

원주 후미에 부착된 와동발생기의 영각 변화에 따른 유동 및 열전달 특성

하 흥 영* · 홍 철 현** · 양 장 식*** · 이 기 백****

Flow and Heat Transfer Characteristics due to the Variations of the Angle of Attack at the Vortex Generators located behind a Circular Cylinder

H-Y Ha* · C-Y Hong** · J-S Yang*** · K-B Lee****

Key words : Circular Cylinder(원형 실린더), Vortex Generator(와동발생기), Half Delta Wing(반삼각익), Heat Transfer(열전달), Five-Hole Pressure Probe(5공 프로브), Thermochromatic Liquid Crystal(액정)

Abstract

Experimental investigations of the flow structure and heat transfer enhancement in a channel with a built-in circular cylinder and a wing-let type vortex generator are presented. Without any vortex generators, relatively low heat transfer takes place in the downstream of the circular cylinder where is a recirculation region with low velocity fluid is formed. However with a wing-let type longitudinal vortex generator in the wake region behind the cylinder, heat transfer in the region can be enhanced. In order to control the strength of longitudinal vortices, the angle of attack of the vortex generators is varied from 20° to 45° , but spacings between the vortex generations are fixed to be 5 mm. The 3-dimensional mean velocity field downstream of the vortex generator is measured by a five-hole pressure probe, and the hue-capturing method using thermochromatic liquid crystals has been used to provide the local distribution of the heat transfer coefficient. The vorticity field and streamwise velocity contour are obtained from the velocity field. Streamwise distributions of averaged Stanton number on the measurement planes show very similar trends for all the experimental cases($\beta=20^\circ$, 30° and 45°). Circulation strength and heat transfer coefficient have the maximum values when the angle of attack(β) is 30°

* 대동공업(주) 기술연구소
** 부산대학교 대학원 기계공학과
*** 부산대학교 기계기술연구소
**** 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

기 호 설 명

- d : 반삼각익(half delta wing)의 설치간격
- H_{sf} : 형상계수 (shape factor)
- Re_x : 반삼각익형의 설치 위치에 근거한 Reynolds 수
- Re_θ : 운동량두께에 근거한 Reynolds수
- \dot{q} : 열유속 (heat flux)
- β : 자유 유동속도 방향에 대한 삼각익의 영각(attack angle)
- δ : 경계층두께
- δ^* : 배제두께
- θ : 운동량두께
- Γ : 순환 (circulation)
- Ω : 와동의 와도 (vorticity)
- Λ : 반 삼각익의 면적비

1. 서 론

장애물이 부착된 하류의 유동현상에 대한 연구는 실제 산업에서 발생하는 공학적인 문제를 해결하는데 있어서 필수적이다. 특히 실린더의 기하학적 형태와 유동방향에 따른 위치변화 그리고 실린더 주위의 유속 또는 유동형태의 변화에 따른 연구들이 중요시 되고 있다. 그 중 원형실린더에 대한 연구는 기하학적으로 가장 간단한 물체이면서 굴뚝, 냉각탑, 통신 및 전력선등의 풍력에 의한 하중의 계산, 해중운항체에 작용하는 유체역학적 하중 계산, 열교환기에서의 대류 열전달계수 등 실제 산업 분야에서도 광범위하게 연구되어 지고 있다.

원형 실린더 주위의 유동이 장애물에 접근함에 따라 장애물의 저해효과로 인해 실린더 근접 상류 쪽에서 역압력구배(adverse pressure gradient)가 발생한다. 이로인해 3차원 경계층 박리가 발생하며, 하류로 이동하면서 말굽와류(horseshoe vortex)구조가 형성한다. 특히 열교환기 분야에서 이러한 말굽와류는 뿔뿔한 물체(bluff body)의 폭과 함께 유익한 효과들이 증가한다. 그러나 하류 부근에서의 빈약한 열전달 효과와 압력손실이 증가하게 된다. 이러한 핀-튜브(fin-tube) 열교환기의 하류 부분에서의 열저항의 감소와 열전달 계수의

향상을 위하여 날개형 와동 발생기(wing-type vortex generator)에 의해 발생하는 종방향 와동들(longitudinal vortices)이 제시되었다⁽¹⁾. 이러한 난류 경계층에서 종방향 속도성분을 가지는 와동과 경계층 사이의 상호작용은 인접한 유체들의 혼합을 향상시킴으로서 열전달을 향상시킨다.

Pauley 등⁽²⁾은 와동과 경계층의 상호작용을 벽면으로부터 멀어지는 유동(common flow up)과 벽면으로 향하는 유동(common flow down)에 대하여 연구하였다. 그들은 와동으로부터 멀리 떨어진 곳에서의 와도는 인접한 다른 와동의 영향을 받고 벽면으로부터 상승한 와동의 와도는 느리게 감소함을 보여주면서 주 와동은 벽면에 의해서만이 그 순환값을 소실함을 보여 주었다. Hingst 등⁽³⁾은 난류 경계층에서 폭방향으로 배열된 와동 발생기를 이용하여 하류에서의 와동과 경계층의 상호작용을 연구하였다. Pearcy⁽⁴⁾는 부착된 와동 구조의 비점성 근사에 기초를 둔 부착된 와동의 상호작용에 대한 모델을 개발했다.

