

## 두꺼운 난류경계층 내부에 놓인 직사각형 프리즘 주위의 유동구조

지호성<sup>\*</sup> · 김경천<sup>†</sup> · 추재민<sup>\*\*</sup> · 이석호<sup>\*\*\*</sup> · 성승학<sup>\*\*\*\*</sup>  
 (2001년 9월 5일 접수, 2002년 2월 25일 심사완료)

### Flow Structure Around a Rectangular Prism Placed in a Thick Turbulent Boundary Layer

Ho Seong Ji, Kyung Chun Kim, Jae Min Choo, Seok-Ho Rhi and Seung Hak Seong

**Key Words:** Flow Structure(유동구조), PIV(Particle Image Velocimetry, 입자영상유속계), Rectangular Prism(직사각형 프리즘), Thick Turbulent Boundary Layer(두꺼운 난류경계층), Multi-Plane Measurement(다중평면측정)

#### Abstract

Flow structures around a rectangular prism have been investigated by using a PIV(Particle Image Velocimetry) technique. A thick turbulent boundary layer was generated by using spires and roughness elements. The boundary layer thickness, displacement thickness and momentum thickness were 650mm, 117.4mm and 78mm, respectively. The ratio between the model height(40mm) and the boundary layer thickness  $H/\delta$ , was 0.06. The Reynolds number based on the free stream velocity and the height of the model was  $7.9 \times 10^3$ . The PIV measurements were performed at three different wall normal planes. Three recirculation regions at forward facing step, top of the roof and backward facing step are clearly seen and show three dimensional features. Dramatic changes of flow patterns are observed in the wake regions in the different spanwise wall normal planes. Instead of reattachment and recirculation zone, rising streamlines are depicted at the normal planes near the side wall due to the interaction with a rising horse shoe vortex. The peak of turbulent kinetic energy occurs at the separation bubble on top of the roof and the magnitude is 2.5 times higher compared with that of the wake region.

#### 기호설명

$H$  : 모형의 높이 [mm]  
 $\bar{q}^2$  : 난류운동에너지 [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]  
 $Re_H$  : 레이놀즈수(프리즘높이 기준)  
 $Re_x$  : 국소레이놀즈수

$Re_\theta$  : 레이놀즈수(운동량 두께 기준)  
 $x, y, z$  : 유동방향, 수평방향 그리고 수직방향 좌표  
 $U, V$  : 유동방향, 수평방향 국소 평균유속 [%]  
 $U_\infty$  : 자유유동속도 [%]  
 $u, v, w$  : 유동방향, 수평방향 그리고 수직방향 난류 섭동성분 [%]  
 $u^*$  : 마찰속도 [%]  
 $\delta$  : 경계층두께 [mm]  
 $\delta^*$  : 배제두께 [mm]

\* 회원, 부산테크노파크 부산대학교 분소 연구원

† 책임저자 회원, 부산대학교 기계공학부,

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-1464 FAX : (051)582-9164

\*\* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 회원, 한국에너지기술연구원, 폐열이용 연구센터

\*\*\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부

- $\theta$  : 운동량두께 [mm]
- $\delta^*/\theta$  : 형상계수
- $\tau_w$  : 벽면전단응력 [ $N/m^2$ ]

1. 서론

편평한 사각형의 지붕표면을 가지는 현대식 저층 건물에서는, 바람이 강할 경우 일반적으로 지붕의 모서리 부근에서 피해가 발생한다.<sup>(1)</sup> 이와 같은 저층 건물 모형에 대해 바람의 동적인 영향에 관한 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되어졌다.<sup>(1-3)</sup> Bearman<sup>(4)</sup>은 뭉툭한 물체 주위의 유동구조에 대하여 후류영역의 유동구조의 특성 및 와류출에 대하여 기술하였다. 그리고 입자영상유속계를 이용한 실험의 경우 뭉툭한 물체의 후류영역에서의 순간유동장에 대한 정보 등을 얻을 수 있는 장점을 기술하였으나 실질적인 실험의 결과는 제공하지 못하였다. Makita<sup>(5)</sup> 등은 열선유속계와 smoke wire를 이용한 뭉툭한 물체 주위의 유동에 대한 실험을 통하여 뭉툭한 물체 후류영역의 유동에 대한 정보를 제공하였다. 그리고 smoke wire를 이용한 유동가시화를 수행하였다. 그러나 열선유속계의 측정한계로 인하여 순간유동장에 대한 정보는 정확히 얻어지기가 어렵고, 또한 유동가시화 실험을 통한 정량적인 유동의 정보는 획득하지 못하였다. Akins<sup>(6)</sup> 등은 LDV를 이용하여 건물모형 지붕표면에서 박리 전단층에 대한 실험을 수행하였다. 그러나 박리가 발생하는 극점에 대한 실험을 수행하므로, 건물 모형주위 전체에 대한 유동의 정보는 획득하지 못하였다. 최근에 이르러 PIV기법을 이용한 구조물 주위의 유동특성에 대한 연구가 수행되어지고 있다. Poitras<sup>(7)</sup> 등은 수동과 PIV기법을 이용하여, 여러 가지 건물모형에 대한 유동구조를 획득하였다. 그러나 건물 주위의 순간유동장의 정보 및 난류 특성치에 대한 정보는 미흡한 실정이다. Jim<sup>(8)</sup> 등은 PIV 기법을 이용하여 저층 구조물 모형의 지붕표면에서의 유동구조를 파악하여 원주와 같은 구조를 규명하였다.

