

〈論 文〉

수직으로 놓인 후향계 단위를 흐르는 유체유동에 미치는 부력의 영향에 관한 연구

백병준* · 박복춘** · 김진택***

(1992년 10월 10일 접수)

Buoyancy-Affected Separated Laminar Flow over a Vertically Located, Two-Dimensional Backward-Facing Step

Byung Joon Baek, Bockchoon Pak and Jin Taek Kim

Key Words : Mixed Convection(혼합대류), Buoyancy Effect(부력효과), Reattachment Length(재부착 길이), Separation(박리), Recirculation Region(재순환 영역), LDV(레이저 도플러 유속계)

Abstract

Numerical analysis and measurements of the velocity and temperature distributions in buoyancy assisting laminar mixed convection flow over a vertically located, two-dimensional backward-facing step are reported. Laser-Doppler Velocimeter and Constant Temperature Anemometer operated in constant current were used to measure simultaneously the velocity and temperature distributions in the recirculation region downstream of the step. The reattachment length was measured by using flow visualization technique for different inlet velocities, wall temperatures and step heights. While the reattachment length X_r increases as the inlet velocity or step height increase, it decreases as the buoyancy force increases, causing the size of the recirculation region to decrease. For the experimental range of $Gr_s/Re_s^2 \times 10^3 < 17$, a correlation equation for the reattachment length can be given by $X_r = 1.05(2.13 + 0.021 Re_s) \exp(-33.7 s^{-0.186} Gr_s/Re_s^2)$. The Nusselt number is found to increase and the location of its maximum value moves closer to the step as the buoyancy force increases. The location of the maximum Nusselt number occurs downstream of the reattachment point, and distance between the reattachment point and the location of the maximum Nusselt number increases as the buoyancy force increases. Computational prediction agrees favorably well with measured results.

기 호 설 명

C_f : 표면마찰계수 ($C_f = \tau_w / \frac{1}{2} \rho u_0^2$)

g : 중력가속도

Gr_s : Grashof수 ($= g\beta(T_w - T_o) \frac{s^3}{\nu^2}$)

h : 열전달계수 ($= -\frac{(k\partial T/\partial y)_{y=0}}{T_w - T_o}$)

H : 계산영역의 높이

Nu_s : Nusselt수 ($Nu_s = hs/T$)

L : 계산영역의 길이

L_s : 계단의 입구길이

Re_s : Reynolds수 ($= \frac{u_o \cdot s}{\nu}$)

*정회원, 전북대학교 정밀기계공학과

**정회원, 전북대학교 기계설계학과

***전북대학교 정밀기계공학과 대학원

- s : 계단높이
 T : 온도
 T_o : 계단입구의 공기온도
 T_w : 가열벽면온도
 ΔT : $T_w - T_o$
 u, v : x, y 방향속도 성분
 x : 주유동방향 좌표
 y : 유동의 수직방향 좌표
 z : 폭방향 좌표
 x_n : 극대 Nusselt 수 위치
 X_n : $(x_n - L_s)/s$
 X : $(x - L_s)/s$
 x_r : 재부착길이
 X_r : $(x_r - L_s)/s$
 Y : $(y - s)/s$
 β : 체적팽창계수
 k : 열전도도
 ν : 동점성계수
 ρ : 유체밀도
 θ : $\frac{T - T_o}{T_w - T_o}$

1. 서 론

기하학적인 형상의 급확대에 의한 박리현상중 후향 계단면위의 유동은 그 단순성으로 인해 박리현상을 이해하기 위한 모형으로 많이 취급되고 있다. 급확대 벽면 위에서 고체벽면을 따라가지 못하고 분리된 유선(박리선)은 계단의 하류에서 재부착한 후 유동이 진행됨에 따라 재발달하게 된다. 이 재부착점과 박리점 사이에서는 재순환 영역이 존재함이 알려져 있으며, 이 재부착점 및 재순환 영역의 존재는 열전달 특성에 중요한 영향을 미치고 있다.

이러한 기하학적인 형상은 일반 열교환 장치, 디퓨저, 연소기, 유체기계, 익형 및 전자장비⁽¹⁾ 등에서 관찰될 수 있다. 특히 전자장비에 적용되는 냉각방식은 경제성 및 소음 등을 고려 했을때 회로설계상 크기의 최소화를 요구하고 있으며, 따라서 장치의 단위 체적당 발열량의 증가에 따른 부력효과 또한 중요한 변수가 됨으로써 자연대류와 강제대류의 혼합 대류현상을 유발시킨다.

많은 후향계단면 유동에 관한 연구들이 주로 유체역학적인 관점에서 취급되어 왔다. 이의 총괄적인 연구동향이 Eaton and Johnson,⁽²⁾ Simpson⁽³⁾

및 김성초⁽⁴⁾에 의해 잘 나타나 있다. Armaly등⁽⁵⁾은 레이저 도플러 유속계(laser doppler velocimeter)를 사용하여 폭넓은 레이놀즈 수의 변화에 따른 속도측정을 통하여 각종 유동영역을 보고하였다. Goldstein 등⁽⁶⁾은 층류유동이 성립되기 위한 레이놀즈수의 임계값 및 재부착길이를 예측할 수 있는 상관관계식을 보고한 바 있다. 박리-재부착 이후 유체의 유동중 난류의 구조에 관한 연구가 백세진 및 유정렬⁽⁷⁾과 김경천 및 정명균⁽⁸⁾ 등에 의해 수행되었으며 백세진 및 유정렬⁽⁹⁾은 유동의 모델에 관해 고찰하였다. 난류유동의 특성에 관한 연구는 박병서 등⁽¹⁰⁾에 의해 실험적으로 수행되어 보고된 바 있으며, 최근에는 유한요소 해석⁽¹¹⁾과 재부착 길이에 미치는 계단높이의 영향⁽¹²⁾등에 관해서 활발한 연구가 진행중이다.