원형 튜브와 날개형 와동발생기가 장착된 채널에서의 유동 특성과 열전달에 관련한 연구로는 Biswas 등⁽⁵⁾은 레이놀즈 수가 500일 때 원형 튜브와 길이방향 와동들에 대한 Navier-Stokes 와 에너지 방정식 들의 계산을 통한 수치적 연구를 하였다. 이 등⁽⁶⁾은 직경이 30 mm인 실린더와 와동발생기의 간격을 실린더 직경의 두배로 고정하여 하류 유동의 특성을 실험적으로 수행하였다. 그리고 권 등⁽⁷⁾은 영각을 20°, 와동 발생기 사이의 간격을 40 mm로 일정하게 유지한 후 와동발생기의 높이를 15, 20, 30 mm로 변화시켜 하류에서 발생하는 와동의 구조와 경계층의 성장특성을 실험하였다.

말굽와류로 대표하는 이러한 3차원 유동현상은 필연적으로 주유동에 대한 2차 유동 (secondary flow)의 형태로 발생되므로, 유동손실을 유발하게 되고, 따라서 이 유동손실을 줄이기 위한 연구가 필요하다. 그런데, 이는 평판 경계층이 존재하는 이상 피할 수 없는 현상이며, 다만 실린더의 기하학적 현상을 변화시켜서, 실린더의 존재로 인하여 생기는 역압력구배를 억제시킴으로서 감소시킬 수 있다고 생각되며 또한 실린더 하류에 와동발생기 장착으로도 감소시킬 수 있다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 난류 유동일 때 원형 실린더 하류의 와동발생기에 의한 와동간의 상호작용에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 원형 실린더 후면에 장착한 와동발생기의 영각(*angle of attack*)을 20° , 30° , 45° 변화시킴으로써 하류에서의 유동 특성을 5공 프로브를 이용하여 측정하였고 끝벽에서의 열전달에 미치는 영향을 색상포착 기법^(7,8)(*hue-capturing technique*)을 이용하여 열전달 특성을 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 유동장 측정 실험장치 및 방법

유동장 실험은 아음속 개방형 풍동을 사용하여 시험 체적부로 공기를 유입시킨다. 풍동은 크게 확대부, 정제부, 수축부, 시험부로 구성되어 있다. 송풍기로부터 유입되는 유입 공기의 속도를 일정하게 하기 위하여 인버터를 사용하여 송풍기의 회전수를 조정함으로써 유입공기의 속도를 일정하게 유지하였다. 시험부의 길이는 약 2000 mm이며 시

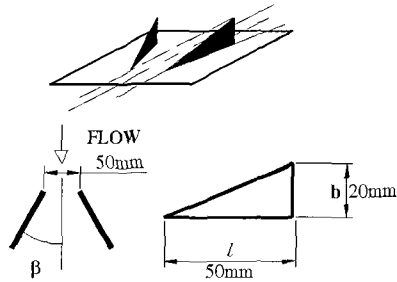


Fig. 1 Schematic of vortex generation

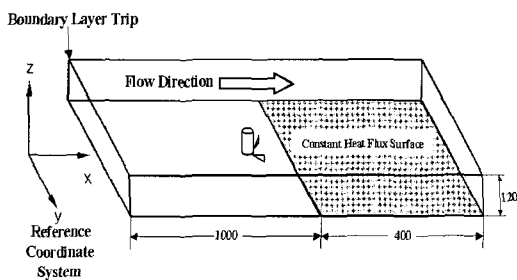


Fig. 2 Physical wind tunnel domain with cylinder (unit : mm)

험 체적부의 단면의 크기는 $500 \times 120\text{mm}$ 이고 두께 15 mm의 아크릴 판으로 제작하였다.

Fig. 1은 본 연구에 사용한 반 삼각의 형태의 와동발생기의 형상, 영각, 크기를 나타낸 개념도이다. 반 삼각의 면적비(*aspect ratio*)는 반 삼각의 코드길이 $l=50\text{ mm}$, 높이 $b=20\text{ mm}$ 이며 Deb 등⁽⁹⁾이 제시한 방법으로 계산하였으며 본 실험에서의 A (*aspect ratio*)는 0.8이다. 와동발생기의 설치 위치는 아음속 풍동의 수축부 출구로부터 1000 mm 떨어진 위치에 설치하였다. Fig. 2는 원형실린더 후미에서의 와동발생기의 설치위치를 나타내고 있다.

순환 및 와동 간격을 조절하기 위해 주 유동방향에 대한 반삼각의 영각(β)을 $\beta=20^\circ$, 30° , 45° 로 변화시켰으며, 원형실린더 후면에서의 삼각의 간격은 실린더의 지름과 같이 하였으며, 각 경우를 조합한 총 3가지 경우에 대하여 실린더의 중심으로부터 후방 100, 150, 200, 300 mm에서 유동장을 측정하였다.

