

태양열 집열면이 있는 4각 덕트 내의 열전달 특성에 관한 연구

고 동 국[†], 조 대 진, 윤 석 주*, 박 상 규**
전북대학교 대학원, *전북대학교 기계공학과, **우석대학교 자동차공학과

A Study on the Characteristics of Heat Transfer in Quadrangle Duct with Solar Absorber Plate

Dong-Guk Ko[†], Dae-Jin Cho, Suck-Ju Yoon*, Sang-Kyu Park**

Graduate School of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Chonju 664-14, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Chonju 664-14, Korea

**Department Automobile Engineering, Woosuk University, Wanju 490, Korea

(Received December 21, 2001; revision received October 4, 2002)

ABSTRACT: This paper analyzed the characteristics of heat transfer in quadrangle duct with absorber plate by solar radiation. Effects of Reynolds number on increasing temperature at outlet for variation of absorber plate temperature were analyzed by using numerical analysis technique. And also the effects of turbulent intensity of inlet flow on increasing temperature at outlet for various duct height and effects of inlet aspect ratio of quadrangle duct and position of heating surface on the outlet temperature were analysed. As the results, Outlet temperature was greatly influenced in low Reynolds number. And the highest outlet temperature distribution appeared on the inlet aspect ratio 2 because of the buoyancy effect.

Key words: Solar absorber plate(태양열 집열면), Flow analysis(유동분석), Quadrangle duct(4각 덕트), Buoyancy effect(부력효과), Aspect ratio(중횡비), Numerical analysis(수치해석), Air heating system(온풍발생장치), Heating surface(전열면)

기 호 설 명

A : 집열면적 [m^2]
 C : 공기 비열 [$J/kg \cdot K$]
 Gr : 태양복사강도 [W/m^2]
 H : 덕트 높이 [m, cm]
 K : 열전도도 [W/min]
 L : 덕트 길이 [m, cm]
 m' : 질량유량 [kg/min]

q' : 열유속 [W/m^2]
 Re : 유입공기의 레이놀즈수
 T_i : 유입공기온도 [$^{\circ}C, K$]
 T_o : 출구공기온도 [$^{\circ}C, K$]
 T_w : 집열면온도 [$^{\circ}C, K$]
 U : 유입공기의 평균속도 [m/s]
 U_i : 유입공기속도 [m/s]
 U_o : 출구공기속도 [m/s]
 W : 덕트 폭 [m, cm]

† Corresponding author

Tel.: +82-63-270-2324; fax: +82-63-270-2315

E-mail address: kdg2002@hanmail.net

그리스 문자

ρ : 공기밀도 [kg/m^3]

- η : 덕트 효율 [%]
 μ : 공기의 점성계수 [kg/m · s]
 μ_t : 공기의 난류점성계수 [kg/m · s]

하첨자

- i : x 방향의 좌표
 j : 3개(x, y, z)의 공간 좌표

1. 서 론

기계공업의 발달로 인하여 산업현장의 기계장치가 대형화, 고성능화 및 정밀화됨에 따라 유체 기계에 연결된 덕트 시스템의 최적설계에 대한 연구가 본격화되고 있다.

덕트 시스템의 최적설계는 장치효율, 안정성 및 경제성 등에 큰 영향을 끼치며, 기계의 효율적 운전과 덕트 시스템의 최적설계를 위한 기초자료로서 덕트 내의 유동 및 열전달 특성을 정확하게 규명하는 것이 필요하다.

이에 따라 덕트 내의 열전달 특성 및 향상에 관한 연구가 열교환기, 보일러, 가열기, 공기조화기, 전자부품냉각, 폐열회수 등 광범위한 분야에서 활발하게 이루어져 왔으며,⁽¹⁾ 이러한 향상기술 중 현재 많이 사용되는 방법으로 덕트 내 유동의 재순환(recirculation) 및 와류(vortex)를 생성시켜 유동의 혼합(mixing)을 왕성하게 하여 열전달을 향상시키기 위해 덕트 내 삽입물을 사용하는 방법과, 유동과 고체면이 접하는 접수면적(wetted area)을 증가시켜 열전달을 촉진시키기 위해 덕트 내측에 핀을 가공하거나 부착하는 방법 등이 있다.

