

접시형 태양열 흡수기의 Transient 열전달 특성에 대한 수치해석 연구

이주한[†]·서주현^{*}·오상준·이진규·서태범^{**}

Analysis of Transient Heat Transfer Characteristics of Dish-Type Solar Receiver System

Juhan Lee, Joohyun Seo, Sangjune Oh, Jinkyu Lee, Taebeom Seo

Key Words: Dish-type solar receiver system(접시형 태양열 시스템), computational transient analysis(과도 수치해석).

Abstract

A numerical and experimental studies are carried out to investigate the transient heat transfer characteristics of 5kWth dish-type solar air receiver. Measured solar radiation and temperatures at several different locations are used as boundary conditions for numerical simulation. Many parameters' effects (reflectivity of the reflector, the thermal conductivity of the receiver body, transmissivity of the quartz window, etc.) on the thermal performance are investigated. Discrete Transfer Method is used to calculate the radiation heat exchange in the receiver. A transient heat transfer model is developed and the rate of radiation, convection and conduction heat transfer are calculated. Comparing the experimental and numerical results, good agreement is obtained. Using the numerical model, the transient heat transfer characteristics of volumetric air receiver for dish-type solar thermal systems are known and the transient thermal performance of the receiver can be estimated.

기호설명

t	: 시간 (sec)	h	: 엔탈피
x_i	: 직교 좌표계($i=1, 2, 3$)	DNI	: 직달 일사량 (W/m^2)
u_i	: i 방향의 유속		
p	: 압력		
ρ	: 밀도		
τ_{ij}	: 응력		
S_m	: 질량 원천		
S_i	: 운동량 원천		
F_{hj}	: j 방향의 에너지 플럭스		
S_h	: 에너지 원천		
H	: 전체 엔탈피		

1. 서론

현재 신·재생에너지 중에서 태양열을 이용한 발전 시스템은 화석연료를 대체할 수 있는 매우 경쟁력이 있는 분야이다. 저밀도의 태양열을 고밀도의 에너지로 전환하기 위한 태양열 고집광 기술의 발달로 인해 고온의 태양열 에너지 이용이 가능하게 되었다. 또한, 태양열 에너지의 이용은 산업용 공정열 및 전력의 생산을 가능하게 하였다. 이러한 고온 태양열 에너지 시스템 종류에는 접시형 태양열 집열기와 솔라 타워 등이 있다. 현재 전 세계적으로 접시형 태양열 집열기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

[†]인하대학교 대학원 기계공학과

E-mail: preheating@gmail.com

Tel: (032) 874-7327 Fax: (032) 868-1716

^{*}인하대학교 대학원 기계공학과

^{**}인하대학교 공과대학 기계공학과

선행연구사례로 흡수기 외부의 공기 유동에 대한 자연대류 열전달 실험 및 수치해석이 진행되었다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ 또한, 2차원 흡수기 내부에서의 층류자연대류 및 내부벽면에 위치한 토출부의 크기 비율, 작동유체에 따른 표면 방사율과 표면 복사 열전달의 결합에 대한 수치해석적 연구가 진행되었다.⁽⁴⁾ 수치해석 결과에 의해 대류, 복사열전달의 Nusselt number 상관관계가 밝혀졌다.

흡수기 형상에 대한 연구도 진행되었다. 흡수기 체적에 대한 실험결과를 바탕으로 태양열 흡수기의 대류 열전달에 대한 간단한 모델 연구도 진행되었다.⁽⁵⁾ 또한 흡수기 입구의 크기와 표면온도, 각도를 고려한 원통형 형상의 흡수기를 제안하였다.⁽⁶⁾ 그리고 2차원 흡수기에서의 자연대류 및 복사 열전달에 대한 수치해석에 대한 연구도 진행되었다.⁽⁷⁾ 불연속적으로 가열된 흡수기 내부에서의 자연대류와 전도 및 복사 열전달을 수치해석과 실험을 비교 분석하였다.⁽⁸⁾ 따라서 수치해석과 실험에서 얻은 결과의 비교 및 분석을 통해 복사 열전달의 영향을 받은 온도장 및 유체 흐름에 대한 정확한 예측을 할 수 있다.

