

## 접시형 태양열 집광시스템용 흡수기의 자연대류 열손실 수치해석 연구

강 명철<sup>1)</sup>, 강 용혁<sup>2)</sup>, 김 종규<sup>3)</sup>, 김 진수<sup>4)</sup>, 유 성연<sup>5)</sup>

### Numerical investigation of natural convection heat loss in solar receiver for dish concentrating system

Myeongcheol Kang, Yongheack Kang, Jongkyu Kim, Jinsoo Kim, Seongyeon Yoo

**Key words** : Dish concentrating system(접시형 집광시스템), Solar Receiver(태양열흡수기),  
natural convection heat loss(자연대류 열손실)

**Abstract** : In dish concentrating system, natural convection heat loss occurs in cavity receiver. Heat loss mechanisms of conduction, convection, and radiation can reduce the system efficiency. To obtain the high efficiency, the receiver is to absorb the maximum of solar energy and transfer to the working fluid with minimum of heat losses. The convection heat loss is an important factor to determine the system performance. Numerical analysis of the convection heat loss of receiver was carried out for varying inclination angle from 0° to 70° with temperature range from 400°C to 600°C using the commercial software package, Fluent 6.0. The result of numerical analysis was comparable with convection heat loss model of solar receiver.

### 1. 서 론

태양열을 이용한 집광형 집열기는 100°C 이상의 고온을 얻을 수 있으므로 에너지의 효율적인 이용에 가장 적합하고 선진국에서는 태양열 발전 및 산업 공정열 적용에 대한 연구가 진행되고 있다. 태양열을 이용한 고온용 발전시스템으로는 접시형 집광시스템이 이용되고 있으며 이중 핵심 요소인 흡수기에 대한 연구/개발이 중요하게 대두되고 있다.

흡수기 설계의 기초자료를 위한 연구로는 반사경에 의해 반사된 태양 복사 플럭스의 특성 분석과 흡수기 내부의 열손실 현상에 대한 실험적, 수치적 해석이 있다. Taumofolau[1] 등은 태양열 집광기의 동공흡수기에서의 자연대류 열손실을 평가하기 위해 흡수기 각도를 증가시키면서 실험을 수행하였다. 동공 흡수기에서의 자연대류 열손실을 측정하기 위한 전기 가열용 흡수기를 제작하여 450~650°C의 온도범위에서 실험하였고 동공의 직경과 개구부 직경의 비를 이용하여 동공의 개방유무에 따른 열손실을 측정하였다.

그리고 Synthetic Schlieren 기술을 이용하여 동공에서 외기로의 유동패턴을 가시화하였다. 또한 CFD 상용프로그램을 이용한 대류 열손실의 수치모델링을 수행하였다.

Kumar[2] 등은 태양열 집광시스템의 동공 흡수기에서의 자연대류 열손실을 수치해석적인 연구를 통하여 동공외부 표면이 단열된 조건과 단열이 안된 조건에 맞는 Nusselt number 상관식을 유도하였다. Reynolds[4] 등은 사다리꼴 형태의

- 1) 한국에너지기술연구원 태양열수력연구센터  
E-mail : mckang21@kier.re.kr  
Tel : (042)860-3743 Fax : (042)860-3739
- 2) 한국에너지기술연구원 태양열수력연구센터  
E-mail : yhkang@kier.re.kr  
Tel : (042)860-3513 Fax : (042)860-3739
- 3) 한국에너지기술연구원 태양열수력연구센터  
E-mail : rnokim@kier.re.kr  
Tel : (042)860-3477 Fax : (042)860-3739
- 4) 한국에너지기술연구원 태양열수력연구센터  
E-mail : jnskim@kier.re.kr  
Tel : (042)860-3549 Fax : (042)860-3739
- 5) 충남대학교 기계설계공학과  
E-mail : syyooh@cnu.ac.kr  
Tel : (042)821-6646

동공 흡수기의 최적 설계를 목적으로 열손실 특성을 실험과 수치해석적인 방법으로 수행하였다. 그리고 동공내의 유동흐름을 유동가시화 기술을 이용하여 획득하였다.

Dish형 집광시스템에 사용되고 있는 동공 흡수기는 동공입구에서 외부로 열손실이 일어난다. 동공측에서 발생하는 대류 열손실을 예측하기 위한 몇가지 모델이 제시되었다. 그러나 각 형태에 따라 정확한 열손실을 계산하는데 어려움이 있다. 본 논문에서는 집광형 시스템에 적용할 흡수기의 열손실을 예측하기 위해 기존 제시된 모델을 이용하여 열손실을 계산하였으며 전산해석을 통하여 얻어진 결과와 비교하였고 동공에서 외부로의 유동 흐름을 예측하였다.

