

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

- Common flow up에 관하여 -

한동주*, 양장식**, 이기백***
(1999년 8월 14일 접수)

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

- On the common flow up -

Dong-Joo Han, 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

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 wings 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 -20 degree to -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. Unlike common flow down, common flow up vortices moved toward the centerline as they developed and interacted strongly with each other but not with the boundary layer. Spanwise profiles of Stanton number were similar for $\beta = -20^\circ$ and -35° , but not similar for $\beta = -45^\circ$. The case of $\beta = -20^\circ$ and -35° showed the two peak Stanton number, but the case of $\beta = -45^\circ$ showed the only one peak Stanton number.

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 발생한다. 이러한 종방향 와동에 대한 최근의 연구는 와동의 상호작용과 더불어 경계층 또는

열전달에 미치는 영향에 대해 수행되어지고 있으며, 와동발생기(vortex generator)의 적절한 디자인과 설치에 대해서도 연구가 진행되고 있다. Pauley와 Eaton⁽¹⁾은 와동발생기의 영각(angle of attack)을 변화시켰을 때 두 가지의 유동형태, 즉 벽면으로부터 멀어지는 유동(common flow up)과 벽면으로 향하는 유동(common flow down)에 관한 연구를 하였으며, Wendt 등^(2,3)은 난류 경계층에 폭방향으로 배열된 와동발생기의 간격 변화에 따라 와동발생기 하류에서 발생하는 와동의 형태와 와동과 경계층의 상호작용에 관한 연구를 수행하였다. Eibeck 등⁽⁴⁾은 와류발생기 하류에서의 와동과 경계층의 상호작용에 관한 벽면의 열전달 특성에 대해서 연구를 수행하였다. 또한 최근에

* 부산대학교 대학원 기계공학부

** 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

는 열교환기로서의 와동발생기의 성능에 관한 연구가 폭넓게 이루어지고 있으며, Fiebig⁽⁵⁾은 종방향 및 횡방향의 와동에 대해 종방향 와동의 경우가 횡방향의 와동에 비해 유동 손실이 적고 열전달 효과가 크게 나타난다고 하였다. 또한 Zhu 등⁽⁶⁾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 연구에서는 홍철현 등⁽⁷⁾과 달리 와동발생기의 영각(β)을 $\beta < 0^\circ$ 으로 변화시킬 때 발생하는 common flow up에 대해 연구를 수행하였다. 본 연구는 기존의 연구($\beta \geq -24^\circ$)와 달리 와동발생기의 영각(β)을 -20° , -30° , -45° 로 더 감소시켜 와동발생기 하류에서 발생하는 와동의 구조와 이 와동에 의한 벽면의 열전달 특성을 5공 프로브와 실시간에 측정 가능한 색상 포착 기법^(8~13)을 이용해 연구하였다.

2. 실험장치

2.1 유동장 및 열전달 측정

본 연구는 홍철현 등⁽⁷⁾과 동일한 실험장치를 이용하여 common flow up에 대해 유동장 및 열전달 측정을 수행하였기 때문에 이전 연구와 다른 점만 기술하고자 한다.

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

본 실험에 사용된 아음속 풍동의 전체 크기는 높이, 폭, 길이가 각각 10cm, 40cm, 200cm이다.

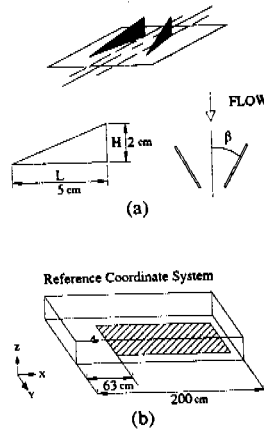


Fig. 1 Schematic diagram of the test facility
(a) angle of attack of half-delta wing and shape
(b) heat transfer surface

반삼각익의 크기는 밑변(L)이 5cm, 높이(H)가 2cm이고, 반삼각익의 설치 위치는 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 4cm으로 고정시켰다. 각각의 영각에 대해 와동발생기의 끝단으로부터 후방 5cm, 10cm, 20cm, 35cm에서 5공 프로브로 유동장을 측정하였다. 그리고 와동발생기 하류에서 발생하는 벽면에서의 열전달 특성은 이전 연구와 동일한 방법으로 측정하였다.

