

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 27, No. 2, 2007

태양 복사에너지 충전재 변화에 따른 고온 태양열 공기식 흡수기의 열전달 성능 해석

이주한*, 김용*, 전용한*, 서태범**†, 강용혁**

*인하대학교 기계공학과 대학원(leejuhan@empal.com, 970069@hanmail.net, wjsdydgks@hotmail.com)

**인하대학교 기계공학부(seotb@inha.ac.kr), **한국에너지기술연구원 고온태양열연구팀(yhkang@kier.re.kr)

Heat transfer performance with different fills as volumetric air receivers for concentrated solar radiative energy

Lee, Ju-Han*, Kim, Yong*, Jeon, Yong-Han*, Seo, Tae-Beom*, Kang, Yong-Heack**

*Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Inha university, Incheon, Korea

**† Department of Mechanical Engineering, Inha university, Incheon, Korea

**Korea institute of energy research

Abstract

The heat transfer characteristics of solar tower receivers are experimentally investigated with receiver shapes. Generally, these become different according to the shapes and materials of the volumetric air receiver. In order to study these effects, the 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.

Keywords : solar tower(솔라타워), volumetric air receiver(공기식 흡수기), honeycomb(허니콤), laminated mesh(적층메쉬)

접수일자 : 2007년 4월 23일, 심사완료일자: 2007년 5월 21일

교신저자 : 이주한(leejuha@empal.com)

기 호 설 명

- a : distance from heater to fill [mm]
- Q : heat transfer rate [W]
- r : radius of heater, fill [mm]
- L : thickness of fill [mm]
- D : diameter of fill [mm]
- ΔT : temperature variation [K]
- \dot{m} : mass flow rate [kg/s]
- J : radiosity [W/m^2]
- ϵ : emittance
- η : efficiency of fill [%]
- θ : angle of fill [$^\circ$]
- 1,2 : index

1. 서 론

최근까지 전세계적으로 태양에너지 연구는 주택의 난방 및 급탕 시스템, 온수기, 농·수산물 건조기, 저가 집열기 및 소규모 태양광 발전 등이 주류를 이루고 있으며, 태양열 발전에 대한 연구는 발전에 필요한 고온 획득 방법과 고온 재료 개발 등의 문제로 인해 큰 진전을 보이지 못하고 있다. 그러나 80년대 중반 미국에서 10 MW급 태양열 발전의 실용화가 이루어진 이후 각국에서 집중적인 개발 투자를 계속하고 있어 2000년대에는 가장 강력한 태양 에너지 이용 방법으로 광범위하게 보급될 전망이다. 특히, 스페인에서는 태양열발전소(PS10⁽¹⁾)가 총건설비 35,000,000 euro의 11 MW급 발전소가 건설되어 년 23,000 MWh의 전력을 생산하고 있으며, 추후 25 MW급으로 규모를 늘려갈 계획에 있다

이러한 고온 태양열 발전의 한 종류인 타워형 발전 방식은 중앙에 타워를 세워 주변의 반사판으로부터 반사된 태양광을 중앙에 위치한 탑의 일정한 크기의 면에 모아 고열을 얻고, 이 고열로 열교환기 등을 이용하여 고압 수증기를 발생시켜 전기를 얻는 방식이다. 이 때 고온을 전달하기 위한 유체로는 공기, 수증기, 용융염 등이 사용된다. 이 중

공기는 수증기나 용융염을 사용할 때에 비해 낮은 압력에서 사용할 수 있어 초기 투자비를 줄일 수 있으며, 부식 등에 의한 파손을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 또한, 타 유체에 비해 추후 관리가 용이하며 발전 폐기물이 적기 때문에 환경 친화적인 발전이 가능하다. 이러한 장점으로 인해 전 세계적으로 공기를 작동 유체로 하는 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽²⁾

공기를 작동 유체로 사용하는 공기식 흡수기의 경우 다공성 금속이나 허니콤 등을 집열체로 사용하는데 금속의 재질이나 다공도에 따라 열전달특성이 변화하기 때문에, 이에 대한 해석은 전체 시스템 설계에서 매우 중요한 부분이다. Lu⁽³⁾는 열교환기 관 안에 충전재를 삽입하여 열전달 특성을 해석하여 충전재의 다공도와 기공율이 열전달 성능에 중요한 영향을 미친다는 것을 보여주었다. Thomas⁽⁴⁾는 공기식 흡수기 집열체로 두 개의 층으로 구성된 다공성 금속과 서로 평행한 채널로 구성된 허니콤을 사용하여 데이터를 수집하였으며 이중구조의 다공성금속에서 더 높은 효율이 나타나는 것을 보여주었다. Reiner⁽⁵⁾는 기존의 공기식 흡수기 앞쪽으로 튜브형 증발기를 설치하는 이중 흡수기(dual receiver)를 제안하여 시스템 전체 효율을 높일 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 그림 1과 같은 개념의 시스템을 제작하여, 충전재로 사용된 메쉬와 허니콤의 적층 방식 즉, 적층 두께 변화에 따른 열전달 특성을 연구하였다.