흡수기의 간단한 형상 및 정상상태에서의 흡수기 내부 유동 해석에 관한 연구가 진행되었다. 그러나 불규칙적인 일사량 조건에서 시스템의 열성능을 향상시키기 위해서 흡수기의 형상들을 복잡하게 설계하였다. 일정한 일사량 조건에서 불규칙적인 흡수기 내부의 상태를 해석하는 것은 매우 어렵다. 따라서 이러한 조건들에 대한 기존의 연구들이 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 다공성 물질이 삽입된 흡수기의 3차원 형상에 대하여 시간에 따른 열전달, 자연대류 열전달, 복사 열전달을 해석하여 흡수기의 성능을 분석하였다. 또한 수치해석의 정확도를 높이기 위하여 실험 결과와 비교 분석 하였다.

2. 실험장치

2.1 공기식 흡수기

Figure 1은 흡수기의 단면이다. 흡수기의 모든 재질은 고온에서 견딜 수 있는 306 SS를 사용하였다.

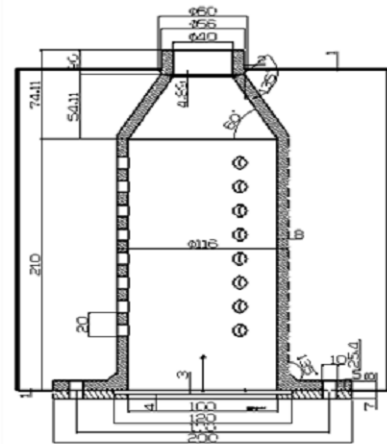


Fig. 1 공기식 흡수기 단면도

Figure 2(a)에서와 같이 2번 방향으로 공기가 유입되어 1번 방향으로 토출된다. 흡수기 내부에서 와류를 형성하기 위하여 세 방향으로 공기가 유입된다. Figure 2(b)는 흡수기 외부 형상이다.

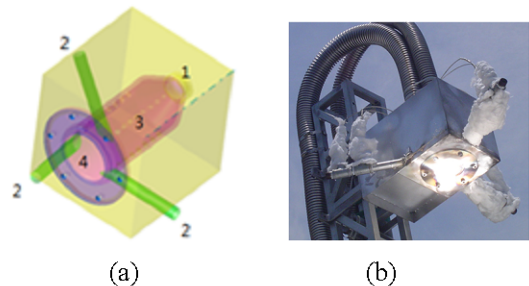


Fig. 2 공기식 흡수기 외부 형상

흡수기의 대류 열손실을 최대한으로 줄이기 위해 흡수기 입구에 투과율이 높고, 고온에서 견딜 수 있는 석영유리(quartz glass)를 설치하였다. 그리고 흡수기 내부를 지나는 공기의 거주시간 및 열전달 면적을 최대한 늘리기 위해서 Figure 3과 같이 니켈 합금으로 이루어진 다공성 물질(porous material)을 삽입하였다.

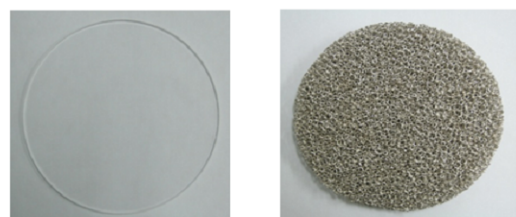


Fig. 3 석영유리, 다공성 물질

3. 계산방법

CFD 해석은 상용 코드를 포함하고 있는 STAR-CCM+ Version 3.02를 사용하였다. 흡수기 내부의 유동 및 열 전달 성능해석은 지배 방정식 simultaneous solution에 기초한다. 흡수기 내부의 지배 방정식은 다음과 같다.

