

(技術論文)

# 비대칭적으로 가열된 유한 수직덕트내 유동의 혼합대류에 관한 연구

백병준\* · B.F. Armaly\*\*

(1991년 8월 10일 접수)

## Mixed Convection in an Asymmetrically Heated Vertical Parallel-Plate of Finite Length Duct Flow

Byung-Joon Baek and B.F. Armaly

**Key Words :** Mixed Convection(혼합대류), Buoyancy Parameter(부력인자), Starved Flow(희박유동), Penetration Depth(투입깊이), LDV(레이저 도플러 유속계), Recirculation Region(재순환 영역)

### Abstract

Measurements and predictions of mixed convection air flow in asymmetrically heated vertical parallel-plate of finite length duct, having unequal but uniform wall temperatures, are reported. Velocity distributions are measured and flow visualizations are employed to examine the nature of the flow as the buoyancy effects are enhanced by increasing either the temperature difference between the walls or by decreasing the forced flow velocity. The velocity distribution skews toward the heated wall and a flow reversal develops adjacent to the cold wall as the buoyancy forces increase. Criteria marking the onset of the reversed flow and the transition from laminar to turbulent flow are reported for increasing asymmetric heating, spacing between the walls, and forced flow velocities in the duct. Numerical prediction of velocity distributions compare well with experimental results. Numerical predictions of temperature distributions and heat transfer are presented to illustrate the effects of buoyancy on these parameters.

### 기 호 설 명

$b$	: 덕트간격	$S$	: $b/L$ , 무차원 덕트간격
$C_p$	: 정압비열	$T$	: 유체의 온도
$g$	: 중력가속도	$T_0$	: 입구에서의 유체온도
$Gr_b$	: $g\beta(T_1 - T_0)b^3/\nu^2$ , Grashof number based on $b$	$T_1$	: 가열부 평판온도
$L$	: 덕트길이	$T_2$	: 냉각부 평판온도
$N_x$	: 유동방향 격자수	$u$	: 유동방향 속도성분
$N_y$	: 수직방향 격자수	$u_0$	: 덕트입구에서의 유동방향 속도성분
$P$	: 압력	$v$	: 유동방향과 수직인 속도성분
$Re_b$	: $U_0b/\nu$ , 레이놀즈수	$x$	: 유동방향 좌표
		$x_d$	: 투입깊이
		$x_h$	: 투입높이 ( $x_h = L - x_d$ )
		$y$	: 수직방향 좌표
		$z$	: 덕트의 폭방향좌표

\* 정회원, 전북대학교 공과대 정밀기계공학과

\*\* Univ. of Missouri-Rolla

- $\beta$  : 열팽창계수  
 $k$  : 열전도도  
 $\rho$  : 밀도  
 $\theta$  :  $(T - T_0)/(T_1 - T_0)$ , 무차원온도  
 $\mu$  : 점성계수

## 1. 서 론

가열된 두평판사이의 대류 열전달 문제는 전자장치 및 각종 열교환기등 공학적 설계와 관련하여 많은 관심을 끌고있다. 두평판은 대칭<sup>(1,2)</sup> 또는 비대칭<sup>(3,4)</sup>적으로 가열되었으며 강제대류, 자연대류 또는 혼합대류 열전달<sup>(5,6)</sup>문제가 보고되고 있다. 또한 기하학적 형상은 수평<sup>(7,8)</sup>, 경사평판<sup>(9,10)</sup> 또는 수직으로 되어 있으며 유체 유동은 층류 또는 난류에 관한 연구등이 수행되고 있다. 이상의 기하학적 형상 또는 유동 조건에 따라 열전달 결과는 많은 차이를 보이며 또한 그 결과를 정확히 예측할 수 있는 방법이 공학적 설계를 위해 요구되고 있다. 기발표된 결과들은 대부분이 무한평판의 해석적인 고찰이 주를 이루며 부력의 효과가 클경우 비대칭 가열에 의한 역류현상을 예측하지 못하였다. Sparrow등<sup>(11)</sup>과 Fukui 등<sup>(12)</sup>이 유한평판의 경우에 이 역류현상을 실험적용 관찰한 바 있으나 그 역류유동의 속도분포, 발생시점 및 현상에 관한 다각적인 분석이 요구된다.