앞서 기술하였듯이 많은 선행 연구자들이 사각 프리즘과 같은 뭉툭한 물체 주위의 유동구조에 대한 연구를 열선유속계, LDV 그리고 모형 표면

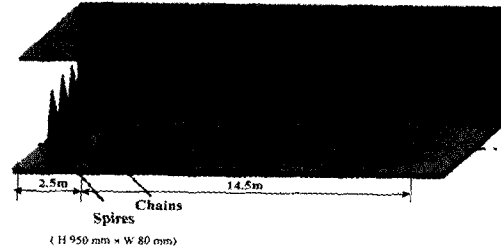


Fig. 1 Schematic of boundary layer generation system

에서의 압력분포 측정 등을 통하여 수행하였다. 그러나 측정한계로 인하여 2차원 평면 유동장에 대한 순간유동장등과 같은 상세한 유동정보를 획득하기는 어려운 실정이다.

선행 연구자들의 압력분포에 대한 연구결과로부터 밝혀진 바와 같이 건물의 전면부에 심각한 피해가 발생한다고 지적하였다. 따라서 건물 모형 주위의 상세한 유동구조를 파악할 필요가 있다. 최근 PIV(입자영상유속계)기법이 복잡한 유동장에 대한 풍부한 정보를 쉽게 얻을 수 있는 매우 유용한 기법이라는 것이 많은 연구를 통하여 밝혀졌다.<sup>(9)</sup> 본 연구에서는 PIV기법을 이용한 정량적 유동가시화를 통하여, 측정 단면의 변화에 따른 사각 프리즘 주위의 상세한 유동구조를 얻고자 한다. 본 연구를 통하여 얻어진 사각 프리즘 주위의 상세한 유동정보는 유동의 박리와 재부착 위치 그리고 박리기포(Separation bubble)의 크기 등을 포함하여 제공할 것이다. 그리고 동역학적 정보는 측정된 난류운동에너지 분포와 같은 난류특성치로부터 설명되어질 수 있다.

2. 실험장치와 방법

2.1 실험장치의 구성

본 실험은 부산대학교에 있는 개방형의 대형 대기 경계층 풍동에서 수행되었다. 풍동의 주요 제원은 시험구간의 크기가 2.1×2.1×20m(W×H×L)이다. 실험에 적용한 경계층을 형성하기 위하여 삼각와류발생기(H 950mm×W 80mm, 4개)와 거칠기 요소(체인,  $\phi$  2.5mm, 300mm 간격)를 조합하여 적용하였다. Fig. 1은 경계층 형성을 위하여 적용한 실험장치 구성의 개략도이다.

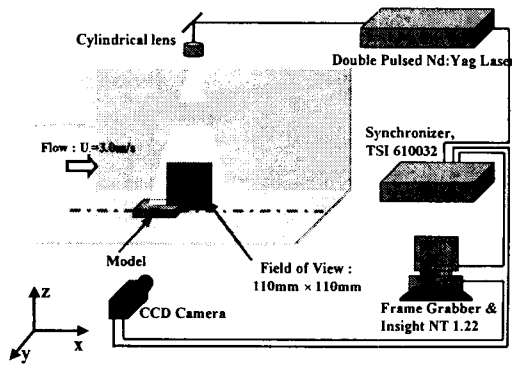


Fig. 2 Schematic of experimental set-up

Fig. 2는 실험장치 구성의 개략도를 나타낸 것이다. 직사각형 프리즘의 크기는  $140 \times 95 \times 40\text{mm}$ ( $L \times W \times H$ )이다. 프리즘은 레이저광의 반사를 최소화하기 위하여 유리로 제작되었다.

대부분의 PIV 실험에 적용되는 추적입자는 비유독성, 비부식성, 비연마성, 비휘발성이어야 하고 화학적으로 불활성이어야 한다. PIV 실험에 있어서 이와 같은 요구조건을 만족하는 추적입자는 많으나, 본 실험에 있어서 추적입자는 Olive 기름의 액적을 적용하였다. Olive 기름 액적의 경우 선행연구자들의 연구를 통하여 보고된 바와 같이, 풍동을 이용한 실험과 같은 기체의 유동에 적절한  $1 \sim 2\mu\text{m}$ 의 입경을 지니고 있다.<sup>11)</sup> 추적입자의 생성은 두 개의 Laskin 노즐 챔버(각 챔버당 Laskin 노즐 6개)를 제작하여 실험에 적용하였다. 챔버의 제작 시 1개의 Laskin 노즐에서 배출되는 공기의 반경을 고려하여 중첩이 발생되지 않도록 배치하였으며, 입구부에는 분배기를 통하여 압축 공기가 6개의 노즐에 균일하게 공급되도록 하였다. 프리즘은 풍동의 입구로부터 18m 하류에 위치시켰고, 레이저광은 풍동의 상측에 설치된 구형렌즈를 통하여 평면 광으로 만들어져 모형 지붕의 상측에 수직으로 조사하였다. 그리고 CCD 카메라는 Fig. 2에서 보여지듯이 조사된 평면 레이저광에 대해 수직으로 설치하였다.

