

다공성 매질의 형상 변화에 따른 접시형 고온 태양열 흡수기의 열성능 평가

이주한*, 서주현, 오상준, 이진규, 조현석, 서태범**

*인하대학교 대학원 기계공학과(preheating@gmail.com), **인하대학교 기계공학과(seotb@inha.ac.kr)

Heat Transfer Analysis of High Temperature Dish-type Solar Receiver with the Variation of Porous Material

Lee, Juhan*, Seo, Joohyun, Oh, Sangjune, Lee, Jingyu, Cho, Hyunseok, Seo, Taebeom**

*Dept. of Mechanical Eng, Graduate School, Inha University(preheating@gmail.com),

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

Abstract

A numerical and experimental studies are carried out to investigate the 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 heat transfer model is developed and the rate of radiation, convection and conduction heat transfer are calculated. Using the numerical model, the heat transfer characteristics of volumetric air receiver for dish-type solar thermal systems are known and the thermal performance of the receiver can be estimated.

Keywords : 접시형 태양열 집열기(Dish type solar thermal system), 공기식 흡수기(Air receiver), CFD 해석(Computational Fluid Dynamics Analysis)

기 호 설 명

t	: time, s
x_i	: cartesian coordinate
u_i	: absolute fluid velocity component in direction x_i , m/s
P	: piezo metric pressure, N/m^2
ρ	: density, kg/m^3
τ_{ij}	: stress tensor components, N/m^2
S_m	: mass source, kg
S_i	: momentum source components, $kg\cdot m/s$
F_{hj}	: diffusional energy flux in direction x_j
S_h	: energy source
H	: total enthalpy, kJ/kg
h	: static enthalpy, kJ/kg
DNI	: direct normal incidence, W/m^2

1. 서 론

고온 태양열을 이용한 접시형 고온 태양열 집열 시스템은 화석연료를 대체할 수 있는 매우 경쟁력이 있는 분야이다.¹⁾ 접시형 고온 태양열 집열 시스템은 접시형 집열기에 부착된 반사경을 이용하여 태양 복사 에너지를 흡수기에 집열시켜 작동 유체를 가열시키는 열매체 방식이다.²⁾ 이러한 접시형 고온 태양열 집열 시스템 중에서 중요한 부분을 차지하고 있는 흡수기는 크게 수증기를 이용하는 방식과 공기를 이용하는 방식으로 분류할 수 있다. 이 중에서 공기식 흡수기는 수증기식에 비해 낮은 압력에서 작동되며, 부식이나 파손의 위험이 적다는 장점이 있다.³⁾ 이러한 공기식 흡수기는 공기를 작동유체로 사용하기 때문에 다공성 물질과 같은 충전재를 흡수기 내부에 삽입하여 전열 면적을 증가시킬 필요가 있다.⁴⁾⁵⁾

이러한 다공성 물질이 삽입된 흡수기에 대한 선행 연구로서 다공성 물질을 통과하는 공기에 대해 유입 열유속과 유량의 상관성에 대해 실험적인 연구가 진행 되었다.⁶⁾⁷⁾⁸⁾ 이러한 유입 열유속과 유량의 상관성은 그림 1에 나타내었다. 일반적으로 흡수기 개구부를 통

해 유입되는 열유속은 개구부의 중앙부분을 중심으로 Gaussian 분포를 형성하고 중앙부분에 높게 유입된 열유속은 그 부분의 다공성 물질에 높은 물질 온도를 발생 시킨다. 하지만 국부적으로 낮게 유입된 열유속을 받는 다공성 물질 부분은 중앙 부분에 비해 낮은 온도 분포를 형성한다. 이러한 현상은 다공성 물질을 통과하는 공기의 유량에 영향을 끼친다. 즉, 고온의 중앙부분을 통과하는 공기는 그 주변을 통과하는 공기보다 더 높은 온도를 형성하게 되고 이로 인해 공기의 점성은 증가하게 된다. 따라서 다공성 물질의 중앙 부분은 공기의 투과성이 감소하여 그 주변보다 유량이 작아지는 현상이 발생한다.

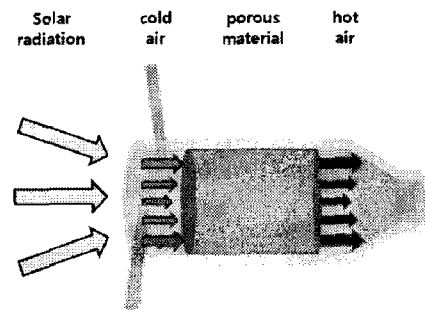


그림 1. 공기식 흡수기의 일반적 이론

따라서 본 연구에서는 위에서 언급한 공기식 흡수기의 이론을 바탕으로 유입 열유속이 집중되는 다공성 물질의 중앙 부분에 유량을 집중시킬 수 있는 돔(Dome)형식의 다공성 물질의 형상을 고려하였다. 또한, 형상변화의 타당성을 확인하기 위해 기존의 원판 형식의 다공성 물질이 삽입된 흡수기와의 열전달 성능을 비교 하였다.

