

태양열 공기가열기의 흡열판 홀 배치와 형상에 따른 열적 성능에 관한 수치해석적 연구

A Numerical Study on the Thermal Performance of a Solar Air Heater Depending on the Hole Configuration and Geometry in the Absorber Plate

신재혁* · 부준홍**†

Shin, Jae Hyuk* and Boo, Joon Hong**†

(Received 9 January 2015; accepted 13 February 2015)

Abstract : A series of numerical analyses was conducted to predict the thermal performance of a solar air heater depending on the hole configuration and geometry in the absorber plate. The planar dimensions of the prototype were 1 m (W) by 1.6 m (H), and the maximum air flow considered was 187 m³/h. It was considered that protruding holes with a triangular opening in the absorber plate would invoke turbulence in the air flow to enhance the convection heat transfer. Six different hole configurations were investigated and compared with each other, while the hole opening height was considered as a design variable. Three-dimensional transient analyses were performed with a commercial software package on the airflow and heat transfer in the model. The numerical results were analyzed and compared from the view point of the outlet air temperature and its time response to derive the optimal hole pattern and hole opening height.

Key Words : 태양열 공기가열기(Solar air heater), 수치해석(Numerical analysis), 홀 패턴(Hole pattern), 홀 형상(Hole shape), 출구 공기온도(Outlet air temperature), 천이작동(Transient operation)

기 호 설 명

W : 태양열 공기가열기 폭 [m]

L : 태양열 공기가열기 길이 [m]

I : 흡열판 길이 [m]

HF : 태양열공기가열기 전면 채널높이[mm]

**† 부준홍(교신저자): 한국항공대학교 항공우주 및 기계 공학부

E-mail : jhboo@kau.ac.kr, Tel : 02-300-0107

*신재혁: 국방기술품질원

**† Boo, Joon Hong (corresponding author) : School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

E-mail : jhboo@kau.ac.kr, Tel : 02-300-0107

*Shin, Jae Hyuk: Defense Agency for Technology and Quality

- HR : 태양열공기가열기 후면 채널높이[mm]
- t : 흡열판 두께 [mm]
- W_h : 홀의 폭 [mm]
- H_h : 홀의 길이 [mm]
- D : 홀의 피치(공기 유동 방향) [mm]
- P : 홀의 피치(흡열판 폭 방향) [mm]
- h : 홀 개구부의 높이 [mm]
- S : 흡열판이 흡수한 태양조사 [W/m^2]

1. 서 론

태양열 공기가열기에 대해서 다양한 연구가 이루어지고 있다. 태양열 공기가열기의 성능 향상을 위해서는 흡열판(absorber plate)과 공기 간의 열전달 증진을 위해 유동공기의 난류 발생 및 재순환 등을 유발할 수 있는 구조의 채택이 선호된다. 최근의 연구에서는 흡열판 위에 다양한 형태의 립(rib) 등 표면 거칠기(roughness)를 부여한 인공적인 구조물을 설치하여 대류열전달을 향상시키는 구조와 이에 따른 성능에 대한 연구가 이루어지고 있다.

Kumar와 Saini¹⁾는 인공적 거칠기가 부여된 공기가열기 덕트의 성능에 대한 수치해석 연구를 수행하였고, Yadab과 Bhagoria²⁾, Karmare와 Tikekar³⁾, Karwa와 Chitoshiya⁴⁾는 태양열 공기가열기의 흡열판 위에 다양한 형태의 립(rib) 구조물이 설치된 경우에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 그리고, Wu와 Tao⁵⁾의 연구에서는 축방향 와류생성기(vortex generator)가 설치된 사각 채널에서 각도 변화에 따른 열전달 성능을 수치해석적으로 분석하여 실험적 결과와 비교하였고, S은 삼각 날개(delta winglet)가 부착된 태양열kullong 등⁶⁾의 연구에서는 와류생성기로 작 공기가열기 덕트의 난류 대류를 실험적으로 분석하였다. 또한,

Sun 등⁷⁾의 연구에서는 공기가열기의 채널 깊이에 따른 성능변화를 제시하였다. 한편, Hu 등⁸⁾은 내부에 배플(baffle)이 설치된 공기가열기의 유도에 대한 수치해석적 연구를 수행하였고, Ho 등⁹⁾은 흡열판에 배플과 흰(fin)이 설치된 경우의 성능 증진을 제시하였으며, Yang 등¹⁰⁾은 흡열판에 오프셋 스트립 흰(offset strip fin)을 부착한 경우의 최적설계를 수행하였다.

본 연구에서는 가정용 태양열 공기가열기에서 평판형의 흡열판에 부착 가능한 립(rib), 흰(fin), 스트립(strip) 등의 부가적 구조물 대신 흡열판 자체에 소형의 돌출형 홀(hole)을 일체형으로 가공한 구조에 대해 초점을 두고 유동과 열전달 증진을 통해 최선의 공기가열기 성능을 모색하는 것을 목적으로 하였다. 이러한 흡열판 구조는 금형을 이용하여 일체형으로 용이하게 가공할 수 있으므로, 생산성을 높일 수 있는 장점을 기대할 수 있다. 그러나 기존의 문헌에는 태양열 공기가열기의 흡열판에 본 연구에서 검토하고자 하는 홀의 형태에 따른 성능을 예측하거나 설계에 활용할 수 있는 이론식 또는 실험적 상관식이 제시되어 있지 않다.

기하학적 설계변수로서는 태양열 공기가열기 내부의 흡열판에 가공된 홀의 형상과 패턴과 홀의 높이 등을 우선 고려하였고, 흡열판과 덮개유리 및 후면 케이싱의 간격을 부차적으로 고려하였다. 주어진 입구 외기 온도, 태양조사 및 공기유량에 대해 태양열 공기가열기의 성능 변수는 출구 공기온도로 고려하였으며, 이를 최고로 할 수 있는 설계변수의 조합을 모색하고자 하였다.