Continuity equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial}(\rho u_j) = s_m \quad (1)$$

Momentum equation

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i \quad (2)$$

Energy equation

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho H u_j + F_{h,j} - u_i \tau_{ij}) = \frac{\partial p}{\partial t} + s_i + s_h \quad (3)$$

Where,

$$H = \frac{1}{2} u_i u_i + h \quad (4)$$

고체표면에서의 수치해석은 discrete transfer method로 수행된다. Discrete transfer method는 하나의 표면에서 다른 대상의 영역을 통과한 대표적인 광선을 추적하는 method이다.⁽⁹⁾ Discrete ordinates method는 흡수기 내부 중앙에 위치한 다공성물질의 radiative transfer equation을 계산하기 위하여 사용되어진다. 흡수기 내부 중앙에 위치한 다공성물질에 대한 복사열전달 해석은 Discrete Ordinates Method를 사용하였다. Transient 해석은 implicit unsteady 방법을 이용하였고, 실험으로 측정된 불규칙적인 열유속을 경계 조건으로 하였다. 그리고 K-ε 난류모델을 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

시간 변화에 따른 공기식 흡수기의 열전달 특성을 수치해석적으로 분석하였다. 시스템의 열성능을 분석하기 위한 흡수기 형상 및 작동 조건의 변화는 수치해석의 결과를 기초로 한다.

Figure 4는 흡수기 입구 표면에 집광되는 플럭스 분포를 측정하여 나타낸 그래프이다. 집광된 플럭스의 범위는 0.406 MW/m²에서 0.1 MW/m²이

며 가우시안 분포를 나타낸다. 플럭스 분포에 대한 이론과 실험을 비교하면 좀 더 정확한 결과 값을 얻을 수 있다. 이와 같은 결과 값을 기초로 하여 시간에 따른 열전달을 계산하였다. 또한, 열성능을 향상시키기 위해 흡수기 내부에 다공성 물질을 삽입하였다.

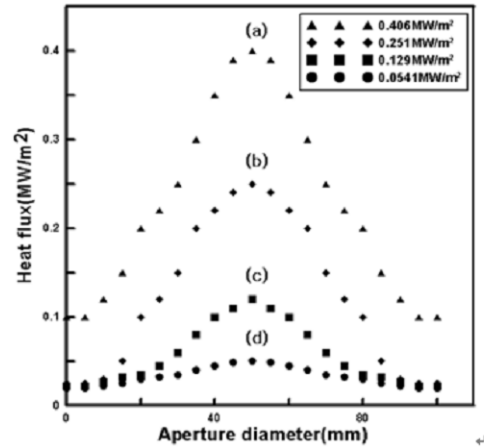


Fig. 4 흡수기 입구 표면에 집광되는 플럭스 분포 (a) 0.406 MW/m², (b) 0.251 MW/m², (c) 0.129 MW/m², (d) 0.0541 MW/m²

