

직사각형 프리즘 주위의 유동특성에 대한 경계층 두께의 영향

지호성*, 김경천**

Effect of Boundary Layer Thickness on the Flow Characteristics around a Rectangular Prism

Ho Seong Ji, Kyung Chun Kim

Key Words: Flow Structure(유동구조), PIV(Particle Image Velocimetry, 입자영상유속계), Rectangular Prism(직사각형 프리즘), Effect of Boundary Layer Thickness(경계층 두께의 영향)

Abstract

Effect of boundary layer thickness on the flow characteristics around a rectangular prism has been investigated by using a PIV(Particle Image Velocimetry) technique. Three different boundary layers(thick, medium and thin)were generated in the Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel at Pusan National University. The thick boundary layer having 670mm thickness was generated by using spires and roughness elements. The medium thickness of boundary layer($\delta=270\text{mm}$) was the natural turbulent boundary layer at the test section with fully long developing length(18m). The thin boundary layer with 36.5mm thickness was generated by on a smooth panel elevated 70cm from the wind tunnel floor. The Reynolds number based on the free stream velocity and the height of the model was 7.9×10^3 . The mean velocity vector fields and turbulent kinetic energy distribution were measured and compared. The effect of boundary layer thickness is clearly observed not only in the length of separation bubble but also in the reattachment points. The thinner boundary layer thickness, the higher turbulent kinetic energy peak around the model roof. It is strongly recommended that the height ratio between model and approaching boundary layer thickness should be a major parameter.

기호설명

H	: 모형의 높이	u, v, w	: 유동방향, 수평방향 그리고 수직 방향 난류 섭동성분
\bar{q}^2	: 난류운동에너지	u_*	: 마찰속도
Re_H	: 레이놀즈수(프리즘높이 기준)	δ	: 경계층두께
Re_x	: 국소레이놀즈수	δ^*	: 배제두께
Re_δ	: 레이놀즈수(경계층두께 기준)	θ	: 운동량두께
x, y, z	: 유동방향, 수평방향 그리고 수직방향 좌표	δ^*/θ	: 형상계수
U, V	: 유동방향, 수평방향 국소 평균유속	τ_w	: 벽면전단응력
U_∞	: 자유유동속도		

1. 서론

* 정회원, 부산테크노파크 부산대분소 연구원

** 정회원, 부산대학교 기계공학부

편평한 사각형의 지붕표면을 가지는 현대식 저층 건물에서는, 바람이 강할 경우 일반적으로 지

붕의 모서리 부근에서 피해가 발생한다.⁽¹⁾ 이와 같은 저층 건물 모형에 대해 바람의 동적인 영향에 관한 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되어졌다.⁽¹⁻³⁾

Makita⁽⁴⁾ 등은 열선유속계와 smoke wire를 이용한 독특한 물체주위의 유동에 대한 실험을 통하여 독특한 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⁽⁵⁾ 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⁽⁶⁾ 등은 수동과 PIV기법을 이용하여, 여러 가지 건물모형에 대한 유동구조를 획득하였다. 그러나 건물 주위의 순간유동장의 정보 및 난류 특성치에 대한 정보는 미흡한 실정이다.

최근 PIV(입자영상유속계)기법이 복잡한 유동장에 대한 풍부한 정보를 쉽게 얻을 수 있는 매우 유용한 기법이라는 것이 많은 연구를 통하여 밝혀졌다.⁽⁷⁾ 본 연구에서는 PIV기법을 이용한 정량적 유동가시화를 통하여, 다양한 접근 유동장 변화에 따른 사각 프리즘 주위의 상세한 유동구조를 얻고자 한다. 이와 같이 보다 자세한 사각 프리즘 주위의 유동정보는 유동의 박리와 재부착 위치 그리고 박리거품의 크기 등을 포함하여 제공할 것이다. 그리고 동역학적 정보는 측정된 난류운동에너지 분포로부터 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 다양한 경계층은 삼각

와류발생기(H 950mm×W 80mm, 4개)와 거칠기 요소(체인, ϕ 2.5mm, 300mm 간격)를 조합하여 생성한 대기경계층(ABL), 풍동의 충분한 길이에 의하여 자연스럽게 생성되는 난류경계층(중간두께의 경계층), 그리고 풍동의 바닥으로부터 70cm 수직으로 상승시킨 영역에서의 균일유동이다. Fig. 1은 ABL 형성을 위하여 삼각와류발생기와 거칠기 요소를 조합하여 구성한 실험장치의 개략도이다.

