

직사각형 프리즘 상면에서 발생하는 원추형 와의 유동구조

김경천* · 지호성* · 성승학**
 (2000년 10월 23일 접수, 2001년 3월 16일 심사완료)

Flow Structure of Conical Vortices Generated on the Roof of a Rectangular Prism

Kyung Chun Kim, Ho Seong Ji and Seung Hak Seong

Key Words: PIV(Particle Image Velocimetry, 입자영상유속계), Rectangular Prism(직사각형 프리즘), Conical Vortices(원추형 와), Wind Tunnel Measurement(풍동실험), Instantaneous and Ensemble Averaged Velocity Fields(순간 그리고 앙상블 평균 속도분포), Vorticity and Turbulent Kinetic Energy Fields(와도 그리고 난류운동에너지분포)

Abstract

Characteristics of the conical vortices on the roof corner of a rectangular prism have been investigated by using a PIV(Particle Image Velocimetry) technique. The Reynolds number based on the free stream velocity and the height of the model was 5.3×10^3 . The mean, instantaneous velocity vector fields, vorticity fields, and turbulent kinetic energy distribution were measured for two different angles of attack, 30° and 45° . The PIV measurements clearly observed not only the conical main vortex and the secondary vortex but also the tertiary vortex which is firstly reported in this paper. Asymmetric formation of the corner vortex for the case of 30° angle of attack produces relatively the high magnitude of vorticity and turbulent kinetic energy around the bigger vortex which generates the peak suction pressure on the roof. Fairly symmetric features of the roof vortex are observed in the case of 45° angle of attack, however, the dynamic characteristics are proved to be asymmetric due to the rectangular shape of the roof.

기호설명

Re_H : 레이놀즈수(프리즘높이 기준)
 Re_x : 국소레이놀즈수
 Re_δ : 레이놀즈수(경계층두께 기준)
 δ : 경계층두께
 δ^* : 배제두께
 Θ : 운동량두께

δ^*/Θ : 형상계수
 ω_x : 와도
 \bar{q}^2 : 난류운동에너지
 x, y, z : 유동방향, 수평방향 그리고 수직방향 좌표
 U, V : 유동방향, 수평방향 국소 평균유속
 U_∞ : 자유유동속도
 u, v, w : 유동방향, 수평방향 그리고 수직 방향 난류 섭동성분
 H : 모형의 높이

† 책임저자 회원, 부산대학교 기계공학부
 E-mail : kckim@pusan.ac.kr
 TEL : (051)510-1464 FAX : (051)582-9164
 * 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과
 ** 부산대학교 기계공학부

1. 서론

편평한 사각형의 지붕표면을 가지는 현대식 저층 건물에서는, 바람이 강할 경우 일반적으로 지붕의 모서리 부근에서 피해가 발생한다.⁽¹⁾ 이와 같은 저층 건물 모형에 대해 바람의 동적인 영향에 관한 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되어졌다.^(1~3) Banks⁽²⁾ 등은 유동가시화 기법과 지붕에서의 압력분포를 측정하여, 접근하는 유동에 대하여 지붕에서 발생하는 와의 공기역학적 영향을 관찰하였다. Tieleman⁽⁴⁾ 등은 TTU(Texas Tech. Univ.) 실험건물에 대한 원형과 모형에 대해 표면 압력분포에 대한 비교실험을 수행하였다. 원형과 모형 비교실험의 결과 평균압력계수에 있어서는 잘 일치하였으나, 과도한 음압의 영역에 있어서는 섭동압력에 대하여 불일치가 존재한다고 지적하였다. 이와 같은 불일치는 경사진 유동의 접근 각도에 대하여 건물의 모서리 영역에서의 유동 박리와 재부착 영역에서 발생되어진다는 것을 지적하였다.

Kawai와 Nishimura⁽⁵⁾는 정사각형의 형상을 지닌 모형의 지붕에서 발생하는 유동구조에 관하여 연구를 수행하였다. 그들은 모서리에서 발생하는 와가 구조물의 지붕에 피해를 입힐 수 있는 강한 음압의 섭동을 야기한다고 지적하였다. 어떠한 특정 유동 각도에 대하여 지붕의 모서리로부터 유동의 박리가 발생하고, 이러한 유동 박리의 영향으로 인하여 한 쌍의 원추형 와가 발생되며, 이 원추형 와는 지붕의 표면에 거대한 음압의 섭동을 일으킨다. 이와 유사한 연구로서 TTU 실험 건물의 1:50 축소모형에 대하여 부산대학교에 있는 대기경계층 풍동에서 Hwangbo⁽⁶⁾ 등에 의하여 수행되었다. 정사각형의 형상을 지니는 구조물의 경우, 강한 돌풍이 접근각도 20° ~ 30° 로 접근할 때 압력 값의 피크치가 발생된다고 Kawai가 최근 지적하였다.⁽⁷⁾ 그리고 열선유속계를 이용한 실험을 통하여 원추형 와의 공간 정보를 제공하였다. 그러나 열선유속계의 측정한계로 인하여 순간유동장에 대한 정보는 정확히 얻어지기가 어렵다.

