

고온 태양열 공기식 흡수기 충전재에 따른 열전달 성능분석

이주한¹⁾, 김용¹⁾, 전용한¹⁾, 서태범²⁾, 강용혁³⁾

Heat transfer performance with laminated mesh and honeycomb volumetric air receivers for the high-temperature solar power plant system

J. H. Lee, Y. Kim, Y. H. Jeon, T. B. Seo, Y. H. Kange

Key words: Solar tower(솔라타워), Volumetric air receiver(공기식 흡수기), honeycomb(허니컴), laminated mesh(적층메쉬)

ABSTRACT: The heat transfer characteristics of solar tower receivers are experimentally investigated with receiver shapes. Generally, the heat transfer characteristics become different according to the shapes and materials of the volumetric air receiver. In order to study these effects, The experimental apparatus adopting laminated mesh and honeycombs as the volumetric air receiver is proposed. The receiver consists of laminated mesh (diameter; 100 mm, thickness; 1 mm), honeycombs (diameter; 100 mm, thickness; 30 mm) inserted into ceramic tube (inside diameter; 100 mm, outside diameter; 120 mm, length; 1000 mm). To apply heat to the receiver, an electric heater is used. To find out the heat transfer characteristics of the laminated mesh, the air temperatures are obtained by installing 3 thermocouples on each layer, dividing ceramic tube into 4 layers. Also, a radiative shield is installed to measure the only air temperature. The data for laminated mesh and honeycomb thickness of 30, 60, 90 mm are obtained. The results show that the temperature of layer 3 is higher than those of layer 2 and layer 1.

Nomenclature

a : distance from heater to fill
Q : heat transfer rate [W]
r : radius of heater, honeycomb [m]
L : thickness of honeycomb [m]
D : Diameter of honeycomb [m]
 ΔT : temperature variation [K]
m : mass flow [kg/s]
J : Radiosity [W/m²]
 ϵ : Emittance of heater
 η : Efficiency of honeycomb [%]
 θ : angle in honeycomb [°]

subscrip

1, 2 : Index

1. 서론

공기와 태양복사에너지를 청정한 전기를 만들 수 있는 태양열발전은 현재 상용화 단계에 이르고 있다. 스페인에서는 태양열발전소(PS10)가 총건설비 35,000,000 euro 의 11MW 급 발전소가

건설되어 년 23,000 MWh의 전력을 생산하고 있으며, 추후 25 MW급 으로 규모를 늘려갈 계획에 있다. 고온 태양열 발전의 한 종류인 타워형 발전 방식은 중앙에 타워를 세워 주변의 반사판으로부터 태양복사에너지를 집광하는 방식으로 중앙의 타워 맨 위에는 흡수기를 설치하여 여기서 모인 태양복사에너지를 공기를 가열한 후 이 열을 이용 하여 터빈을 작동시켜 전기를 생산하는 시스템이다. 공기식 흡수기의 경우 다공성 금속이나 허니컴 등을 집열체로 사용하는데 금속의 재질이나 다공도에 따라 열전달특성이 변화하기 때문에, 이에 대한 해석은 전체 시스템 설계에서

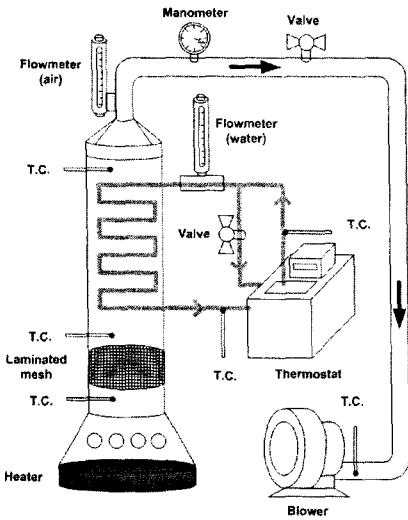


Fig. 1 Schematic of the experiment

매우 중요한 부분이다. Lu⁽¹⁾는 열교환기 관안에 충전재를 삽입하여 열전달 특성을 해석하였으며 Thomas⁽²⁾는 다공도가 다른 두 개의 금속을 설치하여 열전달 특성을 해석하였으며, Reiner⁽³⁾는 dual receiver를 제안하여 효율을 해석하였다. A.G. Imenes⁽⁴⁾는 광대역 리시버 형상을 제안하였으며, M. Becker⁽⁵⁾는 이론을 바탕으로 수치해석적으로 흡수기를 해석하였다. 본 연구에서는 규격이 같은 메쉬와 허니콤을 30, 60, 90 mm로 두께를 늘려가면서 각각의 경우에 대한 열전달 특성을 연구하였다.