Fig. 2는 직사각형 프리즘 주위의 유동구조 파악을 위한 실험장치 구성의 개략도를 나타낸 것이다. 적용된 직사각형 프리즘의 크기는 140×95×40mm(L×W×H)이다. 프리즘은 레이저광의 반사를 최소화하기 위하여 유리로 제작하였다.

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

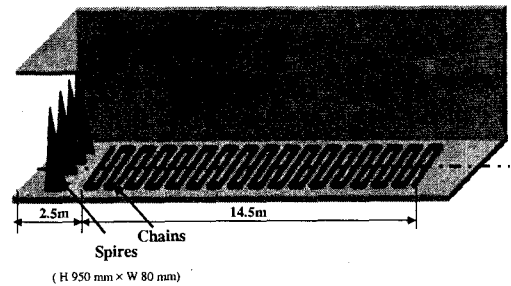


Fig. 1 Schematic of boundary layer generation system

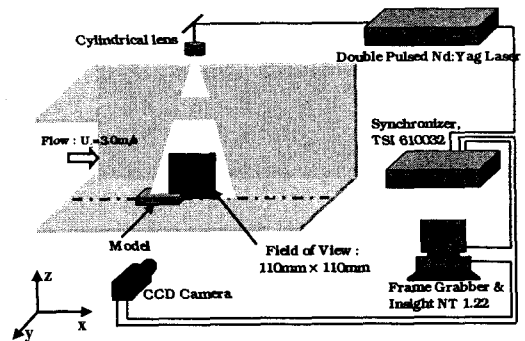


Fig. 2 Schematic of experimental set-up

같이, 풍동을 이용한 실험과 같은 기체의 유동에 적절한 1~2 μm 의 입경을 지니고 있다⁶⁾.

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 압축공기가 6개의 노즐에 균일하게 공급되도록 하였다.

프리즘은 풍동의 입구로부터 18m 하류에 위치시켰고, 레이저광은 풍동의 상측에 설치된 구형 렌즈를 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, 동기화 장치(TSI 610032) 그리고 펜티엄 컴퓨터로 구성되어있다. 레이저빔은 반사경과 구형의 렌즈를 통하여 얇은 평면 광으로 형성되어 시험구간에 조사된다. 화상자료의 획득을 위하여 1K \times 1K의 해상도를 가지는 PIVCAM 10-15 CCD 카메라를 사용하였다. 가장 두꺼운 경계층의 경우 유동장의 정보를 얻기 위하여 28cm \times 28cm의 평면영상을 획득하였으며, 적용된 렌즈는 18-108mm 광각렌즈를 사용하였다. 중간두께의 경계층과 균일유동의 경우 11cm \times 11cm의 평면영상을 획득하였으며, 적용된 렌즈는 80-200mm 망원렌즈를 사용하였다. 유동 정보 획득을 위한 두 화상간의 시간간격은 ABL, 중간두께의 경계층 그리고 얇은 경계층의 경우 각각 200 μs , 150 μs 그리고 150 μs 이다. 획득한 화상은 실험 case당 가장 두꺼운 경계층, 중간두께의 경계층 그리고 얇은 경계층의 경우 각각 2040장(속도장 1020개), 1020장(속도장 510개) 그리고 1020장(속도장 510개)를 획득하여 후처리하였다. 그리고 경계층 영역에 대한 실험이 풍동 바닥면에 대하여 수직방향으로 3개 영역에 걸쳐 화상을 획득하였다.

직사각형 프리즘 주위의 유동장 정보를 얻기 위하여 적용된 렌즈는 80-200mm 망원렌즈를 사용

하여 11cm \times 11cm의 평면영상을 획득하였다. 프리즘 주위의 유동 정보 획득의 경우 두 화상간의 시간간격은 150 μs 이다. 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 사용되었다.

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접근유동

Fig. 3은 풍동의 입구로부터 18m 떨어진 곳에서 측정된 접근유동장의 정보를 표현한 것이다. 국소Reynolds 수(Re_x)는 임계값인 5×10^5 보다 큰 3.36×10^6 이다.

