

## 종방향 와동이 유체유동 및 열전달 특성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

양 장 식\*, 김 은 필\*

부산대학교 기계기술연구소, \*부경대학교 기계공학부

### An Experimental Study on the Effect of Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics by the Longitudinal Vortices

J. S. Yang, E. P. Kim

*Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University, 609-735, Korea*

*\*Division of Mechanical Engineering, Pukyong National University, 608-737, Korea*

(Received May 9, 2000; revision received July 24, 2000)

**ABSTRACT:** The flow characteristics and the heat transfer rate on a surface by interaction of a pair of vortices were studied experimentally. The test facility consisted of a boundary-layer wind tunnel with a vortex introduced into the flow by half-delta winglet protruding from the surface. In order to control the strength of the longitudinal vortices, the angles of attack of the vortex generators were varied from  $\pm 20$  degree to  $\pm 45$  degree, but spacings between the vortex generators were fixed to 4 cm. The 3-dimensional mean velocity measurements were made using a five-hole pressure probe. Heat transfer measurements were made using the thermochromatic liquid to provide the local distribution of the heat transfer coefficient. By using the method mentioned above, the following conclusions were obtained from the present experiment. The boundary layer was thinned in the regions where the secondary flow was directed toward the wall and thickened where it was directed away from the wall. The peak augmentation of the local heat transfer coefficient occurred in the downwash region near the point of minimum boundary-layer thickness.

**Key words:** Vortex pairs(와동쌍), Heat transfer(열전달), Half-delta winglet(반삼각익), Thermochromatic liquid crystal(액정), Five-hole pressure probe(5공 프로브)

#### 기 호 설 명

C<sub>p</sub> : 공기의 비열 [kJ/kg · K]  
 H : 반삼각익의 높이 [cm]  
 H<sub>sf</sub> : 형상계수  
 L : 반삼각익의 가로 길이 [cm]

Re<sub>L</sub> : Reynolds 수,  $\frac{UL}{\nu}$   
 T<sub>∞</sub> : 자유유동의 공기 온도 [°C]  
 T<sub>w</sub> : 가열판의 벽면 온도 [°C]  
 U<sub>∞</sub> : 자유유동의 유동속도 [m/s]  
 ρ<sub>∞</sub> : 자유유동의 공기 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]  
 δ : 경계층 두께 [cm]  
 δ\* : 베제 두께 [cm]  
 θ : 운동량 두께 [cm]

† Corresponding author

Tel.: +82-51-510-2477; fax: +82-51-512-5236

E-mail address: yangjs@hyowon.pusan.ac.kr

## 1. 서 론

와동과 경계층의 상호작용은 실제 공학적 관심의 대상이 되는 많은 유동에서 나타난다. 이들 난류 경계층에서 종방향 와동(longitudinal vortex)은 많은 경우 자연적으로 또는 인위적으로 발생한다. 이러한 종방향 와동에 대한 최근의 연구는 와동의 상호작용과 더불어 경계층 또는 열전달에 미치는 영향에 대해 수행되고 있으며, 와동발생기(vortex generator)의 적절한 디자인과 설치에 대해서도 연구가 진행되고 있다. Pauley와 Eaton<sup>(1)</sup>은 와동발생기의 영각(angle of attack)을 변화시켰을 때 두 가지의 유동형태, 즉 와동과 와동 사이의 유동이 벽면으로부터 멀어지는 유동(common flow up)과 벽면으로 향하는 유동(common flow down)에 관한 연구를 하였으며, Wendt and Hingst,<sup>(2)</sup> Wendt et al.<sup>(3)</sup>은 난류 경계층에 폭방향으로 배열된 와동발생기의 간격 변화에 따라 와동발생기 하류에서 발생하는 와동의 형태와 와동과 경계층의 상호작용에 관한 연구를 수행하였다. Eibeck et al.<sup>(4)</sup>은 와류발생기 하류에서의 와동과 경계층의 상호작용에 관한 벽면의 열전달 특성에 대해서 연구를 수행하였다. 또한 최근에는 열교환기로서의 와동발생기의 성능에 관한 연구가 폭넓게 이루어지고 있으며, Fiebig<sup>(5)</sup>은 종방향 및 횡방향의 와동에 대해 종방향 와동의 경우가 횡방향의 와동에 비해 유동 손실이 적고 열전달 효과가 크게 나타난다고 하였다. 또한 Zhu et al.<sup>(6)</sup>은 덕트 내에 리브(rib)와 사각날개를 조합하여 와동발생기 하류에서 발생된 열전달 효과를 연구하였다. 이러한 연구를 수행하는데 있어서 와동간의 상호작용은 매우 중요한 역할을 하며, 중요 변수로는 와동간의 간격, 강도, 표면으로부터의 와동의 높이 등으로 알려져 있고, 이러한 변수들은 와동발생기의 설치에 의해 조절될 수 있다. 따라서 와동간의 상호작용이 존재하는 유동이나 와동발생기를 사용하여 유동 및 열전달 효과를 제어해야 하는 경우에 와동간의 상호작용이 전 유동장에 미치는 영향에 대한 정확한 이해가 필요하다.

