

와동간의 상호작용이 경계층 및 열전달에 미치는 영향에 관한 연구 (I)

- Common flow down에 관하여 -

홍철현*, 양장식**, 이기백***
(1999년 8월 14일 접수)

An Experimental Study on the Effects of the Boundary Layer and Heat Transfer by Vortex Interactions (I)

- On the common flow down -

Cheul-Hyun Hong, Jang-Sik Yang and Ki-Baik Lee

Key Words : Vortex Pairs(와동쌍), Heat Transfer(열전달), Longitudinal(종방향), Half Delta Wing(반삼각익), Thermochromatic Liquid Crystal(액정), Five-Hole Pressure Probe(5공 프로브)

Abstract

This paper describes the results of an experimental investigation of the flow characteristics and the heat transfer rate on a surface by interaction of a pair of vortices. The test facility consists of a boundary-layer wind tunnel with a vortex introduced into the flow by half-delta wings(vortex generators) protruding from the surface. In order to control the strength of the two longitudinal vortices, the angles of attack of the vortex generators are varied from 20 degree to 45 degree, but spacings between the vortex generators are fixed to 4 cm. The 3-dimensional mean velocity downstream of the vortex generators is measured by a five-hole pressure probe, and the hue-capturing method using the thermochromatic liquid crystals has been used to provide the local distribution of the heat transfer coefficient. By using the method mentioned above, the following conclusions are obtained from the present experiment. The boundary layer is thinned in the regions where the secondary flow is directed toward the wall and thickened where it is directed away from the wall. The peak augmentation of the local heat transfer coefficient occurs in the downwash region near the point of minimum boundary-layer thickness. Streamwise distributions of averaged Stanton number on the measurement planes show very similar trends for all the cases($\beta=20^\circ$, 30° and 45°).

1. 서론

와동과 경계층의 상호작용은 실제 공학적 관심의 대상이 되는 많은 유동에서 나타난다. 이들 중 난류 경계층에서 종방향 와동(longitudinal vortex)은 많은 경우 자연적으로 또는 인위적으로 발생한

다. 자연적으로 발생하는 경우는 주로 쌍으로 나타나며 그 예로 표면으로부터의 돌출물에 의한 말굽와동(horseshoe vortex) 등을 들 수 있다. 종방향 와동과 경계층 사이의 상호작용은 유체역학 및 열전달 분야에서 중요한 현상으로 인식되고 있다. 종방향 와동이 유체 유동에 미치는 영향은 크게 외부 및 내부 유동으로 구분할 수 있다. 외부유동의 경우, 종방향 와동은 비행체의 비행시 양력성분을 발생시키고, 박리를 억제하는 효과가 있으며 실속부근에서 비행 성능의 임계 성능에 중요한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.⁽¹⁾ 또한 내부 유동의 경우, 터빈 익렬 내에서 발생하는 통로와

* (주) 대우정밀, 기술연구소

** 회원, 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

*** 회원, 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

E-mail : hopelee@hyowon.cc.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2300 FAX : (051)512-5236

동(passage vortex), 말굽와동, 모서리와동(corner vortex) 등은 가스 터빈 익렬 통로 내의 열전달 현상에 지대한 영향을 미치며, 덕트 내의 유동에서는 유동 박리 억제나 압력 손실의 회복 등에 기여하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 이와 같이 와동과 경계층의 상호작용으로 인한 유익 또는 무익한 효과를 제어하기 위해 와동발생기(vortex generator)를 설치하여 경계층의 발달을 억제하거나 압력손실을 줄이는 방안 및 열전달을 증진시키는 방안들이 연구되고 있다.⁽²⁾ Pauley 등⁽³⁾은 와동발생기의 영각(angle of attack)을 변화시켰을 때 두 가지의 유동 형태, 즉 벽면으로부터 멀어지는 유동(common flow up)과 벽면으로 향하는 유동(common flow down)에 관한 연구를 수행하였다. Wendt 등^(1, 4)은 난류 경계층에 폭방향으로 배열된 와동발생기의 간격 변화에 따라 와동이 벽면에 근접해지며, 이로 인해 와동과 경계층의 상호작용이 약화됨을 확인하였다. Reichert 등⁽⁵⁾은 S형태의 덕트 내에서 와동 발생기의 위치와 간격, 형상, 배열을 변화시켜 압력과 속도장을 측정하였다. 이들의 연구 결과에 의하면 와동발생기의 배열에 따라, 전체 압력의 왜곡(distortion)은 개선되고 박리영역도 감소하였지만 전압력 회복에는 크게 기여하지 못함을 밝혔다. Eibeck 등⁽⁶⁾은 와동발생기 하류에서의 와동과 경계층의 상호작용에 관한 벽면의 열전달 특성에 대해서 연구를 수행하였고, 최근에는 열교환기로서의 와동발생기의 성능에 관한 연구가 폭넓게 이루어지고 있다. Fiebig⁽⁷⁾은 종방향 및 횡방향의 와동에 대해 종방향 와동의 경우가 횡방향의 와동에 비해 유동 손실이 적고 열전달 효과가 크게 나타난다고 하였다. Zhu 등⁽⁸⁾은 덕트 내에 리브(rib)와 사각날개를 조합하여 열전달 효과를 연구하였다.

