

사각채널내 와동발생기가 부착된 원형실린더 하류 유동 특성에 대한 실험적 연구

이상민* · 하홍영** · 양장식*** · 이기백****

Experimental Investigations of Flow Characteristics by Wing Type Vortex Generators Set up Behind a Circular Cylinder in a Rectangular Channel

S-M Lee* · H-Y Ha** · J-S Yang*** and K-B Lee****

Key words : Vortex Generator(와동발생기), Vortex Pair(쌍와동), Five-hole probe(5공 프
로브), Circular cylinder(원형 실린더), Half Delta Wing(반삼각익)

Abstract

Experimental investigations of the longitudinal vortices, which are produced by wing type vortex generators set up behind a circular cylinder in a rectangular channel, are presented. When the circular cylinder is set up in the rectangular channel, a horseshoe vortex is formed just upstream of the circular cylinder. It generates a turbulent wake region behind the circular cylinder. Therefore, the region of the pressure loss behind the circular cylinder is increased and the size of the wake is small. These problems can be achieved by longitudinal vortices which are generated by wing-type vortex generator. In order to control the strength of longitudinal vortices, the angle of attack of the vortex generators is varied from 20 degree to 45, but the spacing between the vortex generators is fixed 6cm. The 3-dimensional mean velocity measurements are made using a five-hole probe. The vorticity field and streamwise velocity contour are obtained from the velocity field. The following results are obtained. Circulation strength is the maximum value when the angle of attack(β) is 30° , and the vorticity field and streamwise velocity contour in case of $\beta=20^\circ$ show the trend similar to those in case of $\beta=30^\circ$, but do not in case of $\beta=45^\circ$.

* (주)삼성전자, 개발3그룹

** 부산대학교 기계공학과 대학원

*** 부산대학교 기계기술연구소

**** 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

기호설명

- D : 실린더 직경(Cylinder diameter)
- H_{sf} : 형상계수(Shape factor)
- U_{∞} : 자유 유동 속도(Freestream velocity)
- Re_x : 반삼각익의 설치 위치에 근거한 Reynolds 수
- Re_{θ} : 운동량 두께에 근거한 Reynolds 수
- β : 자유 유동속도 방향에 대한 반삼각익의 영각
- δ : 경계층 두께
- θ : 운동량 두께
- Γ : 순환(Circulation)
- \mathcal{Q} : 와동의 와도(Vorticity)
- Λ : 반 삼각익의 면적비

1. 서론

균일한 유동장 내에 설치한 에어 포일, 터빈 기계 익렬의 뿌리 부근, 선박 부착물의 접합부 등의 장애물에 유동이 접근하여 생기는 3차원 경계층 박리는 중요한 유체 역학적인 문제 중의 하나이다. 특히 공학적인 응용이 높은 원형 실린더를 직교 유동장 내에 수직으로 위치시킬 경우, 2차원 난류 경계층이 표면 위에 부착된 원형실린더에 접근하여 선단과 물체의 주위에 복잡한 3차원 유동 현상이 생기며 이는 열전달의 중요한 메커니즘으로 인식되어지고 있다. 경계층을 벗어난 영역의 유체 입자는 실린더에 의하여 생기는 역압력 구배를 충분히 이겨낼 수 있는 운동량을 가지고 있어서 2차원 무한 실린더에서와 같은 유동의 경향을 나타내는 반면 경계층내에서는 상대적으로 작은 운동량을 가진 유체입자가 역압력 구배를 이기지 못하고 박리를 일으키며 실린더의 상류 지역에서 역류가 발생하게 되며 이 역류는 실린더 주위로 퍼져 나가면서 주위 유체입자와 상호 작용으로 와동을 형성한다. 이 와동이 생성되어 발달해 가는 모양이 말굽과 같다고 해서 말굽와동(horseshoe vortex)라고 한다.

특히 열교환기 분야에서 이러한 말굽와동은 뭉툭한 물체(bluff body)의 폭과 함께 강도와 유익한 효과들이 증가한다. 그러나 하류 부근에서의 빈약

한 열전달 효과와 압력손실이 증가하게 된다. 이러한 원-튜브(fin-tube) 열교환기의 하류 부분에서의 열저항의 감소와 열전달 계수의 향상을 위하여 날개형 와동 발생기에 의해 발생하는 종방향 와동들이 제시되었다¹⁾. 이러한 난류 경계층에서 종방향 속도성분을 가진 와동과 경계층 사이의 상호작용은 인접한 유체들의 혼합을 향상 시킴으로써 열전달을 향상 시킨다.

최근의 연구동향은 원형 튜브와 날개형 와동발생기가 장착된 채널에서의 유동 특성과 열전달에 관련한 연구가 수행되고 있다.