따라서 본 연구는 기존의 연구( $\beta \geq -24^\circ$ ,  $\beta \leq 24^\circ$ )와 달리 와동발생기의 영각( $\beta$ )을  $\pm 20^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ 로 더 증가(감소)시켜 와동발생기 하류에서 발생하는 와동의 구조와 이 와동에 의한 벽

면의 열전달 특성을 5공 프로브와 실시간에 측정 가능한 색상 포착 기법<sup>(8-12)</sup>을 이용해 연구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 유동장 실험장치 및 방법

Fig. 1의 (a)와 (b)는 와동발생기인 반삼각익의 형상과 영각 그리고 와동발생기 하류의 속도장 측정 및 열전달 측정을 위한 장치도이다. 와동발생기의 영각( $\beta$ )는 대칭으로 설치된 와동발생기의 중심선에서 와동발생기까지의 시계방향의 각을 (-), 반시계방향의 각을 (+)로 정의하였다.

본 실험에 사용된 아음속 풍동의 전체 크기는 높이, 폭, 길이가 각각 10 cm, 40 cm, 200 cm이다. 반삼각익의 크기는 밑변( $L$ )이 5 cm, 높이( $H$ )가 2 cm이고, 반삼각익의 설치 위치는 아음속 풍동의 수축부 출구로부터 58 cm 떨어진 위치에 설치하였다.

와동간의 간격을 조절하기 위해 주유동 방향에 대한 반삼각익의 영각( $\beta$ )을  $\pm 20^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ 로 변화시켰고, 반삼각익 사이의 거리는 반삼각

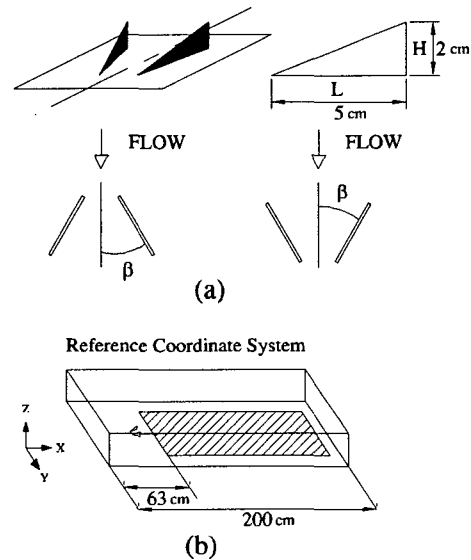


Fig. 1 Schematic diagram of the test facility.  
(a) angle of attack of half-delta wing-let and shape.  
(b) heat transfer surface.

익의 중간 위치에서 4 cm으로 고정시켰다. 각각의 영각에 대해 와동발생기의 끝단으로부터 후방 5 cm, 10 cm, 20 cm, 35 cm에서 5공 프로브로 유동장을 측정하였다. 각 측정 단면에서 측정위치로 이송하기 위해 3축 이송장치를 사용하였다. 각 측정단면에서 유동장을 측정하기 위해 두께 0.5 cm의 아크릴에 0.4 cm의 홈을 가공하여 5공 프로브를 이송할 수 있게 하였고, 홈으로부터 누수 공기를 최대한 억제하기 위해 5공 프로브에 슬라이딩 판을 부착하였다.

각 측정단면에서 압력 측정점은 Y, Z방향으로 0.5 cm간격으로 측정점을 선택하였다. Y방향은 좌측 벽면으로부터 5 cm 떨어져 있는 측정점으로부터 측정되었고, Z방향은 아래 벽면에서 0.3 cm 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 50회 8번 측정하여 앙상블 평균값을 데이터로 사용하였다. 데이터를 저장한 후에는 A/D변환기의 디지털 출력포트에서 3차원 이송장치의 스텝핑 모터 제어부에 디지털 신호를 입력하여 다음 측정 위치로 자동으로 이송되도록 하였다. 이와 같은 장치로부터 획득된 데이터와 5공 프로브의 보정 데이터를 이용해 속도장을 구하였다.<sup>(13)</sup>

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 수행하였으며 보정장치는 실제 실험면과 동일한 위치에 설치하였다. 보정장치와 비디오 카메라와의 거리(L)는 150 cm이며 조명과 보정용 판이 이루는 각( $\theta$ )은 60°로 고정하였다. 온도와 액정의 색상변화를 동시에 측정하기 위해

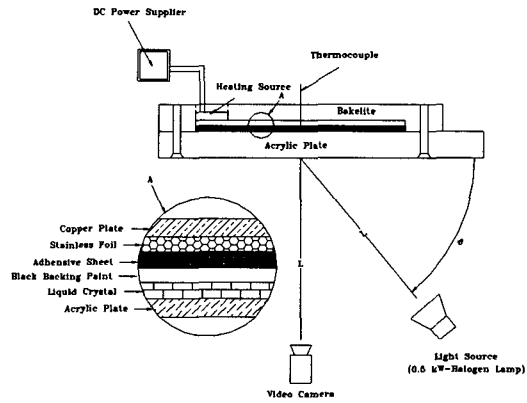


Fig. 2 Schematic diagram of calibration apparatus for local hue versus temperature relation.

