

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 20, No. 1, 2000

열손실을 고려한 PTC(Parabolic Trough Concentrator) 흡수기 최적 직경 결정에 관한 연구

강용혁*, 곽희열*, 윤환기*, 유창균*, 이동규*, 서태범**

* 한국에너지기술연구소

** 인하대학교 기계공학과

Determination of the Optimal PTC Receiver Diameter Considering Heat Losses

Y. H. Kang*, H. Y. Kwak*, H. K. Yoon*, C. K. Yoo*, D. G. Lee*, T. B. Seo**

* *Korea Institute of Energy Research*

** *Department of Mechanical Engineering, In-ha University*

ABSTRACT

Considering the optical performance of the reflector and analyzing heat losses from the receiver, the optimal diameter of the absorber for a PTC(Parabolic Trough Concentrator) system was numerically determined. The results of this study were compared with the results of the IST(Industrial Solar Technology)-PTC test to verify the validity of the model. Good agreement was obtained with the deviation range from 0.4 to 7.7%.

Generally, the net energy gained by the receiver shows the maximum at the particular absorber diameter and the specific gap size between the absorber and the glass envelop because the heat losses from the receiver becomes the minimum. The results showed that the conductive and convective heat losses became the minimum when the gap size was 7 to 10mm. Finally, it was known that the optimal absorber diameter was 62mm at 100°C, 57mm at 150°C, and 53mm at 200°C of the absorber surface temperature, respectively.

Nomenclature

f	focal length [m]
I_b	beam radiation [W/m ²]
ψ	rim angle [deg]
Δr	beam spread [m]
σ_{sun}	sun's width [mrad]
σ_{slope}	slope error [mrad]
σ_{track}	tracking error [mrad]
σ_{rec}	receiver alignment [mrad]
σ_{refl}	specular reflectance error [mrad]
n	number of standard deviation
ρ_s	reflectance of reflector
α	absorptance of absorber
τ_g	transmittance of glass envelop
Γ	flux capture fraction
\dot{Q}_{loss}	heat loss [W/m]
$\dot{Q}_{abs, rad}$	radiation heat loss from absorber surface to inner glass [W/m]
$\dot{Q}_{abs, cond/conv}$	convection heat loss from absorber surface to inner glass [W/m]
$\dot{Q}_{glass, cond}$	conduction heat loss in glass envelop [W/m]
$\dot{Q}_{envir, conv}$	convection heat loss from outer glass envelop to ambient [W/m]
$\dot{Q}_{envir, rad}$	radiation heat loss from outer glass envelop to ambient [W/m]
L	PTC length
D_{abs}	absorber outer diameter [m]
$D_{glass, i}$	glass envelop inner diameter

	[m]
$D_{glass, o}$	glass envelop outer diameter [m]
\overline{Nu}	average Nusselt number
Ra_{cyl}^*	modified Rayleigh number
K_{air}	conductivity of air [W/m K]
ϵ	emittance
T_{abs}	absorber surface temperature [°C]
T_{glass}	glass envelop temperature [°C]
T_{amb}	ambient temperature [°C]
T_{sky}	sky temperature [°C]
U_L	overall heat transfer coefficient [W/m ² °C]

1. 서 론

1970년대 후반의 유류 파동과 더불어 활발한 활동을 시작한 태양열의 이용기술에 관한 연구들은 국내외 많은 분야에서 대단히 활발하게 진행되었지만 이러한 노력에도 불구하고 국내에서의 태양열 활용 시스템의 실용화는 가정용 태양열 온수기를 제외한 모든 분야에서 지극히 미미한 발전을 거듭하여 아직 초보적인 단계에 머무르고 있는 실정이다.

기존의 평판형 집열기는 태양열 흡수면적이 외부로의 열손실 면적이 되므로 온도를 높게 올리는 것이 어려워 온수급탕과 같은 비교적 낮은 온도에 널리 이용되어 왔다. 그러나 태양열을 산업용 에너지로 이용하기 위해서는 100°C 이상의 온도를 필요로 하고 이러한 요구를 만족시키기 위해서는 반사경과 흡수기가 결합된 집광형 집열기 형태이어야만 한다. 이러한 집광형 집열기들은 포물선형 집광기의 광학원리를 이용하여 포물선축에 평행하게 입사하는 광선을 초점으로 반사시키

는 성질을 갖는다.¹⁾

PTC(Parabolic Trough Concentrator)도 이러한 집광형 집열기의 한 형태이며 선 집광형태이고 약 100~300°C까지의 온도범위에서 작동될 수 있다. 일반적으로 PTC는 초점 위치에 원형 흡수기(receiver)가 있고 이러한 원형 흡수기는 집광 에너지를 흡수하는 흡수관(absorber)과 흡수기의 열손실을 줄이기 위해서 흡수기를 둘러 싸고 있는 유리관(glass envelop)으로 구성된다.

PTC의 성능은 설계 기술, 제조기술, 사용된 재질에 따라 상당한 차이를 보인다.²⁾ 태양열을 이용하기 때문에 재질에 영향을 가장 많이 받지만 그 이전에 설계 기술이 최적화 될 필요성이 있다. PTC를 설계하는데 가장 먼저 고려해야 할 점이 시스템의 광학적 분석이 이루어져야 하며 이러한 광학적 분석은 광학 오차를 근거를 토대로 하고 그 다음 흡수관 면적이 열손실 면적이 되므로 열손실을 고려한 PTC 크기와 최적 흡수관 직경을 결정해야 한다.