최근 연구로 Ahn et al.⁽²⁾은 균일한 열유속을 2:1 직사각형 덕트의 하부에 가함으로써 부력에 의해 발생하는 추가적인 2차유동(secondary flow)이 유동 구조변화 및 열전달 향상에 미치는 영향을 연구하였다.

Misra et al.⁽³⁾은 밀폐된 벽면에서의 전도, 벽두께 및 케비티의 종횡비가 자연대류에 미치는 영향을 유한요소법을 이용하여 해석하였으며, Still et al.⁽⁴⁾은 작은 실린더 내에서의 대류 열전달에 대한 습도의 영향을 연구하였다.

또한 Sahoo et al.⁽⁵⁾은 divergence channel에서의 자연대류 유동을 연구하여 divergence chan-

nel의 유동구조는 프렌틀 수뿐만 아니라 semi-vertical angle에 대해서도 매우 중요한 영향을 받음을 입증하였다.

그러나 이와 같은 연구들은 밀폐공간 내에서 자연대류가 발생했을 경우 작은 열유속과 주위 온도차에 의해 발생하는 부력현상과 덕트 내의 2차유동에 의한 유동 특성에 관한 연구에 국한된 것으로서, 덕트 내의 강제대류에 따른 부력효과와 유로 단면형상이 유동구조 및 열전달 향상에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 덕트 내의 열전달 특성 및 향상을 위한 기초자료와 유입된 공기온도에 따른 덕트 출구에서의 최대 승온효과를 얻기 위한 최적의 설계조건을 도출하고자 개방공간으로서 4각 덕트를 선택하고, 수치적인 방법을 통해 출구 온도증가에 대한 유입 공기온도 및 난류강도, 그리고 레이놀즈수의 영향을 각각 덕트 높이와 집열면 온도변화에 따라 해석하였으며, 덕트 입구의 종횡비 및 집열면 위치변화가 출구 온도 분포에 미치는 영향을 고찰하고, 실험값과 비교·분석하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

직교 속도성분을 사용하는 3차원 정상상태의 덕트 내부 유동에 대한 지배방정식은 다음과 같다.⁽⁶⁻⁸⁾

연속방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \rho g_j \quad (2)$$

에너지방정식 :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial u_j \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

난류 운동에너지 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k U) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon \quad (4)$$

난류 운동에너지 소산율방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon U) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad} \epsilon \right] + C_{\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

난류점성계수(eddy viscosity) μ_t 는 다음과 같다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

본 연구에 사용된 표준 $k-\epsilon$ 모델의 모형 상수값은 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.00, \quad \sigma_\epsilon = 1.22, \\ C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92$$

2.2 해석적 방법 및 경계조건

유동해석에는 STAR-CD를 사용하였으며, 수치적 기법으로는 정상상태의 유동을 고려한 SIMPLE 알고리즘, 대류항 보간법으로는 상류차분법(UD), 난류모델로는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

해석상의 수렴조건은 모든 지배방정식에 대해 가장 큰 정규화된 잉여량을 0.001 이하로 설정하였으며, CPU 시간은 약 2 sec/iteration이었다. 유동실험과 비교하기 위해 작동유체는 공기로서 유입 공기온도와 속도는 각각 20°C, 5 m/s로 하였으며, 밀도는 1.205 kg/m³, 점성계수는 1.81 × 10⁻⁵ Pa·s를 사용하여 실험조건과 동일하도록 하고, 수렴성을 좋게 하기 위해 계산값들은 하향이완(under-relaxation)하였다.

덕트 입구에서의 난류강도와 혼합길이는 각각 유입 평균 유속의 5%와 집열면 폭의 10%를 사용하였다.⁽¹⁰⁾

$$k = 1.5 \times (U_i \times I)^2 \quad (7)$$

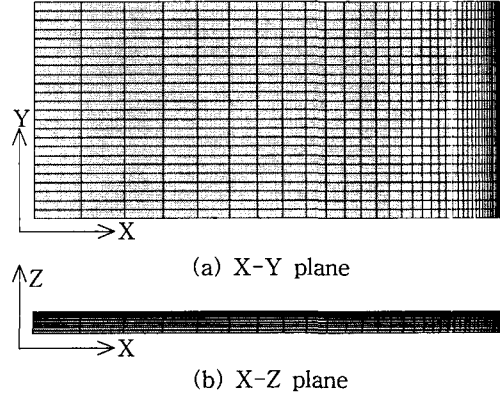


Fig. 1 Grid system of quadangle duct.

$$\epsilon = C_\mu^{0.75} \times \frac{k^{1.5}}{l} \quad (8)$$

여기에서, U_i 는 유입공기의 평균 속도이며, I 는 난류강도를 의미한다. 또한 C_μ 는 모형계수로서 0.09이고, k 는 난류에너지를 나타내며, l 은 특성 길이(characteristic length)이다.