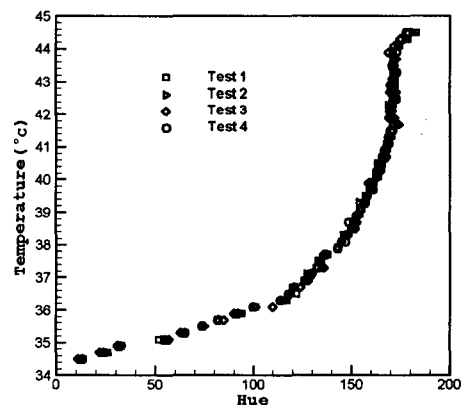


Fig. 3 Local hue versus temperature relation.

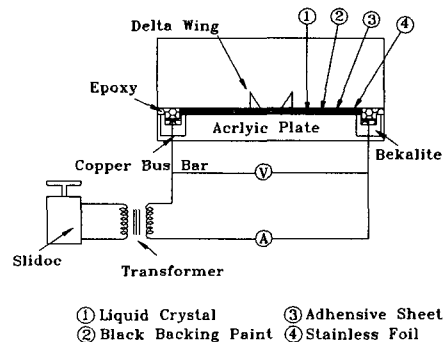


Fig. 4 Experimental apparatus for the measurement of heat transfer rate on the wall surface.

비디오 카메라와 표준온도계를 사용하였고, 이 온도계의 분해능은 0.01°C이며 정확도는 ±0.1°C이다. 그리고 액정의 시정수(time constant)는 100 Hz 정도이다.

보정 실험은 각기 다른 시간에서 4회 측정하였고, Fig. 3은 액정의 색상 대 온도 값을 나타낸 것이다. 이 결과로부터 4회 측정된 값을 앙상블 평균값을 취하여 색상 대 온도의 변화를 나타내는 보정곡선을 구하였다. 다음 식은 색상 대 온도의 보정곡선식이다.

$$T = 34.967 + 0.048852 \times \text{Hue} - 0.0017587 \times \text{Hue}^2 + 1.793 \times 10^{-5} \times \text{Hue}^3 - 6.303 \times 10^{-8} \times \text{Hue}^4 \quad (1)$$

Fig. 4는 와동발생기의 영각의 변화에 따른 와동발생기의 하류의 열전달특성을 측정하기 위한 장치도이다. 두께, 가로, 세로의 크기가 1×40×40 cm인 아크릴판 위에 액정(R35C5W)을 분무기(air brush)로 균일하게 뿌리고, 조명에 의해 액정에 비춰진 광이 액정에 의해 편광되어 반사된 광 이외의 광을 흡수하기 위해 액정 위에 검정페인트(BBG1)를 균일하게 분무기로 뿌렸으며, 그리고 액정을 가열시키기 위해 액정의 온도 보정용 가열판과 달리 가열원으로 스테인리스 박판(0.005×35×22 cm)을 사용하였다. 스테인리스 박판을 가열하기 위해 직경 0.1 cm인 동선을 납땜하였고, 아크릴판 위에 깊이, 폭, 길이 0.5×10×23 cm인 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 0.015 cm였다. 스테인리스 박판을 가열시키기 위해 전원장치로 슬라이더스(slidoc)와 변압기(transformer)를 설치하였다. 슬라이더스의 용량은 3 kVA이며, 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 등열유속

으로 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.

### 3. 실험결과 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( $X=58$  cm)에서 이루어졌으며, 측정은 3축 이송장치를 이용하여 아래 벽면으로부터 0.05 cm 간격으로 각 측정점에서 수행하였다. 측정데이터로부터 계산된 본 실험의 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

#### 3.2 common flow down 및 common flow up

common flow down 및 common flow up에 대한 유동특성은 Han<sup>(14)</sup>에 상세하게 기술되어 있으므로 영각 ±30°에 대해서만 기술하고자 한다.