최근 PIV(입자영상유속계)기법이 복잡한 유동장에 대한 풍부한 정보를 쉽게 얻을 수 있는 매우 유용한 기법이라는 것이 많은 연구를 통하여 밝혀졌다.⁽⁸⁾ 본 연구에서는 PIV기법을 이용한 정

량적 유동가시화를 통하여, 지붕에서 발생하는 원추형 와에 대한 순간유동장과 보다 자세한 공간정보를 얻고자 한다. 이와 같이 보다 자세한 원추형 와의 유동정보는 어떤 특정한 각도에서의 음압의 피크치의 발생을 물리적으로 설명하기에 적절한 원추형 와의 이해를 제공할 것이다. 원추형 와의 동역학적 정보는 측정된 난류운동에너지 분포와 와도로부터 설명되어질 수 있다.

2. 실험장치와 방법

2.1 실험장치의 구성

본 실험은 부산대학교에 있는 개방형의 Blow Down 형태의 풍동에서 수행되었다. 풍동의 주요 제원은 시험구간의 크기가 0.8×0.3×2m(W×H×L)이고, 2.67:1의 수축비를 지니는 2차원 수축노즐을 지닌 형태이다. 직사각형 프리즘의 크기는 140×95×40mm(L×W×H)이다. 프리즘은 레이저 광의 반사를 최소화하기 위하여 유리로 제작되었다. 본 실험에 적용된 실험장치의 구성에 대한 개략도는 Fig. 1과 같다.

실험에 적용된 자유유동속도는 $U_\infty = 2 \text{ m/s}$, 프리즘 높이에 대한 레이놀즈수(Re_H)는 5.3×10^3 이다. 이와같은 레이놀즈수의 영역은 전단층 천이(shear-layer transition) 영역($1,000 \leq Re_H \leq 200,000$)으로 많은 공학적 응용이 이루어지는 영역이라 할 수 있다.

프리즘은 풍동의 출구로부터 1m 하류에 위치시켰고, 적용된 유동의 접근 각도는 30° 와 45° 이다. 레이저광은 풍동의 상측에 설치된 구형렌즈를 통하여 평면 광으로 만들어져 모형 지붕의 상측에 수직으로 조사하였다. 그리고 CCD 카메라는 Fig. 1에서 보여지듯이 조사된 평면 레이저광에 대해 수직으로 설치하였다.

2.2 실험방법

본 실험에 적용되어진 PIV 시스템은 펄스당 최대출력이 250mJ인 이중펄스(double pulsed) Nd-Yag 레이저, 고해상도 CCD 카메라, 동기화장치(TSI 610032) 그리고 펜티엄 컴퓨터로 구성되어 있다. 레이저빔은 반사경과 구형의 렌즈를 통하여 얇은 평면 광으로 형성되어 시험구간에 조사

된다. 화상자료의 획득을 위하여 1K×1K의 해상도를 가지는 PIVCAM 10-15 CCD 카메라가 사용되었다. 두 화상간의 시간간격은 200 μ s이다. 9cm×9cm의 평면영상을 획득하기 위하여 CCD 카메라에 105mm Nikon 망원렌즈를 부착하였다. 사용된 입자는 평균직경이 2 μ m인 올리브 기름 액적으로써 라스킨 노즐에 의해 공급되었다. 속도벡터의 계산과 후처리는 자체 개발한 PIV-ACE V 1.0을 이용하였고, 속도벡터의 추출은 2 화상 상호 상관기법을 사용되었다.

속도계산을 위한 탐색영역의 크기는 24×24 픽셀로 선정하였고, 50%의 중첩이 허용되었다. 속도벡터의 격자 수는 6,889개이고 벡터간의 공간 해상도는 0.93mm이다. 구해진 속도벡터는 본 실험실에서 보유하고 있는 후처리 프로그램으로 불량 벡터의 제거, 중심추적, 앙상블(ensemble) 평균 그리고 통계적 처리를 수행하였다. 화상획득은 실험 case 당 400장(속도장 200개)을 획득하여 후처리하였다.

Fig. 2는 실험에 사용된 측정위치, 유동의 접근

각도 그리고 실험에 적용된 좌표계에 대한 개략도이다. CCD 카메라는 모형에 조사된 평면 레이저광에 수직으로 위치시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접근유동

접근하는 유동장 특성은 풍동의 시험부로부터 1m 하류에서 PIV 기법을 이용하여 측정하였다. Fig. 3에서 평균속도분포와 난류강도분포를 표현하였다. 자유유동의 난류강도는 약 1%정도이고 국소난류강도의 피크치는 완전발달이 이루어지지 않은 난류경계층보다 매우 낮은 값으로 보이는 약 2.5%로 확인되었다. 이는 실험시, 어떠한 경계층 트리핑 와이어(tripping wire)를 사용하지 않았고, 풍동의 바닥면은 매끈한 유리면이기 때문에 모형의 위치에서의 접근하는 경계층은 층류경계층으로 판단된다. 국소레이놀즈수는 임계값인 5×10^5 보다 작은 1.39×10^5 이고, 경계층 두께

