

흡열판에 돌출형 삼각 개구부가 설치된 가정용 태양열 공기가열기의 열성능에 대한 실험적 연구

Experimental Study on the Thermal Performance of a Domestic Solar Air Heater with Protruding Triangular Openings on the Absorber Plate

김현곤* · 부준홍**†

Kim, Hyun Gon* and Boo, Joon Hong**†

(Received 31 January 2016; Accepted 21 April 2016)

Abstract : A solar air heater was designed for supplementary domestic heating. The absorber plate had a series of protruding notches which had triangular openings on the front surface of the absorber plate to direct partial air flow to the rear surface and to enhance the convective heat transfer to the flowing air. The height of the opening as well as the opening configuration was determined by preceding numerical simulations. The experimental model had an absorber plate of 0.78-m width and 1.0-m length which was coated with black paint. The air temperature increased as much as 18°C for 90-m³/h flow rate when the absorber plate was inclined by 45° for a clear-day solar irradiation of about 906 W/m². The collector efficiency ranged from 69 to 74%. Considering the simplicity of the structure and low manufacturing cost, the solar air heater might have competence as an auxiliary heating device for domestic use. On-site experimental results are presented with discussion for various solar irradiations and air flow conditions.

Key Words : 태양열 공기가열기(Solar air heater), 흡열판(Absorber plate), 돌출형 개구부(Protruding openings), 선택적 도장(Selective solar coating), 온도 상승(Temperature rise), 집열효율(Collection efficiency)

기 호 설 명

	P_{hole}	: 개구부 사이 거리 (mm)
	Q	: 집열 열전달률, 집열률 (W)
	T	: 온도 (°C)
\dot{m}		: 공기의 질량유량 (kg/s)

**† 부준홍(교신저자) : 한국항공대학교 항공우주 및 기계 공학부
*김현곤 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

**† Boo, Joon Hong (corresponding author) : School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University
E-mail : jhboo@kau.ac.kr, Tel : 02-300-0107
*Kim, Hyun Gon : Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Graduate school, Korea Aerospace University

\dot{V}	: 공기의 체적유량 (m^3/s)
W_{hole}	: 홀 개구부의 폭 (mm)
w	: 불확실도(오차)
A_{abs}	: 흡열판 면적 (m^2)
C_p	: 정압비열 ($J/(kg \cdot K)$)
h_{hole}	: 개구부의 높이 (mm)
I	: 태양 전조사 (W/m^2)
L_{hole}	: 개구부의 유로 방향 길이 (mm)

그리스 문자

α	: 흡수율
ε	: 방사율
η	: 효율
ρ	: 밀도 (kg/m^3)

하첨자

a	: air
abs	: absorber plate
amb	: ambient
hole	: pertaining to the opening holes
out	: outlet of the fan
t	: total

1. 서 론

액체순환식 태양열 온수기는 가정용으로 가장 많이 보급되어 사용되고 있는 장치로서 기술적으로 친숙하지만, 액체 관로와 축열조 등으로 인해 설치 중량과 부피의 최소화에 한계가 있으며, 반복적인 열팽창 및 수축 등으로 인한 관로의 하자 발생과 열매체의 누설 가능성이 상존하고 유지 및 보수에 부담이 있는 단점이 있다. 반면 태양열 공기가열기는 공기의 열전도계수와 비열이 낮아 상대적으로 집

열효율이 낮다는 단점이 있지만 경량으로 제작과 설치가 간단하며 열매체로 사용되는 공기의 누설로 인한 심각한 유지보수 문제가 별로 없다는 장점이 있다. 이러한 이유들로 인해 태양열 공기가열기는 순간 공간의 보조적 난방이나 식품과 세탁물의 건조용 등의 한정적 용도로 고려 대상이 되어 왔다. 그러나 태양열 공기가열기의 성능이 증진된다면 그 용도는 확장될 가능성이 있다. 태양열 공기가열기의 성능 증진을 위한 연구는 국내외에서 지속되어 왔다.

이론적 또는 수치해석적 방법으로 태양열 공기가열기의 성능 증진을 위한 문헌은 Shin 등¹⁾의 연구에서 그 요약 내용을 제시하고 있다. 또한, Mohamad²⁾는 이중 전면유리창을 통해 U형의 공기유로를 구성하여 열손실을 최소화하는 구조에 대한 해석적 연구를 통해 집열효율을 75%까지 상승시킬 수 있는 설계를 제안하였다.

실험적인 방법으로 태양열 공기가열기의 성능 증진을 연구한 문헌으로, Gill 등³⁾이 이중 전면유리 구조와 유동공기가 충전층(packed bed)을 통과하는 구조로 열전달과 집열효율의 향상을 제시하였으며, Sethi 등⁴⁾은 흡열판에 덤플(dimple)을 원호형태로 배치한 구조에 대해, 그리고 Lanjewar⁵⁾ 등은 흡열판에 W자 형의 리브(rib)를 설치한 구조에서의 열전달 증진을 실험적으로 제시하였다. 이외의 다양한 인공거칠기의 열유체역학적 효과들을 비교 제시한 연구도 다수 존재한다⁶⁾. 한편, 국내에서 Kim 등⁷⁾은 다중유로형 공기가열기에 대한 실험으로 약 최대 약 30%의 집열효율을 보였다.

