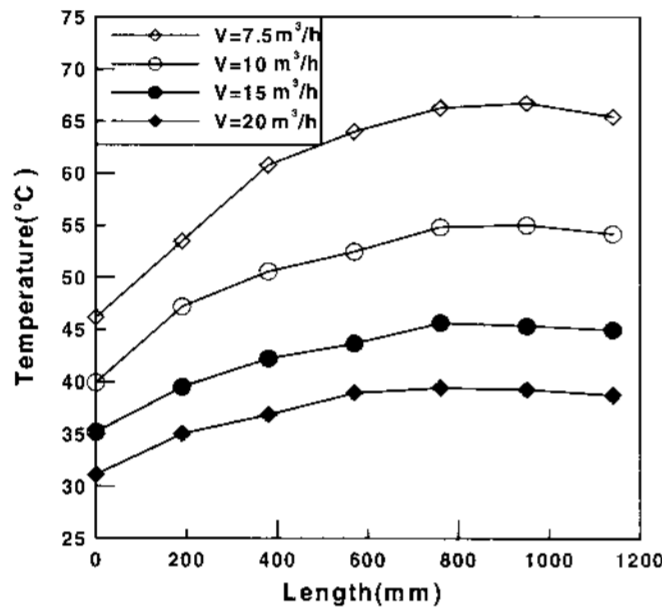


그림 5. Temperature distribution of the glass tube outer surface

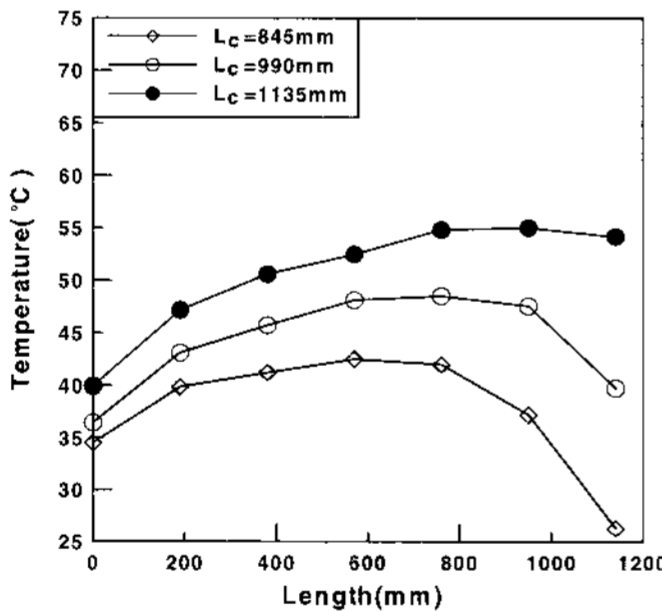


그림 6. Temperature distribution of the glass tube outer surface

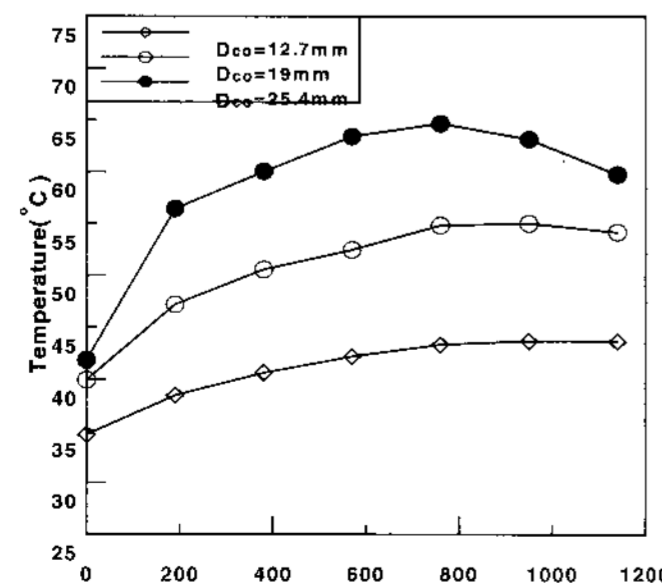


그림 7. Temperature distribution of the glass tube outer surface

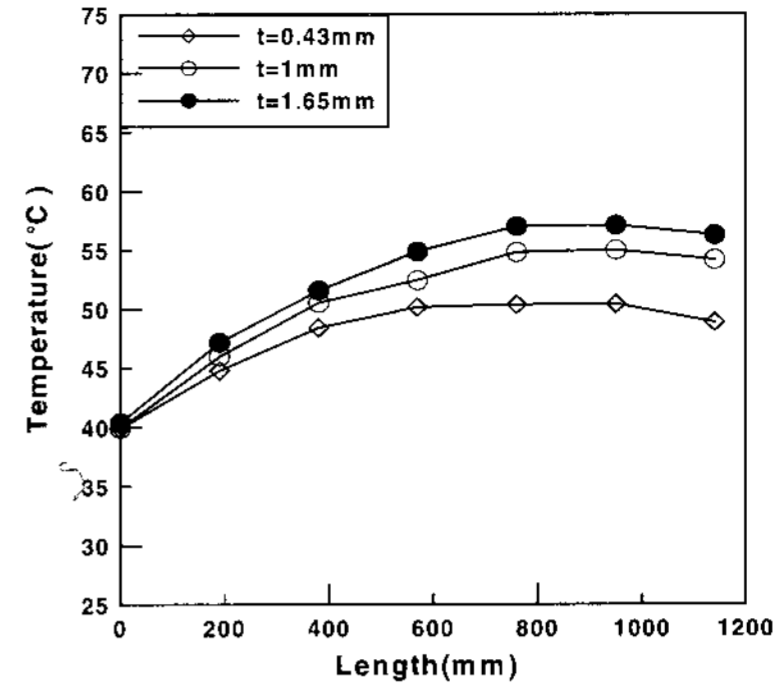


그림 8. Temperature distribution of the glass tube outer surface

표 5. Outlet temperature variation with the air flow rate

volume flow rate(m <sup>3</sup> /h)	T <sub>loss0,a</sub> (K)	ΔQ/Q(%)
7.5	314.5	4.02
10	309.6	2.85
15	305.4	2.37
20	302.3	1.9

표 6. Outlet temperature variation with the length of the copper tube

length(mm)	T <sub>loss0,a</sub> (K)	ΔQ/Q(%)
845	306.0	1.23
990	307.4	2.12
1135	309.6	2.85

표 7. Outlet temperature variation with the diameter of the copper tube

diameter(mm)	T <sub>loss0,a</sub> (K)	ΔQ/Q(%)
12.7	305.5	1.47
19	309.6	2.85
25.4	312.4	3.24

표 8. Outlet temperature variation with the thickness of the copper tube

thickness(mm)	T <sub>loss0,a</sub> (K)	ΔQ/Q(%)
0.43	309.5	2.84
1	309.6	2.85
1.65	309.9	2.87

## 4. 결론

여러 가지 중요한 설계 변수가 진공관형 태양열 집열기의 열성능에 미치는 영향과 적절한 설계점에 대해 수치해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유리관 표면 온도는 축방향 길이에 따라 높아지는데, 구리관의 끝부분에서 최고 온도가 나타난 후 감소한다. 이는 구리관 끝에서 나온 공기가 흐르지 못해 정체 영역이 발생해 열전달 없이 열손실만 생기기 때문이다.
- (2) 공기의 유량이 줄어들수록 최대 12.2K, 구리관의 길이가 길어질수록 최대 3.6K, 직경이 커질수록 최대 6.9K, 두께가 두꺼워질수록 0.4K 높은 공기 출구온도를 얻게 되지만, 열손실비는 증가하게 된다.
