

## 고온 태양열 공기식 흡수기의 충전재 변화에 따른 열전달 및 압력강하 성능 분석

조 자 현, 이 주 한, 강 경 문, 서 태 범\*\*  
인하대학교 대학원 기계공학과, \*인하대학교 기계공학과

### Honeycomb and Laminated Mesh as Open Volumetric Solar Receiver : Performance of Heat Transfer and Pressure Drop

Ja Hyun Cho<sup>†</sup>, Ju Han Lee, Kyung Mun Kang, Tae Beom Seo<sup>\*</sup>  
*Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, Inha University, Incheon 402-751, Korea*

*\*Dept. of Mechanical Eng., Inha University, Incheon 402-751, Korea*

*(Received April 29, 2008; revision received October 6, 2008)*

**ABSTRACT:** The characteristics of heat transfer and pressure drop of several different porous materials which can be used as inserts inside solar volumetric air receivers were experimentally investigated. Generally, porous materials were inserted into solar volumetric air receivers to increase the thermal performance. In the present work, honeycomb (diameter: 100 mm, thickness: 30 mm), laminated mesh (diameter: 100 mm, thickness: 1 mm) are considered as the inserts for the experiment. The experimental apparatus consists mainly of a cylindrical ceramic duct as a receiver and an electric heater as an energy source. This system is an intake open loop, which used as air of working fluid. The temperatures inside the ceramic tube are measured by thermocouples, which are installed at each layer of the porous materials. The pressure-drop experimental apparatus is fabricated alike the above experimental equipment. An acrylic tube is used like as the ceramic tube, which has the same specifications of the ceramic tube. The pressure drop of porous materials inserted in the acrylic tube is measured between front and rear of those by transmitter. The results show that the laminated mesh surpasses the honeycomb of heat transfer and pressure drop increase as the porous material thickness and Reynolds number.

**Key words:** Solar tower(솔라타워), Volumetric air receiver(공기식 흡수기), Honeycomb(허니콤), Laminated mesh(적층메쉬)

#### 기 호 설 명

$A$  : 히터와 다공성 물질의 면적 [ $m^2$ ]  
 $A_2$  : 다공성 물질의 면적 [ $m^2$ ]

$a$  : 히터와 다공성 물질 사이의 거리 [mm]  
 $C_p$  : 정압비열 [ $kJ/kg \cdot K$ ]  
 $D$  : 다공성 물질의 직경 [mm]  
 $D_h$  : 흡수기의 직경 [mm]  
 $E$  : 다공성 물질의 방사량 [ $W/m^2$ ]  
 $F$  : 형상계수  
 $J_f$  : 히터의 라디오시티 [ $W/m^2$ ]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-32-874-7327; fax: +82-32-868-1716

E-mail address: seotb@inha.ac.kr

- $J_2$  : 다공성 물질의 라디오시티 [ $W/m^2$ ]
- $L$  : 다공성 물질의 두께 [mm]
- $m$  : 질량 유량 [kg/s]
- $Q$  : 공기가 얻은 열량 [W]
- $q_2$  : 다공성 물질로 전달되는 총열량 [W]
- $r_1$  : 히터의 반지름 [mm]
- $r_2$  : 다공성 물질의 반지름 [mm]
- $Re$  : Reynolds 수,  $\frac{UD_h}{\nu}$
- $\Delta T$  : 온도 변화 [K]

그리스 문자

- $\epsilon_1$  : 히터의 방사율
- $\epsilon_2$  : 다공성 물질의 방사율
- $\eta$  : 다공성 물질의 열전달 효율 [%]