이상과 같은 기존의 연구들은 와동발생기의 하류에서 발생하는 벽면의 열전달 특성을 이해하기 위해 열전대를 사용하였다. 열전대를 사용할 경우 측정점이 많아야 되고, 실시간에 열전달 특성을 해석할 수 없다. 이에 반해 액정 보정기법인 색상포착 기법⁽⁹⁻¹⁴⁾(hue-capturing technique)은 열전대, 온도 감지 형광물질, 나프탈렌 승화법기법 보다 분해능이 좋고 실시간에 열전달 특성을 감지할 수 있는 특성을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 연구($\beta \leq 24^\circ$)와 달리 와동발생기의 영각(β)을 20° , 30° , 45° 로 더 크게 증가시켜 와동발생기 하류에서 발생하는

와동의 구조와 이 와동에 의한 벽면의 열전달 특성을 5공 프로브와 실시간에 측정 가능한 색상포착기법을 이용해 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 유동장 측정

Fig. 1의 (a)와 (b)는 와동발생기인 반삼각익의 형상과 영각 그리고 와동발생기 하류의 속도장 측정 및 열전달 측정을 하기 위한 장치도이다. 와동발생기의 영각(β)는 대칭으로 설치된 와동발생기의 중심선에서 와동발생기까지의 반시계방향의 각($+$)으로 정의하였다.

본 실험에 사용된 아음속 풍동의 전체 크기는 높이, 폭, 길이가 각각 10cm, 40cm, 200cm이다. 반삼각익의 크기는 밑변(L)이 5cm, 높이(H)가 2cm이고, 반삼각익은 아음속 풍동의 수축부 출구로부터 58cm 떨어진 위치에 설치하였다. 와동간의 간격을 조절하기 위해 주유동 방향에 대한 반삼각익의 영각(β)을 20° , 30° , 45° 로 변화시켰고, 반삼각익 사이의 거리는 반삼각익의 중간 위치에서 4cm로 고정시켰다. 각각의 영각에 대해 와동발생기의 끝단으로부터 후방 5cm, 10cm, 20cm, 35cm에서 유동장을 측정하였다. 각 측정단면에서 측정위치로 이송하기 위해 3축 이송장치를 사용하였다. 각 측정단면에서 유동장을 측정하기 위해 두께 0.5cm의 아크릴에 0.4cm의 홈을 가공하여 5공 프로브를 이송할 수 있게 하였고, 홈으로부터 누수 공기를 최대한 억제하기 위해 5공 프로브에 슬라이딩 판을 부착하였다.

각 측정단면에서 압력 측정점은 Y , Z 방향으로 0.5cm간격으로 측정점을 선택하였다. Y 방향은 좌측 벽면으로부터 5cm 떨어져있는 측정점으로부터 측정되었고, Z 방향은 아래 벽면에서 0.3cm 떨어져 있는 측정점으로부터 측정하였다. 5공 프로브의 압력데이터는 각 압력공과 연결된 미세 압력 변환기(FCO44)로 전달되고, 미세 압력계의 압력은 다채널 A/D변환기(PCL-718)를 통해 디지털 신호로 변환되어 IBM PC로 저장된다. 이때 5공 프로브의 압력 데이터의 오차를 줄이기 위해 각 압력공의 압력을 500회 8번 측정하여 앙상블 평균값을 데이터로 사용하였다. 데이터를 저장한 후에는 A/D변환기의 디지털 출력포트에서 3차원 이송장치의 스텝핑 모터 제어부에 디지털

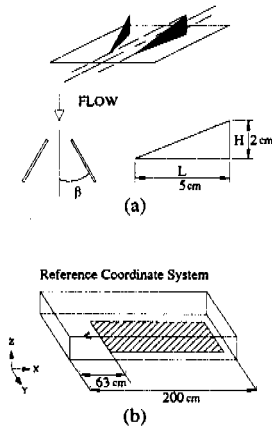


Fig. 1 Schematic diagram of the test facility
 (a) angle of attack of half-delta wing and shape
 (b) heat transfer surface

신호를 입력하여 다음 측정 위치로 자동으로 이동되도록 하였다. 이와 같은 장치로부터 획득된 데이터와 5공 프로브의 보정 데이터를 이용해 속도장을 구하였다.⁽¹⁵⁾

2.2 열전달 실험장치 및 방법

본 실험에서의 열전달 측정은 액정을 이용한 색상 포착 기법을 사용하였고, 실제 온도장 측정에 앞서 액정의 색상에 대한 온도 값을 구하기 위하여 보정 실험을 수행하였다. 제작된 보정장치를 이용해 액정의 온도 변화에 따른 색상(Hue) 변화를 비디오 카메라로 촬영하기 위해 Fig. 2와 같은 장치를 구성하였다.