Wendt 등²⁾은 난류 경계층에 폭방향으로 배열된 와동발생기의 간격변화에 따라 와동이 벽면에 근접해지며, 이로 인해 와동과 경계층이 상호작용이 약화됨을 확인하였다. Pauley 등³⁾은 와동발생기의 영각(angle of attack)을 변화시켰을 때 두 가지의 유동 형태 즉, 와동과 와동사이의 유동이 벽면으로부터 멀어지는 유동(common flow up)과 벽면으로 향하는 유동(common flow down)에 관한 연구를 수행하였다. Biswas 등⁴⁾은 레이놀즈 수가 500일 때 원형 튜브(Tube)와 길이방향 와동들에 대한 Navier-Stokes 와 에너지 방정식 들의 계산을 통한 수치적 연구를 하였다. Chen 등⁵⁾은 날개의 영각(angle of attack)과 면적비(Asspect ratio)를 변화시킨 상태에서 타원형 튜브 하류에서의 열전달과 유동특성에 대하여 수치적인 연구를 하였다. Dong⁶⁾과 Valencia⁷⁾는 원형 장애물이 설치된 채널에서 와동 발생기들의 날개 형태의 영향을 연구하기 위해 실험적 연구를 수행하였다.

이러한 와동간의 상호작용은 매우 중요한 역할을 담당하고 있으며 이때 중요한 변수로는 원형실린더와 와동발생기 사이의 간격, 강도, 표면으로부터의 와동의 높이등으로 알려져 있는데 이는 와동발생기의 설치에 따라 조절될 수 있다. 따라서 와동간의 상호작용이 존재하는 유동이나 와동발생기를 사용하여 유동 및 열전달 효과를 제어해야하는 경우에 와동간의 상호작용이 전 유동장에 미치는 영향에 대한 정확한 이해가 요구된다.

따라서 본 연구에서는 난류 유동일때 실린더 한 개 놓인 경우의 유동장에 대한 이해를 바탕으로 원형 실린더 후면에 와동발생기가 부착된 경우와

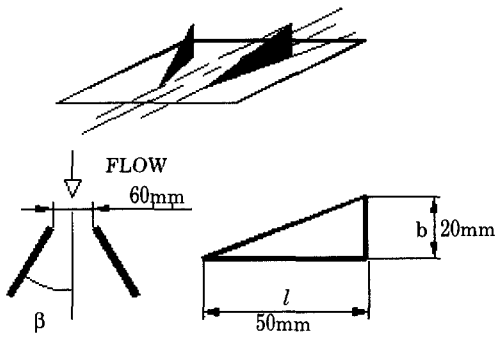


Fig. 1 Schematic of vortex generation

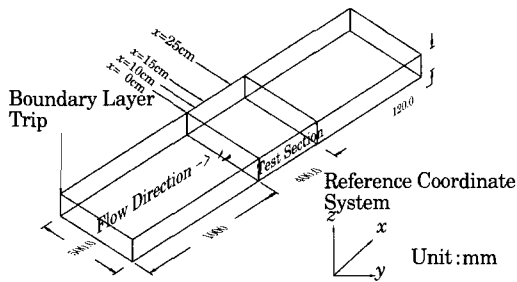


Fig. 2 Physical wind tunnel domain without cylinder

와동발생기만 부착된 경우에 대해 영각을 변화시킴으로써 하류에서의 유동 특성을 조사하여 열교환기 및 기타장치에 대한 기초적 자료를 제공하고 자 한다.

2. 실험방법

2.1 실험장치 및 실험조건

유동장 실험은 아음속 개방형 풍동을 사용하여 시험 체적부로 공기를 유입한다. 풍동은 확대부, 정체부, 수축부, 시험부로 구성되며 송풍기로부터 유입되는 유입 공기의 속도를 일정하게 하기 위하여 인버터를 사용하여 송풍기의 회전수를 조정함으로써 유입공기의 속도를 일정하게 유지하였다. 시험부의 길이는 약 200cm이며 시험 체적부의 단면의 크기는 60cm × 12cm 이고 두께 1.5cm의 아크릴 판으로 제작하였다. 상대적으로 약한 축방향 속도 성분을 지는 와동쌍을 발생시키기 위해 원형 실린더 후면에 한쌍의 반 삼각익(Half delta wing)

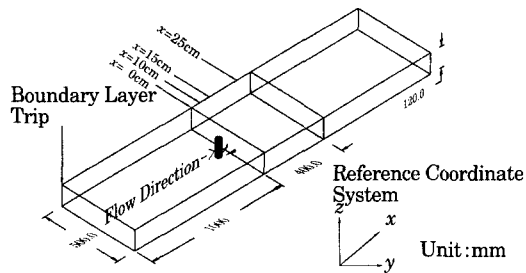


Fig. 3 Physical wind tunnel domain with cylinder

Table 1 Experiment condition

U_{∞}	20m/s
δ	1.427cm
δ^*	0.1313cm
θ	0.108cm
$H_{sf} = \delta^*/\theta$	1.21
Re_x	1.47×10^8
Re_{θ}	1546
Turbulence intensity	0.2%

을 사용한다. 반 삼각익 형태의 와동발생기는 주 유동 방향의 속도 성분을 크게 감소시키지 않고 하류에서 와동을 형성할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에 사용한 반 삼각익의 면적비(Asspect ratio)는 반 삼각익의 코드길이 $l=5cm$, 높이 $b=2cm$ 이며 Deb 등⁽⁶⁾이 제시한 방법으로 계산하였으며 본 실험에서의 A (Aspect Ratio)는 0.8이다.