본 연구에서는 유한 길이를 갖는 수직 덕트내 공기 유동의 속도 분포를 LDV를 사용하여 측정하며 유동 특성에 미치는 가열정도, 덕트간격 및 입구속도등의 영향을 보고하고자 한다. 또한 속도분포, 온도분포 및 열전달에 미치는 부력의 영향을 수치적으로 예측하여 그 타당성을 검증하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험은 Fig. 1에 도시된 수직, 저난류, 개 회로, 공기풍동을 사용하여 수행되었다. 풍동의 시험부는 레이저 빔이 통과할 수 있도록 plexiglass로 제작되었으며 그 시험부 내부에 2차원 사각 덕트를 설치하여 가변 송풍기의 속도 및 입구 유량을 조절함으로써 입구속도가 0.1~1.3m/s 범위가 되도록 하였다.

2차원 덕트는 2개의 알루미늄판(27.62cm × 106.68cm × 2.54cm)으로 구성되었으며 각각의 판

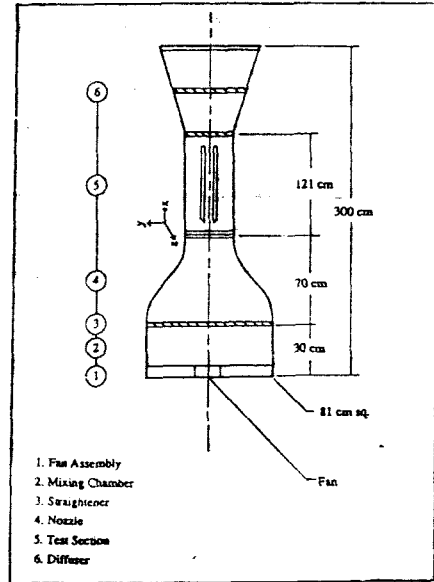


Fig. 1 Schematic diagram of air tunnel

에는 12개의 열전대(copper-constantan)에 의해 평판의 등온상태를 살필 수 있도록 하였다. 평판은 뒷면에 설치된 6개의 가열판에 공급된 전기에 의해 가열되며 각각의 6개의 열판에는 서로 독립된 가감 저항기(rheostat)로부터 전원이 공급되어 전표면이 등온이 되도록한다. 덕트의 다른 한면은 항온조로부터 공급된 물이 순환하도록 가공하여 등온인 냉각면을 이룬다. 사용된 덕트의 각격은 1.91cm, 3.18cm, 4.13cm로 한다. 덕트내의 속도분포는 후향산란형 레이저 도플러 속도계(LDV)를 사용하여 측정하였다. 산란된 도플러 신호는 카운터와 PDP 11/23컴퓨터에 의해 처리, 분석되었으며 측정체적에는 공기와 혼합된 글리세린 입자를 공급함으로써 빛을 산란하도록 한다. 유동특성은 15와트, 직경 2.5cm 평행 백색광을 사용하여 관찰하였다.

## 3. 이론해석

실험과 동일한 조건을 사용하여 유동장 및 온도장의 분포상황을 수치적방법을 통해 구하였다. 지배방정식은 역류유동을 구명할 수 있는 타원형 편미분 방정식이며 그 유동은 2차원, 층류, 정상상태로 가정한다. 물성치들은  $(T_1 + T_2)/2$  온도에서 구한 일정치를 사용하였다.

지배 방정식들은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ &+ \rho g \beta (T - T_0) \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho C_p \mu T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_p \nu T)}{\partial y} \\ &= k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \tag{4}$$

적용된 경계조건은 다음과 같다.

$$x=0, y=0 \quad : \quad u=v=0, \quad T=T_2=T_0 \tag{5}$$

$$x=0, y=b \quad : \quad u=v=0, \quad T=T_1 \tag{6}$$

$$x=0, 0 < y < b \quad : \quad u=u_0, \quad v=0, \quad T=T_0 \tag{7}$$

$$\begin{aligned} x=L, 0 < y < b \quad : \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \end{aligned} \tag{8}$$