근래에 들어 후향계단면 유동에 열전달까지 고려한 문제가 취급되고 있다. 박리유동의 강제대류에 관한 연구가 Aung⁽¹³⁾에 의해 개괄적으로 발표된 바 있으며, Sparrow 등⁽¹⁴⁾은 최대 열유속점과 재부착점과의 관계를 예측하였다. Sparrow 와 Chuck⁽¹⁵⁾은 채널의 폭을 변수로 하는 재부착점의 상관 관계식을 제시하고 있으며 Aung⁽¹⁶⁾은 마하젠더 간섭계(mach-zehender interferometer)를 사용하여 강제대류의 온도분포를 구한 뒤에 그 결과를 수치 계산 결과와 비교 검토하였다.⁽¹⁷⁾ Vogel과 Eaton⁽¹⁸⁾은 맥동 열선 풍속계(pulsed-wire anemometer)와 열타래 탐침(thermal tuft probe)을 사용하여 표면마찰을 측정하였으며 레이저 도플러 유속계를 사용하여 박리와 재순환을 갖는 난류 유동속도를 측정하였다.

지금까지는 후향계단위를 흐르는 유동에 대해, 유체역학 또는 강제대류 열전달에 관한 연구가 수행되어 왔으나 부력의 영향을 고려한 혼합대류 현상에 대한 고찰은 미흡한 실정이다. 비교적 경제조건이 명료한 채널의 경우에 대해 후향계단면 유동에 미치는 부력의 영향에 관한 수치적 연구가⁽¹⁹⁾ 있으나 비교 할만한 실험 결과가 없는 상태이며 이를 규명하기 위해서는 실험적인 검증을 통한 수치해석방법이 제시되어야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 수직 평판에 위치한 후향 계단면 위를 흐르는 유체유동의 특성, 즉 재부착점, 박리 및 재순환 영역에 미치는 부력의 영향을 수치해석 및 실험으로 조사한다. 유동의 가시화를 통해 재부착점의 위치를 측정하며 레이저도플러 유

속계(5W, Ar-Ion, DANTEC)에 의한 속도분포 및 CTA(constant temperature anemometer, 55M01과 55M20, DANTEC)를 사용한 온도분포를 동시에 측정 함으로써 유동 특성 및 열전달에 미치는 부력의 영향을 검토한다.

2. 실험장치 및 방법

수직으로 놓여진 후향 계단면위를 지나는 층류 유동에 관해서 부력효과(계단입구속도, 가열량, 계단높이 등)를 변화시켜 가면서 속도 및 온도의 분포를 측정 할 수 있도록 장치를 제작하였다.

실험은 5% 이하의 낮은 난류강도를 갖는 개회로(open circuit)풍동을 Fig. 1과 같이 플렉시유리(plexiglass)로써 제작하여 수행되었다. 풍동은 수축비 9 : 1을 갖는 수축부와 시험부가 설치될 사각덕트부 및 확산부로 구성되며 확산부에는 변속 팬을 설치하여 시험부에 공급되는 공기의 속도가 0.2~1.0 m/s가 되도록 하였다. 사각덕트내에 설치될 후향계단면은 비가열 상태의 플렉시유리로 제

작하되 그 높이를 임의로 변화시킬 수 있도록 한다. 30 cm×100 cm×1 cm 크기의 알루미늄 판으로 구성된 계단 하류벽면의 가열면은 뒷면에 부착된 6 개의 가열고무판(15 cm×25 cm×1 mm)에 서로 독립된 가변전압을 공급 함으로써 전체온도가 등온이 유지되도록 한다.

경계층내의 온도변화를 측정하기 위한 탐침(probe)의 이송을 위해 사각덕트의 윗면에 작고 긴 홈(1 cm×70 cm)을 만든다. 탐침의 가열면과 수직방향으로의 이송은 Stepper motor를 구동시켜 0.02 mm까지 이동 가능하도록 하며 유동방향의 이송은 조절나사를 통해 수동으로 작동된다. 속도측정은 두 속도성분(u, v)까지 측정 가능하도록 2개의 신호처리기를 갖는 2성분 레이저 도플러 유속계로써 수행토록 한다. 도플러 신호및 광학적 측정점의 이송은 IBM-AT급 개인용 컴퓨터에 의해 조정된다. A/D변환기를 통해 수집된 온도와 동시에 전달된 속도의 데이터들은 통계적인 소프트웨어를 통해 처리된다. 측정체적에는 공기와 혼합된 글리세린 입자를 공급하여 빛을 산란하도록 하며 유동 특성은 15와트, 직경 2.5 cm 평행 백색광을 사용하여 관찰한다.