Fig. 1은 와동발생기인 반삼각익의 형상과 영각을 나타낸 것이며, 반삼각 형상은 길이 $l=5cm$, 높이 $b=2cm$, 반삼각 사이의 간격을 원형실린더 직경(D)의 두배인 6cm로 하였으며 영각(β)를 변화시키면서 유동장을 측정하였다. 반 삼각익의 설치 위치는 아음속 풍동의 수축부 출구로부터 100cm 떨어진 위치에 설치하였다.

Fig. 2는 와동발생기만 부착하였을 경우와 Fig. 3는 원형실린더 후면에 와동발생기가 부착된 경우의 하류 유동장 측정을 위한 장치도이다. 순환 및 와동 간격을 조절하기 위해 주 유동방향에 대한 반 삼각익의 영각(β)을 변화시켰다. $\beta=20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 이며 원형실린더 후면에서의 삼각익의 간격 6cm에 대해 각 경우를 조합한 총 3가지 경우에 대하여 원형실린더 중심으로부터 후방 10cm, 15cm, 25cm에서 유동장을 측정하였다. 그리고 Table 1은 본

실험에서의 실험조건을 나타낸 것이다.

2.2 유동장 측정

각 측정단면에서 측정점을 이송하기 위해 3축 이송장치를 사용하였다. 측정단면에서 유동장을 측정하기 위해 두께 0.5cm의 아크릴에 0.4cm의 홈을 가공하여 5공 프로브를 측정부에 삽입한다. 또한 측정 단면의 홈을 움직이도록 슬라이딩 판을 제작하고 여기에 5공 프로브를 부착하여 누수 공기를 최대한 억제하였다. 각 측정단면에서 압력 측정점은 y, z방향으로 0.4cm간격으로 측정점을 선택하였다. y방향은 좌측 벽면으로부터 15cm 떨어 져있는 측정점으로부터 측정되었고 z방향은 아래 벽면에서 0.2cm 떨어져있는 측정점으로부터 측정 되었다. 5공 프로브로부터의 압력 데이터는 각 압력공과 연결된 미세 압력변환기(FCO44)로 전달 된다. 미세 압력계의 압력은 다채널 A/D변환기 (PCL-812 PG)를 통해 디지털 신호로 변환되어 Pentium 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 출력 포트에서 3축 이송장치의 스텝핑 모 터 제어부에 디지털 신호를 입력하여 다음 측정 위치로 자동으로 이송된다. 획득된 데이터로부터 5공 프로브의 보정 데이터를 이용하여 속도장을 구 한다. 이로부터 식(1)을 이용하여 와도장(Ω)을 구 하는데 이때 유한 차분식을 사용하여 측정점을 포함하는 경계부분에서는 2차 정확도의 중앙 차분법 으로 경계내부에서는 4차 정확도의 중앙 차분법을 사용하였다. 순환(Γ)은 식(2)로부터 구할 수 있다.

$$\Omega_x = \left(\frac{\delta w}{\delta y} - \frac{\delta v}{\delta z} \right) \quad (1)$$

$$\Gamma_i = \oint_{path} V \cdot ds \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 와동발생기 하류의 유동장($\beta=20^\circ$)

유동특성을 조사하기 위하여 각 경우에 대해 측

정단면에서의 속도장(velocity field)을 구하고 이로부터 와도장(vorticity field)과 x축 방향(streamwise)속도 분포를 구하였다. 와도장은 각 측정점에서의 와도값을 상류측 속도 U_∞ 로 나눈 값(Ω/U_∞)으로 나타내었다. 각 측정단면에서 측 방향 속도 분포는 u/U_∞ 의 0.6~0.99까지에 대해 나타내었다. 본 연구에서는 원형실린더 끝단을 중심으로 부착한 와동발생기의 간격이 실린더 직경(D)에 대하여 2D로 부착한 경우와 와동발생기만 부착된 경우에 대해 유동특성을 실험하였다.

Fig. 4는 $\beta=20^\circ$ 경우 주유동 방향의 2차 유동(secondary flow)속도벡터를 (a)는 와동발생기만 부착된 경우, (b)는 실린더 후미에 와동발생기가 부착된 경우를 하류의 3개의 단면 ($x=10, 15, 25cm$)에서 나타낸 것이다.