위 방정식들의 해는 SIMPLE기법을 도입하여 유한차분법을 사용한 TEACH 코드를 수정하여 구하였다. 계산을 반복할 때마다 먼저 운동량 방정식을 계산한 후 부력항에 포함된 온도를 에너지방정식에 의해 수정한다. 해의 수렴은 전체계산 영역의 표준화된 오차의 합이 0.005보다 작을때 만족된 것으로 하였다. 계산 영역의 격자들의 분포는 속도 구배가 큰 영역 및 속도의 방향이 바뀌는 부근에서 조밀하도록 구성하였으며 이를 위해 실험적인 관찰 및 등간격 격자를 사용한 예비계산으로서 이들을 결정하도록 하였다. 사용된 매개변수하에서 격자의 밀도  $N_x \times N_y = 90 \times 50$ 가 격자의 구성에 무관한 해를 구하는데 충분하였으며 수렴된 해를 구하는데 300~500회 반복계산을 필요하였다. 계산은 IBM 4381 Model Group 14 및 FPS-164 컴퓨터에 의해 수행되었다.

4. 결과 및 고찰

2차원 유동을 확인하기 위해 두 평판간격의 중심에서 넓이 방향(z 방향)으로 유동방향 속도를 측

정하였다. 이속도 분포는 평판 넓이의 80% 영역까지 동일한 속도를 보이고 있다. 평판의 양끝 부근에서는 풍동벽면의 영향을 받아 속도의 구배가 있으나 대부분의 영역에서는 2차원 유동 상황을 보인다. 실제 실험의 덕트내 속도분포는 평판 폭의 중심(z=0)부에서 측정되었다.

수직 덕트에서의 유동방향 속도(u)의 측정치 및 수치결과를 Fig. 2에서 Fig. 5까지 나타내었다. 속도 측정은 3차원 이송기 위의 LDV를 시편의 입구로부터 x=20.3, 47.0, 81.3, 102.9cm 위치에서 각각 횡방향(y)을 따라 1mm 간격으로 이송시켜 측정된 결과이며 비대칭 가열 조건에 따른 속도분포를 보여주고 있다.

Fig. 2에서는 입구속도 0.42m/s 일때 비가열 조건하에서의 속도 분포를 나타낸다. 유동이 덕트의 길이 방향으로 진행됨에 따라 완전히 발달하는 과정을 보여주며 x=102.9cm에서 포물선 속도 분포로 성장됨을 볼 수 있다. 실선으로 표시된 수치해 또한 실험 결과와 잘 일치됨을 알 수 있다. 이상의 결과들로서 유동상태에 미치는 비대칭 가열 조건의

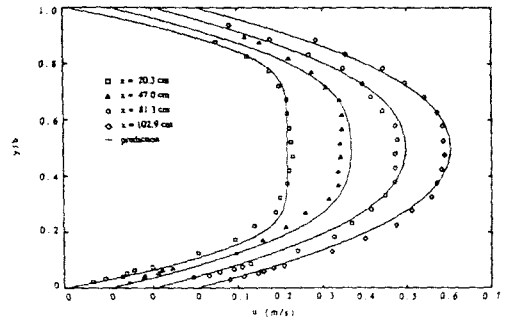


Fig. 2 Velocity distribution for  $Re_b=852$  and  $Gr_b=0$

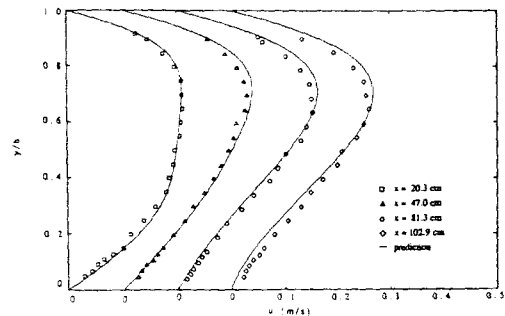


Fig. 3 Velocity distribution for  $Re_b=305$  and  $Gr_b=2.25 \times 10^4$

영향을 살피는데 실험장치 및 수치계산 방법의 타당성을 인정할 수 있다. 비대칭 가열조건하에서는 유동이 진행됨에 따라 고온 벽면에 가까운 유체는 가속되기 때문에 속도 분포가 고온 벽면쪽을 향하여 기울어진 형상을 보이며 Fig. 3과 같이 부력의 영향이 증가함에 따라 고온부에서의 점진적인 가속 유동은 질량보존을 만족시키기 위해 저온부에서의 점진적인 감속 유동을 유발시킨다.

