

# 솔라 타워용 공기식 흡수기를 위한 충전재의 열전달 및 압력 강하 특성

조자현\*·이주한\*·김용\*·전용한\*·서태범<sup>†</sup>·강용혁\*\*

## Characteristics of heat transfer and pressure drops of the fills for solar tower volumetric air receivers

J. H. Cho\*, J. H. Lee\*, Y. Kim\*, Y. H. Jeon\*, T. B. Seo<sup>†</sup> and Y. H. Kang\*\*

**Key Words:** solar tower(솔라 타워), volumetric air receiver(공기식 흡수기), honeycomb(허니콤), laminated mesh(적층 메쉬)

### Abstract

Characteristics of heat transfer and pressure drops of fills for solar tower volumetric air receivers are experimentally investigated with the material and the thickness. The volumetric air receiver considered in this paper consists of a ceramic tube and fills are inserted in the ceramic tube. Air is used as the working fluid. Two materials, which are a honeycomb(diameter: 100mm, thickness: 30mm) and laminated mesh(diameter: 100mm, thickness: 1mm), are considered as the fills. In order to investigate the characteristics of heat transfer of fills, this volumetric air receiver is heated by an electric heater and air temperatures in ceramic tube are measured. Also, the radiative shields are installed to measure the only air temperature. In addition, the pressure losses are measured with the thickness of fills while the air goes through the fills inserted in an acrylic tube. The flow becomes turbulent and fully developed in front of the fills. The results show that the heat transfer and pressure drop characteristics of the laminated mesh are superior to those of the honeycomb.

### 기호설명

$\Delta T$  : 온도 변화 [K]

$\dot{m}$  : 질량 유량 [kg/s]

$J$  : 라디오시티 [ $W/m^2$ ]

$\varepsilon$  : 히터의 방사율

$\eta$  : 충전재의 열전달 효율 [%]

$\Theta$  : 충전재의 열전대 삽입각도 [°]

$r$  : 히터와 충전재의 반지름 [mm]

$L$  : 충전재의 두께 [mm]

$D$  : 충전재의 직경 [mm]

### 1. 서론

지구의 온난화와 화석 에너지 고갈 문제로 인하여 대체 에너지 개발이 중요시 되고 있다. 대체에너지 중 하나인 태양에너지는 자원의 무한성과 청정에너지라는 장점을 지니고 있다.

태양에너지에 대한 활용은 주택의 난방 및 급탕 시스템, 온수기, 농·수산물 건조기, 저가 집열기 및 소규모 태양광 발전 등이 주류를 이루고 있다.

---

<sup>†</sup> 서태범, 인하대학교 기계공학과

E-mail: seotb@inha.ac.kr

TEL : (032)874-7327 FAX : (032)868-1716

\* 인하대학교 기계공학과 대학원

\*\* 한국에너지기술연구원 고온태양열연구팀

---

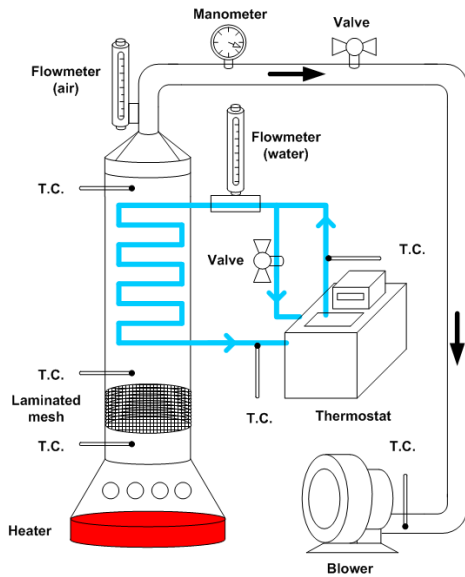


Fig. 1 Schematic of the experiment

태양 에너지를 이용한 고온 타워형 발전은 현재 스페인에서 총 건설비 35,000,000euro를 들여 건설된 11MW급 태양열발전소(PS10)<sup>(1)</sup>가 년 23,000MWh의 전력을 생산하고 있으며, 추가적으로 25MW급 타워형 태양열발전소가 스페인에서 건설될 예정이다.