2. 실험 장치 및 흡수기 형상 설계

2.1 접시형 고온 태양열 집열기

그림 2(a)는 본 연구에서 사용된 접시형 고온 태양열 시스템이다. 태양열 집열기의 총 용량은 $5kW_t$ 이며 포물선형 반사경 10개를 사용하였다.

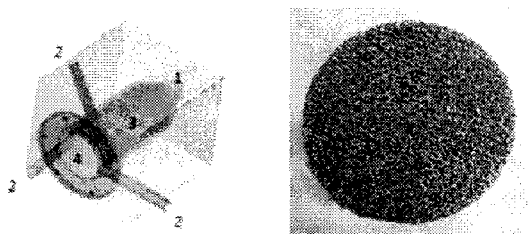
그림 2(b)는 접시형 태양열 집열기에 부착된 반사경을 이용하여 태양 복사 에너지가 흡수기에 집열되는 모습이다. 접시형 태양열 집열기를 통해 측정된 유입 열유속은 해석 모델의 열원에 대한 경계 조건으로 사용되었다.



(a) 접시형 태양열 집열기
(b) 흡수기 외부 형상

2.2 흡수기 형상 설계

그림 3은 공기식 흡수기의 형상에 대한 개략도이다. 흡수기의 모든 재질은 고온에서 견딜 수 있는 stainless steel 306을 사용하였다. 그림 3(a)에서와 같이 공기식 흡수기 내부에서 와류를 형성시키기 위하여 2번으로 표시된 세 방향으로 공기를 유입시켜 주었다. 2번 방향으로 유입된 공기는 3번 부분의 다공성 물질로 채워진 흡수기 내부를 통과한 뒤 1번 방향의 출구를 통해 토출된다. 흡수기의 개구부의 직경은 태양열 집열기의 초점지역 플럭스 분포에 의해 태양복사열을 90% 이상 흡수할 수 있도록 10cm로 정하였다.⁹⁾

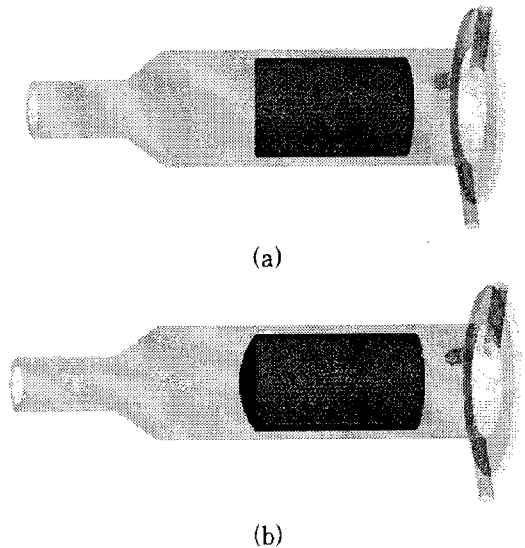


(a) 흡수기 개략도
(b) 다공성 물질

공기식 흡수기의 대류 열손실을 최대한으로 줄이기 위해 흡수기 개구부에 투과율이 높고, 고온에서 견딜 수 있는 석영유리(quartz window)를

설치하였다. 석영유리의 직경은 흡수기 개구부와 일치하며 두께는 0.5cm이다. 그리고 흡수기 내부를 지나는 공기의 거주시간 및 열전달 면적을 최대한 증가시키기 위해서 니켈 합금으로 이루어진 다공성 물질(porous material)을 채워 넣었다. 다공성 물질의 두께는 1cm이며 흡수기 내부의 중앙 부분에 20개를 적층하였다. 또한, 공기식 흡수기 외부로의 열손실을 방지하기 위해 세라믹 섬유(thermal ceramic fiber)를 이용하여 흡수기 외벽 및 출구를 단열 상태로 유지하였다.

