

PIV기법을 이용한 저층 건물 지붕에서 발생하는 원추형 와의 구조에 대한 실험적 연구

지호성* · 정은호* · 김경천**

An Experimental Study for the Structure of Conical Vortex at the Low-Rise Building Roof by using a PIV Technique

Ho Seong Ji, Eun Ho Jeong and Kyung Chun Kim

Key Words: 입자영상유속계(PIV/Particle Image Velocimetry), 원추형 와(Conical Vortex), 2차 와(Secondary Vortex), 저층 건물 지붕(Low-Rise Building Roof)

Abstract

The Characteristics of the conical vortices on the roof surface of a low-rise building has been investigated by using a PIV(Particle Image Velocimetry) technique. The scaled model of TTU building with 1:92 scaling ratio was used. The Reynolds number based on the free stream velocity and the length of the model was 1.96×10^5 . When the angle of attack for the building model is 45° , the conical vortices are occurred symmetrically and the center of vortices are changed with respect to the angle of the approaching flow. The rotating direction of the conical vortices found to be counter-rotating. The secondary vortex motions are investigated using the instantaneous flow field data.

기호설명

α : 유동의 접근각(Angle of Attack)

ΔT : 시간간격(duration time)

Re_L : 레이놀즈수($Re_L = \frac{U_\infty L}{\nu}$)

1. 서론

지붕의 모서리에서 발생하는 원추형 와로 인해 강한 음압의 섭동이 발생하며 이로 인해 건축물 지붕표면에 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이러한 유동의 현상은 접근유동에 의하여 지붕의 모서리에서 박리된 두 개의 원추형 와가 지붕의 모서리에서의 높은 음압 생성의 원인

을 제공한다. 이와 같은 원추형 와에 관한 연구가 선행연구자인, Kawai등에 의하여 수행되어졌다.[1] 최근 Kawai[2]는 열선유속계를 이용한 조건부 추출 기법을 이용하여 원추형 와의 공간적 정보를 얻었다. 하지만, 열선유속계의 측정한계로 인해 순간적인 속도장은 구할 수 없으며, 보다 상세한 원추형 와의 특성치에 대한 데이터가 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 PIV 기법을 이용한 정량적 유동 가시화 실험을 수행함으로써 기존 연구에 대한 미비점을 보완하고 보다 정확한 원추형 와에 대한 정보를 제공하고자 한다.

2. 물리적 배경

접근하는 유동의 각도에 따라 건물의 지붕에서 발생하는 와는 지붕의 모서리 부분에서 원추형을 이루면서 모서리의 길이방향으로 발달하여 진행되고 또한 와의 축의 경우에 있어서 좌우로 혼

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** 부산대학교 공과대학 기계공학부

들림이 발생된다고 알려지 왔다. 이 경우 유동의 접근각도가 건물의 모서리부분, 즉 Fig. 1에서 나타난 각도와 같이 45° 를 이룰 때 2개의 원추형 와가 대칭적으로 발생된다고 알려지 왔다. 또한 건물에 대한 유동의 접근각도가 건물의 모서리 방향으로 변화함에 따라 한 개의 와는 점점 커지는 것을 볼 수 있으며 나머지 모서리에서는 감소하다 소멸된다는 것이 알려져 있다. 또한 유동의 접근각도에 따라 원추형 와의 재부착을 볼 수 있으며 그 속에서 2차 와의 박리를 관찰할 수 있다. 이상에서 기술한 원추형 와의 특징은 다음과 같다.[1]

(가) 원추형 와의 구조는 Fig. 1에서 제시되었으며 한 쌍의 원추형 와는 흔들리며 회전하는 나선형의 축을 가진다.

(나) 원추형 와는 지붕 모서리에서 강한 음압을 일으킨다.

(다) 한 쌍의 나선형 축의 회전방향은 서로 반대이며 축의 회전은 고주파수 영역에서 일정한 간격으로 생성되어 진행되는 파형의 음압을 발생시킨다.

(라) 원추형 와 축의 흔들림은 낮은 주파수 영역에서 음압의 섭동을 일으킨다.

(마) 접근 난류의 횡방향 성분이 축의 흔들림을 증폭시키고 낮은 주파수 영역에서 음압의 섭동은 난류 유동에서 주목할 만큼 증가됨을 볼 수 있다.