본 연구의 목적을 위해 수치해석적 방법을 사용하였으며, 해석 도구로서는 상용 코드인 ANSYS FLUENT (version 6.3.26)를 이용하여 3차원 천이(비정상)상태 유동 및 열전달 해석을

수행하였다. 이 도구를 사용하면 시간 경과에 따라 가열기 내부 및 출구 공기 온도의 변화를 예측하는 것은 물론, 정상상태 온도분포에 도달할 때까지의 천이작동 시간과 이때 수렴된 출구 공기온도를 예측할 수 있으므로 태양열 공기가열기의 열적 성능을 평가할 수 있다. 홀의 패턴과 형상은 흡열판과 일체형으로 용이한 가공이 가능한 범위에서 다양하게 고려하였다.

2. 태양열 공기가열기 모델링

2.1 태양열 공기가열기 해석 모델

본 연구에서 고려한 태양열 공기가열기는 건물의 외벽에 간편하게 착탈이 가능한 경량 구조를 가진 형태로서, 예상하는 실물 크기는 폭 1 m, 길이(설치 높이) 1.6 m, 두께 80 mm이다. 전체 길이 중에서 흡열판의 길이는 1.5 m이며 흡열판이 끝나는 부분부터 상단 케이싱의 사이에는 공기 출구가 있으며 송풍기가 설치된다. 흡열판과 전면 덮개유리 및 후면 케이싱(casing)의 간격은 각각 50 mm 및 30 mm로 고려하였다. 외부 공기는 공기가열기 하단에 설치된 입구로 들어와, 태양조사에 의해 데워진 흡열판을 따라 자연대류 및 강제대류에 의해 수직방향으로 유동한다. 흡열판에는 다수의 홀들이 특정한 패턴으로 설치되어 흡열판의 전면 및 후면으로 공기가 유동하며 열전달을 할 수 있도록 한다. 흡열판에 가공되는 홀의 폭은 약 10 mm 임을 고려하고, 가공성을 고려한 홀의 열(row) 간 피치를 20 mm로 하면 흡열판의 폭 1 m 내에 50 열의 홀들이 배치되고, 각 열에는 75개의 홀들이 가공될 수 있다. 수치해석 모델의 단순화를 위해 대칭성을 고려하여 Fig. 1에 도시된 바와 같이 실물의 폭 1 m 중 2개의 열을 포함할 수 있는 40 mm만 해석 모델에 이용하였다. 이는

인접한 열 사이의 간섭 현상을 고려할 수 있는 최소한의 폭으로 고려하였다. 한편, 공기 입구의 유동은 전체 입구 단면적에 균일하게 분포되며, 공기의 출구는 들어온 공기의 유량이 모두 나가는 것으로 설정하였다. 해석 모델의 제원은 Table 1에 나타내었다. Fig.1의 흡열판에는 홀의 형상과 배치 패턴이 도시되지 않았으나, 2.4절에서 제시되는 총 6가지 서로 다른 홀 패턴과 홀의 높이를 설계변수로 고려하였다.

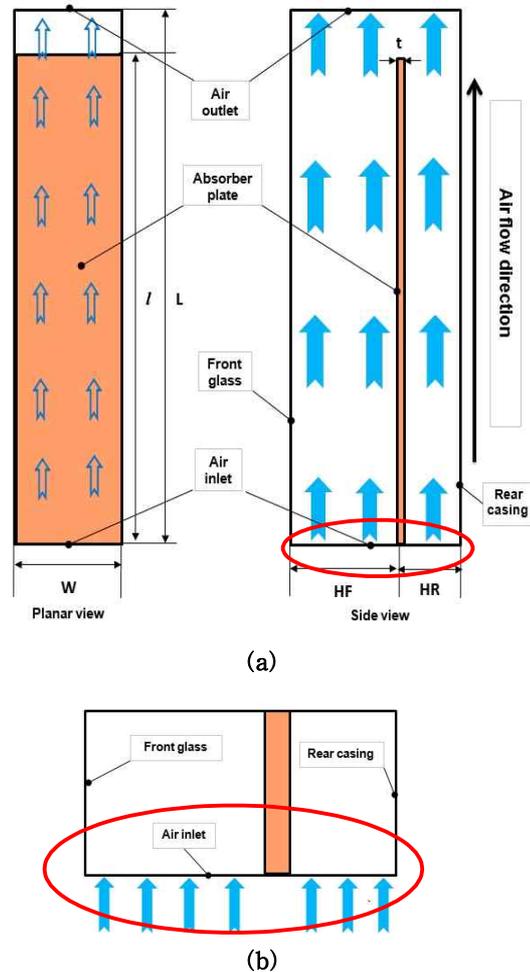


Fig. 1 Schematic of the numerical model of a solar air heater (a) planar and side views, (b) magnified view of air inlet part

Table 1 Dimensions of the numerical model

Width, W	40 mm
Length, L	1.6 m
Absorber Length, l	1.5 m
Channel height, front side, HF	50 mm
Channel height, rear side, HR	30 mm
Absorber thickness, t	2 mm

2.2 수치적 모델의 격자 생성

태양열 공기가열기 수치적 모델의 해석을 위한 격자, 즉 메시(mesh) 생성을 위해서 Gambit(ver. 2.4.6) software를 이용하였으며, 정사면체 형태의 메시지를 사용하였다.

수치해석의 신뢰성을 위해 메시 크기와 수에 따른 수치해의 안정성과 정밀도를 검증하였으며, 모든 경우에 계산 변수의 수렴기준은 residual이 10^{-5} 이하로 하였다. 최종적으로 본 연구의 수치해석에 사용된 메시의 수는 홀 개구부의 높이에 따라 약 51만 개에서 97만 개의 범위였다. 이는 홀 개구부의 높이가 적은 경우에는 개구부 주위 공기 유동에 대해 유체역학 및 열전달 해석 상 수렴성과 정확성을 확보하기 위해 보다 조밀한 격자의 구성이 필요했기 때문이다. Fig. 2에 메시 구조 및 배치의 특징적 형상을 볼 수 있도록 수치적 모델의 일부를 제시하였다.

