

난류 경계층에 잠긴 수직벽 주위 유동의 2차원성 연구

차재은* · 김형우* · 김형범†

Experimental Investigation of Two-dimensionality of Flow around the Vertical Fence Submerged in a Turbulent Boundary Layer

Jae-Eun Cha, Hyoung-Woo Kim and Hyoung-Bum Kim

Abstract. An experimental investigation of the flow around a vertical fence was carried out using a PIV velocity field measurement technique. The vertical fence was embedded in a turbulent boundary layer. The instantaneous velocity fields measured at cross-sectional planes reveal complex longitudinal vortices that vary in size and strength, developing from the upstream location. In the instantaneous vorticity and velocity field data, the shear flow separated from the fence top is highly turbulent and shows unsteady flow characteristics. The topography of the ensemble averaged velocity fields, especially the separation bubble formed behind the fence, shows that the spatial distributions of streamwise velocity (U) and vertical (V) are symmetric, the spanwise velocity (W) is skew-symmetric with respect to the central xy -plane ($z=0$).

Key Words: Vertical fence wake(수직벽 후류), Two dimensionality(이차원성), PIV(입자화상속도계)

기호설명

ν : 작동유체의 동점도 계수

H : 수직벽의 높이

U_0 : 자유흐름속도

U : 흐름방향 속도

V : 수직방향 속도

W : 횡방향 속도

Re_d : 자유흐름속도와 운동량두께로 계산된

Reynolds 수($= d \times U_0 / \nu$)

1. 서 론

표면부착물 주위를 흐르는 박리전단유동은 실질적인 중요성에 의해 많은 연구가 진행되고 있다. 기존의 연구로부터 부착물 주위의 박리 유동은 부착물체의 기

하학적 형상(높이(h), 길이(l), 두께(w)), 자유흐름속도(U_0), 경계층 두께(δ), 난류강도 등과 같은 여러 가지 변수에 의해 결정된다고 알려졌다^(1,2).

대부분의 박리전단유동 연구는 시간평균 혹은 앙상블 평균된 재부착길이의 변화에 집중되어 왔다. 그러나 표면 부착물 주위에 존재하는 박리전단유동은 비정상 유동으로 이로 인한 흐름에 의한 진동현상(flow-induced vibration)이나 음향소음(acoustic noise)등을 이해하기 위해서는 평균 유동특성이 아닌 박리전단유동의 비정상 유동특성을 이해하는 것이 중요하다.

표면부착물 주위 유동의 대표적인 경우인 수직벽(vertical fence) 유동은 다른 대표적인 후향계단유동(backward-facing step flow)과 비교하여 수직벽 전후로 각각 다른 특성을 가지는 두 가지 박리유동이 존재한다. 수직벽 전방에서 부압구배(adverse pressure gradient)에 기인해 나타나는 전방 박리유동과 수직벽 끝단에서의 기하학적인 형상에 의해 나타나는 후방 박리유동이 그 것이다.

이와 같은 특징으로 수직벽 앞의 전방박리유동이 끝단에서 박리되는 후방박리유동에 영향을 주게 된다.

†경상대학교 항공기부품기술연구소
E-mail : kimhb@gnu.ac.kr

*한국원자력연구원 고속로 기술개발부

**경상대학교 기계항공공학부, 원

이는 후향계단유동에 비해 수직벽유동의 해석 및 연구가 상대적으로 적게 이루어진 하나의 원인이 되었다. 수직벽의 첨단부(tip)에서 발생하는 후방 박리유동(separation bubble)은 앞에서 언급된 다양한 변수들에 의해서 그 길이가 약 9H~15H사이의 다양한 범위로 존재한다. 이러한 수직벽 주위의 유동은 항력의 감소나 혼합(mixing) 등에 영향을 주고, 최근에는 Aero-optics 문제를 해결하기 위해서도 많은 연구가 진행되고 있다.

수직벽 주위 유동의 경우, 두 가지의 대표적인 비정상 유동특성이 나타난다고 보고되었다. 첫 번째는 수직벽의 첨단부에서 발생하는 전단박리유동내에서 주기적인 와류출 현상이다. Trout 등⁽³⁾은 이 와류출 현상이 수직벽 직후의 박리점 부근을 제외한 하류영역에서 plain mixing layer와 특징이 유사함을 밝혔다.

두 번째로 대표적인 비정상 유동현상은 flapping현상으로 이는 수직벽 후방에서 발생하는 박리유동이 매우 느린 주파수로 크게 요동치는 현상을 의미한다. Flapping현상의 원인은 아직까지 명확하게 밝혀지지 않았다^(4,5).