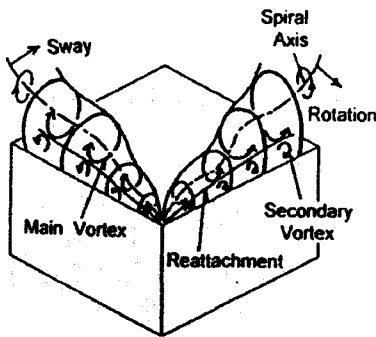


Fig. 1 원추형 와의 구조[1]

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치의 구성

편평한 지붕의 표면에서 발생하는 원추형 와의

구조를 확인하기 위하여 수행되어진 연구에 적용된 실험장치로는 Blow Down 형태의 풍동이 적용되어졌다. 풍동의 측정부의 크기는 폭이 80cm, 높이가 30cm, 길이가 2m 이며 유리 및 아크릴로 제작되어 있고, 풍동의 단면적을 고려하여 패쇄비가 유동에 영향을 미치지 않도록 모형이 제작되어졌다. 그리고 유동은 3마력의 속도 가변형 원심팬에서 공급되는 공기는 정체실과 수축비 2.67:1의 2차원 수축 노즐을 통과한 후 시험구간으로 유입된다. 또한 광원으로 적용되어진 Laser Beam의 굴절 등을 방지하기 위하여 Laser Beam이 조사되는 풍동의 단면은 유리로 이루어졌다. 실험에 적용된 주요장비는 Nd-Yag Laser, Synchronizer, 그리고 1K×1K의 CCD-Camera등이 적용되어졌다. 실험에 적용되어진 실험장치의 구성 및 개략도 그리고 좌표계를 살펴보면 Fig. 2와 같다.

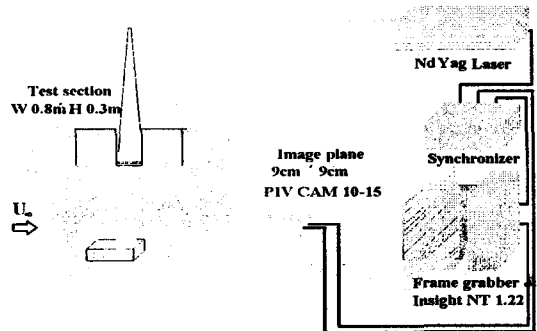


Fig. 2 실험장치 구성의 개략도

적용된 모델은 투명 PC(Poly Carbonate)sheet를 사용하였고, 크기는 140mm×75mm×40mm(가로×세로×높이)의 치수를 갖는 직육면체 모델로써 TTU모형을 1:92로 축소한 것이다.(Fig. 3참조)

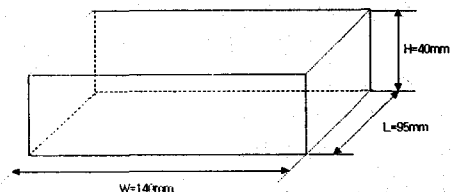


Fig. 3 모형의 개략도

실험 조건은 자유유동 속도, $U_\infty=2\text{m/s}$ 로 고정

시켰고, 이때의 적용된 건물 모형에 대한 레이놀즈 수(Re_L)는 약 1.96×10^5 정도이다. 이러한 레이놀즈의 영역은 "sheet-layer transition regime"이라 불리는 ($1,000 \leq Re_L \leq 200,000$)으로 실제 공학적인 응용이 많은 영역이다.

3.2 실험방법

본 연구에서 사용된 PIV 시스템은 레이저 시스템과 고해상도 CCD 카메라, 동기화장치(TSI 610032) 및 구동용 팬텀 컴퓨터로 구성되어 있다. 광원으로 사용한 레이저는 이중펄스 방식의 Nd-Yag 레이저이고, 파워는 250mJ이었다. 광원으로부터의 레이저는 구형렌즈와 원통형렌즈를 거치면서 평면빔으로 만들어져 시험부로 조사된다. 화상획득을 위한 CCD 카메라는 1K×1K의 해상도를 가진 PIVCAM 10-15 CCD 카메라를 사용하였고, 2frame 간의 시간 간격(Δt)은 최소 35 μ s 이상으로 고속유동의 계측이 가능한데 본 실험에서는 약 250 μ s (250.04703 μ s)로 유동장을 측정하였다. 부착된 렌즈는 Nikon 렌즈(105mm)를 사용하였다. 사용된 입자는 라스킨 노즐을 이용한 올리브 오일 에어로졸이고 입자의 평균 직경은 2 μ m로써, 이전연구에 의해 알려진 바 PIV 계측에 적당한 크기이다.