각 측정단면에서 측정점을 이송하기 위해 3축 이송장치를 사용하였다. 측정단면에서 유동장을 측정하기 위해 두께 15 mm의 아크릴에 5 mm의 홈을 슬롯모양으로 400 mm 길이로 가공하여 5공 프로브를 측정부에 삽입한다. 또한 측정 단면의 홈을 움직이도록 슬라이딩 판을 제작하고 여기에 5공 프로브를 부착하여 누설 공기를 최대한 억제하였다. 각 측정단면에서 압력 측정점은 x, z 방향으로 4 mm간격으로 측정점을 선택하였다. y 방향은 좌측 벽면으로부터 100 mm 떨어져있는 측정점으로부터 측정되었고 Z 방향은 아래 벽면에서 3 mm

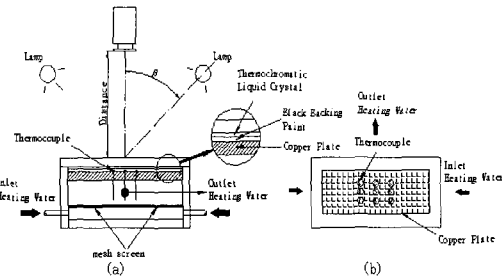


Fig. 3 Schematic diagram of calibration apparatus for local hue versus temperature relation

떨어져있는 측정점으로부터 측정되었다. 5공 프로브로부터의 압력 데이터는 각 압력공과 연결된 미세 압력변환기(FCO44)로 전달된다. 미세 압력계의 압력은 다채널 A/D변환기(PCL-812 PG)를 통해 디지털 신호로 변환되어 PC로 저장된다. 이때 5공 프로브의 압력 데이터의 오차를 줄이기 위해 각 압력공의 압력을 500회 5번 측정하여 앙상블 평균값을 데이터로 사용하였다. 데이터를 저장한 후에는 A/D변환기의 디지털 출력포트에서 3축 이송장치의 스텝핑 모터 제어부에 디지털 신호를 입력하여 다음 측정 위치로 자동으로 이송된다. 획득된 데이터로부터 5공 프로브의 보정 데이터⁽¹⁰⁾를 이용하여 속도장을 구한다.

2.2 열전달 측정 실험장치 및 방법

본 실험에서의 열전달 측정에 앞서 액정의 색상에 대한 온도값을 구하기 위하여 보정 실험을 수행한다. 본 연구에서는 R35C5W의 액정을 사용하고 광원은 두 개의 20W의 삼파장 램프를 사용하였다. Fig. 3에서 액정 보정판은 크기가 15×80×145mm인 아크릴 판을 사용하였고 동판은 10×50×115 mm를 사용하고 9개의 열전대와 온도 지시계(DT-2871)를 사용하여 온도를 측정하였다. 열전대는 동판 중앙에서 가로 10 mm, 세로 20 mm간격으로 동판에 구멍을 가공한 후 접촉저항을 줄이기 위해 열에폭시(thermalbond-4964)로 접착하였다. 1~9번째의 열전대의 온도 편차는 ±0.3°C를 가진다. 또한 아크릴 판 위에 액정을 분

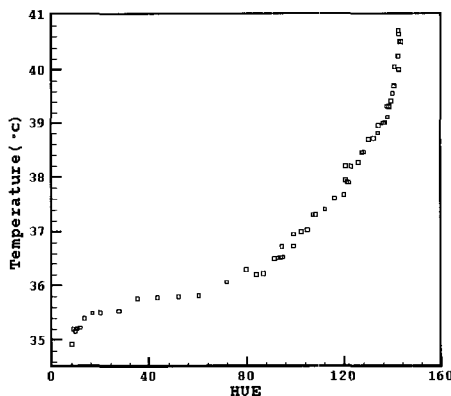


Fig. 4 Local hue versus temperature relation

무기(air brush)로 균일하게 표면에 뿌린 후 조명에 의해 액정을 통과하는 빛을 흡수하기 위해 액정을 도포한 아크릴 판 위에 검정페인트(BBG1)를 분무기로 균일하게 뿌린다. 항온조에서 유입되는 온수는 양방향의 입구로 유입되고 동판의 균일한 가열을 위해 그물망(mesh screen)을 통과하도록 하였다. 광원 이외의 모든 광을 차단하기 위하여 암실에서 보정실험을 수행하였고 보정장치는 대기 온도(22.3°C)에 노출시켜놓고 열원인 항온조는 45°C까지 가열한 후 입구를 개방하여 온도를 상승시키면서 온도와 액정의 색상변화를 동시에 비디오 카메라로 촬영하였다. 액정 보정에 사용된 온도 지시계(DT-2871)의 분해능은 0.01°C이고 정확도는 ±0.2°C이다 보정실험은 실제 실험조건과 동일하게 수행되어지며 보정판과 광원의 거리는 700 mm, 보정판과 카메라의 거리는 600 mm 그리고 광원과 카메라의 각은 70°이다. Fig. 4은 각기 다른 날에 9개의 열전대에서 9회 측정 후 액정의 색상 대 온도값의 결과로부터 9회 측정된 값을 앙상블 평균값을 취하여 온도 대 액정의 색상에 대한 보정곡선을 구하였다. 이때 보정에 사용된 열전대는 5번이며 다음 식(1)은 온도 대 색상에 대한 보정곡선 식이다.

$$T = 34.7143 + 5.375 \times 10^{-2} \times Hue - 8.571 \times 10^{-4} \times Hue^2 + 5.233 \times 10^{-6} \times Hue^3 \quad (1)$$