2. 실험

본 연구에서는 공기식 흡수기의 형상 변화에 따른 열전달 특성을 연구하기 위해 그림 1 과 같은 실험 장치를 제안하였다. 먼저 공기식 흡수기의 형상을 조사하기 위해 원통형관을 제작하였으며, 관 안쪽에 충전재를 삽입하여 열전달 특성을 알아보았다. 유체가 원통형 개회로를 통과하는 흡입식 시스템이며, 주변으로의 열손실을 최소로 하기 위해 원형관의 재질은 세라믹을 선택하였다. 제작된 원형 세라믹관은 내경 100 mm, 외경 120 mm, 길이 1000 mm으로 그림 2 와 같이 제작하였다. 관속에는 2종류의 충전재가 삽입되는데 허니콤의 특성은 표 1, 메쉬의 특성은 표 2 와 같다. 충전재를 가열하기 위해 전기 히터(직경: 300 mm, MAX. Temp.: 1200°C)를 슬라 이닥스에 연결하여 일정한 온도를 유지시켜주었다.

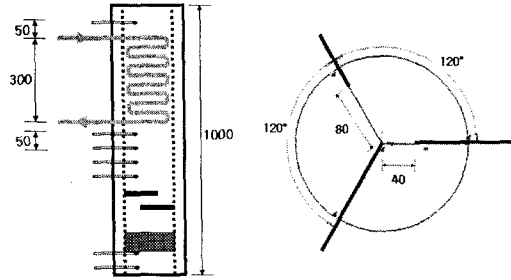


Fig. 2 Thermocouple position

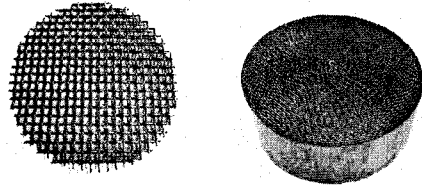


Fig. 3 Stainless steel Mesh & metal honeycomb

온도측정을 위해 K type 열전대(model: TT-30, OMEGA Co.)를 사용하였으며, 그림 2 와 같이 층마다 3개씩 삽입하였으며 관 입구에 1 층, 허니콤 아래, 위부분에 1층씩 설치하였다. 또한, 세라믹 관의 층별 온도를 알아보기 위해 허니콤 다음 부분부터 4층, 열교환기 뒷부분에 1층의 열전대를 삽입하였다. 그림 2 와 같이 각 층에는 120° 간격으로 중심에서 40 mm씩 떨어져 지면서 설치하여 각 층의 평균 온도를 측정하였다. 또한, 충전재 다음 부분에는 복사차폐물 (radiative shield)을 설치하여 순수한 공기의 온도를 측정하였다.

2.1 계산 과정

실험을 수행하기 앞서 충전재의 두께에 따른 효율을 구하기 위해 전기히터에서 허니콤까지 전달되는 열량을 다음과 같이 구하였다.

$$R_1 = r_1/a, \quad R_2 = r_1/a$$

$$X = 1 + \frac{1 + R_2^2}{R_1^2}$$

$$F_{1-2} = \frac{1}{2} \left(X - \sqrt{X^2 - 4 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2} \right)$$

(1)

여기서 F_{1-2} 는 형상계수(View factor)이며 r_1 은 히터의 반지름 r_2 는 충전재의 반지름이다.