1. 서 론

최근 국내의 에너지 소비 증가율은 정부정책에 따른 고효율 에너지 기자재 보급과 에너지 절약 의식 확산에 의하여 점점 안정적인 성장세를 보이고 있다. 이러한 세계적인 추세와는 반대로 국내의 에너지 소비 실정은 자원의 해외 의존도가 점차 높아지는 경향을 보이고 있다. 그렇기 때문에 급작스런 국외 에너지 가격 변동에 따른 국내의 안정적인 에너지 공급에 어려움을 겪게 된다. 따라서 안정적인 에너지 공급을 하기위한 근본적인 해결방법으로서 자원의 무한함과 청정성이라는 장점을 지닌 신재생에너지 분야에 대한 투자와 연구·개발이 필요하다. 연간 태양으로부터 지구에 도달하는 태양에너지의 1%만 활용하더라도 전 세계 에너지 수요를 감당할 수 있기 때문에 태양에너지는 화석연료를 대체할 수 있는 가장 경쟁력 있는 분야로 평가받고 있다.

일반적으로 태양 에너지의 이용 분야는 집열 온도, 즉 활용 온도에 따라 저온( $100\text{ }^\circ\text{C}$  이하), 중온( $100\sim 300\text{ }^\circ\text{C}$ ), 고온( $300\text{ }^\circ\text{C}$  이상) 활용 분야로 세분된다. 중·고온 이용 분야인 집광형 집열기는 집광 형태의 기하학적 구조에 따라 진공관형, Parabolic Dish형, PTC(Parabolic Trough Concentrator), CPC(Compound Parabolic Concentrator), Solar Tower 형이 있다.

타워형 고온 태양열 시스템의 주요 요소 중 하

나인 흡수기는 고집광된 태양복사에너지를 열에너지로 변환하는 장치이다. 흡수기에 집광된 태양복사에너지를 전달하기 위한 작동유체로는 공기, 수증기, 용융염 등이 사용된다. 이 중 공기는 수증기나 용융염 등에 비해 낮은 압력에서 사용할 수 있어 초기 투자비용을 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한, 부식 및 고압 운전 조건에 따른 파손을 줄일 수 있으며, 타 유체에 비해 추후 관리가 용이하고 발전 폐기물이 적기 때문에 환경친화적인 발전이 가능하다.<sup>(1-2)</sup> Lu et al.<sup>(3)</sup>은 열교환기 관 안에 다공성 물질을 삽입하여 열전달 특성을 해석하여 다공성 물질의 다공도와 기공율이 열전달 성능에 중요한 영향을 미친다는 것을 보였다. Buck et al.<sup>(4)</sup>은 기존의 공기식 흡수기 앞쪽으로 튜브형 증발기를 설치하는 이중 흡수기(dual receiver)를 제안하여 시스템 전체 효율을 높일 수 있도록 하였으며, Fend et al.<sup>(5)</sup>은 공기식 흡수기 집열체로 두 개의 층으로 구성된 다공성 금속과 서로 평행한 채널로 구성된 다공성물질을 비교하여, 이중 구조의 다공성물질에서 더 높은 열전달 효율이 나타나는 것을 보였다. 또한 Fend et al.<sup>(6)</sup>은 공기식 흡수기에 사용되는 다공성 금속의 재료와 구조적 특성을 제시하여 각각의 금속에 대한 열전달 및 압력강하 특성을 실험적으로 연구하였다. 이와 같이 고온 태양열 공기식 흡수기에 대한 실험적, 수치 해석적인 연구가 활발히 진행되고 있다.



Fig. 1 Schematic of the experiment(Heat transfer).

그러나 아직까지 다공성물질의 다양한 재질 변화, 적층방법 변화 및 다양한 작동조건 변화에 따른 흡수기 성능 변화에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 다공성물질로 사용된 메쉬와 허니콤의 적층 방식 즉, 적층 두께 변화에 따른 열전달 및 압력강하 특성을 비교 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

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

#### 2.1.1 열전달실험

공기식 흡수기의 형상변화에 따른 열전달 특성을 알아보기 위한 실험 장비를 Fig. 1과 같이 구성하였다. 실험 시스템은 크게 인공열원, 흡수기, 열교환기로 구성되어 있다.