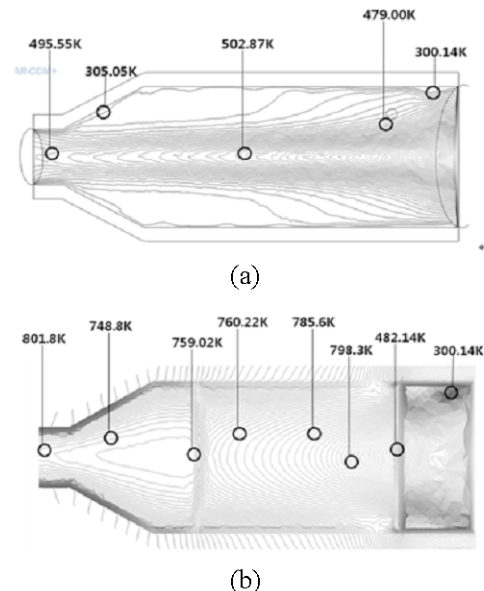


Fig. 5 다공성 물질의 유무에 따른 온도 비교 (a) 다공성 물질을 삽입하지 않은 경우, (b) 다공성 물질을 삽입한 경우

Figure 5는 다공성 물질의 유무에 따라서 흡수기 내부의 온도를 비교하였다. Figure 5(a)는 흡수

기 내부에 다공성 물질이 없는 경우이며, Figure 5(b)는 흡수기 내부에 다공성 물질이 있는 경우의 온도 분포이다. 이것은 정상상태에서의 결과이다. 같은 조건에서 다공성 물질이 삽입된 흡수기의 출구 온도는 다공성 물질을 삽입하지 않은 흡수기의 출구 온도보다 매우 높게 나타난다. 또한 다공성 물질을 삽입하지 않은 경우에 흡수기 내부의 벽면 온도가 상승한다. 흡수기 내부로 유입되는 공기는 흡수기 내부 면에 충분히 접촉할 수 없기 때문에 충분한 열전달이 일어나지 않는다. 이와 반대로 다공성 물질이 삽입되어진 경우에는 흡수기 개구부로 유입되는 태양 복사 에너지에 의해 다공성 물질의 온도가 상승되고 유입된 공기의 온도도 상승된다. 따라서 충분한 열전달이 일어난다. 열성능을 향상시키기 위해서 흡수기 내부에 삽입하는 물질에 대한 특성들은 이미 알려져 있다. 허니콤 구조, 메쉬 및 다공성 물질 등이 사용되어진다. 열전달의 관점에서 보면 다공성 물질을 삽입하였을 경우에 열성능이 크게 향상된다.⁽¹⁰⁾

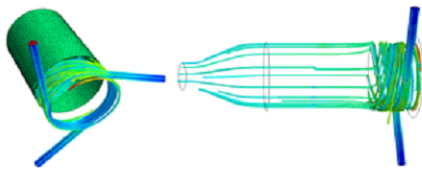


Fig. 6 흡수기 내부의 유동 흐름

흡수기 내부의 유동 흐름은 Figure 6에 나타내었다. 세 방향으로 유입되는 입구는 원주방향으로 설계 하였고 유입된 공기는 흡수기 내부에서 와류를 형성한다. 본 연구에서 제안한 흡수기 형상은 플럭스 분포가 가장 높게 측정되는 흡수기 개구부에서의 열전달률을 향상시키기 위하여 고안된 디자인이다. 따라서, 유입된 공기는 첫 번째 위치한 다공성 물질을 통과 하기전에 잘 혼합되어지고 일정한 온도 분포를 나타낸다.

Figure 7은 시간에 따른 흡수기 내부의 온도 분포를 단면의 모습으로 나타내었다. 흡수기 입구의 경계조건은 앞서 계산하여 얻은 플럭스 값을 사용하였다. 최대 플럭스는 0.406 MW/m^2 이며 최소 플럭스는 0.0541 MW/m^2 이다. 각각의 경우에 온도 분포는 (a)와 (b)에 나타내었으며 300초 간격으로 측정하였다. 최대 플럭스의 경우 흡수기 전체의 온도를 상승 시키거나 지속적인 고온의 공기를

얻기 위해서는 1500초가 소요된다. 이와 반대로 최소 플럭스의 경우에 흡수기 전체의 온도를 상승 시키기 위해서는 1200초 보다 적게 소요된다.