본 연구는 PTC에 대한 설계 관점, 즉 PTC의 광학적 분석을 토대로 하여 광학적 오차가 흡수기 직경에 미치는 영향, 흡수관 직경 및 유리관과 흡수관 사이의 간격을 결정하는데 그 목적이 있다.

2. 이론적 고찰

2.1 광학적 해석

PTC의 최적설계를 위한 PTC의 광학적 분석은 집광기(concentrator)의 최적 림각(optimum rim angle)과 반사광의 에너지 분포를 예측하는데 사용된다. 이러한 분석은 포물선에 대한 기본적인 지식을 필요로 하고 가장 이상적인 경우 즉, 입사광이 포물선축에 평행하게 입사하는 경우를 수학적으로 묘사하고 난 다음, 입사광이 유한한 각도를 갖고 입사할 경우를 고려해야 한다. 먼저

미소 림각 $d\phi$ 에 대한 반사 플럭스(flux)를 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{d\phi}{d\psi} = \frac{2f\rho I_b}{1 + \cos(\psi)} \quad (1)$$

반사광 플럭스는 초점거리 f 와 집광기 림각, ψ 의 함수이다. 즉, 초점거리, f 가 결정되면 최적 림각이 결정된다. 그러나 입사광이 포물선 축과 평행하지 않게 입사될 경우 초점에서는 반사광 분산(beam spreading)이 일어나게 된다. 이러한 경우는 태양 disc의 유한한 크기(2.8mrad) 때문에 실제 입사광은 축과 평행하지 않게 입사하게 된다. 그림 1를 보면 태양 disc의 유한한 크기, ϵ 을 갖고 입사를 한다면 초점에서 이에 상응하는 반사광 분산이 발생한다.

반사광이 초점에서 형성되는 이미지의 폭을 Δr 이라고 하면,

$$\Delta r = \frac{4f \tan(\epsilon/2)}{(1 + \cos \psi)} \quad (2)$$

이러한 Δr 이 초점에서 일어날 수 있는 최소 반사광 분산이다. 그러나 Δr 은 다음과 같은 오차에 의해서 증가하게 된다.

- 1) 미러를 해당 포물선에 일치시키는데서 발생하는 오차(slope error)
- 2) 입사광선의 비반사에 의한 오차
- 3) 추적 오차
- 4) 흡수기를 배치하는데서 발생하는 오차

이러한 오차들로 인해 흡수관 상에 형성되는 이미지의 폭은 증가하게 된다. 광학적 오차들은 무작위(random) 하다고 가정을 하고 표준편차의 단위를 갖는다. 오차들의 조합된 영향은 통계적으로 결정되고 태양의 강도는 정규분포로 근사화