Fig. 5는 영각이 30°일 때 각 단면( $X=5, 10, 20, 35$  cm)에서 common flow down의 2차 유동(secondary flow) 속도벡터를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 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 난류확산 및 각운동량의 보

Table 1 Test conditions

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

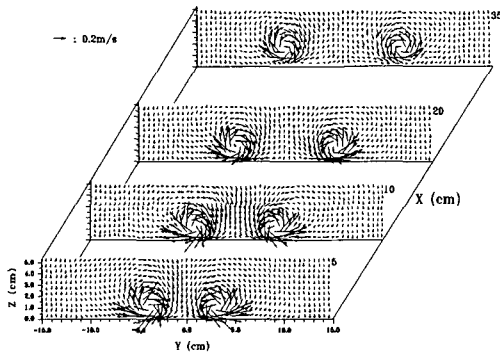


Fig. 5 Secondary velocity vector at  $\beta = 30^\circ$ .

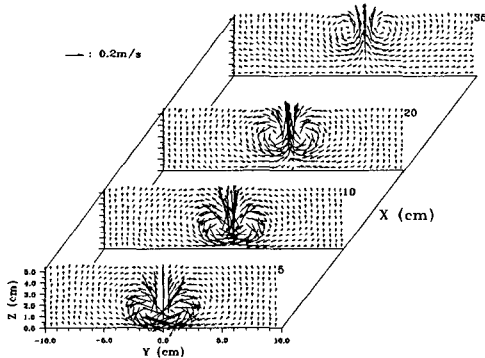


Fig. 6 Secondary velocity vector at  $\beta = -30^\circ$ .

존에 의해 하류로 이동할수록 와동에 의한 속도 벡터의 크기가 상대적으로 감소하고 또한 종방향 와동과 반대 방향, 즉 벽면을 중심으로 종방향 와동과 대칭 위치에 존재하는 가상와동(image vortex)으로 인해 벽면 상부의 종방향 와동(실제 와동)을 폭방향( $\pm Y$ 방향)으로 이동하게 함으로 와동과 와동 사이의 거리가 증가하게 된다.

Fig. 6은 영각  $-30^\circ$ 일 때 각 단면( $X=5, 10, 20, 35$  cm)에서 common flow up의 2차 유동 속도벡터를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 두개의 와동은 중심영역( $Y=0$  cm)을 기준으로 해서 각각 시계방향과 반시계방향으로 회전하는 두개의 와동쌍이 발생하고 있다. 반시계방향(시계방향)의 와동은 중심영역에서 upwash 유동이 발생하고, 중심의 바깥쪽 영역에서 downwash 유동이 발생한다. 또한 두 개의 와동은 서로 강하게 작용하고 있음을 알 수 있다. 측정단면 하류로 이동할수록 와동의 속도벡터 크기가 감소하며 와동과 와동 사이의 거리는 거의 변하지 않지만,

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

$X_i$	Value	$\delta X_i$	$\left(\frac{\delta X_i}{X_i}\right) \times 100(\%)$
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
$\rho_\infty$	1.2822( $kg/m^3$ )	0.0111( $kg/m^3$ )	0.87
$U_\infty$	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			
$\delta(St)/St = 5.38(\%)$			

벽면으로부터의 와동의 상승은 하류로 이동할수록 뚜렷이 증가함을 알 수 있다. 이는 종방향 와동과 반대 방향, 즉 벽면을 중심으로 종방향 와동과 대칭 위치에 존재하는 가상 와동에 의해 벽면 상부의 종방향 와동을 중심영역( $Y=0$  cm)의 위치로 이동시키려는 영향과 그리고 하류로 이동할수록 중심영역으로 이동한 종방향 와동의 강한 상호작용에 의해 벽면에서 대류되어져 벽면으로부터 와동이 상승하게 된다. 이러한 현상은 Pauley and Eaton<sup>(1)</sup>의 실험에서도 관찰되었다.

### 3.3 벽면에서의 국소 열전달분포

반삼각의 하류에서 발생하는 벽면의 국소 열전달분포를 다음과 같이 Stanton 수로 나타내었다.

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

Stanton 수의 불확실성은 Chauvenet 판별법<sup>(15)</sup>과 Abernethy et al.<sup>(16)</sup>의 방법으로 해석하였고, 20 대 1의 신뢰도에서 Stanton 수의 불확실성에 대한 데이터를 Table 2에 나타내었고, 비열  $C_p$ 는 온도변화에 대해 민감하지 않기 때문에 일정한 것으로 가정하였다. 또한  $\Delta T$ 는  $(T_w - T_\infty)$ 를 의미한다.

#### 3.3.1 common flow down

Fig. 7은 영각이  $20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 일 때 벽면 전체의 열전달계수를 Stanton 수로 나타낸 것이 것이다.

그리고 Stanton 수는 실제 Stanton 수를 1000배 해서 나타내었고, 등 Stanton 수 곡선은 0.00015 간격으로 표현하였다.

영각이 45°(Fig. 7의 (c))일 때는 전 영역에서 두 개의 최대값을 갖는 국소 열전달분포를 보였지만, 영각이 30°(Fig. 7의 (b))인 경우는 X=10 cm 단면 이후, 영각이 20°(Fig. 7의 (a))인 경우에는 X=15 cm 이후에서 두 개의 최대의 국소 열전달이 나타났다. 이는 영각이 증가할수록 와동과 와동 사이의 간격이 증가하므로 와동 상호

간의 작용이 약해지기 때문에 영각이 증가할수록 전 영역에서 두 개의 최대값을 갖는 국소 열전달 분포를 나타내게 된다.