에너지를 열전달 매질인 공기가 흡수기를 통과

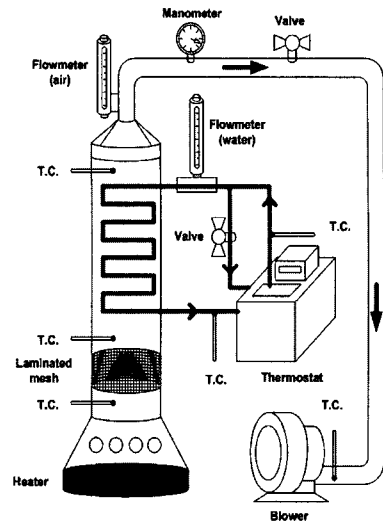


Fig. 2 Schematic of the experiment(Heat transfer).

하면서 가열된 후 열교환기를 지나면서 냉각되어 다시 대기 중으로 방출되는 흡수식 개방 시스템이다. 인공 열원은 지름 300 mm, 평균온도 1200 °C, 최대출력 3 kW의 원형 히터를 사용하였다. 그리고 히터의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 가변 전압장치를 사용하였다. 인공열원으로부터 흡수기로 도달하는 복사열손실을 줄이기 위하여 고 깔모양의 하우징 제작하였으며, 하우징 내부에는 반사판을 설치하여 복사열의 집광효과를 높였다. 흡수기는 내경 100 mm, 외경 120 mm, 길이 1000 mm인 원통형관 형상을 제작하였다. 관의 재질은 단열효과를 최대로 하여 열손실을 최소화하기 위하여 초고온 상태에서 열적변형이 거의 발생하지 않는 세라믹 관을 사용하였다. 공기식 흡수기에 삽입되는 다공성물질로는 Fig. 3과 같은 메쉬, 허니콤을 사용하였다. 허니콤과 메쉬는 특성은 Table 2와 Table 3과 같다.

Table 1 Summary of experimental conditions

Fill	Thickness of porous material (mm)	Coolant flow rate (L/min)	Air flow rate (kg/s)
Layer 1. M Mesh	30	1.1	0.002
Layer 2. M Mesh	60	1.1	0.002
Layer 3. M Mesh	90	1.1	0.002
Layer 1. H Honeycomb	30	1.1	0.002
Layer 2. H Honeycomb	60	1.1	0.002
Layer 3. H Honeycomb	90	1.1	0.002

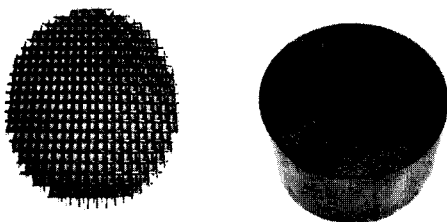


Fig. 3 Stainless steel mesh and metal honeycomb.

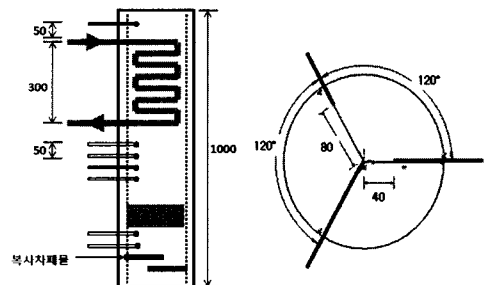


Fig. 4 Thermocouple position.

Table 2 Characteristic 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.  
space velocity : volume of flow fluid/honeycomb volume.

Table 3 Characteristic of mesh

Component materials of support	Cr-Ni-C
Mesh	6 (mesh/inch)
Wire diameter	1.0 (mm)
space ratio	72 (%)

space ratio : total area/wire area.

순수 공기의 온도만을 측정하기 위하여 Fig. 4와 같이 흡수기 입구부에 복사 차폐물을 설치하였으며, 다공성물질 각 층에 각각 3개의 K-type 열전대(model : TT-30)을 설치하여 온도를 측정하였다. 세라믹관 내부에는 데이터 측정을 위한 계측 기기들의 작동온도를 유지시키기 위해 Helical tube형 열교환기를 설치하였다. 고온의 공기를 효과적으로 냉각시키기 위해 동관을 이용하여 대향류방식의 열교환기를 설계하였다. 열교환기의 작동유체로서 물을 사용하였으며, 작동유체의 온도를 일정하게 유지시키기 위하여 항온수조를 이용하였다.