- (3) 집열기 설계 시 열손실비가 최대 3.24%에 불과하므로 열손실이 좀 커지게 되더라도 더 많은 열량과 높은 출구 온도를 얻는 부분에 초점을 맞춰 설계해야 한다.
- (4) 본 연구는 다양한 모델 개발을 위한 기초 자료로 활용하기 위한 연구이기 때문에 자세한 계산 및 결과 분석은 생략하였다.

## 참고문헌

1. Yin Zhiqiang, Chinese All Glass Evacuated Solar Collector Tubes during the Past 18 years, Chinese Journal of Solar Energy No.1 1997
2. Eaton C.B. and Blum H.A, The Use of moderate Vacuum Environments as a Means of Increasing the Collecting Efficiencies and Operating Temperatures of Flat-Plate Collectors, Solar Energy Vol. 17, 1975
3. Eisenhammer T. et al., Optimization of silver Based Heat Mirrors Using a Genetic Algorithm, In Proceedings of Optical Materials Technology for Energy Efficiency and Solar Energy Conversion XI, Proc. SPIE 1727, 1992
4. Gui Yuzong, Xue Zuqing, Zhou Xiaowen, and Yin Zhiqiang, Determination of emittance of Selective Absorbing Surfaces, Solar Energy Vol. 64, 1998
5. Yin Zhiqiang, Xue Zuqing, and Zhang Jian, Graded Al-N/Al Absorbing Surfaces for All-Glass Evacuated Tubular Collectors, Renewable Energy Vol. 16, 1999
6. Bofeng Lee, The Progress and Prospect of Middle/High Temperature Evacuated Tubular Solar Collector, Renewable Energy Vol. 24, 2001
7. 김철주, 진공 유리관 태양열 집열기 열파이프의 적용을 위한 기초연구, 태양에너지 Vol. 12, 1992
8. 지명국, 2002, Heat pipe를 내장한 진공관 태양열 집열기의 성능 연구, 대한설비공학회 하계학술 발표대회, pp. 58-63
9. 광희열, 2003, 진공관형 태양열 집열 기술, 한국 태양에너지 학회지, Vol. 2, No. 1, pp. 24-31