가장 두꺼운 경계층의 경우 경계층 두께($\delta = 650\text{mm}$)에 대한 Reynolds수(Re_δ)는 1.1×10^5 이다. 그리고 배제두께(δ^*)와 운동량 두께(θ)는 각각 117.4mm와 78mm로 측정되었다. 따라서 형상계수(δ^*/θ)는 층류인 경우의 형상계수값 2.59보다 매우 작은 1.50이었다. 이 값은 실험에 적용된 경계층 유동이 난류경계층 영역이라는 것을 의미한다.

중간두께의 경계층의 경우 경계층 두께($\delta = 270\text{mm}$)에 대한 Reynolds수(Re_δ)는 4.32×10^4 이다. 그리고 배제두께(δ^*)와 운동량 두께(θ)는 각각 41.3mm와 30mm로 측정되었다. 따라서 형상계수(δ^*/θ)는 층류인 경우의 형상계수값 2.59보다 매우 작은 1.37이었다. 이 값은 실험에 적용된 경계층 유동이 난류경계층 영역이라는 것을 의미한다.

얇은 두께의 경계층의 경우 경계층 두께($\delta = 36.5\text{mm}$)에 대한 Reynolds수(Re_δ)는 6.7×10^3 이다. 그리고 배제두께(δ^*)와 운동량 두께(θ)는

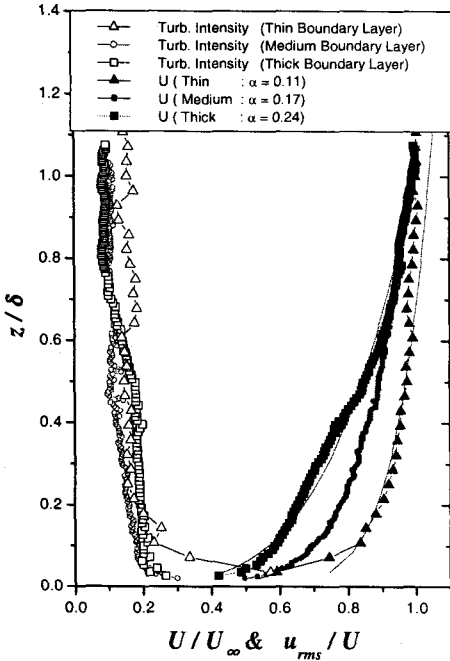


Fig. 3 Approaching boundary layer

각각 7.6mm와 2.46mm로 측정되었다. 따라서 형상계수(δ^*/θ)는 층류인 경우의 형상계수값 2.59보다 큰 3.09로 나타났다. 이 값은 실험 적용된 경계층 유동이 층류경계층 영역이라는 것을 의미한다.

3.2 평균속도분포

접근 유동장의 변화에 따른 저층 건물 모형 주위 유동구조를 확인하기 위한 실험을 PIV 기법을 이용하여 모형의 중심단면에 대하여 수행하였다.

Fig. 4는 접근유동장이 가장 두꺼운 경계층인 경우 중심단면에서 획득한 속도분포를 유선으로 표현한 것이다. 건물 모형의 전면 모서리와 후면 모서리에서 발생하는 유동의 박리가 명백히 확인되었다. 이는 많은 선행연구자들에 의해 지적된 것처럼 유동장에 놓인 물체의 급격한 형상변화는 유동의 박리를 유발한다는 것과 잘 일치된다. 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

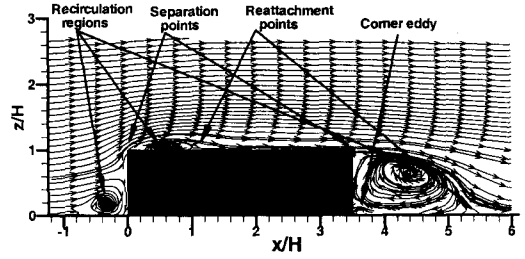


Fig. 4 Streamlines from ensemble averaged velocity field(for thick boundary layer)

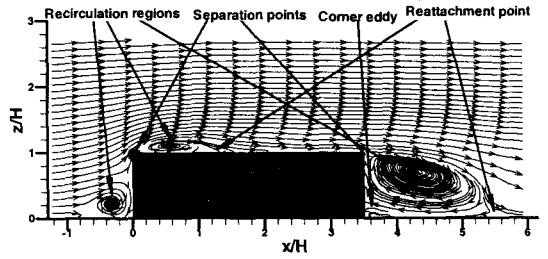


Fig. 5 Streamlines from ensemble averaged velocity field(for medium boundary layer)