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

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%

3.2 Common flow up

Common flow up에 대한 유동특성은 한동주⁽¹⁴⁾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 주유동방향의 속도분포를 구하였다. 각 측정 단면에서 X축 방향 속도분포는 u/U_∞ 의 0.6 ~ 0.99까지에 대해 나타내었다. 유동방향 와도는 각 측정점에서의 와도 값을 상류측 속도 U_∞ 로 나눈 값(ω_x/U_∞)으로 나타내었다.

Fig. 2는 영각 -30° 일 때 각 단면($X=5, 10, 20, 35\text{cm}$)에서 와동쌍의 2차 유동(secondary flow)의 속도벡터를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 개의 와동은 중심영역($Y=0\text{cm}$)을 기준으로 해서 각각 시계방향과 반시계방향으로 회전하는 두 개의 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, 벽면으로부터의 와동의 상승은 하류로 이동할수록 뚜렷이 증가함을 알 수 있다. 이는 종방향 와동과 반대 방향, 즉 벽면을 중심으로 종방향 와동과 대칭 위치에 존재하는 가상 와동(image vortex)에 의해 벽면 상부의 종방향 와동을 중심영역($Y=0\text{cm}$)의 위치로 이동시키려는 영향에 의해 발생하며, 하류로 이동할수록 중심영역으로 이동한 종방향 와동의 강한 상호작용

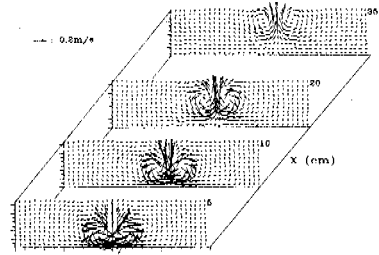


Fig. 2 Secondary velocity vector at $\beta = -30^\circ$

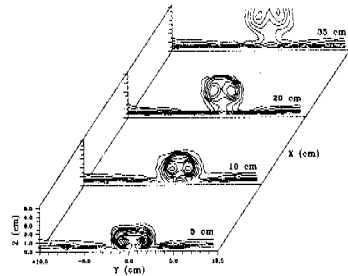


Fig. 3 Streamwise velocity contours at $\beta = -30^\circ$
($u/U_\infty = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.95, 0.99$)

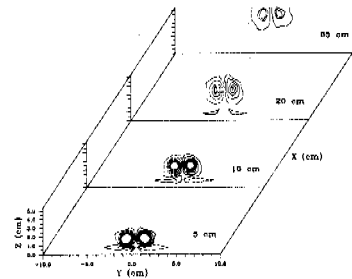


Fig. 4 Streamwise vorticity contours at $\beta = -30^\circ$
($\omega_x/U_\infty = \pm 0.1, 0.25, 0.35, 0.5, 0.55, 0.6$ [1/cm] solid line: positive value, dotted line: negative value)

에 의해 벽면에서 대류되어져 벽면으로부터 와동이 상승하게 된다. 이러한 현상은 Pauley 등⁽¹⁾의 실험에서도 관찰되었다.

Fig. 3은 $X=5, 10, 20, 35\text{cm}$ 에서 주유동방향의 속도를 상류측 유동속도로 무차원(u/U_∞)하여 나타낸 주유동방향의 등속도 분포이다. 그림에서 바깥쪽 영역은 자유유동 속도를 의미하기 때문에 주유동방향의 등속도 분포에서 알 수 있듯이 와동 상호간의 작용은 경계층 두께변화에 지

대한 영향을 미침을 알 수 있다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 와동의 상호작용에 의해 벽면으로부터 와동이 상승함으로 인해 좌측면(우측면)에서 중심 방향으로 향하면서 경계층 두께가 얇아지나 중심 영역 부근에서는 와동의 상호작용으로 인해 경계층 두께가 증가하며, 이러한 현상으로 인해 하류로 갈수록 더욱 심함을 알 수 있다.

Fig. 4는 자유유동속도(U_∞)에 대한 유동방향 와도를 등와도 성분(0.1~0.6)으로 각 측정단면에서 나타낸 것이다. 등와도 성분에서 알 수 있듯이 하류로 이동함에 따라 와동과 와동 사이의 상호작용은 아주 강하게 작용하고 있음을 알 수 있다. 초기($X=5\text{cm}$)에는 와동의 형상은 원형에 가깝지만 하류로 이동할수록 난류확산에 의해 와도 성분이 평활화되어 Z방향으로 확장된 타원형 형상을 나타내었다. 그리고 와동과 벽면의 접촉조건에 의해 벽면과 주와동(primary vortex) 사이에 반대 부호의 2차 와동(secondary vortex)이 존재하였고, 2차 와동은 주와동의 상호작용에 의해 중심영역으로, 즉 upwash 영역으로 이동함을 알 수 있다. 그러나 $X=35\text{cm}$ 단면에서는 벽면으로부터 주와동의 상승에 의해 2차 와동은 소멸하였다.