그림 4는 기존의 다공성 물질의 형상과 돔(Dome)형 다공성 물질의 형상을 나타낸 것이다. 기존의 원판형 적층구조에서 유입된 공기는 와류를 형성시키기 위한 세 방향 입구의 영향으로 원심력에 의해 벽면을 타고 흐르는 단점이 있다. 이러한 경우 공기는 흡수기 내부를 균일하게 흐르지 못하며 유입 열유속이 집중되는 다공성 물질의 중앙 부분에 접촉하게 되는 양이 적게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 다공성 물질의 형상을 그림 4(b)와 같이 설계하였다. 유입 열유속이 집중되는 다공성 물질의 중앙 부분에 더 많은 양의 공기를 통과시키기 위해 다공성 물질에 곡률을 주었으며 이 각도는 접시형 고온 태양열 집열기의 림 각도인 43.85°와 같다.



(a) 원판형 다공성 물질 형상
(b) 돔(Dome)형 다공성 물질 형상

3. 수치해석 방법 및 경계 조건

3.1 수치해석 방법

CFD해석은 상용코드인 STAR-CCM+ Version 3.02를 사용하였다. 공기식 흡수기 내부의 유동 및 열전달 성능해석은 지배 방정식의 simultaneous solution에 기초한다. 공기식 흡수기 내부의 지배 방정식은 다음과 같다.

Continuity equation

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

Momentum equation

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

Energy equation

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

Where,

$$H = \frac{1}{2} u_i u_i + h$$

공기식 흡수기 내부 표면에서의 복사 열전달 해석은 Discrete Transfer Method을 이용해 수행되었다. Discrete Transfer method는 복사열전달 해석 영역 내의 한 표면에서 다른 표면까지의 대표적인 beam을 추적하면서 계산을 수행하는 방법이다.¹⁰⁾ 흡수기 내부 중앙에 위치한 다공성물질에 대한 복사열전달 해석은 Discrete Ordinates Method를 이용하였다. 난류 해석은 K-ε 난류 모델을 이용하였다.

3.2 경계 조건

공기식 흡수기의 외부는 단열 조건을 적용하였다. 접시형 고온 태양열 집열기를 통해 측정된 유입 열유속은 해석 모델의 열원에 대한 경계 조건으로 사용되었다. 유입 열유속은 흡수기 개구부를 중심으로 Gaussian 분포

를 형성하였고 최대 유입 열유속은 0.406 MW/m²으로 측정되었다. 해석에 사용된 기본적인 경계 조건을 정리하여 표 1에 나타내었다.

표 1. 경계 조건

Variable	Values
유입 공기 속도	3.14m/s
유입 공기 온도	296K
석영유리의 투과율	0.95
다공성 물질의 다공도	약 70%
최대 유입 열유속	0.406 MW/m ²

4. 결과 및 고찰

다공성 물질의 형상변화에 따른 공기식 흡수기의 열전달 향상을 확인하기 위해 공기식 흡수기의 열전달 성능을 수치해석적으로 분석하였다.

그림 5는 돔형 다공성 물질이 삽입된 흡수기 내부의 유동을 나타낸 것이다. 흡수기의 입구형상은 상대적으로 고온 영역인 다공성 물질의 전면부에서 공기의 거주 시간을 증가시키기 위해 설계하였다. 이러한 이유로 세 방향으로 유입된 공기는 흡수기 내부의 전면부에서 와류를 형성한 뒤 다공성 물질을 통과하면서 균일한 유동을 형성한다. 이러한 흡수기 내부의 유동은 원판형 다공성 물질이 삽입된 흡수기 형상에 대해서도 유사한 결과를 나타낸다.

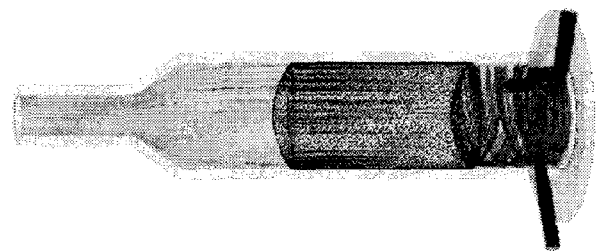


그림 5. 흡수기 내부의 유동

그림 6은 수치해석 시 공기식 흡수기 내부의 특정 위치에 대한 유속 및 온도 측정 포인트이다. Virtual probe method를 사용하였

으며 실제 실험에서의 속도 센서 및 열전대의 역할을 하는 것이다.

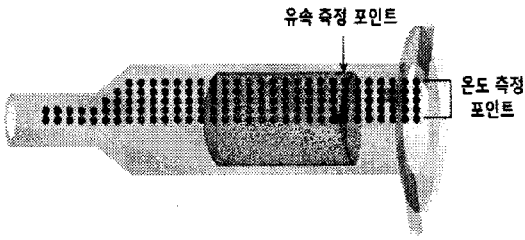


그림 6. 유속 및 온도 측정 포인트

그림 7은 각 형상의 다공성 물질 전면부에서 측정된 공기의 유속을 비교한 그래프이다. 그림 6에서의 유속 측정 포인트에서 측정하였으며 다공성 물질의 시작점으로부터 20mm거리의 지점에서 직경과 평행한 방향으로 측정하였다.