Fig. 5는 시험면과 그 가열판을 나타낸 것이다. 크기가 15×400×530 mm인 아크릴판 위에 시험

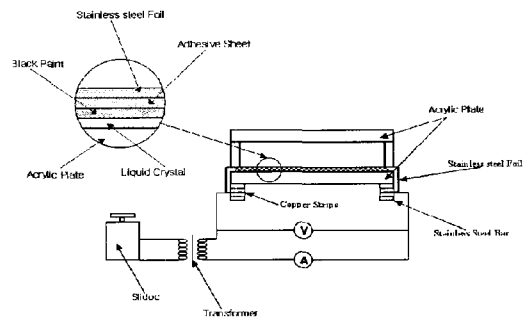


Fig. 5 Experiment apparatus for the measurement of the heat transfer of the heat transfer on the wall surface

단면부에 해당하는 300×300 mm인 아크릴판에 액정을 분무기로 균일하게 뿌리고, 조명에 의해 액정이 비춰진 판이 액정에 의해 편광되어 반사되는 광 이외의 광을 흡수하도록 액정 위에 검정페인트를 균일하게 뿌린 후 액정을 가열시키기 위한 두께가 0.05 mm인 스테인레스 박판(stainless steel foil)을 양면 접착제로 접착하였다. 스테인레스 박판의 균일한 가열을 위해 스테인레스 박판 끝단에 두께가 2.9 mm인 구리막대(copper strips)와 두께가 6 mm인 스테인레스 막대(stainless steel bar)를 이용하여 압착하였으며, 구리 막대에 AC전원을 공급하였다.

스테인레스 박판을 가열시키기 위한 전원 공급 장치로 슬라이닥스와 변압기를 설치하였다. 슬라이닥스의 용량은 3kW이며 슬라이닥스로 가열판에 전원을 공급할 경우 스테인레스 박판의 저항이 적기 때문에 슬라이닥스에 과부하가 걸려 슬라이닥스에 무리를 주게 되므로 1차 전원으로 슬라이닥스를 사용하고 1차 전원에서 출력된 전원을 병렬로 연결된 3개의 변압기에 연결하여 2차 전원으로 사용하였다. 2차 전원에서 출력되는 저 전압, 고 전류의 전원을 스테인레스 박판에 연결되어 있는 구리막대에 전달하여 1차 전원인 슬라이닥스의 전압을 변화에 의해 전체 스테인레스 박판의 등열유속량을 조절할 수 있게 하였다. 실험은 보정시와 동일한 조건에서 수행된다. 그리고 시험면 상단 90 mm의 위치에 T형 열전대를 설치하고 시험단면으로 유입되는 자유 유동의 온도(T_{∞})를 실험 시 동시에 측정하기 위해 온도 지시계(omega: DT-41 TC)를 시험면 옆에 고정시켜며 2차 전원의 전압도 동시에 측정할 수 있도록 시험면 근처에 고정시켰다.

비디오에 연결된 모니터를 통하여 색상값의 변화가 없을 때 온도지시계, 전압계, 전류계를 시험면의 색상분포와 함께 비디오로 녹화시킨다. 전압

과 전류를 이용해 스테인레스 박판에 인가된 열유속을 계산하였다.

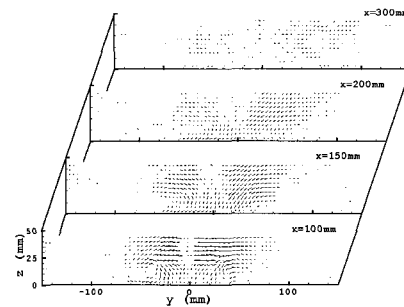
3. 결과 및 고찰

시험부 내로 유입되는 유동특성을 조사하기 위해 I형 열선 풍속계 및 경계층 프로브를 이용해 평균속도, 경계층두께, 난류강도를 측정하였다. 측정 위치는 반 삼각익이 설치된 위치에서 이루어졌으며, 측정은 3축 이송장치를 이용하여 벽면으로부터 0.2 mm간격으로 각 측정점에서 수행하였다. 측정데이터로부터 계산된 본 실험의 조건은 Table 1에 나타내었다.

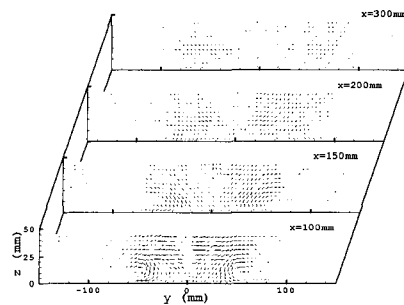
3.1 2차 속도 벡터

Fig. 6 (a), (b), (c)는 영각(β)의 변화에 따른 주유동 방향의 2차 유동(secondary flow)속도벡터를 실린더의 중심으로부터 하류의 4개의 단면($x=100, 150, 200, 300$ mm)에서 나타낸 것이다.