Fig. 7의 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 발생된 와동이 downwash 영역으로 향하면서 벽면의 표면에 부착(attachment)될 때 발생하는 것으로 판단된다.

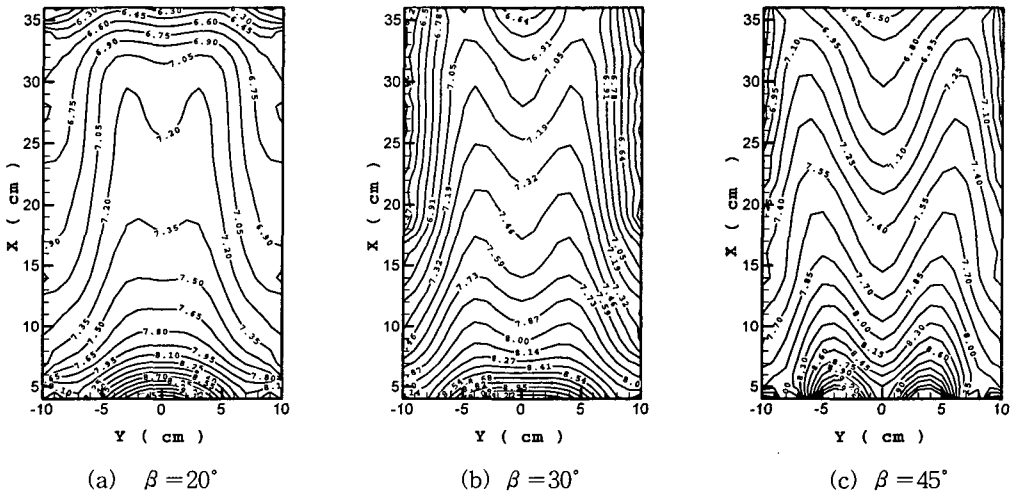


Fig. 7 The contours of  $St \times 1000$ .

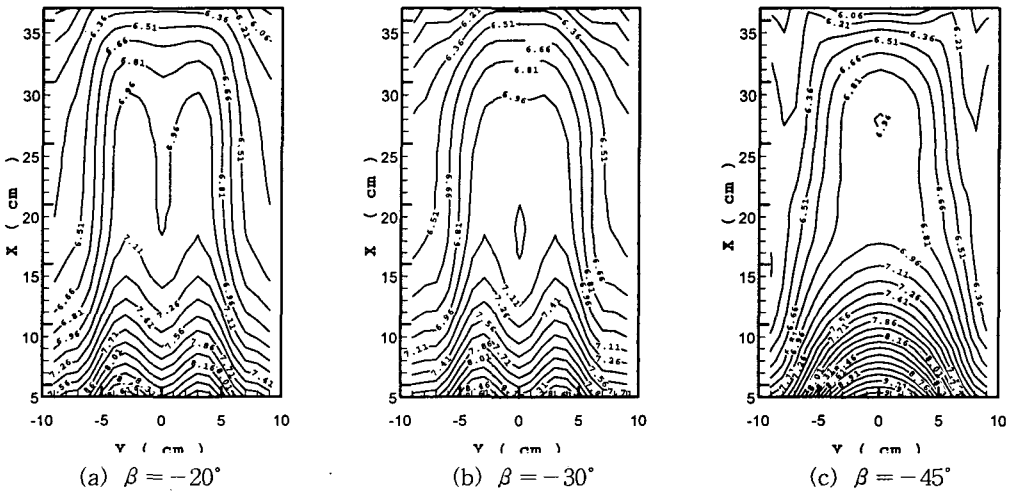


Fig. 8 The contours of  $St \times 1000$ .

3.3.2 common flow up

Fig. 8은 영각이  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$ ,  $-45^\circ$ 일 때, 즉 common flow up의 경우에 벽면 전체의 열전달 계수를 Stanton 수로 나타낸 것이다.

영각이  $-20^\circ$ 일 때는  $X=30\text{ cm}$  이전까지의 영역에서 두 개의 최대값을 갖는 국소 열전달분포를 보였고, 영각이  $-30^\circ$  경우는  $X=20\text{ cm}$  이전까지의 영역에서 두 개의 최대값을 갖는 국소 열전달분포를 나타내었다. 영각이  $-45^\circ$ 인 경우는 전영역에서 한 개의 최대값을 갖는 국소 열전달분포를 나타내었다. 이는 와동 간의 상호작용이 영각이 감소할수록 더욱 강하게 작용한다는 것을 의미한다. 또한 두 개의 최대값을 갖는 국소 열전달값의 위치는 쌍와동의 중심위치와 거의 일치함을 알 수 있다.