## 2.2 실험방법

본 실험에 적용되어진 PIV 시스템은 펄스당 최대출력이 200mJ인 이중펄스(double pulsed) Nd-Yag 레이저, 고해상도 CCD 카메라, 동기화장

치(TSI 610032) 그리고 펜티엄 컴퓨터로 구성되어 있다. 레이저빔은 반사경과 구형의 렌즈를 통하여 얇은 평면 광으로 형성되어 시추구간에 조사된다. 화상자료의 획득을 위하여  $1\text{K} \times 1\text{K}$ 의 해상도를 가지는 PIVCAM 10-15 CCD 카메라가 사용되었다. 경계층 유동 정보 획득의 경우 두 화상간의 시간 간격은  $200\mu\text{s}$ 이다. 접근 유동장의 정보를 얻기 위하여  $28\text{cm} \times 28\text{cm}$ 의 평면영상을 획득하였으며, 적용된 렌즈는 18-108mm 광각렌즈를 사용하였다. 화상 획득은 실험 case 당 2040장(속도장 1020개)을 획득하여 후처리하였다. 그리고 경계층 영역에 대한 실험이 수행되도록 풍동 바닥면의 수직방향으로 3개영역에 걸쳐 화상을 획득하였다. 즉, 획득한 화상의 전체 영역은  $28\text{cm} \times 80\text{cm}$ 이다. PIV 실험시 입자의 위치와 화상의 위치사이의 비선형 관계에 의해 야기되는 왜곡의 보정은 수행된 실험의 결과의 정확성을 높인다<sup>12)</sup>. 작은 화상의 획득에 의한 유동 정보는 왜곡이 발생한다 할지라도 왜곡의 정도가 무시할 정도이다. 그러나 거대화상의 경우 왜곡의 정도는 실험 결과의 정확성에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 본 실험에서 적용된 접근유동장의 정보를 얻기 위한 화상은 거대화상이라고 판단된다. 그러므로 거대화상의 획득 시 발생하는 왜곡은 다음의 식 (1)에 의하여 보정을 하였다.

$$\begin{aligned} \text{Image}_x &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy \\ &\quad + a_5y^2 + a_6x^3 + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9y^3 \\ \text{Image}_y &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy \\ &\quad + a_5y^2 + a_6x^3 + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9y^3 \end{aligned} \quad (1)$$

그리고 프리즘 주위의 유동 정보 획득의 경우 두 화상간의 시간간격은  $150\mu\text{s}$ 이다. 프리즘 주위의 유동장 정보를 얻기 위하여 적용된 렌즈는 80-200mm 망원렌즈를 사용하여  $11\text{cm} \times 11\text{cm}$ 의 평면영상을 획득하였다. 화상획득은 실험 case당 1020장(속도장 510개)을 획득하여 후처리하였다. 속도벡터의 계산과 후처리는 자체 개발한 PIV-ACE V 1.0을 이용하였고, 속도벡터의 추출은 2 화상 상호상관기법을 사용하였다.

속도계산을 위한 탐색영역의 크기는  $24 \times 24$  픽셀로 선정하였고, 50%의 중첩이 허용되었다. 속도벡터의 격자 수는 7,056개이고 벡터간의 공간 해상도는 1.3mm이다. 구해진 속도벡터는 본 실험

실에서 보유하고 있는 후처리 프로그램으로 불량 벡터의 제거, 중심추적, 앙상블(ensemble) 평균 그리고 통계적 처리를 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 접근유동

접근유동장은 거칠기 요소와 삼각와류발생기를 적용하여 인위적으로 경계층을 생성하였다. 획득된 속도장은 1020개의 속도장을 앙상블 평균을 취하였다. Figs. 3, 4는 풍동의 입구로부터 18m 떨어진 곳에서 측정된 접근유동장의 정보를 표현한 것이다. 난류강도의 최대값은 약 28%를 나타내고, 자유유동의 난류강도는 약 8%를 나타내고 있다. 국소 Reynolds 수 ( $Re_x$ )는 임계값인  $5 \times 10^5$ 보다 큰  $3.36 \times 10^6$ 이고, 경계층 두께 ( $\delta = 650\text{mm}$ )에 대한 Reynolds수 ( $Re_\delta$ )는  $1.1 \times 10^5$ 이다. 그리고 배제두께( $\delta^*$ )와 운동량 두께( $\theta$ )는 각각 117.4mm와 78mm로 측정되었다. 따라서 형상계수( $\delta^*/\theta$ )는 층류인 경우의 형상계수값 2.59보다 매우 작은 1.50이었다. 이 값은 실험에 적용된 경계층 유동이 난류경계층 영역이라는 것을 의미한다. 그리고 마찰속도( $u_*$ )와 벽면 전단응력( $\tau_w$ )는 각각 0.085m/s,  $8.67 \times 10^{-3} \text{N/m}^2$ 이다. 벽법칙 지수는  $u = U_\infty(y/\delta)^\alpha$ 에 의하여 구하였으며, 이때 지수( $\alpha$ )는 0.24이다.