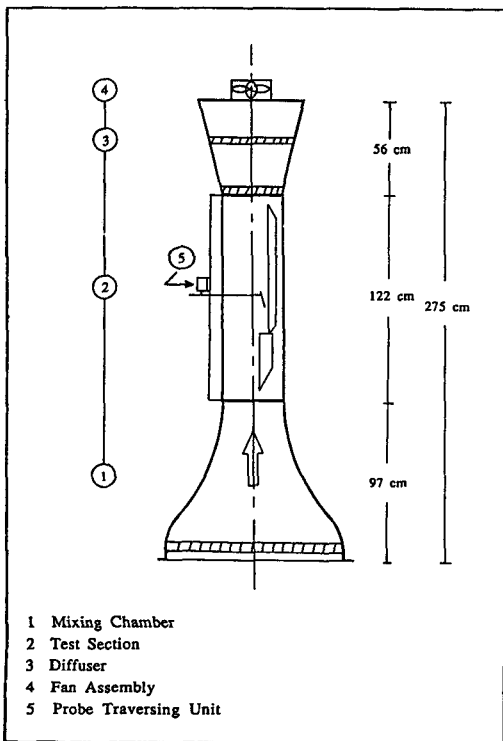


Fig. 1 Schematic diagram of wind tunnel

3. 수치 해석

3.1 지배방정식 및 경계조건

실험에 사용된 형상 및 경계조건들을 수치적 계산에 적용하도록 한다. 재순환 현상이 존재하는 유동장은 타원형 지배방정식으로 표시된다. 2차원 정상상태인 비압축성 층류 유동에서 연속방정식, 운동량 및 에너지 방정식은 다음과 같다.

연속 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

운동 방정식

$$\rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + \rho g \beta (T - T_0)$$

$$\rho \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right]$$

에너지 방정식

$$\rho C_p \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right]$$

경계 조건

$s < y < H, x = 0 : u = \text{Blasius 속도분포},$

$T = T_o$

$0 < y < H, x = L :$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$$

$y = H, 0 < x < L : u = u_o, \partial v / \partial y = 0, T = T_o$

$y = 0, L_s < x < L : u = v = 0, T = T_w$

$y = s, 0 < x < L_s : u = v = 0, \partial T / \partial y = 0$

$0 < y < s, x = L_s : u = v = 0, \partial T / \partial x = 0$

운동량 및 에너지 방정식이 서로 연관된 이상의 비선형 편미분방정식을 주어진 경계조건 하에서 SIMPLE 방식을 도입하여 유한차분법으로 수치계산을 수행한 TEACH code를 사용하여 해석한다. 수치계산을 위한 계산영역은 Fig. 2와 같다.

계산을 반복할 때마다 먼저 운동량 방정식을 계산한 후 부력항에 포함된 온도를 에너지방정식에 의해 수정한다. 해의 수렴은 전체 계산 영역의 표준화된 오차의 합이 0.005 보다 작을 때 만족된 것

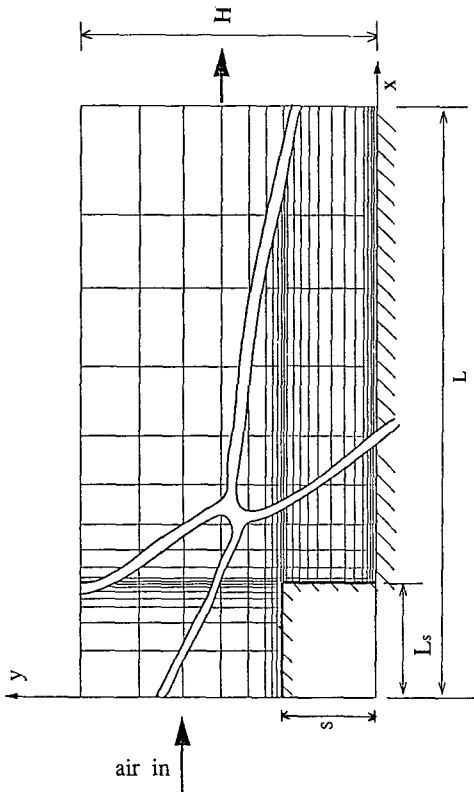


Fig. 2 Non-uniform grid system in computational domain

으로 하였다. 계산 영역의 격자 분포는 속도 구배가 큰 영역 및 속도의 방향이 바뀌는 부근에서 조밀하도록 구성하였으며 이를 위해 실험적인 관찰 및 등간격 격자를 사용한 예비계산으로써 이들을 결정하도록 하였다. 사용된 매개변수에 대해서 격자의 밀도 $N_x \times N_y = 90 \times 60$ 가 격자의 구성에 무관한 해를 구하는데 충분하였다.

4. 결과 및 고찰

제작된 실험장치로부터 2차원 유동을 확인하기 위하여 $y = 0.64 \text{ cm}$ 에서 평판의 넓이(z) 방향을 따라 속도를 측정하였다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 사각덕트 벽면의 영향을 받지 않는 시험부의 중심부 영역에서 균일한 속도를 보이는 2차원 유동이 형성되고 있으며 측정된 속도 및 온도분포는 평판의 중심부($z=0$)에서 유동의 수직 방향을 따라 측정되었다.