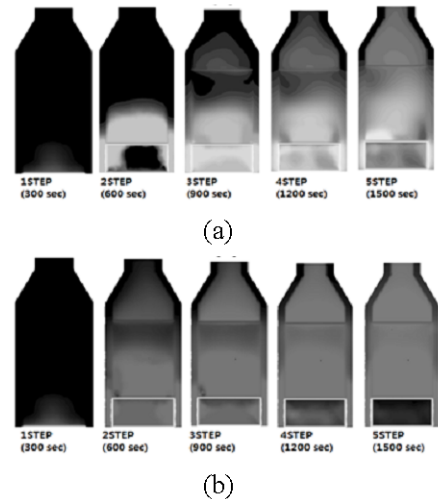


Fig. 7 시간에 따른 흡수기 내부의 온도 분포 (시간 간격=300초)

(a) 최대 플럭스 : 0.406 MW/m^2 ,
(b) 최소 플럭스 : 0.0541 MW/m^2

Figure 8은 흡수기 개구부에서의 플럭스 값을 그래프로 나타내었다. 태양의 움직임에 따라서 접시형 태양열 집열기로부터 집광된 태양 복사 에너지가 흡수기 개구부로 유입될 때의 플럭스 값을 측정하였다. 시간이 지남에 따라서 플럭스의 값이 감소하는 경향을 보이는 이유는 태양의 고도가 낮아지기 때문이다.

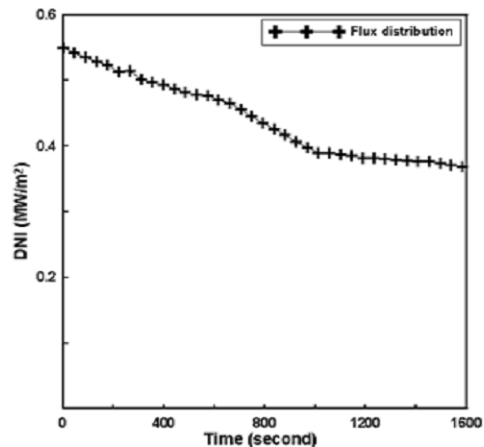


Fig. 8 흡수기 개구부에서의 플럭스 (location: latitude $37^\circ, 23' 0.62''$ N, longitude $126^\circ, 39' 21.87''$ E, time: 13:00~13: 26)

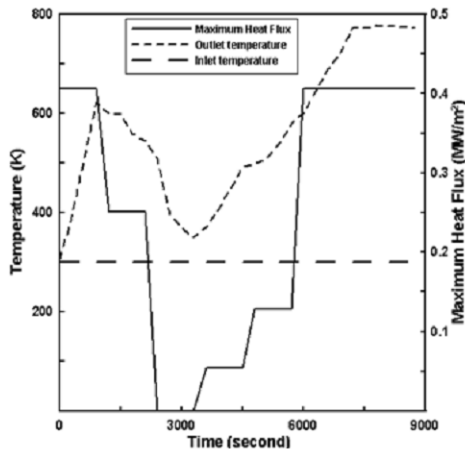


Fig. 9 플럭스 변화에 따른 출구 온도

Figure 9는 플럭스의 범위가 0.41 MW/m^2 에서 0 MW/m^2 일때 시간 변화에 따른 흡수기 입구, 출구 온도를 그래프로 나타내었다. Figure 9에서와 같이 흡수기 입구로 태양복사에너지가 유입되어 내부 온도가 정상상태로 도달한 후 흡수기 출구 온도가 정상상태에 이르는 시간은 2000초라는 것을 알 수 있다.