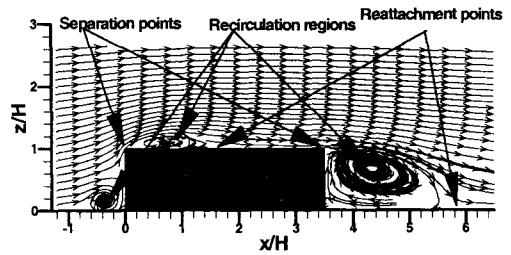


Fig. 6 Streamlines from ensemble averaged velocity field(for thin boundary layer)

끝단으로부터 1.93H 떨어진 지점)에서 각각 발생되었다. 재순환영역의 경우는 건물의 전면부와 지붕표면의 전면부 그리고 후류영역에서 재순환이 발생하는 것이 명백히 확인되었다.

Fig. 5는 접근 유동장이 중간두께의 경계층인 경우 모형의 중심단면에서 획득한 속도분포를 유선으로 표현한 것이다. 유동의 박리와 재순환 영역(모형의 정면, 지붕 표면의 모서리 영역 그리고 후류영역)이 명백히 관찰된다. 평균속도분포의 결과를 통하여 $\partial u / \partial y = 0$ 인 지점을 추적하므로 명백히 확인되어진다. 지붕표면에서의 재부착 위

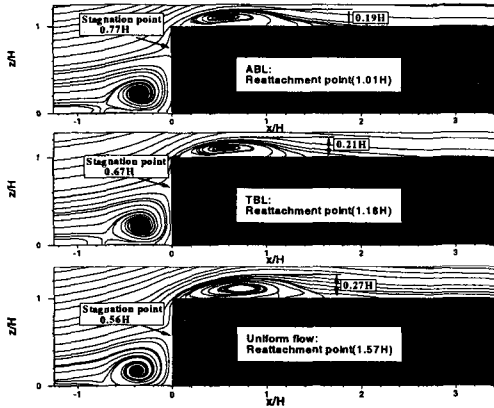


Fig. 7 Comparison of streamlines by approaching boundary layer (windward side)

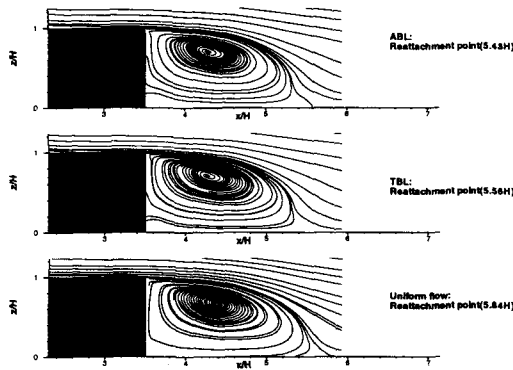


Fig. 8 Comparison of streamlines by approaching boundary layer (leeward side)

치는 약 1.18H 위치에서 발생하였으며, 후류영역에서의 재부착은 5.56H에서 발생되었다.

Fig. 6은 접근유동장이 얇은 두께의 경계층인 경우 중심단면에서 획득한 속도분포를 유선으로 표현한 것이다. 즉 모형이 놓인 유동장 영역은 균일 유동장 영역에 위치한 모형에 대하여 중심단면에서 획득한 속도분포를 유선으로 표현한 것이다. 유동의 박리와 재순환 영역(모형의 정면, 지붕 표면의 모서리 영역 그리고 후류영역)이 명백히 관찰된다. 평균속도분포의 결과를 통하여 $\partial u/\partial y = 0$ 인 지점을 추적하므로 명백히 확인된다. 지붕표면에서의 재부착 위치는 약 1.57H 위치에서 발생하였으며, 후류영역에서의 재부착은 5.84H에서 발생되었다.

Figs. 7,8은 접근 유동장 변화에 따른 유선분포

의 변화를 확인하기 위하여 비교하여 표현한 결과이다. 모형에 접근하는 경계층 두께에 따른 비교를 통하여, H/δ 의 값이 증가할수록 지붕에서의 재순환 영역의 크기는 증가하며(0.19H→0.21H→0.27H), 지붕에서의 재부착 위치는 유동의 하류 방향으로 이동하였다(1.01H→1.18H→1.57H). 그리고 모형의 후류영역에서의 재순환 영역의 크기는 증가하며, 재부착 위치는 하류로 이동하였다(5.43H→5.56H→5.84H).