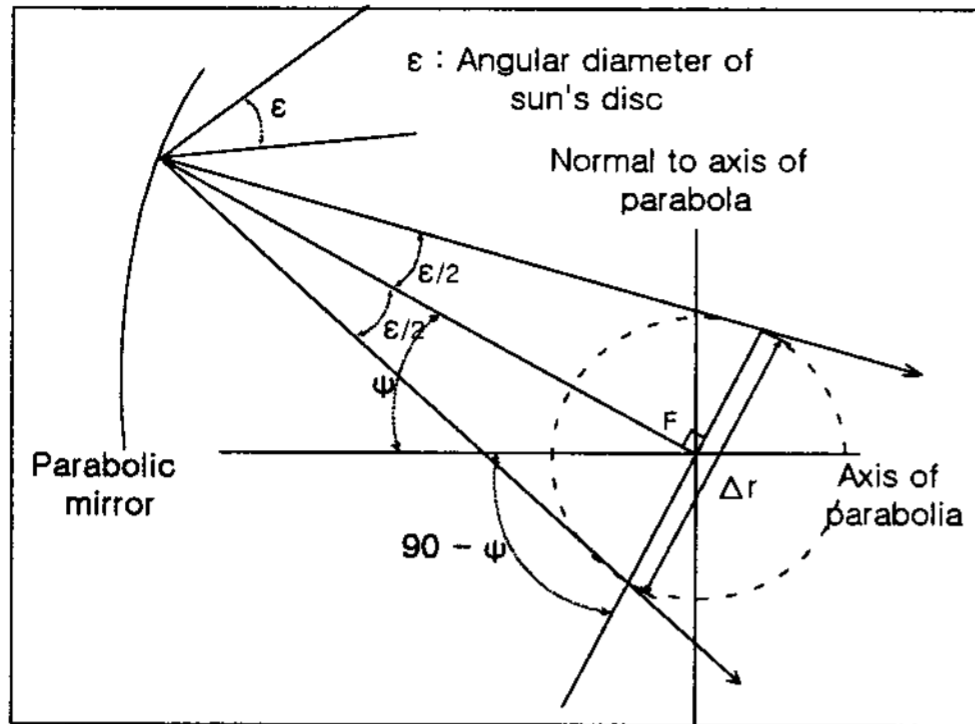


Fig. 1. Reflection of nonparallel rays from a parabolic trough collector

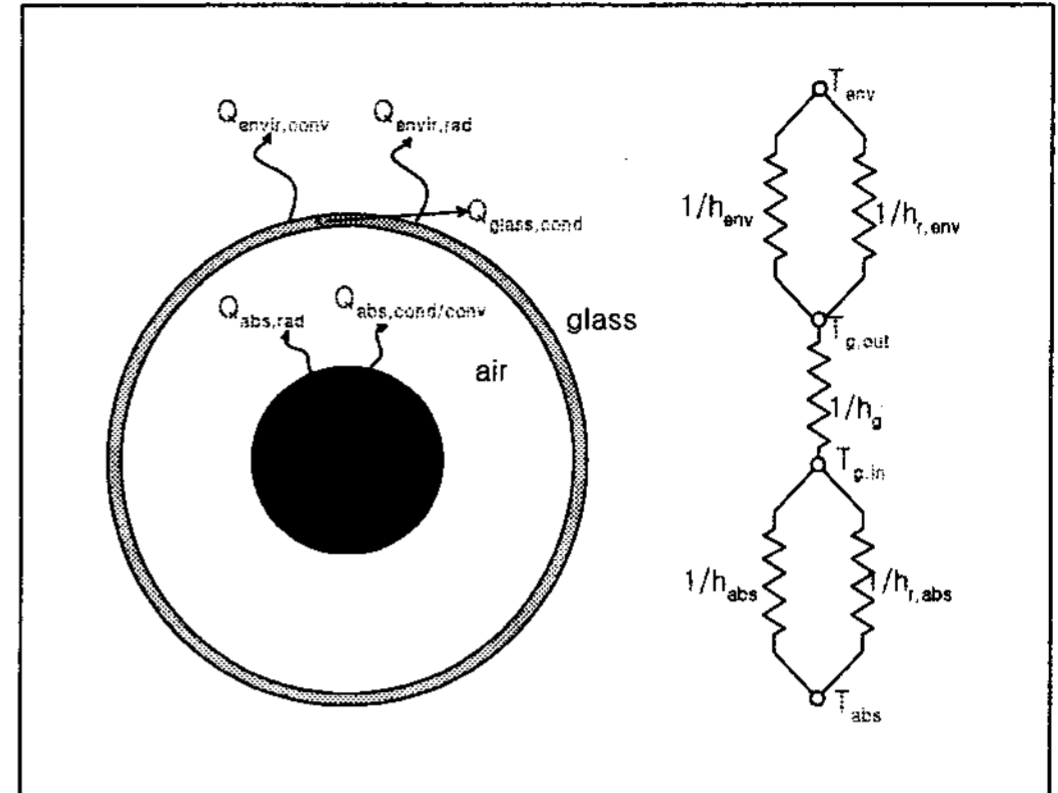


Fig. 2. Heat loss mode

시킬 수 있고 광학오차(σ)가 증가할 수록 반사광 분산이 커지는 결과가 된다.

이러한 광학오차는 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{sun}}^2 + 2\sigma_{\text{slope}}^2 + \sigma_{\text{track}}^2 + \sigma_{\text{rec}}^2 + \sigma_{\text{refl}}^2}$$

이러한 광학오차를 고려하여 반사광 분산이 되는 폭의 길이는 다음과 같다.

$$\Delta r = \frac{4f \tan(n \frac{\sigma}{2})}{(1 + \cos \psi)} \quad (3)$$

그리고 Δr 에 의해서 반사광이 흡수관에서 어느 정도 비율로 차단되는가를 결정한다. 따라서,

Δr 에 의해서 차단되는 에너지, $\Delta \dot{Q}_{\text{inter}}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta \dot{Q}_{\text{inter}} = \rho_s \tau_g a \Gamma \left(\frac{d\phi}{d\psi} \right) \Delta \psi \quad (4)$$

차단비율, Γ 는 반사면에서 반사된 태양광 중에서 Δr 에 의해서 차단되는 비율을 의미하고 광학적 오차에 따라 달라지게 된다.

2.2 열손실 해석

열손실 모델은 PTC의 흡수기로부터의 열손실을 예측하기 위해서 사용된다. 열손실계수는 흡수관 온도의 함수이다. 열손실을 흡수관의 평균온도의 함수로 표현함으로써 열전달 매체의 입/출구 온도, 유량, 열전달 매체 특성을 표현해줄 필요가 없어진다. PTC의 열손실을 예측하기 위한 모델은 흡수관내를 흐르는 열전달 매체는 정상상태이고 흡수관과 유리관은 회체(gray surface) 및 산란체(diffuse surface)와 같이 열복사를 하는 방사체이거나 흡수체로 간주하였다.