#### 3.2 평균속도분포

경계층 내에 위치한 건물 모형 주위의 2차원 유동구조를 PIV 기법을 이용하여 획득하여 분석하였다. 측정 단면의 변화에 따른 건물 주위의 유동구조를 확인하기 위하여, 인위적으로 형성시킨 경계층 영역에 위치한 모형주위의 유동에 대하여 실험을 수행하였다. 실험을 수행한 영역은 모형의 중심단면과 단면으로부터 0.5H, 그리고 1.0H 떨어진 3가지 단면에서 화상을 획득하여 실험의 결과를 구하였다. Fig. 5는 저층 건물 주위의 유동구조를 확인하기 위해 실험을 수행한 측정단면을 표현한 것이다. 이때 유동 정보의 획득을 위한 화상은 약 110mm×110mm이며 각각의 경우에 있어서 1020개의 화상을 획득하여 앙상블 평균을 취하였다. 즉, 획득된 속도장은 510개이다. 모형 주위의 전체적인 유동구조의 파악을 위

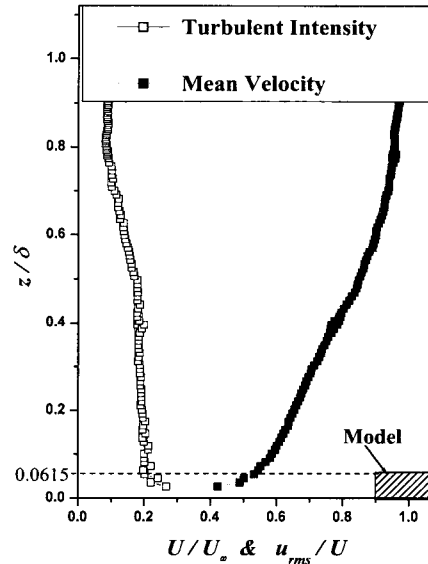


Fig. 3 Approaching boundary layer

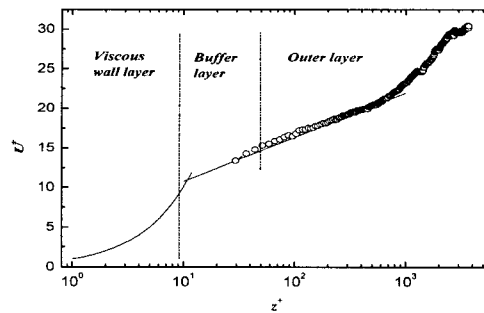


Fig. 4 Mean velocity profile

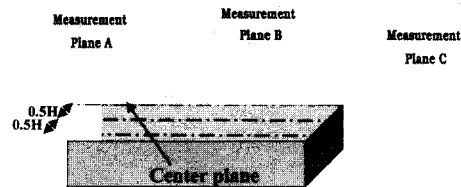


Fig. 5 Measurement planes

하여 3개 영역에 걸쳐 실험을 수행하였다.

Figs. 6, 7 그리고 8은 모형의 중심단면에서 획득한 속도분포를 유선과 수직방향에 대한 속도분포로 표현한 것이다. Fig. 6은 모형 주위의 평균

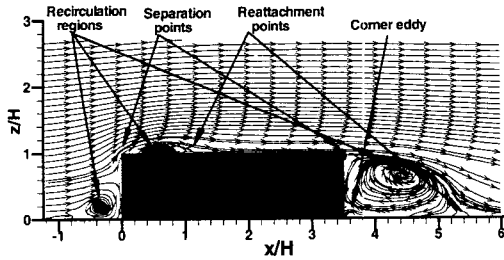


Fig. 6 Streamlines from ensemble averaged velocity field(at center-plane)

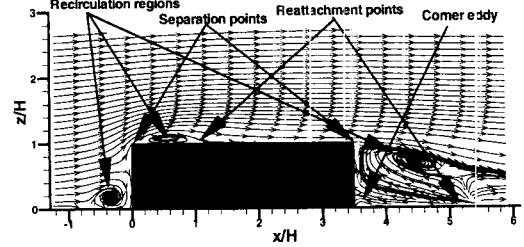


Fig. 9 Streamlines from ensemble averaged velocity field(0.5H from center-plane)

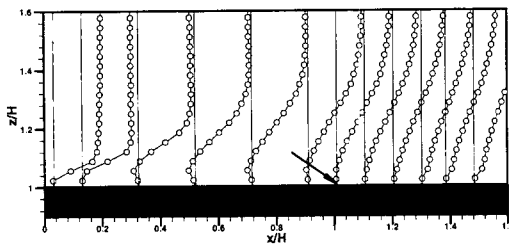


Fig. 7 Ensemble averaged velocity field (model roof region at center-plane)

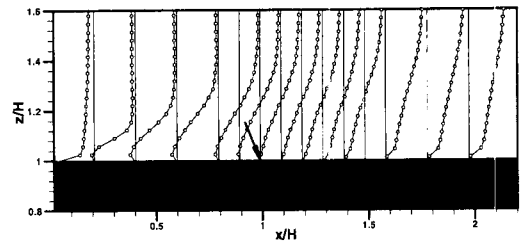


Fig. 10 Ensemble averaged velocity field(model roof region 0.5H from center-plane)