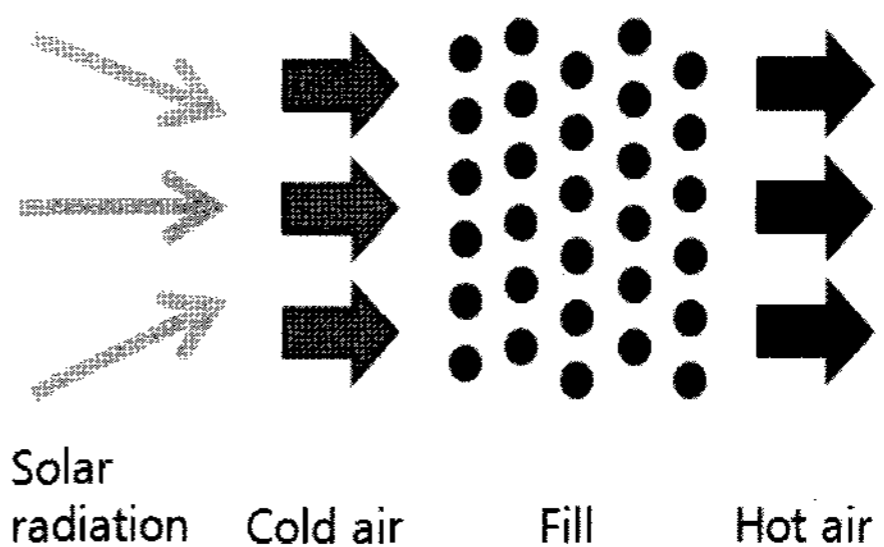


그림 1. Open volumetric receiver principle

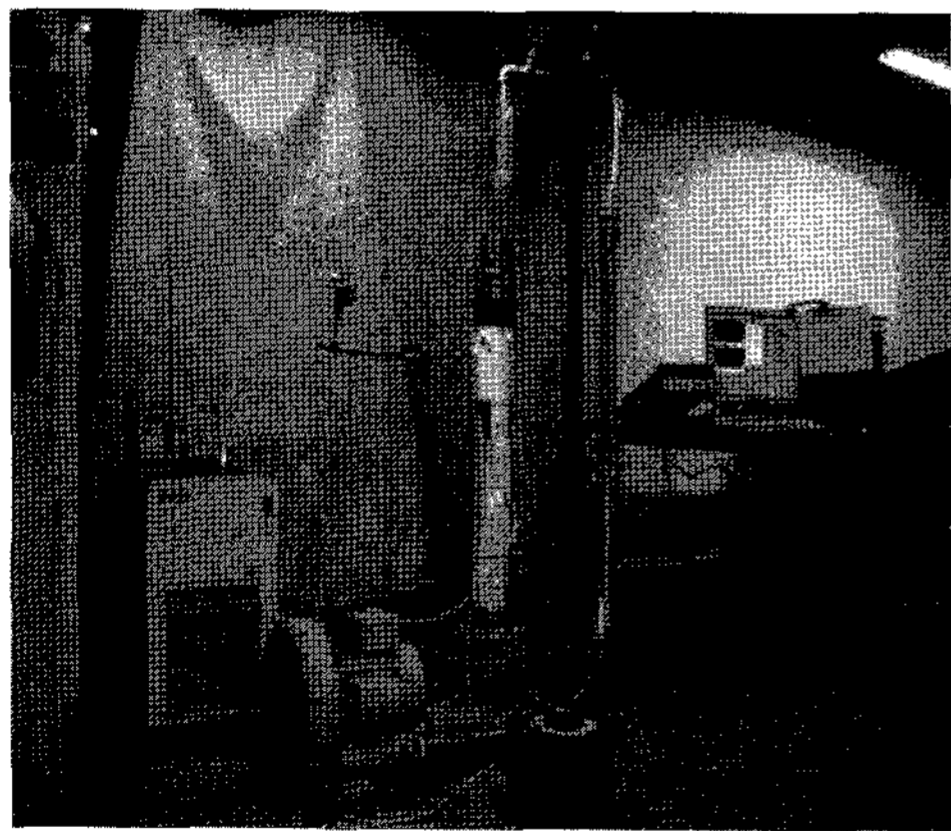
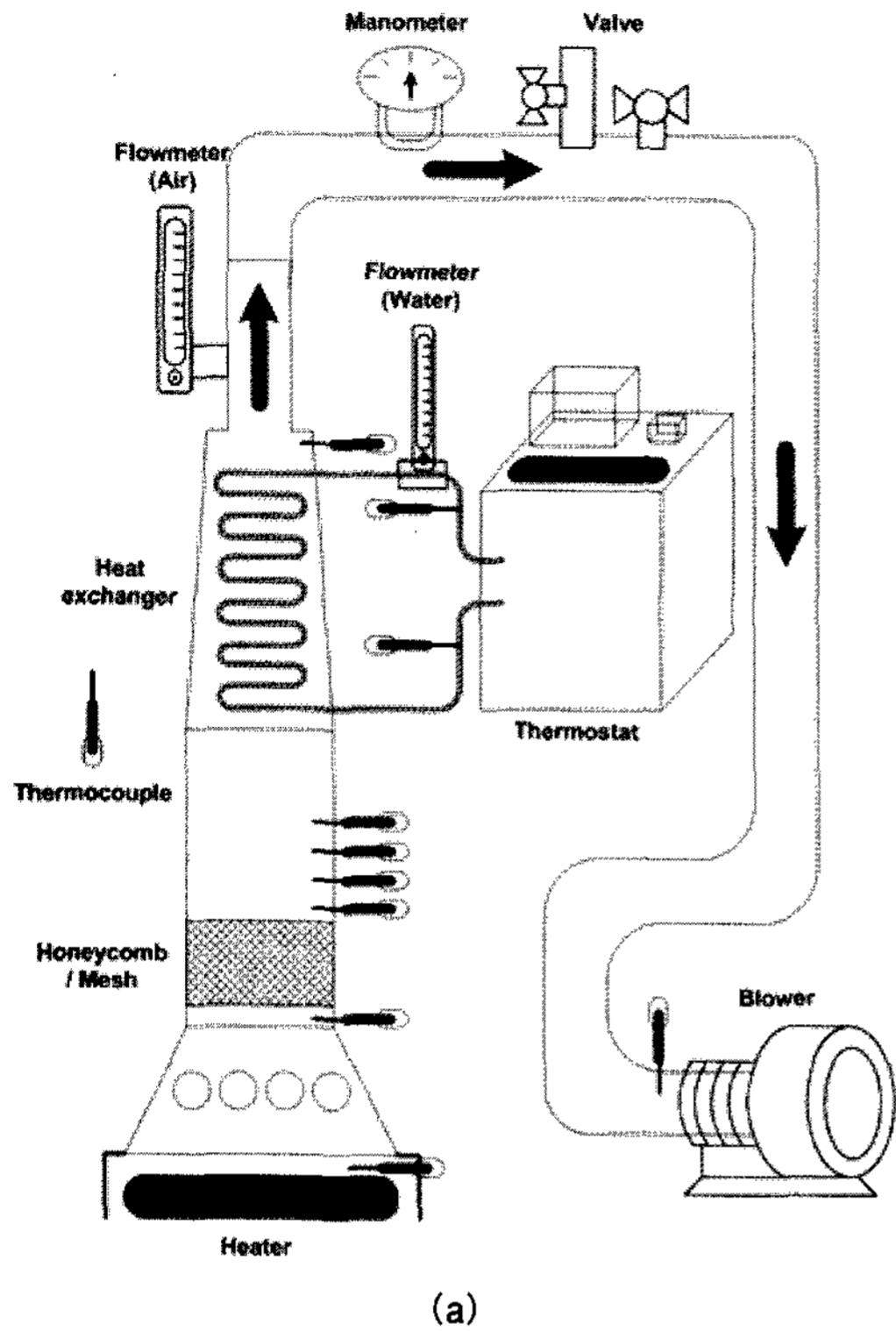