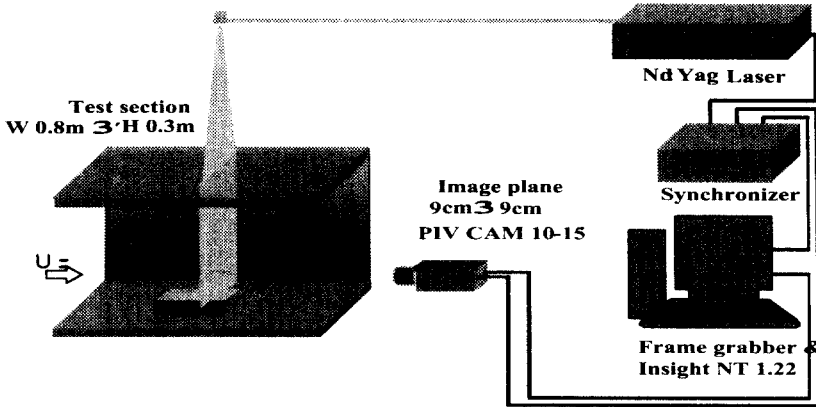


Fig. 1 The schematic diagram of experimental setup

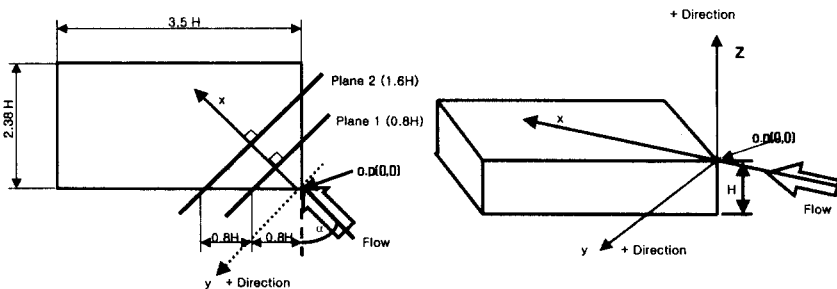


Fig. 2 The measurement positions, the definition of angle of attack and coordinate system

($\delta = 12.4\text{mm}$)에 대한 레이놀즈수는 $Re_\delta = 1.73 \times 10^3$ 이다. 그리고 배제두께(δ^*)와 운동량 두께(θ)는 각각 2.78mm와 1.35mm로 측정되었다. 따라서 형상계수(δ^*/θ)는 층류인 경우의 형상계수값 2.59보다 작은 2.06이었다. 이 값은 접근 경계층 유동이 천이영역에 가깝다는 것을 의미한다.

3.2 평균속도분포

속도장에 대한 화상은 Fig. 9에서 보여주듯이, 원추형 와의 구조가 확연히 보여질 수 있는 각도에 대하여 획득되었다.

Fig. 4는 유동의 접근각도 30° 의 경우에 대해서 0.8H 위치에서 획득한 평균속도분포이다. 평균속도장은 200개의 순간속도장에 대한 평균으로 얻어졌다. CCD 카메라의 각도와 유동의 방향이 서로 일치하지 않기 때문에(Fig. 9(a)참조), 자유유동 영역에서 일정하게 유동이 측면을 향하는 것을 관찰할 수 있다. 특히 y의 좌표축의 음의 영역에서 모서리 와류의 형성이 선명하게 보이지 않는다.

유동 방향과 카메라 위치 사이의 각도로 인한 화상의 보정을 위하여 Galilian 변환이 적용되었다. 이는 무차원화된 속도벡터장에 대하여 0.3V를 더하여줌으로써 간단히 처리된다. Fig. 5에서 보는바와 같이 접근유동에 대한 수직평면에 대해서도 다른 크기의 반전와류가 선명하게 관찰되어졌다. y-z평면에서의 원추형 와의 중심은

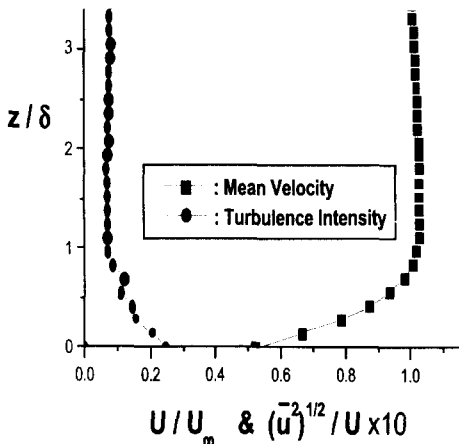


Fig. 3 The approaching boundary layer profile

(0.234H, 0.056H) 그리고 (-0.368H, 0.016H) 근처로 추정되어진다. 경사진 유동으로 인하여 프리즘의 모서리를 따르는 유동의 박리에 의하여 우측면에서의 와가 좌측면보다 더 크고 발달된 것이 관찰되어진다. 우측모서리 부근에서의 수직속도의 크기는 자유유동의 값을 초과한다. 많은 선행연구에서 논의되었듯이, 모서리 부근에서의 높은 횡방향 속도가 음압의 피크치에 중요한 역할을 할 수 있다. 0.8H보다 하류인 1.6H면에 있어서 와는 더욱 발달되고 크기가 증가한다는 것이 Fig. 6에서 보여진다. 이때 와의 중심은 참고적으로