유동장에 미치는 부력의 영향에 대해 총괄적인 경향을 살펴보기 위해 무차원 유동함수에 의한 윤곽선(contour plot)이 Fig. 4에 제시되었다. 유동특성에 미치는 벽면의 온도 및 입구속도의 변화에 따른 각각의 영향이 나타나고 있다. 계단면에서 박리된 유동이 계단 하류의 가열벽면에 재부착하여 계단면과 재부착점 사이에 재순환영역을 형성하는 일반적인 형상을 유지하나 부력의 증가에 따라 재부착 길이(X_r)가 감소함을 보이고 있다. Fig. 4(a)에서는 입구속도를 $u_o = 0.55 \text{ m/s}$ 로 고정하고 가열면온도를 상승시킴에 따라 재부착길이 및 재순환영역의 크기가 감소하고 있음을 보인다. $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 에 도달하여 $Gr_s/Re_s^2 \times 10^3 > 17$ 일 경우에는 재

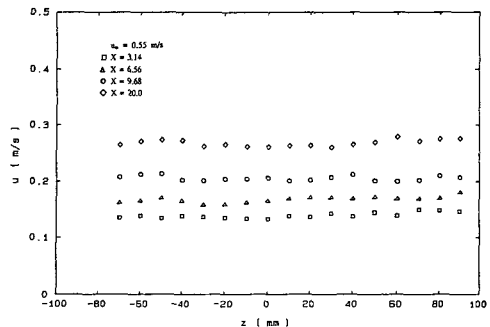


Fig. 3 Streamwise velocity measured across the plate width at $y = 0.64 \text{ cm}$

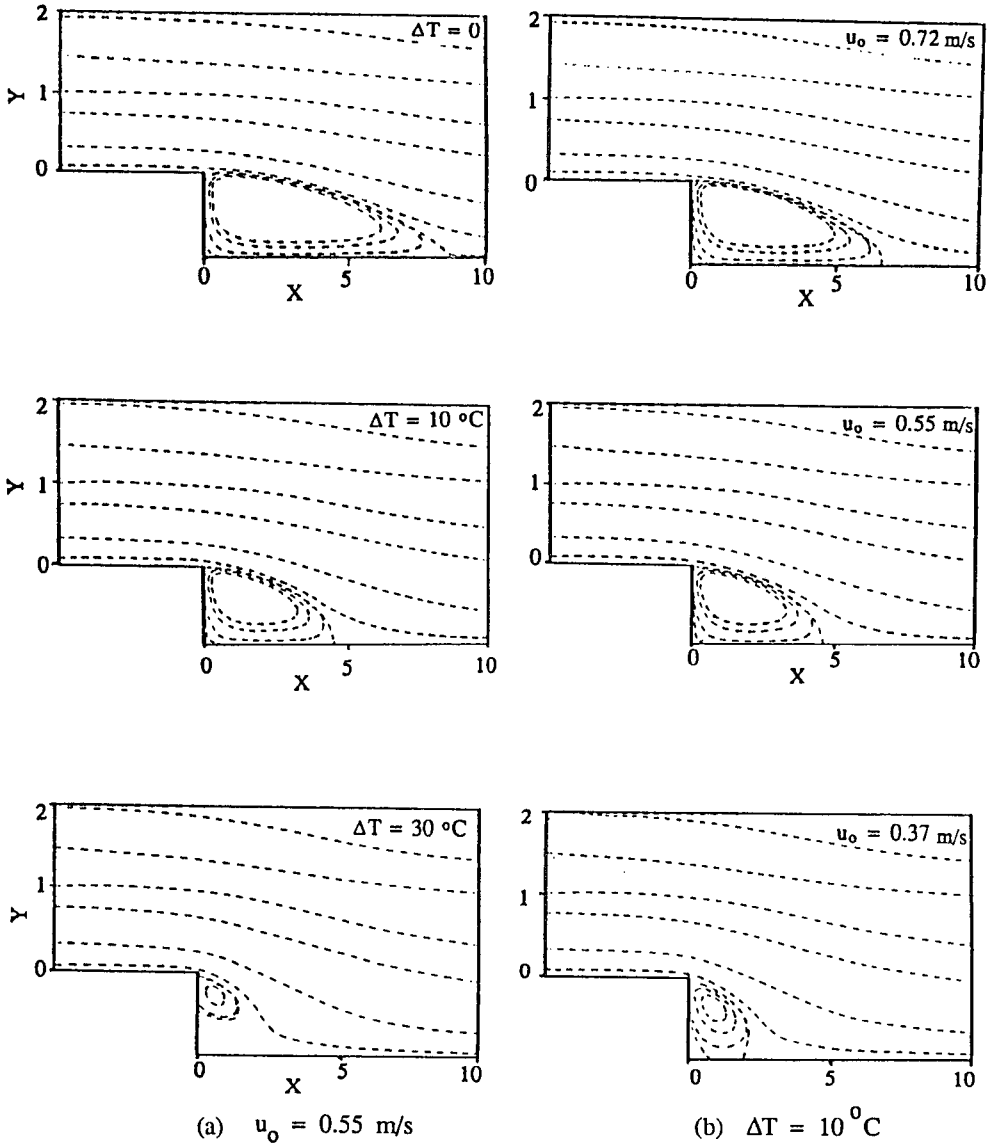


Fig. 4 Effect of inlet velocity and wall temperature on the streamline calculation

부착점은 소멸되고, 재순환영역은 하류 가열벽면으로부터 이탈되어 계단벽면의 박리점부근에서 소규모로 형성되고 있다. Fig. 4(b)는 $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ 로 고정된 상태에서 입구속도가 감소(부력의 증가)함에 따라 재부착점 및 재순환영역이 감소함을 보여주고 있다. 하류벽면 가까이 형성된 재순환 영역의 (-) 방향속도가 부력의 영향으로 발생하는 (+) 방향속도에 의해 상쇄됨으로써 재순환영역이 감소되고 재부착점이 계단을 향해 이동하는 현상을 보인다.