본 연구에서 사용한 속도벡터의 계산과 후처리는 실험실에서 자체 개발한 프로그램(PIV-ACE 1.0)을 사용하였고, 이의 검증은 이전에 수행되었던 수 차례의 연구사례를 통하여 충분히 이루어졌다. 속도벡터의 추출 알고리즘은 2화상 상호상관기법을 이용하였다. 속도벡터의 격자수는 모두 6889개이고 벡터간의 공간해상도는 0.93mm 이다. 소프트웨어에 의한 오차는 sub-pixel로의 추적 시에 발생하며 화상의 해상도의 한계로부터 기인한다. 오차에 대한 r.m.s 값은 0.01픽셀 정도이다. 다시 말해서 속도벡터가 3pixel의 변위를 가지든, 4픽셀의 변위를 가지든 0.01픽셀정도의 오차를 가진다. 속도를 계산하기 위한 탐색영역(interrogation window)의 크기는 24×24 픽셀이고, 50%의 겹침이 허용되었다. 즉 실제 속도벡터간의 간격(grid size)은 12픽셀이 된다. 구해진 속도벡터는 본 실험에서 보유하고 있는 후처리 프로그램으로 불량벡터의 제거, 중심추적, 앙상블평균, 위상평균 등의 통계적 처리를 수행하였다. 화상획득은 Case 당 400장(속도장 200개)를 획득하여 후처리를 하였다. 이러한 앙상블의 개수는 기존연구에서 밝혀진 바 난류값의 평균의

이 일정한 값으로 유지될 수 있는 개수이다.

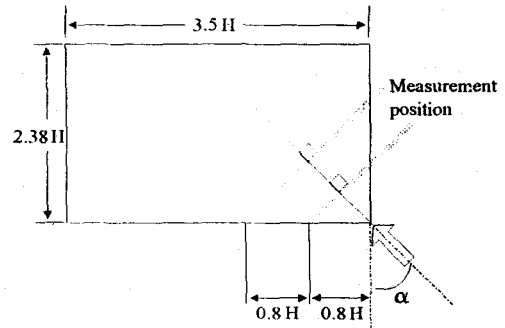


Fig. 4 측정위치에 대한 개략도

Fig. 4는 실험이 수행된 모형에서 측정영역을 표시한 개략도이다. 풍동의 하류부 1m의 위치에 모형이 설치하였다. 이때 모형과 유동의 각도를 조절하면서 실험을 수행하였다. 원활한 실험 결과를 얻기 위하여 조사되는 Laser Beam은 건물 모형의 지붕에 수직으로 조사되도록 렌즈를 조절하였으며, 또한 정확한 유동장의 화상을 얻기 위하여 조사되는 Laser Beam에 수직되는 위치에 CCD Camera를 위치시켰다. 유동의 접근각도를 변화시키면서 실험이 수행되므로 각 각의 경우에 대하여 Laser Beam이 모형에 수직으로 조사되도록 하였으며 또한 각 실험의 경우에 대하여 정확한 유동장의 화상을 얻기 위하여 CCD Camera를 Laser Beam에 대하여 수직이 되도록 모형의 뒤편에 설치하여 실험을 수행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험결과

PIV 기법을 이용한 실험을 수행한 결과 선행 연구[4]에 의하여 제시된 유동의 접근각도 중에서 건물의 지붕부분에서 발생하는 와의 발생을 확인할 수 있었으며 유동의 접근각도의 변화에 따라 와의 크기와 중심의 변화가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

아래에 나타낸 Figs. 5~10은 순간유동장을 200번 ensemble하여 얻은 평균 유동장을 표현한 결과이다. Fig.5와 Fig.6는 유동의 접근각도 30° 인