Martinuzzi와 Tropea⁽⁶⁾는 수직벽 전방에서의 유동가시화를 통해 수직벽 전방에서 saddle 과 nodal 점이 주기적으로 나타나는 cellular구조가 존재함을 보여주었다. Kim과 Lee⁽⁷⁾는 PIV를 이용한 수직벽 전방 유동의 순간속도장 측정을 통해 수직벽 전방에서 복잡한 3차원 유동구조가 존재함을 밝혔다.

수직벽 유동에 관한 기존의 실험 및 해석 연구는 대부분 수직벽 중앙 단면에서만 이루어졌고, 수직벽 횡방향으로의 유동구조에 대한 연구는 거의 보고되지 않았다. 이는 대부분의 연구들이 수직벽 중앙에서의 2차원성(two dimensionality)을 가정하여 이루어졌기 때문이다. De Brederode의 연구⁽⁸⁾에 의하면 수직벽의 횡방향길이와 높이와의 비인 종횡비가 10에서 수직벽 전방 유동의 2차원성을 보장할 수 있다고 발표하였다. Martinuzzi와 Tropea⁽⁶⁾는 W/H>10에서 전방 박리유동의 벽면가시화를 통해 박리선의 2차원성을 가시화에서 확인하였다. 그러나 벽면가시화는 시간평균화된 결과를 나타내 유동의 비정상 특성을 알기 어렵다. Ruderich와 Fernholz⁽⁹⁾는 수직벽의 후방유동에서는 종횡비 10에서도 유동의 3차원성이 나타남을 보여주었다.

일반적인 표면부착물 주위 유동의 실험적 연구에서

유동의 2차원성은 크게 두 가지 경우로 분류할 수 있다. 첫 번째는 한 축으로의 유동 특성값의 크기가 다른 두 방향으로의 유동 특성값의 크기보다 아주 작아서 무시할 수 있거나, 두 번째로는 하나의 축을 중심으로 좌우대칭이 될 때, 유동의 2차원성이라고 표현한다.

본 연구에서는 PIV기법을 이용하여 수직벽 주위 유동장의 xy-, xz- 그리고 yz-단면에서의 순간속도장 측정을 통해 비정상 유동장을 관찰하였다. 또한 순간속도장 결과를 앙상블 평균하여 평균 유동 특성을 계산하였다. 이 결과를 이용하여 수직벽 주위 유동의 2차원성 가정의 유효성을 연구하고, 또한 수직벽 전방에서 발생하는 와동에 대한 정량적인 측정연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험은 측정구간의 크기가 150^w×150^h×1800^lmm인 풍동에서 이루어졌다. 높이(H)가 9 mm인 수직벽은 입구에서 하류로 1500 mm되는 위치에 설치되었다. 수직벽을 난류경계층에 잠기게 하기 위해 측정구간의 입구에 tripping wire를 설치하였다. 이렇게 해서 만들어진 난류경계층의 수직벽 위치에서의 경계층 두께는 4.3 H로 운동량두께와 자유흐름속도(U₀=7 m/s)를 기준으로 한 Reynolds수는 1200이다.

Figure 1에 모델 및 실험장치의 개략도를 나타냈다.

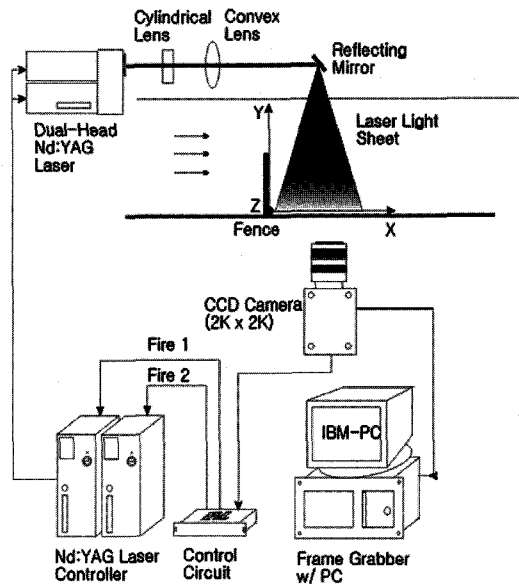


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set-up.

수직벽의 형상비(두께와 높이와의 비)는 0.05이고 종횡비(길이와 높이와의 비)는 16이다. 이는 기존의 연구에서 제안된 전방유동에서의 유동의 2차원성을 확보할 수 있는 10보다 큰 값이다.

본 실험에서는 xz -, xy -와 yz -평면상에서의 순간속도장을 PIV기법을 이용하여 측정하였다. 사용된 추적입자는 평균 직경이 $2\ \mu\text{m}$ 인 올리브기름을 사용하였다. Nd:YAG 레이저와 동기된 $2\text{ k} \times 2\text{ k}$ CCD카메라를 이용하여 입자화상을 획득하였다. 측정 평면에 따라 400장(yz -평면)에서 2000장의(xy -, xz -평면)의 입자화상을 획득하였고 이로부터 각각 200장과 1000장의 순간속도장을 획득하였다. 순간속도장을 앙상블 평균하여 평균속도등을 계산하였다.