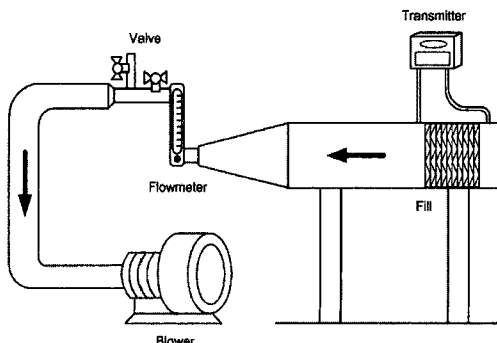


Fig. 5 Schematic of the experimental (pressure drop).

2.1.2 압력강하실험

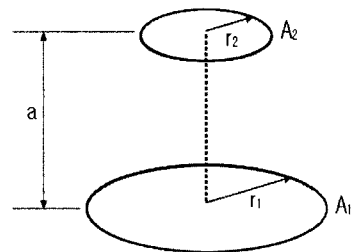
공기식 흡수기에서 작동유체가 다공성물질을 통과할 때 발생하는 압력 강하를 측정하기 위해 Fig. 5와 같은 실험 장치를 제작하였다. 원통형 아크릴 관내에 다공성물질을 삽입한 후 유량이 100~570 L/m로 다공성물질을 지날 때의 압력차를 측정하였다. 전체 시스템은 작동 유체인 공기가 원통형 개회로를 통과할 수 있는 흡입식 시스템이다. 압력 강하 실험을 위해 사용된 아크릴 관은 열전달 특성 실험에 사용된 세라믹 관과 같은 크기를 갖는다. 또한, 아크릴 관 내부에서의 유동을 일정하게 만들기 위해 아크릴 관 입구에 메쉬를 설치하였다.

Re 수에 대하여 다공성물질의 전후 압력차를 차압계 (model : cp 200)를 이용하여 측정하였다.

측정된 데이터는 데이터 수집 장치인 데이터 로거와 모듈을 통하여 수집하였다. 작동 유체인 공기의 유량은 차압계 다음에 설치된 차압면적식 유량계를 통해 측정된다.

2.2 실험결과 처리 방법

실험을 수행하기에 앞서 다공성물질의 재질 및 적층 방식에 따른 열전달 효율을 구하기 위해 전기히터에서 다공성물질까지 전달되는 열량을 다음과 같이 구하였다.<sup>(7)</sup>



$$R_1 = r_1/a, \quad R_2 = r_2/a \tag{1}$$

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

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

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

여기서  $F_{1-2}$ 는 형상계수(View factor)이며  $r_1$ 은 히터의 반지름,  $r_2$ 는 다공성물질의 반지름이다.  $E_{b2}$ 는 다공성물질의 방사량이며,  $J_1$ 과  $J_2$ 는 히터와 다공성물질의 라디오시티(radiosity)이다. 히터의 방사율은 0.95로  $\epsilon_1$ 로 나타내었으며, 메쉬는 0.51~0.72, 허니콤은 0.49~0.64의 방사율을 가지며  $\epsilon_2$ 로 나타내었다. 그리고  $q_2$ 는 히터에서 다공성 물질로 전달되는 총열량이며 이때의 히터의 표면 온도는 1050~1100 °C이며, 흡수기 표면의 온도는 326.8~371.8 °C였다.

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

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

다공성물질의 효율을 계산하기 위해서 공기가 얻는 열량은 다음과 같이 계산하였다.