입구에서 유입유량을 제한하며 (starved flow) 비대칭 가열을 증가시키기에 따라 입구로부터 어떤 거리에 도달하면 부력에 의해 가속된 질량 유동은 입구에서 유입된 질량 유동 보다 크게 된다. 이때에는 부가적인 유동이 형성되는데 입구에서의 유입은 제한이 되어 있으므로 통상 덕트의 출구로부터 질량 보존을 만족시킬 만큼의 질량 유동이 공급된다. Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 이 부가적인 유동은 출구부근에서 시작하여 저온부 벽면을 따라 역류하여 일정거리(투입깊이)에 도달됨을 알 수 있다. 가열이 증가됨에 따라 이역류의 투입깊이( $x_d$ )

는 증가하여 임계 가열량( $Gr_b/(S^{1.7}Re_b^2) \approx 1500$ )에 이르면 그 최대값에 도달하게 된다. 가열량을 이 임계 가열량보다 증가 할지라도 투입깊이( $x_d$ )는 일정한 값을 유지하는 반면 출구로부터의 역류는 형성되지 않고 난류의 현상이 나타나기 시작한다. 이때 입구측의 층류 유동과 출구측의 난류유동 사이에서는 천이혼합유동을 나타내는 불안정한 3차원 유동의재순환 영역(recirculation region)이 형성되었다. 이 재순환 영역 하류에서 성장되는 난류유동에서는 난류 유동의 혼합유동에 의해 역류가 나타나지 않는다.

Fig. 5의 실험 결과에서 보이는 바와 같이  $x=20.3\text{cm}$ 와  $x=81.3\text{cm}$ 사이에서 재순환 영역이 존재하며 역류 현상이 사라진 난류 유동이 성장되기 시작함을 알 수 있으며 2차원 층류 유동을 예측할 수 있었던 수치적 결과가 3차원 유동 및 난류유동에 기인하여 현저한 편이를 보이고 있다. 부력의 효과가 클 경우 즉  $Gr_b/(Re_b)^2 > 0.8$ 에서는 새로운 차원의 수치적 해석이 요구됨을 보이고 있다.

온도 분포 및 열전달에 관한 실험적인 확인은 수행되지 못하였으나, 속도와 온도가 서로 연관된 (coupled) 방정식에서 속도 분포를 정확히 예측할 수 있었던 수치적 방법을 온도 및 열전달에 미치는 부력의 효과를 예측하기 위하여 사용하였다. 여러 유동방향( $x$ )위치에 따른 무차원 온도 분포를 Fig. 6에 제시하였다.

