

**쉴리렌 간섭계에 의한 사각덕트내 후향계단후
 유동에서의 혼합대류 전열에 관한 연구**
**A Study on Mixed Convection Heat Transfer in Duct Flow behind
 a Backward-Facing Step by Using Schlieren Interferometer**

백 병준*, 박복춘**, 김진택***
B.J. Baek, B. C. Pak, J. T. Kim

Key words : Schlieren Interferometer(쉴리렌 간섭계), Backward Facing Step(후향계단), Mixed Convection(혼합대류), Reattachment Length(재부착길이), Buoyancy Parameter(부력변수)

Abstract

The flow and heat transfer characteristics behind a backward facing step located in a vertical channel has been studied. In this study, the numerical prediction has been performed by solving the Navier-Stokes equation and energy equation simultaneously with the SIMPLE algorithm embedded in TEACH code. Local heat flux was measured by using Schlieren Interferometer. The flow visualization was performed using the cylindrical lens and the laser beam that is scattered by the supplied glycerine particles. The velocity and temperature distributions, recirculation region, reattachment length, and local heat flux are obtained under the various parameters to investigate the buoyancy effect on the flow and heat transfer characteristics behind the step.

———— 기 호 설 명 ————

a : 이산화방정식 계수
 C_p : 비열 (J/kg°C)
 d : 간섭무늬의 간격 (m)
 Δd : 간섭무늬의 변위 (m)
 Gr_s : Grashof수
 g : 중력가속도 (m/s²)
 H : 무차원 채널높이 (h/s)
 h : 채널높이 (m)
 k : 열전도도 (W/mK)
 L_s : 계단의 길이 (m)
 N_x : x방향 격자수
 N_y : y방향 격자수
 P : 압력 (N/m²)

q_x : 가열벽면에서의 열유속 (W/m²)
 Re_s : 레이놀즈 수
 s : 계단높이 (m)
 T : 유동 공기온도 (°C)
 T_0 : 입구 공기온도 (°C)
 T_w : 가열벽면온도 (°C)
 ΔT : $T_w - T_0$ (°C)
 u, v : x, y 방향속도 (m/s)
 u_0 : 채널입구 공기속도 (m/s)
 X : $x - L_s$ (m)
 X_{max} : $x_{max} - L_s$ (m)
 x : 주 유동방향 좌표 (m)
 x_{max} : 극대 열유속 위치 (m)
 x_r : 재부착길이 (m)
 y : 유동의 수직방향 좌표 (m)

희랍문자

β : 열팽창계수 (1/K)

*정회원, 전북대학교 정밀기계공학과
 **정회원, 전북대학교 기계설계학과
 ***정회원, 전북대학교대학원 정밀기계공학과

- μ : 점성계수 (kg/m sec)
 ϕ : 일반 종속변수
 Ψ : 무차원 유선함수
 ρ : 밀도 (kg/m³)
 θ : $(T - T_0)/(T_w - T_0)$
 ξ : 부력변수 ($\xi = Gr_s/Re_s^2$)

1. 서 론

전열 해석에 사용되는 간섭계로서는 국소 온도에 비례하여 변화하는 빛의 줄무늬(fringe)의 변위를 측정함으로써 열유속을 계산하는 Mach-Zehnder 간섭계가 주를 이룬다 하겠다. 이러한 방법은 열경계층 내에서의 등온선을 구하기에 용이하며, 벽면에 인접한 곳에서의 온도분포를 외삽(extrapolation)하여 국소 열유속을 구하는 것이다.

Merzkirch⁽¹⁾는 국소온도의 기울기와 비례하여 형성된 간섭무늬에 의하여 열유속을 측정할 수 있는 쉘리렌 간섭계를 제안하였으며, 기존의 초음속 유동에 사용되었던 이 장치가 열전달 연구에 사용될 수 있음을 보여준 것이다. 즉, 가열 벽면에서 전달되는 열유속에 의해 형성된 간섭무늬의 변위를 측정함으로써 온도 분포를 구할 필요없이 직접 열유속을 측정할 수 있었다.

Sernas 등⁽²⁾과 Sernas와 Fletcher⁽³⁾는 일반적인 쉘리렌 장치에 설치된 칼날(knife edge)을 단순히 2개의 편광 프리즘 및 Wollaston 프리즘으로 대체함으로써 쉘리렌 간섭계를 구성하여 열유속을 측정할 수 있는 식을 제안하였다. 이 열유속 측정장비를 사용하여 일반 열교환장치, 디퓨저, 연소기, 유체기계, 익형 및 전자장비⁽⁴⁾등에서 관찰될 수 있는 후향계단(backward facing step)에 의해 박리되어 재부착하는 전열유동에 대하여 고찰하고자 한다.

후향계단위를 흐르는 유동에 대한 개괄적인 연구동향은 Eaton과 Johnson,⁽⁵⁾ Simpson⁽⁶⁾, 김성초⁽⁷⁾에 의해 잘 나타나 있다.

Armaly 등⁽⁸⁾은 LDV(laser Doppler velocimeter)를 사용하여 폭넓은 레이놀즈 수의 변화에 따른 유속을 측정하여 각종 유동영역을 확인한 바 있다.

Goldstein 등⁽⁹⁾은 층류유동이 성립되기 위한 임계값 및 재부착길이를 예측할 수 있는 상관관계식

을 제시하였다.