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

여기서,  $Q$ 는 다공성물질을 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 다공성물질의 효율  $\eta$ 를 구할 수 있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 열전달 실험결과

공기식 흡수기의 경우 열전달 성능을 분석하는 기준은 흡수기로 도달하는 복사에너지를 설치한 다공성물질을 통하여 가능한 많은 양을 가용에너지로 전환시키는 것이다. 이를 가능하게 하기 위해서 다공성물질의 열전달 성능을 향상시켜야 한다. 다음 결과는 일정한 유량을 기준으로 허니콤과 메쉬 두 가지 종류의 다공성물질에 대해 30 mm, 60 mm 그리고 90 mm로 두께 변화를 준 경우에 대해 열전달 성능을 분석한 결과이다.

Fig. 6은 히터에서 다공성물질까지 전달되는 열량에 따른 다공성물질의 전·후의 가열된 공기

온도 차를 나타내고 있다. layer 1 (thickness : 30 mm)에서는 허니콤이 메쉬보다 3~9 °C 더 큰 온도차를 보였으며, layer 2 (thickness : 60 mm)에서는 6~11 °C, layer 3 (thickness : 90 mm)에서는 15~22 °C 더 큰 온도차가 발생하였다. 그리고 두께 변화에 따른 온도차는 layer 1과 layer 2의 온도차가 30 °C인 반면 layer 2와 layer 3에서의 온도차는 61 °C로 더 큰 온도차를 보였다. 전체적으로 허니콤보다 메쉬가 더 큰 온도차를 보였으며, 다공성물질의 두께가 두꺼워질수록 더 낮은 온도차가 나타난 것을 알 수 있다. 이러한 결과의 원인으로는 공기와의 접촉면적에 따른 정체 시간의 차이를 들 수 있다. 각각의 다공성물질의 형상을 기준으로 허니콤은 각각의 격자가 서로 겹치지 않는 한 방향으로의 공기의 이동 경로를 형성한다. 반면에 메쉬는 각각의 격자들이 임의의 방향으로 적층되어 있기 때문에 공기와의 접촉 면적이 더 커지고 그에 따른 격자 사이에서의 공기의 정체 시간이 길어지게 된다. 따라서 이러한 이유로 메쉬에서 작동 유체인 공기가 복사에 지를 더 많이 흡수할 수 있어 더 낮은 온도차를 갖게 된다. 그리고 Layer 2에서 Layer 3으로 두께의 변화에 따른 상대적으로 큰 온도 변화는 공극 사이에서 열에너지의 정체시간증가와 함께 불규칙한 유동에 따른 난류의 혼합을 일으켜서 열전달 현상을 증가시키기 때문이다.

Fig. 7은 히터에서 다공성물질까지 전달되는 열량에 따른 다공성물질의 효율(efficiency)을 나타낸 것이다. Layer 1과 layer 2 모두 허니콤보다 메쉬에서 3~4% 더 높은 효율을 보였으며, layer 3에서는 허니콤과 메쉬의 효율차이가 5~7%로 나타났다. 두께의 변화에 따른 효율 차이는 layer 1과 layer 2 사이는 6~9%인 반면 layer 2와 layer 3은 14~19%로 더 큰 효율차를 보였다. 그리고 전반적으로 메쉬가 허니콤보다 POA가 증가할수록 효율이 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 전열면적의 증가와 유동의 불균일성으로 인한 열전달의 증가로 인하여 열에너지의 저장용량이 메쉬가 허니콤보다 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 온도차가 가장 심한 layer 3에 대하여 허니콤과 메쉬를 통과한 공기의 온도를 비교한 결과 그래프이다. 이 때 두 온도는 허니콤과 메쉬의 온도를 평균한 값이다. 다공성물질의 온도가 약 320~370 °C로 증가하는 동안 공기의 온도는 약 190~340 °C로 증가하였다. 이는 Thomas et

al.의 다공성물질과 공기 간의 온도분포 데이터에서 공기의 온도가 다공성물질의 온도에 근접해 가는 것과 일치한다.<sup>(6)</sup>

3.2 압력강하 실험결과

허니콤과 메쉬 두 가지 다공성물질을 30 mm, 60 mm 그리고 90 mm의 두께를 증가시키면서 압력강하 특성을 분석한 결과 이다.