보정 실험은 광원 이외의 모든 광을 차단하기 위하여 암실에서 수행되었으며 보정장치는 실제 실험면과 동일한 위치에 설치하였다. 보정장치와 비디오 카메라와의 거리(L)는 150cm 이며 조명과 보정용 판이 이루는 각(θ)은 60° 로 고정하였다. 온도와 액정의 색상변화를 동시에 측정하기 위해 비디오 카메라와 표준온도계를 사용하였고, 이 온도계의 분해능은 0.01°C이며 정확도는 ± 0.1°C이다.

보정 실험은 각기 다른 시간에서 4회 측정하였고, Fig. 3은 액정의 색상 대 온도 값을 나타낸 것이다. 이 결과로부터 4회 측정한 값을 앙상블 평균값을 취하여 색상 대 온도의 변화를 나타내

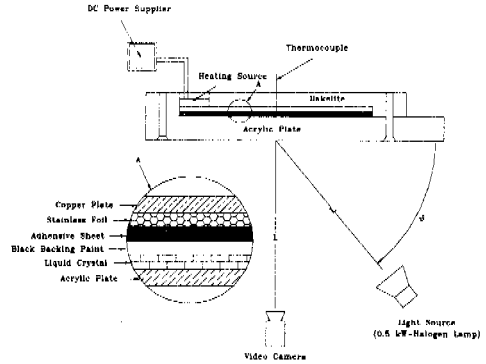


Fig. 2 Schematic diagram of calibration apparatus for local hue versus temperature relation

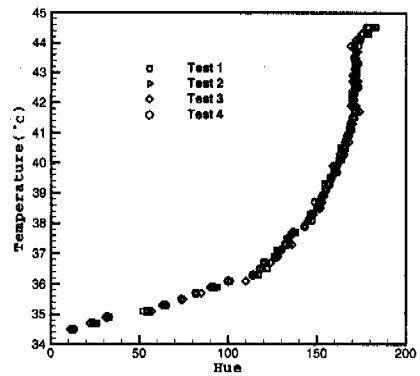


Fig. 3 Local hue versus temperature relation

는 보정곡선을 구하였다. 다음 식은 색상 대 온도의 보정곡선식이다.

$$T = 34.976 + 0.048852 \times \text{Hue} - 0.0017587 \times \text{Hue}^2 + 1.793 \times 10^{-5} \times \text{Hue}^3 - 6.303 \times 10^{-8} \times \text{Hue}^4 \quad (1)$$

Fig. 4는 와동발생기의 영각의 변화에 따른 와동발생기의 하류의 열전달특성을 측정하기 위한 장치도이다. 두께, 가로, 세로의 크기가 1×40×40cm인 아크릴판 위에 액정(R35C5W)을 분무기 (air brush)로 균일하게 뿌리고, 조명에 의해 액정에 비추진 광이 액정에 의해 편광되어 반사된 광 이외의 광을 흡수하기 위해 액정 위에 검정페인

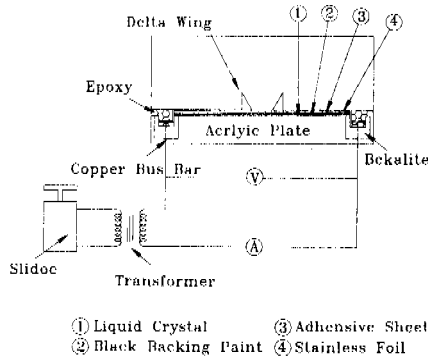


Fig. 4 Experimental apparatus for the measurement of heat transfer rate on the wall surface

트(BBG1)를 균일하게 분부기로 뿌렸으며, 그리고 액정을 가열시키기 위해 액정의 온도 보정용 가열판과 달리 가열원으로 스테인리스 박판(0.005×35×22cm)을 사용하였다. 스테인리스 박판을 가열하기 위해 직경 0.1cm인 동선을 납땀하였고, 아크릴판 위에 깊이, 폭, 길이 0.5×10×23cm인 홈을 앤드밀로 가공한 후 그 홈 사이에 바클라이트를 에폭시로 접착하고 그 홈에 동선을 넣고 에폭시로 접착하였다. 바클라이트는 동선의 열을 단열시키기 위해 이용하였으며, 액정과 스테인리스 박판은 양면접착제를 이용해 접착하였고 제작된 가열판의 전체 두께는 0.015cm였다. 스테인리스 박판을 가열시키기 위해 전원장치로 슬라이더스(slidoc)와 변압기(transformer)를 설치하였다. 슬라이더스의 용량은 3kVA이며, 슬라이더스로 가열판(스테인리스 박판)에 전원을 공급할 경우 가열판의 저항이 작기 때문에 슬라이더스에 고부하가 걸려 무리를 주게 되므로 1차 전원으로 슬라이더스를 사용하였다. 1차 전원에서 출력된 전원을 병렬로 연결된 3개의 변압기에 연결하여 2차 전원으로 사용하였다. 2차 전원에서 출력된 저전압, 고전류의 전원을 가열판에 연결되어 있는 동선에 인가하여 스테인리스 박판을 등열유속으로 만들었고, 1차 전원인 슬라이더스의 전압변화에 의해 전체 가열판의 열유속량을 조절할 수 있게 하였다. 또한 전압계(Tektronix, FG503)와 전류계(Sanwa, CAM-201s)를 설치하여 전압과 전류를 이용해 스테인리스 박판에 인가된 열유속을 계산하였다.