집열면과 단열면 상층부 벽면에 대해서는 일반적으로 많이 사용되는 점착조건(no-slip condition)을 사용하였으며, 가열된 벽면에는 덕트의 축 방향으로 균일한 벽온도(constant wall temperature : 100°C)가 공급되며, 나머지 벽면들은 단열(adiabatic) 처리하였다.

Fig. 1은 수치계산을 위하여 사용한 4각 덕트의 격자계(45 × 24 × 12)를 보여주고 있다. (a)와 (b)는 각각 덕트의 평면도와 측면도를 나타내는데, 덕트 내로 유입되는 유입공기의 유동 특성 영향보다는 집열면 온도 및 대류의 영향이 크다고 판단하여 덕트 출구와 집열면에 조밀한 격자로 구성하였다.

3. 실험장치 및 방법

수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 실험장치를 구성하고, 실험을 수행하였다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 태양열 집열면을 갖는 4각 덕트에 의한 온풍발생장치의 개략도이다. 온풍발생장치는 실제 상용화된 태양열 온수기의 집열판 하부에 덕트를 설치한 것으로서 지열 영향을 배제하고, 공기유입시의 오염을 방지하기 위해 지면으로부터 500 mm에 유입구를 설

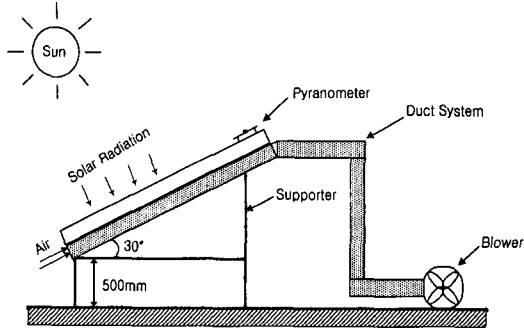


Fig. 2 Schematic experimental setup.

치하고, 태양열 온수기 설치규격에 따라 30° 경사로 고정하였다. 건조기 등에 유입되는 공기흐름을 모사하기 위하여 덕트 출구 쪽에 송풍기를 설치하고, 흡입된 공기가 덕트 내를 통과하면서 상부의 집열면에 의해 가열된 후 출구에 배출됨으로써 온풍이 발생하도록 하였다. 이때 집열면에서의 태양 복사강도를 측정하기 위하여 전천 일사량계를 사용하였다.

Fig. 3은 온풍발생장치의 집열면과 덕트의 상세도를 나타낸 그림이다. 온풍발생장치는 태양광을 투과하여 집열면으로부터의 대류 및 방사열 손실을 경감하는 투과체(4mm 저철분 강화유리)와 투과체를 통과하여 입사한 태양 복사에너지 흡수하여 열에너지로 변환시키는 집열면(2mm 블랙크롬 도금동판), 그리고 유입된 공기가 집열면 하부와 단열재 위면을 따라 흐르도록 높이 60mm로 이루어진 폭 1200mm, 길이 2400mm의 덕트 부분으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 태양

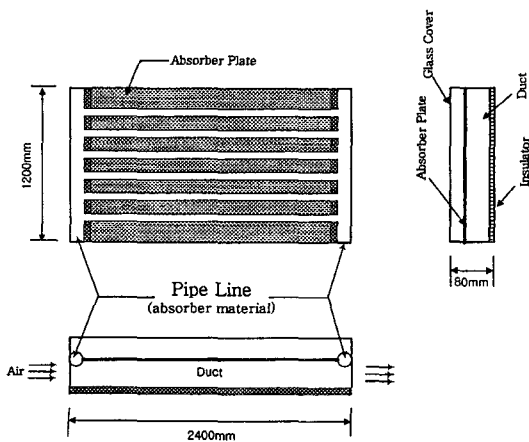


Fig. 3 Structure of air heating system.