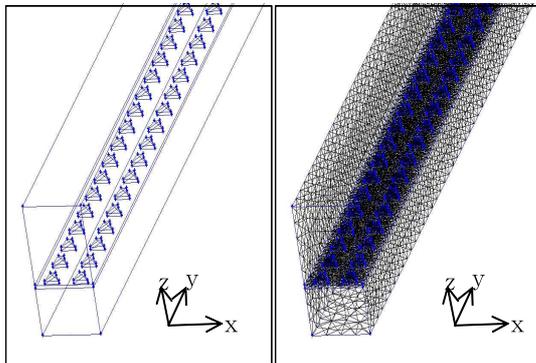


Fig. 2 Geometry and generated meshes of the numerical model (partial view)

2.3 경계조건 및 작동조건

Fig. 3에 보이는 바와 같이 수치해석 모델의 윗면은 덮개유리(cover glass)로 외부 공기에 의한 자연대류 열손실 및 복사열손실을 고려하였고, 양쪽 옆면은 대칭 조건을 적용하였다. 모델의 아랫면은 후면 케이싱(rear casing)으로서 단열조건을 적용하였으며, 전면에서는 전체 면적에 걸쳐 유량이 균일하게 분포된 공기가 유입되도록 설정하였다. Fig. 3에는 나타나지 않았으나 해석 모델의 뒷면(공기 출구측)은 outflow로 설정하여 유입된 모든 공기가 나가는 것으로 적용하였다. 흡열판에서는 흡수된 태양조사에 상당하는 크기의 일정한 열유속 조건으로 열이 발생하는 것으로 모사하였다.

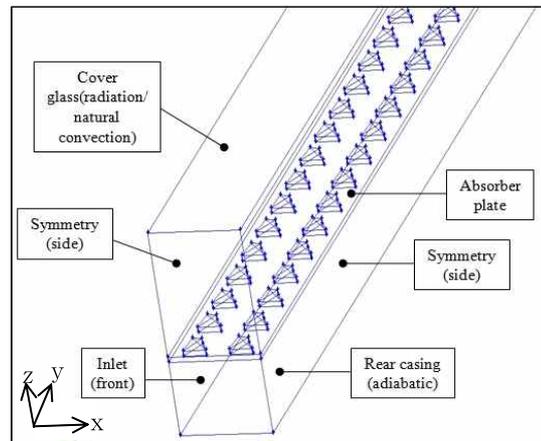


Fig. 3 Boundary conditions for the numerical model

FLUENT를 이용하여 난류유동을 해석하는데 있어서 일반적인 standard k-ε model은 특정한 경우에 수렴성의 문제가 대두되기 때문에 Renormalization-Group (RNG) k-ε model이 넓은 범위의 난류 유동해석에 상대적으로 더욱 정확하고 신뢰성이 우수하므로 선호된다고 알려져 있다.¹¹⁾ 그러므로 본 연구에서도

RNG k- ϵ model을 난류 해석에 사용하였다. 또한, 흡열판 온도나 출구 공기온도가 동일한 값에 접근하는 경우라도 소요시간이 짧을수록 공기가열기의 성능이 우수한 것으로 판단할 수 있다는 점을 반영하여 천이(또는 비정상) 유동(unsteady flow) 조건으로 해석을 수행하였다. 천이상태 유동해석에서는 안정성과 수렴성을 보장하기 위한 조건을 검토하여 모사시간 간격을 5 sec로 하였다. 수치해석에 사용한 작동조건과 매개변수는 Table 2에 요약하였다.

Table 2 Operating conditions and parameters in the numerical analysis

Time step size (sec)		5.0
Iteration per time step		20
Absorbed solar irradiance, S (W/m ²)		800, 850
Volumetric air flow rate (m ³ /h)		3.40, 7.48
Inlet air temperature (K)		283
Ambient air	Temperature (K)	283
	Convective heat transfer coefficient at the outer surface of cover glass (W/m ² ·K)	5.0

공기의 체적유량은 상용 태양열 공기가열기에서 사용하는 팬(fan)의 실제 유량범위가 85~187 m³/h (50~110 cfm)임을 고려하였으며, 수치모델의 폭이 실물의 1/25이므로 폭 방향의 균일유동을 가정하여 모델에는 3.40~7.48 m³/h를 반영하였다. 그러나 이하 자료에는 시스템의 성능평가가 용이하도록 실물의 전체유량을 표기하였다. 한편, 덮개유리 및 흡열판의 재질과 열물성치는 Table 3에 제시하였다. 흡열판은 복사성질을 위해 흑색 도장하였다. 또한, 태양열 공기가열기로 유입되는 외부 공기의 온도는 봄과 가을철의 평균온도로 283 K(10°C)로 설정하였으며 Table 4에 물성치를 기재하였다.

Table 3 Properties of the absorber plate and cover glass

	Absorber plate at 283 K	Cover glass at 300 K
Material	Aluminum(pure)	Glass(pyrex)
Density	2700 kg/m ³	2225 kg/m ³
Specific heat	885 J/kg·K	835 J/kg·K
Thermal conductivity	237 W/m·K	1.4 W/m·K
Absorptivity	0.9 (coating)	-
Emissivity	0.9 (coating)	-
Transmissivity	-	0.9

Table 4 Properties of air at 283 K

Density (kg/m ³)	1.2407
Specific heat (J/kg·K)	1004.7
Thermal conductivity (W/m·K)	0.0249
Viscosity (N·s/m ²)	1.761x10 ⁻⁵

2.4 홀 패턴 종류 및 크기

흡열판에 가공되는 홀의 종류는 Fig. 4에 도시된 바와 같이 1-a, 1-b, 2-a, 2-b, 3-a, 3-b로 총 6가지 배치 형태들을 검토 대상으로 하였다. 홀의 폭과 높이, 홀 사이의 거리 등은 실제 가공이 가능한 범위와 폭을 고려하여 선정하였다. Fig. 5의 좌측 1, 2 및 3은 흡열판의 평면도 상에 배치된 형태이며, 이 세 형태의 각각에 대해 우측의 a 및 b는 측면도 상에서 보이는 홀의 개구부가 돌출된 방향에 따라 두 가지의 서로 다른 경우를 나타낸다. a 및 b에서 좌측으로 열린 경우는 흡열판 전면 덮개유리쪽으로 홀의 개구부가 가공된 경우를, 그리고 우측으로 열린 경우는 후면 케이싱 방향으로 개구부가 가공된 경우를 나타낸다. a 및 b에서 화살표는 공기의 유동 방향을 나타내고 있다. 패턴 1의 경우는 홀의 개구부가 공기 유동을 마주보는 방향으로 열려 있는 경우로서, 1-a는 홀이 전부 흡열판 위로 설치되어 있고, 1-b는 흡열판을 기준으로 상, 하 방향으로 교차로 가공된 경우이다. 패턴 2의 경우는 홀의 개구부가 공기 유동