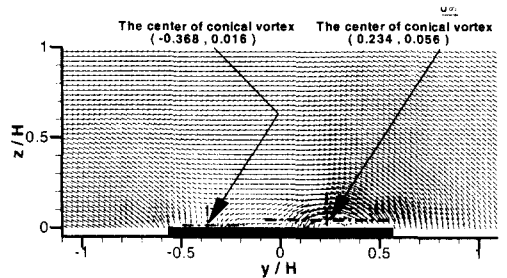


Fig. 4 The mean flow profile(The angle of attack : 30° / Measurement Position : 0.8 H)

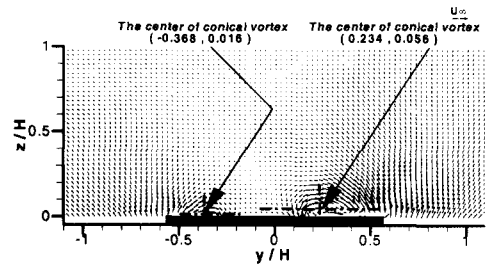


Fig. 5 The mean flow profile(V+0.3V). (The angle of attack : 30° / Measurement Position : 0.8 H)

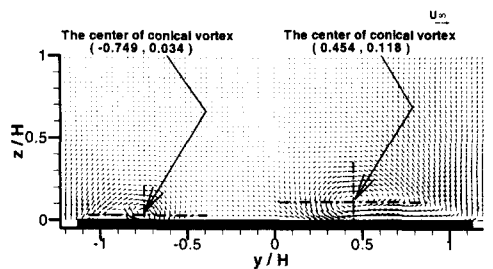


Fig. 6 The mean flow profile(V+0.3V). (The angle of attack : 30° / Measurement Position : 1.6 H)

(0.454H, 0.118H) 그리고 (-0.749H, 0.034H)로 변화한다. 평균속도장에서는 2차와(secondary vortices)는 명확하게 보이지는 않는다. 그림에도 불구하고 2차와는 발달되고, 와와 관련된 속도의 크기는 자유유동 값보다 작다고 판단된다.

Figs. 7과 8은 유동의 접근각도 45° 에 있어서 0.8H와 1.6H에서의 평균속도분포를 나타낸 것이다. 이 경우에 있어서, 카메라의 각도와 유동의 각도가 일치하기 때문에 어떠한 속도성분의 변환도 필요치 않다. Fig. 7에 있어서 원추형 와의 위치는 대칭을 이루고 있으나 정확하게 대칭은 아니다. 이는 직사각형을 이루는 지붕의 형상이 와의 형성과 발달에 영향을 미친다는 것을 의미한다.

0.8H 수직평면에 대하여 원추형 와의 중심좌표는 (0.304H, 0.042H)와 (-0.277H, 0.046H)이다. 모서리 부근의 수직속도성분의 크기가 자유유동장의 속도크기보다 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 음압의 피크치는 유동의 접근각도가 30° 일 때 보다 작을 수 있다. Fig. 8에서 원추형 와 중심의 변화와 원추형 와 크기의 증가가 발견된다. 그리고 원추형 와의 중심은 (0.614H, 0.074H)와 (-0.582H, 0.078H)로서 대칭구조를 유지한다. 1.6H 면에서는 평균 속도분포에서 2차와가 관찰된다.

원추형 와는 프리즘의 모서리 영역에서의 유동 박리에 의하여 야기되어지며, 중심 축은 프리즘 모서리에 대하여 경사를 이룬다. 평균속도장의 측정 결과로부터 추정된 원추형 와의 축의 중심은 Fig. 9에 나타내었다. 모서리에서 발생하는 와가 원추형의 형태를 지니고 있다는 가정한다면, 주와(main vortex)의 중심과 모서리 선단을 간략하게 연결하므로 중심축의 각도를 추정할 수 있

다. 유동의 접근각도 30° 의 경우, 지붕모서리와 와 축이 이루는 각도가 비대칭적인 접근유동으로 인하여 좌측면이 우측면보다는 크다는 것을 확인할 수 있다. 수평면에서 와의 각도는 좌측면은 22.2° 그리고 우측면은 11.1° 를 이룬다. 수평면과 동일한 방법으로, 수직면에서의 와의 중심각도는 좌측면에서 6.2° , 우측면에서 1.5° 를 이룬다.

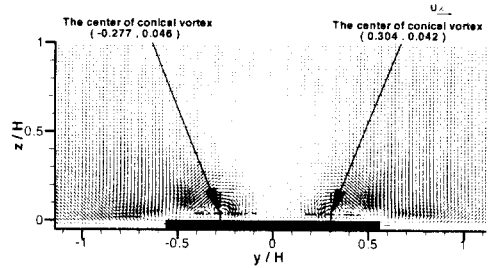


Fig. 7 The mean flow profile(The angle of attack : 45° / Measurement Position : 0.8 H)

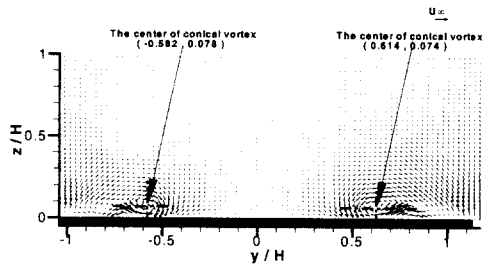


Fig. 8 The mean flow profile(The angle of attack : 45° / Measurement Position : 1.6 H)