본 연구에서는 선행연구로 수행된 Shin 등¹⁾의 수치해석 결과 선정된 흡열판 돌출부의 기하학적 형상을 토대로 시제품을 제작하여 성능을 검증하는 실험적 연구를 수행하였다. 특

이 시험 결과를 분석하여 경량과 저가격이 요구되는 가정용 태양열 공기가열기로 성능이 적합한지 그 가능성을 입증하고자 하였다.

2. 실험모델 및 장치

2.1 실험모델의 개요

본 연구에서 사용한 태양열 공기가열기의 개략도는 Fig. 1과 같으며 유리덮개와 흡열판의 상세 사상은 Table 1에 제시하였다.

이 사양은 상용 제품으로서 제작과 설치의 용이성을 고려하여 정한 것이다. 공기는 하단부에 설치된 흡입구를 통해 가열기로 들어가 흡열판의 전면과 후면을 접촉하여 흐르며 상부에 설치된 직경 120 mm의 환에 의해 강제 대류된다. 흡열판의 크기는 상용 제품으로서 제작과 설치의 용이성을 고려하여 높이 1.0 m, 폭 0.78 m로 선정하였다. 덮개유리는 두께 3 mm의 폴리카보네이트 재질로 제작하였다. 장치의 경량화를 위해 흡열판은 두께 0.6 mm의

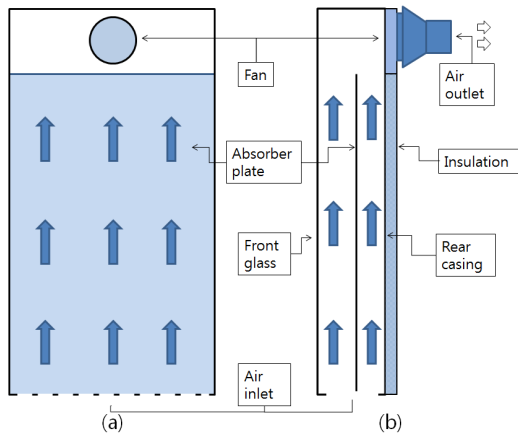


Fig. 1 Schematic of the solar air heater in this study : (a) plain view, (b) side view

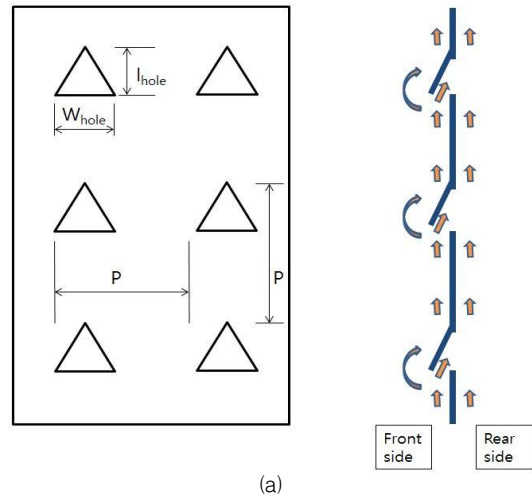


Fig. 2 (a) Schematic of the protruding triangular openings on the absorber plate and the air flow around them (b) photograph of the openings

Table 1 Specification of the solar air heater used in this study

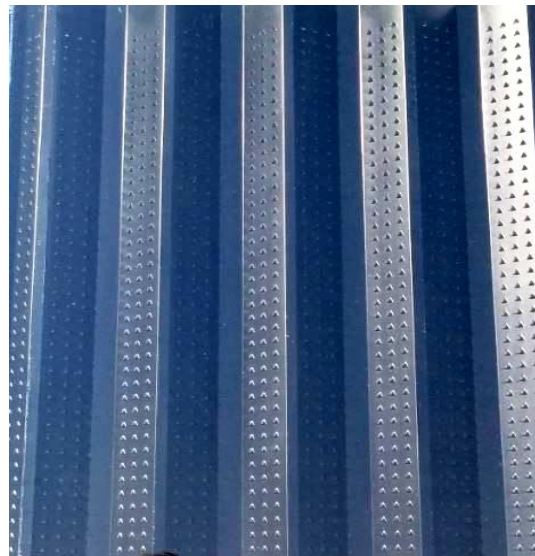
Glazing cover	
material	Polycarbonate
size	1.20 m (H) × 0.86 m (W)
thickness	3 mm
area	1.03 m ²
Absorber plate	
material	Galvanized steel iron
size	1.00 m (H) × 0.78 m (W)
area, A_{abs}	0.78 m ²
absorptivity, α	0.96
emissivity, ϵ	0.52
Fan	
voltage/power/speed	12 VDC /12.6 W/ 3600 rpm

아연도금 강판으로 하였으며, 표면에는 흡수율 0.96, 방사율 0.52의 선택적 도장재(selective coating)를 도포하였다(Dampney사, ThurmaloX 250). 흡열판은 유동공기에 난류를 유발하고 흡열판의 전면과 후면에서 모두 열전달이 가능하도록 Fig. 2와 같이 삼각형 개구부가 돌출 되도록 가공하였다. 개구부의 사양은 Table 2에 제시하였다. 개구부의 높이는 선행연구에서 5 mm가 최적 값으로 제시되었으나 2 mm 이상 5 mm 이하의 범위에서는 예측되는 성능의 차이가 크지 않았으며, 판재의 특성상 홀 가공 중 균열이 발생하는 것을 방지하기 위해 최종적으로 3.6 mm로 가공하였다. 또한 홀의 폭은 5.6 mm이다.