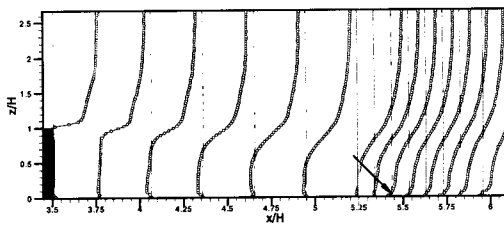


Fig. 8 Ensemble averaged velocity field(model wake region at center-plane)

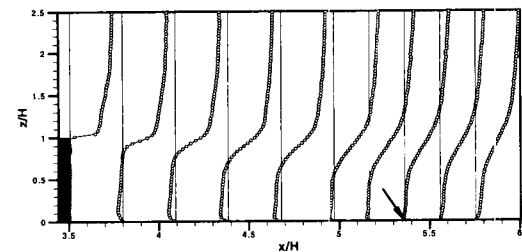


Fig. 11 Ensemble averaged velocity field(model wake region 0.5H from center-plane)

유동분포를 유선으로 표현한 것이다. Fig. 7은 모형의 상층의 평균유동을 수직방향에 대한 속도분포를 자세히 표현한 것이다. Fig. 8은 모형의 후류영역의 평균유동을 수직방향에 대한 속도분포를 자세히 표현한 것이다. 유선으로 표현한 결과를 살펴보면 건물 모형의 전면 모서리와 후면 모서리에서 발생하는 유동의 박리가 확인되었다. 그리고 재부착 위치는  $\partial u / \partial y = 0$ 인 지점을 확인하므로 명백하게 확인되어질 수 있다. 재부착 위치는 모형의 중심에 대한 실험의 경우 지붕표면에서는 약 1.01H, 후류 영역에서는 5.43H(모형 끝단으로부터 1.93H 떨어진 지점)에서 각각 발생

되었다. 재순환영역의 경우는 건물의 전면부와 지붕표면의 전면부 그리고 후류영역에서 재순환이 발생하는 것이 확인되었다.

Figs. 9, 10 그리고 11은 모형의 중심단면으로부터 측면으로 0.5H 떨어진 위치에서의 측정단면에 있어서 평균속도에 대한 유선분포와 수직방향에 대한 속도분포로 표현한 것이다. Fig. 9는 모형 주위의 평균유동분포를 유선으로 표현한 것이다. Fig. 10은 모형의 상층의 평균유동을 수직방향에 대한 속도분포를 자세히 표현한 것이다. Fig. 11은 모형의 후류영역의 평균유동을 수직방

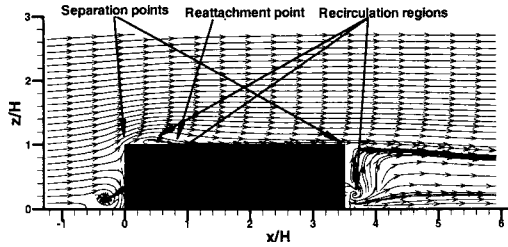


Fig. 12 Streamlines from ensemble averaged velocity field(1.0H from center-plane)

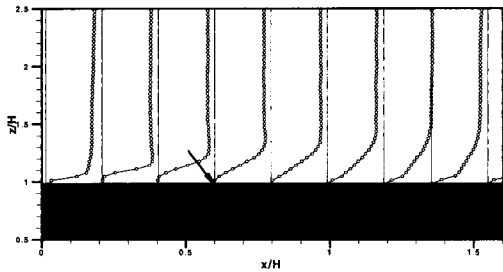


Fig. 13 Ensemble averaged velocity field(model roof region 1.0H from center-plane)

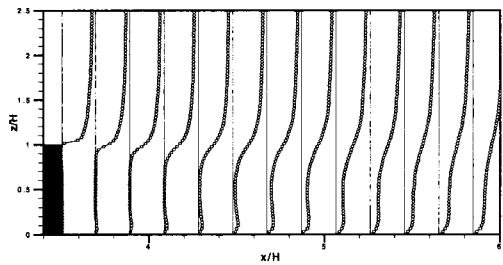


Fig. 14 Ensemble averaged velocity field(model wake region 1.0H from center-plane)

향에 대한 속도분포를 자세히 표현한 것이다. 박리가 발생하는 위치는 중심에서의 경우와 동일하지만, 재부착 위치는 지붕표면에 있어서는 0.99H로 건물 모형의 전면부로 이동하였다. 그리고 후류영역의 경우 5.34H에서 재부착이 발생하였다. 즉, 후류영역에서 재부착은 건물의 벽으로 접근하는 형태를 지니고 있다. 이는 중심의 경우와는 달리 측면에서 발생하는 말발굽 와의 영향으로 인하여 재부착 위치가 앞으로 이동하는 것으로 판단된다. 모형 전면부와 지붕표면의 재순환 영역은 확인되어졌으며 박리기포 (Separation bubble)의 크기 또한 감소하였다.