3.3 벽면에서의 국소 열전달분포

반삼각의 하류에서 발생되는 벽면의 국소 열전달분포를 다음과 같이 Stanton수로 나타내었다.

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

Stanton수의 불확실성은 Chauvenet 판별법⁽¹⁵⁾과 Abernethy 등⁽¹⁶⁾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. 5~7은 영각이 -20° , -30° , -45° 일 때 벽면 전체의 열전달 계수를 Stanton수로 나타낸 것이다. Stanton수는 실제 Stanton수를 1000배 해서 나타내었고, 등 Stanton수 곡선은 0.00015 간격으로 표현하였다.

영각이 -20° (Fig. 5)일 때는 $X=30\text{cm}$ 이전까지

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			
$\delta(St)/St = 5.38(\%)$			

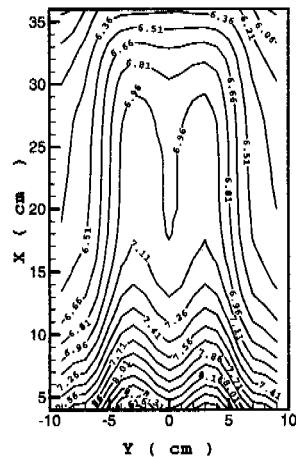


Fig. 5 The contours of $St \times 1000$ ($\beta = -20^\circ$)

의 영역에서 두 개의 최대값을 갖는 국소 열전달분포를 보였고, 영각이 -30° 경우(Fig. 6)는 $X=20\text{cm}$ 이전까지의 영역에서 두 개의 최대값을 갖는 국소 열전달분포를 나타내었다. 영각이 -45° 인 경우(Fig. 7)는 전영역에서 한 개의 최대값을 갖는 국소 열전달분포를 나타내었다. 이는 와동간의 상호작용이 영각이 감소할수록 더욱 강하게 작용한다는 것을 의미한다. 또한 두 개의 최대값을 갖는 국소 열전달값의 위치는 쌍와동의 중심위치와 거의 일치함을 알 수 있다.

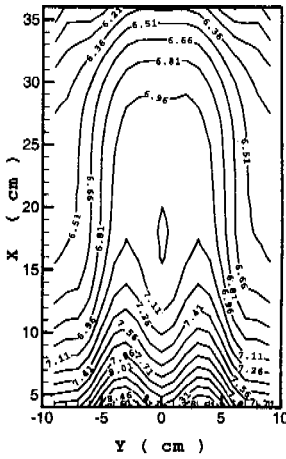


Fig. 6 The contours of $St \times 1000$ ($\beta = -30^\circ$)

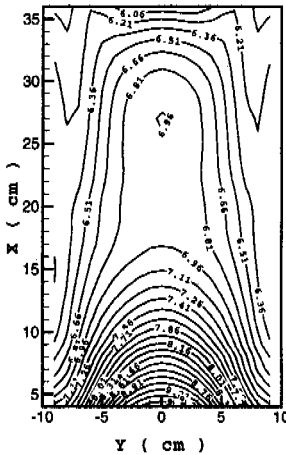


Fig. 7 The contours of $St \times 1000$ ($\beta = -45^\circ$)

그리고 $X=30\text{cm}$ 이후에는 영각 -20° , -30° , -45° 모두 한 개의 최대값을 갖는 형태로 나타났다. 이는 영각 -30° 의 유동방향 와동(Fig. 4)에서 보았듯이 와동의 상호작용으로 인해 벽면으로부터 와동이 상승하기 때문에 발생한다.

Fig. 5~6의 결과에서 알 수 있듯이 하류로 이동할수록 두 개의 최대값 사이의 간격은 영각이 감소하여도 거의 변하지 않았다.