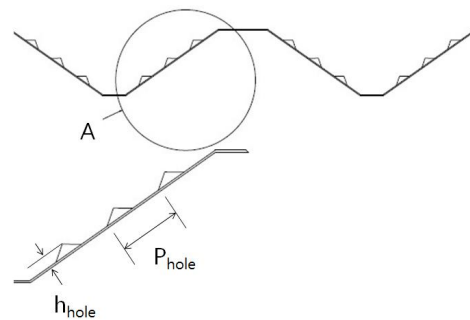
Table 2 Dimensions of the triangular openings on the absorber plate

Hole width, W_{hole} (mm)	5.6
Hole length, L_{hole} [flow direction] (mm)	10
Pitch, P_{hole} (mm)	20
Hole opening height, h_{hole} (mm)	3.6

흡열판의 전반적 형상은 평면 대신 Fig. 3에 보이는 바와 같이 폭 방향으로 사다리꼴로 절곡한 형태를 채택하였다. 이는 공기가 열기가 고정 설치되는 경우 태양조사의 방위각 변화에도 집열 성능의 변화를 최소화하고, 공기와 접촉면적 증가로 인해 대류열전달 증가 효과를 기하기 위한 설계이다. Fig. 3 (a)는 홀이 가공된 흡열판의 사진이며, Fig. 3 (b)는 삼각형 홀 개구부가 가공된 위치에서 폭 방향 단면도의 일부와 Section A에 대한 상세도이다. 삼각형 홀 개구부는 공기의 유동방향과 흡열판의 폭 방향으로 각각 20 mm의 균일한 간격으로 가공되었다. 공기가 열기 장치의 총 중량은 12 kg으로서 (주)팜텍에서 제작하였다.



(a)



(b)

Fig. 3 (a) Photograph of the absorber plate (b) partial cross-sectional view of the absorber plate and detail view

2.2 실험장치 셋업

태양열 공기가 열기의 실험장치는 Fig. 4와 같이 경사각을 조절할 수 있도록 구성하였다. 흡열판은 시험장소에서 정남향으로 설치하였으며, 실험조건의 일관성을 위해 경사각은 수평면에서 45°를 유지하였다.

시험 중 측정할 항목은 아래와 같다.

- 1) 태양 전조사(total solar irradiation)
- 2) 공기유량

- 3) 입구 공기온도
- 4) 출구 공기온도

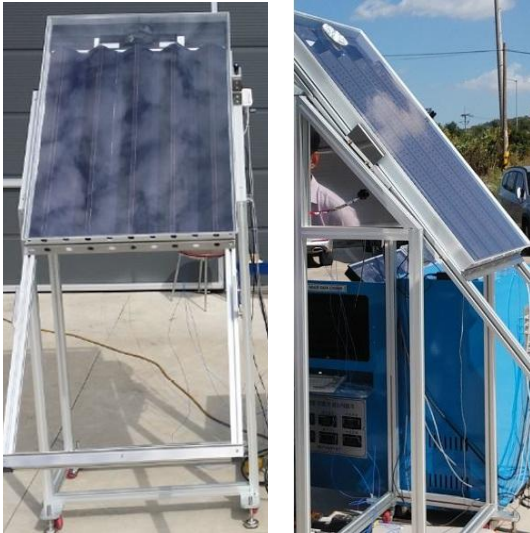


Fig. 4 Photographs of the experimental setup

태양 전조사는 Apogee사의 SP-110을 덮개 유리판과 평행한 프레임에 장착하여 수광면과 동일한 경사각에서 측정하였다. 전조사계의 측정오차는 $\pm 5\%$ 이며 반복정밀도는 1% 이내이다. 공기온도는 입구와 환 출구에서 측정오차 1.0% 범위로 보정한 K-type 열전대 프로브(probe)로 측정하였으며 자료획득장치를 통해 10초 간격으로 처리되었다. 공기유량은 Testo 417 베인 풍속-풍량계(vane anemometer)를 사용하여 측정하였으며, 오차는 ± 0.1 m/s이다.