## 2. 전산해석

집광형 집열기의 동공 흡수기에서 흡수기 각도에 따라 자연대류 열손실이 발생한다. 흡수기 성능을 판단할 때 자연대류 열손실은 중요한 요소이고 흡수기 각도의 변화에 따라 많은 영향을 미친다. 그러므로 자연대류 열손실을 판단하기 위해 흡수기 각도와 동공표면의 온도를 변화시키면서 열손실을 예측하였다.

동공에서의 자연대류 열손실을 2-D로 수치해석하기 위해 상용프로그램인 Fluent 6.0을 사용하였다. 외기영역은 넓은 범위의 영역을 설정하여 흡수기는 영역의 중심에 위치하도록 하였고 영역조건을 pressure-inlet 경계 조건으로 가정하였다. 실제 흡수기는 무한한 외기영역에 노출되어 있기 때문에 수치해석에서는 외부영역의 크기에 따라서 해석의 차이가 발생할 수 있다. 그러므로 외부영역은 외기온도 조건을 갖는 충분히 큰 wall에 의해 둘러 쌓여있다고 가정해야 한다. 따라서 외기 영역을 결정하기 위해 외기 input 조건과 흡수기의 input 조건을 동일하게 가정한 경우 흡수기와 인접한 부근에서 작동유체와 열흐름에 의한 영향이 무시될 수 있도록 외부영역의 크기를 결정하였다. 여기서는 흡수기 직경의 30배의 크기로 외부 영역 크기를 정하였다.

동공 흡수기의 경계조건은 동공 표면의 온도 ( $T = T_{surf}$ )를 일정하게 하였고 외부영역은 Pressure\_inlet 조건으로 경계조건은  $P = P_{atm}$ 을 적용하였다. 그리고 동공 흡수기의 외부 표면은 단열조건(flux=0)을 적용하였다.

· 외기영역 경계조건: pressure-inlet boundary

$$P = P_{atm}, T = 27^\circ\text{C}$$

· 흡수기 동공측 경계조건: isothermal boundary

$$T = 400, 500, 600^\circ\text{C}$$

· 흡수기 외부표면: adiabatic boundary

$$\frac{\partial T}{\partial \phi} = 0$$

laminar, steady-state, 2-D 지배방정식을 해석하였고 운동량 방정식을 풀기 위해 자연대류 유동에 있어 수렴 속도가 빠른 Boussinesq 모델을 적용하였다. 나머지 공기의 물성값은 온도에 대한 함수로 계산하여 입력하였다. 수치해법으로 first order upwinding scheme, SIMPLEC 알고리즘을 사용하였고 압력에 대한 이산화 방법은 PRESTO!를 이용하였다. 수렴판정은 연속방정식, 운동량방정식과 속도성분은  $10^{-3}$ 이고 에너지방정식은  $10^{-6}$ 이하가 되는 시점으로 정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

흡수기 경사 각도가  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ 에 대하여 제시된 모델에 의한 계산과 전산해석을 수행하여 결과를 비교하였다. 제시된 모델을 이용한 계산은 온도를  $300\sim 700^\circ\text{C}$ 로 변화시키면서 수행하여 온도의 영향을 살펴 보았다. 흡수기의 동공에서 발생하는 자연대류 열손실을 예측하기 위해 온도를  $400^\circ\text{C}, 500^\circ\text{C}, 600^\circ\text{C}$ 로 변화시켜 온도 변화에 의한 열전달계수와 총열손실량을 계산하였다. 그리고 얻어진 값들을 기존 제시된 모델을 이용하여 얻어진 결과와 비교하였다. 그리고 흡수기 표면의 온도를  $400^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$ 로