그림 2. Schematic diagram of experimental system

2. 실험

2.1 실험장치

그림 2 (a)는 공기식 흡수기의 형상 변화에 따른 열전달 특성을 측정 및 연구할 수 있는 실험장치

개략도이며 실제 실험 장치는 그림 2 (b)이다. 실험 장치는 크게 열원, 흡수기, 열교환기로 구성되어 있다. 전체 시스템은 열원에서 발생하는 복사열에 의해 예열된 흡수기로 대기 중의 공기가 통과하며 가열된 후 열교환기를 지나면서 냉각되어 다시 대기 중으로 방출되는 개방형 시스템이다.

열원으로는 지름 300 mm, 평균 표면온도 1200 °C, 최대출력 3kW의 원형 초고온 히터를 사용하였다. 히터의 온도를 일정하게 유지하기 위해 가변 전압장치를 사용하였다. 전기히터의 복사열을 흡수기로 집중시키기 위해 고깔모양의 하우징을 제작하였으며, 하우징 안쪽은 반사판으로 처리하여 빛의 집중도를 높였다. 하우징 중간 둘레 부분에 30 mm 간격으로 직경 50 mm의 구멍을 내어 대기 중의 공기가 흡입될 수 있도록 하였다.

그림 3과 같이 흡수기가 설치되는 부분은 원통형관으로 제작하였다. 관의 재질은 단열효과를 최대로 하여 열손실을 최소화 하고, 초고온 상태에서 열적변형을 최소화하기 위해 세라믹으로 하였다. 세라믹 원통형관은 내경 100 mm, 외경 120 mm, 길이 1,000 mm로 제작하였다.

그림 4는 충전재로 사용한 메쉬와 허니컴이다. 두 충전재의 직경은 100 mm이다. 충전재의 특성은 표 1, 2에 종합하였다.

세라믹관 내부에는 다른 계측 기기들의 작동온도를 유지시키기 위해 열교환기를 설치하여 고온으로 가열된 공기를 냉각하였다. 공기를 효과적으로 냉각하기 위해 대향류방식(Counter flow)으로 유체를 이송하였으며, 동관을 이용하여 열교환기를 제작하였다. 사용된 동관의 직경은 10 mm, 총길이는 2,500 mm이다. 열교환기를 지나는 유체는 물이며, 일정한 온도의 물을 열교환기에 공급하기 위해 항온수조를 이용하였다.

2.2 데이터 수집

흡수기의 열전달 특성을 파악하기 위해 중요한 것은 각 부분의 온도를 정확히 측정하는 것이다. 여기

서 복사열을 받는 부분은 반드시 흡수기만으로 한정 되어야 하는데 동일한 축방향으로 설치된 흡수기와 열전대는 열원에 의한 복사열의 영향을 받을 수 있는 염려가 있다. 따라서 본 연구에서는 순수한 공기의 온도를 측정하기 위하여 세라믹 관 내부에 복사 차폐물(Radiative shield)을 설치하여 복사열을 받지 않는 공기의 유동 경로를 만들어 대류 열전달에 의해서만 가열된 공기의 온도를 측정하였다.