경우 측정위치가 0.8H와 1.6H인 경우에 대한 결과이다. 두 개의 그림을 비교하여 보면 그림의 중심을 기준으로 좌측면에서는 와가 발생되기 시작하고, 우측면에서는 발생한 와의 축이 중심으로부터 우측으로 바뀌어 나가는 것과 와의 크기가 발달되는 것이 보여진다. 즉 건물의 모서리를 따라 와가 발달하여 진행되어진다는 것을 실험결과를 통하여 확인할 수 있었다. 유동이 건물에 도달하여 벽면의 모서리로부터 유동의 박리가 일어나고 이때 박리된 유동은 와를 형성하며 유동의 전면부로부터 하류로 갈수록 와가 발달되면서 모서리를 따라 발생된다는 사실을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

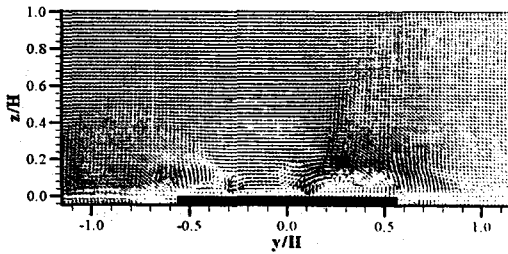


Fig. 5 평균유동장
(유동의 접근각도 : 30°, 측정위치 0.8H)

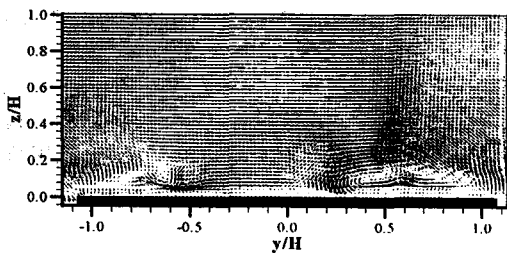


Fig. 6 평균유동장
(유동의 접근각도 : 30°, 측정위치 1.6H)

Fig. 7과 Fig. 8은 유동의 접근각도 37.5° 일 때 측정위치가 0.8H, 1.6H인 위치에서의 측정결과이다. 유동의 접근각도가 37.5° 인 실험의 결과인 경우 30° 인 경우에 비하여 중심의 좌측면에서 앞선 경우보다 더욱 발달된 와가 나타나고 와의 축이 좌·우 방향으로 각각 발달하여 진행되는 것이 나타났다. 이 경우도 앞선 결과와 마찬가지로 건물 모형의 측면에서의 박리로부터 와가 발달되며, 하류로 진행되어질수록 점점 와가 발달된다는 것을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

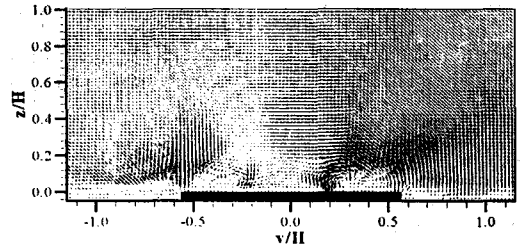


Fig. 7 평균유동장
(유동의 접근각도 : 37.5, 측정위치 0.8H)

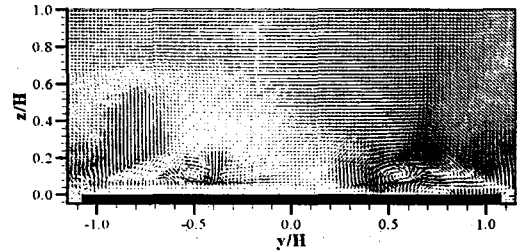


Fig. 8 평균유동장
(유동의 접근각도 : 37.5, 측정위치 1.6H)

Fig. 9와 Fig. 10은 유동의 접근각도가 45° 일 때, 측정위치가 0.8H, 1.6H인 지점에서의 실험 결과이다. 결과를 통하여 유동의 접근각도가 45° 인 경우 와의 형성이 모형의 중심을 기준으로 대칭적으로 나타나며 또한 하류로 유동이 진행되어질수록 그 축이 좌·우 모서리를 따라 발달하며 건물의 지붕으로부터 거리가 점점 멀어지는 것을 확인할 수 있었다. 이와같은 현상을 통하여 와의 크기가 점점 발달하며 증가하는 것을 의미하는 것으로 사료되어진다.