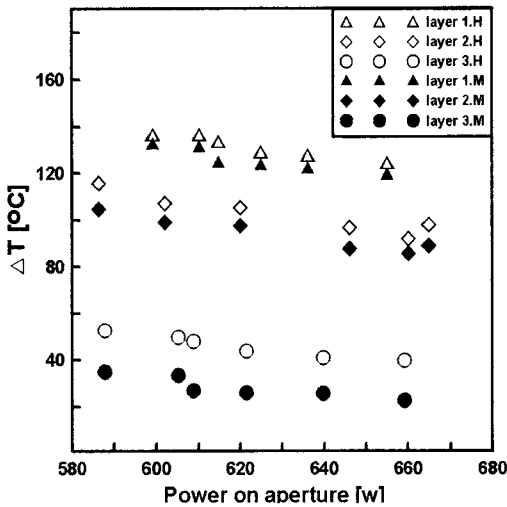


Fig. 6 Different Air Temp. with power on aperture.

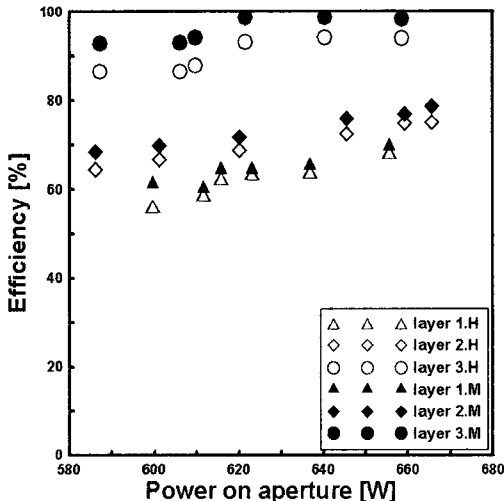


Fig. 7 Receiver efficiency with power on aperture.

Fig. 9는 Re 수에 따른 메쉬와 허니콤의 압력손실을 나타낸다. 다공성물질 재질에 따른 압력손실은 Re 수가 1500~6500으로 변화할 때 layer 1과 layer 2에서는 허니콤이 메쉬보다 12~57%, layer 3에서는 20~62% 더 큰 압력손실을 나타내었다. 또한, 다공성물질의 두께 변화에 따른 압력손실은 허니콤이 메쉬에 비해 크며 선형적으로 압력손실이 발생한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 압력강하가 가장 크게 일어나는 Layer 3에 대하여 Re 수 변화에 따른 압력계수 변화를 나타낸 그래프이다. Re 수가 1500일 때는 비슷한 압력계수를 나타내지만 Re 수가 증가할수록 압력계수가 작아지는 것을 알 수 있다.

4. 결론

- (1) 허니콤과 메쉬 모두 도달하는 열량과 두께가 증가할수록 효율이 증가하였으며, 메쉬에서 보다 높은 효율이 나타났다. 가장 두꺼운 90 mm에서 메쉬는 95.40%, 허니콤은 74.37%로 메쉬가 더 높은 효율을 나타냈다.
- (2) Re 수의 변화에 따른 다공성물질의 재질 변화에 따른 압력강하는 두께와 Re 수의 증가에 따른 압력강하 폭이 허니콤이 메쉬보다 더 크게 나타났다. 두께와 Re 수가 가장 큰 90 mm, Re 6500에서 메쉬는 46 Pa, 허니콤은 57 Pa의 가장 큰 압력강하를 나타냈으며, 허니콤과 메쉬 모

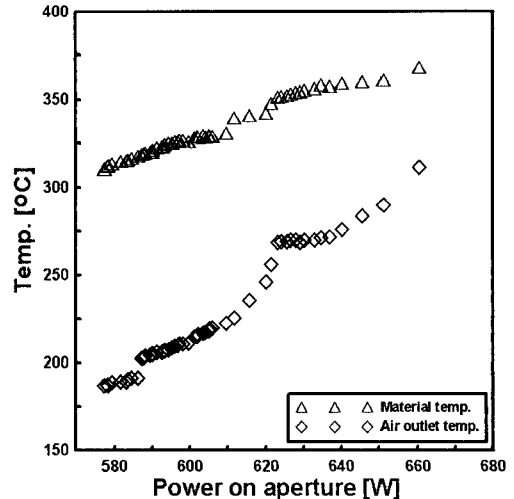


Fig. 8 Comparison of material Temp. and air Temp. with power on aperture.