표 1. Characteristics of honeycomb

Component materials of support	Fe-Cr-Al
Packed density	0.4~0.6 (kg/m ³)
Space velocity	30,000~60,000 (h ⁻¹)

(h⁻¹: 충전층의 부피를 V(l), 부피공급속도를 F(lh⁻¹) 이라고 하면 공간속도는 F/V로서 정의된다. 단위는 h⁻¹ 이다.)

표 2. Characteristics of Mesh

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

정확한 온도를 측정하기 위해 관내에 축방향을 기준으로 일곱 부분에 각각 3개씩 총 21개의 열전대를 설치하여 온도 데이터를 수집하였다. 관 입구에 위치한 열전대는 대기에서 유입된 공기가 열원에 의해 가열된 후의 온도를 측정한다. 충전재와 닿아 있는 열전대는 열원에 의해 가열된 충전재의 온도를 측정한다. 충전재 위로 50 mm 간격으로 설치된 열전대는 가열된 공기의 온도변화를 측정한다. 마지막으로 열교환기 다음에 설치된 열전대는 열교환기를 통과한 공기의 온도를 측정한다. 그림 3과 같이 각 부분에는 120° 간격으로 중심에서 40 mm의 간격으로 열전대를 3개씩 설치하여 각 열전대의 온도를 수집하여 평균을 구하였다.

이러한 온도들은 데이터 수집 장치인 데이터 로거 (Agilent 34970A)와 모듈(Agilent 34901A 20 channel multiplexer)을 통하여 수집되었다.. 작동 유체인 공기의 유량은 열교환기 다음에 설치된 차압면적식 유량계(Flowcell)를 통해 측정된다.

2.3 실험방법

본 연구에서는 흡수기의 열전달 특성을 알아보기 위해 다음과 같이 실험을 수행하였다. 복사 에너지원으로 사용된 전기히터는 가변전압장치를 조절하여 전기히터에서 충전재까지 도달하는 복사 에너지량을 조절하였다. 입구에서 공기를 흡입하기 위해 전기히터와 충전재 사이에 있는 하우징 둘레에 직경 50 mm의 홀을 내어 대기의 공기가 0.002 kg/s의 일정한 질량유량으로 흡입되도록 하였다. 흡입된 공기는 복사에너지에 의해 가열된 충전재를 통과하게 된다. 이와 같이 가열된 충전재에서 공기로의 열전달이 이루어지게 된다. 실험에 사용한 충전재는 총 두 종류로써, 각각 적층메쉬와 금속 허니컴을 사용하였다.