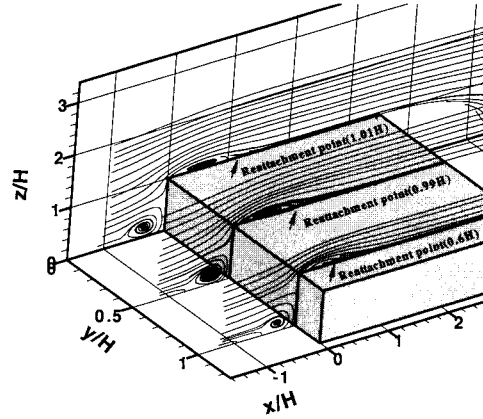


Fig. 15 Comparison of streamlines by measurement planes (windward side)

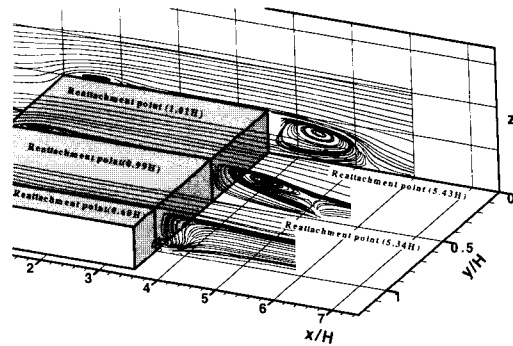


Fig. 16 Comparison of streamlines by measurement planes (leeward side)

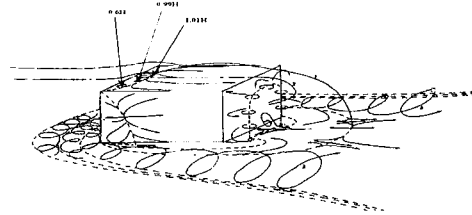


Fig. 17 Schematic of flow structure around low-rise building

Figs. 12, 13 그리고 14는 모형의 중심단면으로부터 측면으로 1H 떨어진 단면에서의 평균속도에 대한 유선분포와 수직방향에 대한 속도분포를 표현한 것이다. 지붕표면에서의 재부착 위치는 다른 실험 경우와 달리 현저히 모서리 근처로 이

동한 0.6H위치에서 발생되었다. 특이한 점은 후류영역에서는 벽면근처에서 비점성 유동 해석시의 source로 보여지는 현상이 나타나며, 이 점으로부터 수직방향으로 상승하는 유동이 발생된다. 이것은 유동의 모형의 측면을 따라 발생하는 말발굽 와에 의한 유동의 유입과 후류영역에서 발생하는 재순환 영역의 유동이 복합적으로 발생되어지는 것으로 판단된다. 벽면근처에서의 비점성 유동해석시의 source로 보여지는 점에서의 유동방향이 바닥면으로 부터 수직방향으로 향하는 것은 유동은 말발굽 와로부터 유입되지만 유동방향은 측정단면의 안쪽에서의 재순환 영역의 유동이 지배적인 역할을 하는 것으로 판단된다.

Figs. 15, 16은 측정 단면의 변화에 따른 유선 분포의 변화를 확인하기 위하여 비교하여 표현한 결과이다. 비교결과를 통하여 모형 지붕모서리 근처 재순환 영역의 크기의 비교가 명백히 나타났다. 정면 재순환 영역의 경우, 건물 모형의 중심에 비하여 외곽 영역에서의 재순환 영역의 크기가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 재부착 위치의 경우는 중심 단면에서 외곽으로 이동할수록 재부착 위치는 유동의 상류로 이동하였다. (1.01H→0.99H→0.6H/ 5.43H→5.34H→×) 후류 영역에 있어서 재순환 영역의 크기 또한 건물의 바깥의 경우가 중심의 경우보다 감소하였다. 그리고 앞서 지적한 1.0H 떨어진 위치에서 후류 영역에서는 source로 보여지는 지점으로부터 수직방향으로 유동이 상승하는 현상이 나타났다. 동일한 유동장에서 측정 단면의 변화에 따른 저층 건물 주위의 유동구조의 변화가 관찰되어졌다. Fig. 17은 모형 주위의 유동구조에 대한 개략도를 표현한 것이다.

### 3.3 난류 운동에너지 분포

난류 운동 에너지는 난류 섭동(fluctuation) 거동에 의해 야기되므로 평균 난류 운동에너지 분포는 지붕의 모서리에서 발생하는 유동에 관한 동역학적 정보를 제공한다. 난류 운동 에너지는 각각의 순간유동장에서 평균 유동장을 빼고 남은 순간 섭동 속도장으로부터 계산된다. 주 유동방향(x축)의 속도 섭동성분과 수직방향(z축)의 속도 섭동성분만을 측정하였으므로 난류 운동 에너지 분포는 다음의 식 (2)에 의해 구한다.

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

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

Figs. 18~21은  $U_\infty^2$ 로 무차원화된 건물 모형 주위의 난류운동에너지 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 18은 모형의 중심 단면에서의 난류운동에너지 분포를 표현한 것이다. Fig. 19는 건물의 측면으로부터 0.5H 떨어진 위치의 측정단면에서 획득한 난류운동에너지 분포이다. 난류 운동에너지 분포에서 모서리 영역(36%)보다는 재순환 영역의 난류운동에너지(46%)가 약 10% 더 높은 값을 지니고 있다. 이는 재순환 영역에서의 순간유동장에서 관찰되어지는 와 운동에 의한 속도 섭동성분에 의한 난류운동에너지 분포에 지배적인 역할을 하는 것으로 판단된다. Fig. 20은 중심단면으로부터 1.0H 떨어진 측정 단면에서 획득한 난류운동에너지분포이다.