고온 타워형 발전 시스템은 타워 주위의 반사판을 이용하여 태양복사 에너지를 타워 중앙의 흡수기에 집광시켜 전기를 생산하는 시스템이다. 이러한 고온 타워형 발전 시스템 중 중요한 부분을 차지하고 있는 흡수기는 크게 수증기를 이용하는 방식과 공기를 이용하는 방식으로 나눌 수 있다. 이 중에서 공기식 흡수기는 수증기식에 비해 낮은 압력에서 가동되며, 부식이나 파손을 줄일 수 있다는 장점이 있기 때문에 많은 연구가 진행 중에 있다<sup>(1-2)</sup>

공기식 흡수기는 작동유체로 공기를 사용하기 때문에 다공성 물질이나 허니콤 등과 같은 충

진재를 흡수기 내부에 삽입하여 전열면적을 크게 할 필요가 있다. 이러한 충전재를 삽입한 공기식 흡수기의 효율은 충전재의 재질이나 형상 또는 다공도에 큰 영향을 받는다.<sup>(3-5)</sup> 그러나 아직까지 충전재의 재질 변화 및 적층 방식 변화에 따른 열전달 특성 및 압력강하 특성에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 허니콤과 메쉬의 서로 다른 두 가지 종류의 충전재를 제안하였다. 이러한 두 가지 충전재를 이용하여, 각각의 적층 두께 변화에 따른 공기식 흡수기의 열전달 특성 및 압력 강하 특성을 실험적으로 연구하였으며, 결과 비교를 통해 최적의 충전재 재질 및 형상, 적층 방식을 도출하고자한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 장치

본 연구에서는 공기식 흡수기의 충전재 재질 및 적층 방식에 따른 열전달 특성 및 압력 강하 특성을 연구하였다. 실험에 사용된 충전재와 유량에 대한 실험 조건들은 Table 1과 같다.

#### 2.1.1 열전달 실험

공기식 흡수기의 열전달 특성을 연구하기 위해 Fig. 1과 같은 실험 장치를 제안하였다. 먼저 공기식 흡수기의 형상을 모사하기 위해 원통형관을 제작하였으며, 관 안쪽에 충전재를 삽입하여 열전달 특성을 알아보았다. 전체 시스템은 작동 유체인 공기가 원통형 개회로를 통과하는 흡입식 시스템이며, 주변으로의 열손실을 최소화하기 위해 세라믹 원형관을 사용하였다. 사용된 세라믹관은 내경 100mm, 외경 120mm, 길이 1000mm로 Fig. 2(a)와 같다.

Table. 1 Summary of experimental conditions

	Fill	Thickness of fill (mm)	Coolant inlet Temp. (°C)	Coolant flow rate (L/min)	Air flow rate (kg/s)
Layer 1. M	Mesh	30	25	1.1	0.002
Layer 2. M	Mesh	60	25	1.1	0.002
Layer 3. M	Mesh	90	25	1.1	0.002
Layer 1. H	Honeycomb	30	25	1.1	0.002
Layer 2. H	Honeycomb	60	25	1.1	0.002
Layer 3. H	Honeycomb	90	25	1.1	0.002