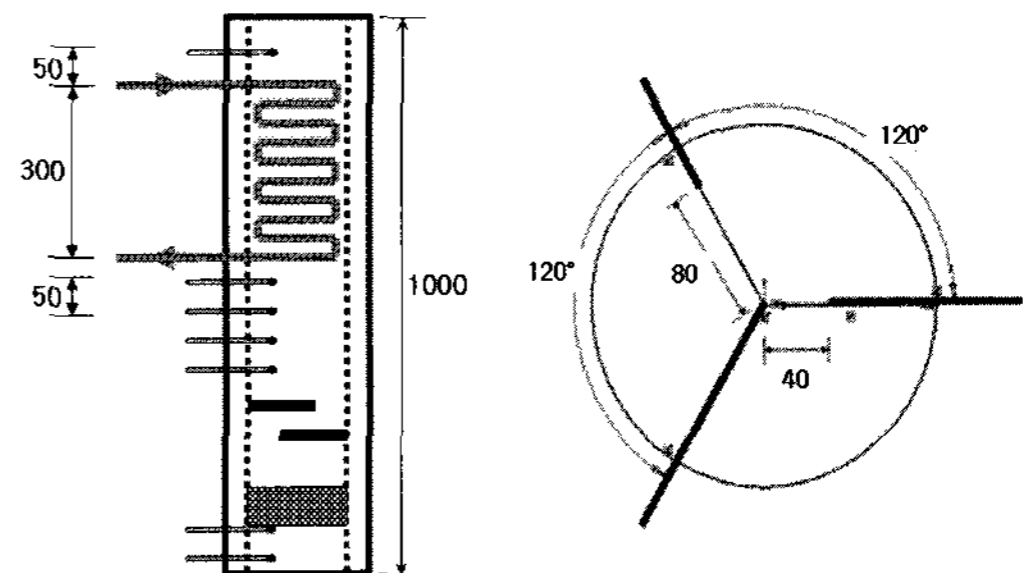


그림 3. Thermocouple position

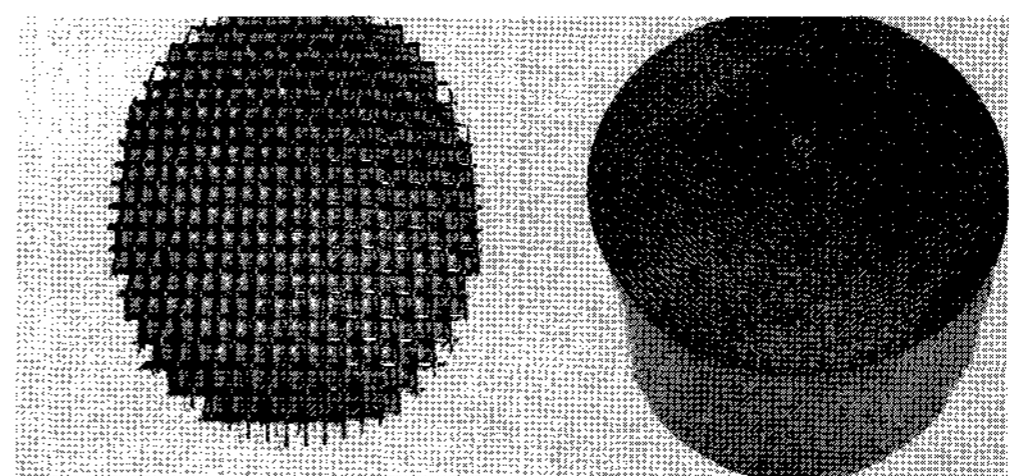


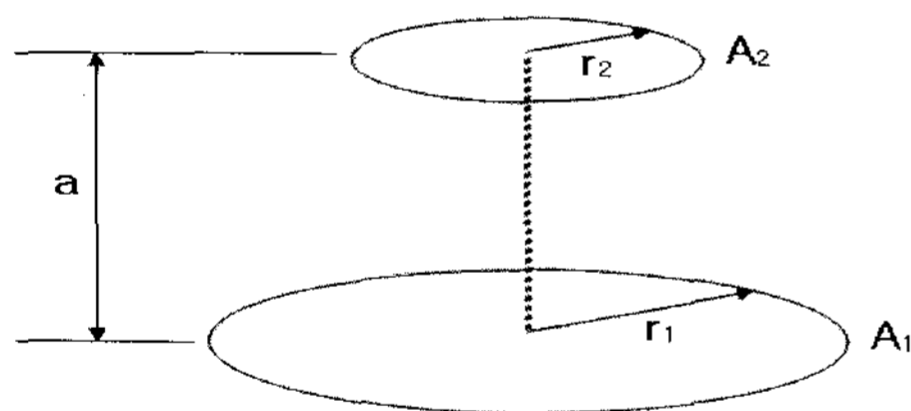
그림 4. Stainless steel mesh & metal honeycomb

각각의 충전재를 30 mm, 60 mm, 90 mm의 서로 다른 두께로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 충전재를 통과한 공기의 온도 변화 정도를 알아보기 위해, 충전재 삽입부 윗부분의 축 방향으로 50 mm 간격으로 온도 데이터를 추출하였다.

유량계의 작동 온도를 유지하여 주기 위해 충전재에 의해 가열된 공기를 냉각해야 하기 때문에 열교환기를 삽입하여 1.1 l/min의 일정한 체적유량으로 냉각수를 순환시켰다. 열교환기에 의해 냉각된 공기는 유량 측정을 위해 유량계를 지난 후 대기 중으로 배출된다. 본 연구의 실험 조건들은 표 3에 종합하였다.

2.4 실험결과 처리

실험을 수행하기에 앞서 충전재의 두께에 따른 효율을 구하기 위해 전기히터에서 충전재까지 전달되는 열량을 다음과 같이 구하였다.⁽⁶⁾



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

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

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

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

$$q_2 = \frac{E_{b2} - J_2}{(1 - \epsilon_2)/\epsilon_2 A_2} = \frac{J_2 - J_1}{1/A_1 F_{1-2}} \quad (4)$$

여기서 E_{b2} 는 충전재의 방사량이며, J_1 과 J_2 는 히터와 충전재의 라디오시티(radiosity)이다. ϵ_1 과 ϵ_2 는 각각 히터와 충전재의 방사율이며, q_2 는 히터에서 충전재로 전달되는 총열량이다.

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

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

충전재의 효율을 계산하기 위해서 공기가 얻는 열량은 다음과 같이 계산하였다.

$$Q = \dot{m} c_p \Delta T \quad [W] \quad (6)$$

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

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

위의 식들을 통해 충전재의 효율 η 를 구할 수 있다.

표 3. 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

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 충전재의 형상과 두께변화에 따른 공기식 흡수기의 열전달 특성을 해석하기 위해 데이터를 수집 및 비교·분석하였다.

그림 5는 히터에서 충전재까지 전달되는 열량에 따른 충전재를 통과한 후의 공기 온도를 나타내고 있다. Layer 1 (thickness: 30 mm)에서는 허니콤보다 메쉬에서 4~9 °C, layer 2 (thickness: 60 mm)에서는 8~13 °C, layer 3 (thickness: 90 mm)에서는 15~21 °C 더 높다. 한편, 두께 변화에 따른 온도 차이는 layer 1과 layer 2의 온도차가 20~26 °C인 반면 layer 2와 layer 3의 온도차가 60~64 °C로 더 높은 온도차를 보였다. 전체적으로 허니콤보다 메쉬에서 더 높은 온도의 공기를 배출하였으며, 충전재의 두께가 두꺼워질수록 높은 온도가 나타난다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과가 나온 이유는 공기와 접촉면적의 차이를 들 수 있다. 각각의 충전재의 형상을 기준으로 허니콤은 각각의 격자가 서로 겹쳐지지 않고 같은 방향으로 공기가 이동하는 통로를 형성한다. 반면에 메쉬는 각각의 격자들이 서로 다른 방향으로 적층되어 있기 때문에 공기와 접촉 면적이 더 커진다. 또한 복사 에너지를 받는 면적 역시 위와 같은 이유로 메쉬가 더 크기 때문에 메쉬의 온도가 더 높아지게 된다.

그림 6은 히터에서 충전재까지 전달되는 열량에 따른 충전재의 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. 전반적으로 허니콤보다 메쉬에서 더 높은 효율을 나타내었으며, 충전재의 두께가 두꺼워질수록 높은 효율을 나타내었다.