Fig. 21은 측정 단면의 변화에 따른 난류운동에너지 분포의 비교를 나타낸 것이다. 중심단면의 경우, 난류운동에너지의 분포는 정면 재순환 영역에서 34%를 나타내고 있다. 최대값은 건물 지붕의 재순환 영역(0.4H위치)에서 약 57%를 나타내고 있다. 재부착이 발생하는 약 1H의 위치에서 46%를 나타내고 있다. 그리고 건물의 하류 박리 위치인 3.5H에서 17%, 후류 재순환 영역인 5H의 위치에서 23%를 나타내고 있다. 박리에 의한 가속이 이루어지는 영역과 재순환 영역내의 와 운동이 관찰되는 영역에서 강한 난류운동에너지분포를 이루고 있다. 평균유동장과 유선분포에서 알 수 있듯이 유동박리가 발생하는 모서리 영역에서 유동의 가속구간이 나타난다. 그리고 재순환영역에서도 강한 난류운동에너지가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 또한 재순환 영역중에서 모형의 벽면보다는 유동의 가속구간에서 강한 난류운동에너지가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 난류운동에너지 분포에 대한 결과를 통하여 유동의 박리에 의해 건물 모서리에서부터 형성되는 전단층 영역에서 강한 속도섭동 성분이 난류운동 에너지를 지배한다는 것을 확인할 수 있다. 중심

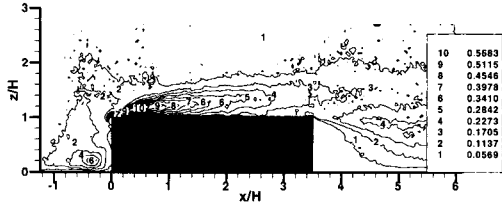


Fig. 18 Turbulent kinetic energy distribution (Center-plane)

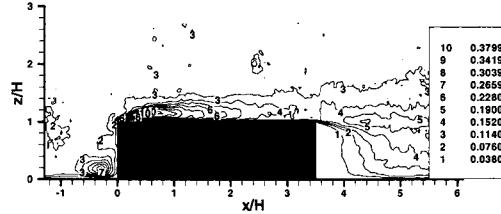


Fig. 20 Turbulent kinetic energy distribution (1.0H from center-plane)

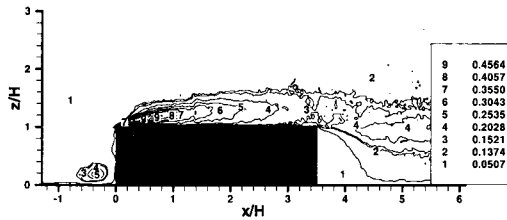


Fig. 19 Turbulent kinetic energy distribution (0.5H from center-plane)

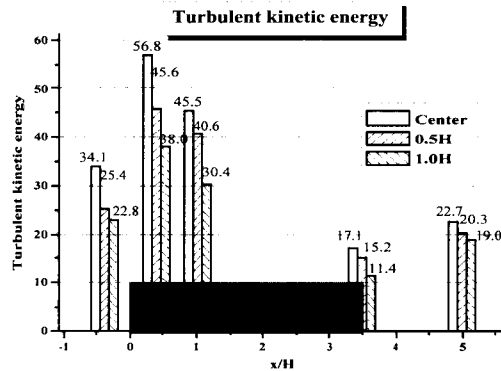


Fig. 21 Comparison of turbulent kinetic energy by measurement plane variation

단면으로부터 0.5H 떨어진 단면에서의 난류운동 에너지 분포는 정면 재순환 영역에서 25%를 나타내고 있다. 최대값은 건물 지붕의 재순환 영역(0.4H 위치)에서 약 46%를 나타내고 있다. 재부착이 발생하는 약 1H의 위치에서 41%를 나타내고 있다. 그리고 건물의 하류 박리 위치인 3.5H에서 15%, 후류 재순환 영역인 5H의 위치에서 20%를 나타내고 있다. 모형의 중심단면으로부터 1.0H 떨어진 단면에서의 난류운동에너지분포를 살펴보면, 정면 재순환 영역에서 23%를 나타내고 있다. 최대값은 건물 지붕의 재순환 영역(0.4H 위치)에서 약 38%를 나타내고 있다. 재부착이 발생하는 약 1H의 위치에서 30%를 나타내고 있다. 그리고 건물의 하류 박리 위치인 3.5H에서 11%, 후류 재순환 영역인 5H의 위치에서 19%를 나타내고 있다. 측정 단면의 변화에 따른 비교를 통하여 난류운동에너지 분포의 값의 크기는 지붕의 재순환영역에서 최대값을 이루고 있으며, 건물지붕의 재부착 위치 근처, 정면의 재순환영역에서 그리고 후류 재순환영역의 순으로 나타내고 있다. 측정 단면이 측면 가까이 갈수록 낮은 값을 지니고 있다. 이는 건물의 측면으로 갈수록 유동이 매우 복잡한 3차원 유동의 형태를 지니고 있으며, 지붕 표면에서 박리기포(Separation bubble)의 크기는 감소하고 정면의 재순환 영역

은 측면을 따르는 말발굽 와(horseshoe vortex)의 영향에 의한 것으로 판단되어진다. 측면에서 발생하는 말발굽 와에 의한 횡방향 속도의 섭동성분의 증가에 기인한다고 판단된다. 이는 후류 영역에서의 운동에너지 분포에서도 동일한 결과를 확인할 수 있다.