2.3 공기유량 측정

집열성능의 계산을 위해서는 공기가 흡수한 열량을 산정해야 하는데, 이를 위해서는 정확한 공기유량의 측정이 필수적이다. 통상적으로 사용되는 직류식 환의 구조상 중앙부에 일정 직경의 허브(hub)가 존재하므로 특히 토출구에 인접한 거리에서는 허브 직경 안쪽에서

공기 유속이 상대적으로 적게 측정되며 유동 단면에서 불균일도가 크다. 공기 유동 단면에서 유속의 불균일한 분포는 풍속계 또는 풍량계를 사용한 측정에 심각한 오차를 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 IEA-SHC Task 43⁸⁾을 참조하여 Fig. 5에 보이는 바와 같은 공기유동 정류장치를 제작하였다. 공기유동 정류장치 출구 단면의 속도분포를 측정오차 1% 이내로 보정된 열선 풍속계로 정밀하게 측정한 결과 매우 균일한 값을 얻었으며, 이를 토대로 계산한 풍량과 베인 풍량계로 측정한 값을 비교했을 때 Table 3에서 보이는 바와 같이 체적유량 90~125 m³/h 범위에서 최대 상대오차 $\pm 4\%$ 로 신뢰할 수 있는 측정치를 확인할 수 있었으므로, 이후 실험에서는 사용이 간편한 베인 풍속-풍량계의 측정치를 사용하였다.

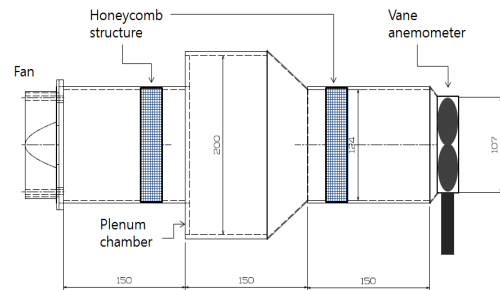


Fig. 5 Schematic diagram of the air-flow rectifier

Table 3 Relative errors in air-flow measurement

Air flow range (m ³ /h)	Hot-wire anemometer (m ³ /h)	Vane anemometer (m ³ /h)	Relative error (%)
80-95	92.6	90.2	2.6
95-110	111.3	107.7	3.2
110-125	126.1	121.3	3.8

2.4 성능시험 방법 및 성능 계산

본 연구에서는 태양 전조사와 공기 질량유

량의 변화에 대해 태양열 공기가열기를 통한 공기 온도의 상승을 측정하고 집열효율을 계산하기 위한 성능시험을 진행하였다.

태양열 공기가열기에서 흡열판의 설계가 정해지고 나면 성능시험 상 주요 인자는 다음과 같다.

- 환경 매개변수: 태양 전조사, 외기 온도
 - 작동 매개변수: 공기 유량
- 이상의 변수들과 공기가열기에 의한 온도 상승분으로부터 공기에 의한 집열률 Q 는 식 (1)과 같이 계산할 수 있다⁹⁾.

$$Q = \dot{m} \cdot C_{p,a} \cdot \Delta T = \rho \cdot \dot{V} \cdot C_{p,a} \cdot \Delta T \quad (1)$$

여기서 \dot{m} 은 공기의 질량유량이며 $C_{p,a}$ 는 공기의 정압비열이다. 공기의 온도상승 ΔT 는 가열기 출구의 공기온도 T_{out} 과 외기 온도 T_{amb} 와의 차이이다. 질량유량은 밀도(ρ)와 체적유량(\dot{V})의 곱이므로, 측정된 T_{amb} , T_{out} 및 상대습도를 토대로 습공기선도¹⁰⁾에서 구한 ρ 와 풍량계로 측정된 \dot{V} 의 곱으로 계산하였다.

집열효율은 아래 식으로 계산하였다⁹⁾.

$$\eta = \frac{Q}{A_{abs} I} \quad (2)$$

여기서 A_{abs} 는 흡열판의 설치면적이고 I 는 태양전조사이다.

2.5 오차 해석

식 (1)과 (2)에서 집열효율을 결정하는 측정 변수는 질량유량, 온도차 및 전일사량이다. 질량유량은 직접 측정하지 않고 체적유량을 측정하고 이에 공기밀도를 곱하여 계산하였으며, 공기밀도는 공기가열기 입출구 평균온도

에서 산정한 값을 사용하였는데, 각 풍량에 해당하는 온도 범위에서 공기 밀도는 1% 이내의 변화가 있었으므로, 간단한 오차해석을 위해 공기밀도 변화를 무시하고 질량유량 대신 측정변수인 체적유량을 고려하였다.

체적유량(\dot{V}), 온도차(ΔT) 및 전일사량(I)을 기준하여 문헌¹¹⁾에 제시된 방법에 의해 오차 해석을 수행하였다. 각 변수의 불확실도(오차)를 w 로 나타내면 부분 불확실도(fractional uncertainty)는 다음 식과 같다.

$$\frac{w_\eta}{\eta} = \left[\left(\frac{w_{\dot{V}}}{\dot{V}} \right)^2 + \left(\frac{w_{\Delta T}}{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{w_I}{I} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

본 논문에서의 실험 중 풍량이 가장 큰 경우를 기준으로 실험시간 전체에 걸친 \dot{V} , ΔT , I 및 η 의 평균치는 각각 119.6 m³/h, 14.3°C, 910.2 W/m² 및 0.74이었다. 이들을 토대로 오차해석을 수행한 결과 집열효율의 오차는 5.4%로 산정되었다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 선택적 도장에 따른 집열기 성능