Table 1 Test condition

Boundary layer thickness (δ)	1.3cm
Displacement thickness (δ^*)	0.417cm
Momentum thickness (θ)	0.275cm
Shape factor ($H_{sf} = \delta^*/\theta$)	1.52
Reynolds number($Re_L = U_\infty L/\nu$)	31400
Turbulent intensity	0.6%

3. 결과 및 고찰

3.1 실험조건

시험부 내로 유입되는 유동특성을 조사하기 위해 I형 열선 프로브 및 경계층 프로브를 이용해 평균속도, 경계층두께, 난류강도를 측정하였다. 측정위치는 반삼각익이 설치된 위치($X=58cm$)에서 이루어졌으며, 측정은 3축 이송장치를 이용하여 아래 벽면으로부터 0.05cm 간격으로 각 측정점에서 수행하였다. 측정데이터로부터 계산된 본 실험의 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

3.2 Common flow down

Common flow down에 대한 유동특성은 한동주⁽¹⁶⁾에 상세하게 기술되어 있으므로 영각 30°에 대해서만 기술하고자 한다. 유동특성을 조사하기 위하여 각 경우에 대해 측정 단면에서의 속도장(velocity field)을 구하고 이로부터 유동방향 와도(streamwise vorticity, $\omega_x = (\frac{\partial w}{\partial Y} - \frac{\partial v}{\partial Z})$)와 주유동 방향의 속도분포를 구하였다. 유동방향 와도는 각 측정점에서의 와도 값을 상류측 속도 U_∞ 로 나눈 값(ω_x/U_∞)으로 나타내었다.

Fig. 5는 영각이 30°일 때 각 단면($X=5, 10, 20, 35cm$)에서 2차 유동(secondary flow)의 속도벡터를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 각각 반시계방향과 시계방향으로 회전하는 두 개의 쌍와동이 발생함을 알 수 있다. 또한 측정단면 하류로 이동할수록 와동의 속도벡터 크기가 감소하고 있음을 알 수 있고, 와동과 와동 사이의 간격이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 각운동량의 보존에 의해 하류로 이동할수록 와동에 의한 속도벡터의 크기가 상대적으로 감소하고 또한

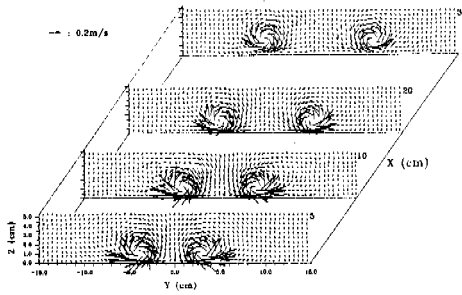


Fig. 5 Secondary velocity vector at $\beta = 30^\circ$

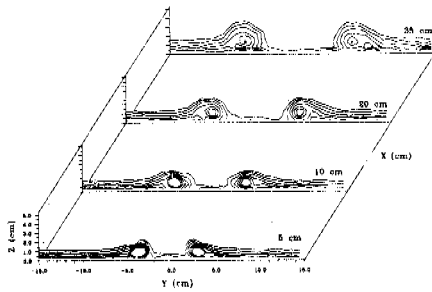


Fig. 6 Streamwise velocity contours at $\beta = 30^\circ$
($u/U_\infty = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.95, 0.99$)

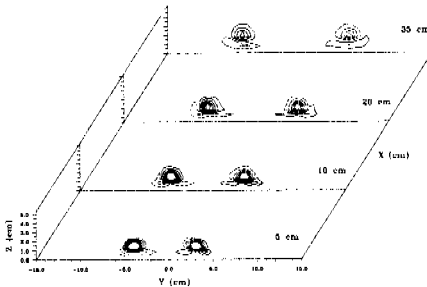


Fig. 7 Streamwise vorticity contours at $\beta = 30^\circ$
($\omega_x/U_\infty = \pm 0.1, 0.25, 0.35, 0.5, 0.55, 0.6$ [1/cm] solid line: positive value, dotted line: negative value)

난류확산으로 인해 와동과 와동 사이의 거리가 증가하게 된다.

Fig. 6은 $X=5, 10, 20, 35\text{cm}$ 에서 주유동방향의 속도를 상류측 유동속도로 무차원(u/U_∞)하여 나타난 주유동방향의 등속도 분포이다.

그림에서 바깥쪽 영역은 자유유동속도를 의미

하기 때문에 주유동방향의 등속도 분포에서 알 수 있듯이 와동 상호간의 작용은 경계층 두께변화에 지대한 영향을 미침을 알 수 있다. 폭방향의 속도구배 ($\partial v/\partial Y$)가 $X=5\text{cm}$ 에서 가장 크기 때문에 경계층 두께가 얇아지나 하류로 이동할수록 와동의 중심 영역에서의 주유동속도의 결손과 난류확산에 의해 와동의 세기가 약해지므로 폭방향의 속도구배 ($\partial v/\partial Y$)가 감소하게 된다.