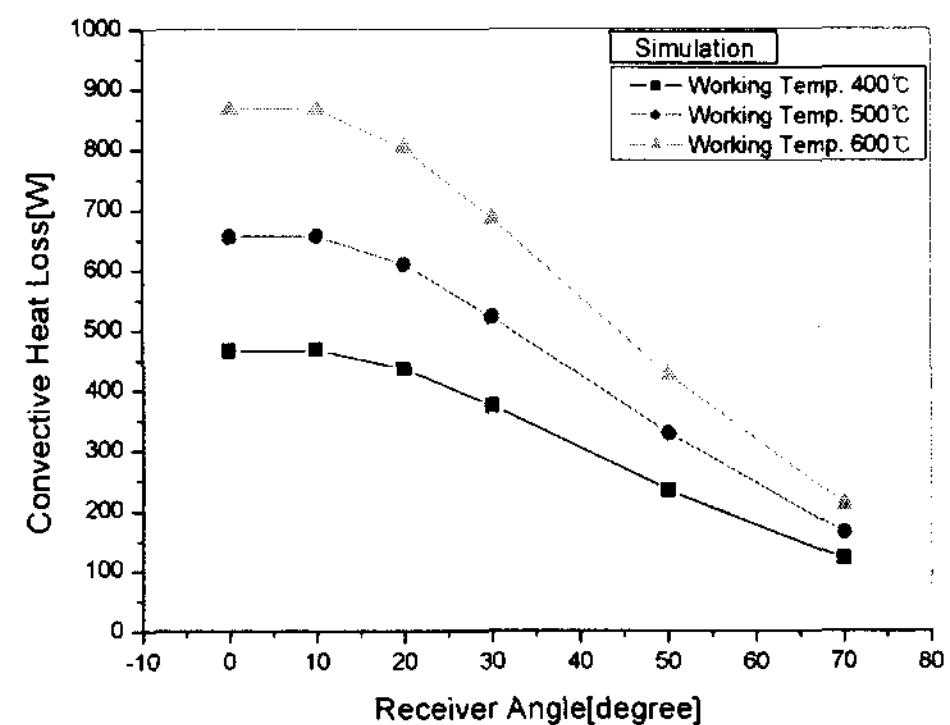


Fig. 1 Variation of convection heat loss at various receiver temperature with different inclination

증가하면서 동공 내부에서 외부로의 유동현상과 온도분포를 예측하였다.