그림 7은 충전재 온도와 충전재를 통과한 공기의 온도를 비교한 그림이다. 이 때 두 온도는 허니콤과 메쉬의 온도를 평균한 값이다. 충전재의 온도가 약 320~370 °C로 증가하는 동안 공기의 온도는 약 190~340 °C로 증가하였다. 이는 Thomas Fend⁽⁴⁾의 충전재와 공기간의 온도분포 데이터에서 공기의 온도가 충전재의 온도에 근접해 가는 것과 일치한다.

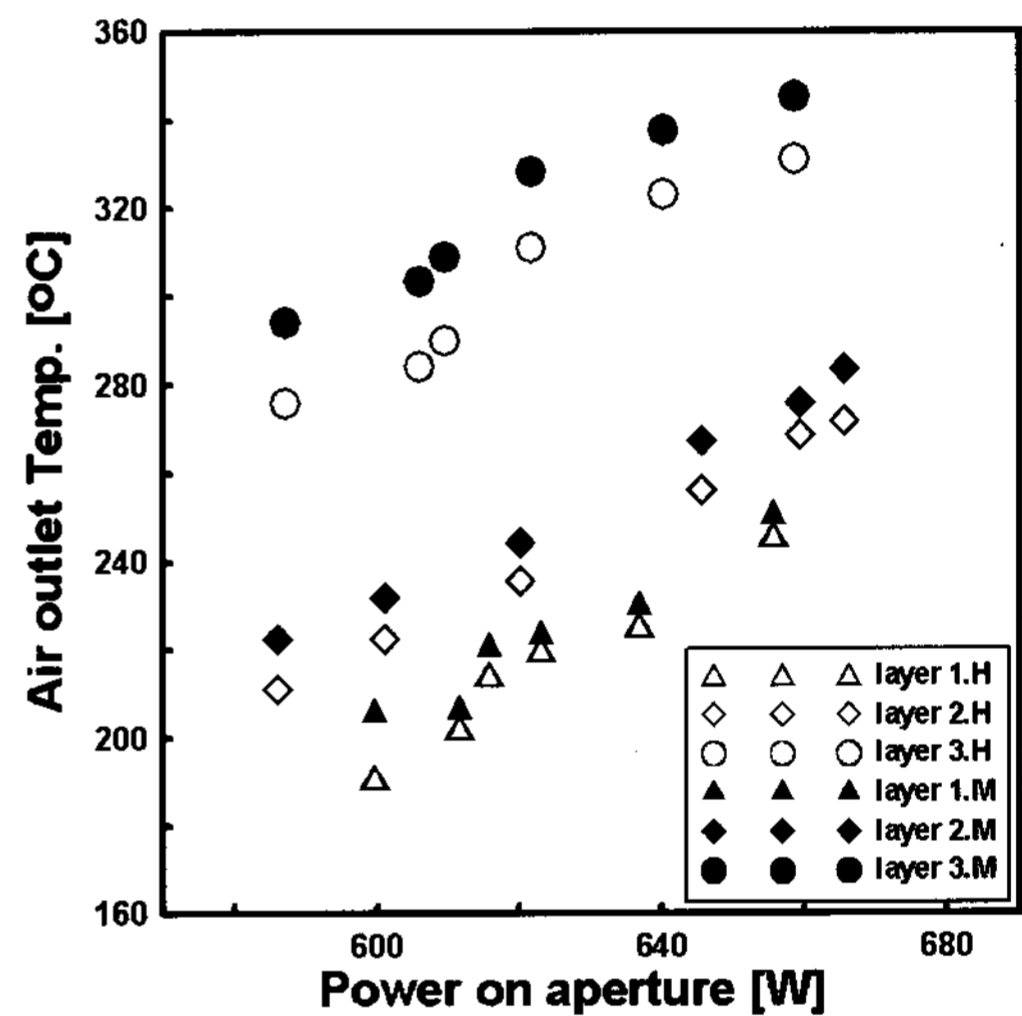


그림 5. Air outlet Temp. with power on aperture

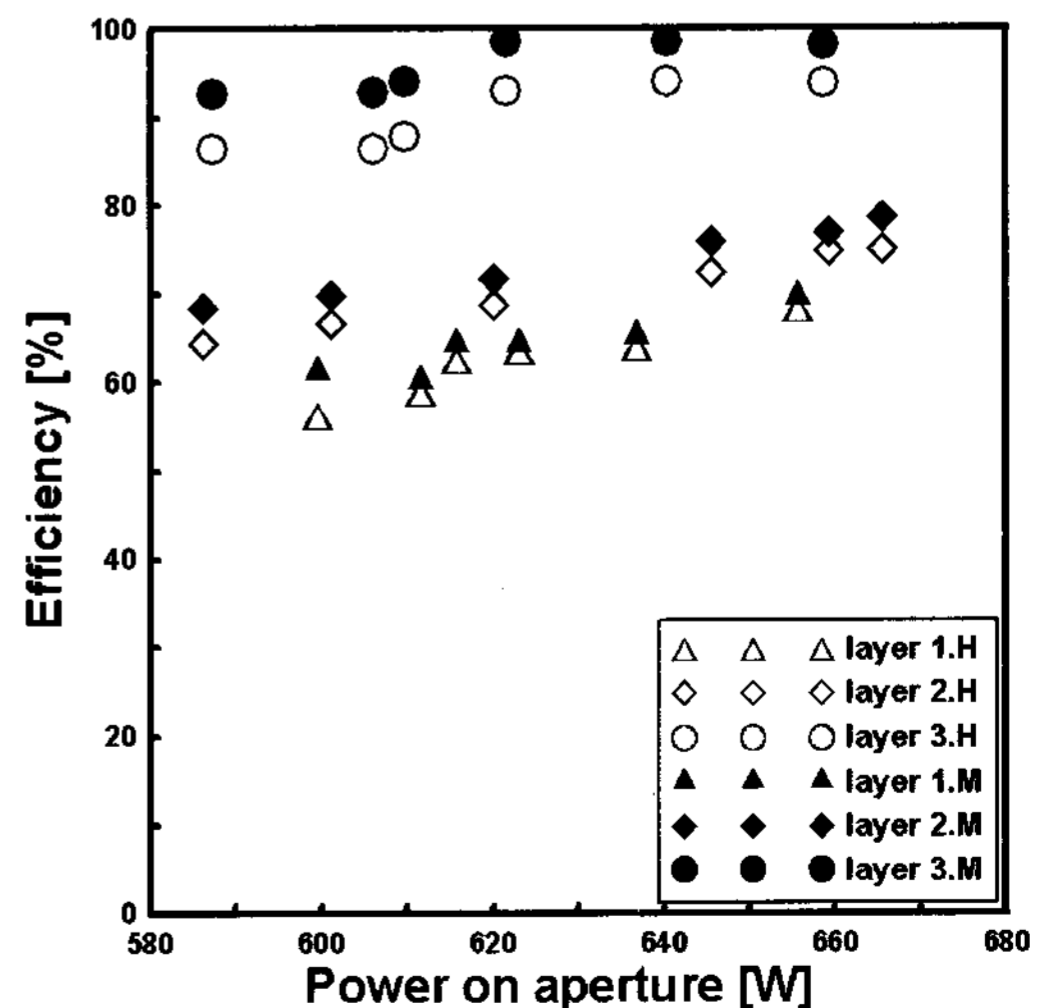


그림 6. Receiver efficiency with power on aperture

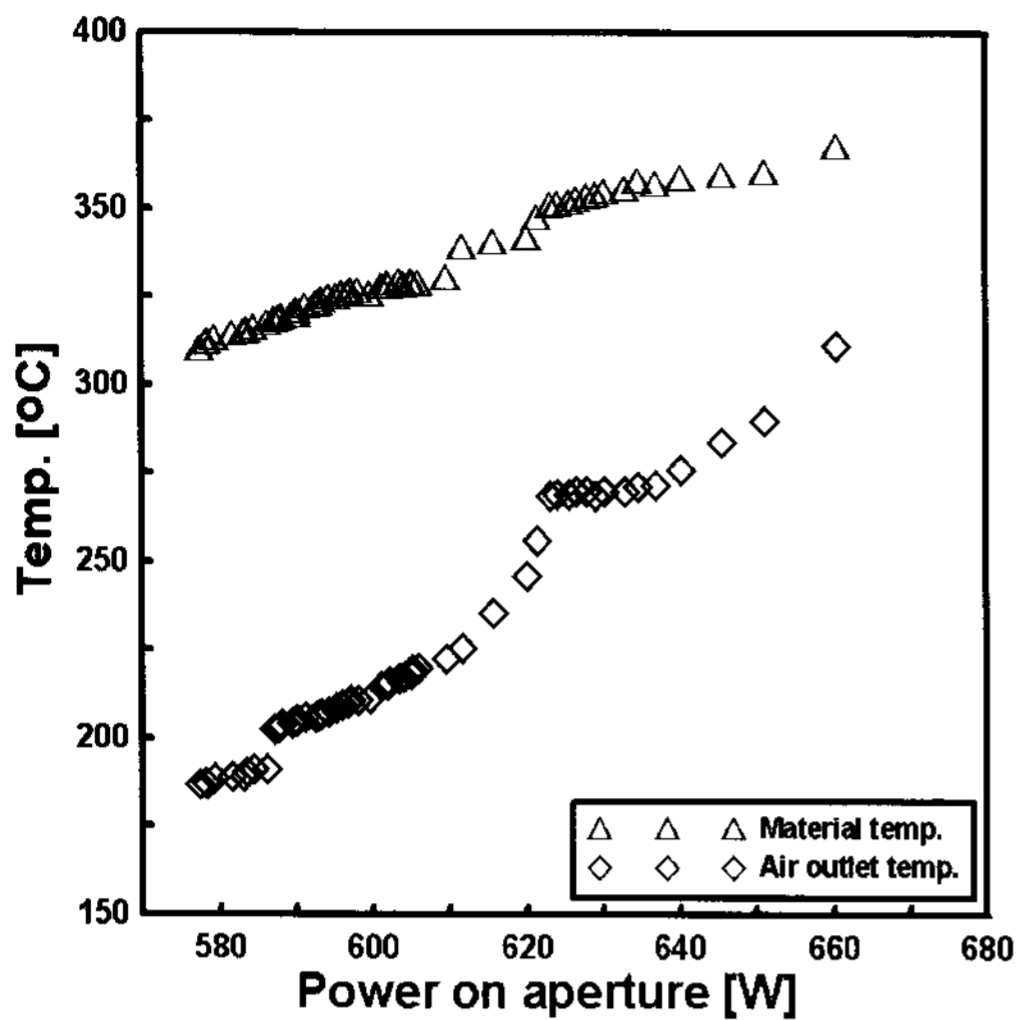


그림 7. Comparison of material Temp. and air Temp. with power on aperture

표 4~9는 허니콤과 메쉬의 두께와 POA(power on aperture)의 변화에 따른 각 부분에서의 온도 분포와 열량, 총괄 효율을 보여주고 있다. 각 표에서 POA는 히터에서 발생한 열량이 충전재까지 전달되는 양이며, Material front Temp.는 충전재 전면부의 온도이다. Air outlet Temp.는 대기의 공기가 충전재를 통과한 후 온도이며 HE air Temp.는 충전재를 통과한 고온의 공기가 열교환기를 통과하며 냉각된 온도를 나타낸다. Power air는 충전재에 의해 공기로 전달된 열량을 나타내며, Efficiency는 충전재에서 공기로 전달된 열량을 히터에서 충전재로 전달된 열량으로 나누어 충전재의 열전달 성능을 나타내는 효율이다.

4. 결론

본 연구는 고온 태양열 발전의 한 형태인 솔라타워(Solar tower) 시스템의 공기식 흡수기 형상에 따른 열전달 특성을 해석하기 위해 충전재로 사용된 메쉬와 허니콤의 적층 방식 즉, 적층 두께 변화(30~90 mm)에 따른 열전달 특성을 연구하였다. 실험 결과 충전재 종류에 따른 차이 즉, 격자의 모

표 4. Operational data of layer 1. H

Layer 1. H			
POA(W)	599.58	615.76	655.59
Material front Temp.(°C)	328.18	351.05	368.99
Air outlet Temp. (°C)	191.13	214.69	245.99
HE air Temp. (°C)	67.23	78.09	100.56
Power air (behind fill)(W)	333.58	380.89	443.74
Efficiency (%)	55.63	61.71	67.69