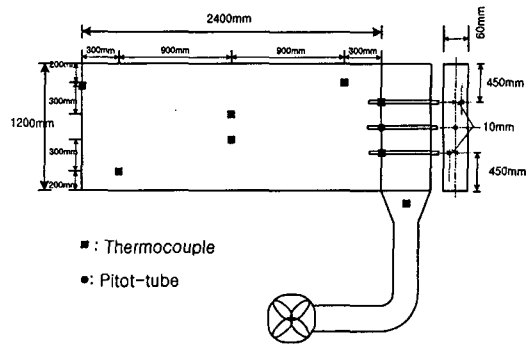


Fig. 4 Measuring position of air heating system.

열 온수기의 열매체 영향을 고려하지 않기 때문에 열매체가 들어가는 파이프라인 양 끝부분을 실링(sealing) 처리하여 외부로의 열손실을 방지하였다.

Fig. 4는 덕트의 태양열 집열면, 입·출구온도 및 출구속도의 측정위치를 나타낸 그림이다. 집열면 온도는 부착형 열전대를 사용하여 4곳에서 측정된 값들을 산술 평균하였으며, 공기의 유입온도와 출구온도는 막대형 열전대를 이용하여 측정하였다. 출구온도는 중앙으로부터 양쪽 상·하 20mm 높이위치에서 측정하여 평균값을 취했고, 피토크관을 사용하여 덕트 출구 중앙에서 공기속도를 측정하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 계산값과 실험값 비교

Fig. 5는 수치 계산값과 실험값을 비교한 그림이다. 측정일은 1999년 12월 23일과 2000년 3월 9일이고, 측정시간은 오전 10시 30분부터 오후 3시 30분까지 30분 간격으로 측정하였으며, 수치 계산은 측정된 값(Solar Angle 및 Solar Intensity 등)을 그대로 적용하여 수행하였다. 수치해석 결과는 실험값과 비교하여 전체시간에 대해 최대 오차율 8.3% 범위 내에서 잘 일치하였다. 그러나, 측정시간에 따른 출구 평균 온도분포가 불균일한 상태를 나타내는데, 이는 출구온도를 중앙으로부터 양쪽 상·하 20mm 위치에서 측정 후 산술평균하여 계산함으로써 발생된 오차라 판단되며, 출구온도는 덕트 출구로부터 유출되는 공기가 혼합되는 부분에서 측정함으로써 더욱 정확한 결과를 도출할 수 있으리라 사료된다.

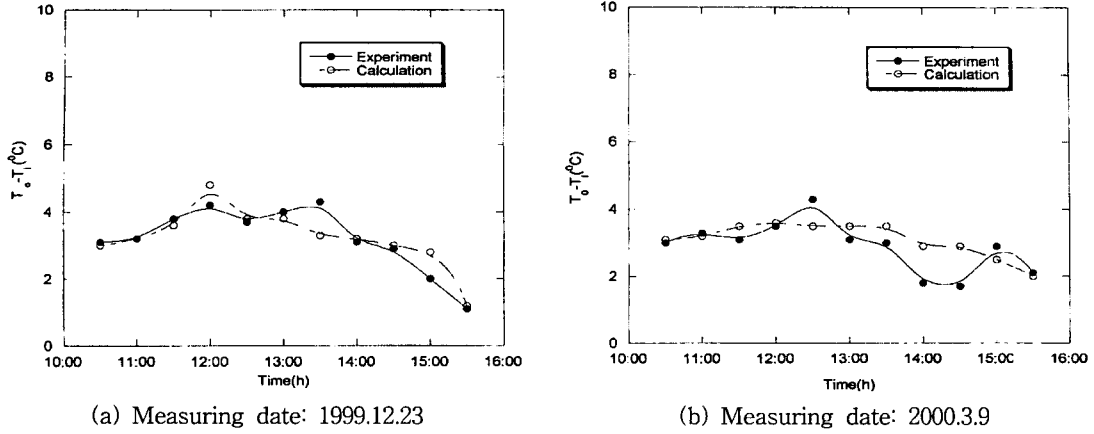


Fig. 5 Comparison of experiment and calculation (U_i : 5 m/s).