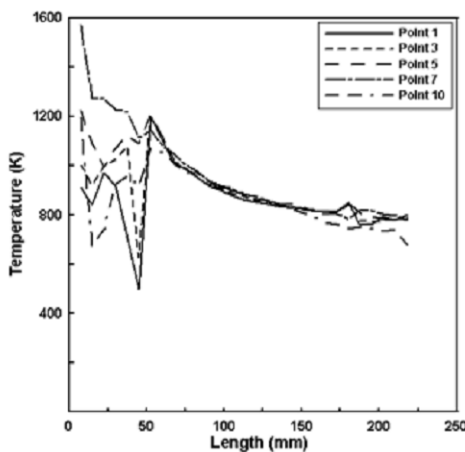


Fig. 10 흡수기 축방향에 대한 온도 분포

Figure 10은 흡수기의 축방향을 지나는 각기 다른 반지름 위치에서의 온도 분포를 나타내었다. 유입된 공기의 온도는 석영유리에 근접하였을 경우에 급격히 감소하며, 공기가 다공성 물질에 접촉하였을 경우에는 온도가 급격히 증가한다. 다공성 물질을 통과한 공기의 온도는 점차 감소한다. 실험값과 계산값을 비교함으로써 정확한 흡수기의 온도 분포를 예측할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 시간 변화에 따른 열전달, 자연 대류 열전달, 복사 열전달 및 전도 열전달 현상등을 포함하고 있는 3차원의 모델을 이용하여 다공성 물질을 삽입한 공기식 흡수기의 열성능을 분석하였다. 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 흡수기 내부에 다공성 물질을 삽입하였을 경우가 다공성 물질을 삽입하지 않았을 경우보다 열전달률이 매우 높다.

(2) 흡수기 전체의 온도를 상승시키거나 흡수기 출구로부터 고온의 공기를 지속적으로 얻기 위해서는 최소 플럭스 분포일 경우보다 최대 플럭스 분포일때 더 많은 시간이 소요된다.

(3) 흡수기 입구에 일정한 태양 복사 에너지를 투입시킨 후 일정한 출구 온도를 얻기 위해서는 약 2200초가 소요된다.

(4) 흡수기 내부로 유입된 공기의 온도는 석영 유리에 근접하였을 경우에 급격히 감소하며, 공기가 다공성 물질에 접촉하였을 경우에는 온도가 급격히 증가한다. 또한 다공성 물질을 통과한 공기의 온도는 점차 감소한다.

후 기

본 연구는 산업자원부 출연금으로 수행되었음 (과제번호: 005-N-SO14-P-01-0-000)

참고문헌

- (1) S. Yasuaki, K. Fujimura, T. Kunugi, N. Akino, Natural convection in a hemispherical enclosure heated from below, *Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp.1605 - 1617, 1999.
- (2) J.M. Khubeiz, E. Radziemska, W.M. Lewandowski, Natural convective heat transfer from an isothermal horizontal hemispherical cavity, *Apply Energy*, Vol. 73, pp.261 - 275, 2002.
- (3) W.M. Lewandowski, P. Kubski, J.M. Khubeiz, H. Bieszk, T. Wilczewski, S. Szymanski, Theoretical and experimental study of natural convection heat transfer from isothermal hemisphere, *Heat Mass Transfer*, Vol. 40, pp.101 -

109, 1997.

- (4) S.N. Singh, S.P. Venkateshan, Numerical study of natural convection with surface radiation in side-vented open cavities, *Int. J. Thermal Sci.* Vol. 43, No. 4, pp.865 - 876, 2004.
- (5) D.L. Siebers, J.S. Kraabel, Estimating convective energy losses from solar central receivers, Sandia Laboratory Report, SAND84-8717, 1984.
- (6) C.G. McDonald, Heat loss from an open cavity, Sandia Laboratory Report, SAND95-2939, 1995.
- (7) J.L. Lage, J.S. Lim, A. Bejan, Natural convection with radiation in a cavity with open top end, *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 114, pp.479 - 486, 1992.
- (8) A.A. Dehghan, M. Behnia, Combined natural convection - conduction and radiation heat transfer in a discretely heated open cavity, *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 118, pp.56 - 64, 1996.
- (9) P.S. Cumber, Improvements to the discrete transfer method of calculating radiative heat transfer. *Heat Mass Transfer*, pp.2215-2258, 1995.
- (10) J. H. Lee. Et al., Heat transfer performance with laminated mesh and honeycomb volumetric air receivers for the high-temperature solar power plant system, *Energy Sustainability 2007* , ES2007-36160, 2007.