먼저, 삼각형 돌출 개구부가 가공된 동일한 흡열판에 대해 일반 흑색도장(흡수율 0.9, 방사율 0.9)과 선택적 도장(흡수율 0.96, 방사율 0.52)을 한 경우의 성능을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 동일한 외기온도, 풍량 및 태양조사 조건에서 선택적 도장을 한 흡열판이 일반 흑색 도장한 흡열판보다 입출구의 공기온도차(즉, 공기 온도 상승) ΔT 가 평균 3.2°C 더 크게 나타났으며, 이는 일반 흑색도장을 한 흡열판의 경우의 평균 온도 상승분 15°C를 기준으로 약 20%에 해당하므로 그 영향은 매우 큰 것

으로 평가된다. 따라서 이후 성능 시험은 선택 적도장재를 도포한 흡열판 모델을 사용하였다.

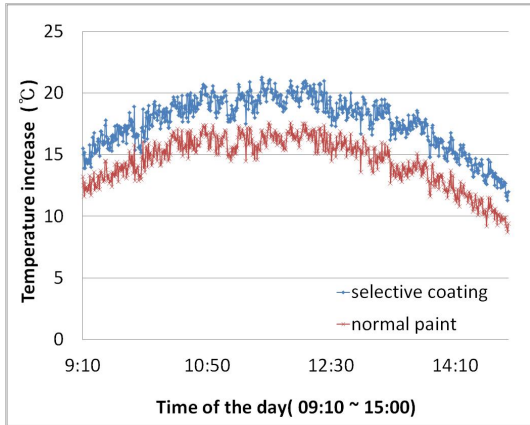


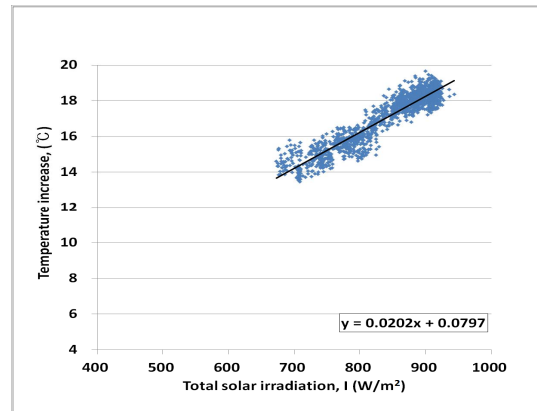
Fig. 6 Temperature increase through the solar air heater with different surface coatings ($\dot{m}=0.027$ kg/s, average total solar irradiation= 850 W/m²)

3.2 태양열 공기가열기의 온도 상승 성능

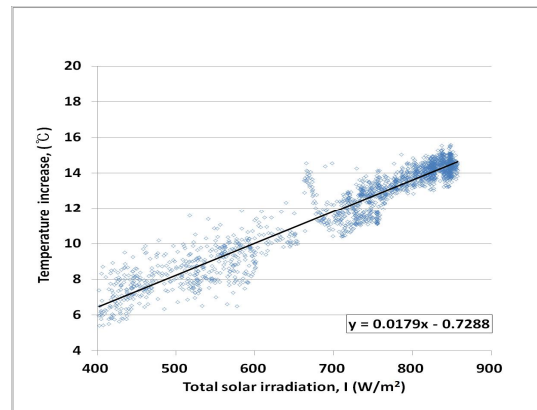
Fig. 7은 세 가지 서로 다른 공기유량에 대한 집열성능을 검토하기 위해 2015년 9월 17일, 18일 및 22일에 오전 9시에서 오후 5시까지 일정 공기유량에 대해 측정된 공기 온도상승 ΔT 를 전조사율에 따라 나타낸 그래프이고, Table 4는 측정된 공기의 체적유량을 집열효율 계산 등을 위해 질량유량으로 환산한 표이다. 밀도는 외기온도, 출구온도 및 상대습도를 고려해서 습공기선도⁹⁾를 이용하였다. 그래프의 (a), (b) 및 (c)에서 공기 질량유량(\dot{m})은 각각 0.027 kg/s, 0.033 kg/s, 및 0.037 kg/s 이었다.

Table 4 Air flow rates for performance test

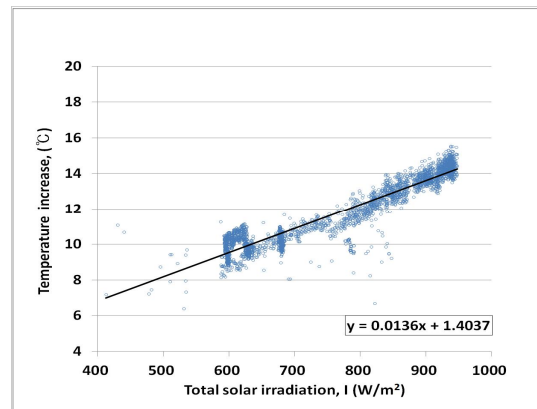
\dot{m} (kg/s)	temperature range (°C)	ρ (kg/m ³)	\dot{V} (m ³ /h)
0.027	30 ~ 48	1.0823	90.2
0.033	27 ~ 41	1.1050	107.7
0.037	26 ~ 41	1.1025	121.3