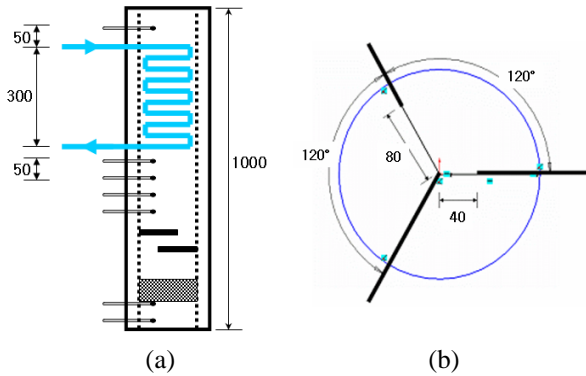


Fig. 2 Thermocouple position

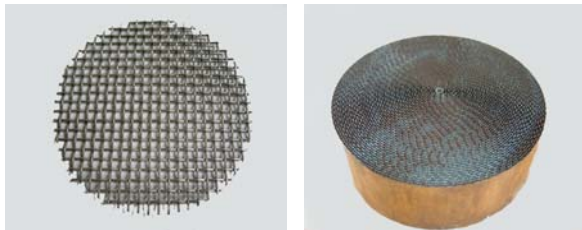


Fig. 3 Stainless steel mesh & Metal honeycomb

온도측정을 위해 Fig. 2와 같이 각 층마다 3개의 K-type 열전대(model: TT-30)를 설치하였다. 열전대의 층별 설치 위치는 Fig. 2(a)와 같다. 각 층의 평균 온도를 측정하기 위해 Fig. 2(b)와 같이 열전대를 배치하였다. 또한, 충전재 다음 부분에는 복사차폐물(radiative shield)을 설치하여 순수한 공기의 온도를 측정하였다. 측정된 온도는 데이터 수집 장치인 데이터 로거(Agilent 34970A)와 모듈(Agilent 34901A 20 channel multiplexer)을 통하여 수집된다. 작동 유체인 공기의 유량은 열교환기 다음에 설치된 차압면적식 유량계를 통해 측정된다.

세라믹관 내부에 삽입되는 충전재는 Fig. 3과 같은 허니콤과 메쉬를 사용하였다. 허니콤의 특성은 Table 2, 메쉬의 특성은 Table 3과 같다.

Table. 2 Characteristics of honeycomb

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

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

Table. 3 Characteristics of mesh

Component materials of support	Cr-Ni-C
Mesh number	6
Wire diameter	1.0 (mm)
Real space	3.23 (mm <sup>2</sup> )
Space ratio	72 (%)



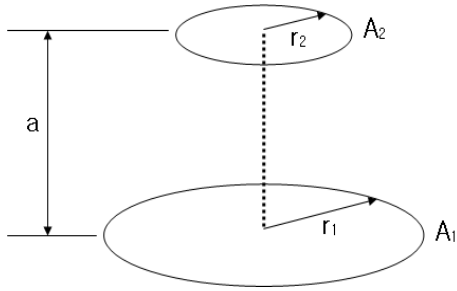
Fig. 4 Schematic of the experiment

### 2.1.2 압력강하 실험

공기식 흡수기에서 작동유체가 충전재를 통과할 때 발생하는 압력 강하를 측정하기 위해 Fig. 4와 같은 실험 장치를 제작하였다. Fig. 4와 같이 원통형 아크릴 관내에 충전재를 삽입한 후 충전재를 지날 때의 압력차를 측정하여 압력 강하를 구하였다. 전체 시스템은 관내의 작동 유체인 공기가 원통형 개회로를 통과할 수 있는 흡입식 시스템이다. 압력 강하 실험을 위해 사용된 아크릴관은 열전달 특성 실험에 사용된 세라믹관과 같은 내경 100mm, 외경 120mm, 길이 1000mm를 사용하였다. 또한, 아크릴관 내부에서의 유동을 일정하게 만들기 위해 아크릴관 입구에 메쉬를 설치하였다. 충전재 전후 압력차는 차압계(Kimo cp 200)를 이용하여 압력강하를 측정하였다. 측정된 데이터는 데이터 수집 장치인 데이터 로거(Agilent 34970A)와 모듈(Agilent 34901A 20 channel multiplexer)을 통하여 수집된다. 작동 유체인 공기의 유량은 차압계 다음에 설치된 차압면적식 유량계를 통해 측정된다.