일반적으로 대칭적으로 설치된 한쌍의 반삼각



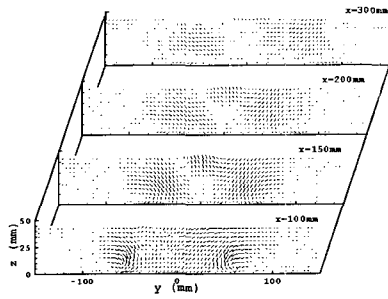
(a) $\beta=20^\circ$



(b) $\beta=30^\circ$

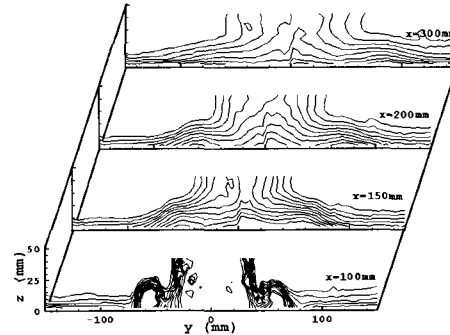
Table 1. Test Conditions

Boundary layer thickness(δ)	14 mm
Displacement thickness(δ^*)	1.31
Momentum thickness(θ)	1.08
Shape factor($H_{sf} = \delta^* / \theta$)	1.21
Reynolds number(Re_x)	4.083×10^5
Turbulence intensity	0.8%



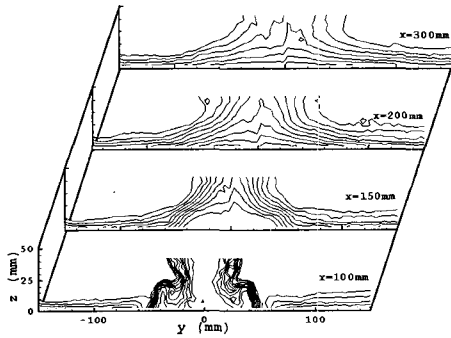
(c) $\beta=45^\circ$

Fig. 6 Secondary flow velocity vector

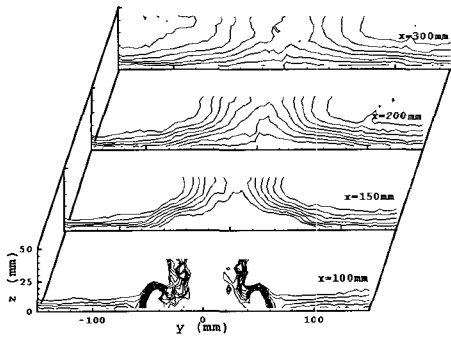


(c) $\beta=45^\circ$

Fig. 7 Streamwise velocity contours ($u/U_\infty = 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 0.99$)



(a) $\beta=20^\circ$



(b) $\beta=30^\circ$

익의 하류에서 나타나는 유동은 거의 대칭적 구조를 가지는 것으로 알려져 있다. 또한, $x=100$ mm에서는 각각 반시계방향과 시계방향으로 회전하는 두 개의 쌍와동이 발생함을 할 수 있지만, 하류로 이동할수록 와동의 속도벡터 크기가 감소하고 있음을 알 수 있고, 와동과 와동사이와의 간격이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 각운동량의 보존에 의해 하류로 이동할수록 와동에 의한 속도벡

터의 크기가 상대적으로 감소하고 또한 난류확산으로 인해 와동과 와동사이의 거리가 증가하게 된다. 실린더 뒤의 후류(wake)의 영향으로 인한 압력손실과 실린더 하류에서 발생하는 말굽와동과 와동발생기에 의해 발생된 종방향와동의 상호작용으로 인해 폭방향(y)으로 확산되어 y방향으로 타원형 형상에 가까운 와동을 발생시킨다.

영각의 증가로 인해 주와동과 반대방향으로 회전하는 코너와동(corner vortex)의 영향을 관찰할 수 있다. $x=100, 150$ mm에서는 주와동의 간격이 $x=300$ mm에 비해 작기 때문에 주와동과 코너와동의 상호작용이 나타나지만 $x=300$ mm에서는 주와동의 간격이 $x=100, 150$ mm일 때 보다 상대적으로 크기 때문에 주와동과 코너와동의 상호작용이 상대적으로 작아져서 코너와동의 현상이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

3.2 주유동방향의 등속도 분포

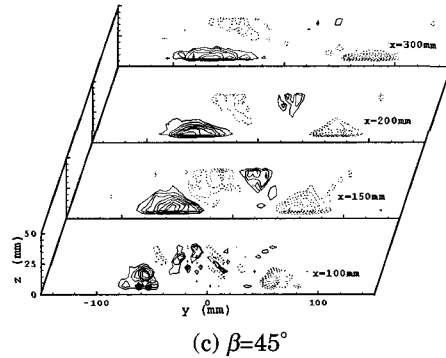
Fig. 7 (a), (b), (c)는 영각(β)의 변화에 따른 주와동방향의 속도를 상류층 유동속도로 $0.5 \sim 0.99$ 까지 무차원(u/U_∞)하여 나타낸 주유동방향의 등속도 분포를 실린더 하류 4개의 단면 ($x=100, 150, 200, 300$ mm)에서 나타낸 것이다.

바깥쪽 영역은 자유유동속도를 의미하기 때문에 주유동방향의 등속도 분포에서 할 수 있듯이 와동상호간의 작용은 경계층 두께변화에 지대한 영향을 미침을 알 수 있다. 실린더 하류로 이동할수록 상승(upwash) 영역에서는 경계층이 증가함을

확인 할 수 있다. 그러나 후류의 영향으로 인하여 하강(downwash) 영역이 하류로 갈수록 사라짐을 확인할 수 있다. 또한 $x=100$ mm에서는 와동중심 영역(vortex core region)을 확인 할 수 있지만 하류로 이동할수록 와동중심영역이 사라지는 것을 알 수 있다. 또한, 영각의 증가에 따라 와동과 와동 사이의 간격은 증가함을 알 수 있다. 이는 영각의 증가로 인해 초기에 생성된 와동과 와동사이의 간격이 증가하기 때문이다.