이 온도 분포는 유동이 진행됨에 따라 균일 입구 온도( $\theta=0$ )로부터 평균의 길이가 충분히 길때 도

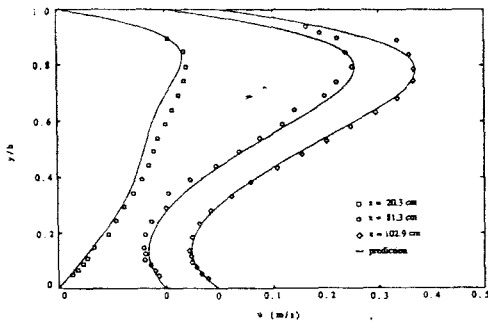


Fig. 4 Velocity distribution for  $Re_b=285$  and  $Gr_b=6.36 \times 10^4$

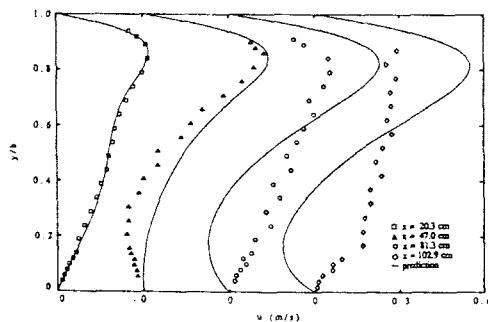


Fig. 5 Velocity distribution for  $Re_b=350$  and  $Gr_b=1.21 \times 10^5$

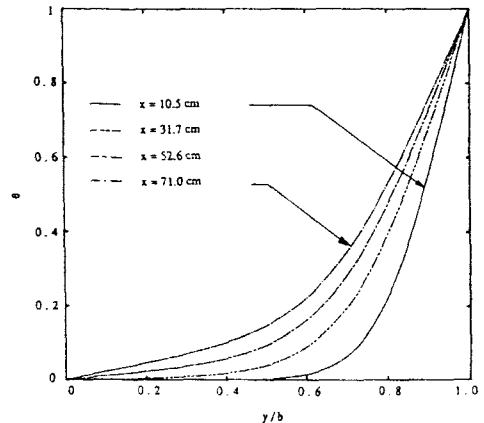


Fig. 6 Temperature distribution for  $Re_b=285$  and  $Gr_b=6.36 \times 10^4$

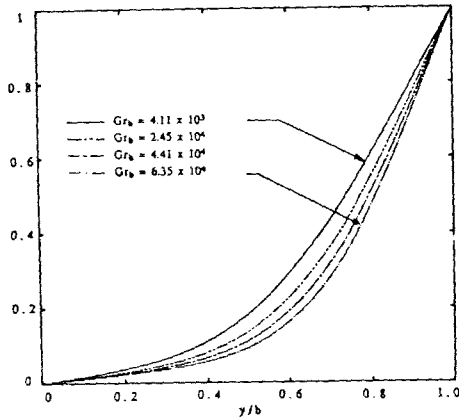


Fig. 7 Effects of buoyancy on the temperature distribution at  $x/L=0.5$  for  $Re_b=285$

달릴 수 있는 선형온도 분포를 향하여 성장되고 있음을 보여준다. 또한 가열평판에서의 열전달( $\partial\theta/\partial y|_{y=1}$ )은 유동이 진행됨에 따라 감소하며 냉각평판( $y/b=0$ )에서는 증가하는 경향을 보여주고 있다.  $x/L=0.5$  위치에서 온도 분포에 미치는 부력의 효과를 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림은 두 평판간의 온도차가 증가할수록(부력이 증가할수록) 온도구배(열전달률)가 가열평판에서 증가한 반면 냉각부( $y/b=0$ )에서는 감소함을 보여주고 있다.

유동의 가시화를 통해 역류의 개시점과 그 투입 길이를 비대칭 가열정도, 두평판 간격 및 입구의 속도 함수로서 표시하였다. 고정된 속도와 두평판 간격에 대해 투입길이  $x_d$ 는 비대칭 가열정도가 증가할수록 증가하였다. 또한 입구 속도와 비대칭 가열정도를 일정하게 유지하였을때 투입길이  $x_d$ 는 두평판의 간격이 증가할수록 증가하였다. Fig. 8에는 덕트의 입구로부터 측정된 투입높이와 수치적으로 예측한 투입높이의 비교를 나타내고 있는데  $x_h/L > 0.3$ (또는  $x_d/L < 0.7$ )인 범위에서는 실험적으로 측정된 값이 예측한바와 잘 일치함을 보이나 그 외의 영역에서는 많은 편이를 보이고 있다. 이는  $x_h/L > 0.3$  일때는 유동이 부력의 정도가 낮은 층류 유동인 반면  $x_h/L > 0.3$ 에서는 유동이 층류로부터 난류유동으로의 천이영역이 발생하기 시작하며 또한 실험적으로 확인된 3차원 재순환 영역을 형성하기 때문에 2차원 층류유동을 가정한 수치적 예측과 차이를 보임을 알 수 있다.

이 측정치 및 예측 결과를 사용하여 투입높이에

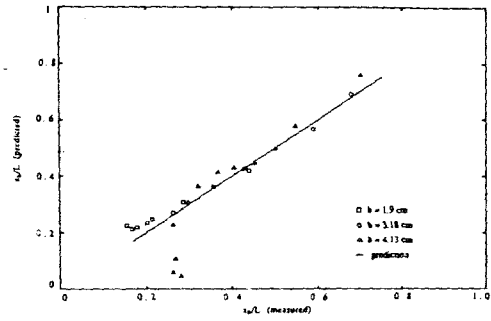


Fig. 8 Measured and predicted penetration height of the reversed flow

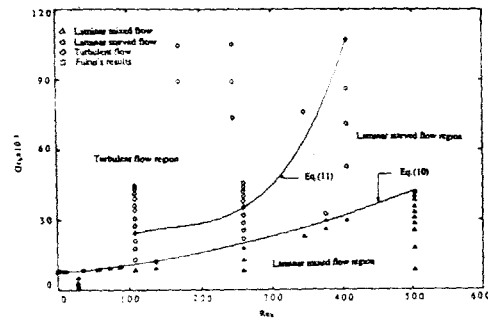


Fig. 9 Regions of laminar mixed, laminar started, and turbulent flows

대한 상관 관계식을 비대칭 가열정도, 평판 간격, 입구 속도의 함수로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_h/L = 26.4(S - 0.0283) + 0.95e^{-1.11(Gr_b/Re_b^2)} \quad (9)$$