방향을 등지고 있는 경우로 2-a의 경우는 개구부가 흡열판 아래쪽으로만 설치되어 있고, 2-b는 흡열판을 기준으로 상향 및 하향으로 교차로 가공된 경우이다. 패턴 3의 경우는 홀의 개구부가 공기 유동을 마주보거나 등지고 있는 것이 교차적으로 구성되어 있는데, 3-a는 개구부가 흡열판 위로만, 그리고 3-b는 홀 개구부가 흡열판 아래쪽으로만 가공된 경우이다.

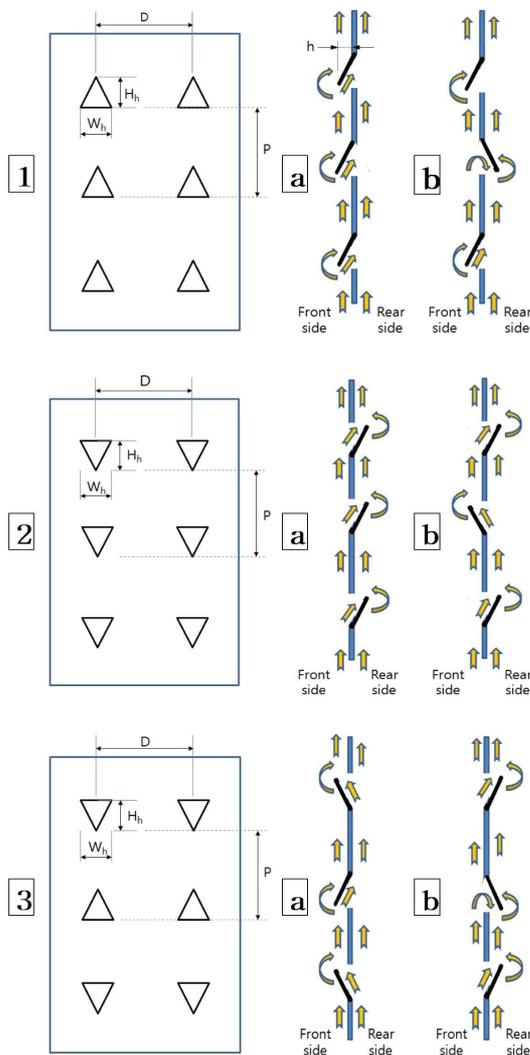


Fig. 4 Six different types of hole pattern investigated in this study

홀 개구부의 형상은 삼각형이며, 개구부 하나의 폭은 10 mm로 하였고, 폭 방향과 유동방향의 홀 사이 거리(피치, pitch)를 20 mm로 하였다. 단, 홀 개구부의 높이는 설계변수로 취급하여 10, 5, 그리고 1.3 mm로 3가지 경우에 대해 비교할 수 있도록 하였다. 이 수치들은 금형 가공으로 제작이 가능한 범위에서 적정 간격으로 선정하였다. 홀 및 개구부의 제원은 Table 5에 요약하였다.

Table 5 Dimensions of the hole openings and configuration for the numerical model

Hole width, W_h (mm)	10
Hole length, H_h [flow direction] (mm)	10
Pitch, D (mm)	20
Pitch, P (mm)	20
Hole opening height, h (mm)	10, 5, 1.3
Number of holes (ea)	150

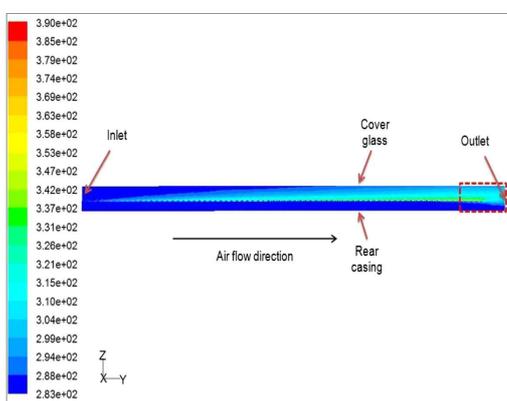
3. 수치해석 결과

3.1 대표적 수치해석 결과

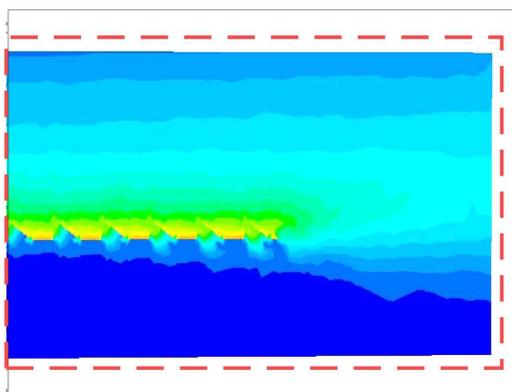
본 연구에서의 대표적인 수치해석의 결과로서, 패턴 1-a에 대해 홀 개구부의 높이가 5 mm, 흡열판이 흡수한 태양조사 800 W/m^2 , 공기유량 $187 \text{ m}^3/\text{h}$ (모델 공기유량 $7.48 \text{ m}^3/\text{h}$)인 조건에서 3,160 sec 경과 후 홀이 위치한 열의 길이 방향으로 자른 단면의 2차원적 온도분포는 Fig. 5-(a)에 보이는 바와 같다. 또한, 흡열판의 끝부분과 공기 출구 부분을 포함하여 확대한 등온 분포도를 Fig. 5-(b)에 나타내었다.