3.3 주유동방향 등와도 성분

Fig. 8 (a), (b), (c)는 영각(β)의 변화에 따른 자유 유동속도(U_∞)에 대한 유동방향 와도(streamwise vorticity $\Omega_x = (\frac{\delta w}{\delta y} - \frac{\delta v}{\delta z})$)를 등와도 성분으로 각 측정 단면($x=100, 150, 200, 300$ mm)에서 나타낸 것이다. 영각이 $20^\circ, 30^\circ$ 경우에는 와동간의 간격이 45° 에 비해 작아지기 때문에 주와동과 말굽와동의 상



(c) $\beta=45^\circ$
Fig. 8 Streamwise vorticity contour ($\Omega_x/U_\infty = \pm 0.1, 0.25, 0.35, 0.5, 0.55, 0.6$ [1/cm] solid line: positive value, dotted line : negative value)

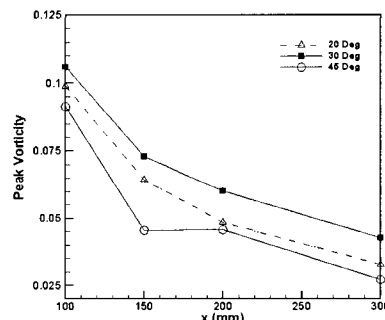


Fig. 9 Peak vorticity (Ω_{max} / U_∞ [1/cm])

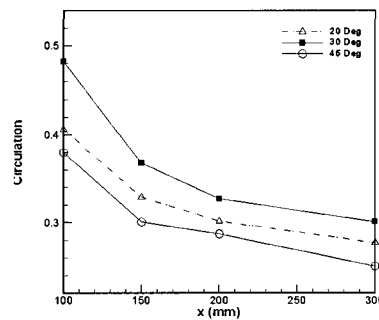
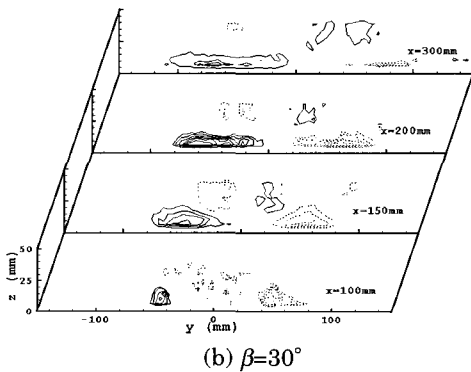
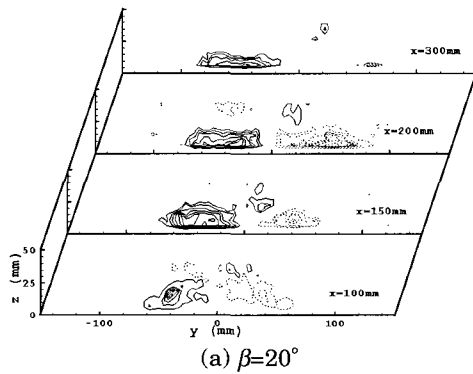


Fig. 10 Local circulation (Γ / U_∞ [cm])

호작용이 말굽와동과 코너와동의 상호작용보다 강하게 나타나므로 코너와동은 많이 사라짐을 알 수 있다. 영각이 45° 인 경우 $x=100, 150$ mm에서는 주와동과 반대방향으로 회전하는 코너와동의 상호작용이 강하지만 $x=300$ mm에서는 와동과 와동사이의 간격 증가로 주와동과 코너와동와의 상

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

X_i	Value	δX_i	$(\frac{\delta X_i}{X_i}) \times 100(\%)$
V	2.5 (V)	0.01 (V)	0.4
I	63 (A)	1.6 (A)	2.54
A	0.125(m ²)	0.0012(m ²)	0.97
ρ_∞	1.1856(kg/m ³)	0.0111(kg/m ³)	0.94
U_∞	6.5(m/s)	0.15(m/s)	2.31
ΔT	12.0(°C)	0.51(°C)	4.25
Total . Stanton number uncertainty $\delta(St)/(St) = 5.21 (\%)$			

호작용이 약해짐을 알 수 있고, 영각이 20°, 30°, 45° 모두 하류로 이동할수록 주와동 사이의 간격은 증가하고 와동의 형태는 난류 확산으로 인해 폭 방향으로 확장된 타원형의 형상을 나타내었다.

3.4 최대 와도값과 국소 순환값

Fig. 9은 영각과 축방향 변화에 따른 최대 와도값을 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 하류로 이동할수록 최대 와도값은 급격히 감소하는 경향을 보였다. 그리고 영각 30°, 20°, 45° 순으로 최대 와도값이 감소하였다.

Fig. 10은 영각과 축방향 변화에 따른 국소 순환 ($\Gamma_i = \oint_{path} V \cdot ds$)값의 변화를 나타낸 것이다. 국소 순환값의 변화는 Fig. 9의 최대 와도값과 유사한 경향을 보였다. 영각 30°일 때가 가장 큰 순환값을 가졌고, 순환값의 크기는 최대 와도값과 동일하게 영각 30°, 20°, 45° 순으로 감소하였다.

3.5 벽면에서의 열전달분포

실린더 하류에서 발생하는 벽면에서의 국소 열전달분포를 다음과 같이 Stanton수로 나타내었다.