일반적으로 대칭적으로 설치된 한쌍의 반삼각 의 하류에서 나타나는 유동은 거의 대칭적 구조 를 가지는 것으로 알려져 있다. Fig.4 (a)에서 알 수 있듯이 각각 반시계방향과 시계방향으로 회전 하는 두 개의 쌍와동이 발생함을 할 수 있다. 또한 측정단면이 하류로 이동할수록 와동의 속도벡터 크기가 감소하고 있음을 알 수 있고, 와동과 와동 사이와의 간격이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 각운동량의 보존에 의해 하류로 이동할수록 와동 에 의한 속도벡터의 크기가 상대적으로 감소하고 또한 난류확산으로 인해 와동과 와동사이의 거리가 증가하게 된다.

Fig. 4 (b)의 경우에는 실린더 뒤의 후류(wake)의 영향으로 인한 압력손실과 실린더 하류에서 발생되는 말굽와동과 와동발생기에 의해 발생된 종 방향와동(longitudinal vortex)의 상호작용으로 인해 폭방향(y)으로 더 확산되어 y방향으로 타원 형 형상의 와동을 발생시킨다.

Fig. 5는 $\beta=20^\circ$ 인 경우 주와동방향의 속도를 상류측 유동속도로 무차원(u/U_∞)하여 나타낸 주유 동방향의 등속도 분포를 (a)는 와동발생기만 부착 된 경우, (b)는 실린더 후미에 와동발생기가 부착 된 경우를 하류의 3개의 단면 ($x=10, 15, 25cm$)에 서 나타낸 것이다.

Fig. 5 (a)에서 바깥쪽 영역은 자유유동속도를 의미하기 때문에 주유동방향의 등속도 분포에서

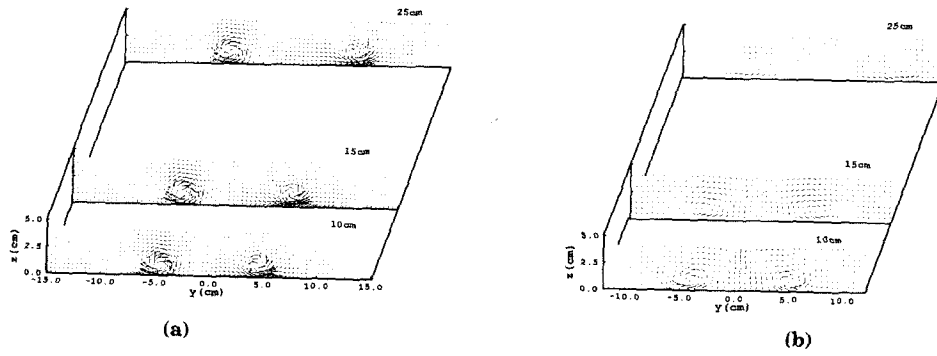


Fig. 4 Secondary velocity vector at $\beta=20^\circ$

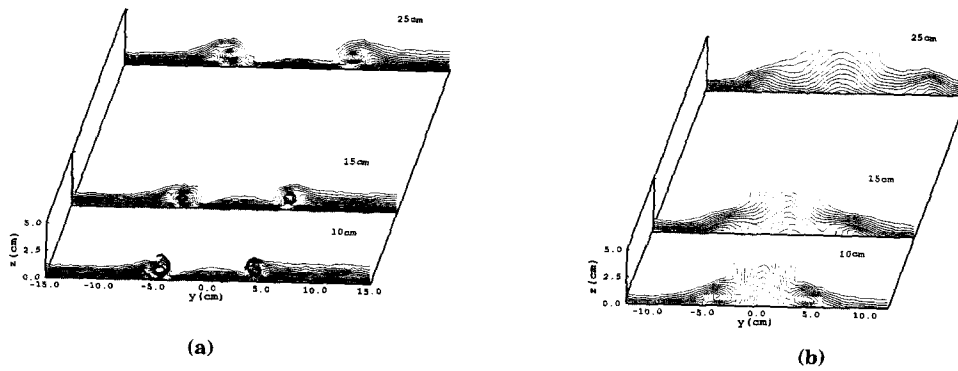


Fig. 5 Streamwise velocity contours at $\beta=20^\circ$

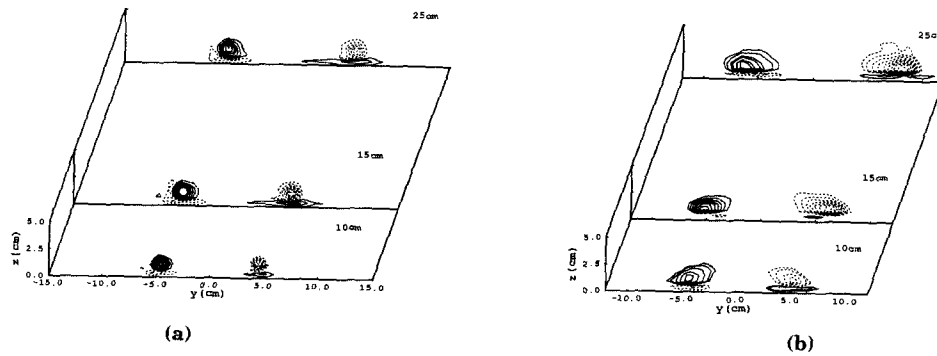


Fig. 6 Streamwise vorticity contour at $\beta=20^\circ$ (solid line: positive value, dotted line: negative value)