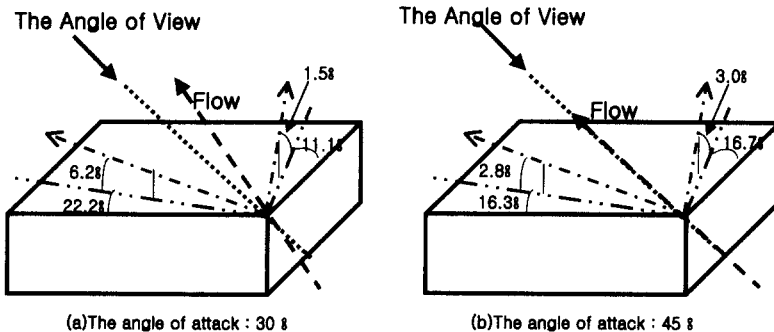


Fig. 9 The center of conical vortices

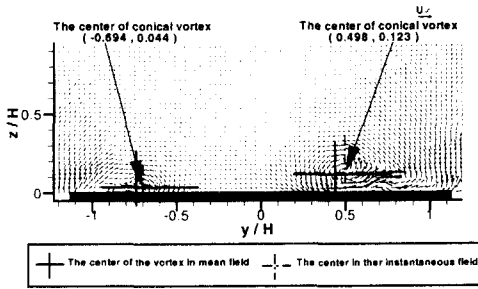


Fig. 10 The instantaneous flow field($V + 0.3V$).
(The angle of attack : 30° / Measurement Position : $1.6 H$)

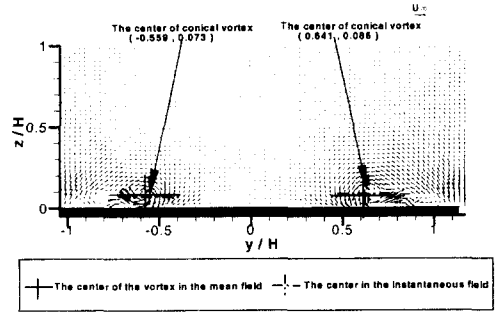


Fig. 12 The instantaneous flow field(The angle of attack : 45° / Measurement Position : $1.6 H$)

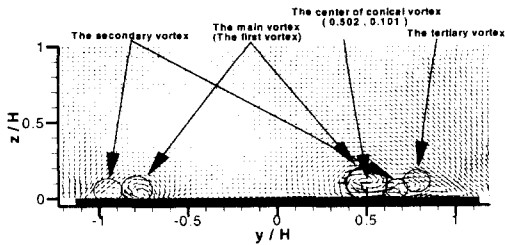


Fig. 11 The instantaneous flow field($V + 0.3V$).
(The angle of attack : 30° / Measurement Position : $1.6 H$)

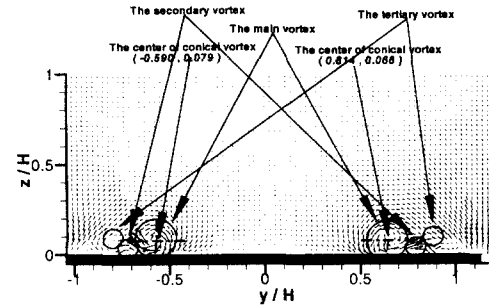


Fig. 13 The instantaneous flow field(The angle of attack : 45° / Measurement Position : $1.6 H$)

이와같은 결과를 통하여 유동이 접근하는 방향에서의 와의 크기가 유동의 반대 면에서의 와의 크기에 비하여 2배정도 크다는 것을 보여준다. 자유유동으로부터 와 운동으로 변형된 거대한 운동량에 의하여, 상대적으로 높은 음압이 좌측면에서 예상된다. 유동의 접근각도가 30° 일 때 좌측면에서 발견되었던 평균 압력계수의 피크치와 rms 압력계수의 피크치에 관한 많은 선행연구에 의하여 이 추정이 뒷받침될 수 있다.

유동의 접근각도 45° 일 때, 예상되었듯이 지붕 수평면에 대하여 약 16.5° 로 와 축이 거의 서로 대칭을 이루는 것이 관찰되었다. 0.4° 의 각도차이가 발생하는 것은 모형이 정확하게 정사각형을 이루지 않기 때문으로 판단된다. 모형에 대하여 수직방향의 원추형와의 각도는 약 3° 이고, 양쪽이 거의 대칭을 이루고 있다.

3.3 순간속도분포

Figs. 10, 11은 동일한 면에서 획득된 순간속도 분포를 보여준다. Fig. 10에서 와 중심(0.498H,

0.123H)이 Fig. 11에서 와 중심(0.434H, 0.101H)으로 이동됨이 관찰되었다. 와의 중심의 이동은 축 흔들림(sway motion)이 존재한다는 것을 의미하지만 그다지 심하지는 않다. 축의 흔들림은 Kawai와 Nishimura에 의하여 또한 관찰된 바 있다.⁽⁵⁾ Fig. 11에서 주 와(main vortex) 주변에 2차 와가 명백하게 관찰되어졌고, 그리고 2차 와 주변에 새로운 와가 또한 관찰되어졌다. 지금까지는, 이미 발표된 문헌에서 오직 주 와와 2차 와의 존재만 보고되었다. 순간유동장에 대한 PIV 결과를 통하여 새로운 3차 와가 존재한다는 것을 밝혔다. 2차 와는 주 와와 서로 반대의 회전방향을 지니고있고, 새로운 와는 2차 와와 서로 다른 회전방향을 지니고 있다. 새로운 와는 2차 와와 지붕모서리에서의 유동박리에 의하여 생성된다고 설명되어질 수 있다. 주 와로부터 박리된 전단층의 재부착이 표면부근에서 2차 와를 야기한다.