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

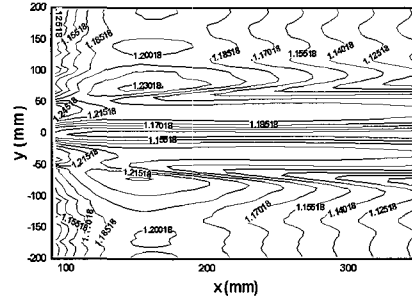


Fig. 11 Contours of Stanton number $\times 100$ ($\beta = 20^\circ$)

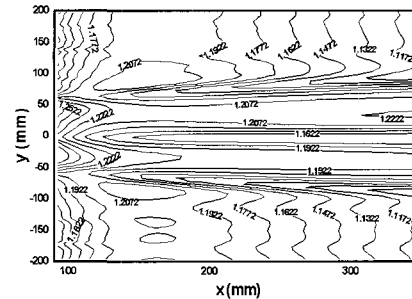
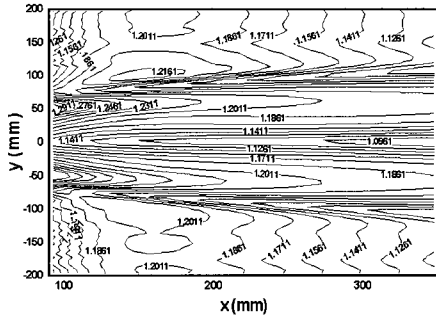


Fig. 12 Contours of Stanton number $\times 100$ ($\beta = 30^\circ$)

Stanton수의 불확실성은 Abernethy 등(11)의 방법으로 해석하였고, 20대 1의 신뢰도에서 Stanton수의 불확실성에 대한 데이터는 Table 2에 나타내었고, 비열 C_p 는 온도변화에 대해 민감하지 않으므로 일정한 것으로 가정하였고, ΔT 는 $(T_w - T_\infty)$ 를 의미한다.

Fig. 11~13은 와동발생기의 영각(β)이 20°, 30°, 45°에서 벽면 전체의 열전달계수를 Stanton수를 나타낸 것이다. Stanton수 곡선은 0.00015 간격으로 표현하였다.

영각이 증가할수록 와동과 와동사이의 간격이 증가하고 이로 인해 와동 상호간의 작용이 약해지기 때문에 영각이 증가할수록 두 개의 최대값을 갖는 국소 열전달 값 사이 간격이 증가함을 알 수 있다. 또한 각각의 최대값의 위치는 와동의 중심위치와 거의 일치함을 알 수 있다. $x=150$ mm, $y=\pm 90$ mm 위치에서 말굽와류의 중심이 발견되었다. 이는 와동발생기에서 발생한 와류에 의하여 실린더에 의해서 생성되는 말굽와류의 중심이 확산된 것으로 판단된다.



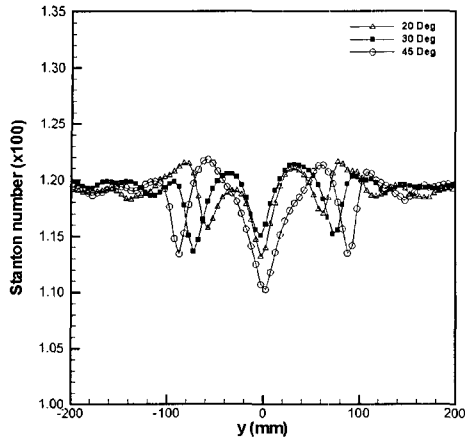


Fig. 17 Spanwise profiles of Stanton number with $\beta=20^\circ, 30^\circ$ and 45° at $x=300$ mm

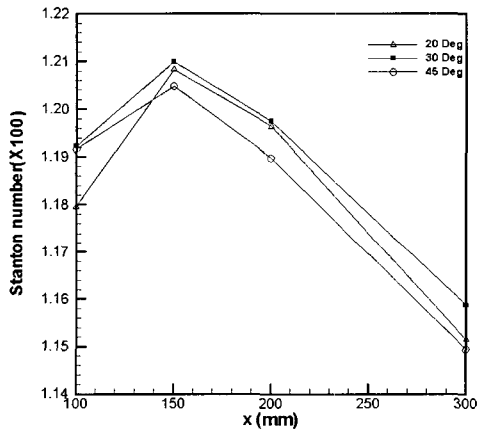


Fig. 18 Spanwise distributions of averaged Stanton number on the measurement planes

유동과 후류 그리고 종방향 와동의 상호작용으로 인해 종방향과 반대방향의 와동이 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 영각이 45° 인 경우와 30° 경우 최대 열전달 값은 비슷한 값을 가지고 있다.

Fig. 16은 측정단면 $x=200$ mm에서 영각의 변화에 따른 국소 열전달분포를 나타낸 그림이다. Fig. 15와 같이 실린더 하류에서 영각이 45° 인 경우 최소 열전달계수를 가지고 있다. 이는 영각이 증가함에 따라 와동 상호간의 작용이 약해지기 때문이다. 또한 난류 확산으로 인한 와동이 약해짐으로 전체적으로 열전달분포값은 상류에 비해 감소

하고 있다. Fig. 17은 측정단면 $x=300$ mm에서 영각의 변화에 따른 국소 열전달분포를 나타낸 그림이다. 열전달 분포는 영각이 변화하여도 비슷한 경향을 보여주고 있다.