그림 2에 보여지는 것처럼 열평형 방정식은 식 (5), (6)과 같이 정의할 수 있다.^{2),3),4)}

$$\dot{Q}_{\text{abs,rad}} + \dot{Q}_{\text{abs,cond/conv}} = \dot{Q}_{\text{glass,cond}} \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{\text{glass,cond}} = \dot{Q}_{\text{envir,conv}} + \dot{Q}_{\text{envir,rad}} \quad (6)$$

여기서,

$$\frac{\dot{Q}_{\text{abs,rad}}}{L} = \frac{\pi D_{\text{abs}} \sigma (T_{\text{abs}}^4 - T_{\text{glass,i}}^4)}{1/\epsilon_{\text{abs}} + \frac{D_{\text{abs}}}{D_{\text{glass,i}}} \frac{1}{\epsilon_{\text{glass,i}}} - 1} \quad (7)$$

$$\frac{\dot{Q}_{\text{abs,cond/conv}}}{L} = \overline{Nu} \pi K_{\text{air}} (T_{\text{abs}} - T_{\text{glass,i}}) \quad (8)$$

$$\overline{Nu} = \frac{h\delta}{K_{air}} = \frac{0.772\left(\frac{Pr}{0.861+Pr}\right)^{1/4}(Ra_{cyl}^*)^{1/4}}{\ln\left(\frac{D_{glass,i}}{D_{abs}}\right)} \quad (9)$$

$$Ra_{cyl}^* = \frac{[\ln\left(\frac{D_{glass,i}}{D_{abs}}\right)]^4}{\delta^3(D_{abs}^{-3/5} + D_{glass,i}^{-3/5})^5} Ra_{\delta} \quad (10)$$

$$Ra_{\delta} = \frac{g\beta(T_{abs} - T_{glass})\delta^3}{\alpha\nu}, \quad \delta = \frac{D_{glass,i} - D_{abs}}{2}$$

위의 식은 $10^2 \leq Ra_{cyl}^* \leq 10^7$ 의 범위에 있을 때 사용할 수 있는 상관식이다. 만약 $Ra_{cyl}^* < 100$ 일 경우 전도만을 고려해도 무방하다. 즉, $h \approx K_{air}/L$ 이다.³⁾

$$\frac{\dot{Q}_{glass,cond}}{L} = \frac{2\pi K_{glass}}{\ln\left(\frac{D_{glass,o}}{D_{glass,i}}\right)} (T_{glass,i} - T_{glass,o}) \quad (11)$$

$$\frac{\dot{Q}_{envir,conv}}{L} = \pi D_{glass,o} h_g (T_{glass,o} - T_{amb}) \quad (12)$$

여기에서, h_g 는 유리관 온도와 외기온도 영향을 고려한 열전달 계수이다.⁴⁾

$$h_g = 0.314 \left[\frac{(T_{glass,o} - T_{amb})}{2D_{glass,o}} \right]^{0.27} \quad (13)$$

$$\frac{\dot{Q}_{envir,rad}}{L} = \varepsilon_{glass,o} \pi D_{glass,o} \sigma (T_{glass,o}^4 - T_{sky}^4) \quad (14)$$

식 (14)에서 천공온도(sky temperature)는 외기온보다 6°C 정도 낮다고 가정하였다.⁴⁾

흡수기 열손실은 총괄 열손실계수, U_L 를 고려하여 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{Q}_{loss} = U_L \pi D_{abs} (T_{abs} - T_{amb}) \quad (10)$$

PTC의 흡수기에서 열손실을 계산하기 위해서는 일단 흡수관 조건과 외기 조건이 주어져야 한다. 그 다음 열평형 식(5), (6)을 이용하여 유리관의 온도를 계산한다. 이러한 과정은 열평형 방정식을 만족하는 유리관의 온도를 찾기 위해서 반복 계산에 의해 수행된다.

3. 결과 및 검토

3.1 모델의 타당성

열손실을 고려한 PTC 흡수관 최적 직경을 결정하기 위해서 광학 모델 및 열손실 모델에 대한 타당성 검증을 위해서 미국 IST(Industrial Solar Technology) PTC 실험 결과와 비교하였다. 표 1에 실려 있는 IST PTC 사양에 대해서 작동온도가 200°C이하인 상황에 대해서 각 실험 데이터와 비교를 한 결과 그림 3에 나타내었다. 작동 온도가 높을수록 모델과 실험 결과의 오차는 증가하였다. 실험 결과는 열손실이 작동온도에 제곱에 비례하는 결과를 보였지만 모델은 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 그래서 온도범위를 200°C 이하로 설정하였다.