그리고  $X=30\text{ cm}$  이후에서는 영각  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$ ,  $-45^\circ$  모두 한 개의 최대값을 갖는 형태로 나타났다. 이는 영각  $-30^\circ$ 의 유동방향 와동(Fig. 6)에서 보았듯이 와동의 상호작용으로 인해 벽면으로부터 와동이 상승하기 때문에 발생한다.

Fig. 8의 결과에서 알 수 있듯이 하류로 이동할수록 두 개의 최대값 사이의 간격은 영각이 감소하여도 거의 변하지 않았다.

3.5 각 단면에서의 국소 열전달분포

3.5.1 common flow down

Fig. 9-12는 측정단면  $X=5, 10, 20, 35\text{ cm}$ 에서

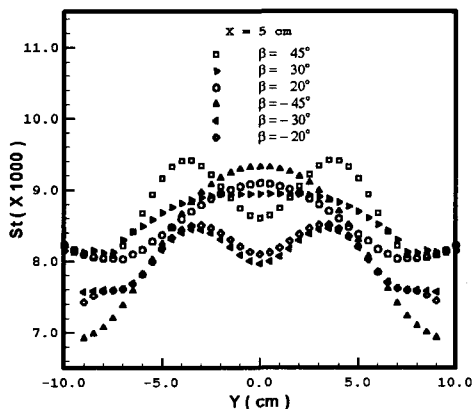


Fig. 9 Spanwise profiles of Stanton number with  $\beta = \pm 20^\circ, \pm 30^\circ$  and  $\pm 45^\circ$  at  $X=20\text{ cm}$ .

common flow down 및 common flow up에 대한 국소 열전달분포를 나타낸 것이다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이 영각이  $45^\circ$ 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 두개의 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  $45^\circ$ 인 경우가 가장 심함을 알 수 있고, 영각이  $45^\circ$ 인 경우가 영각  $20^\circ, 30^\circ$ 에 비해 최대 열전달값이 각각 약 7%와 3% 정도 증가하였다.

Fig. 10은 측정단면  $X=10\text{ cm}$ 에서 영각의 변화가  $30^\circ, 45^\circ$ 인 경우에 두 개의 최대값을 나타냈지만 영각이  $20^\circ$ 인 경우는 Fig. 9와 마찬가지로 최대값이 하나인 형태로 나타났다. Fig. 9와 비교해 볼 때 국소 열전달분포의 최대값 및 최소값의 위치가 폭방향으로 멀어짐을 확인할 수 있다. 이는 하류로 갈수록 와동간의 상호작용이 약해짐을 의미한다. 또한 영각이  $45^\circ$ 인 경우의 최대 열전달값이 영각  $20^\circ$ 에 비해 약 9.5%, 영각  $30^\circ$ 에 비해 약 4% 정도 증가하였다.

Fig. 11은 측정단면  $X=20\text{ cm}$ 에서 영각의 변화에 따른 국소 열전달분포를 나타낸 것이다. Fig. 11은 Fig. 9, 10과 달리 국소 열전달분포의 최대값이 영각의 변화에 따라 모두 두 개로 나타났

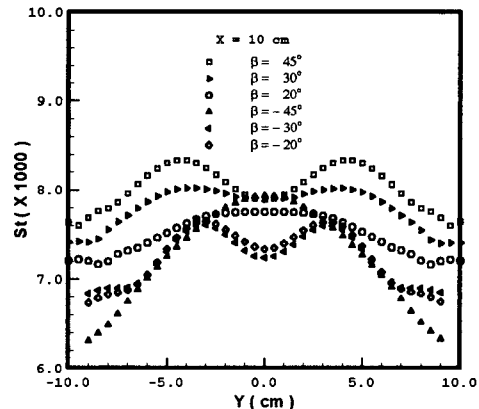


Fig. 10 Spanwise profiles of Stanton number with  $\beta = \pm 20^\circ, \pm 30^\circ$  and  $\pm 45^\circ$  at  $X=35\text{ cm}$ .

다. 그리고 최대값 사이의 위치는 영각이 증가할수록 증대됨을 알 수 있다. 영각  $30^\circ$ 인 경우가 영각  $45^\circ$ 인 경우보다 최대값의 열전달분포가 약간 증가함을 알 수 있고, 난류확산으로 인해 와동이 약해지기 때문에 전체적인 열전달분포값은 상류에 비해 감소하고 있다.

Fig. 12는 Fig. 11과 유사한 경향을 보이고 있지만 영각  $20^\circ$ 인 경우는 열전달분포곡선이 Fig. 11의 경우에 비해 뚜렷한 두 개의 최대값이 나타나며 영각  $30^\circ$ 와 영각  $45^\circ$ 의 국소 열전달분포의 최대값이 거의 동일한 값을 유지하였다.