이로 인해 와동과 와동 사이의 경계층은 얇아지나 와동의 바깥영역은 경계층이 두꺼워진다. 따라서 유동이 벽면으로 향하는 downwash 영역에서는 경계층이 얇아지고 유동이 벽면으로부터 멀어지는 upwash 영역에서는 경계층이 증가하게 된다. 또한 하류로 이동할수록 쌍와동의 간격은 증가하고 확산에 의해 와동의 형상은 커지게 된다. 본 실험의 경우 하류로 이동할수록 와동과 와동 사이의 경계층 두께의 변화는 거의 없는 것으로 나타났지만 upwash 영역에서는 경계층이 증가함을 확인할 수 있었다. Pauley⁽³⁾의 경우 와동과 와동 사이의 경계층 두께는 하류로 이동할수록 증가한다고 하였다. 그러나 Pauley 실험의 경우 와동과 와동 사이의 경계층 두께의 변화는 반삼각익의 설치 위치에서 43cm 이상일 경우에 경계층의 변화가 뚜렷이 나타났지만 43cm 미만의 경우에는 경계층 두께 변화가 본 실험의 결과와 같이 거의 없는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 자유유동속도 (U_∞)에 대한 유동방향 와도를 등와도 성분(0.1 ~ 0.6)으로 각 측정단면에서 나타낸 것이다. 등와도 성분에서 알 수 있듯이 하류로 이동할수록 와동과 와동 사이의 상호작용은 아주 약하게 작용하고 있다. $X=5, 10, 20\text{cm}$ 에서는 와동의 중심 형상은 원형에 가깝지만, $X=35\text{cm}$ 에서는 난류확산에 의해 와도성분이 평활화되어 폭방향으로 확장된 타원형 형상을 나타냈다. Westphal 등⁽¹⁷⁾의 연구에 의하면 반삼각익이 단지 하나만 설치되어 있는 경우에도 이와 같은 현상이 발생한다고 하였다. 그리고 와동과 벽면의 접촉조건에 의해 벽과 주와동(primary vortex) 사이에 반대 부호의 2차 와동(secondary vortex)이 존재하였고, 이 2차 와동은 주와동에 의해 소산되어 와동의 upwash 영역으로 이동함을 알 수 있다. 그러나 이 2차 와동이 주와동으로 권입(rolling-up)되어지는 현상은 관찰할 수 없었다.

Table 2 The uncertainty of Stanton number with odds of 20 to 1

X_i	Value	δX_i	$(\delta X_i/X_i) \times 100(\%)$
V	$2(V)$	$0.12(V)$	0.6
I	$46(A)$	$1(A)$	2.17
A	$0.105(m^2)$	$0.001(m^2)$	0.95
ρ_∞	$1.2822(kg/m^3)$	$0.0111(kg/m^3)$	0.87
U_∞	$10(m/s)$	$0.23(m/s)$	2.3
$\delta(\Delta T)$	$8.0(^{\circ}C)$	$0.33(^{\circ}C)$	4.125
Total Stanton number uncertainty			
$\delta(St)/St = 5.38(\%)$			

3.3 벽면에서의 국소 열전달분포

반삼각의 하류에서 발생하는 벽면의 국소 열전달분포를 다음과 같이 Stanton수로 나타내었다.

$$St = \frac{\dot{q}}{\rho_\infty C_p U_\infty (T_w - T_\infty)} \quad (2)$$

Stanton수의 불확실성은 Chauvenet 판별법⁽¹⁸⁾과 Abernethy 등⁽¹⁹⁾의 방법으로 해석하였고, 20대 1의 신뢰도에서 Stanton수의 불확실성에 대한 데이터를 Table 2에 나타내었고, 비열 C_p 는 온도변화에 대해 민감하지 않기 때문에 일정한 것으로 가정하였다. 또한 ΔT 는 $(T_w - T_\infty)$ 를 의미한다.

Fig. 8~10은 영각이 20°, 30°, 45° 일 때 벽면 전체의 열전달계수를 Stanton수로 나타낸 것이 것이다. 그리고 Stanton수는 실제 Stanton수를 1000배 해서 나타내었고, 등 Stanton수 곡선은 0.00015 간격으로 표현하였다.

영각이 45° (Fig. 10)일 때는 전 영역에서 두 개의 최대값을 갖는 국소 열전달분포를 보였지만, 영각이 30° (Fig. 9)인 경우는 X=10cm 단면 이후, 영각이 20° (Fig. 8)인 경우에는 X=15cm 이후에서 두 개의 최대의 국소 열전달이 나타났다. 이는 영각이 증가할수록 와동과 와동 사이의 간격이 증가하므로 와동 상호간의 작용이 약해지기 때문에 영각이 증가할수록 전 영역에서 두 개의 최대값을 갖는 국소 열전달분포를 나타내게 된다.