비교 결과 최소 0.46%에서 최대 7.7%의 오차

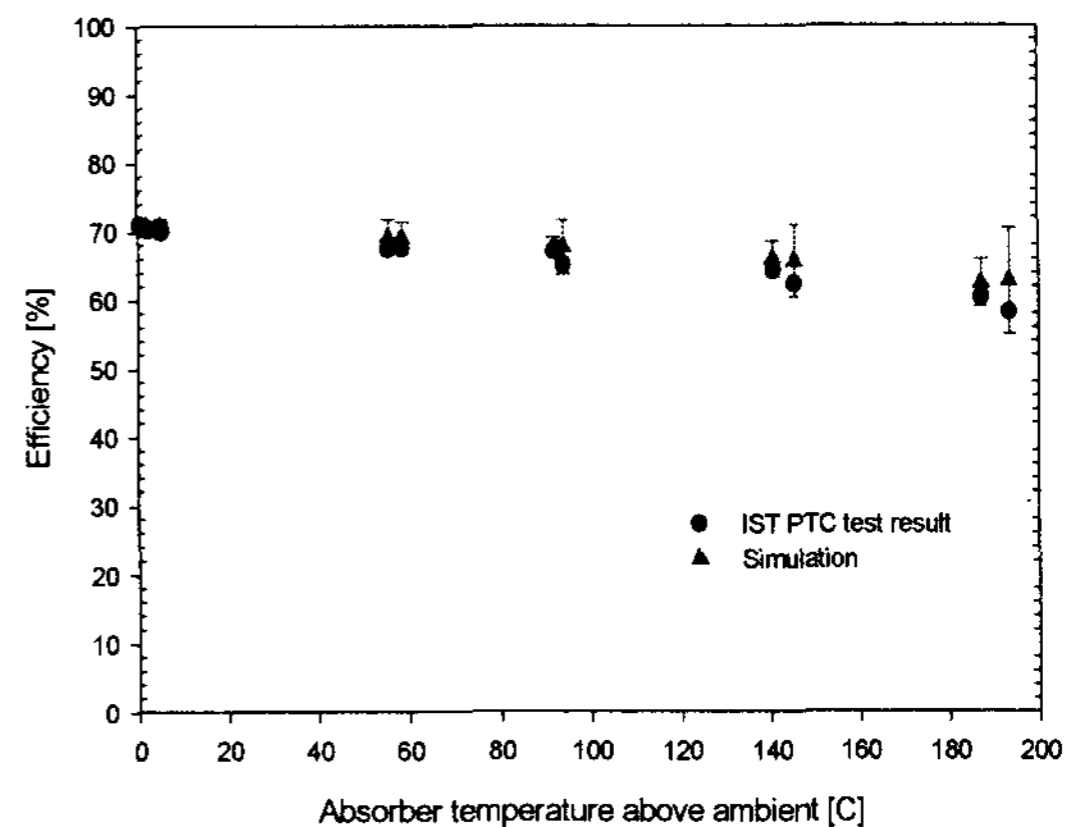


Fig. 3. Comparison of IST PTC test results with simulation model

Table 1. IST PTC Specifications

rim angle	72 °
focal length	0.762 m
PTC length	6.1 m
reflectance	0.83(3M SA-85)
absorber diameter	0.051 m
glass envelop diameter	0.075 m
absorber absorptance	0.94
absorber emittance	0.1 (100°C) 0.25(300°C)
glass transmittance	0.91
glass emittance	0.92

를 나타내어 비교적 모델이 실험 결과와 잘 일치하였다.

광학적 오차에 대한 측정치가 없으므로 해서 시뮬레이션 모델과 실험값을 비교한 결과 총 광학오차는 9.18 mrad로 나타났다. 시뮬레이션의 조건은 IST의 PTC 실험결과를 근거로 하여 기준 조건을 설정하였고 작동온도에 따른 최적 흡수관 직경을 구하기 위해서 직달 일사량, 800 W/m², 외기온도 5°C로 설정하였다.

3.2 림각 및 광학 오차가 흡수관 직경에 미치는 영향

그림 4는 림각(rim angle)에 따른 흡수관에서 반사광을 차단하는 비율을 보여주고 있다. 림각이 증가할수록 차단 비율은 증가를 하고 흡수관 직경이 증가할 수록 차단 비율은 높아진다. 흡수관 직경이 작을수록 림각에 따른 반사광 차단비율 증가량이 급격하게 변했다. 그리고 흡수관 직경이 고정된 상태에서 보면 대략 림각이 80~100° 일