Fig. 12, 13은 유동의 접근각도 45° 에 대한 순간속도분포를 보여준다. 그림은 와 축의 흔들림

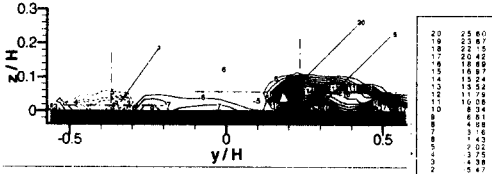


Fig. 14 The vorticity field (The Angle of Attack : 30° / Measurement Position : 0.8 H)

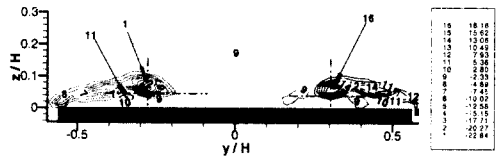


Fig. 16 The vorticity field (The Angle of Attack : 45° / Measurement Position : 0.8 H)

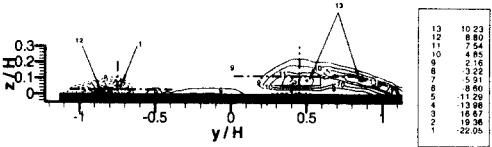


Fig. 15 The vorticity field (The Angle of Attack : 30° / Measurement Position : 1.6 H)

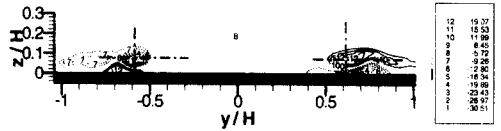


Fig. 17 The Vorticity Field (The Angle of Attack : 45° / Measurement Position : 1.6 H)

(sway motion)에 대하여 유사한 정보를 보여준다. 그리고 2차 와 부근에 3차와 와 2차와를 포함하는 자세한 유동구조를 보여준다.

3.4 와도 분포와 난류 운동에너지 분포

유동방향의 와도장은 측정된 속도구배로부터 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\omega_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \quad (1)$$

무차원화된 와도 ($\omega_x \cdot H / U_\infty$) 분포는 지금까지 논의하였던 순간유동장과 평균유동장과 더불어 원추형 와의 강도와 형태를 표현한다. Figs. 14와 15는 유동의 접근각도 30° 인 경우에 대한 평균 와도 분포를 보여준다. 0.8H의 위치에 있어서, 작은 음의 와도 분포가 좌측면에 나타나는 것에 비하여, 우측면에 거대한 양의 와도 분포(반시계방향)영역이 나타난다. 반시계방향의 와도의 피크치가 시계방향의 와도의 피크치보다 3.5배 더 높다. 속도장의 경우로부터 추정하였듯이, 와 운동의 중심근처에서 와도의 피크치가 발생한다.

와도 분포는 지붕 위에서 발생하는 3개의 와 운동의 존재를 명백하게 보여준다. Fig. 14에 있어, 우측면 와에서 2개의 피크치가 존재한다. 와도의 피크치 위치는 주 와의 중심에서 동시에 발생한다. 와도의 다른 양의 피크치는 이 연구논문에서 앞서 지적하였듯이 3차 와의 존재를 나타낸다. 주 와와 3차 와의 사이에서 관찰되어지는 유동방향 와도의 음의 값은 2차 와라 할 수 있다.

좌측면의 경우에는 우측면에 비하여 그다지 뚜렷하지는 않으나 또한 3개의 피크치가 관찰된다.

Fig 15에서 보여지듯이, 유동이 하류로 진행될수록, 양 모서리에서 두 개의 원추형 와가 다른 방법으로 전개된다. 우측면의 와가 강도에 있어서 감소하는 것에 반해, 좌측면의 와는 보다 증가한다. 우측면 원추형 와에 있어서 세 개의 와 운동이 매우 명백히 보이는 것을 지적하는 것이 매우 흥미롭다. 그림에도 불구하고, 좌측면 와는 거의 양의 와도 값을 가지고 그리고 벽면근처에서 보다 작은 시계방향의 와도를 지닌다. 이 현상은 Fig. 6의 평균속도분포에 있어서도 잘 나타나졌다. 유동이 접근하는 영역의 모서리로부터 반시계방향의 강한 회전운동은 2차 와의 발달을 억제한다는 것이 설명되어질 수 있다. 유동의 반대방향에 있어서의 2차 와의 급속한 발달은 시계방향으로 상대적으로 약한 운동에 의하여 가능하다.

Figs. 16과 17은 유동방향의 접근각도 45° 에 대한 0.8H와 1.6H에서의 와도 분포 나타낸다. Fig. 16에서 보여지듯이, 0.8H의 위치에서 반대방향을 지니는 거의 대칭의 구조를 가지는 와도의 분포가 놀랄 만큼 뚜렷이 보여진다. 여기서도 3개의 와 운동의 존재가 쉽게 발견된다. 주 와 운동에 있어서 와도 값의 피크치의 위치는 와의 중심에서 동시에 일어난다.