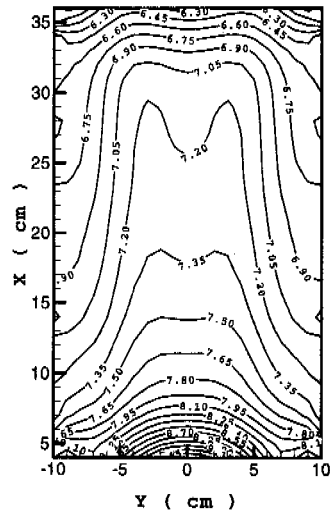


Fig. 8 The contours of $St \times 1000$ ($\beta = 20^\circ$)

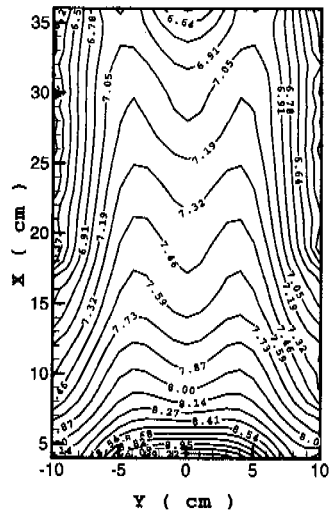


Fig. 9 The contours of $St \times 1000$ ($\beta = 30^\circ$)

Fig. 8~10의 결과에서 알 수 있듯이 하류로 이동할수록 두 개의 최대값 사이의 간격은 영각이 증가할수록 증가함을 알 수 있다. 또한 각각의 최대값의 위치는 와동의 중심 위치와 거의 일치하며, 이 위치는 와동발생기로부터 발생한 와동이 downwash영역으로 행하면서 벽면의 표면에

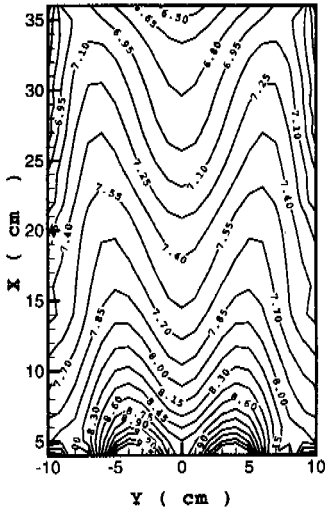


Fig. 10 The contours of $St \times 1000$ ($\beta = 45^\circ$)

부착(attachment)될 때 발생하는 것으로 판단된다.

3.4 각 단면에서의 국소 열전달분포

Fig. 11~14는 측정단면 $X=5, 10, 20, 35\text{cm}$ 에서 영각의 변화에 따른 국소 열전달분포를 나타낸 것이다. Fig. 11은 측정단면 $X=5\text{cm}$ 에서 영각의 변화에 따른 국소 열전달분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 영각이 45° 인 경우에는 두 개의 최대값을 나타내고 있지만 영각이 $20^\circ, 30^\circ$ 인 경우는 최대값이 하나인 형태로 나타났다. 그리고 모든 영각에 대해 두 개의 최소 열전달 값을 가짐을 확인할 수 있다. 이 두 개의 최소값은 와동에 의해 발생된 유동이 downwash 영역에서 upwash 영역으로 이동할 때 발생하는 현상이며, 벽면에서의 와동박리에 의해 발생하는 것으로 판단된다. 또한 폭방향(Y방향)으로 열전달 구배는 45° 인 경우가 가장 심함을 알 수 있고, 영각이 45° 인 경우가 영각 $20^\circ, 30^\circ$ 에 비해 최대 열전달값이 각각 약 7%와 3%정도 증가하였다.

Fig. 12는 측정단면 $X=10\text{cm}$ 에서 영각의 변화에 따른 국소 열전달분포를 나타낸 것이다. 영각이 $30^\circ, 45^\circ$ 인 경우에 두 개의 최대값을 나타냈지

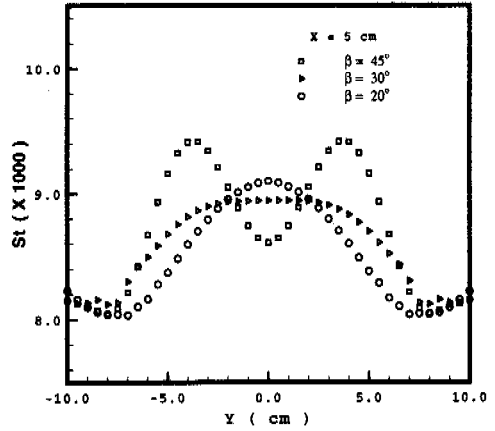


Fig. 11 Spanwise profiles of Stanton number with $\beta = 20^\circ, 30^\circ$ and 45° at $X=5\text{cm}$

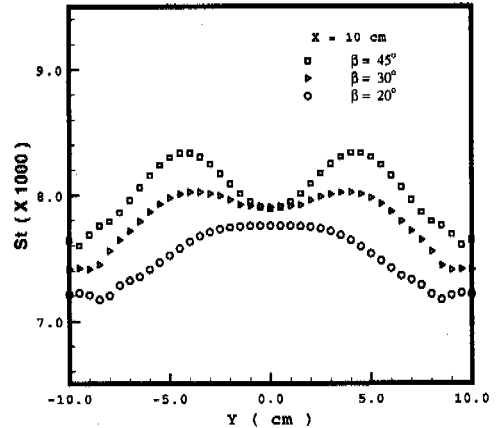


Fig. 12 Spanwise profiles of Stanton number with $\beta = 20^\circ, 30^\circ$ and 45° at $X=10\text{cm}$

만 영각이 20° 인 경우는 Fig. 11과 마찬가지로 최대값이 하나인 형태로 나타났다.