할수 있듯이 와동상호간의 작용은 경계층 두께변화에 지대한 영향을 미침을 알 수 있다. 폭방향의 속도구배($\partial v/\partial y$)가 $x=10cm$ 에서 가장 크기 때문에 경계층 두께가 얇아지나 하류로 이동할수록 와동의 중심영역에서의 세기가 약해지므로 폭방향의 속도구배($\partial v/\partial y$)가 감소하게 된다. 이로 인해 와동

과 와동사이의 경계층은 얇아지나 와동의 바깥영역은 경계층이 두꺼워진다. 따라서 유동이 벽면으로 향하는 downwash 영역에서는 경계층이 얇아지고 유동이 벽면으로부터 멀어지는 upwash 영역에서는 경계층이 두꺼워진다. 또한 하류로 이동할수록 와동쌍의 간격은 증가하고 확산에 의해 와동

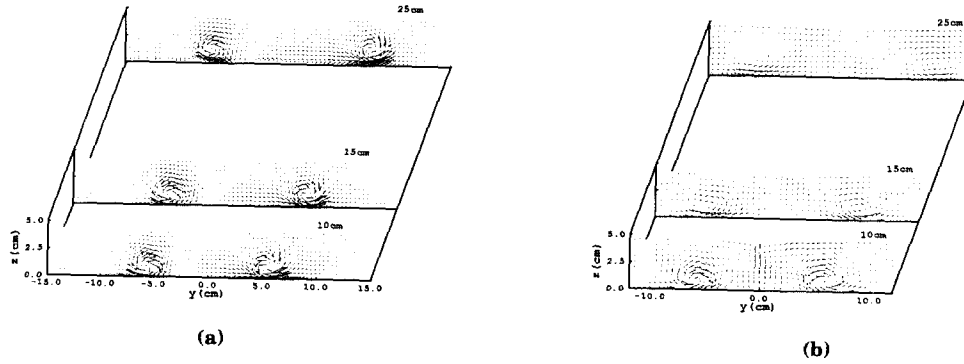


Fig. 7 Secondary velocity vector at $\beta=30^\circ$

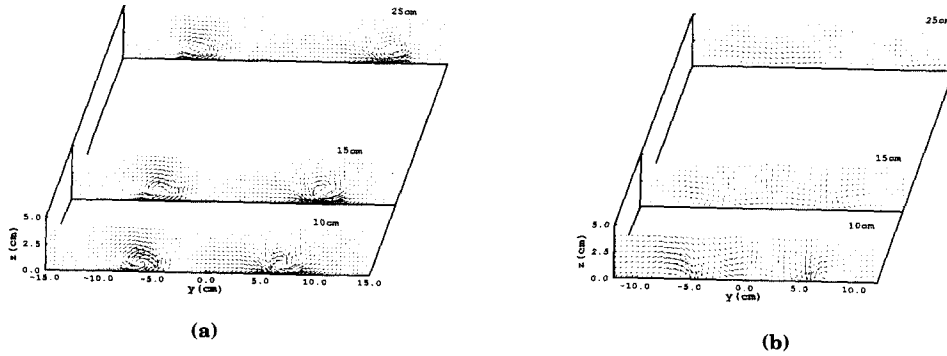


Fig. 8 Secondary velocity vector at $\beta=45^\circ$

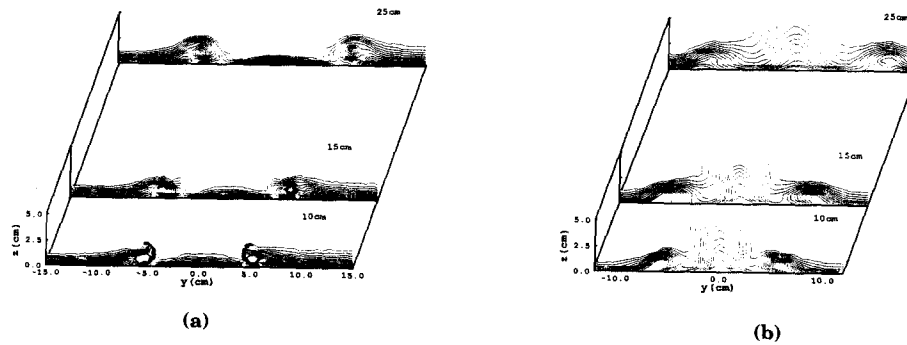


Fig. 9 Streamwise velocity contours at $\beta=30^\circ$

의 형상은 커지게 된다.

Fig. 5 (b)의 실린더 후미에 와동발생기가 부착된 경우 하류로 이동할수록 upwash 영역에서는 경계층이 증가함을 확인할 수 있다. 그러나 후류의 영향으로 인하여 downwash 영역이 하류로 갈수록 사라짐을 확인할 수 있다. 또한 $x=10\text{cm}$ 에서는

와동중심영역(vortex core region)를 찾아 볼 수 있지만 하류로 이동할수록 와동중심영역이 약해지는 것을 알 수 있다.