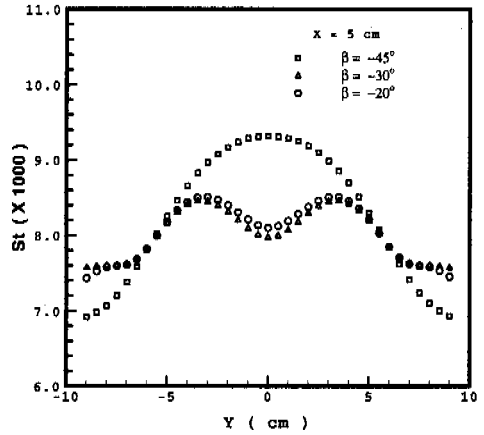


Fig. 8 Spanwise profiles of Stanton number with $\beta = -20^\circ$, -30° and -45° at $X=5\text{cm}$

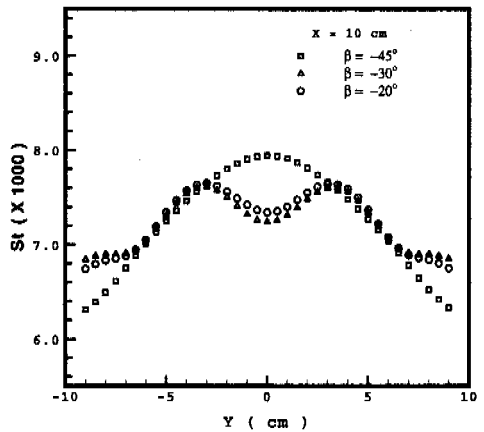


Fig. 9 Spanwise profiles of Stanton number with $\beta = -20^\circ$, -30° and -45° at $X=10\text{cm}$

3.4 각 단면에서의 국소 열전달분포

Fig. 8~11은 측정단면 $X=5, 10, 20, 35\text{cm}$ 에서 영각의 변화에 따른 국소 열전달분포를 나타낸 것이다.

Fig. 8은 측정단면 $X=5\text{cm}$ 에서 영각의 변화에 따른 국소 열전달분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 영각이 -20° , -30° 인 경우는 두 개의 최대값을 가지며 국소 열전달분포는 거의 동일한 형태를 보였지만, 영각이 -45° 인 경우

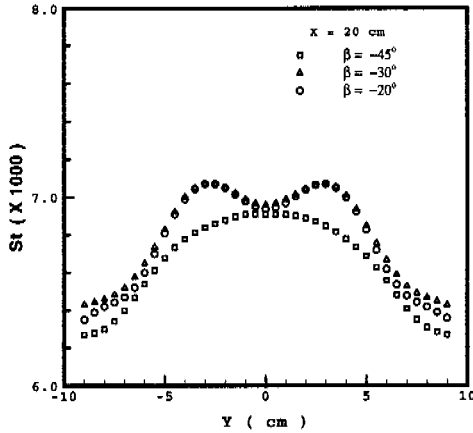


Fig. 10 Spanwise profiles of Stanton number with $\beta = -20^\circ, -30^\circ$ and -45° at $X=20\text{cm}$

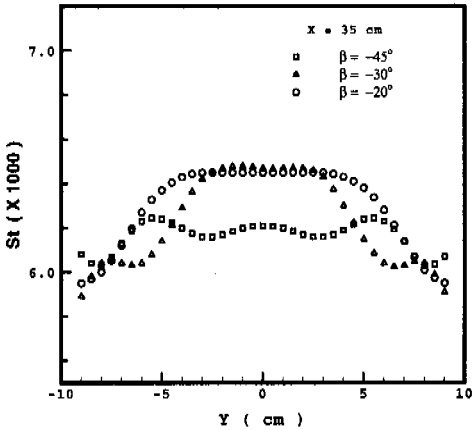


Fig. 11 Spanwise profiles of Stanton number with $\beta = -20^\circ, -30^\circ$ and -45° at $X=35\text{cm}$

는 최대값이 하나인 형태로 나타났다. 이는 영각의 절대값이 증가할수록 와동 상호간의 작용이 더욱 강하게 나타나기 때문이다. 그리고 영각 -45° 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. 9는 측정단면 $X=10\text{cm}$ 에서 영각의 변화에 따른 국소 열전달분포를 나타낸 것이다. 영각이 $-20^\circ, -30^\circ, -45^\circ$ 경우 모두 Fig. 8과 동일한 경

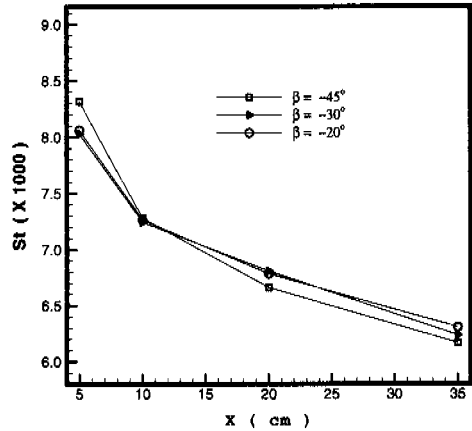


Fig. 12 Streamwise distributions of averaged Stanton number on the measurement planes

향을 보였지만, Fig. 8과 달리 영각 -45° 인 경우가 영각 $-20^\circ, -30^\circ$ 에 비해 최대 국소 열전달이 약 4% 정도만 증가하였다.