백세진과 유정렬⁽¹⁰⁾, 그리고 김경천과 정명균⁽¹¹⁾은 박리-재부착 이후의 유체의 난류 구조에 관한 연구를 고찰하였으며, 백세진과 유정렬⁽¹²⁾의 유동의 모델에 관한 고찰 및 난류유동의 특성에 관한 연구가 박병서 등⁽¹³⁾에 의해 실험적으로 수행되었다.

최근에는 유한요소해석법의 적용⁽¹⁴⁾, 재부착길이에 미치는 계단높이의 영향⁽¹⁵⁾등에 대한 활발한 연구가 진행중이며, 박리유동의 강제대류에 관한 연구로는 Aung⁽¹⁶⁾에 의해 개괄적으로 발표된 바 있고, Sparrow 등⁽¹⁷⁾은 최대열유속점과 재부착점과의 관계를 예측한 바 있다.

Aung⁽¹⁸⁾은 마하젠더 간섭계(Mach-Zehnder Interferometer)를 사용하여 온도분포를 측정하였으며, Aung 등⁽¹⁹⁾은 수치적으로 실험결과와 비교 검토하였다. Vogel과 Eaton⁽²⁰⁾은 맥동열선풍속계(pulsed-wire anemometer)와 열타래탐침(thermal tuft probe)을 사용하여 표면마찰을 측정하였으며, LDV를 사용하여 박리와 재순환을 갖는 난류 유동속도를 측정하였다.

본 연구에서는 수직 채널의 한면에 위치한 후향계단위를 흐르는 유체의 유동특성 및 전열에 미치는 부력의 영향에 관하여 가시화 방법을 통한 물리적인 형상고찰, 유동 속도 및 온도분포의 수치적인 예측방법 제시, 쉘리렌 간섭계에 의한 열유속의 측정등을 수행함으로써, 발열부가 존재하는 이들 기하학적인 형상의 설계시 그 기초자료로서 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1(a)는 plexiglass로써 제작되어 본 실험에 사용된 풍동을 나타내고 있다. 레이저 빔이 통과하는 시험부의 벽면은 고품질 유리를 사용하여 빛의 굴절이 일정하도록 하였다.

풍동은 수축비 9 : 1을 갖는 수축부와 시험부가 설치될 사각덕트부 및 확산부로 구성된다. 확산부에는 변속 팬을 설치하여 시험부에 공급되는 공기의 속도가 0.2~1.0 m/s 되도록 하였으며, 수축부는 다항식으로 표시된 완만한 곡선식에 의해 설계 제작되어 자유흐름 속도가 5% 이하의 낮은 난류강도를 갖도록 하였다.

사각덕트내에 설치될 후향계단면은 길이 15 cm,

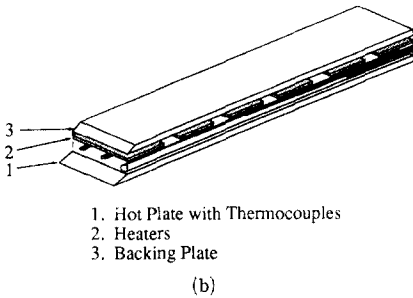
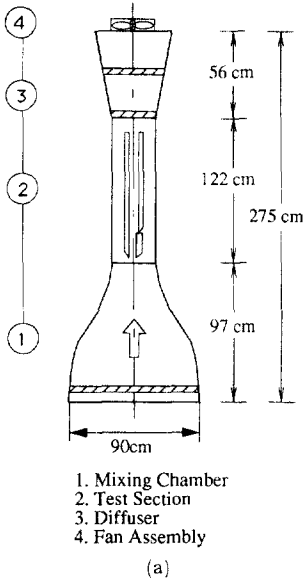


Fig. 1 Schematic diagram of air tunnel and heated plate

폭 30 cm, 두께 1 cm인 plexiglass 또는 알루미늄 판으로 구성되며, 가열면과의 접촉면을 최소로 하여 전도에 의하여 전열을 방지하였다.

가열면은 Fig. 1(b)와 같이 두개의 알루미늄판 (100 cm×30 cm×1 cm)과 그 사이에 삽입된 6개의 가열고무판 (15 cm×25 cm×1 mm) 및 판지로서 구성되며, 나사에 의해 사각덕트의 벽면에 고정되어 시험부를 이룬다. 시험표면 하부에 18개의 copper constantan 열전대를 삽입하여 가열면의 온도를 측정하였으며, 각각의 표면온도에 따라 6개의 가열판에 가변 전압을 공급함으로써 전체 표면온도가 등온이 유지되도록 하였다. 채널의 다른 한면은 115 cm×30 cm×1 cm 크기의 plexiglass 뒷면에 2 cm 두께의 합성수지를 보강하여 단열이 되도록 하였다.

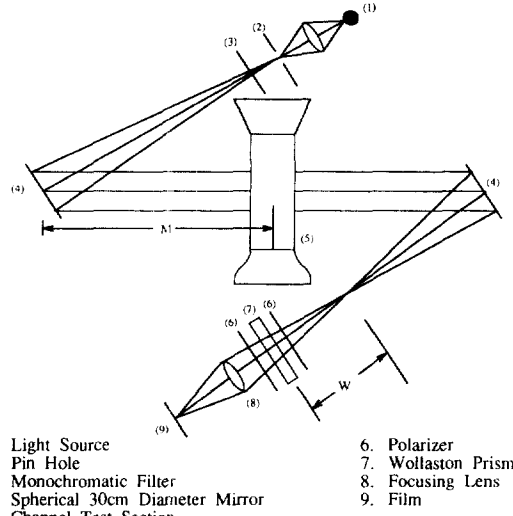


Fig. 2 Optical arrangement of Schlieren interferometer

채널 입구에서의 유속은 LDV를 사용하여 측정하였으며, 공기와 혼합된 글리세린 부유입자에 원통형 렌즈(cylindrical lens)를 통과한 slit 형태의 He-Ne 레이저 광원을 산란시킨 후, 가시화된 부분을 촬영하여 재순환영역을 고찰하였다.