원판형상의 다공성 물질의 전면부에서는 입구 형상의 영향으로 벽면에서의 유속이 더 높게 측정되었다. 하지만 돔형상에서는 원판형상과는 반대로 다공성 물질의 중앙 부분에서의 유속이 더 높게 측정되었다. 즉, 돔형상의 다공성 물질을 적층함으로써 열유속이 집중되는 다공성 물질의 중앙부분에 더 많은 공기를 통과 시킬 수 있다. 따라서 돔형상의 다공성 물질이 고온 부분에 접촉하는 공기의 양이 많기 때문에 원판형상의 다공성 물질보다 태양복사에너지를 더 효율적으로 사용할 수 있다.

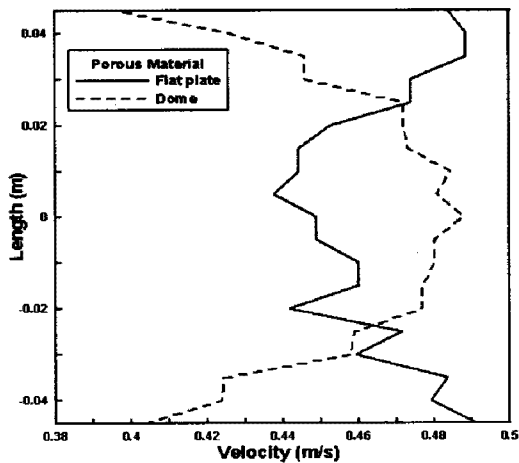


그림 7. 흡수기 전면부에서의 유속 분포

그림 8은 다공성 물질의 형상에 따른 흡수기 내부의 온도 분포를 비교한 것이다. 그림 8(a)는 원판형상의 다공성 물질이 삽입된 경우이며, 그림 8(b)은 돔형상의 다공성 물질이 삽입된 경우이다.

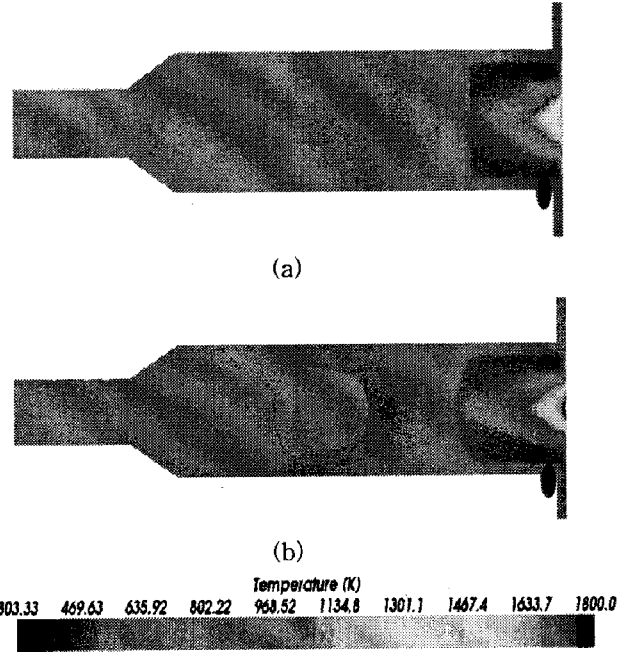


그림 8. (a) 흡수기 내부의 온도 분포(원판 형상)
(b) 흡수기 내부의 온도 분포(돔 형상)

그림 8에서와 같이 동일한 조건에서 돔형상의 다공성 물질이 삽입된 흡수기의 전체적인 온도 분포가 원판형상인 경우보다 높게 나타났다.

그림 9는 그림 6에서 지정한 온도 측정 포인트 중에서 흡수기 내부의 중심축에 따르는 온도 분포를 나타낸 것이다. 석영 유리를 통해 유입된 태양 복사에너지는 석영유리 전면부의 공기를 고온 상태로 만들지만 세 방향의 입구에서 유입된 대기 온도 상태의 공기 영향으로 온도가 급감한다. 그러나 유입된 공기는 열원으로 작용하는 다공성 물질과 접촉하면서 열전달에 의해 온도가 급격히 증가한다. 다공성 물질을 통과하는 공기의 온도는 점차 증가한 뒤 다공성 물질이 영향이 없는 흡수기의 후면부에서는 공기의 온도가 점차 감소하였다.