표 5. Operational data of layer 2. H

Layer 2. H			
POA(W)	600.10	614.78	656.59
Material front Temp.(°C)	329.13	349.22	369.95
Air outlet Temp. (°C)	194.34	220.22	253.09
HE air Temp. (°C)	68.23	82.65	101.23
Power air (behind fill)(W)	340.04	392.00	458.00
Efficiency (%)	56.66	63.76	69.76

표 6. Operational data of layer 3. H

Layer 3. H			
POA(W)	602.56	614.44	657.59
Material front Temp.(°C)	328.78	350.98	370.96
Air outlet Temp. (°C)	211.11	235.56	268.56
HE air Temp. (°C)	88.11	100.08	116.11
Power air (behind fill)(W)	373.70	422.80	489.06
Efficiency (%)	62.02	68.81	74.37

표 7. Operational data of layer 1. M

Layer 1. M			
POA(W)	599.58	615.76	655.59
Material front Temp.(°C)	326.73	353.17	367.99
Air outlet Temp. (°C)	215.16	244.00	275.91
HE air Temp. (°C)	89.87	105.45	117.89
Power air (behind fill)(W)	381.84	439.75	503.82
Efficiency (%)	63.68	71.41	76.84

표 8. Operational data of layer 2. M

Layer 2. M			
POA(W)	601.52	617.99	659.56
Material front Temp.(°C)	327.87	354.95	370.65
Air outlet Temp. (°C)	275.87	290.05	331.39
HE air Temp. (°C)	99.81	112.88	129.45
Power air (behind fill)(W)	503.74	532.22	615.23
Efficiency (%)	83.74	86.12	93.27

표 9. Operational data of layer 3. M

Layer 3. M			
POA(W)	600.90	618.98	660.89
Material front Temp.(°C)	326.89	357.44	371.80
Air outlet Temp. (°C)	281.99	299.21	339.00