열유속 측정을 위한 설리렌 간섭계의 구성 및 광학적 배열은 Fig. 2와 같으며, 측정과정은 다음과 같다.

1) 광원으로 부터 수광부까지의 전체 장치를 동일 높이로 정렬시켜 레이저 광선이 수평을 유지하도록 한다.

2) 핀홀(pin hole)을 사용하여 레이저로부터 발생한 광원의 강도를 조절한 후, 30 cm 직경의 구면거울에 입사시킨다.

3) 구면거울에서 반사된 평행광은 시험부의 밑도차에 의하여 편향된 후, 제2의 구면거울에서 반사되어 수광부에 도달되도록 한다.

4) Wollaston 프리즘을 회전시켜 45° 경사각의 기준 간섭무늬를 형성하도록 한다. 만약, 이 간섭무늬가 가열면과 수직이면 가열면에 수평 방향으로의 온도 변화가 매우 작기 때문에 열경계층 내에서의 줄무늬 변위가 존재하지 않는다.

5) 촛점에서 프리즘까지의 거리(W)에 의해 줄무늬 간격을 조절한 후, 편광 프리즘을 회전시켜 얻어진 선명한 상을 촬영한다.

촬영된 간섭무늬로부터 간격(d) 및 벽면에서의 변위(Δd)를 측정 한 후, Sernas와 Fletcher⁽²⁾에 의해 제시된 다음과 같은 관계식을 사용하여 가열면과 수직방향(y 방향)으로의 열유속을 구하였다.

$$q_x = \frac{k}{\sin\theta} \left[- \left(\frac{RT_w^2}{P} \right) \left(\frac{\lambda}{2KZ(n_e - n_o) \tan\alpha \left(f - \frac{MW}{f} + W \right)} \right) \left(\frac{\Delta d}{d} \right) \right]$$

f : 오목거울의 초점거리(m)

K : Gladstone-Dale 상수(m^3/kg)

M : 시험부의 중심과 오목거울 중심간의 거리(m)

$n_e - n_o$: Wollaston 프리즘내의 굴절계수 차

R : 기체상수(kJ/kgK)

W : 오목거울의 초점과 Wollaston 프리즘 중심간의 거리(m)

Z : 시험부의 폭(m)

α : Wollaston 프리즘의 췌기각(rad)

λ : 광원의 파장(m)

θ : 가열면과 기준 간섭무늬의 수직 방향과의 각(rad)

촬영된 간섭무늬의 간격 및 변위는 형상투영기(profile projector)를 사용하여 측정하였다.

3. 수치계산

3.1 지배방정식 및 경계조건

2차원 정상상태인 층류유동에서의 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식 및 경계조건은 다음과 같다.

연속 방정식

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

운동량 방정식

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

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

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)

입구: $0 < y < h - s, x = 0 : u = u_o, T = T_o$

출구: $0 < y < h, x = 50s :$

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

단열벽면 : $y = 0, 0 < x < 50s : u = v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0$

계단이후 가열면 : $y = h, 5s < x < 50s : u = v = 0, T = T_w$

계단면 : $y = h - s, 0 < x < 5s : u = v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0$ (or $T = T_w$)

계단면 : $h - s < y < h, x = 5s : u = v = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0$ (or $T = T_w$)

3.2 이산화방정식

일반적인 변수 ϕ 에 대한 지배방정식을 이산화하기 위한 격자계 및 검사체적은 Fig. 3과 같다.

격자계의 구성은 엇갈림 격자계를 채택하였으며, 검사체적에 대한 유한체적법을 적용하였다. 온도와 압력등의 스칼라변수는 검사체적의 중심에 위치하며, 속도성분 u, v 는 주 격자점들 사이에 두었다. 대류-확산에 의한 플럭스를 하이브리드 도식

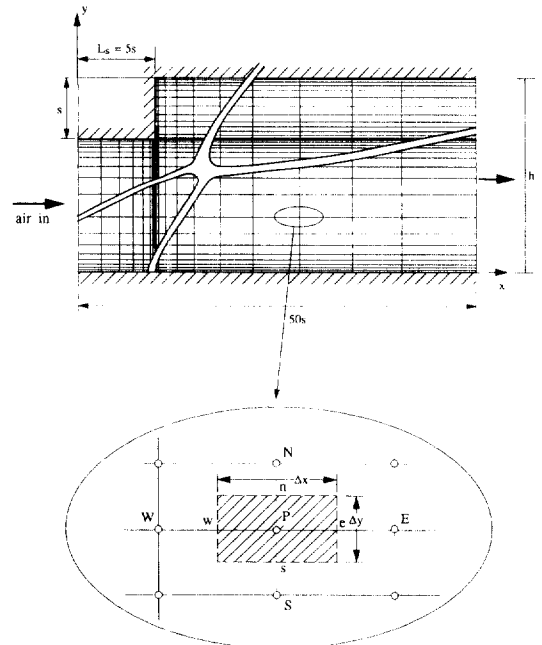


Fig. 3 Grid system and control volume in computational domain

(hybrid scheme)을 사용하여 구하면, 격자점 p 에서의 변수에 대한 2차원 이산화방정식은 다음과 같다.