4.2 덕트 효율

Fig. 6은 본 연구를 위해 설계한 태양열 온풍 발생장치의 덕트 효율을 나타낸 그림이다. 측정일은 2000년 3월 9일과 2000년 8월 22일이며, 측정시간은 오전 11시부터 오후 4시까지 30분 간격으로 측정하였다. 측정결과로부터의 덕트 효율 계산은 다음의 식(9), (10)을 사용하였다.⁽¹¹⁾

$$\eta = \frac{Q}{Gr \cdot A} \tag{9}$$

$$Q = m' \cdot C \cdot (T_o - T_i) \tag{10}$$

3월의 일일 평균 효율은 28%이며, 8월은 24% 정도로 3월 중의 효율이 다소 높게 나타난 이유

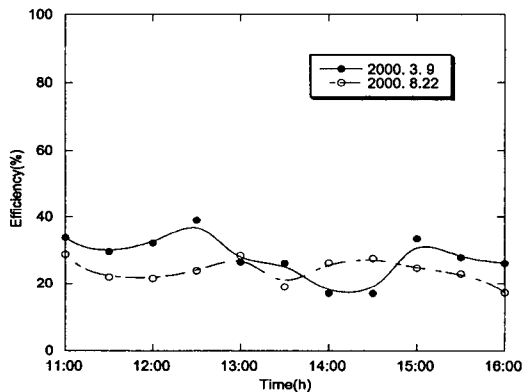


Fig. 6 Efficiency of duct versus standard day time (U_i : 5 m/s).

는 3월과 8월의 태양복사강도에 의한 집열면 평균 온도는 70°C 정도로 유사한 반면, 일일 평균 유입공기온도는 3월의 7.5°C가 8월의 31°C보다 낮고, 집열면에 의해 가열된 공기의 입·출구 온도차는 8월보다 3월이 더 크기 때문이다.

4.3 유입공기의 유동특성 영향

태양열 온풍발생장치의 덕트 출구 온도증가에 미치는 유입공기 유동조건에 영향을 수치해석적 방법을 사용하여 분석하였다.

4.3.1 유입 공기온도의 영향

집열면 온도를 일정하게 하였을 때 덕트에 유입되는 공기의 온도가 출구 온도증가에 미치는

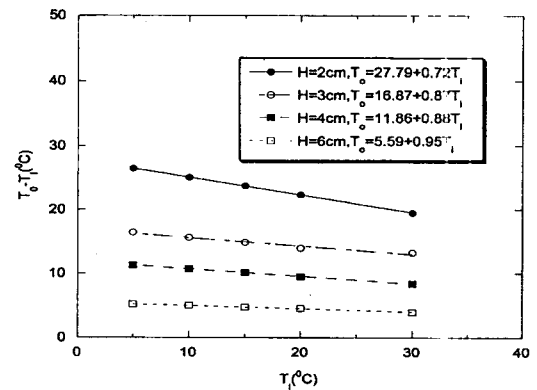


Fig. 7 Effect of inlet temperature on average increasing temperature at outlet for duct height (U_i : 5 m/s, T_w : 100°C).

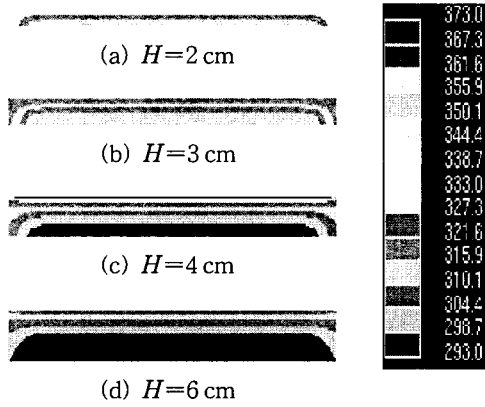


Fig. 8 Outlet temperature contours for duct height (U_i : 5 m/s, T_i : 20°C, T_w : 100°C).

영향을 분석하였다.

Fig. 7은 유입공기속도 5 m/s, 집열면온도 100°C로 일정하게 하였을 때, 유입공기온도 변화에 대한 출구 온도증가량을 덕트 높이에 따라 도시한 것이다. 출구 온도증가량은 유입공기온도 변화에 대하여 덕트 높이가 3, 4, 6 cm로 증가함에 따라 각각 16, 11, 4°C로 거의 일정한 경향을 보이지만, 2 cm로 작아지면 일정하지 않고 유입공기온도가 5°C일 때에는 28°C의 온도증가량을 보이는 반면, 30°C에서는 22°C로 감소하고 있다. 이 결과는 Fig. 6에서와 같이 유입공기온도가 증가하면 집열면과 상대온도차가 작아져서 실질적인 열전달량이 감소하기 때문이라고 판단되며, 결과적으로 덕트 효율은 감소할 것이다.