이 관계식은 층류 영역  $Gr_b/(Re_b)^2 < 0.7$ 인 범위에서 실험 및 수치적 결과가 5%이내의 오차로서 투입높이를 예측할 수 있으며, 측정된 투입높이,  $x_h/L$ , 역시  $Gr_b/(S^{1.7}Re_b^2)$ 의 함수로서 표시될 수 있는데 이 무차원수들은 실험적(경험적)으로 층류 및 난류 유동영역의 특성을 설명하기 위해 도입되었다.  $Gr_b/(S^{1.7}Re_b^2) < 400$ 인 범위에서는 유동은 층류 유동을 유지하며 이때의 투입 길이는 식(9)로서 나타낼 수 있으며 이 범위 이상에서 유동은 층류로부터 난류로 천이를 시작하여 투입 길이는 비대칭 정도에 무관하게 되어  $Gr_b/(S^{1.7}Re_b^2) > 1500$ 일때  $x_h/L = 0.18$ (또는  $x_h/L = 0.82$ )로 도달한다.

덕트의 비가열판을 따라 출구측으로부터 흘러들어오는 역류가 형성되기 시작하는 개시점을 측정하기 위해 유동의 가시화 방법을 여러 조건 하에서 수행하였다. 또한 역류가 더이상 형성되지 않고 재순환 영역이 시작되는 점(층류유동으로부터 난류유동으로의 천이 시작)이 관찰되었다. 이 결과들이 Fig. 9에 표시한 바와 같이 요약된다.

이 그림은 3가지 서로 다른 유동 영역을 표시한다. 첫번째 영역은 어떠한 역류도 형성되지 않는 순수한 층류 영역이다. 이 영역은 매우 낮은 순부력 혼합 대류영역을 나타낸다. 이 영역은 실험적으로

$$Gr_b \leq 7630 + 24.1 Re_b + 9.07 \times 10^{-2} Re_b^2 \quad (10)$$

일때 나타난다. 두번째 영역은 입구에서의 유입 유량을 제한함으로써 부력의 효과를 크게 하였을때 형성되는 회박 층류유동(laminar starved flow) 영역이다. 이 영역에서는 고온부에서 가속되는 유량을 보충하기 위해 비가열판을 따라 출구측으로부터 역류가 형성되는 영역이다. 역류의 투입 길이는 부력의 영향이 커질수록 증가한다. 2차원 층류 유동 모델이 실험치와 잘 일치함을 보이는 영역이다. 이 유동 영역은 부력이 계속 증가하여 재순환 영역이 형성(층류유동에서 난류유동으로의 천이 시작)될 때 소멸되어 출구측으로부터의 역류는 더이상 나타나지 않고 출구측에서 서서히 난류의 난류의 영향이 증가한다. 세번째 영역인 난류 유동 영역은

$$Gr_b \geq 427 Re_b - 2.4 (Re_b)^2 + 4.93 \times 10^{-3} (Re_b)^3 \quad (11)$$

이 만족될 때 형성된다. 이 3유동 영역은 Fig. 9에서와 같이 식(10)과 식(11)에 의해 구분된다. 역류가 형성되는 회박 층류 유동 영역은 두 식(10)과 식(11)에 의해 경계지워지며 Fukui 등<sup>(7)</sup>의 결과는 본 결과의 제한된 부분에서 잘 일치됨을 보여주고 있다. 단 이 상관 관계식의 사용은 실제 수행된 실험 인자의 범위에 제한된다. 난류 유동 영역에서의 재순환 영역의 크기는 벽면 간격과 비대칭 가열 정도가 증가됨에 따라 감소하며 입구 속도가 증가될수록 감소한다. 비대칭 가열 정도가 증가됨에 따라 재순환 영역의 하측 선단은 일정하게 유지되나 상측 선단이 하측으로 이동하여 재순환 영역은 유동

이 완전히 난류로 발달되었을 때 소멸된다.