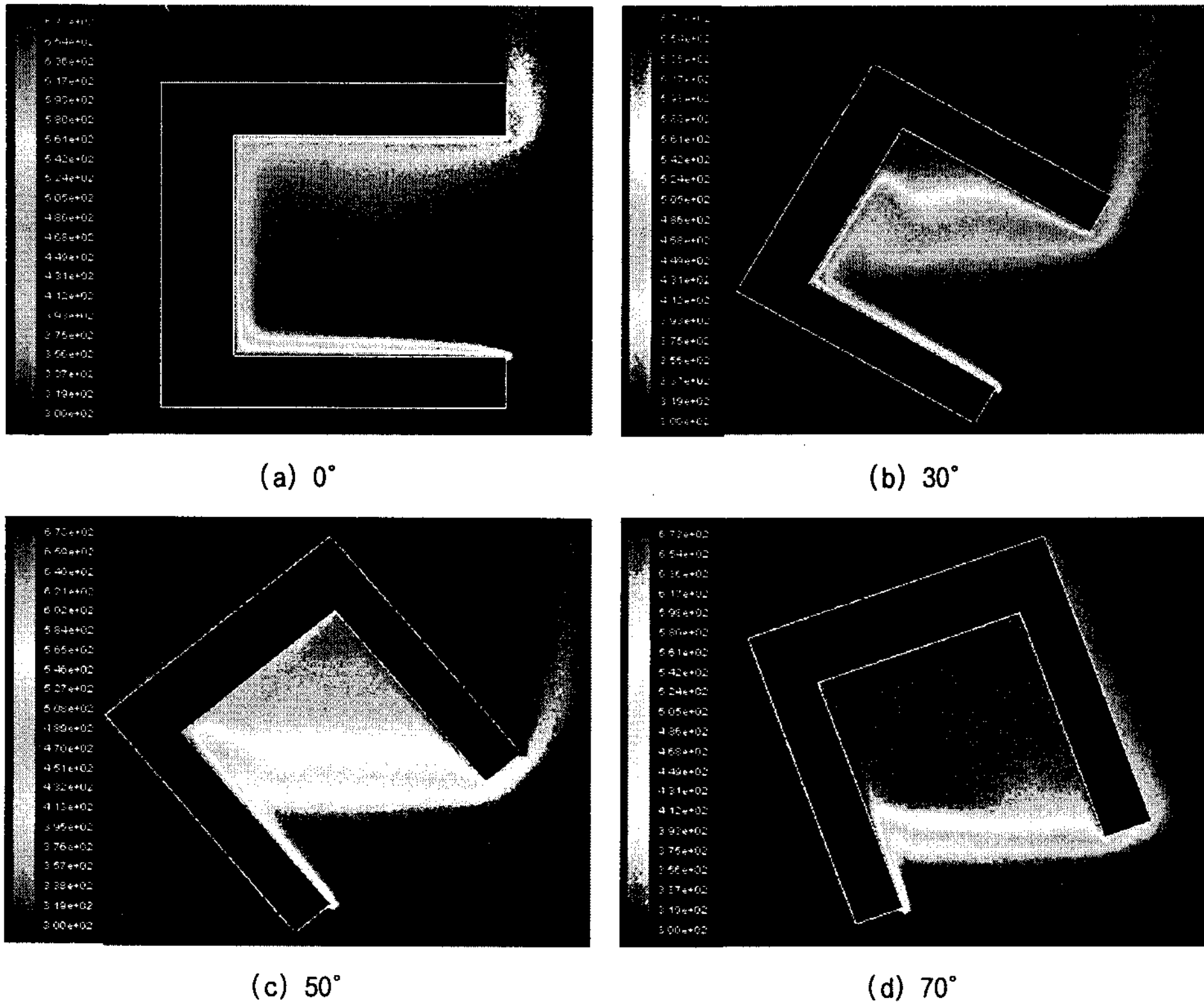


Fig. 3 Temperature contours at 400°C for different inclination

Fig. 1과 2는 수치해석을 통하여 얻은 열손실의 결과를 보여준다. 작동온도는 400~600°C로 증가하면서 각도에 따른 열손실의 영향을 살펴 보았다. 그림에서 보이는 것처럼 각도가 증가할 수

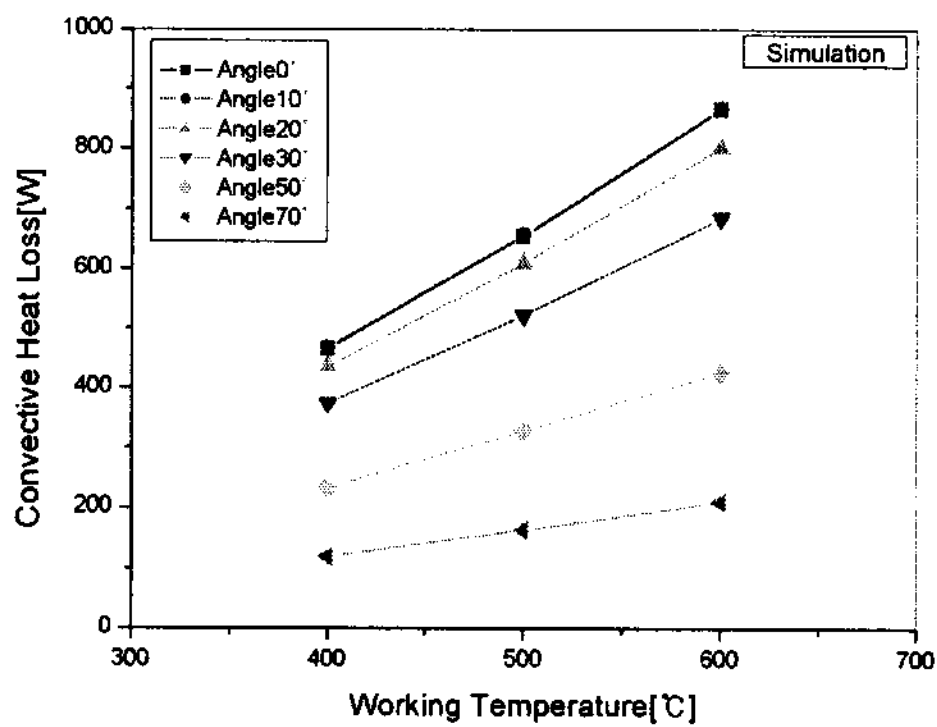


Fig. 2 Variation of convection heat loss with various receiver temperature

록 열손실은 감소하고 작동온도의 변화에서는 거의 유사한 경향을 보였다. 작동온도 400°C인 경

우 각도 0도에서는 465W로 70도인 경우와 비교하여 열손실이 3.9배 크게 나타났고 작동온도가 600°C에서는 대략 4배 정도가 되었다.