3.4 난류 운동에너지 분포

난류 운동 에너지는 난류 섭동 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(x 축)의 속도 섭동성분과 수직방향(z 축)의 속도 섭동성분을 측정하였으므로 난류 운동 에너지 분포는 $\bar{q}^2 = 0.75(\bar{u}^2 + \bar{w}^2)$ 에 의해 구한다.

Figs. 9~11은 U_∞^2 로 무차원화된 프리즘 모형 주위의 난류운동에너지 분포를 나타낸 것이다. Fig. 9는 접근 유동장이 가장 두꺼운 경계층인 경우 모형의 중심 단면에서의 난류운동에너지 분포를 표현한 것이다. Fig. 10은 접근 유동장이 중간두께의 경계층인 경우 건물의 중심단면에서 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. 11은 접근 유동장이 얇은 경계층인 경우 건물의 중심단면에서 획득한 난류운동에너지 분포이다. 정면 재순환 영역에서 59%를 나타내고 있다. 피이크치는 건물 지붕의 재순환 영역(0.4H위치)에서 약76%로 피이크치를 나타내고 있다.

4. 결론

다양한 접근경계층에 놓인 직사각형 프리즘 주

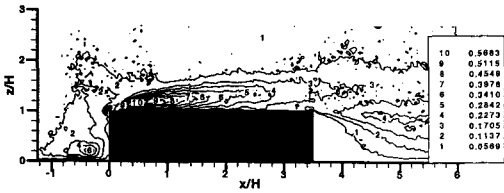


Fig. 9 Turbulent kinetic energy distribution
(For thick boundary layer)

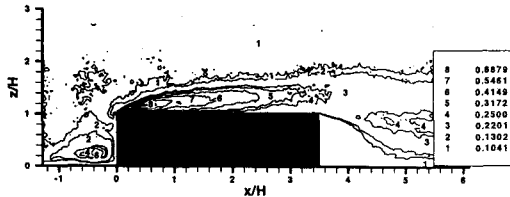


Fig. 10 Turbulent kinetic energy distribution
(For medium boundary layer)

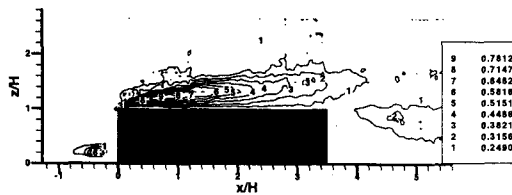


Fig. 11 Turbulent kinetic energy distribution
(For thin boundary layer)

위의 유동구조를 PIV 기법을 이용한 실험을 수행하여 얻어진 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 접근 유동장의 변화에 따른 비교를 통하여, 경계층 두께에 대한 모형의 높이의 비가 증가할수록 중심단면에서 재부착 위치는 하류로 이동하였다. 지붕에서의 재순환 영역의 크기는 증가하였다.

(2) 난류운동에너지는 건물 지붕의 재순환 영역에서 피이크치를 나타내며, 후류영역에 비하여 가장 두꺼운 경계층, 중간두께의 경계층 그리고 얇은 경계층에 있어서 각각 2.5배, 2.7배 그리고 2.3배 높은 값을 지니고 있다.

(3) 다양한 유동장에 놓인 프리즘 주위의 난류운동에너지의 피이크치는 가장 두꺼운 경계층의 경우에 비하여 얇은 경계층의 경우 약 1.3배, 중간두께의 경계층인 경우 약 1.2배 높은 값을 나

타낸다. 즉 경계층 두께에 대한 모형의 비가 평균 난류 특성치의 변화에 가장 중요한 인자로 작용하였다.

(4) 본 연구에서 수행된 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) 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.

(5) 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, pp455~461

(6) Poitras G., Brizzi L. E., Pecheux J. and Gagnon Y., " The study of fluid flows in the immediate vicinity of building models," *9th Int. Symp. on Flow Visualization(2000)*, 246-1~246-10.

(7) 김경천, 김상기, 윤상열, 2000, " 횡단류 제트의 유동 및 난류특성치에 대한 PIV 측정, " 대한기계학회논문집 B권, 제24권, 제3호, pp. 382~389.

(8) Melling A., 1997, " Tracer particles and seeding for particle image velocimetry, " *Meas. Sci. & Technol.* Vol. 8, pp 1406~1416.