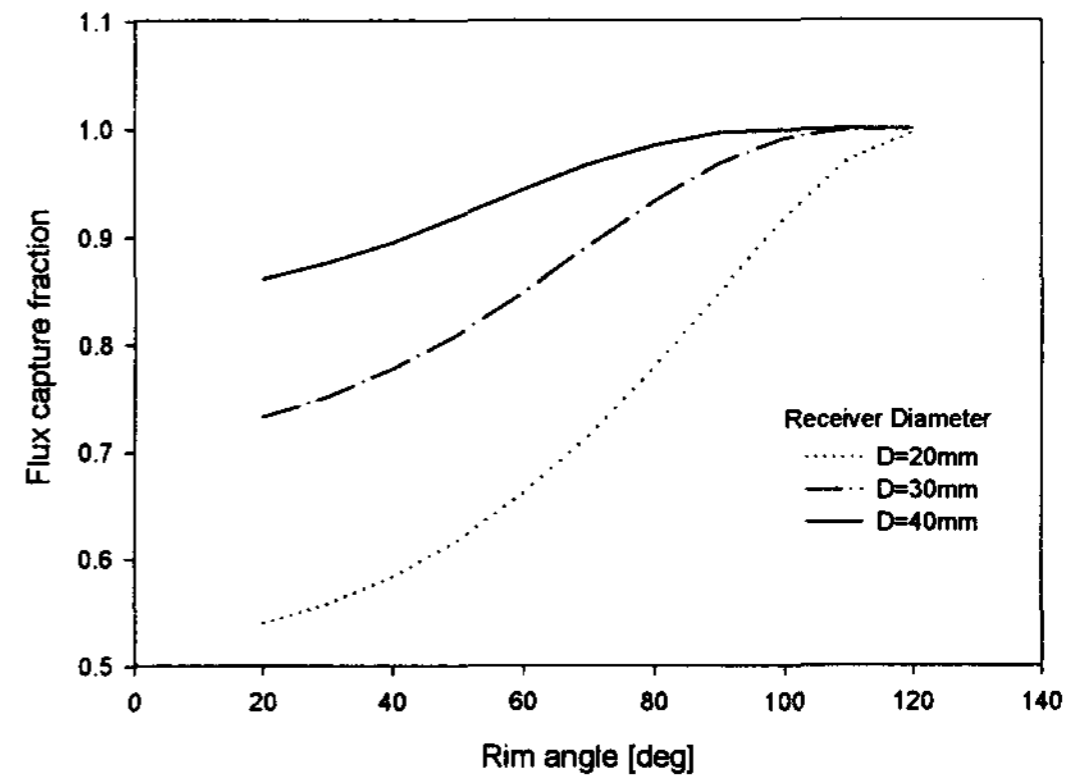


Fig. 4. Flux capture fraction with rim angle

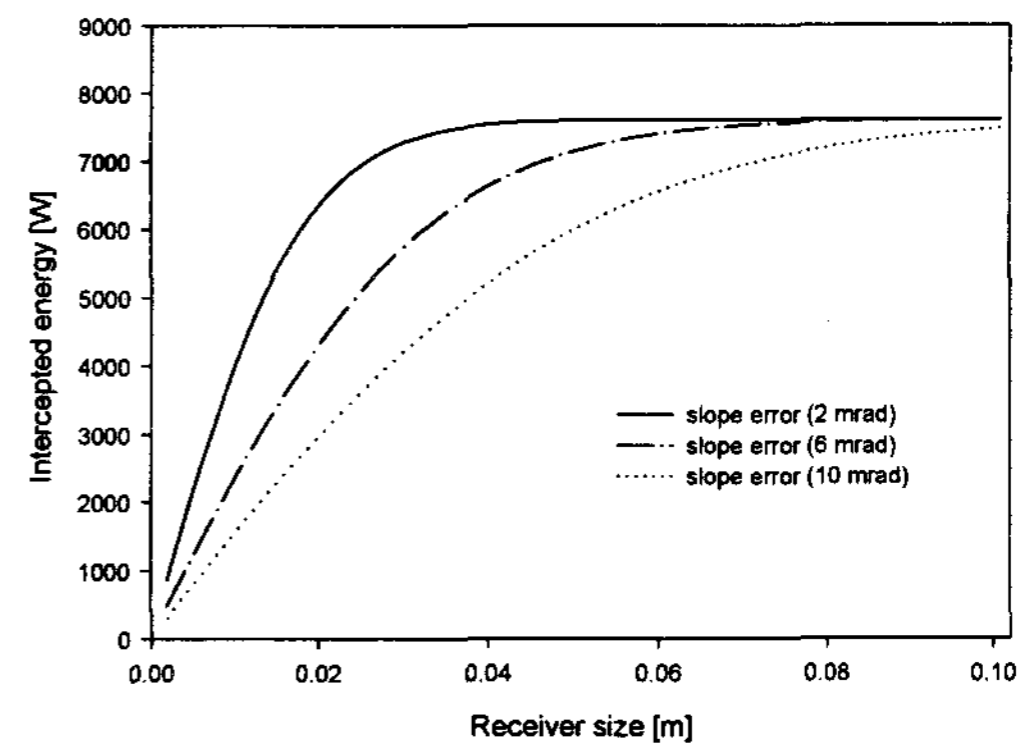


Fig. 5. Intercepted energy by absorber with slope error

때 차단비율 증가량이 가장 높다.

그림 5는 반사경의 경사오차(slope error)에 따른 흡수관에서 차단되는 에너지를 보여주고 있다. 경사오차는 PTC의 반사판의 제작과 관련이 되고 이러한 오차가 성능에 가장 영향을 많이 미친다. 일반적으로 경사오차가 증가할 수록 초점에 형성되는 에너지 밀도는 넓게 분포를 하게 된다. 그러므로 흡수관 직경은 커지고 중심점에서의 최대 강도(peak intensity)는 작아지게 된다. 경사오차의 증가는 총 광학적 오차의 증가를 의미하므로 광학적 오차의 증가는 에너지 밀도의 분산을 의미한다. 이러한 오차는 반사면을 제작할 때 설계 포물선에서 얼마나 벗어나 있는가를 판단하는 척

도이다.

3.3 흡수관과 유리관 사이 간격

흡수기의 흡수관의 최적 직경을 구하기 전에 흡수관과 유리관 사이 간격을 결정해야 한다. 이러한 간격은 흡수관과 유리관 사이의 상태, 즉 진공상태이거나 열전도도가 낮은 기체로 채워져 있는 경우 또는 공기가 채워져 있는 경우 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 공기가 채워져 있는 경우를 고려하였다. 즉 흡수관과 유리관 사이에 있는 공기는 자연대류에 의해 외기로 열을 손실하게 된다. 이러한 열손실은 식(9)에서 Ra_δ 의 함수로 주어진다. Ra_δ 는 흡수관의 온도와 유리관의 온도, 흡수관과 유리관 간격에 따라 달라진다. 흡수관과 유리관 간격에 따른 열손실을 구하고 이 결과로부터 흡수관과 유리관 간격을 결정하였다.