Fig. 3은 흡수기 각도가 0°, 30°, 50°, 70°인 경우의 온도 분포를 보여주는 그림이다. 흡수기의 표면온도가 400°C일 때 흡수기의 각도에 따라서 발생하는 온도를 보여준다. 각도 0°에서 보면 차가운 공기가 동공하단으로 들어가 수직벽면과 동공상단을 거쳐 외기로 빠져 나간다. 동공의 대부분이 convective zone으로 하단에 형성되어 있으며 stagnation zone은 동공측 상단에 희미하게 형성된 것을 볼 수 있다.

각도 30°에서는 상단의 형성된 stagnation zone의 온도가 초기 설정된 벽면의 온도와 유사하게 유지되고 있으며 외부로 유출되는 흐름도 각도가 작은 경우와 비교하여 상당히 줄어든 것을 알 수 있다.

각도 50°인 경우 외부로의 유동이 급격하게 줄어들었고 동공 상단에 형성된 stagnation zone도 상당한 크기로 증가하였다. stagnation 온도는 벽면온도와 유사하게 나타나고 있다. 각도가 70°에 이르면 외부로의 유동이 현격하게 줄어들

어 동공의 10~20%만이 convective zone이 나타나고 상단에 형성된 stagnation zone에서는 벽면의 온도와 거의 일치하였다. 그리고 외부로의 유동이 외부 벽면을 타고 흐르는 현상이 발생하였다.

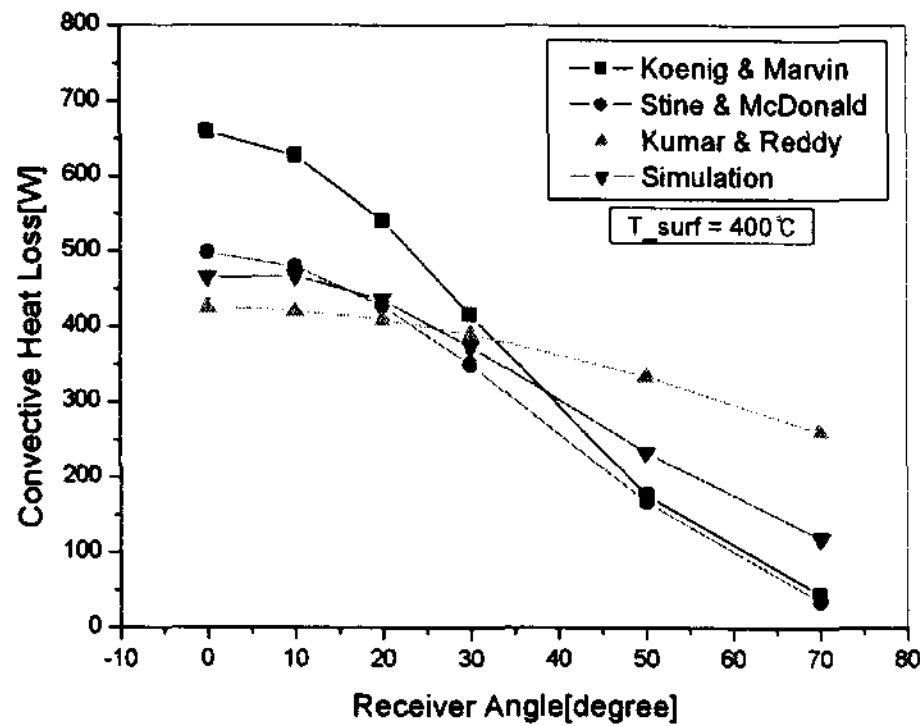


Fig. 4 Comparison of natural convection heat loss ( $T_{surf}=400^{\circ}\text{C}$ )