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b$$

각 계수는 다음과 같다.

$$a_E = D_e A (|P_e|) + \max[-F_e, 0]$$

$$a_W = D_w A (|P_w|) + \max[F_w, 0]$$

$$a_N = D_n A (|P_n|) + \max[-F_n, 0]$$

$$a_S = D_s A (|P_s|) + \max[F_s, 0]$$

$$b = \text{압력차분 및 부력항에 의한 생성항}$$

여기서, F 는 제어체적면을 통과하는 질량유량이며, D 는 확산 코эф피시언트를 나타낸다.

$$F_e = (\rho u)_e \Delta y, D_e = \frac{\mu \Delta y}{(\Delta x)_e}, P_e = \frac{F_e}{D_e}$$

$$F_w = (\rho u)_w \Delta y, D_w = \frac{\mu \Delta y}{(\Delta x)_w}, P_w = \frac{F_w}{D_w}$$

$$F_n = (\rho v)_n \Delta x, D_n = \frac{\mu \Delta x}{(\Delta y)_n}, P_n = \frac{F_n}{D_n}$$

$$F_s = (\rho v)_s \Delta x, D_s = \frac{\mu \Delta x}{(\Delta y)_s}, P_s = \frac{F_s}{D_s}$$

함수 $A(|P|)$ 는 다음과 같다.

$$A(|P|) = \max[0, (1 - 0.5|P|)]$$

계산영역의 격자들의 분포는 속도 구배가 큰 영역인 벽면 부근에서 조밀하도록 구성하였으며, $N_x \times N_y = 90 \times 60$ 가 격자의 구성에 무관한 해를 구하는데 충분하였다. 이 때 벽면 부근의 최소격자 길이는 $\Delta y/s = 0.0035$ 이었다.

3.3 수치해석 절차

주어진 지배방정식은 완전한 타원형이므로 각 유동변수에 대한 해는 반복계산에 의하여 결정된다. 이산화방정식의 해를 구하기 위하여 TDMA (tri-diagonal matrix algorithm)에 근거한 선순법 (line-by-line)을 사용하였으며, 전체적인 수치해석 절차는 다음과 같다.

(1) 온도 및 압력장에 대한 가정

(2) 가정한 온도 및 압력장을 사용하여 생성항을 계산한 후에 x, y 성분 운동량방정식에 대한 이산화방정식을 풀어 속도장을 구한다.

(3) SIMPLE 알고리즘⁽²¹⁾을 사용하여 압력을 수정한후, 개선된 압력장 및 속도장을 구한다.

(4) 개선된 속도장을 사용하여, 에너지방정식에

대한 이산화방정식을 풀어 새로운 온도를 구한다.

(5) 수정된 압력장 및 온도장을 다시 새로운 예측값으로 하여 순서 (1)로 돌아가서 수렴해를 얻을 수 있을 때까지 전체 과정을 반복한다.

수렴조건은 다음과 같다.

$$\frac{\sum |Res_\phi|}{\sum N_\phi} < 0.005$$

여기서, $\sum |Res_\phi|$: 이산화방정식의 잔류량

$\sum N_\phi$: 입구경계면에서의 기준량을 나타낸다.

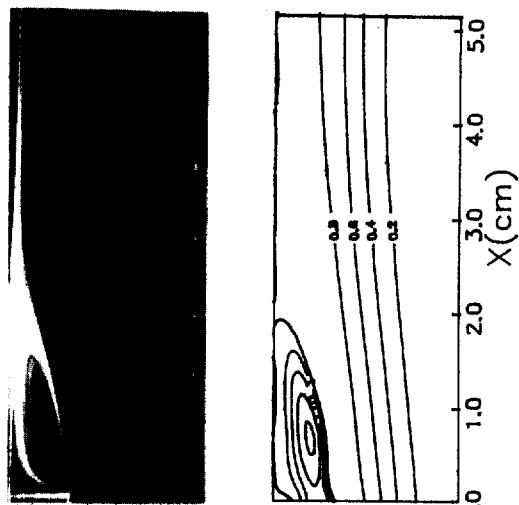
4. 연구결과 및 검토

수치계산에 의해 구한 유선(streamline)과 가시화 방법을 통해 촬영한 사진을 비교하여 Fig. 4에 나타내었다.

$u_o = 0.3 \text{ m/s}$, $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 일 때 계단면뒤에 형성된 재순환 영역을 보여주고 있으며, $X \cong 1.9 \text{ cm}$ 에서 재부착하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 실리렌 간섭계에 의하여 얻어진 대표적인 간섭무늬를 촬영한 것이다.

$\Delta T = 7^\circ\text{C}$ 와 $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 일 때를 비교하면, 벽면의 온도가 증가할수록 가열벽면에서의 간섭무늬의 변위 Δd 가 증가함으로써 열유속이 증가하고 있음을 나타내고 있다.