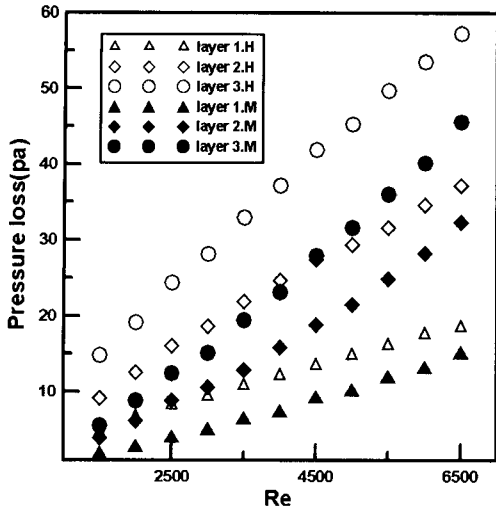


Fig. 9 Comparisons of the pressure loss with Reynolds number.

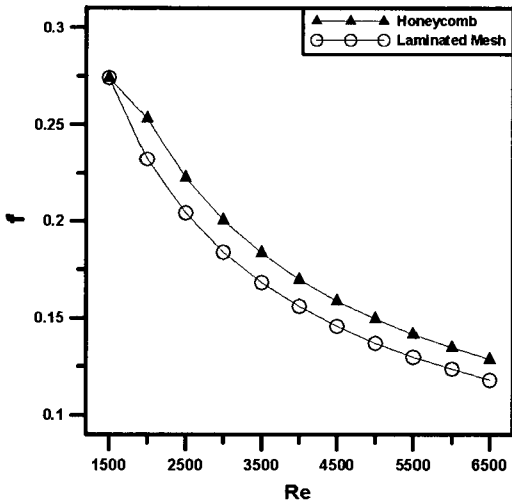


Fig. 10 Comparisons of the friction factor with Reynolds number.

두 압력강하가 선형적으로 증가하는 경향이 나타났다.

제안된 실험 조건들을 비교해 볼 때, 고온 타원형 태양열 발전용 흡수기의 다공성물질로서 높은 열전달 효율과 낮은 압력 강하를 보이는 메쉬가 허니콤보다 적합하다.

참고문헌

1. Sandia National Laboratories, 1990, 10 MW Solar Two Experimental Solar Facility, Five miles E of Barstow, in Daggett.
2. European Commission, 2007, European Research on Concentrated Solar Thermal Energy, Community research, pp. 26-39.
3. Lu, W., Zhao, C. Y. and Tassou, S. A., 2006, Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers Part I : Metal-foam filled pipes, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, No. 15-16, pp. 2751-2761.
4. Buck, R., Barth, C., Eck, M. and Steinmann, W. D., 2004, Dual receiver concept for solar towers, Solar Energy, Vol. 80, No. 10, pp. 1249-1254.
5. Fend, T., Hoffschmidt, B., Pitz-Paal, R., Reutter, O. and Riebrock, P., 2004, Porous materials as open volumetric solar receivers: Experimental determination of thermophysical and heat transfer properties, Energy, Vol. 29, No. 5-6, pp. 823-833.
6. Fend, T., Pitz-Paal, R., Reutter, O., Bauer, J. and Hoffschmidt, B., 2004, Two novel high-porosity materials as volumetric receivers for concentrated solar radiation, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 84, No. 1-4, pp. 291-304.
7. Modest, M. F., 1993, Radiative heat transfer, McGraw-Hill, New York, pp. 790-800.