Table. 1 Characteristics of honeycomb

Component materials of support	Fe-Cr-Al
Packed density	0.4 ~ 0.6
Space velocity	30,000 ~ 60,000 (h ⁻¹)
Pressure drop	5.5 *1

(*1: pressure drop at 1.0 Nm/s of 200 °C air)

Table. 2 Characteristics of Mesh

Component materials of support	Cr-Ni-C
Mesh	6
Wire diameter	1.0 (mm)
Real space	3.23 (mm ²)
space ratio	72 (%)

$$q_2 = \frac{E_{b2} - J_2}{(1 - \epsilon_2)/\epsilon_2 A_2} = \frac{J_2 - J_1}{1/A_1 F_{1-2}} \quad (2)$$

여기서 E_{b2} 는 충전재의 방사량이며, J_1 과 J_2 는 히터와 충전재의 라디오시티(radiosity), ϵ_2 는 충전재의 방사율이다. q_2 는 히터에서 충전재로 전달되는 총열량이다.

$$A_2 F_{2-1} = A_1 F_{1-2} \quad (3)$$

여기서 F_{2-1} 은 위와 같은 간단한 상관관계식에 의하여 구할 수 있다. 충전재의 효율을 계산하기 위해서 물과 공기가 얻는 열량은 다음과 같이 계산하였다.

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad [W] \quad (4)$$

여기서, Q 는 충전재를 통과하며 공기가 얻는 열량이며 \dot{m} 은 유량, ΔT 는 온도변화율이다.

Table. 3 Summary of experimental conditions

	충진재	충진재두께(mm)	냉각수배출온도(°C)	냉각수유량(l/min)	흡입공기유량(kg/s)	열전대위치(°)
layer1.M	Mesh	10	25	1.1	0.002	0, 120, 240
layer2.M	Mesh	20	25	1.1	0.002	0, 120, 240
layer3.M	Mesh	30	25	1.1	0.002	0, 120, 240
layer1.H	Honeycomb	10	25	1.1	0.002	0, 120, 240
layer2.H	Honeycomb	20	25	1.1	0.002	0, 120, 240
layer3.H	Honeycomb	30	25	1.1	0.002	0, 120, 240

$$\eta = \frac{Q}{q_2} \times 100 \quad [\%] \quad (5)$$

위에서 얻은 값으로 충전재의 효율 η 를 구할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 충전재의 두께 변화에 따른 공기식 흡수기의 열전달 특성을 실험적으로 연구하였다.

그림 4에서 x 축은 히터에서 충전재까지 전달되는 열량(Power of aperture)을 말하며 y 축은 공기가 충전재를 통과하며 가열된 온도(Air outlet Temp.)이다. layer 1에서는 허니컴보다 메쉬에서 4 ~ 9 °C 더 높은 온도로 가열되었으며 layer 2에서는 8 ~ 13 °C, layer 3에서는 15 ~ 21 °C 더 높은 온도로 가열되었다. 한편 layer 1과 layer 2의 온도차가 20 ~ 26 °C인 반면 layer 2와 layer 3의 온도차가 60 ~ 64 °C로 더 높은 온도차를 보였다. 전체적으로 허니컴보다 메쉬에서 더 높은 온도의 공기를 배출하였으며 충전재의 두께가 두꺼워 질수록 높은 온도를 나타내었다.

그림 5에서 y 축은 충전재의 효율(Efficiency)이다. layer 1과 layer 2 모두 허니컴보다 메쉬에서 3 ~ 4 % 더 높은 효율을 보였으며 layer 3에서는 허니컴과 메쉬의 효율차이가 5 ~ 7 %로 나타났다. 한편 layer 1과 layer 2의 효율차이가 6 ~ 9 %인 반면 layer 2와 layer 3는 14 ~ 19 %로 더 높은 온도차를 보였다. 전반적으로 허니컴보다 메쉬에서 더 높은 효율을 나타내었으며 충전재의 두께가 두꺼워 질수록 높은 효율을 나타내었다.

그림 6는 충전재가 가열되는 정도에 따라 그곳을 통과하는 공기가 어느 정도 가열되는가를 비교한 것으로서 허니컴과 메쉬의 온도 평균값을 나타내었다. 충전재의 온도가 310 ~ 355 °C로 증가하는 동안 공기의 온도는 160 ~ 310 °C로 증가하였다. 이와 같이 충전재가 가열되는 정도에 비해 공기에서 현저하게 높은 차이를 보였다.