### 2.2 계산 과정

실험을 수행하기에 앞서 충전재의 재질 및 적층 방식에 따른 열전달 효율을 구하기 위해 전기히터에서 충전재까지 전달되는 열량을 다음과 같이 구하였다.<sup>(6)</sup>



$$R_1 = r_1/a, \quad R_2 = r_2/a, \quad (1)$$

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

$$F_{1-2} = \frac{1}{2} \left( X - \sqrt{X^2 - 4 \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2} \right) \quad (3)$$

$$q_2 = \frac{E_{b2} - J_2}{(1 - \epsilon_1)/\epsilon_1 A_2} = \frac{J_2 - J_1}{1/A_1 F_{1-2}} \quad (4)$$

여기서  $F_{1,2}$ 는 형상계수(View factor)이며  $r_1$ 은 히터의 반지름,  $r_2$ 는 충전재의 반지름이다.  $E_{b2}$ 는 충전재의 방사량이며,  $J_1$ 과  $J_2$ 는 히터와 충전재의 라디오시티(radiosity)이다.  $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_2$ 는 각각 히터와 충전재의 방사율이며,  $q_2$ 는 히터에서 충전재로 전달되는 총열량이다. 이 때 사용되는 복사 물성치 및 온도 등은 실제 실험 데이터를 사용하였다.

$$A_2 F_{2-1} = A_1 F_{1-2} \quad (5)$$

여기서  $F_{1,2}$ 는 위와 같은 간단한 상관관계식을 통해 구할 수 있다.

충전재의 효율을 계산하기 위해서 공기가 얻는 열량은 다음과 같이 계산하였다.

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (6)$$

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

$$\eta = \frac{Q}{q_2} \times 100 \quad [\%] \quad (7)$$

위의 식들을 통해 충전재의 효율  $\eta$ 를 구할 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 충전재 재질 변화 및 두께 변화에 따른 열전달 및 압력 강하 특성을 실험적으로 연구하였다.

Fig. 5는 충전재의 표면 온도와 충전재를 통과한 후의 공기 온도를 비교한 그래프이다. 이 때 두 온도는 허니콤과 메쉬의 온도를 평균한 값이다. 충전재의 온도가 약 320 ~ 370°C로 증가하는 동안 충전재를 통과한 공기의 온도는 약 190 ~ 340°C로 증가하였다. 이는 Thomas Fend<sup>(4)</sup>의 충전재와 공기간의 온도분포 데이터에서 공기의 온도가 충전재의 온도에 근접해 가는 것과 일치한다. 이를 통해 본 실험의 신뢰성을 입증할 수 있다.

Fig. 6은 충전재 표면에 도달하는 열량 변화에 따른 충전재를 통과한 뒤의 공기온도 변화이다. 충전재의 재질에 따른 온도 변화는 layer 1에서 메쉬가 허니콤보다 4 ~ 9°C, layer 2에서는 8 ~ 13°C, layer 3에서는 15 ~ 21°C 더 높게 나타났다. 또한, 충전재 두께 변화에 따른 온도 차이는 layer 1과 layer 2에서 20 ~ 26°C의 온도차를 보인 반면, layer 2와 layer 3의 온도차는 60 ~ 64°C로 더 높은 온도차를 나타냈다. 전체적으로 메쉬가 허니콤보다 그리고 충전재의 두께가 두꺼워질수록 고온의 공기가 배출되는 것을 확인할 수 있다. 이는 재질 변화에 따른 충전재의 전열면적의 차이에 기인한다. 각각의 충전재의 형상을 기준으로 허니콤은 각각의 격자가 서로 겹치지 않고 같은 방향으로 공기가 이동하는 통로를 형성한다. 반면에 메쉬는 각각의 격자들이 서로 다른 방향으로 적층되어 있기 때문에 전열면적이 더 커진다. 또한, 복사 에너지를 받는 면적 역시 위와 같은 이유로 메쉬가 더 크기 때문에 메쉬의 온도가 더 높아지게 된다.