Visualization Numerical streamlines

Fig. 4 Comparison of numerical streamlines with visualization for $u_o = 0.3 \text{ m/s}$ and $\Delta T = 30^\circ\text{C}$

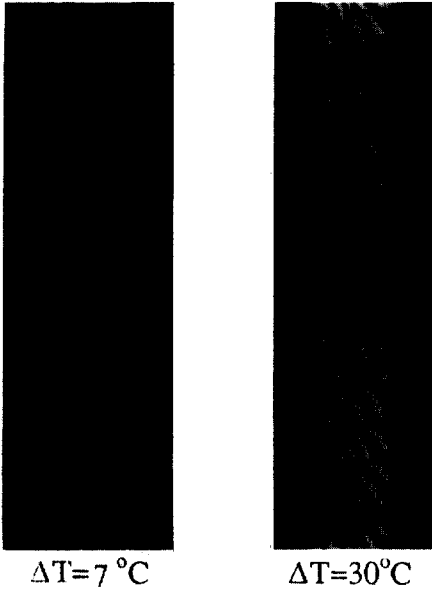


Fig. 5 Typical fringe pattern of Schlieren interferometer

유동장에 미치는 부력 및 채널 간격의 총괄적인 영향을 살펴보기 위해 Fig. 6에 수치계산에 의한 무차원 유선의 변화를 나타내었다.

각 그림의 무차원 유선은 하부 단원면의 $\Psi=0$ 로부터 0.2간격으로 증가하여 가열면의 $\Psi=1$ 까지 증가하며, 재순환영역에서는 0.01간격으로 변화한다. 계단면에서 박리된 유선은 가열 벽면에 재부착하여 계단면과 재부착점 사이에 타원형의 재순환 영역이 형성되고 있으며, 이 재순환 영역은 입구속도와 가

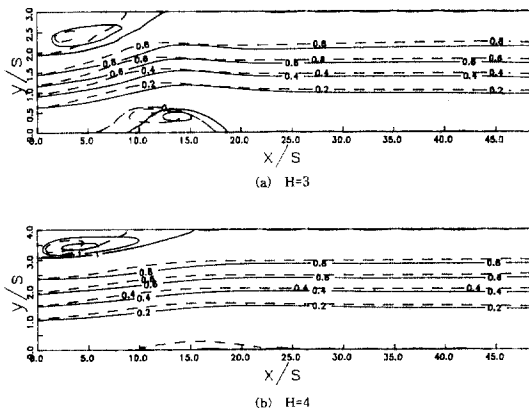


Fig. 6 Streamline distributions for $u_0 = 0.7 \text{ m/s}$ (--- : $\Delta T = 7^\circ\text{C}$, ---- : $\Delta T = 20^\circ\text{C}$)

열 벽면의 온도에 따라 크게 변화하고 있다. Fig. 6(a)는 무차원 채널높이가 $H=3$ 일 때, 가열벽면의 온도가 증가함에 따라 재순환영역의 크기는 감소함을 보여주고 있다. 즉, 벽면 가까이 형성된 재순환영역의 (-)속도가 부력의 증가로 인한 (+)속도와 서로 상쇄되어 재발달 하게됨으로써, 재부착길이 $X_r/s=12.5$ 로부터 $X_r/s=8.7$ 로 짧아지고 있음을 나타내고 있다. $y/s=0$ 부근에서는 재부착점과 대응하여 변화하는 부가적인 재순환영역이 형성되고 있다. 이 부가적인 재순환영역은 Armaly 등⁽⁸⁾에 의해 처음으로 확인되었으며, 급확장에 의한 강한 역압력구배 (adverse pressure gradient)의 작용인 것으로 보고된 바 있다. 부가적인 재순환영역은 채널 높이가 $H=4$ 로 증가(Fig. 6(b))하여 확장비 $\left(\frac{H}{H-1}\right)$ 가 감소함에 따라 소멸되나, 가열면의 온도가 $\Delta T=20^\circ\text{C}$ 로 증가함에 따라 다시 생성됨으로써 확장비, 속도 및 가열벽면의 온도의 증가에 따라 형성되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 $u_0=0.5 \text{ m/s}$, $\Delta T=20^\circ\text{C}$ 일 때 유동이 진행됨에 따라 변화하는 속도분포에 대한 수치계산 결과이다. 계단면과 인접한 가열벽면($X/s=2.43$, $y=0.02 \text{ m}$)부근에서 크게 형성되었던 재순환영역은 유동이 하류 방향으로 진행됨에 따라 소멸되어 $\partial u/\partial y=0$ 인 위치($X/s=6.89$)에서 재부착한 후, $X/s=11.17$, $X/s=19.0$ 으로 재발달함에 따라 증가되는 속도분포를 보여주고 있다.

단면확장 직후인 $X/s=2.43$ 위치에서는 최대 속도의 위치가 확장이전의 채널 중심에 있으나, 유동이 하류로 진행됨에 따라 확장된 단면의 높이 H 의 중심으로 이동한 후 재발달 하고 있으며, 이에 따라 채널의 비가열 벽면($y=0$)의 속도는 급속히 감

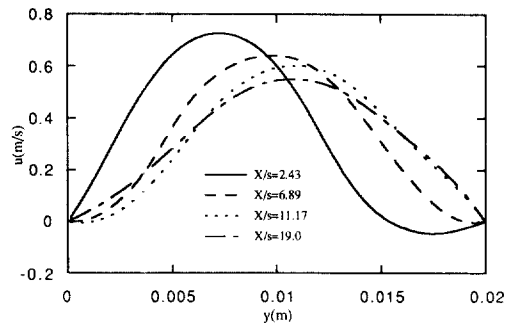


Fig. 7 Velocity profiles for $u_0 = 0.5 \text{ m/s}$ and $\Delta T = 20^\circ\text{C}$

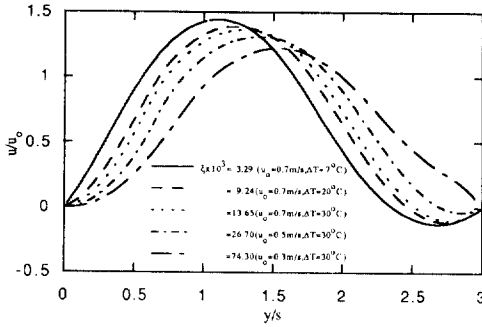


Fig. 8 Effect of buoyancy parameters on the velocity profiles at $X/s=5.3$

소하여 미세한 역류 영역을 형성한 후에 증가함으로써 재발달하는 과정을 보여주고 있다.