Fig. 11과 비교해 볼 때 국소 열전달분포의 최대값 및 최소값의 위치가 폭방향으로 멀어짐을 확인할 수 있다. 이는 하류로 갈수록 와동간의 상호작용이 약해짐을 의미한다. 또한 영각이 45° 인 경우의 최대 열전달값이 영각 20° 에 비해 약 9.5%, 영각 30° 에 비해 약 4%정도 증가하

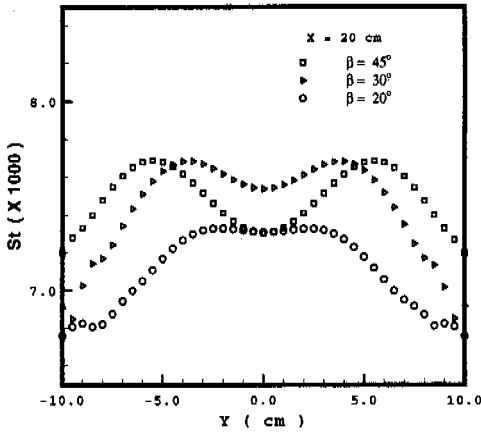


Fig. 13 Spanwise profiles of Stanton number with $\beta = 20^\circ, 30^\circ$ and 45° at $X=20\text{cm}$

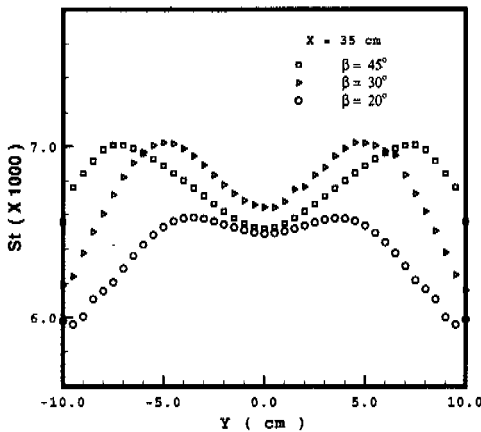


Fig. 14 Spanwise profiles of Stanton number with $\beta = 20^\circ, 30^\circ$ and 45° at $X=35\text{cm}$

였다.

Fig. 13은 측정단면 $X=20\text{cm}$ 에서 영각의 변화에 따른 국소 열전달분포를 나타낸 것이다. Fig. 13은 Fig. 11, 12와 달리 국소 열전달분포의 최대값이 영각의 변화에 따라 모두 두 개로 나타났다. 그리고 최대값 사이의 위치는 영각이 증가할수록 증대됨을 알 수 있다. 영각 30° 인 경우가 영각 45° 인 경우보다 최대값의 열전달분포가 약간 증가함을 알 수 있고, 난류확산으로 인해 와동이

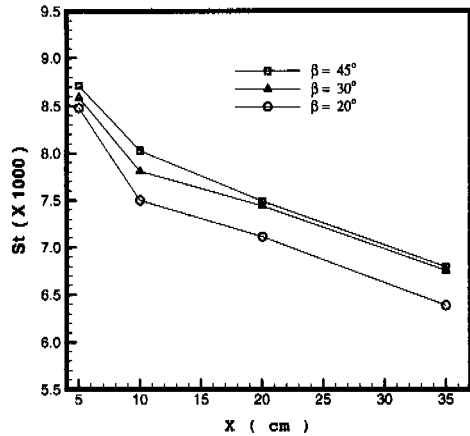


Fig. 15 Streamwise distributions of averaged Stanton number on the measurement planes

약해지기 때문에 전체적인 열전달분포값은 상류에 비해 감소하고 있다.

Fig. 14는 Fig. 13과 유사한 경향을 보이고 있지만 영각 20° 인 경우는 열전달분포곡선이 Fig. 13의 경우에 비해 뚜렷한 두 개의 최대값이 나타나며 영각 30° 와 영각 45° 의 국소 열전달분포의 최대값이 거의 동일한 값을 유지하였다.

3.5 주유동 방향의 평균 열전달분포

Fig. 15는 각 측정단면에서의 평균 열전달분포를 나타낸 것이다. 각 측정단면에서의 평균 열전달분포는 Simpson의 적분방법으로 계산하였다.

그림에서 알 수 있듯이 모든 영각에 대해 평균 열전달 분포는 유사한 경향을 나타냈으며, 모든 영각에 대해 $X=20\text{cm}$ 이후에서는 평균 열전달 분포값의 감소폭이 거의 일정한 값(0.0004)으로 일정하게 유지되었고, 영각 45° 인 경우가 가장 열전달이 잘 되었다. 그리고 모든 영각에 대해 $X=10\text{cm}$ 이전에서는 평균 열전달분포가 급격히 변화하였지만, $X=10\text{cm}$ 이후에서는 완만하게 감소하였다.