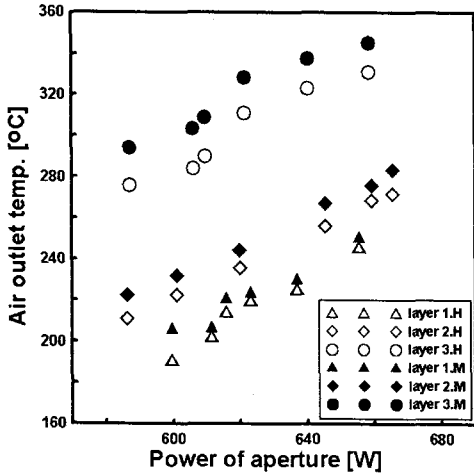


Fig. 4 Air Temp. with power of aperture

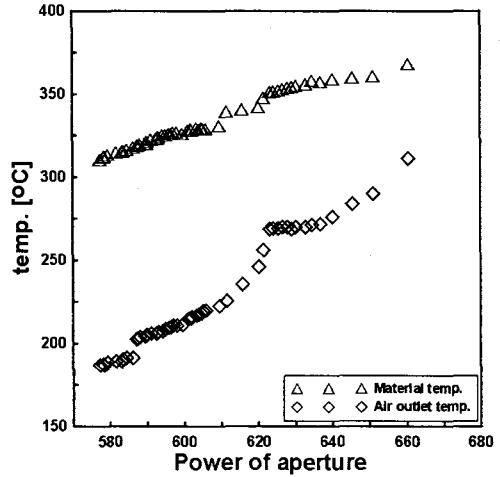


Fig. 6 Receiver Eff. with power of aperture

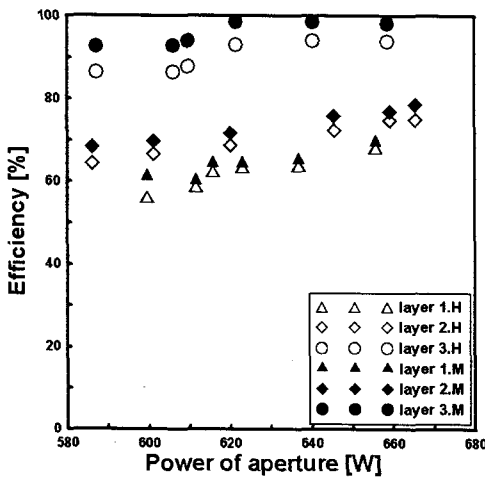


Fig. 5 Receiver Eff. with power of aperture

4. 결론

본 연구는 고온 태양열 발전의 한 형태인 솔라타워(Solar tower) 시스템의 공기식 흡수기 형상에 따른 열 전달 특성을 해석하기 위한 데이터를 수집한 것이다. 허니컴과 메쉬 두 종류의 충전재에 따른 데이터를 수집해본 결과 충전재 종류에 따른 효율, 온도차에 비해 충전재의 두께에 따른 차이가 현저하게 크게 나타났다. 두께가 두꺼워질수록 효율이 증가하였으며 가장 두꺼운 90mm에서 약 97%의 높은 효율이 나타났다. 추후 충

진재의 두께를 좀 더 미세하게 조절하며 데이터를 수집할 것이며 형상과 재질을 바꿔가며 각각의 열전달특성을 해석하고 가상 시뮬레이션을 통하여 이론값 과 실제 값을 비교 연구할 것이다.

참고문헌

1. W. Lu et al., 2006, Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part I: Metal-foam filled pipes. International journal of heat and mass transfer, Vol. 49, pp. 2751-2761
2. Thomas Fend et al., 2004, Porous materials as open volumetric solar receivers; experimental determination of Thermophysical and heat transfer properties, Solar energy materials & solar cell, Vol. 84, pp. 291-304.
3. Reiner Buck et al., 2004, Dual receiver concept for solar towers, Solar Energy, Vol. 80, pp. 1249-1254.
4. A. G. Imenes et al., 2005, The design of broadband, wide-angle interference filters for solar concentrating systems, Solar energy materials & solar cells, Vol. 90, pp. 1579-1606.
5. M. Becker et al., 2005, Theoretical and numerical investigation of flow stability in porous materials applied as volumetric solar receivers, Vol. 80, pp. 1241-1248.