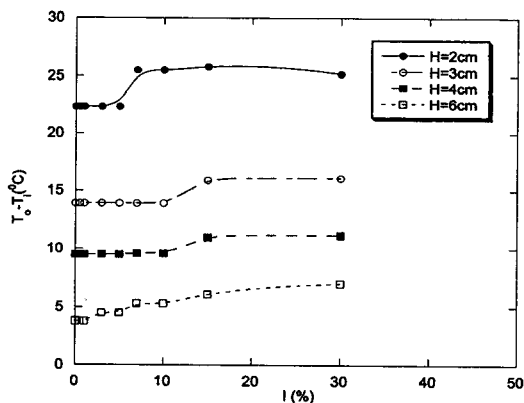


Fig. 9 Effect of turbulent intensity on average increasing temperature for duct height (U_i : 5 m/s, T_i : 20°C, T_w : 100°C).

Fig. 8은 유입공기속도 및 온도가 일정한 상태에서 덕트 높이 변화에 따른 출구에서의 온도분포의 수치해석 결과를 나타낸 그림이다. 덕트 높이가 2, 3 cm에서 집열면 온도는 덕트 하부면까지 전달되지만, 4, 6 cm일 경우에는 거의 전달되지 않는데 이는 덕트 높이가 증가할수록 온도분포의 성층화 현상이 더욱 크게 발생하여 덕트 상부의 집열면 온도가 덕트 하부까지 도달하지 못하기 때문이다. 따라서 덕트 높이가 클 경우 온도분포의 성층화 현상에 의한 온도분포의 균일성을 완화시키기 위한 방법으로서 덕트 내 유동의 재순환 및 와류와 같은 혼합특성을 향상시키는 보완장치가 필요하다고 사료된다.

4.3.2 난류강도의 영향

덕트 내 유동의 혼합을 왕성하게 함으로써 열전달 효과를 촉진시키기 위해 덕트 내로 유입되는 공기의 난류강도의 영향을 분석하였다.

Fig. 9는 유입공기속도 및 온도가 일정한 상태에서 출구 온도증가에 대한 유입공기의 난류강도 영향을 덕트 높이 변화에 따라 도시한 것이다.

출구 온도증가에 대한 난류강도의 영향은 덕트 높이가 증가할수록 줄어들음을 알 수 있다. 이와 같이 덕트 높이가 증가함에 따라 난류강도의 영향이 줄어드는 이유는 유입공기와 집열면으로부터 가열된 덕트 내 공기와의 혼합률이 덕트 높이가 작은 경우보다 상대적으로 작기 때문이라고 판단된다.

또한, 급격한 온도상승은 덕트 높이가 2 cm일

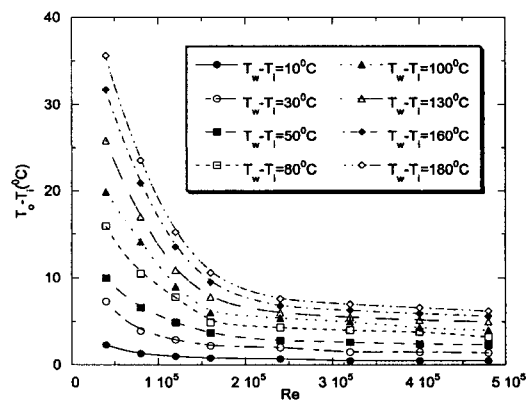


Fig. 10 Effect of Reynolds number on average increasing temperature for absorber plate temperature (T_i : 20°C).

경우 8%의 난류강도에서 발생되며, 3, 4, 6 cm에서는 15% 정도에서 나타난다. 이는 입계 난류강도 지점에서의 유입공기와 내부공기와의 교란 및 혼합률이 상대적으로 증가하여 열전달 및 확산효과가 상승하기 때문이라고 사료된다.

4.3.3 레이놀즈수의 영향

Fig. 10은 유입공기온도가 20℃인 상태에서 출구 온도증가에 대한 유입공기의 레이놀즈수 영향을 집열면 온도변화에 따라 도시한 것이다. 출구 온도상승은 저 레이놀즈수에 있어서 집열면 온도변화에 따라 크게 나타나는 반면, 고 레이놀즈수에 있어서 집열면 온도변화에 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 이는 일정 레이놀즈수(2×10^5)를 넘을 경우 집열면 온도에 의한 전열효과보다 유입공기속도 증가에 따른 냉각손실이 더욱 크게 작용하기 때문이라고 사료된다.