Fig. 10은 측정단면 $X=20\text{cm}$ 에서 영각의 변화에 따른 국소 열전달분포를 나타낸 것이다. 영각이 $-20^\circ, -30^\circ, -45^\circ$ 경우 모두 Fig. 9와 동일한 경향을 보였지만, 영각 -45° 인 경우는 Fig. 9와 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. 11은 측정단면 $X=35\text{cm}$ 에서 영각의 변화에 따른 국소 열전달분포를 나타낸 것이다. Fig. 10과 달리 영각 $-20^\circ, -30^\circ$ 경우 두 개의 국소 최대 열전달값이 나타나지 않고 하나의 국소 최대 열전달값을 나타내었다. 따라서 $X=35\text{cm}$ 이후부터는 와동의 상호작용으로 인하여 벽면으로부터의 와동의 상승효과가 지배적으로 작용하는 것으로 판단된다.

3.5 주유동 방향의 평균 열전달분포

Fig. 12는 각 측정단면에서의 평균 열전달분포를 나타낸 것이다. 각 측정단면에서의 평균 열전달분포는 Simpson의 적분방법으로 계산하였다.

그림에서 알 수 있듯이 영각 -20° 와 -30° 의 경우는 유사한 경향을 보이지만, 영각 -45° 경우에 비해 평균 열전달분포값이 약간 증가하였다. 그리고 $X=10\text{cm}$ 이전에서는 영각 변화에 따라 국소 열전달분포가 급격히 감소하였고, 그 이후에는 완만하게 감소하였다.

4. 결론

와동발생기의 영각을 -20° , -30° , -45° 로 변화시킬 때 발생하는 common flow up의 유동현상을 5공 프로브를 이용해 측정하고, 측정된 유동특성을 토대로 액정을 이용해 실시간에 표면의 열전달 특성을 해석한 결과, common flow down의 연구결과⁽⁷⁾와 비교해 볼 때 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° , 30° , 45° 에서 두 개의 국소 최대열전달 값이 나타났지만, common flow up의 경우, 하류로 이동할수록 영각 -20° , -30° , -45° 에서 한 개의 국소 최대열전달값을 나타내었다.

(3) 주유동방향의 평균열전달 분포곡선에서 $X=20\text{cm}$ 이전에서는 common flow up의 경우가 common flow down의 경우보다 열전달 감소율이 더 증가하였고, 그 이후에서는 반대 현상이 나타났다.

(4) common flow down의 경우가 common flow up의 경우보다 열전달이 잘 되었다.

후 기

이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

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., 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.
- (3) 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.
- (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) 홍철현, 양장식, 이기백, 1999, "와동간의 상호작용이 경계층 및 열전달에 미치는 영향에 관한 연구 (I)," 대한기계학회지(계재승인).
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 양장식, 나종문, 이기백, 1995, "선형 터빈 캐스케이드 끝벽의 열전달 특성에 관한 연구," 대한기계학회, 제19권, 제9호, pp. 2386~2398.
- (12) 윤정환, 도덕희, 이상준, 1996, "TLC와 컬러 화상처리를 이용한 Hele-Shaw Cell 내부 대류 온도장 측정," 대한기계학회논문집(B), 제20권, 제3호, pp. 1114~1122.
- (13) 이기백, 김태영, 양장식, 1997, "색상포착기법과 수치 계산을 이용한 3차원 밀폐 공간 내의 자연 대류 연구," 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제12호, pp. 1595~1607.
- (14) 한동주, 1999, "종방향 와동쌍의 상호작용과 유동특성에 관한 연구," 부산대학교 석사학위논문.
- (15) Holman, J. P., 1984, *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill.
- (16) Abernethy, R. B., Benedict, R. P., and Dowdell, R. B., 1985, "ASME Measurement Uncertainty," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 161~164.