한편, 동일한 패턴과 작동 조건에서 등온 분포도와 더불어 홀의 패턴에 따라서 공기의 유동을 확인할 수 있도록 Fig. 6과 Fig. 7에 공기 유동장의 속도벡터 및 유선(streamline)을 부분적으로 정밀 확대하여 나타내었다. 이는 유동방향으로 총 75개의 홀 중에서 71번째와 72

번째의 홀의 중간을 절단한 Y-Z 단면이다. 홀 개구부의 존재로 인해 흡열판 위에서 아래로 공기의 유동이 순환하는 것을 확인할 수 있으며, 홀 개구부 주위에서는 유동의 재순환(recirculation)과 와류(vortex)가 발생하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 기구에 의해 흡열판과 유동공기 사이에 열전달이 증가하는 것으로 추정할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5 Temperature contours in the Y-Z plane along the hole centerline (a) whole view of solar air heater, (b) magnified view of the region enclosed with dotted line (For the hole pattern 1-a, $h = 5$ mm)

Figs. 6 및 7에서 검정색 및 하얀색 윤곽선으로 표시된 부분은 흡열판과 홀 개구부의 절

단면으로, Fig. 6는 흡열판의 끝과 공기 가열기 출구 인근 부분을 정밀 확대한 것이고, Fig. 7은 홀 주위에서 생성되는 유선과 온도장을 부분적으로 정밀 확대한 것이다.

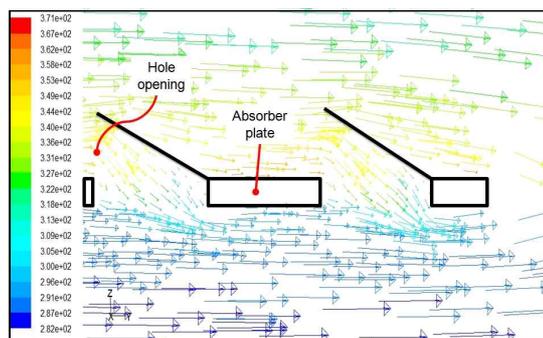


Fig. 6 Velocity vector field in the Y-Z plane along the hole centerline, near the end of the absorber plate (For the hole pattern 1-a, $h = 5$ mm)

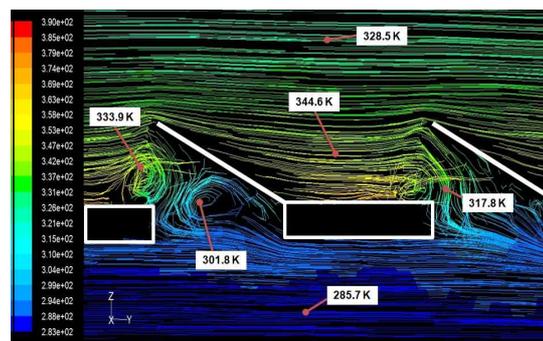


Fig. 7 Streamline and temperature in the Y-Z plane along the hole centerline, near the end of absorber plate (For the hole pattern 1-a, $h = 5$ mm, magnified view)

3.2 6종 홀 패턴의 성능 비교

위에서 언급한 6종의 홀 패턴 각각에 대해 홀 개구부의 높이를 변화에 따른 수치해석을 수행하였으며, 비교를 위한 작동조건으로는 공기유량 $85 \text{ m}^3/\text{h}$ (모델 공기유량 $3.40 \text{ m}^3/\text{h}$) 및 흡열판이 흡수한 태양조사 $850 \text{ W}/\text{m}^2$ 을 동일하게 적용하였다. 대표적으로 홀 개구부의 높이 5 mm 의 경우 시간에 따른 출구 공기온도

그래프를 Fig. 8에 제시하였다. 출구 공기온도는 출구 단면에서의 온도분포와 질량유량의 분포를 고려한 유체평균온도로 산출하였다. (이하 ‘출구 공기온도’는 평균온도를 의미함).

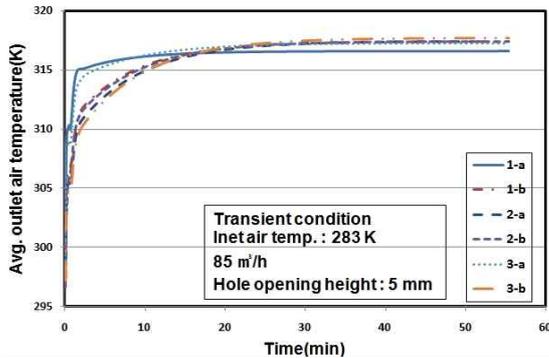


Fig. 8 Transient variation of the average outlet air temperature for six different hole patterns with hole height 5 mm ($S = 850 \text{ W/m}^2$)

최종 수렴온도, 즉 정상상태 온도가 가장 높은 패턴은 3-b, 2-b, 2-a, 1-b, 3-a, 1-a의 순이었으며, 이 중에서 2-b, 2-a, 1-b의 경우는 차이가 거의 없었다. 한편, 단시간 내에 최고온도(정상상태 온도)에 수렴하는 패턴은 1-a와 3-a가 다른 패턴들에 비해 탁월하기 나타나고 있는데, 정상상태 출구 공기온도 수치들에 대한 평균치를 317.4 K로 할 때 이의 99%인 314.2 K에 도달하는 시간이 1-a의 경우에는 75 sec 이내, 3-a의 경우는 125 sec 이내로 나타났다. 차순위로 출구 공기온도의 응답성이 빠른 패턴 1-b의 경우가 7분 정도로 나타난 것이 비하면 이들 1-a 및 3-a 두 패턴의 온도 상승이 상대적으로 매우 신속하다는 것을 알 수 있다.