Fig. 6는 $\beta=20^\circ$ 인 경우 자유유동속도(U_∞)에 대한 유동방향 와도를 등와도 성분으로 각 측정 단면($x=10, 15, 25\text{cm}$)에서 나타낸 것이다. (a)는 와동

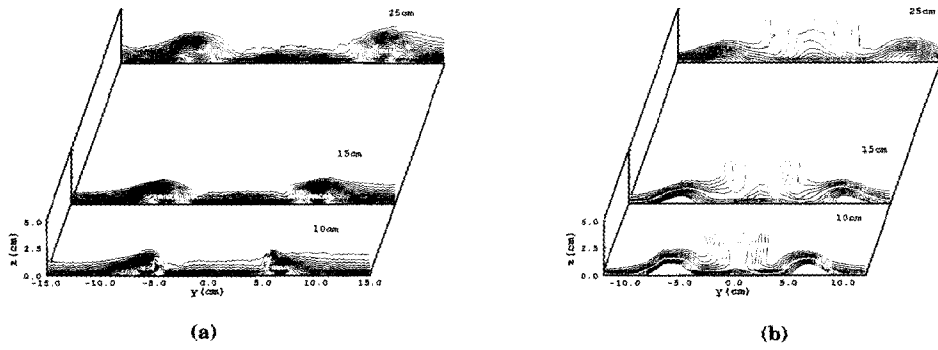


Fig. 10 Streamwise velocity contours at $\beta=45^\circ$

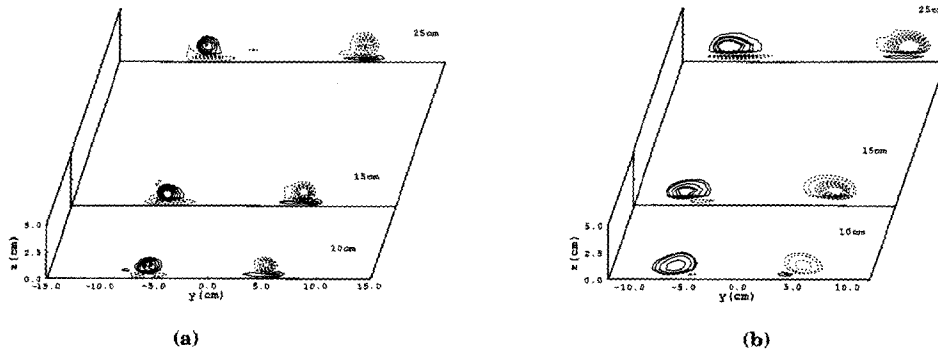


Fig. 11 Streamwise vorticity contour at $\beta=30^\circ$ (solid line: positive value, dotted line : negative value)

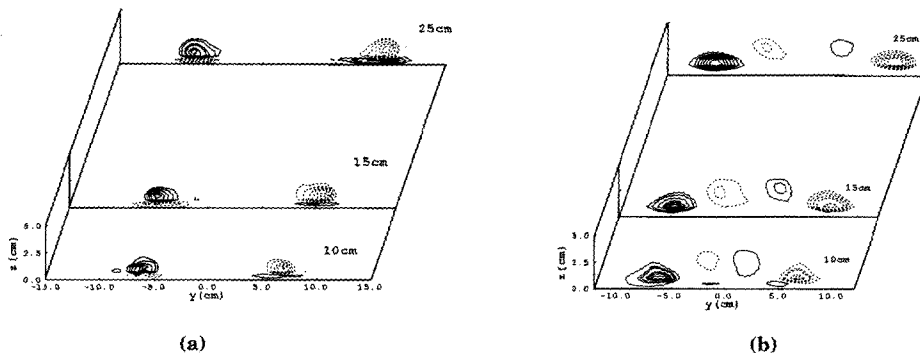


Fig. 12 Streamwise vorticity contour at $\beta=45^\circ$ (solid line: positive value, otted line : negative value)

발생기만 부착된 경우, (b)는 실린더 후미에 와동 발생기가 부착된 경우이다.

Fig. 6 (a)의 등와도 성분에서 알 수 있듯이 하류로 이동할수록 와동과 와동사이의 상호 작용은 아주 약하게 작용하고 있다. $x=10, 15\text{cm}$ 에서는 와동의 중심 형상은 원형에 가깝지만, $x=25\text{cm}$ 에서는

난류확산에 의한 와도 성분이 평활화되어 폭방향으로 확장된 타원형 형상을 나타내고 있다. 그리고 와동과 벽면의 점착조건에 의해 벽과 주와동 사이에 반대 부호의 2차 와동이 관찰되었다. Pauley 등⁽¹⁾의 연구결과에서도 동일한 현상이 발견되었다.