그림 6은 외기온이 10°C일 때 흡수관 표면 온도 및 흡수관과 유리관 사이의 간격에 따른 열손실을 보여주고 있다. 간격 크기가 7mm까지 열손실은 급격히 감소하다가 서서히 증가를 하였다. 즉, 간격 크기가 너무 작으면 자연대류에 의한 영향보다는 전도에 의한 영향이 커지게 되고 간격

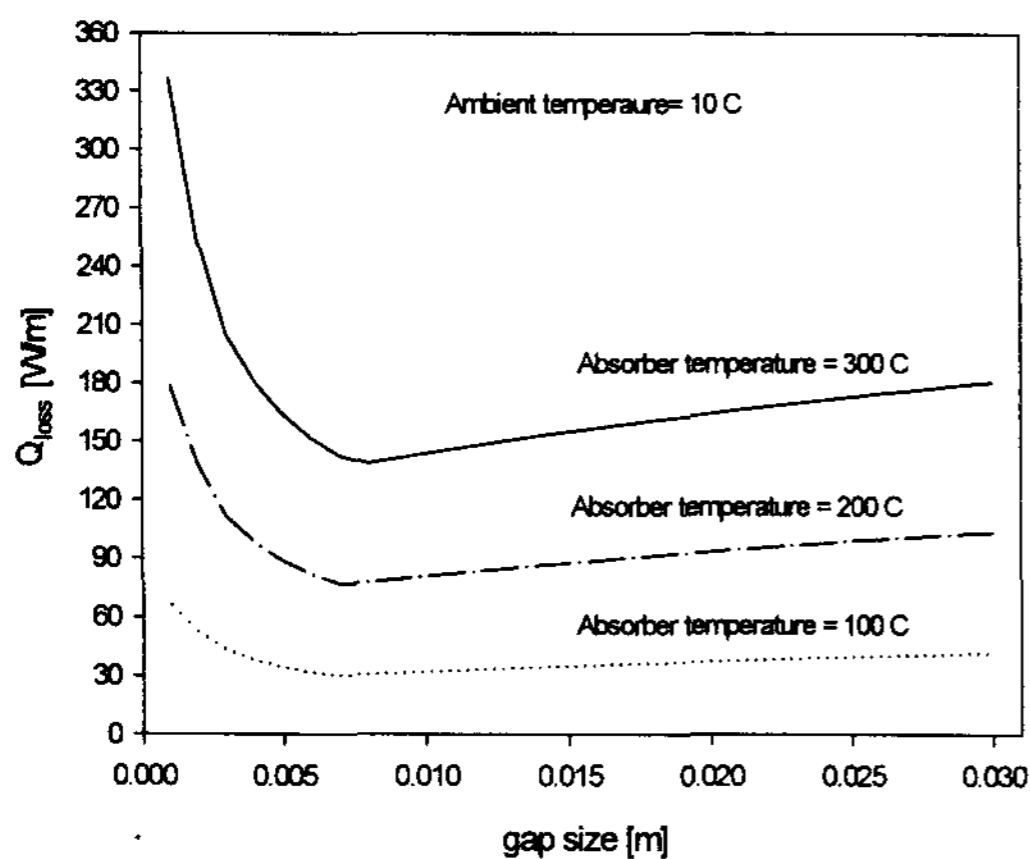


Fig. 6. Heat loss with gap size between absorber and glass envelop

크기가 너무 크면 자연대류에 의한 영향이 커지게 된다. 그러므로 자연대류가 시작되는 간격에서 최소의 열손실이 발생한다.

간격이 7mm이하에서 Ra_{cyl}^* 은 100이하의 값을 갖는다. 그러므로 이 영역에서는 전도에 의한 영향만이 고려된다. 그러므로 본 시뮬레이션 조건에서 흡수관과 유리관 사이 간격은 7~10mm를 유지하는 것이 가장 열손실을 줄이는 최적 간격이다. 그리고 흡수관 표면 온도가 증가할수록 열손실이 커지고 흡수관과 유리관 사이 간격 결정은 중요하게 작용됨을 알 수 있다. 즉 흡수관 표면 온도가 100°C일 경우 간격 크기에 따라 열손실이 최소 30[W/m]에서 최대 60[W/m]로 변화폭이 완만하게 변했지만 300°C일 경우, 열손실이 최소 150[W/m]에서 최대 330[W/m]로 간격 크기에 따라 변화폭이 심했다.

3.4 최적 흡수관 직경

PTC의 최적 흡수관 직경은 PTC의 광학적 요소와 열손실을 고려하여 결정하게 된다. 흡수관 직경이 증가함에 따라 반사광을 차단하는 비율은 증가하다가 임계 크기 (critical size)에서 1로 일정하게 되지만 열손실은 계속해서 증가하게 된다. 그러므로 최적 흡수관 직경에서 총 순수 에너지는 최대가 된다.

본 연구에서는 9.18mrad의 광학오차에서 흡수관이 반사광을 모두 차단하는 직경은 75mm로 나타났다.