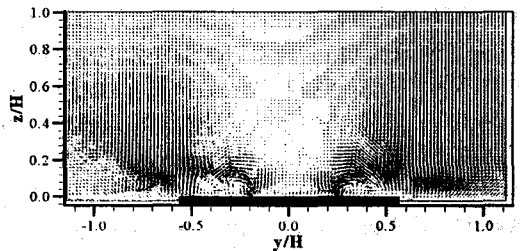


Fig. 9 평균유동장
(유동의 접근각도 : 45°, 측정위치 0.8H)

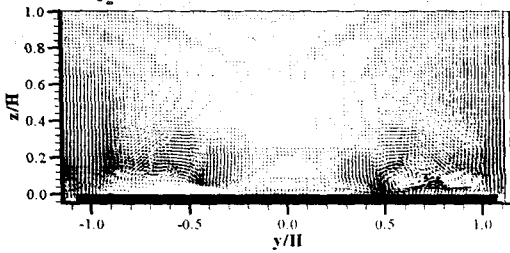


Fig. 10 평균 유동장
(유동의 접근각도 : 45° , 측정위치 1.6H)

4.2 고찰

이상에서 획득한 실험결과를 200번 ensemble 을 실시하므로 2차 와(secondary vortex)의 현상이 정확히 보여지지 않지만, 순간 유동장에 대한 자료에서 보다 정확히 2차 와가 발생하는 현상을 확인할 수 있었다. Fig. 11은 유동의 접근각도가 30° 인 경우에 대하여 측정위치가 1.6H인 위치에서 획득한 결과이다. 이때 와의 우측면에 2차 와가 발생되어지는 것이 관찰되어진다. 그러나 보다 정확히 관찰되어지지 않고 경향만 나타난 것은 모형의 제작이 합성수지로 제작되어진 관계로 인하여 Laser Beam의 반사가 발생되어 일어난 현상으로 사료되어진다.

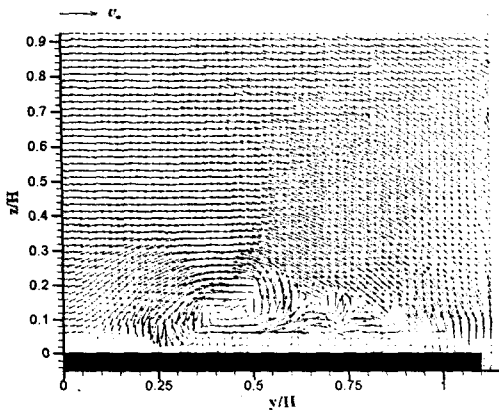


Fig. 11 순간 유동장
(유동의 접근각도 : 30° , 측정위치 : 1.6H)

Fig. 12는 유동의 접근각도가 37.5° 인 경우에 대한 순간 유동장을 표현한 그림이다. 이 경우도

앞서 기술한 30° 의 경우와 마찬가지로 2차 와의 발생이 나타나고, 건물 모형의 반사로 인하여 경향만 보여지는 것으로 사료된다. 또한 결과에서 알 수 있듯이 모형의 벽면으로부터의 박리가 확연히 나타나는 것을 볼 수 있다.

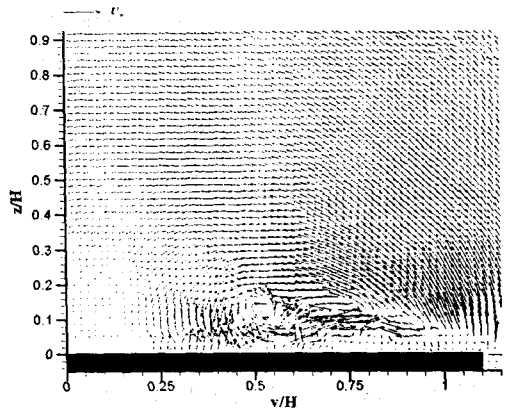


Fig. 12 순간 유동장
(유동의 접근각도 : 37.5° , 측정위치 : 1.6H)

Fig. 13은 유동의 접근각도가 45° 인 경우에 획득한 순간 유동장의 결과이다. 순간 유동장을 확인한 결과, 원추형 와의 축 흔들림 현상으로 인하여 2차 와의 위치 또한 변화를 일으킨다는 것이 확인되어졌다. Fig. 11, 12 그리고 13을 비교하여 보면 원추형 와의 축의 흔들림 현상으로 인하여 위치가 평균 유동장에서 보여주는 위치와 어느 정도 상이하게 나타나는 것으로 판단되어진다.