Fig. 17로부터, 와도 분포 정확히 대칭성을 이루진 않으나 어느 정도의 대칭성을 지니고 있다. Fig. 17에 있어서 약간의 크기 차이가 보여진다.

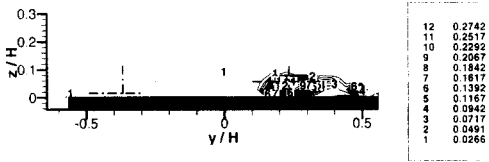


Fig. 18 The turbulent kinetic energy (The Angle of Attack : 30° / Measurement Position : 0.8 H)

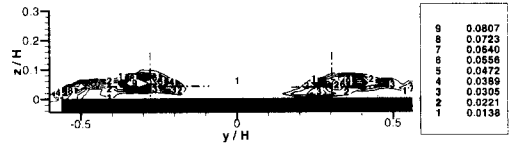


Fig. 20 The turbulent kinetic energy (The Angle of Attack : 45° / Measurement Position : 0.8 H)

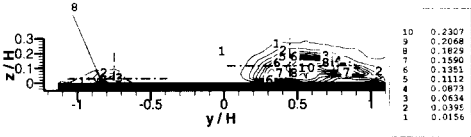


Fig. 19 The turbulent kinetic energy (The Angle of Attack : 30° / Measurement Position : 1.6 H)

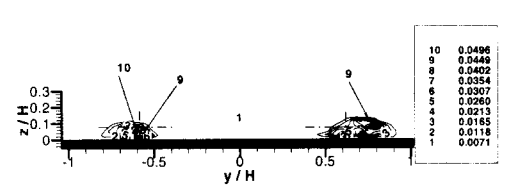


Fig. 21 The turbulent kinetic energy (The Angle of Attack : 45° / Measurement Position : 1.6 H)

우측면의 와는 좌측면의 와보다 약간 크다. 프리즘의 형상이 정사각형이 아니므로 우측면의 와는 좌측면의 와보다 지붕 모서리에 널리 상호 작용한다. 고체 벽면은 흔들림 운동(sway motion)의 방지에 의해 보다 안정적이 되도록 원추형 와에 대하여 영향을 미칠 수 있다. 2차 와의 두드러진 대부분의 특징은 하류로 진행될수록 발달한다. 만약 0.8H 평면에서의 크기와 1.6H에서의 크기를 비교하면, 2차 와의 크기는 약 4배 증가한다. 나아가서, 2차 와에 있어서 와도의 피크치의 절대값은 주 와의 크기와 비슷하다.

이 현상은 또한 유동의 접근각도 30° 이 경우에 대하여 좌측면 와(작은 와)에서 또한 관찰되어진다. 따라서 프리즘에 대한 전형적인 원추형 와는 3개의 서로 다른 와 운동으로 구성되고, 그리고 2차 와의 크기와 형상은 유동의 접근각도와 주 와의 국소적인 운동량과 밀접한 연관이 있다. 난류 운동 에너지는 와의 흔들림 현상 또는 난류 섭동 거동에 의해 야기되므로 평균 난류 운동에너지 분포는 지붕의 모서리에서 발생하는 와에 관한 동역학적 정보를 제공한다. 난류 운동 에너지는 각각의 순간유동장에서 평균 유동장을 빼고 남은 순간 섭동 속도장으로부터 계산된다. 주 유동방향의 속도 섭동성분을 측정하지 않았기 때문에 난류 운동 에너지 분포는 다음의 식 (2)에 의해 구한다.

$$\begin{aligned} \bar{q}^2 &= \frac{1}{2}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2) \\ &= \frac{3}{4}(\bar{v}^2 + \bar{w}^2) \end{aligned} \quad (2)$$

단, \bar{u}^2 은 $0.5(\bar{v}^2 + \bar{w}^2)$ 으로 가정한다.

Figs. 18과 19는 유동의 접근각도 30° 에서 0.8H와 1.6H 평면에서의 난류 운동 에너지 분포를 나타낸 것이다. \bar{q}^2 는 U_∞^2 으로 무차원화되었다. Fig. 18에서 우측면에서의 강한 원추형 와의 형성이 평균 속도 운동에너지의 약 27%에 해당하는 높은 강도의 섭동 에너지를 생성한다. 결과들은 유동의 접근각도가 20~30° 범위를 이룰 때 모서리 부근에서 뾰족한 형상의 음압의 생성에 관한 물리적 원인을 뒷받침한다.⁽⁷⁾ 좌측면 와에 있어서 난류 운동 에너지가 거의 0을 이루는 것은 와 운동이 층류 유동의 범위라는 것을 나타낸다.

1.6H의 위치에서, 좌측면 원추형 와의 내부의 복잡한 와 운동에 의하여 상대적으로 낮은 양의 난류운동에너지가 생성된다. 다시 말하면, 우측면의 와는 계속적으로 난류 현상을 유지하고 그리고 난류 운동 에너지의 피크치가 3개의 와 운동이 서로 상호작용 하는 영역에서 일어난다는 것을 보여준다.