6종의 홀 패턴들에 대해 홀 개구부 높이가 10 mm와 1.3 mm의 경우에 대한 출구 공기온도의 천이작동 해석 결과는 각각 Fig. 9와 Fig. 10에 제시하였다. 그리고 Fig. 11에는 수치해석 결과들을 종합하여 각 패턴별로 홀 개

구부의 높이에 따른 출구 공기온도를 비교하여 나타내었다. 정상상태에서 가장 높은 출구 공기온도를 보이는 패턴 3개를 보면, 홀 개구부 높이가 10 mm의 경우에는 2-b, 2-a, 3-b의 순이었고, 홀 개구부 높이가 1.3 mm의 경우에는 2-a, 3-b, 2-b의 순으로 나타났다. 집열기 입구 공기온도가 283 K이고, 출구공기의 평균온도는 약 317 K이므로 가열기를 통한 공기 온도상승은 약 34 K로 예측되었다. 또한, 홀 개구부 높이가 1.3 mm인 경우는 모든 홀 패턴에 대해 10 mm 및 5 mm의 경우보다 상대적으로 출구 공기온도가 더 낮았으며, 그 차이는 홀 패턴에 따라 다르지만 최대 1.5 K 정도로 나타났다.

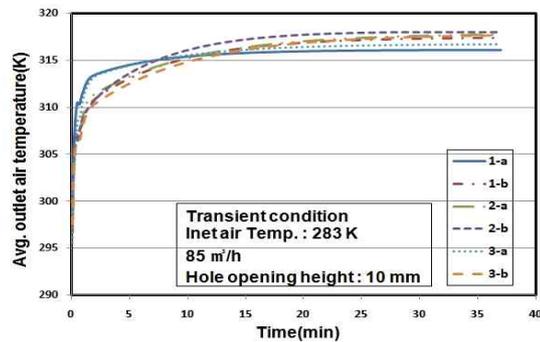


Fig. 9 Transient variation of the outlet air temperatures for six different hole patterns with hole height 10 mm ($S = 850 \text{ W/m}^2$)

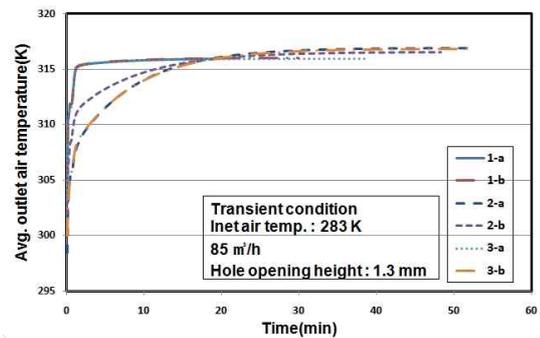


Fig. 10 Transient variation of the outlet air temperatures for six different hole patterns with hole height 1.3 mm ($S = 850 \text{ W/m}^2$)

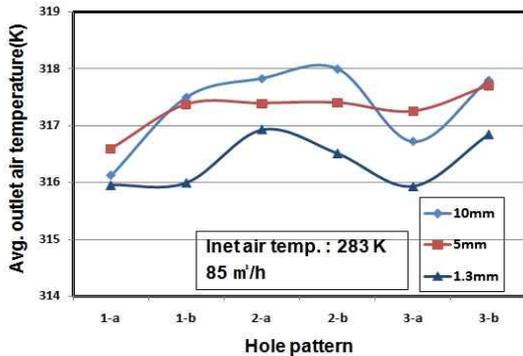


Fig. 11 Comparison of the outlet air temperatures for three different hole opening height ($S = 850 \text{ W/m}^2$)

한편, 가장 단시간 내에 정상상태(최고) 온도에 수렴하는 성능은, 모든 홀 개구부 높이에 대해서 패턴 1-a와 3-a가 다른 패턴들에 비해 탁월하게 나타나고 있다. 이에 대한 상세한 수치적 자료는 Table 6에 요약하였다. 또한, Table 6의 하부에는 태양열 공기가열기 내부로부터 덮개유리를 통한 외부로의 열손실률을 함께 나타내었다. 이 값은 덮개유리의 경계면에서 계산된 정미(net) 열전달률로서 자연대류 및 복사에 의한 외부 공기로의 열손실을 의미한다. 단, 본 논문에서는 덮개유리 이외의 부분에서 열손실은 고려하지 않았고, 집열판의 높은 균일 열유속을 적용하였으므로, 출구 공기온도는 실제로 다 과대하게 예측되었을 것으로 생각된다.

Table 6 Numerical results for the 6 different hole patterns ($S = 850 \text{ W/m}^2$, air flow $85 \text{ m}^3/\text{h}$)

Average outlet air temperature(K)						
Hole opening height	Hole pattern					
	1-a	1-b	2-a	2-b	3-a	3-b
10 mm	316.1	317.5	317.8	318.0	316.7	317.8
5 mm	316.6	317.4	317.4	317.4	317.3	317.7
1.3 mm	316.0	316.0	316.9	316.5	315.9	316.8
Rate of heat loss through cover glass(W)						
10 mm	-4.6	-2.6	-2.2	-2.1	-3.6	-2.2
5 mm	-3.8	-2.7	-2.6	-2.7	-2.9	-2.4
1.3 mm	-3.3	-3.3	-2.5	-2.9	-3.4	-2.7

공기가열기의 성능은 출구 공기온도가 가장 높게 나타나는 경우와 가장 빠른 시간에 출구 공기온도가 상승하는 경우를 우수하다고 고려할 수 있다. 그러나 정상상태에서 도달되는 출구 공기 온도차가 크지 않다면 최단 시간에 출구 공기온도 상승을 가져올 수 있는 경우가 선호된다고 할 수 있다. 이는 공기가열기에서는 보통 축열방식을 사용하지 않고 가열된 공기를 직접 사용하기 때문이다. 따라서 1-a, 3-a, 2-a, 그리고 2-b의 4가지 패턴으로 범위를 축소하여 진행하였다.

3.3 천이작동 성능이 우수한 홀 패턴들의 성능 비교

중간 정도의 공기유량($85 \text{ m}^3/\text{h}$)에 대한 수치해석 결과 상대적으로 천이작동 성능이 우수한 4가지 홀 패턴들(1-a, 3-a, 2-a 및 2-b)에 대해서는 좀 더 상세한 해석이 수행되었다. 우선, 실제 장착되는 쉘의 최대 유량으로서 $187 \text{ m}^3/\text{h}$ (모델 유량 $7.48 \text{ m}^3/\text{h}$ 에 해당)를 적용한 결과를 비교 분석하였다.