Fig. 5에서는 입구속도($u_0=0.55\text{ m/s}$)를 고정하고 벽면의 온도를 $\Delta T=0, 5, 10, 30^{\circ}\text{C}$ 로 증가시키에 따라 변화하는 속도분포를 서로 다른 위치($X=3.14, 6.56, 20.0$)에서 측정하여 나타내었다. 실선으로 표시된 수치계산값이 실험결과와 잘 일치하고 있으며 부력이 재순환영역의 특성 및 속도분포에 미치는 영향이 잘 나타나고 있다. 재순환 영역내의 위치 $X=3.14$ 에서 측정된 속도분포를 보면 비가열 ($\Delta T=0^{\circ}\text{C}$)에서 상대적으로 큰(-)방향속도가

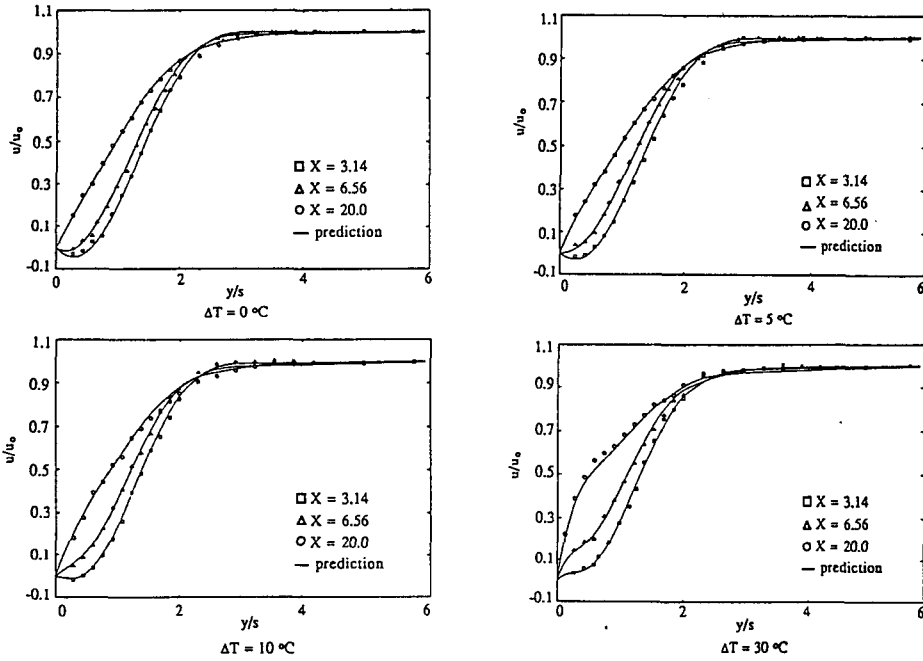


Fig. 5 Dimensionless streamwise velocity distribution for $u_0=0.55$ m/s

벽면의 온도가 증가함에 따라 감소되고 있다. $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 일 경우에 보이고 있는 (+) 방향속도는 재순환 영역의 축소로 인해 $X=3.14$ 이전에 형성된 재부착점 이후의 재발달 과정을 나타내고 있다.

주유동 방향 속도 분포에 미치는 부력의 영향을 살펴보기 위해 동일지점 ($X=6.56$)에서 벽면의 온도 변화에 따른 영향(Fig. 6) 및 벽면의 온도가 일정할 때 입구 속도의 변화에 따른 속도 분포(Fig. 7)의 변화를 나타내었다. Fig. 6에서는 $X=6.56$ 에서 $\Delta T=0^\circ\text{C}$ 일 경우에 상대적으로 크게 형성되었

던 재순환 영역이 벽면의 온도가 상승함에 따라 계단후면으로 이동하여 나타나지 않고 있으며 계속된 부력의 증가로 인해 ($\Delta T=30^\circ\text{C}$) 벽면 가까이에서 가속된 유동은 혼합유동의 특징인 경계층에 속도의 극대점 형성을 시작하고 있음을 보이고 있다. Fig. 7은 $u_0=0.72$ m/s일때 $X=6.56$ 에서 재부착점의 특징이 나타나고 있으나 레이놀즈수가 감소함에 따라 재순환 영역의 크기가 축소됨으로써 이 위치는 재부착점 이후의 재발달 과정에 있음을 알 수 있다.