Fig. 8은 $X/s=5.3$ 위치의 속도분포에 미치는 부력변수 ξ 의 영향을 도시한 것이다. $\xi = Gr_s/Re_s^2 = g\beta\Delta T s/u_0^2$ 로 정의된 부력변수는 $T_0=293K$, $s=0.007m$ 와 $\beta=2/(T_0+T_w)=2/(\Delta T+2T_0)$ 을 사용하여 계산되었다.

부력의 영향이 증가됨에 따라 재순환 영역의 크기는 감소하며, 최대속도 위치가 가열 벽면쪽으로 이동함으로써 재발달이 빨라지고 있다. 최대속도의 감소는 부력의 증가에 따른 역류 속도의 감소에 기인하며, 이는 그 단면에서의 질량보존을 만족시키고 있다. $\xi \times 10^3 = 74.3$ 일 때 $y/s=2.7$ 위치에서 보이는 작은 돌기는 강해진 부력에 의한 벽면 부근에서의 가속된 속도에 기인된다.

Fig. 9는 유동이 진행됨에 따라 재부착점을 기준으로 재순환영역($X < X_r$)과 재순환 영역의 하류($X > X_r$)에서의 온도분포를 나타내고 있는 수치계산 결과이다.

계단 바로 뒤($X/s=1.27$)의 재순환 영역에서는 유동이 정체됨으로써 상대적으로 높은 온도를 유지하나, 유동이 진행됨에 따라 벽면에서의 온도구배가 예민하게 증가한다. 즉, 재부착길이($X/s=7.2$)를 지나 $X/s=9.37$ 에서 극대온도구배(극대열유속)를 보인후 완만하게 감소하고 있다. $H=3$ 일 때 윌리렌 간섭계에 의해 측정된 국소 열유속을 $q_x = k\partial T/\partial y|_w$ 로써 계산된 수치계산 결과와 비교하여 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다.

레이저광이 통과하는 유리의 불균일 및 관동 오차등에 의한 약간의 오차가 존재하나 일반적인 경향은 잘 일치하고 있다. 입구의 공기 속도를 $u_0=$

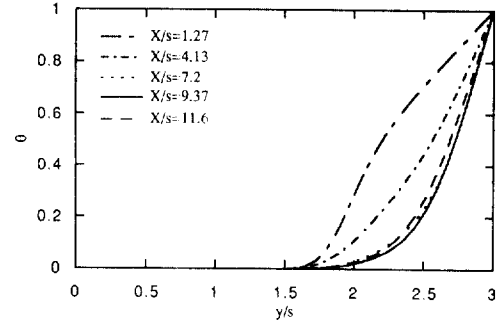


Fig. 9 Temperature profiles along the streamwise direction for $u_0=0.5m/s$ and $\Delta T=20^\circ C$

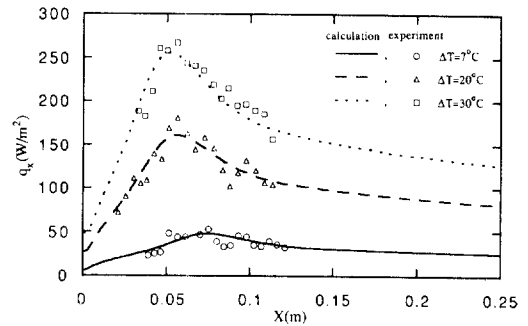


Fig. 10 Local wall heat flux distributions for $u_0=0.5m/s$ and $H=3$

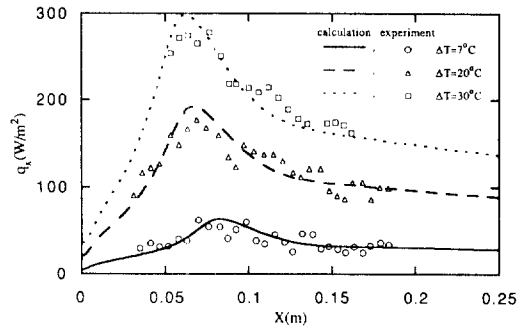


Fig. 11 Local wall heat flux distributions for $u_0=0.7m/s$ and $H=3$

$0.5m/s$ (Fig. 10)로 고정하고 벽면의 온도차를 $\Delta T=7^\circ C$, $\Delta T=20^\circ C$, $\Delta T=30^\circ C$ 로 증가시킴에 따라 온도차에 비례하여 열유속이 전체 유동장에 걸쳐 증가하고 있으며, 극대 열유속점의 위치는 재부착 길이와 함께 감소하여 유동의 상류로 이동하고 있다. 입구 속도를 $u_0=0.7m/s$ 로 증가시켰을 때 (Fig. 11) 극대 열유속의 크기는 증가하며, 그 위