3.7 주유동 방향의 평균 열전달분포

Fig. 18는 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, 영각이 30° 일 때 열전달값이 큰 것을 알 수 있다. 또한 $x=150$ mm까지는 열전달값이 증가하다가 감소하고 있다.

4. 결 론

경계층이 형성되어 있는 평판 위에 수직으로 부착된 실린더 후미에 와동발생기를 부착한 경우에 대해 와동발생기 하류에서 발생하는 유동현상을 5공 프로브와 액정을 이용하여 유동장 및 열전달을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 영각의 변화에 관계없이 $x=100$ mm에서는 각각 반시계방향과 시계방향으로 회전하는 두 개의 쌍와동이 발생함을 알 수 있지만, 하류로 이동할수록 와동의 속도벡터 크기가 감소는 경향을 나타내었다.

(2) 하류로 이동할수록 주와동 사이의 간격은 증가하고 와동의 형태는 난류 확산으로 인해 폭방향으로 확장된 타원형의 형상을 나타내었다. 또한, 최대 와도값과 국소 순환값은 $30^\circ, 20^\circ, 45^\circ$ 순으로 감소하였다.

(3) 영각이 클수록 와동간 중심부의 간격이 넓어져 와동간의 상호작용이 작아지게 되어 바닥면에서의 지속적인 열전달 증대가 하류 부분까지 이루어지지 못했다.

(4) 실린더 후미에 와동발생기가 부착한 경우 영각이 30° 인 경우가 $20^\circ, 45^\circ$ 에 비해 열전달이 잘 되었다.

참 고 문 헌

(1) Tiggelbeck, St., Mitra, N.K., and Fiebig, M., 1994, "Comparison of wing-type vortex generators for heat transfer enhancement in channel flow", ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 116, No.4, pp.880~885.

(2) Pauley, W. R. and Eaton, J. K., "Experimental Study of the Development of Longitudinal Vortex Pairs Embedded in a Turbulent Boundary Layer", AIAA Journal, Vol.26, No.7, pp.816~826, 1988

(3) Bruce J. Wendt, Isaac Grebert and Warren R. Hingst, 1993, "Structure and development of streamwise vortex arrays embedded in a turbulent boundary layer", J. AIAA, Vol.31, No.2.

(4) Percy, H. H., "Shock-Induced separation and its prevention by design and boundary layer control.", Boundary layer and Flow control. Vol.2, edited by G.V. Lachman, Pergamon, New York 1961, pp.1166-1344

(5) G. Biswas, N. K. Mitra, M. Fiebig, 1994, "Heat transfer enhancement in fin-tube heat exchangers by wingleet type vortex generators", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.37, No.2, pp.283-291

(6) 이상민, 하홍영, 양장식, 이기백, 2001, "사각채널내 와동발생기가 부착된 원형 실린더 하류 유동 특성에 대한 실험적 연구", (사) 한국박용기관학회지, 제25권, 제5호, pp. 1076~1085.

(7) 양장식, 나종문, 이기백, 1995, "선형 터빈 캐스케이 드 끝벽의 열전달 특성에 관한 연구", 대한기계학회, 제19권, 제9호, pp. 2386~2398.

(8) 이기백, 김태영, 양장식, 1997, "색상포착기법과 수치 계산을 이용한 3차원 밀폐공간 내의 자연 대류 연구", 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제12호, pp. 1595~1607.

(9) P. Deb, G. Biswas, N.K. Mitra, 1995, "Heat transfer and flow structure in laminar and turbulent flows in a rectangular channel with longitudinal vortices", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.38, No.13, pp.2427-2444

(10) 하홍영, 2002, "와동발생기 영각의 변화 따른 실린더 하류의 유동장 및 열전달에 대한 실험적 연구", 부산대학교 석사학위논문.

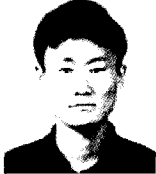
(11) Abernethy, R. B., Benedict, R. P. and Dowdell, R. B., 1985, "Measurement Uncertainty", ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 107, pp. 161~164.

(12) 권수인, 양장식, 이기백, 2002, "와동 발생기 높이 변화에 대한 경계층 내의 유동장과 온도장에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집 B권, 제26권 제1호, pp.82~93.

저 자 소 개



하홍영(河洪永)
1973년 3월생. 2000년 영남대학교 기계공학과 졸업. 2002년 부산대학교 기계공학과 대학원 졸업(석사). 2002년 - 현재 대동공업(주) 기술연구소



홍철현(洪徹弦)
1970년 8월생. 1997년 부산대학교 기계공학과 졸업. 1999년 부산대학교 기계공학과 대학원 졸업(석사).



양장식(梁長植)
1961년 1월생. 1984년 부산대학교 기계공학과 졸업. 1986년 부산대학교 기계공학과 대학원 졸업(석사). 1995년 부산대학교 기계공학과 대학원 졸업(박사). 1999년 - 현재 부산대학교 기계공학부 . 당학회 회원.



이기백(李起白)
1938년 8월생. 1964년 서울대학교 물리학과 졸업. 1968년 경북대학교 대학원 졸업(석사). 1983년 경북대학교 대학원 졸업(박사). 1970년 - 현재 부산대학교 기계공학부 교수. 당학회 회원.