4. 결 론

쌍와동의 상호작용에 의한 유동특성을 5공 프로브를 이용해 측정하고, 측정된 유동특성을 토

대로 액정을 이용해 실시간에 표면의 열전달 특성을 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 두 와동간의 간격은 하류로 이동할수록 멀어지며, 와동의 세기가 표면의 열전달 증대에 지배적인 역할을 함을 알 수 있었다.

(2) 쌍와동에 의해 하류로 이동할수록 두 개의 최대 열전달계수의 값이 뚜렷하게 나타났으며 이 위치는 쌍와동의 중심 영역의 위치와 일치하였다.

(3) 하류로 갈수록 와동간 중심부의 간격이 넓어지고 와동의 난류확산에 의해 벽면에 미치는 영향이 작아져 벽면에서의 지속적인 열전달 증대가 하류 부분에까지 이루어지지 못하였다.

(4) $\beta = 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 의 경우 유동장 및 열전달분포는 유사한 경향을 보였지만, $\beta = 30^\circ, 45^\circ$ 의 경우가 $\beta = 20^\circ$ 비해 열전달이 잘 되었다.

후 기

이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 광모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Wendt, B. J. and Hingst, W. R., 1994, "Flow Structure in the Wake of a Wishbone Vortex Generator," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 11, pp. 2234~2240.
- (2) Deb, P., Biswas, G., and Mitra, N. K., 1995, "Heat Transfer and Flow Structure in Laminar and Turbulent Flows in a Rectangular Channel with Longitudinal Vortices," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 13, pp. 2427~2444.
- (3) Pauley, W. R. and Eaton, J. K., 1988, "Experimental Study of the Development of Longitudinal Vortex Pairs Embedded in a Turbulent Boundary Layer," *AIAA Journal* Vol. 26, No. 7, pp. 816~823.
- (4) Wendt, B. J., Grebert, I., and Hingst, W. R., 1993, "Structure and Development of Streamwise Vortex Arrays Embedded in a Turbulent Boundary Layer," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 2, pp. 319~325.
- (5) Reichert, B. A. and Wendt, B. J., 1993, "An Experimental Investigation off S-Duct Flow Control Using Arrays of Low Profile Vortex Generations," *AIAA Paper* 93-0019.
- (6) Eibeck, P. A. and Eaton, J. K., 1987, "Heat Transfer Effects of a Longitudinal Vortex Embedded in a Turbulent Boundary layer," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 109, pp. 16~24.
- (7) Fiebig, M., 1997, "Vortices and Heat Transfer," *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*, Vol. 77, No. 1., pp. 3~18.
- (8) Zhu, J. X., Fiebig, M., and Mitra, N. K., 1995, "Numerical Investigation of Turbulent Flows and Heat Transfer in a Rib-Roughened Channel with Longitudinal Vortex Generators," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 3, pp. 495~501.
- (9) Camci, C., Kim K., Hippensteele, S. A., and Pointsatti, P. E., 1993, "Evaluation of a Hue Capturing Based Transient Liquid Crystal Method for High-Resolution Mapping of Convective Heat Transfer on Curved Surfaces," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 311~318.
- (10) Akino, N., Kunugi, T., Ichimiya, K. Mitsushiro, K., and Usda, M. 1989, "Improved Liquid-Crystal Thermometry Excluding Human Color Sensation," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 558~565.
- (11) Hippensteele, S. A., Russell, L. M. and Torres, F. J., 1985, "Local Heat Transfer Measurements on a Large Scale-Model Turbine Blade Airfoil Using A Composite of a Heat Element and Liquid Crystals," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 107, pp. 953~960.
- (12) 양장식, 나중문, 이기백, 1995, "선형 터빈 캐스케이드 끝벽의 열전달 특성에 관한 연구," 대한기계학회, 제19권, 제9호, pp. 2386~2398.
- (13) 윤정환, 도덕희, 이상준, 1996, "TLC와 컬러

- 화상처리를 이용한 Hele-Shaw Cell 내부 대류 온도장 측정," 대한기계학회논문집(B), 제20권, 제3호, pp. 1114~1122.
- (14) 이기백, 김태영, 양장식, 1997, "색상포착기법과 수치 계산을 이용한 3차원 밀폐 공간 내의 자연 대류 연구," 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제12호, pp. 1595~1607.
- (15) 이기백, 양장식, 1995, "Cubic Spline 보간법을 이용한 5공 프로브의 보정과 그응용," 한국항공우주학회지, 제 23권, 제 2호, pp. 61~68
- (16) 한동주, 1999, "종방향 와동쌍의 상호작용과 유동특성에 관한 연구," 부산대학교 석사학위논문.
- (17) Westphal, F. V., Pauley, W. R., and Eaton, J. K., 1987, "Interaction Between a Vortex and a Turbulent Boundary Layer-Part 1: Mean Flow Evolution and Turbulence Properties," NASA TM 88361.
- (18) Holman, J. P., 1984, *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill.
- (19) Abernethy, R. B., Benedict, R. P., and Dowdell, R. B., 1985, "ASME Measurement Uncertainty," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 161~164.