### 3.5.2 common flow up

Fig. 9는 측정단면  $X=5$  cm에서 영각의 변화에 따른 국소 열전달분포를 나타낸 것으로, Fig. 9에서 알 수 있듯이 영각이  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$ 인 경우는 두 개의 최대값을 가지며 국소 열전달분포는 거의 동일한 형태를 보였지만, 영각이  $-45^\circ$ 인 경우는 최대값이 하나인 형태로 나타났다. 이는 영각의 절대값이 증가할수록 와동 상호간의 작용이 더욱 강하게 나타나기 때문이다. 그리고 영각  $-45^\circ$ 인 경우가 영각  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$ 에 비해 최대 국소 열전달이 약 10.5% 정도 증가하였지만, 영각  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$ 는 거의 변화가 없었다.

Fig. 10의 측정단면  $X=10$  cm에서는 영각이  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$ ,  $-45^\circ$  경우 모두 Fig. 9와 동일한 경향을 보였지만, Fig. 9와 달리 영각  $-45^\circ$ 인 경우가 영각  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$ 에 비해 최대 국소 열전달

이 약 4% 정도만 증가하였다.

Fig. 11의 측정단면  $X=20$  cm에서는 영각이  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$ ,  $-45^\circ$  경우 모두 Fig. 10과 동일한 경향을 보였지만, 영각  $-45^\circ$ 인 경우는 Fig. 10과 달리 영각  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$ 보다 국소 열전달의 최대값이 더 작은 값으로 나타났다. 이는 영각이 감소할수록 와동의 상호작용이 강하게 발생되고 이로 인해 벽면으로부터의 와동의 상승효과가 더 빨리 발생하기 때문이다.

Fig. 12의 측정단면  $X=35$  cm에서는 Fig. 11과 달리 영각  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$  경우 두 개의 국소 최대 열전달값이 나타나지 않고 하나의 국소 최대 열전달값을 나타내었다. 따라서  $X=35$  cm 이후부터는 와동의 상호작용으로 인하여 벽면으로부터의 와동의 상승효과가 지배적으로 작용하는 것으로 판단된다.

## 3.6 주유동 방향의 평균 열전달분포

### 3.6.1 common flow down

Fig. 13은 각 측정단면에서의 평균 열전달분포를 나타낸 것이다. 각 측정단면에서의 평균 열전달분포는 Simpson의 적분방법으로 계산하였다.

Fig. 13에서 알 수 있듯이 모든 영각에 대해 평균 열전달 분포는 유사한 경향을 나타냈으며, 모든 영각에 대해  $X=20$  cm 이후에서는 평균 열전달 분포값의 감소폭이 거의 일정한 값(0.0004)으로 일정하게 유지되었고, 영각  $45^\circ$ 인 경우가 가

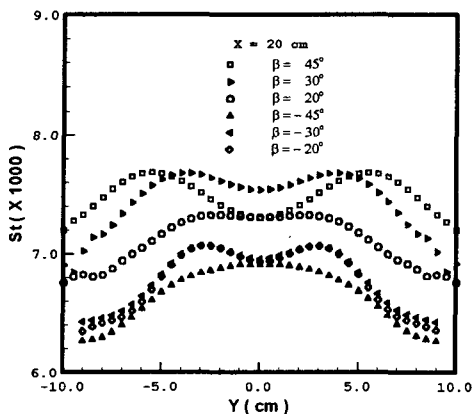


Fig. 11 Spanwise profiles of Stanton number with  $\beta = \pm 20^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$  and  $\pm 45^\circ$  at  $X = 20$  cm.

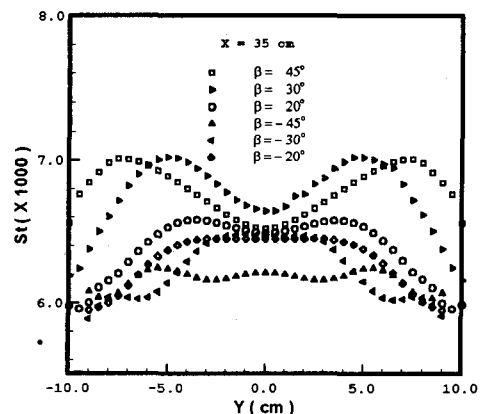


Fig. 12 Spanwise profiles of Stanton number with  $\beta = \pm 20^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$  and  $\pm 45^\circ$  at  $X = 35$  cm.



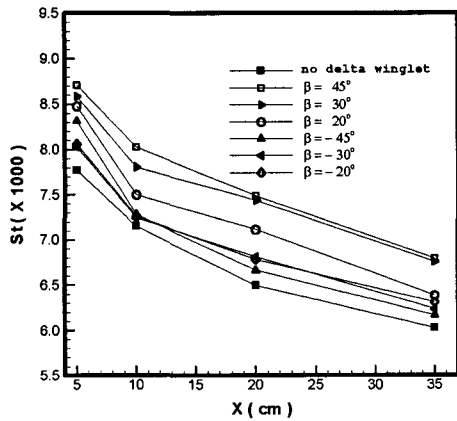


Fig. 13 Streamwise distributions of averaged Stanton number on the measurement.