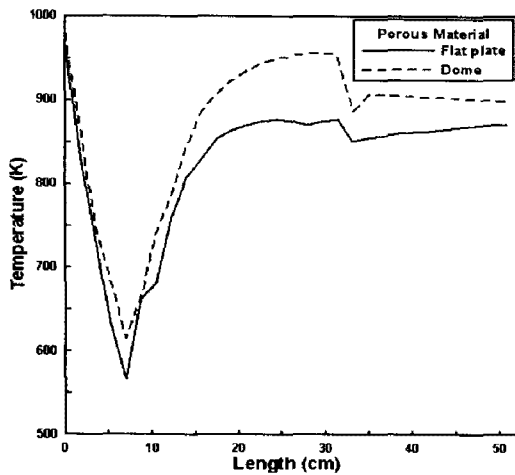


그림 9. 흡수기 축 방향의 온도 분포

두 형상에 대한 온도 분포를 살펴보면 다공성 물질을 통과하기 전에는 유사한 온도 분포를 형성하지만 다공성 물질을 통과하면서 각 지점의 온도는 돔형상이 원판형상보다 40~90K정도 높은 것으로 확인되었다. 그림 7에서 확인한 것과 같이 돔형상의 다공성 물질을 적층함으로써 열유속이 집중되는 다공성 물질의 중앙부분에 더 많은 공기를 통과시킬 수 있다. 따라서 고온의 다공성 물질과 열전달되는 공기의 양이 많아지고 이로 인해 출구온도의 증가 또한 이루어졌다.

5. 결론

본 연구에서는 대류 열전달, 복사열전달 및 전도 열전달 현상들을 포함하고 있는 3차원 모델을 이용하여 다공성 물질의 형상에 따른 공기식 흡수기의 열성능을 분석하였다. 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 세 방향 입구 형상의 영향으로 흡수기 전면부에서 와류가 형성 되었고 이로 인해 공기의 거주시간이 증가 하였다.
- (2) 돔형상의 다공성 물질을 적층함으로써 열유속이 집중되는 다공성 물질의 중앙부분에 더 많은 공기를 통과 시킬 수 있다.
- (3) 흡수기 내부로 유입된 공기의 온도는 석영유리에 근접하였을 경우에 급격히 감소

하며, 공기가 다공성 물질에 접촉하였을 경우에는 온도가 급격히 증가한다. 또한 다공성 물질을 통과한 공기의 온도는 점차 감소한다.

(4) 동일한 조건에서 돔형상의 다공성 물질이 삽입된 흡수기의 출구온도가 원판형상인 경우보다 높게 나타났다. 따라서 돔형상의 다공성 물질이 삽입된 흡수기는 원판형상의 경우보다 유입된 태양복사에너지를 더 효율적으로 사용할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업 자원부 출연금으로 수행되었음. (과제번호: 005-N-S014-P-01-0-000)

참 고 문 헌

1. 산업자원부, 에너지정책 성과분석 및 향후 전략에 관한 보고서, 산업자원부, 2006.5.
2. D. Mills, Advances in solar thermal electricity technology, Solar Energy, Vol. 76, pp. 19-31, 2004.
3. European Commission, European Research on Concentrated Solar Thermal Energy, pp. 1-39, 2004.
4. SOLUCAR, Solucar energia S.A., 1MW power plant for southern spain (PS10), SOLARPACES, Avda. De la Buhaira, 241018 Seville, 2001.
5. Sandia National Laboratories, 10MW Solar Two Experimental Solar Facility, Five miles E of Barstow, in Daggett, 1990.
6. Buck, R., Biehler, T., Heller, P. Advanced volumetric receiver-reactor for solar methane reforming. In: Sanchez, M., Macias, M.(Eds.), Proceedings of the 6th IEA-Symposium on Solar Thermal

Concentrating Technologies, vol. I, pp. 395-405, 1993.

7. Mathur, S., Tondon, P.K., Saxena, S.C., Thermal conductivity of binary, ternary and quaternary mixture of rare gases. *Molecular Physics* 12, 569-573, 1967.

8. Thomas Fend, Robert Pitz-Paal, Two novel high-porosity materials as volumetric receivers for concentrated solar radiation, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2004.

9. Y. H. Kang, H. Y. Kwak, H. K. Yoon, C. K. Yoo, D. G. Lee, M. C. Kang, H. S. Yoon, Flux Distribution of The Dish Concentrator, *Proceedings of the Korean Solar Energy Society*, pp. 127-133, 1999.

10. P.S. Cumber, Improvements to the discrete transfer method of calculating radiative heat transfer. *Heat Mass Transfer*, pp.2215-2258, 1995.