그리고 건물 주위 전체의 난류운동에너지 분포를 통하여, 동일한 실험의 경우에 있어서 가장 높은 영역은 지붕머서리 부근의 재순환영역이며, 다음으로 유동이 접근하는 건물면의 재순환 영역이다. 그리고 상대적으로 낮은 난류운동에너지를 지니고 있는 영역은 후류 영역에서의 재순환 영역이다. 중심단면의 경우 유동이 건물에 대하여 수직되게 접근할 때 후류영역보다는 정면의 지붕 표면은 약 2.5배, 정면 재순환 영역은 후류영역보다 약 1.7배 더 큰 값을 지니고 있다. 측면으로 갈수록 유동이 3차원 유동의 형태인 말발굽 와의 형태를 지니고 있으므로 주유동방향과 수직방향의 속도성분과 더불어 횡방향 속도성분이 값이



증가하게 되고 이로 인하여 측면에서는 정면 재순환 영역의 난류운동에너지분포가 상대적으로 높은 값을 지니고 있으며, 후류영역에서의 난류운동에너지 값 또한 동일한 원인으로 판단되어진다.

#### 4. 결 론

두꺼운 난류경계층에 놓인 직사각형 프리즘 주위의 유동구조를 PIV 기법을 이용한 실험을 수행하여 얻어진 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 측정 단면의 변화에 따른 재부착 위치는 중심단면으로부터 측면으로 갈수록 상류로 이동하였다(지붕표면 재부착위치;  $1.01H \rightarrow 0.99H \rightarrow 0.6H$ , 후류영역;  $5.43H \rightarrow 5.34H \rightarrow \times$ ). 그리고 재순환 영역의 크기는 중심단면으로부터 측면으로 갈수록 말발굽 와를 포함하는 복잡한 3차원 유동으로 인하여 감소하였다.

(2) 본 연구에서 수행된 다중평면 PIV 측정 결과를 통하여 후류영역의 경우 가장 바깥 측정단면에서 건물 주변에 형성되는 말발굽류의 상호작용으로 후류측 모서리 와가 와해되는 과정을 관찰할 수 있었다. 이는 측면에서 발생하는 말발굽 와에 의한 유동으로부터 유입되고 내부의 재순환 영역에서의 유동이 상승유동에 지배적 역할을 하는 것으로 판단된다.

(3) 측정 단면의 변화에 따른 난류운동에너지분포를 통하여 바람이 접근할 때 접근하는 영역의 건물 모서리 영역과 재순환 영역에서 강한 난류운동에너지가 나타났다. 특히 정면 재순환 영역의 경우 후류영역에 비하여 약 2.5배 높은 난류운동에너지를 지니고 있다.

(4) 본 연구에서 수행된 다중평면 PIV 측정 결과는 LES 등 3차원 수치해석을 검증하는 중요한 데이터로 활용될 수 있으리라 사료된다.

#### 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) Bearman P. W., 1998, "Developments in the Understanding of Bluff Body Flows," *JSM E Int. Journal Series B*, Vol. 41, No.1, pp 109~113.
- (5) Makida H. and Sassa K., 1987, "Visualization and Measurement of the Wake of Two Dimensional Bodies in the Strong Turbulence," *Turbulence Measurements and Flow Modeling*, pp 137~146.
- (6) Akins R. E. and Reinhold T. A., 1998, "Laser Doppler Velocimeter Measurements of Separated Shear Layer on Bluff Bodies," *J. Wind & Eng. Ind. Aerodyn.* 74-76, pp. 455~461.
- (7) Poitras G., Brizzi L. E., Pecheux J. and Gagnon Y., 2000, "The Study of Fluid Flows in the Immediate Vicinity of Building Models," *9th Int. Symp. on Flow Visualization*, 245-1~246-10.
- (8) 김경천, 지호성, 성승학, 2001. "직사각형 프리즘 상면에서 발생하는 원추형 와의 유동구조," 대한기계학회논문집 B권, 제25권, 제5호, pp. 713~721.
- (9) 김경천, 김상기, 윤상열, 2000, "횡단류 제트의 유동 및 난류특성치에 대한 PIV 측정," 대한기계학회논문집 B권, 제24권, 제3호, pp. 382~389.
- (10) Melling A., 1997, "Tracer Particles and Seeding for Particle Image Velocimetry," *Meas. Sci. & Technol.* Vol. 8, pp 1406~1416.
- (11) Soloff S. M., Adrian R. J. and Liu Z. C., 1997, "Distortion Compensation for Generalized Stereoscopic Particle Image Velocimetry," *Meas. Sci. & Technol.* Vol. 8, pp 1441~1454.

(1) Bienkiewicz B. and Sun Y., 1992, "Local Wind Loading on the Roof of a Low-Rise Building," *J. Wind Eng. & Ind. Aerodyn.* 45,