Figs. 20과 21에서 보여지듯이 유동의 접근각도 45° 인 경우에 있어서, 비록 평균속도분포는 대칭적 양상을 보여주고 있으나, 난류 운동 에너지 분포는 비대칭적 현상을 나타낸다. 유동의 접근각도가 45° 일 때, 무차원화된 난류 운동 에너지는 평균 유동 에너지의 8%이고 유동의 접근각도

30° 인 경우보다는 매우 낮다. 만약에 선행연구에서 지적하였듯이 유동의 접근각도가 45° 에 비하여 30° 인 경우 표면의 압력 섭동의 평균값과 rms 값이 매우 높다는 것을 기억한다면, 이 현상은 매우 의미가 있다.^(6,7)

Fig. 20은 0.8H에서 와도 분포 마찬가지로 전반적인 분포 양상은 대칭을 이루고 있다고 할지라도, 각각의 와에 있어서 에너지의 피크치는 다르다는 것을 보여주고 있다. 우측면의 와는 접촉하는 표면 경계에 보다 넓으므로 더욱 안정적인 것이라고 추측할 수 있다. Fig. 21에서 보여지듯이, 1.6H평면에서는 많은 차이점이 관찰된다. 우측면 와에 있어서 벽면 근처에서 다른 피크치를 나타내는 것에 비하여 난류 운동 에너지는 좌측면에 대한 주 와 운동에 있어서 집중되어지는 것을 보여준다. 주 와와 관련이 있는 피크치는 흔들림 운동에 의하여 야기되어질 수 있으나, 벽면 근처에서 높은 난류 운동 에너지는 고체 벽면 경계에 기인한 난류 에너지 생성과 일치한다. 이와 같은 설명은 유동의 접근각도 45° 인 경우에 대한 난류 운동 에너지 분포의 차이점을 설명하기에는 충분치 않으나, 와도 분포의 차이와 마찬가지로 일관성이 관찰된다.

4. 결론

지붕 모서리에서 발생하는 와에 관한 속도장의 순간분포와 평균분포가 PIV 기법을 이용하여 성공적으로 수행되어졌다. 직사각형 프리즘에 대한 유동의 접근각도 영향과 원추형 와의 전개를 관찰하기 위하여 2개의 유동접근각도와 두 개의 수직 단면이 선정되었다. 결론은 다음과 같이 요약된다.

(1) 2차 와와 지붕모서리로부터의 박리된 전단층에 의하여 생성되는 새로운 3차 와의 존재가 발견되었다.

(2) 순간유동장과 평균유동장은 지붕모서리에서 발생하는 와는 3개의 서로 다른 주 유동방향 구조를 이루고 있으며, 각각의 와들은 형상과 강도가 유동의 접근각도에 매우 밀접한 연관이 있다는 것을 알 수 있었다.

(3) 유동의 접근각도가 30° 일 때, 보다 큰 와와 관련이 있는 높은 값의 속도, 와도 그리고 난

류 강도가 관찰되었고, 이는 높은 음압의 피크치의 발생에 관련된 물리적 메커니즘을 뒷받침한다.

(4) 유동의 접근각도 45° 일 때, 평균 속도와 와도장은 상류부분에서는 매우 대칭적으로 보여진다. 그럼에도 불구하고 와도와 난류 운동에너지 분포는 지붕의 비대칭적인 형상에 의하여 하류로 진행되어질수록 비대칭적으로 변한다.

참고문헌

- (1) Bienkiewicz B. and Sun Y., 1992, "Local Wind Loading on the Roof of a Low-Rise Building," *J. Wind & Eng. Ind. Aerodyn.* 45, 11~24.
- (2) Banks D., Meroney R. N., Sarkar P. P., Zhao Z. and Wu F., 2000, "Flow Visualization of Conical Vortices on Flat Roofs with Simultaneous Surface Pressure Measurement," *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* 84, 65~85.
- (3) Ham H. J. and Bienkiewicz B., 1998, "Wind Tunnel Simulation of TTU Flow and Building Roof Pressure," *J. Wind. Eng. & Ind. Aerodyn.* 77&78, 119~133.
- (4) Tieleman H. W., Surry D. and Mehta K. C., 1996, "Full/model Scale Comparison of Surface Pressure on Texas Tech Experimental Building," *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* 61, 1~23.
- (5) Kawai H. and Nishimura G., 1996, "Characteristics of Fluctuating Suction and Conical Vortices in a Flat Roof in Oblique Flow," *J. Wind Eng. & Ind. Aerodyn.* 60, 211~225.
- (6) Hwangbo D., Ji H. S., Seong S. H. and Kim K. C., 2000, "Wind Tunnel Modeling of Prismatic Low-Rise Building in the Atmospheric Boundary Layer," *1st International Symposium on Wind and Structure*, 327~336.
- (7) Kawai H., 2000, "Local Peak Pressure on a Flat Roof - Mechanism and Reduction-," *1st International Symposium on Wind and Structure*, 91~98.
- (8) 김경천, 김상기, 윤상열, 2000, "횡단류 제트의 유동 및 난류특성치에 대한 PIV 측정," 대한기계학회논문집 B권, 제24권, 제3호, pp. 382~389.