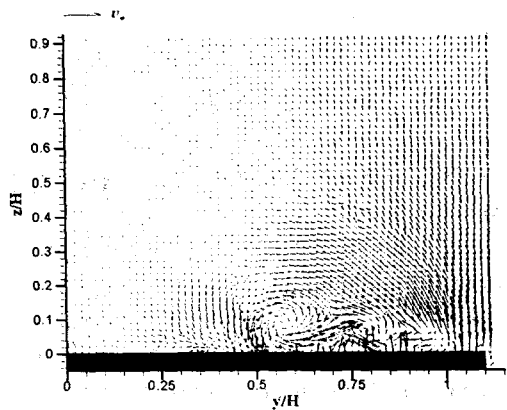


Fig. 13 순간 유동장
(유동의 접근각도 : 45° , 측정위치 : 1.6H)

순간 유동장에 대한 결과로부터 2차 와의 현

상이 확연히 나타나며 이와같은 2차 와는 주 와 (main vortex)와 건물모형의 모서리에서 발생하는 박리사이의 영역에서 주 와의 2차 박리에 의하여 발생되어지는 것으로 사료되어진다.

유동의 접근각도가 30° 인 경우 와의 발생이 시작되어지는 현상이 나타나며 주변에 형성되는 와는 건물의 측면 벽에 유동이 충돌하여 발생하는 박리현상으로 인한 것으로 보여진다. 이와 같은 유동은 유동의 접근각도가 점점 증가함에 따라 와의 크기가 점점 증가와 감소를 진행하므로 유동의 접근 각도가 45° 를 이룰 때 거의 대칭을 이루고 있다.

유동의 접근각도가 45° 인 경우에 있어서 건물 모형의 상층부에서 발생하는 와가 크기 그리고 위치 등에 있어서 거의 대칭을 이루는 것을 확인할 수 있었다. 또한 유동의 접근각도가 변화함에 따라 원추형 와의 크기가 한쪽에서는 증가하지만 다른 쪽의 와는 점점 감소하는 현상을 확인할 수 있었다. 유동의 접근각도가 45° 를 이룰 때 측정이 이루어진 두 위치 모두에서 대칭적으로 원추형 와가 발생됨을 확인할 수 있었다. 이상에서 기술한 원추형 와(conical vortex)는 그 유동의 방향이 모두 중심을 향하는 방향성을 지니고 있다. 즉 중심축을 기준으로 두 개의 와가 서로 반대방향을 지니고 있다. 이는 건물 모형의 양쪽 모서리에서 발생되어지는 유동의 박리현상에 의한 것으로 사료되어진다.

5. 결론

이상의 연구결과를 기초로 다음과 같은 결론에 도달할 수 있었다.

- (1) 유동의 접근각도가 증가함에 따라 와의 발달과 감소가 건물 모형의 양 모서리에서 발생되어 유동의 접근각도가 45° 를 이룰 때 대칭을 이룬다.
- (2) 순간 유동장에 대한 자료를 통하여 원추형 와의 옆에 2차 와(secondary vortex)가 발생되어지는 것이 관찰되어졌다.
- (3) 또한 순간 유동장을 관찰한 결과 와의 축에 있어 흔들림(sway)현상이 관찰되어졌다.
- (4) 순간유동장을 확인한 결과 2차 와(secondary

vortex)의 측면에 모형의 벽면에서 발생된 유동의 박리현상과 원추형 와에 의한 새로운 와(3차 와; third vortex)가 관찰되어졌다.

참고문헌

- (1) H.Kawai, G.Nishimura, ' Characteristics of fluctuating suction and conical vortices in a flat roof in oblique flow', Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 60 (1996) 211-225
- (2) H.Kawai, ' Local Peak Pressure on a Flat Roof - Mechanism and Reduction-', 1st International Symposium on Wind and Structure(2000)
- (3) B.Bienkiewicz and Y.Sun, ' Local Wind Loading on the Roof of a Low-Rise Building ', J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 45(1992) 11-24
- (4) D.Hwangbo, H.S.Ji, K.C.Kim, ' Wind Tunnel Modeling of Prismatic Low-Rise Building in the Atmospheric Boundary Layer ', 1st International Symposium on Wind and Structure(2000)
- (5) H.J.Ham, and B.Bienkiewicz, ' Wind tunnel simulation of TTU flow and building roof pressure ', J.Wind.Eng. Ind. Aerodyn 77&78, 119-133