(a) $\dot{m} = 0.027$ kg/s



(b) $\dot{m} = 0.033$ kg/s



(c) $\dot{m} = 0.037$ kg/s

Fig. 7 Temperature increase through the solar air heater against total solar irradiation and air mass flow rates

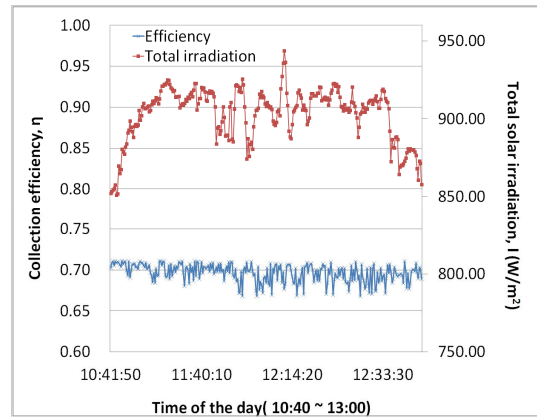
실험장치가 경사각 45°를 유지하고 정남향을 향하도록 했기 때문에 시각에 따라 태양의 천정각과 방위각이 변하면서 전조사율이 변화한다. 태양전조사는 조절할 수 없는 물리량이므로 공기유량에 따른 온도증가 성능을 동일한 전조사에서 일률적으로 비교하는 것은 불가능하나, 전조사에 따른 온도증가 경향은 비교 가능하다. 이러한 목적으로 각각의 그래프에는 온도상승을 태양전조사의 함수로 선형 회귀분석한 결과가 제시되어 있다. 각 유량별 기울기는 $\dot{m} = 0.027$ kg/s 일 때 0.0202, $\dot{m} = 0.033$ kg/s 일 때 0.0173, 그리고 $\dot{m} = 0.037$ kg/s 일 때 0.0136로 유량이 커질수록 온도상승률의 기울기가 감소하는 것으로 나타나고 있다. 이러한 결과는 식 (1)의 관점에서, 일정 집열률 Q 에 대해 질량유량 \dot{m} 즉 $\rho \dot{V}$ 와 온도상승분 ΔT 는 서로 반비례한다는 경향과 일치한다.

3.3 태양열 공기가열기의 집열효율

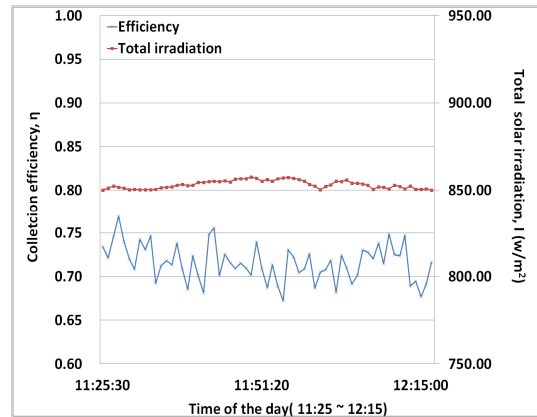
구조가 정해진 특정 태양열 공기가열기의 집열효율은 특징적으로 일사조건과 공기유량의 함수가 된다. 또한, 다른 조건이 동일하다면 태양조사가 클수록 집열효율은 증가하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 고안된 태양열 공기가열기에 대해 집열효율의 최대 범위를 파악하기 위해 실험 중 취득 가능했던 범위에서 전일사조건이 우수한 경우의 자료를 중점적으로 분석하였다.

Fig. 8은 위에서 언급한 세 개의 공기유량 값 ($\dot{m} = 0.027, 0.033,$ 및 0.037 kg/s) 각각에 대해 시간대별로 측정된 실험자료에서 태양전조사가 850 W/m^2 이상인 시간대를 선정하여 전조사율과 계산된 순간 집열효율을 도시한 그래프이다.

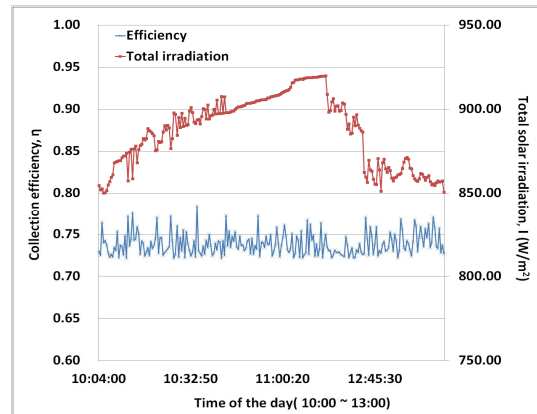
Fig. 8의 (a) 및 (c)에서 태양전조사가 850 W/m^2 에서 920 W/m^2 변하는 동안에도 집열



(a) $\dot{m} = 0.027$ kg/s



(b) $\dot{m} = 0.033$ kg/s



(c) $\dot{m} = 0.037$ kg/s

Fig. 8 Collection efficiency of the solar air heater for different air mass flow rates.