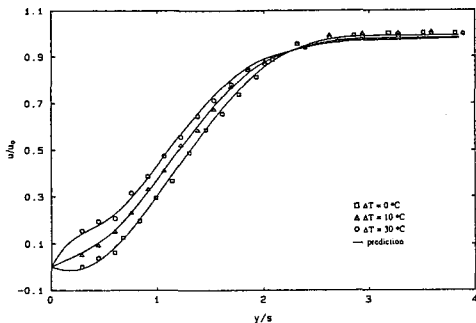


Fig. 6 Effect of wall Temperature on the velocity distribution for $u_0=0.55$ m/s at $X=6.56$

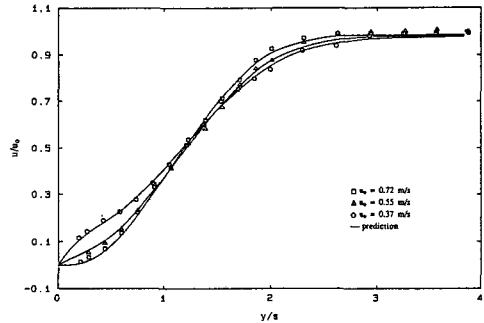


Fig. 7 Effect of inlet velocity on the velocity distribution for $\Delta T=10^\circ\text{C}$ at $X=6.56$

벽면에서의 속도 변화에 의해 정의되는 마찰계수 $C_f = \tau_w / \frac{1}{2} \rho u_o^2$ 를 유동이 진행됨에 따라 Fig. 8에 도시하였다. 비가열 상태일 때 재순환 영역에서 음의 값을 보인 표면마찰계수가 재부착점에서 0점을 통과한 후 급격히 증가한 다음 완만한 증가를 보이는 일반적인 후향계단 유동의 성질을 나타내고 있다. 부력이 증가(벽면온도증가)함에 따라 $\partial u / \partial y = 0$ 인 위치까지의 재부착 길이 X_r 가 예민하게 감소하고 있으며 $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 일 때 재순환 영역이 벽면으로부터 이탈됨으로써 가열벽면에 재부착하는 현상이 더이상 존재하지 않고 전체 유동장에 걸쳐 마찰계수가 양의 값을 갖게 된다. 또한 부력의 증가에 의해 벽면부근에서 가속된 유동이 표면마찰계수의 증가를 야기시킨다.

온도장에 미치는 부력의 영향을 살펴보기 위해 입구 속도를 고정하고 벽면 온도의 변화에 따른 재순환 영역 $X = 3.14$ 에서의 온도 분포를 Fig. 9에 나타내었다. 부력이 증가함에 따라 벽면에서의 온도구배가 증가함으로써 열전달이 증가함을 나타낸다. 부력의 영향을 무시한 강제대류의 경우와 비교하여 혼합대류에서의 열전달이 증가하고 있다.

Fig. 10에서는 유동이 진행됨에 따라 재부착점을 중심으로 재순환 영역과 재부착 이후($X > X_r$)에서 변화화하는 온도 분포를 나타내고 있다. 계단 후면의 재순환 영역($X < X_r$)에서는 유동이 정체됨으로써 상대적으로 높은 온도를 유지하여 벽면과의 온도차가 작으나 유동이 진행됨에 따라 벽면에서의 온도구배가 매우 예민하게 증가한다. $X_r + 5s$ 에서 온도구배는 최대가 된 후 완만하게 감소하고 있음을 보인다.

벽면의 가열온도 T_w , 입구온도 T_o 와 계단높이 s 를 기초로 하여 $Nu_s = - \frac{\partial T / \partial y|_{y=0} \cdot S}{T_w - T_o}$ 로 정의된

Nusselt수에 미치는 부력의 영향을 보여준다. Nusselt수는 계단벽면에서의 최소값으로부터 급격하게 증가하여 재부착점 부근에서 극대값을 갖게 된 후 서서히 감소하고 있다. 벽면의 온도차가 증가(Grashof수 증가)할수록 극소 Nusselt수는 전체 유동장에 걸쳐 증가하나 극대 Nusselt수의 위치는 재부착점의 위치와 함께 감소하여 계단쪽으로 이동한다. 또한 레이놀즈 수의 증가에 따라 극대 Nusselt수의 위치가 뒤로 후퇴하는데 이는 재순환 영역이 확대되면서 재부착점이 후퇴하고 열경계층의 성장이 늦어지기 때문이다. 레이놀즈수 증가에

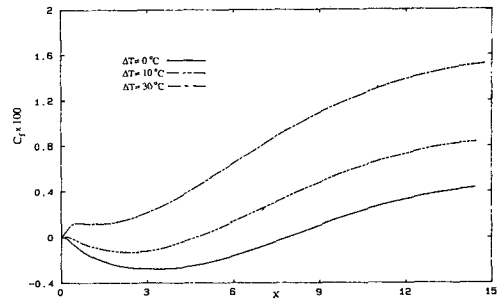


Fig. 8 Buoyancy effect on the skin friction coefficient

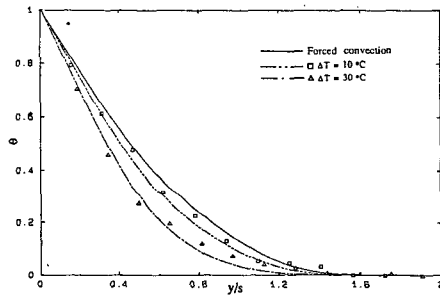


Fig. 9 Effect of wall temperature on the temperature distribution for $u_o = 0.55 \text{ m/s}$ at $X = 3.14$