HE air Temp. (°C)	101.81	119.08	134.50
Power air (behind fill) (W)	516.03	550.61	630.51
Efficiency (%)	85.87	88.95	95.40

양에 따른 차이에 비하여 충전재의 두께에 따른 차이가 현저하게 크게 나타났다. 두께가 두꺼워질수록 효율이 증가하였으며, 적층메쉬의 두께가 가장 두꺼운 90 mm에서 약 95 %의 높은 효율이 나타났다. 추후 좀 더 다양한 충전재의 두께 조절 및 공기의 유량 변화에 따른 열전달 특성을 해석하고, 시뮬레이션을 통하여 이론값과 실제값을 비교·연구할 것이다.

참 고 문 헌

1. Solucar energia S. A., 11MW power

plant for southern spain (PS10), 2001, SOLARPACES.

2. Peter Heller, Markus Pfander, Thorsten Denk, Felix Tellez, Antonio Valverde, Jesus Fernandez, Arik Ring, Test and evaluation of a solar powered gas turbine system, Solar energy, 2006, pp. 1225-1230.
3. W. Lu, C. Y. Zhao and S. A. Tassou, Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part I: Metal-foam filled pipes, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, Vol. 49, Issue 15-16, pp. 2751-2761.
4. Thomas Fend, Bernhard Hoffschmidt, Robert Pitz-Paal, Oliver Reutter and Peter Riebrock, Porous materials as open volumetric solar receivers: Experimental determination of thermophysical and heat transfer properties, Energy, 2004, Vol. 29, Issue. 5-6, pp. 823-833.
5. Reiner Buck, Christian Barth, Markus Eck and Wolf-Dieter Steinmann, Dual receiver concept for solar towers, Solar Energy, 2004, Vol. 80, Issue 10, pp. 1249-1254.
6. Michael F Modest, Radiative heat transfer, Mcgraw-Hill, 1993, p. 790.