Table 5 Summary of experimental results

	\dot{m} (kg/s)	I (W/m ²)	T _{amb} (°C)	ΔT (°C)	η (%)
(a)	0.027	906.5	30.5	18.0	68.6
(b)	0.033	853.3	27.4	14.6	72.3
(c)	0.037	910.2	26.7	14.3	74.4

효율의 변화는 크게 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 앞의 Fig. 7에 제시된 선형 회귀분석 식에 의하면 태양전조사와 공기의 집열률은 직선적으로 비례 하므로 이를 식 (2)에 고려하면 이론적으로 일정 공기유량에서 집열효율은 상수가 된다는 것을 알 수 있다. 다만, 집열효율에서 다소의 진동 폭이 나타난 것은 외기의 조건(습도, 풍속, 온도 등)과 운량 등에 따른 일사조건이 순간적으로 변화한 것에 의한 영향으로 생각된다.

Table 5는 이상의 실험 결과에서 각 공기유량별로 온도상승 및 집열효율을 정리한 것이다. (a)의 경우 $\dot{m} = 0.027$ kg/s에서 온도상승 18°C와 집열효율 68.6%, 그리고 (c)의 경우 $\dot{m} = 0.037$ kg/s에서 온도상승 14.3°C와 집열효율 74.4%의 결과를 보인다. 유사한 전일사 조건에서 집열성능이 유사할 경우는 공기유량의 증가에 따라 온도상승분 ΔT가 감소하는 것은 식 (1)에 의해 명확하다.

한편, ΔT가 감소하는데도 불구하고 결과적인 집열효율이 증가한 결과는 아래와 같이 설명될 수 있다. (a)의 경우를 기준으로 (c)의 결과를 비교해 보면, 공기 질량유량에서 0.01 kg/s의 증가는 약 37%에 해당하며, ΔT에서 3.7°C 감소는 약 21% 감소에 해당한다. 한편 I는 906.5 W/m²에서 910.2 W/m²으로 0.4%가 증가했다. 집열효율을 결정하는 식 (2)에서, 분자의 Q계산에 \dot{m} 증가분 37%와 ΔT 감소분 21%, 그리고 분모의 I 증가분 0.4%를 고려하

면 결과적인 집열효율은 상대적으로 약 8.4% 상승하는 것으로 예측된다. 실험결과로 계산된 집열효율이 (a)의 경우 68.6%에서 (c)의 경우 74.4%로 증가한 것은 상대적으로 약 8.4%의 증가에 해당하므로 예측된 값과 일치한다.

3.4 집열효율의 비교 평가

태양열 공기가열기들에 대한 집열효율은 집열기의 구조, 공기유량(풍량), 그리고 전일사 등에 따라 특징적으로 달라지며, 최고 값은 85% 정도의 범위로 알려져 있다. 다른 조건이 동일하다면 집열효율은 일반적으로 풍량에 따라 증가하는 경향을 보이지만, 풍량의 값이 커짐에 따라 그 증가율은 감소하여 점진적으로 한계치에 접근한다. 한편 풍량의 증가는 압력 손실을 동반하여 송풍기 소비동력을 증가시키므로 실제에 있어서는 설계 제한조건으로 고려된다.

Mohamad²⁾는 일정 길이 2 m, 폭 1 m 크기의 집열면적에 다양한 성능 증진형 설계를 적용한 공기집열기에 대해 풍량 0.0025~0.1 kg/s/m² 범위에서 이론적 해석을 수행하였다. 이 문헌에서 집열효율은 온도상승인자(ΔT/I)의 함수로 제시되었는데, 본 연구의 온도상승인자 범위인 0.016~0.02°C·m²/W에서 단일 또는 이중 덮개유리의 경우에는 최고 집열효율이 68~75%, 이중 공기통로와 다공성 매트릭스 흡열체를 사용하는 경우에는 85% 정도가 될 수 있음을 제시했다.

한편, Peng 등은¹²⁾ 집열면적이 0.64 m²인 집열기에 성능 증진방법으로 집열판에 25종의 다양한 핀-핀(pin-fin) 구조를 설치하여 본 논문에서의 풍량을 포함하는 넓은 풍량 범위(0.038~0.16 kg/s/m²)에서 실험 결과를 제시하였는데, 최적의 핀-핀 형상에서 집열효율의 범위는 65~87%이고 최고효율은 최대 풍량에

서 발생하나, 본 논문에서의 단위면적당 최대 풍량인 0.048 kg/s/m^2 에서의 집열효율은 66% 정도로 나타났다.

이외에도 이중 덮개유리를 갖는 공기집열기 구조에 대해서는 풍량 범위 $0.014 \sim 0.028 \text{ kg/s/m}^2$ 에서 다수의 연구들이 존재하나¹³⁻¹⁴⁾, 대부분 최고 집열효율은 64~81%의 범위를 보이고 있다.