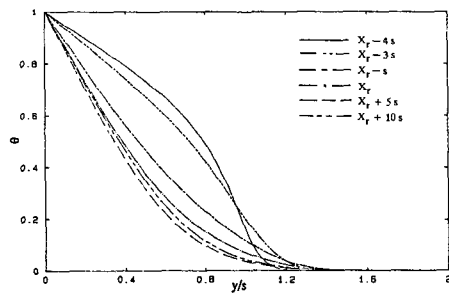


Fig. 10 Calculated temperature development along the streamwise direction for $u_o = 0.55 \text{ m/s}$ and $\Delta T = 10^\circ\text{C}$

따른 재순환 유동영역의 길어짐은 Nusselt 수와 레이놀즈수 사이의 상반된 결과를 야기하고 있다. 즉, Fig. 11에서 $X_r < 11$ 일 경우 레이놀즈수가 증가함에 따라 Nusselt수는 감소한 반면 $X_r > 11$ 에서는 레이놀즈수가 증가 할 수록 Nusselt수가 증가하고 있다. 재순환 영역에서는 재부착점의 길이가 길수록(레이놀즈수가 클수록) 재부착점으로부터 벽면을

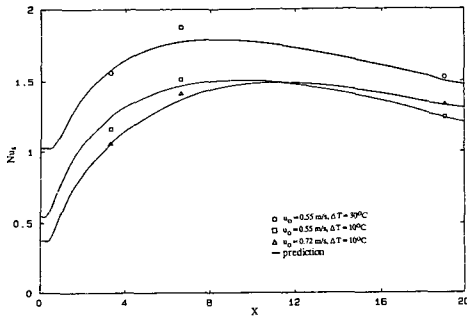


Fig. 11 Effect of buoyancy force on the Nusselt number variation

따라 흘러 내려오는 (-방향) 유체의 온도가 상승하여 가열 벽면과의 온도차가 감소됨으로써 Nusselt수가 감소하나 재부착점 이후에 유동이 재발달하는 과정에서는 속도의 증가에 따른 열유속의 증가로 Nusselt수가 증가함을 알 수 있다.

계단의 높이, 입구속도 및 벽면의 온도를 변화시키면서 이들의 변화에 따른 재부착 길이를 유동의 가시화를 통해 측정하였다. 유동장에 혼합된 글리세린 입자를 15와트 평행 백색광에 산란 시키므로써 가시화된 재부착 길이를 반복 측정하고 평균하여 관측 오차를 최소화한다. Goldstein등⁽⁶⁾은 층류 유동에서는 $X_r = (2.13 + 0.021 Re_s)$ 로써 레이놀즈수 변화에 따른 재부착 길이를 예측할 수 있는 관계식을 제시한 바 있다 본 연구에서는 이 관계식을 수정하여 부력의 영향을 고려한 재부착길이를 예측할 수 있는 상관관계식을 도출한다. 실험에 사용된 계단의 높이, 레이놀즈수 및 Grashof수의 변화에 따라 추기정된 재부착길이는

$$X_r = 1.05(2.13 + 0.021 Re_s) \exp(-c Gr_s / Re_s^2)$$

여기서 $c = 79.4 (s = 0.01 \text{ m})$

$$c = 84.6 (s = 0.0064 \text{ m})$$

$$c = 95.0 (s = 0.0038 \text{ m})$$

로 나타낼 수 있으며, 함수 s^{-n} 을 도입하여 각 계단 높이에 대해 계수 c 를 단일값으로 도출할 수 있었다. 실험에 사용된 모든 계단높이, 부력, 레이놀즈수에 대해 재부착길이를

$$X_r = 1.05(2.13 + 0.021 Re_s) \exp(-33.7s^{-0.186} Gr_s / Re_s^2)$$

로써 예측할 수 있다. 이 관계식을 실제 측정된 재

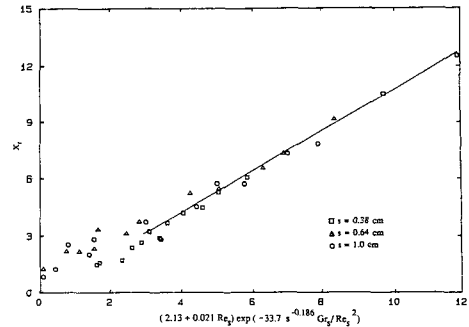


Fig. 12 Correlation of the reattachment length

부착길이를 비교하여 Fig. 12에 나타냈다. 이 관계식은 $Gr_s / Re_s^2 \times 10^3 < 17$ 일 때 7% 오차 범위에서 재부착길이를 예측할 수 있으나 $X_r < 3.5$ 에서는 그 편차가 크게 나타난다. 이 편차는 부력의 수준이 증가함에 따라 재순환영역이 계단하류의 가열 벽면으로부터 이탈되어 그 크기가 매우 완만하게 감소하는 영역에서 발생하는데 일반적으로 정의되는 재부착 길이와 차이가 있음을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 수직 평판에 위치한 후향계단위를 흐르는 유체의 유동 특성 및 열전달에 미치는 부력의 영향이 검토 되었다.