그림 7은 작동온도와 흡수관 직경에 따른 흡수관에서의 획득 에너지를 보여주고 있다. 고정된 일사량 조건하에서 작동온도가 증가할수록, 흡수관 직경이 증가할수록 열손실이 증가함으로 획득 에너지량은 감소하고 최적 흡수관 직경도 열손실을 줄이기 위해서 작게 형성된다. 흡수관 표면 온도가 100°C인 경우, 흡수관 직경이 62mm에서 최대 획득에너지량을 보였고 150°C인 경우 57mm, 200°C인 경우, 53mm에서 획득에너지가

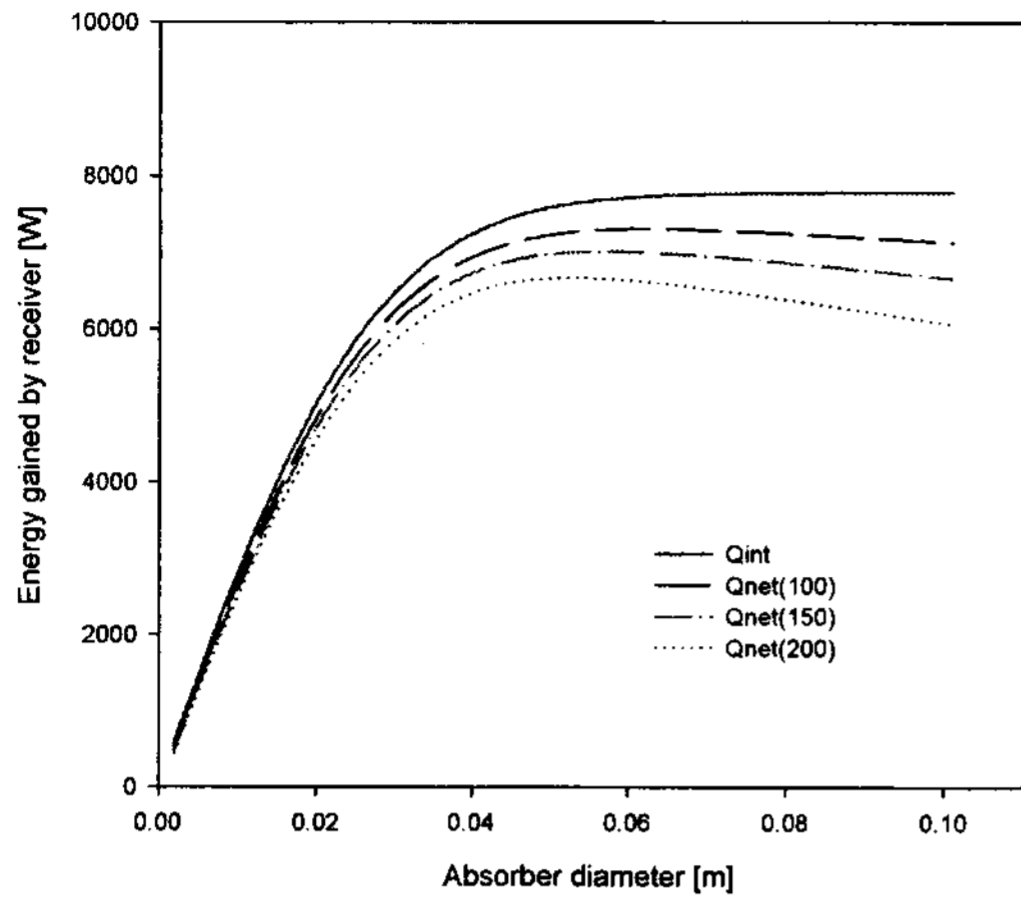


Fig. 7. PTC gain energy with absorber diameter

최대를 보였다. 이 때의 효율은 100°C인 경우가 67.7%이고 150°C인 경우가 64.5%이고 200°C인 경우가 61.7%로 나타났다.

3. 결론

열손실을 고려한 PTC 흡수기 최적 직경을 구하기 위한 시뮬레이션을 통해서 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 시뮬레이션 모델의 검증과 기준 조건 설정을 위해서 IST의 PTC 실험 결과와 비교한 결과 최소 0.46%에서 최대 7.7% 오차를 나타내어 모델이 타당성을 검증하였다.
- 2) 흡수관 직경이 고정된 상태에서 보면 80~10

0°의 립각에서 반사광 차단 비율이 가장 높았다.

- 3) 흡수관과 유리관 사이의 열손실을 최소로 하는 최적 간격은 7mm에서 10mm사이임을 보였다. 그리고 흡수관 표면 온도가 300°C일 경우 열손실이 최소 150W/m²에서 최대 330W/m²를 보여주었고 흡수관 표면온도가 증가할수록 흡수관과 유리관 사이 간격결정이 열손실을 줄이는 가장 중요한 변수임을 알았다.
- 4) 광학적 분석과 열손실을 고려한 흡수관 최적 직경은 100°C일 때 62mm, 150°C일 때 57mm, 200°C일 때 53mm로 나타났다.

참고 문헌

1. 한국에너지기술연구소, “중·고온 집광 시스템 및 활용 기반기술 연구”, 1997, pp.3~5.
2. R. Gee, H. W. Gaul, D. Kearney and A. Rabl, “Long-Term Average Performance between of Parabolic Trough Improvements”, 1980, pp.1~10.
3. W. B. Stine and R. W. Harrigan, “Solar Energy Fundamentals and Design”, 1985, pp.181~198.
4. F. P. Incropera and D. P. DeWitt, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, 1996, pp.509~512.