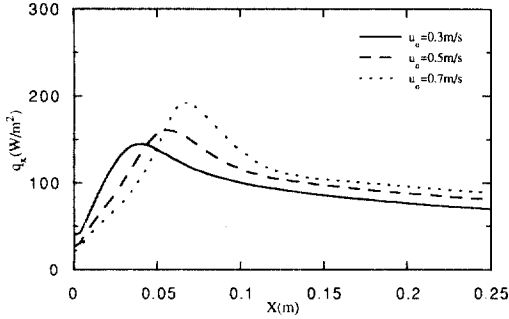


Fig. 12 Local wall heat flux distributions for $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ and $H = 3$

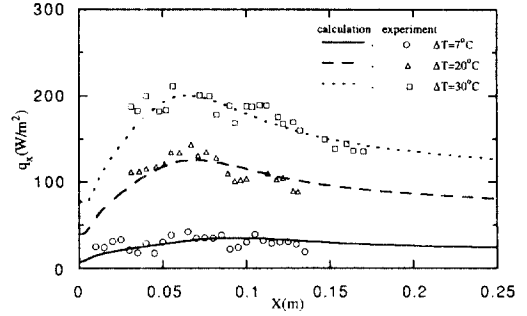


Fig. 13 Local wall heat flux distributions for $u_0 = 0.5$ m/s and $H = 4$

치는 재순환 영역의 확대 및 열경계층의 성장이 늦어짐으로써 유동의 하류로 이동함을 알 수 있다. 즉, $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 일 때 최대 열유속점의 위치는 $X_{\max} = 5$ cm로 부터 $X_{\max} = 6.5$ cm로 15% 증가하였다. 동일 온도차($\Delta T = 20^\circ\text{C}$)에서 속도 변화에 따른 열유속의 변화를 살펴보기 위하여 수치계산 결과를 단일 선도에 그려보면 Fig. 12와 같다.

극대 열유속 및 재부착점 이후의 열유속은 순부력 (assisting buoyancy)의 영향으로 입구속도 $u_0^{1/3}$ 에 비례하여 증가하나, 가열 벽면을 따라 역류가 형성되는 재순환 영역에서는 입구속도의 증가에 따라 열유속이 감소한다. 그 이유는 재부착점으로 부터 하강하는 유체가 속도증가에 따라 확장된 재순환영역을 역류하면서 가열되어, 그 온도가 상승함으로써 가열 벽면과의 온도차가 감소되기 때문이다. Fig. 13은 채널의 높이를 증가시켜 $H = 4$, $u_0 = 0.5$ m/s로 유지하고 벽면의 온도차를 $\Delta T = 7^\circ\text{C}$, $\Delta T = 20^\circ\text{C}$, $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 로 변화시켰을 때의 열유속 변화를 도시한 것이다.

채널의 높이를 $H = 4$ 로 증가하여 확장비가 $4/3$ 로 감소하면 극대 열유속점까지의 열유속 증가는 완만해지며, 극대 열유속은 $H = 3$ 일 때 (Fig. 10)와 비교해보면 $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 의 경우 22%까지 감소하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14는 가열 벽면으로부터의 열유속과, 가열 벽면에 가장 인접한 격자점 ($y/s = 0.0035$)에서의 x 성분 속도와의 관계를 나타내고 있는 수치계산결과이다.

계단면 이후의 열유속의 변화는 단면의 확장 개시점 ($X = 0$)에서의 최소값으로부터 유동이 진행됨에 따라 급격하게 증가하여 재부착점 부근에서 최

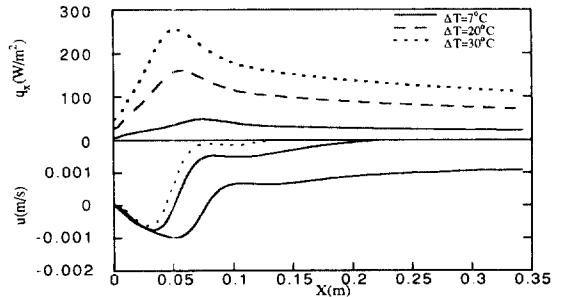


Fig. 14 Local wall heat flux distributions, and wall adjacent streamwise velocity profiles for $u_0 = 0.5$ m/s

대값을 갖은 후 단조로운 감소를 하고 있다. 계단벽면에 근접한 곳에서의 역류속도는 그 극대값이 존재하며, 유동이 진행됨에 따라 속도는 0이 된 후 (재부착점) 부호가 바뀌어 서서히 증가한다. 재부착길이 및 극대 열유속점의 위치는 가열벽면의 온도 증가에 의한 부력의 영향이 증가할수록 감소하고 있다. 낮은 부력수준 ($\Delta T = 7^\circ\text{C}$)에서는 $X_r > X_{\max}$ 이고, ΔT 가 증가하여 재순환영역의 크기가 감소하면 $X_{\max} > X_r$ 이 되어 극대열유속점과 재부착점의 위치가 상반되나, 벽면에 인접한 곳에서의 속도변화 du/dx 가 최대인 점과 일치한다.

5. 결론

윌리엄 간섭계를 사용하여 가열 벽면으로부터의 열유속을 측정함으로써 후향계단위를 흐르는 유체 유동에 미치는 부력의 영향이 검토되었다. 유동속도 및 온도분포는 수치해석 방법으로 구하였으며, 계산된 열유속이 실험결과와 양호한 일치율을 보임으

로써 전열 측정에 설리렌 간섭계의 유용성을 제시 하였다.