Fig. 7은 충전재 표면에 도달하는 열량의 변화에 따른 충전재의 효율 변화이다. 전반적으로 메쉬가 허니콤보다 더 높은 열전달 효율을 나타냈으며, 충전재의 두께가 두꺼워질수록 높은 효율을 보였다. Layer 1과 layer 2에서의 효율은 메쉬가 허니콤보다 3 ~ 4% 더 높게 나타났으며, layer 3에서는 메쉬와 허니콤의 효율차가 5 ~ 7%로 나타났다. 두께 변화에 따른 효율차는 layer 1과 layer 2에서 6 ~ 9%로 나타났으며, layer 2와

layer 3에서는 14 ~ 19%로 더 큰 효율차를 보였다. 그리고 충전재 표면에 도달하는 열량이 증가함에 따라 효율 역시 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8은 충전재의 두께 변화에 따른 압력강하를 나타낸다. 충전재의 두께가 layer 1에서 layer 3으로 변화할 때, 허니콤의 압력강하는 11.7 ~ 38.6Pa이고, 메쉬의 압력강하는 8.8 ~ 25.9Pa로 나타났다. 따라서 허니콤의 압력강하가 메쉬의 압력강하보다 크다는 것을 알 수 있다.

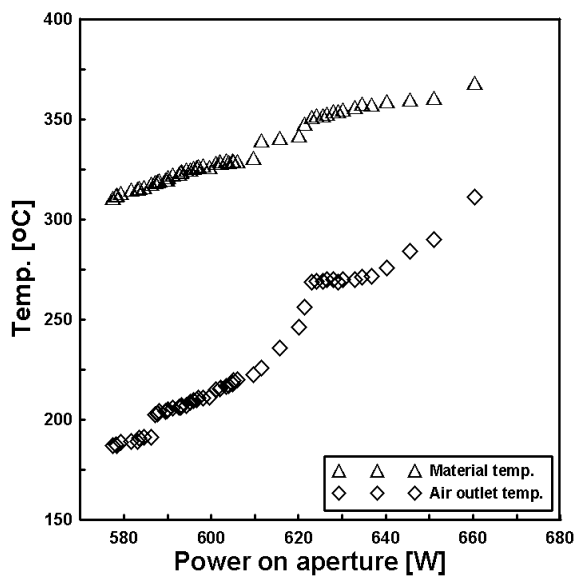


Fig. 5 Comparisons of the material Temp. and air Temp. with the power on aperture