Fig. 12에는 대표적으로 홀 개구부 높이가 5 mm인 경우에 대해 출구 공기 온도의 최종 온도와 이에 소요되는 천이작동 시간을 비교 제시하였다. 외부공기 유입온도가 동일한 283 K 일 때, 4가지 모든 패턴들에서 출구의 공기온도는 약 302 K로 접근하면서 약 19 K(°C) 상승하는 것을 알 수 있다. 정상상태의 출구 공기온도가 높은 순서는 2-b, 2-a, 3-a, 1-a의 순으로 나타났지만, 실제 그 차이는 1 K 이내로 작았다. 특히, 2-b와 1-a의 출구온도 차이는 0.14 K 정도로 나타났다. 이 정도의 온도차는 수치적인 오차의 누적으로 발생할 수도 있고, 실제로도 열전대를 이용한 온도 측정오차 범위에 드는 정도이므로, 출구 온도에 의해 성능의 우열을 가리는 것은 큰 의미가 없을 것

으로 판단되었다. 한편, 출구 공기온도의 상승 속도가 가장 빠른 패턴은 1-a, 3-a, 2-b, 그리고 2-a의 순으로 나타났는데, 이 순서가 성능의 우수성을 나타낸다고 보는 것이 타당하다고 판단되었다. 홀 개구부 높이 10 mm인 경우에도 정상상태 출구 공기온도가 높은 순서는 2-b, 2-a, 3-a, 그리고 1-a로 나타났으며, 홀 패턴에 따른 출구 공기 온도의 차이는 최대 0.2 K로 매우 미소하였다.

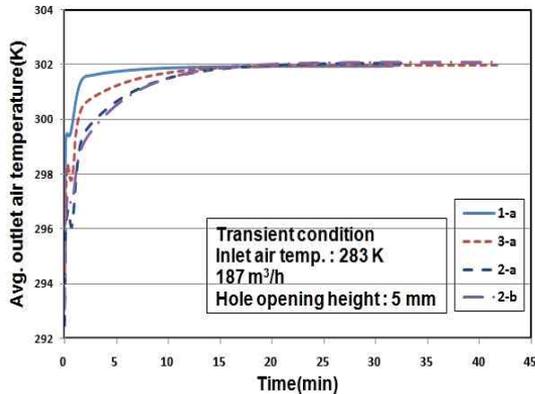


Fig. 12 Transient variation of the average outlet air temperature for four different hole patterns with hole height 5 mm ($S = 850 \text{ W/m}^2$)

Fig. 13에는 4종의 홀 패턴에 대해, 10 mm 이내에서 5개의 서로 다른 홀 개구부 높이에 따른 정상상태의 출구 공기온도를 비교하였다. 또한, 이들 홀 패턴에 대한 수치해석 결과 자료는 Table 7에 요약하였다. 모든 홀 패턴에 대해 그 절대적 차이가 1 K 미만이라는 하지만, 전반적으로 홀 개구부 높이가 5 mm인 경우에 가장 높은 출구 공기온도가 예측되었다. 또한 검토된 4종의 홀 패턴 모두에 대해 홀 개구부의 높이가 1.3 mm인 경우에 가장 낮은 출구 공기온도가 예측되었다. 무엇보다도 홀 개구부의 높이가 커질수록 가공상 흡열판의 파단 등 어려움이 예상되므로, 필요 이상

의 개구부 높이를 지양한다는 관점에서 검토한 범위에서는 5 mm 정도를 최적 높이로 판단할 수 있다. 한편, 모든 홀 개구부 높이에 대해 출구 공기온도 상승이 가장 빠른 두 개의 홀 패턴은 공기유량이 $85 \text{ m}^3/\text{h}$ 일 때와 마찬가지로 패턴 1-a와 3-a의 순으로 나타났다.

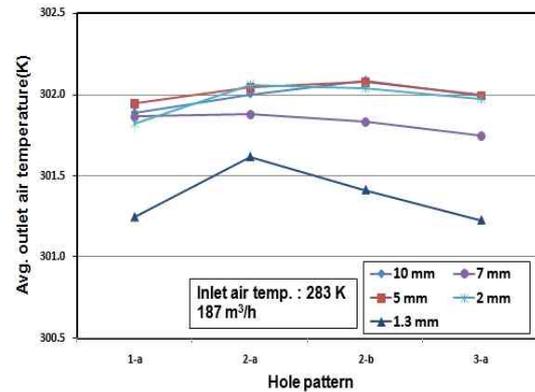


Fig. 13 Comparison of the outlet air temperatures for different hole opening height ($S = 850 \text{ W/m}^2$)

Table 7 Summary of the numerical analyses for 4 significant hole patterns ($S = 850 \text{ W/m}^2$, air flow $187 \text{ m}^3/\text{h}$)

Average outlet air temperature (K)				
Hole opening height	Hole pattern			
	1-a	2-a	2-b	3-a
10 mm	301.9	302.0	302.1	302.0
7 mm	301.9	301.9	301.8	301.7
5 mm	301.9	302.0	302.1	302.0
2 mm	301.8	302.0	302.0	301.9
1.3 mm	301.3	301.6	301.4	301.2
Rate of heat loss through cover glass (W)				
10 mm	-1.8	-1.4	-1.1	-1.4
7 mm	-1.8	-1.6	-1.7	-2.0
5 mm	-1.6	-1.3	-1.2	-1.4
2 mm	-1.2	-1.3	-1.4	-1.6
1.3 mm	-1.6	-1.3	-1.4	-1.6

3.4 태양조사율 변화에 따른 성능 비교

이상의 해석 결과를 토대로 홀 개구부 높이를 5 mm로 선정하되, 두 개의 홀 패턴 1-a와 3-a만을 대상으로 태양조사가 변화된 작동조

건에서의 성능을 비교 검토하여 최적의 홀 패턴과 개구부 높이를 결정하고자 하였다. 변경된 작동조건으로서 흡열판에 흡수된 열유속은 800 W/m^2 를 적용하였으며, 이는 약 988 W/m^2 의 태양조사에 해당한다.