Fig. 6 (b)에서 와동의 형태가 $x=10\text{cm}$ 에서부터

폭방향으로 확장된 타원형 형상을 나타내고 있다. 이는 실린더 후류와 말굽와동 그리고 종방향와동의 상호작용으로 인해 와동발생기만 부착하였을 경우보다 더욱더 난류확산이 증가하기 때문인 것으로 여겨진다.

3.2 영각(β)의 변화에 따른 와동발생기 하류의 유동장

Fig. 4, Fig. 7, Fig. 8은 와동발생기의 영각(β)이 20°, 30°, 45°에서 주유동 방향의 2차 유동속도벡터를 (a)는 와동발생기만 부착된 경우, (b)는 실린더 후미에 와동발생기가 부착된 경우를 하류의 3개의 단면 ($x=10, 15, 25cm$)에서 나타낸 것이다.

영각 45°인 경우는 영각의 증가로 인해 주와동과 반대방향으로 회전하는 코너와동(corner vortex)의 영향을 관찰할 수 있다. $x=10, 15cm$ 에서는 주와동의 간격이 $x=25cm$ 에 비해 작기 때문에 주와동과 코너와동의 상호작용이 뚜렷하게 나타나지만 $x=25cm$ 에서는 주와동의 간격이 $x=10, 15cm$ 일 때 보다 상대적으로 크기 때문에 주와동과 코너와동의 상호작용이 상대적으로 작아져서 코너와동의 현상이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

Fig. 5, Fig. 9, Fig. 10은 와동발생기의 영각(β)이 20°, 30°, 45°에서 주와동방향의 속도를 상류층 유동속도로 무차원(u/U_∞)하여 나타낸 주유동방향의 등속도 분포를 (a)는 와동발생기만 부착된 경우, (b)는 실린더 후미에 와동발생기가 부착된 경우를 하류의 3개의 단면 ($x=10, 15, 25cm$)에서 나타낸 것이다.

영각의 변화에 따라 와동과 와동사이의 경계층 두께의 변화는 거의 없지만, 영각의 증가에 따라 와동과 와동사이의 간격은 증가함을 알 수 있다. 이는 영각의 증가로 인해 초기에 생성된 와동과 와동사이의 간격이 증가하기 때문이다.

Fig. 6, Fig. 11, Fig. 12는 와동발생기의 영각(β)이 20°, 30°, 45°에서 자유유동속도(U_∞)에 대한 유동방향 와도를 등와도 성분으로 (a)는 와동발생기만 부착된 경우, (b)는 실린더 후미에 와동발생

기가 부착된 경우를 하류의 3개의 단면 ($x=10, 15, 20cm$)에서 나타낸 것이다.

영각이 45°로 증가하면 주와동과 반대방향으로 회전하는 코너와동의 영향을 관찰할 수 있지만, 영각이 20°, 30° 경우에는 와동간의 간격이 45°에 비해 작아지기 때문에 주와동과 말굽와동의 상호작용이 말굽와동과 코너와동의 상호작용보다 강하게 나타나므로 코너와동은 나타나지 않는 것으로 판단된다. 영각이 45°인 경우 $x=10, 15cm$ 에서는 주와동과 반대방향으로 회전하는 코너와동의 상호작용이 강하지만 $x=25cm$ 에서는 와동과 와동사이의 간격 증가로 주와동과 코너와동와의 상호작용이 약해짐을 알 수 있고, 영각이 20°, 30°, 45° 모두 하류로 이동할수록 주와동 사이의 간격은 증가하고 와동의 형태는 난류 확산으로 인해 폭방향으로 확장된 타원형의 형상을 나타내었다.

3.3 최대 와도값과 국소 순환

Fig. 13은 영각과 축방향 변화에 따른 최대 와도값을 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 최대 와도값은 와동발생기만 부착한 경우와 실린더 후미에 와동발생기만 부착한 경우 모두 유사한 경향을 보여주고 있고, 하류로 이동할수록 최대 와도값은 급격히 감소하는 경향을 보였다. 그리고 와동발생기만 부착한 경우와 실린더 후미에 와동발생기를 부착한 경우 모두 영각 30°, 20°, 45°순으로 최대 와도값이 감소하였다.

Fig. 14는 영각과 축방향 변화에 따른 국소 순환값의 변화를 나타낸 것이다. 국소 순환값의 변화는 Fig. 13의 최대 와도값과 유사한 경향을 보였다. 와동발생기만 부착한 경우와 실린더 후미에 와동발생기를 부착한 경우에서 와동발생기만 부착한 경우의 영각 30°일 때가 가장 큰 순환값을 가졌고, 순환값의 크기는 최대 와도값과 동일하게 영각 30°, 20°, 45°순으로 감소하였다.