4.4 덕트 단면 형상변화의 영향

덕트 내의 열전달 효과를 증대시키기 위해 덕트 내에 구리재질의 플레이트-형 흡수기(plate-fin absorber)를 설치했을 경우, 덕트 단면 형상 및 경계조건 변화가 열전달 향상에 미치는 영향을 수치해석적인 방법을 통해 분석하였다.

4.4.1 덕트 입구 종횡비의 영향

Table 1은 덕트 입구 종횡비(H/W)에 따른 계산조건들을 나타내며, Fig. 11은 유입공기속도 5 m/s 및 벽면 전체의 열유속이 일정한 상태에서 덕트 입구 종횡비 변화에 따라 출구에서의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 덕트의 입구의 단면에서의 온도분포는 모든 종횡비 조건에서 일정한 분포를 나타내며, 종횡비 변화에 대한 영향을 거

Table 1 Operating conditions for aspect ratio (L=2.4 m)

H	W	Aspect ratio (H/W)
8 cm	4 cm	2.0
7 cm	5 cm	1.4
6 cm	6 cm	1.0
5 cm	7 cm	0.7
4 cm	8 cm	0.5

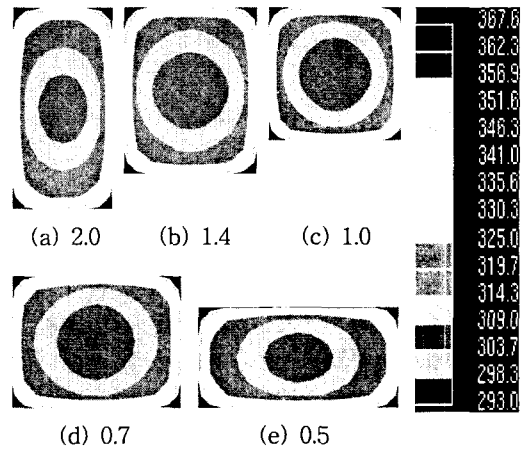


Fig. 11 Outlet temperature contours for aspect ratio ($U_i: 5 \text{ m/s}$, $T_i: 20^\circ\text{C}$, $q'': 790 \text{ W/m}^2$, heating surface: entirely).

의 받지 않음을 알 수 있다. 또한, 전 벽면에서의 균일한 열유속 조건에 의해 상·하 대칭적인 분포를 나타내었다.

가장 큰 출구 평균 온도는 종횡비 2인 경우(a)였으며, 종횡비 0.5인 경우(e)와 비교하여 0.2℃ 정도의 매우 작은 차이를 나타내었다.

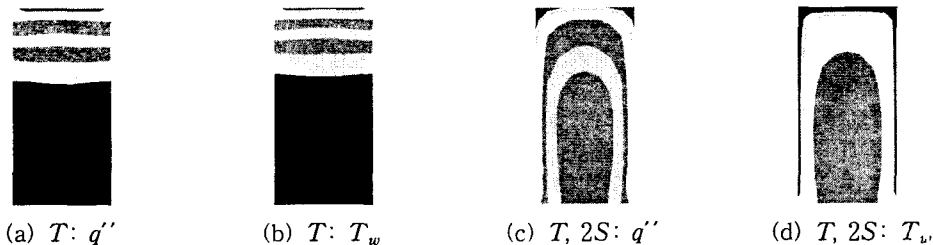


Fig. 12 Outlet temperature contours for the boundary condition and the position of heating surface at aspect ratio: 2.0 ($q'': 790 \text{ W/m}^2$, $U_i: 5 \text{ m/s}$, $T_i: 20^\circ\text{C}$, $T_w: 100^\circ\text{C}$, T: Top, S: Side).

4.4.2 경계조건의 영향

Fig. 12는 유입공기속도 5 m/s 및 종횡비 2로 하였을 때 경계조건 변화에 따른 출구에서의 온도분포를 나타낸 그림이다. 본 연구에 사용된 집열면이 덕트 상부에 있을 경우, 즉 덕트의 윗면에서만 열전달이 일어나는 경우, 온도분포의 성층화 현상이 발생되며, 경계조건이 일정 열유속 조건 또는 일정 온도조건일 경우 차이가 거의 없음을 알 수 있다(a)(b). 그러므로, 본 연구에서의 집열면 경계조건으로 덕트의 상면 등온조건을 적용한 것은 일정 열유속 조건에서의 결과와 동일할 것이라고 판단된다.