장 열전달이 잘 되었다. 그리고 모든 영각에 대해  $X=10$  cm 이전에서는 평균 열전달분포가 급격히 변하였지만,  $X=10$  cm 이후에서는 완만하게 감소하였다.

3.6.2 common flow up

Fig. 13에서 알 수 있듯이 영각  $-20^\circ$ 와  $-30^\circ$ 의 경우는 유사한 경향을 보이지만, 영각  $-45^\circ$  경우에 비해 평균 열전달분포값이 약간 증가하였다. 그리고  $X=10$  cm 이전에서는 영각 변화에 따라 국소 열전달분포가 급격히 감소하였고, 그 이후에는 완만하게 감소하였다. 반삼각익이 설치되어 있지 않은 경우보다 반삼각익이 설치된 경우가 열전달이 잘됨을 알 수 있고, 특히 common flow down의 경우가 열전달이 가장 잘됨을 확인할 수 있다.

4. 결 론

와동발생기의 영각을  $\pm 20^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ 로 변화시킬 때 발생하는 common flow down과 common flow up의 유동현상을 5공 프로브를 이용해 측정하고, 측정된 유동특성을 토대로 액정을 이용해 실시간에 표면의 열전달 특성을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) common flow down의 경우, 하류로 이동할수록 두 와동간의 간격은 증가하였지만, 와동간의 상호작용은 아주 약하였다. 그러나 common flow up의 경우, 하류로 이동하여도 두 와동간의

간격은 거의 변화가 없지만, 와동의 강한 상호작용으로 인해 하류로 이동할수록 벽면으로부터의 상승효과가 증대되었다.

(2) common flow down의 경우, 하류로 이동할수록 영각  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ 에서 두 개의 국소 최대열전달 값이 나타났지만, common flow up의 경우, 하류로 이동할수록 영각  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$ ,  $-45^\circ$ 에서 한 개의 국소 최대열전달값을 나타내었다.

(3) common flow down의 경우는 종방향 와동이 하류로 이동할수록 와동과 와동 사이의 상호작용보다 와동과 경계층의 상호작용이 강하게 발생하고, 반면에 common flow up의 경우는 와동과 경계층의 상호작용보다 와동과 와동의 상호작용이 강하게 작용하여 와동이 벽면으로부터 상승하는 효과가 발생하므로 common flow down의 경우가 common flow up의 경우보다 열전달이 잘 되었다.

(4) 와동발생기를 설치한 경우가 종방향 와동의 발생으로 인해 와동발생기를 설치하지 않은 경우보다 열전달이 잘 됨을 확인할 수 있었다.

(5) 와동발생기를 설치한 경우가 전체적으로 열전달이 잘 되지만 항력증가의 원인이 될 수 있기 때문에 추후에 기존의 열교환기 모델의 성능과 비교 검토되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Fiebig, M., 1997, Vortices and Heat transfer, zeitschrift fur angewandte mathematik und mechanik, Vol. 77, No. 1, pp. 3-18.
  6. 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.
  7. 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.
  8. Akino, N., Kunugi, T., Ichimiya, K., Mitsuhiro, K. and Usda, M. 1989, Improved liquid-crystal thermometry excluding human color sensation, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 111, pp. 558-565.
  9. 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.
  10. Yang, J. S., Na, J. M. and Lee, K. B., 1995, An experimental investigation of the heat transfer characteristics on the endwall surface within the plane turbine cascade, KSME Journal, Vol. 19, No. 9, pp. 2386-2398.
  11. Yoon, S. H., Kim, M. K. and Lee, D. E., 1997, Experimental investigation on heat transfer with a two-dimensional oblique impinging jet, SAREK Journal, Vol. 9, No. 4, pp. 427-434.
  12. Jung, G. H., Kim, Y. Y., Kim, S. K. and Seo, T. B., 1999, An experimental study on the heat transfer augmentation by using the multiple orifice nozzle, SAREK Journal, Vol. 11, No. 5, pp. 647-657.
  13. Lee, K. B. and Yang, J. S., 1995, The calibration and application of 5-hole probe using cubic spline interpolation, KSAS Journal, Vol. 23, No. 2, pp. 61-68.
  14. Han, D. J., 1999, An experimental study on the interaction and flow characteristics of longitudinal vortex pairs, MS Thesis, Pusan National University.
  15. Holman, J. P., 1984, Experimental Methods for Engineers, McGraw-Hill.
  16. Abernethy, R. B., Benedict, R. P. and Dordell, R. B., 1985, ASME measurement uncertainty, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 107, pp. 161-164.