Fig. 14에 홀 패턴 1-a 및 3-a에 대해 출구 공기온도의 천이작동에 대한 수치해석 결과를 비교하여 나타내었다. 우선, 약 15분 경과 시에는 두 경우 모두 정상상태에 도달하며, 수렴된 출구 공기온도는 측정오차 범위에서 유사하다. 보다 더 중요한 성능으로 고려되는바 출구 공기온도가 보다 빨리 상승하는 것은 1-a 패턴임을 확인할 수 있다.

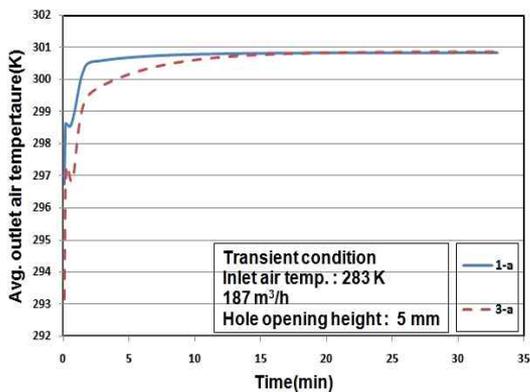


Fig. 14 Transient variation of the average outlet air temperature for two different hole patterns with hole height 5 mm ($S = 800 \text{ W/m}^2$)

이 경우에 덮개유리를 통한 대류 및 복사열 손실은 $1.2 \sim 2.0 \text{ W}$ 로 계산되었다. 단, 본 논문에서는 덮개유리 이외의 부분에서 이상적인 단열과 집열판에서 높은 균일 열유속을 가정하였으므로, 공기온도 상승분은 실제보다 과대하게 나타났을 것이며, 이를 토대로 계산된 집열기효율 또한 과대하게 산정될 것으로 판단된다. 그러나 비교 대상 모두에 동일한 열손실 조건을 적용했으므로 우수한 홀 패턴과 최

적 개구부 높이의 선정 결과에는 영향이 없을 것으로 생각된다.

이상의 수치해석 결과들을 종합해 볼 때, 본 연구에서 검토한 설계인자들의 범위에서는 패턴 1-a에서 홀 개구부의 높이를 5 mm로 했을 때 가장 우수한 열성능이 예상된다고 판단할 수 있다. 또한, 제작상의 관점에서, 성능의 큰 차이가 없다면 홀의 개구부가 일정한 방향으로 생성되어 있는 패턴 1-a가 홀의 개구 방향이 교차하는 패턴 3-a보다 가공이 용이할 것으로 사료된다.

4. 결 론

태양열 공기가열기 내부 흡열판에 일체형으로 가공한 홀의 패턴 및 형상의 변화에 따른 열전달 성능을 예측하기 위해 일련의 수치해석을 수행한 결과, 비교 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 단, 이하의 결론들은 본 연구에서 다른 태양열 공기가열기 모델에 관한 기하학적 형상과 수치의 범위, 그리고 검토된 작동조건의 범위에 한한다는 것을 명시한다.

- (1) 검토된 6종의 홀 패턴들 중에서는 패턴 1-a의 경우가 모든 경우에 출구 공기온도의 상승속도(천이작동 성능)가 가장 우수하다.
- (2) 홀 개구부의 높이를 설계변수로 고려하여 1.3 mm에서 10 mm 범위에서 각 홀 패턴에 대한 정상상태 성능을 출구 공기온도로 평가한 결과, 최적의 높이는 5 mm 부근에 존재하는 것으로 예측되었다.
- (3) 본 논문의 수치적 모델링 과정에서 이상화된 단열 및 균일 열유속 조건 등이 적용되었으나, 동일 조건에서 비교 검토한 홀 패턴과 홀 개구부 높이 선정에 대한 결론에

는 영향이 없을 것으로 판단된다. 실질적인 태양열 공기가열기 성능 예측을 위해서는 실제 제품의 구조와 작동조건을 보다 정밀하게 모델링한 수치모사로 실험치와 비교할 수 있는 연구가 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었습니다. (과제번호: 20139910100770)

Reference

1. Kumar, S. and Saini, R.P., CFD based performance analysis of a solar air heater duct provided with artificial roughness, *Renewable Energy*, Vol.34, pp. 1285~1291, 2009.
2. Yadav, A.S. and Bhagoria, J.L., A CFD based thermo-hydraulic performance analysis of an artificially roughened solar air heater having equilateral triangular sectioned rib roughness on the absorber plate, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol.70, pp. 1016~1039, 2014.
3. Karmare, S.V. and Tikekar, A.N., Analysis of fluid flow and heat transfer in a rib grit roughened surface solar air heater using CFD, *Solar Energy*, Vol. 84, pp. 409~417, 2010.
4. Karwa, R. and Chitoshiya, G., Performance study of solar air heater having V-down discrete ribs on absorber plate, *Energy*, Vol. 55, pp. 939~955, 2013.
5. Wu, J.M. and Tao, W.Q., Effect of longitudinal vortex generator on heat transfer in rectangular channels, *Applied Thermal Engineering*, Vol.37, pp. 67~72, 2012.
6. Skullong, S. and Promvong, P., Experimental investigation on turbulent convection in solar air heater channel fitted with delta winglet vortex generator, *Chinese J. of Chemical Engineering*, Vol.22, No.1, pp. 1~10, 2014.
7. Sun, W., Ji, J. and He, W., Influence of channel depth on the performance of solar air heaters, *Energy*, Vol.35, pp. 4201~4207, 2010.
8. Hu, J., Sun, X., Xu, J. and Li, Z., Numerical analysis of mechanical ventilation solar air collector with internal baffles, *Energy and Buildings*, Vol.62, pp. 230~238, 2013.
9. Ho, C.D., Chang, H., Wang, R.C. and Lin, C.S., Performance improvement of a double-pass solar air heater with fins and baffles under recycling operation, *Applied Energy*, Vol. 100, pp. 155~163, 2012.
10. Yang, M., Yang, X., Li, X., Wang, Z. and Wang, P., Design and optimization of a solar air heater with offset strip fin absorber plate, *Applied Energy*, Vol. 113, 1349~1362, 2014.
11. Fluent Inc., 1998, FLUENT 5 User's Guide, Vol.2, pp.9-18~9-20.