## 5. 결 론

비대칭적으로 가열된 수직 덕트내의 혼합 대류의 특성이 여러 실험 인자에 따라 보고되었다. 비대칭 가열 정도에 따라 층류 혼합유동(laminar mixed flow), 역류유동이 형성되는 회박층류유동(laminar starved flow), 3차원 재순환 및 난류유동이 확인되었으며 2차원 층류 유동을 모델로 한 수치적 결과가 실험적으로 측정된 속도 분포와 잘 일치하며 역류가 형성되는 회박 층류유동 개시점을 정확히 예측할 수 있다.

회박 층류유동의 개시점, 역류의 투입길이 및 난류유동 영역의 개시점을 예측할 수 있는 상관 관계식이 제시되었다. 수행된 실험 인자 범위에서 2차원 층류유동을 모델로 한 수치적인 해는  $Gr_b / (St^{1.7} Re_b^2) > 400$ 일 경우에 실제유동이 난류유동으로의 천이가 일어나기 때문에 실험 결과와 편이를 일으키기 시작하며 이 천이를 나타내는 재순환 영역의 하측 선단의 길이는  $Gr_b / (St^{1.7} Re_b^2) > 1500$ 일 때  $x_n/L=0.8$ 의 값을 유지한다. 이 재순환 영역의 크기는 두 벽면의 간격과 비대칭 정도가 증가할수록 감소하나, 입구 속도가 증가할수록 증가함을 보이고 있다.

## 참 고 문 헌

- (1) Aung, W., Fletcher, L.S. and Sernas, V., 1972, "Developing Laminar Free Convection between Flat Plates with Asymmetric Heating," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.15, pp.2293 ~2308.
- (2) Azevedo, L.F.A. and Sparrow, E.M., 1985, "Natural Convection in Open Ended Inclined Channels," ASME Journal of Heat Transfer, Vol.107, pp.893 ~901.
- (3) Beckett, P.M. and Friend, I.E., 1982, "Combined Natural and Forced Convection Between Parallel Walls; Developing Flow at Higher Rayleigh Numbers," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 27, pp.611 ~621.
- (4) Bodoia, J.R. and Osterle, J.F., 1962, "The Development of Free Convection Between Heated Vertical Plates," ASME Journal of Heat Transfer, Vol.84, pp. 40 ~44.

- (5) Cebeci, T., Khattab, A.A. and Lamont, R., 1982, "Combined Natural and Forced Convection in Vertical Ducts," *Heat Transfer* 82, *Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference, Munich, West Germany*, Vol.3, pp.419~424.
- (6) Emery, A.F. and Gessner, F.B., 1976, "The Numerical Prediction of Turbulent Flow and Heat Transfer in the Entrance Region of a Parallel Plate Duct," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol.98, pp.594~600.
- (7) Fukui, K., Nakajima, M., Ueda, H. and Mizushima, T., 1982, "Flow Instability and Transport Phenomena in Combined Free and Forced Convection Between Vertical Parallel Plates," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol.15, pp.172~180.
- (8) Kamotani, Y. and Ostrach, S., 1976, "Effect of Thermal Instability on Thermally Developing Laminar Channel Flow," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol.98, pp.62~66.
- (9) Ou, J., Cheng, K.C. and Lin, R., 1976, "Combined Free and Forced Laminar Convection in Inclined Rectangular Channels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.19, pp.277~283.
- (10) Quintiere, J. and Mueller, W.K., 1973, "An Analysis of Laminar Free and Forced Convection Between Finite Vertical Parallel Plates," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol.95, pp.53~59.
- (11) Sparrow, E.M., Chrysler, G.M. and Azevedo, L.F., 1984, "Observed Flow Reversals and Measured-Predicted Nusselt Numbers for Natural Convection in a One-Sided Heated Vertical Channel," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol.106, pp.325~332.
- (12) Wirtz, R.A. and Stutzman, R.J., 1982, "Experiments on Free Convection Between Vertical Plates with Symmetric Heating," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol.104, pp.501~507.
- (13) Yao, L.S., 1983, "Free and Forced Convection in the Entry Region of a Heated Vertical Channel," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 26, pp.65~72.