사용된 DPIV기법은 FFT-based DPIV에 조사구간 이동기법⁽¹⁰⁾을 적용하여 최종 조사구간의 크기는 40×40 pixel에 50% 겹침비를 사용하였다. 측정단면의 면적이 약 $6 \times 6\ \text{cm}^2$ 으로, PIV결과로 구해진 속도벡터의 공간해상도는 $1.2 \times 1.2\ \text{mm}$ 이다.

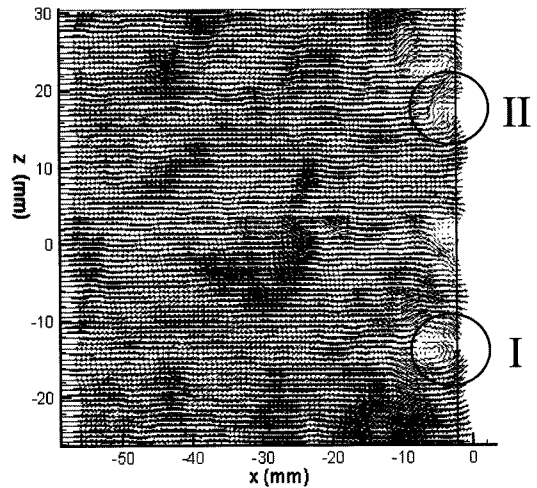
3. 실험결과

3.1 수직벽 전방 유동구조

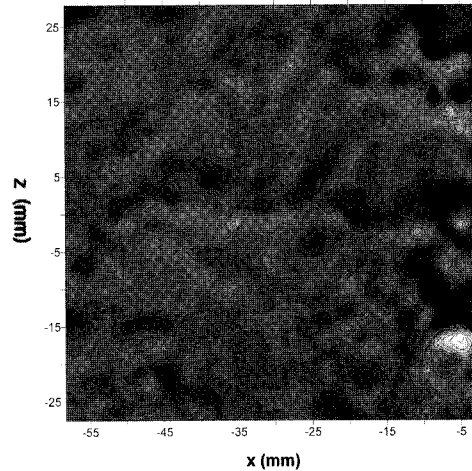
기존의 연구⁽⁶⁾에서 수직벽 전방에 3차원 celluer구조가 존재한다고 보고되었으나, 이는 정성적인 가시화 연구로 정량적인 측정 연구는 이루어지지 않았다. Figure 2는 바닥에서 $0.7H$ 높이에서의 xz 단면 순간속도장, 와도(vorticity)와 와동(vortex core) 컨투어 그래프를 보여준다. 와동이 전단유동내에 잠겨 있을 경우, 와도로부터 와동의 위치를 정확히 알 수 없게 된다. 본 연구에서는 Chong등⁽¹¹⁾이 제안한 방법을 사용하여 와동 중심의 위치를 표시하였다.

Fig. 2(a)의 순간속도장은 평균속도장 결과에 의하면 수직벽면에 위치해야 하는 정체점(stagnation point)이 상류로 이동하여 위치함을 보여준다. 이는 기존 가시화 연구⁽⁶⁾에서 보여준 주기적인 nodal 및 saddle점의 존재가 정량적인 속도장 측정에서도 나타났음을 의미한다.

그러나 기존의 가시화 연구에서는 시간평균화된 벽면가시화 기법을 사용하여 nodal 및 saddle점의 배치가 정적으로 나타났지만 본 연구에서는 200장의 순간속도장을 분석한 결과 벽면을 따라 무작위로 nodal 및 saddle점이 이동함을 확인하였다.



(a) Instantaneous velocity field



(b) Instantaneous vorticity and vortex core

Fig. 2. Instantaneous velocity, vorticity and vortex core location in front of fence (xz -plane ($y/H=0.7$)).

Stuer등⁽¹²⁾은 전향계단유동(forward-facing step)연구에서 벽면을 따라 두 종류의 와동이 발생한다고 발표하였다. 벽면에 부딪힌 전방유동이 벽면을 타고 좌우로 흐르면서 마주 오는 유동과 운동량의 크기가 비슷한 경우, Martinuzzi와 Tropea⁽⁶⁾이 가시화한 수직벽 유동과 유사하게 두 개의 반대로 회전하는 와동이 나타나지만, 만일 마주 흐르는 유동의 운동량의 크기차이가 클 경우, 말굽 모양의 두 개의 와동이 생기는 대신, 나선상으로 회전하는 하나의 유동이 생긴다고 보고하였다.