4. 결론

와동발생기만 부착한 경우 그리고 실린더 후미에 와동발생기를 부착한 경우에 대해 와동발생기

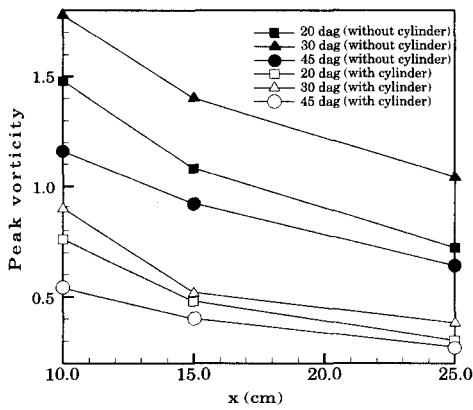


Fig. 13 Peak vorticity (Ω_{max}/U_{∞})

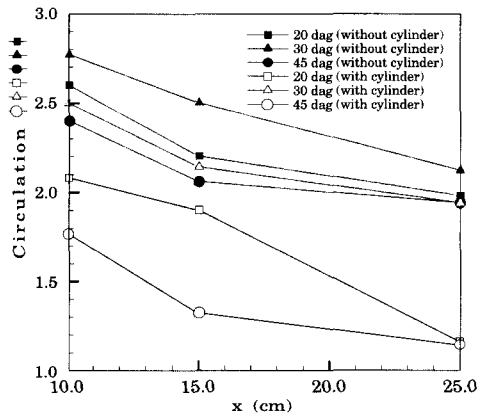


Fig. 14 Local circulation (Γ/U_{∞})

의 영각을 20°, 30°, 45°로 변화시킬 때 와동발생기 하류에서 발생하는 유동현상을 5공 프로브를 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 와동발생기만 부착한 경우와 실린더 후미에 와동발생기가 부착한 경우, 최대 와도값과 국소 순환값은 30°, 20°, 45°순으로 감소하였다.
- (2) 와동발생기만 부착한 경우 중 영각 30°가 가장 큰 최대와도값과 국소 순환값을 나타내었다.
- (3) 와동발생기만 부착하였을 경우와 실린더 후미에 와동발생기를 부착하였을 경우 모두 두 와동간의 간격은 하류로 갈수록 증가하였지만, 와동간의 상호작용은 아주 약하였다.

- (4) 실린더 후미에 와동발생기를 부착한 경우 영각이 45°는 영각이 20°, 30°와 달리 주와동과 반대방향으로 회전하는 코너와동이 발생하였다.

후 기

본 연구는 부산대학교 기성회 재원 학술 연구조성비에 의한 연구임

참고문헌

- [1] Tiggelbeck, S., Mitra, N. K. and Fiebig, M., "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, 1994
- [2] Wendt, B. J. and Hingst, W. R., "Flow Structure in the Wake of a Wishbone Vortex Generator," AIAA Journal, Vol.32, No.11, pp.2234~2240, 1997
- [3] 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
- [4] Biswas, G., Mitra, N. K. and Fiebig, M. "Heat transfer enhancement in fin-tube heat exchangers by winglet type vortex generators," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.37, No.2, pp.283~291, 1994
- [5] Chen, Y., Fiebig, M., and Mitra, N. K., "Conjugate heat transfer of a finned oval tube with a punched longitudinal vortex generator in form of a delta winglet-Parametric investigations of the winglet," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.41, No.23, pp. 3961~3978, 1998
- [6] Dong, Y., Fiebig, M. and Mitra, N. K., "Simultaneous Heat Transfer Enhancement and Flow Loss Reduction on Fin-Tubes," Proceeding 9th International Journal of Heat transfer Conference, Jerusalem, Hemisphere, Vol.4, pp.51~56, 1990
- [7] Valencia, A., Fiebig, M. and Mitra, N. K., "Heat

Transfer Enhancement by Longitudinal Vortices in a Fin-Tube Heat exchanger Element with Flat Tubes," *Journal of Heat Transfer*, Vol.118, No.1, pp.209~211, 1996

- [8] Deb, P., Biswas, G. and Mitra, N. K., "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, 1995

저 자 소 개



이상민(李象敏)

1977년 2월생, 1999년 경북대학교 농기계공학과 졸업, 2001년 부산대학교 기계공학과 졸업(석사). (주)삼성전자 개발그룹 근무



하홍염(河洪永)

1973년 3월생, 2000년 영남대학교 기계공학과 졸업, 2000년 - 현재 부산대학교 일반대학원 기계공학과 재학중



양장식(梁長植)

1961년 1월생, 1984년 부산대학교 공과대학 기계공학과 졸업, 1986년 동대학원 졸업(석사), 1995년 동대학원 졸업(박사), 현재 부산대학교 기계기술연구소 선임연구원, 당학회 회원



이기백(李起白)

1938년 8월생, 1964년 서울대학교 물리학과 졸업, 1968년 경북대 대학원 졸업(석사), 1983년 동대학원 졸업(박사) 1991년-1993년 부산대학교 공과대학 특성화 공학부장, 1970년 - 현재 부산대학교 공과대학 기계공학부 교수, 당학회 회원