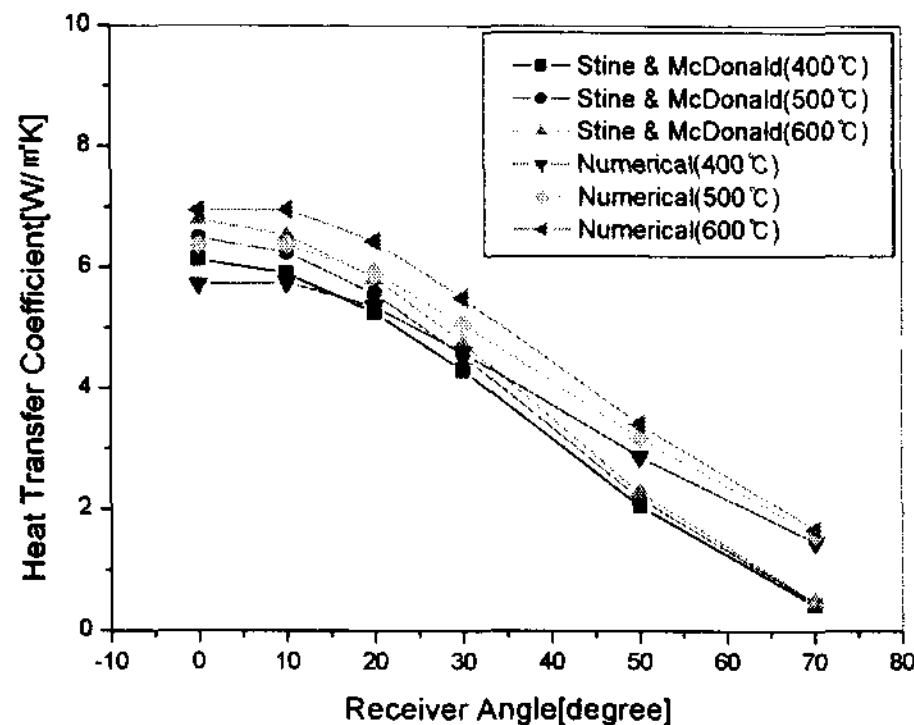


Fig. 5 Comparison of heat transfer coefficient (Stine & McDonald, simulation)

Fig. 4는 흡수기 표면 온도  $400^{\circ}\text{C}$ 인 경우 수치해석 결과와 각 모델별 열손실을 비교한 그림이다. 각 모델들을 비교한 결과 각도가 작은 경우에는 Stine & McDonald 모델이 수치해석 결과와 거의 유사하게 나타났다. 그러나 각도 50도와 70도에서 수치해석 결과보다 열손실이 작게 나타났다. 수치해석과 Stine & McDonald 모델만 놓고 보면 온도의 따른 영향은 크게 차이를 보이지 않고 큰 각도에서 미세한 차이를 보였다. Fig. 5는 수치해석의 결과와 유사한 Stine & McDonald 모델의 대류 열전달 계수를 비교한 그림이다. 전체적으로 수치해석 결과보다 대류 열전달계수가 작게 나타났다.

## 4. 결론

Dish형 집광시스템에 사용되고 있는 동공 흡수기에서 발생하는 대류열손실을 예측하기 위해 기존 제시된 모델을 이용하여 열손실을 계산하였으며 전산해석을 통하여 얻어진 결과와 비교하였다. 본 연구에서 수행된 내용은 다음과 같다.

온도와 각도에 따라 발생하는 열손실은 온도가 증가함에 따라 열손실이 증가하고 각도 증가에 따라서는 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 또한 각도가 작은 경우 동공에서는 convection zone만 존재하므로 열손실량이 많아지고 각도가 증가하면서 stagnation zone이 커지므로 열손실량이 감소하는 결과를 볼 수 있었다. 기존 제시된 모델과 비교하여 Stine & McDonald 모델과 상당히 일치하는 경향을 보였으나 각도가 큰 경우에는 차이가 나타났다. 이 결과를 이용하여 향후 새로운 흡수기의 열손실 해석을 위한 자료로 활용이 가능하다.

## References

- [1] T. Taumofolau, et al., 2004, "Experimental investigation of natural convection heat loss from a model solar concentrator cavity receiver", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 126, pp. 801~807.
- [2] N.S. Kumar and K.S. Reddy, 2007, "Numerical investigation of natural convection heat loss in modified cavity receiver for fuzzy focal solar dish concentrator", *Solar Energy*.
- [3] N. D. Kaushika and K. S. Reddy, 2000, "Performance of a low cost solar paraboloidal dish steam generating system", *Energy Conversion & Management*, Vol. 41, pp. 713~726.
- [4] D.J. Reynolds, et al., 2004, "An Experimental and computational study of the heat loss characteristics of a trapezoidal cavity absorber", *Solar Energy*, Vol. 76, pp. 229~234.
- [5] Jawad M. Khubeiz, et al., 2002, "Natural convection heat-transfers from an isothermal horizontal hemispherical cavity", *Applied Energy*, Vol. 73, pp. 261~275.
- [6] 강명철외, 2006, "태양열과 가스 연소열을 적용한 복합 태양열 흡수기의 열특성 연구", *신재생에너지*, Vol. 2, No. 4, pp. 33~38.