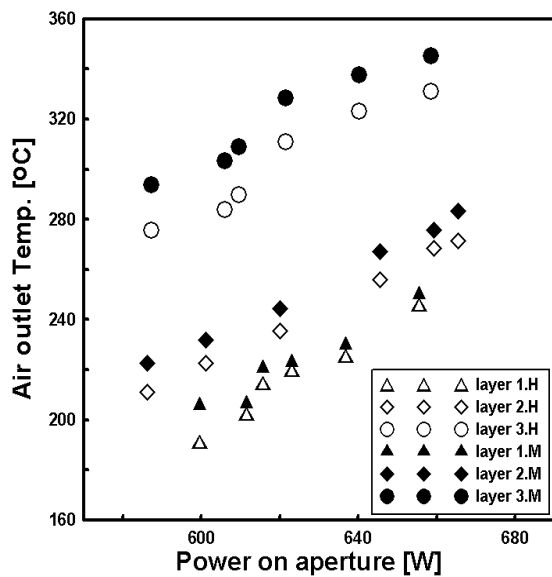


Fig. 6 Comparisons of the air Temp. with the power on aperture

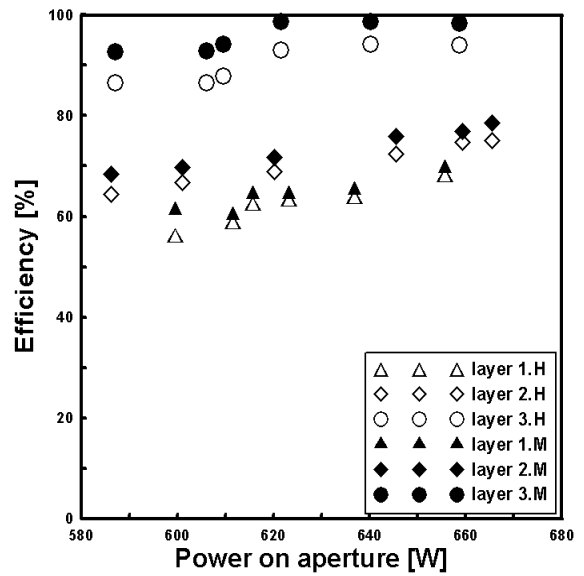


Fig. 7 Comparisons of the receiver Eff. with the power on aperture

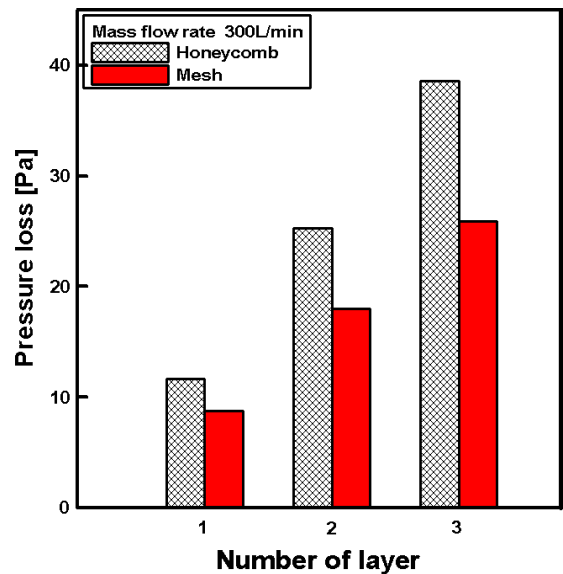


Fig. 8 Comparisons of the pressure loss with the thickness of fills

#### 4. 결론

본 연구는 고온 태양열 발전의 한 형태인 솔라 타워(Solar tower) 시스템의 공기식 흡수기 형상에 따른 열전달 및 압력 강하 특성을 해석하였다. 허니콤과 메쉬 두 종류의 충전재에 따른 실험 결과 충전재 재질에 따른 효율은 충전재에 공급되는 온도차에 비해 충전재의 두께에 따른 차이가 현저하게 크게 나타났다. 두께가 두꺼워질수록

효율이 증가하였으며, 가장 두꺼운 90mm에서 97%의 높은 효율이 나타났다. 충전재 재질에 따른 압력강하는 허니콤이 메쉬보다 더 큰 압력 강하가 일어난다는 것을 알 수 있다. 충전재의 두께의 변화에 따른 압력강하의 변화 폭은 두께가 두꺼워질수록 허니콤이 메쉬보다 압력강하 폭이 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

전체적인 실험 결과로 허니콤과 메쉬를 비교해 볼 때, 공기식 흡수기의 충전재로서 높은 열전달 효율과 낮은 압력 강하가 나타나는 메쉬가 적합하다고 생각된다.

앞으로 충전재의 재질과 형상, 그리고 유량의 변화에 따른 각각의 열전달 및 압력강하 특성을 해석 할 것이다.

## 참고문헌

- (1) SOLUCAR, Solucar energia S.A., 2001, "11MW power plant for southern spain (PS10)", SOLARPACES, Avda. De la Buhaira, 241018 - Seville.
- (2) Sandia National Laboratories, 1990, "10MW Solar Two Experimental Solar Facility", Five miles E of Barstow, in Daggett .
- (3) W. Lu., C. Y. Zhao., S. A. Tassou., 2006, "Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers," International journal of heat and mass transfer, Vol. 49, pp. 2751-2761
- (4) T. Fend., R. Pitz-Paal., O. Reutter., J. Bauer., B. Hoffschmidt., 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.
- (5) J. M. Chavez., C. Chaza., 1991, "Testing of a porous ceramic absorber for a volumetric air receiver", Solar Energy Materials, Vol 24, pp. 172-181.
- (6) Michael F Modest., 1993, "Radiative heat transfer", Mcgraw-Hill, p. 790