현재 상용화 된 태양열공기가열기 제품 중 65% 이상으로 높은 집열효율을 성취한 경우는 이중 덮개유리를 사용하거나, 덮개유리 또는 후면 벽에 단위면적당 수천 개의 미세 천공(micro perforation) 구조를 가공하여 공기를 유입시키고 흡열판에 충전층 또는 펠트(felt) 등 특수한 다공성 구조물을 통해 유동공기와의 열전달을 증가시키는 방법을 채택하고 있어 고가의 설비와 제작비의 상승이 불가피하다¹⁵⁾. 본 연구에서 제시한바 삼각 돌출형 개구부를 갖는 태양열 공기가열기에서 얻은 약 69~74% 범위의 집열효율은 최고 수준에 근접한 수치로서, 간단한 가공에 의한 집열판의 구조 개선으로 장치의 경량과 저가격을 실현하면서 성능을 증진시키기에는 적합한 것으로 판단된다.

4. 결 론

삼각 돌출형 홀 개구부를 가지며 집열면적이 0.78 m^2 인 흡열판을 이용한 태양열 공기가열기에 대한 실험적 연구를 통해 온도 상승과 집열효율의 관점에서 성능을 분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 흡열판에 흡수율이 방사율보다 높은 선택적 도장을 하였을 때 일반적 흑색 도장에 비해 동일 일사 및 공기유량 조건에서 약 3°C 이상 큰 온도상승 효과가 가능하다.

(2) 공기 질량유량 0.027 kg/s (체적유량 $90 \text{ m}^3/\text{h}$)의 경우는 평균 태양전조사 906 W/m^2 에서 약 18°C 의 온도상승, 그리고 공기 질량유량 0.037 kg/s (체적유량 $121 \text{ m}^3/\text{h}$)의 경우는 평균 태양전조사 910 W/m^2 에서 약 14.3°C 의 온도상승 성능을 확인하였다.

(3) 집열효율은 공기 질량유량 $0.027 \sim 0.037 \text{ kg/s}$ (집열면적 당 $0.035 \sim 0.047 \text{ kg/s/m}^2$)과 태양전조사 $850 \sim 910 \text{ W/m}^2$ 의 범위에서 69~74%로 나타났으며, 흡열판에 간단한 삼각 돌출부의 가공만으로 우수한 집열성능 증진 효과를 입증하였다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었다(과제번호: 20139910100770). 또한 태양열 온풍기 시험모델은 (주)팜텍에서 제공하였으며 이에 감사한다.

Reference

1. Shin, J. H., Boo, J. H., A numerical study on the thermal performance of a solar air heater depending on the hole configuration and geometry in the absorber plate, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol.35, No.1, 2015.
2. Mohamad, A. A., High efficiency solar air heater, Solar Energy, Vol.60, pp.71-76, 1997.
3. Gill, R. S., Singh, S., Singh, P. P., Low cost solar air heater, Energy Conversion and Management, Vol.57, pp.131-142, 2012.
4. Sethi, M., Varun, N. S., Thakur, N. S., Correlations for solar air heater duct with dimpled shape roughness elements on absorber plate, Solar Energy, Vol.86(9), pp.2852-2861, 2012.

5. Lanjewar, A., Bhagoria, J. L., Sarviya, R. M., Heat transfer and friction in solar air heater duct with W-shaped rib roughness on absorber plate, *Energy*, Vol.36, pp.4531-4541, 2011.
6. Sharma, S. K., Kalamkar, V. R., Thermo-hydraulic performance analysis of solar air heaters having artificial roughness - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, pp.413 - 435, 2015.
7. Kim, J. R., Hong, B.P., Woo, J. S., Choi, K. H., Basic operational characteristics for developments of solar air heater for air heating in winter, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol.31, pp.87-94, 2011.
8. Kramer, K. S., White paper on solar air heating collectors, IEA-SHC Task 43 - Solar rating and certification procedure, pp.18-22, 2013.
9. Duffie, J. A., Beckman, W. A., *Solar engineering of thermal processes*, 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc., pp.282-301, 2006.
10. Cengel, Y. A., Boles, M. A., *Thermodynamics: an engineering approach*, 7th ed., McGraw-Hill, pp.949, 2011.
11. Holman, J.P. *Experimental Methods for Engineers*, 6th ed., McGraw-Hill, pp.49-56, 1994.
12. Peng, D., Zhang, X., Dong, H., Lv, K., Performance study of a novel solar air collector, *Applied Thermal Energy*, Vol. 30, pp.2594-2601, 2011.
13. El-khawajah, M.F., Aldabbagh, L.B.Y., Egelioglu, F., The effect of using transverse fins on a double pass flow solar air heater using wire mesh as an absorber, *Solar Energy*, Vol. 85, pp.1479 - 1487, 2011.
14. Ozgen, F., Esen,, M., Esen, H., Experimental investigation of thermal performance of a double-flow solar air heater having aluminium cans, *Renewable Energy*, Vol. 34, pp.2391-2398, 2009.
15. Technical Specs., Luba GLR solar air collector, Enerconcept Distribution, Inc., www.enerconcept.com, 2016.