레이놀즈수의 증가에 따라 확장되었던 재순환영역이 부력의 증가에 따라 축소됨으로써 재부착길이가 감소하며 $Gr_s / Re_s^2 \times 10^3 = 17$ 일 경우에는 하류벽면에서의 재부착점이 소멸되고 계단면에 부착한다. 실험에 사용된 계단높이, 부력변수, 레이놀즈수에 대해 $X_r > 3$ 에서의 재부착길이는 $X_r = 1.05(2.13 + 0.021 Re_s) \exp(-33.7s^{-0.186} Gr_s / Re_s^2)$ 로 예측할 수 있다.

재순환영역에서 음(-)의 값을 보인 표면마찰계수가 재부착점에서 0점을 통과한 후 급격히 증가한 다음 완만한 증가를 보인다. 이 마찰계수는 부력이 커짐에 따라 증가하고 있으며, 재부착점이 계단면에 형성될 경우에는 전체 유동장에 걸쳐 양의 값을 갖게 된다.

Nusselt수는 계단벽면에서의 최소값으로부터 급격하게 증가하여 재부착점부근에서 극대값을 갖게 된 후 서서히 감소하고 있다. 벽면의 온도차가 증가(Grashof수 증가)할수록 국소 Nusselt수는 전

체 유동장에 걸쳐 증가하나 극대 Nusselt의 위치는 재부착점의 위치와 함께 감소하여 계단쪽으로 이동한다. 또한 레이놀즈수의 증가에 따른 재순환 영역의 확장은 극대 Nusselt의 위치를 계단 하류 방향으로 후퇴시킨다.

후 기

이 논문은 1991년도 교육부 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며 이에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) 이재현 등, 1989, "전자장비 채널에서의 혼합 대류에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제 13권, 제4호, pp. 771~779.
- (2) Eaton, J.K. and Johnson, J.P., 1981, "A Review of Research on Subsonic Turbulent Flow Reattachment," AIAA Journal, Vol.10, pp. 1093~1100.
- (3) Simpson, R. L., 1981, "A Review of Some Phenomena in Turbulent Flow Separation," Journal of Fluid Engineering, Vol.103, pp. 520~530.
- (4) 김성초, 1989, 후향계단면에서 재부착하고 재전개하는 2차원 비압축성 흐름해석, 박사학위논문, 한국과학기술원.
- (5) Armaly, B.F. et al., 1983, "Experimental and Theoretical Investigation of Backward-Facing Step Flow," J. Fluid Mechanics, Vol. 127, pp. 473~493.
- (6) Goldstein, R.J. et al., 1970, "Laminar Separation, Reattachment, and Transition of the Flow Over a Downstream-Facing Step," J. Basic Eng., Vol. 92, pp. 732~741.
- (7) 백세진, 유정열, 1989, "박리-재부착 이후의 재발달 난류경계층 (I)," 대한기계학회논문집, 제13권, 제4호, pp. 780~788.
- (8) 김경천, 정명균, 1985, "2차원 수직벽을 지나는 재부착 박리 전단층의 난류구조에 관한 연구 (I)," 대한기계학회논문집, 제9권, 제4호, pp. 403~413.
- (9) 백세진, 유정열, 1989, "박리-재부착 이후의 재발달 난류경계층 (II)," 대한기계학회논문집, 제13권, 제5호, pp. 999~1011.
- (10) 박병서, 성형진, 정명균, 1989, "급확대-축소 연결부 주변의 원관 난류유동에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제13권, 제6호, pp. 1269~1282.
- (11) 이규환, 김상균, 유제청, 1989, "Step 위를 지나는 2차원 층류 점성 비압축성 유체유동에 관한 유한요소 해석," 대한기계학회 '89년도 춘계 학술대회초록집 (II), pp. 114~117.
- (12) Ohm, T., et al., 1989, "Parametric Calculation of Reattachment Length in Axisymmetric Sudden-Expansion Flows," 대한기계학회 '89년도 춘계 학술대회초록집 (II), pp. 303~306.
- (13) Aung, W., 1983, "Separated Forced Convection," Proceeding of the ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference, Vol. 2, pp. 499~515.
- (14) Sparrow, E. M., Kang, S. S. and Chuck. W., 1987, "Relation between the Points of Flow Reattachment and Maximum Heat Transfer for Regions of Flow Separation," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 103, pp. 1237~1246.
- (15) Sparrow, E. M. and Chuck. W., 1987, "PC Solutions for Heat Transfer and Fluid Flow Downstream of an Abrupt, Asymmetric Enlargement in a Channel," Numerical Heat Transfer, Vol. 12, pp. 19~40.
- (16) Aung, W., 1983, "An Experimental Study of Laminar Heat Transfer Downstream of Backstep," Journal of Heat Transfer, Vol. 105, pp. 823~829.
- (17) Aung, W., Baron, A. and Tsou, F. K., 1985, "Wall Independency and Effect of Initial Shear-Layer Thickness in Separated Flow and Heat Transfer," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, pp. 1757~1771.
- (18) Vogel, J. C. and Eaton, J. K., 1985, "Combined Heat Transfer and Fluid Dynamic Measurements Downstream of a Backward-Facing Step," Journal of Heat Transfer, Vol. 107, pp. 922~929.
- (19) Lin, J. T., 1989, "Mixed Convection in Laminar/Turbulent Separated Backward Facing Step Flows." Ph.D Dissertation, University of Missouri-Rolla.