집열면에 흡수된 태양복사에너지는 전도에 의해 덕트의 양쪽 측면에 전달되는데, 본 연구에서는 상면과 양측면 모두가 같은 조건으로 가정하여 계산을 수행하였다. Fig. 12의 (c)와 (d)는 덕트의 세 면에서의 표면 등온조건과 일정 열유속 조건에 따라 출구단면에서의 온도분포를 나타낸 그림이다. 덕트 하부의 단열면과의 공기 밀도차로 인해 덕트 상부면으로 온도분포의 부차현상 및 부력효과가 형성된다. 또한, 온도구배는 일정한 열유속 경계조건에서 더 크게 발생하며, 경계조건이 표면 등온조건일 경우 출구 평균 온도가 더 크게 나타남을 알 수 있다.

5. 결 론

기존 실험모델을 제작, 실험을 수행하고, 수치 해석 기법을 사용하여 태양열 집열면이 있는 4각 덕트 내의 열전달 특성에 관한 연구를 수행하면서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 수치해석 결과는 실험값과 비교하여 전체 시간에 대해 최대 오차율 8.3% 범위 내에서 잘 일치하였다.

(2) 일일 평균 덕트 효율은 3월중의 효율값이 8월보다 4% 정도 높게 나타났다.

(3) 출구 온도증가는 덕트 높이 및 저 레이놀즈수에 크게 영향을 받는 반면, 유입공기온도 및 난류강도에는 적게 영향을 받았다.

(4) 덕트 단면 형상에 따른 가장 큰 출구 평균 온도는 덕트 입구의 종횡비가 2인 경우였으나, 출구에서 요구되는 온풍 온도를 만족시키기 위한 덕트 단면 형상과 위치의 적절한 조합이 필요함을 알 수 있었다.

본 연구에서는 경계조건을 단순화하여 적용하였으나, 경계면에서의 온도분포의 영향 및 덕트의 단면 형상 변화 등에 대한 지속적인 연구가 수행되어야 한다고 판단된다.

후 기

본 연구는 중소기업 기술혁신 개발사업의 일환으로 수행되었으며 시스템을 제공해 준 (주)한성정공에 사의를 표합니다.

참고문헌

1. Lee, S. C., 1999, The Current Status and the Prospects of Heat Transfer Enhancement Technology, Korean Society of Mechanical Engineers Journal, Vol. 39, No. 3, pp. 33-37.
2. Ahn, S. T., Sin, S. H. and Sohn, C. H., 1999, Numerical Analysis on Heat Transfer due to Buoyancy Force of Viscoelastic fluid, Korean Society of Computational Fluids Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 9-16.
3. Misra, D. and Sarker, A., 1997, Finite Element Analysis of Conjugate Natural Convection in A Square Enclosure with A Conducting Vertical Wall, Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, Vol. 141, No. 3-4, pp. 205-219.
4. Still, M., Venzke, H., Durst, F. and Melling, A., 1998, Influence of Humidity on the Convective Heat Transfer from Small Cylinders, Experiments in Fluids, Vol. 24, No. 2, pp. 141-150.
5. Sahoo, R. K. and Sastri, V. M. K., 1997, Numerical Investigation of Free Convection Flow in Divergent Channels, Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, Vol. 146, No. 1-2, pp. 31-41.
6. Anderson, J. D., Degrez, G., Dick, E. and Grundman, R., 1995, Computational Fluid Dynamics.
7. Versteeg, H. K. and Mallasekera, W., 1995, An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method.

8. Hoffman, Klaus A. and Chiang, Steve T., 1993, Computational Fluid Dynamics For Engineers, Vol. I : II.
9. STAR-CD Version 3.1 Manuals, 1999, Computational Dynamics Ltd.
10. Baek, K. W., Lee, S. H. and Cho, N. H., 2000, Numerical Optimization of the Coolant Flow Rates through cylinder Head Gasket Holes by applying CFD Techniques, Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 8, No. 5, pp. 121-128.
11. Lunde, Peter J., 1979, Solar Thermal Engineering (Space Heating and Hot Water System).