계단면에서 박리된 유선은 가열 벽면에 재부착하며, 그 내부는 타원형의 재순환영역을 형성한다. 재순환영역 및 재부착길이는 입구 속도에 비례하여 그 크기가 증가하나, 부력의 영향이 증가함에 따라 감소하였다.

계단면 이후의 열유속의 변화는 단면의 확장 개시점의 최소값으로부터 유동이 진행됨에 따라 급격하게 증가하여 극대값에 도달한 후, 단조로운 감소를 한다. 열유속은 가열벽면의 온도에 의한 부력의 영향이 증가할수록 전체 유동장에 걸쳐 증가하였으나, 재순환영역내에서는 입구속도의 증가에 따라 감소하고, 재부착점 하류에서는 순부력의 영향으로 $u_0^{1/3}$ 에 비례하여 증가하였다. 채널높이의 증가에 의한 전체 유동장의 열유속 변화는 완만하여 극내열유속은 감소하며, 극대 열유속점의 위치는 벽면에 인접한 곳에서의 유동방향 속도 변화가 최대인 점과 일치하였다.

강한 역압력구배의 작용에 의한 추가적인 재순환 영역은 확장비, 입구속도 및 가열벽면의 온도 증가에 따라 형성되었다.

후 기

이 연구는 92년도 한국과학재단 연구비 지원(과제번호 : KOSEF 923-0900-003-1)하에 이루어졌으며, 이에 대해 관계자에게 감사드린다.

참 고 문 헌

(1) Merzkirch, W.F., 1965, "A Simple Schlieren Interferometer System," AIAA Journal, Vol. 3, pp. 1974~1976.
 (2) Sernas, V., Fletcher, L.S. and Jones, J.A., 1972, "An Interferometric Heat Flux Measuring Device," ISA Transaction, Vol. 11, No. 4, pp. 346~357.
 (3) Sernas, V., Fletcher, L.S., 1970, "A Schlieren Interferometer Method for Heat Transfer Studies," J. of Heat Transfer, Vol. 92, pp. 202~204.
 (4) 이재현, 남평우, 박상동, 조성환, 1989, "전자장비 채널에서의 혼합대류에 관한 연구," 대한기

계학회 논문집, 제13권, 제4호, pp. 771~779.
 (5) Eaton, J.K., Johnson, J.P., 1981, "A Review of Research on Subsonic Turbulent Flow Reattachment," AIAA Journal, Vol. 10, pp. 1093~1100.
 (6) Simpson, R.L., 1981, "A Review of Some Phenomena in Turbulent Flow Separation," J. of Fluid Engineering, Vol. 103, pp. 520~530.
 (7) 김성초, 1989, "후향단면에서 재부착하고 재전개하는 2차원 비압축성 흐름 해석," 박사학위논문, 한국과학기술원.
 (8) Armaly, B.F., Durst, F., Pereira, J.C.F., Schönung, B., 1983, "Experimental and Theoretical Investigation of Backward-Facing Step Flow," J. Fluid Mechanics, Vol. 127, pp. 473~496.
 (9) Goldstein, R.J., Erickson, V.L., Olson, R.M., Eckert, E.R.G., 1970, "Laminar Separation, Reattachment, and Transition of the Flow Over a Downstream-Facing Step," J. Basic Eng., Vol. 92, pp. 732~741.
 (10) 백세진, 유정열, 1989, "박리-재부착 이후의 재발달 난류경계층(I)," 대한기계학회논문집, 제13권, 제4호, pp. 780~788.
 (11) 김경천, 정면균, 1985, "2차원 수직벽을 지나는 재부착 박리 전단층의 난류구조에 관한 연구(I)," 대한기계학회 논문집, 제9권, 제4호, pp. 403~413.
 (12) 백세진, 유정열, 1989, "박리-재부착 이후의 재발달 난류경계층(II)," 대한기계학회 논문집, 제13권, 제5호, pp. 999~1011.
 (13) 박병서, 성형진, 정면균, 1989, "급확대-축소 연결부 주변의 원관 난류 유동에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제13권, 제6호, pp. 1269~1281.
 (14) 이규환, 김상균, 유제청, 1989, "Step 위를 지나는 2차원 층류 점성비압축성 유체유동에 관한 유한요소 해석," 대한기계학회 '89년도 춘계 학술대회 초록집(II), pp. 114~117.
 (15) Taein Ohm, Dong-soon Jang, Hyungkee Yoon, 1989, "Parametric Calculation of Reattachment Length in Axisymmetric Sudden-Expansion Flows," 대한기계학회 '89년도 춘계 학술대회 초록집(II), pp. 303~306.
 (16) Aung, W., 1983, "Separated Forced Convec-

- tion," Proceedings of the ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference, Vol. 2, pp. 499~515.
- (17) Sparrow, E.M., Kang, S.S., 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.
- (18) Aung, W., 1983, "An Experimental Study of Laminar Heat Transfer Downstream of Back-step." J. Heat Transfer, Vol. 105, pp. 823~829.
- (19) Aung, W., Baron, A., 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.
- (20) Vogel, J.C., Eaton, J.K., 1985, "Combined Heat Transfer and Fluid Dynamic Measurements Downstream of a Backward-Facing Step," J. Heat transfer, Vol. 107, pp. 922~929.
- (21) Patankar, Suhas V., 1989, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill book company, New York, pp. 79~126.