본 수직벽 연구에서는 Stuer등⁽¹²⁾이 발견한 전향계단 유동의 와동 설명이 Martinuzzi와 Tropea⁽⁶⁾의 수직벽

전방 와동가시화보다 더 정확하게 수직벽 전방에서 발생하는 와동을 설명함을 확인하였다.

Figure 2의 순간속도장 결과에서 I로 표시된 영역에서는 두 개의 반대 방향으로 회전하는 와동의 존재를 확인할 수 있다. 반면 II로 표시된 영역에서는 하나의 와동을 확인하였다. 200장의 순간속도장으로부터 본 연구자들은 두 개의 반대방향으로 회전하는 와동보다 하나의 와동만이 존재하는 경우가 더 많음을 확인하였고 이는 일반적으로 벽면을 따라 흐르는 유동의 운동량의 차이가 크음을 의미한다. 순간속도장 결과로부터 전방에 발생하는 와동의 위치는 무작위로 이동하지만 와동간의 상대적인 위치는 약 1.6H의 간격을 유지하는 것을 알 수 있었다.

Figure 3은 수직벽 전방유동에서의 2차원성을 확인하기 위해 $y/H = 0.7$ 높이에서 xz 평면상의 평균속도장 결과로부터 구한 횡방향 속도성분의 변화를 보여준다. 그림은 $x/H = -3.5, -2, -1$ 위치에서 횡방향 속도(w)의 차이 $(W_{z0} - W_z) / W_{z0}$ 이다. W_{z0} 는 $z/H = 0, y/H = 0.7$ 위치에서의 횡방향속도이다.

Figure 3의 결과는 전방유동이 수직벽으로 다가오며 따라 처음에는 횡방향으로의 크기차이가 없고, 흐름방향 속도성분과 비교하여 크기도 작은 즉, 앞에서 기술한 유동의 2차원 유동의 첫 번째 정의에 따르면, 유체가 수직벽 근처로 이동함에 따라, 수직벽의 중양을 기준으로 교대칭(skew symmetry)이 되는 유동 형태로 바뀌게 된다. 비교를 위한 흐름방향 평균속도의 경우, $x/$

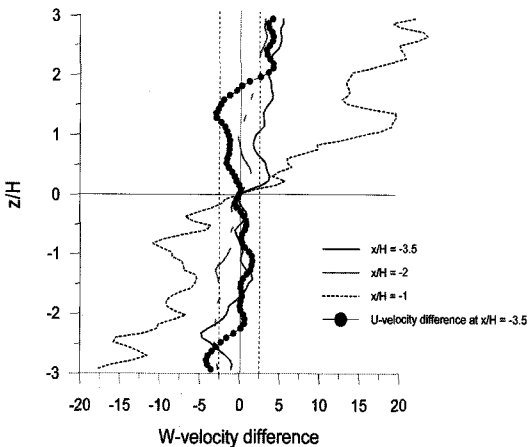


Fig. 3. W-velocity difference $((W_{z0} - W_z) / W_{z0})$ variations along the spanwise direction at $x/H = -3.5, -2$ and -1 (xz -plane ($y/H = 0.7$)).

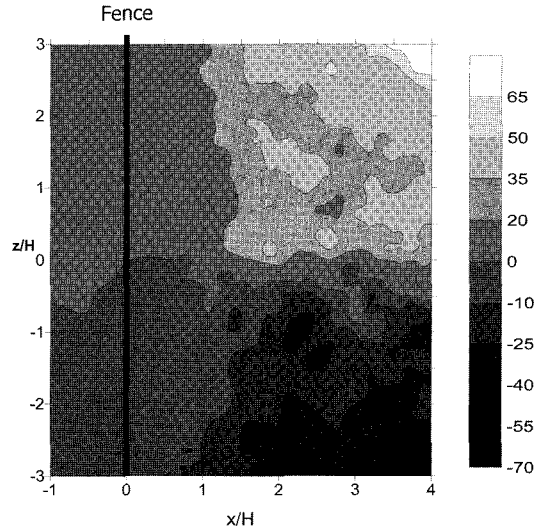


Fig. 4. Mean lateral velocity(w) contour plot in the xz -plane ($y/H = 1.4$).

$H = -3.5$ 에서 $z/H = -2 \sim 2$ 구간에서 속도차이는 2.5% 이내가 된다. 이 결과로부터 수직벽 전방유동의 경우, 흐름 방향 속도성분의 경우, 수직벽 중심을 기준으로 좌우로 값차이가 없는 2차원 성을 가지나, 횡방향 속도성분의 경우, 수직벽으로 가까이 갈수록 속도의 크기가 증가하면서 중심을 기준으로 교대칭의 2차원성을 가짐을 알 수 있다. 또한, 흐름방향 속도보다 크기가 작아 2차원 유동으로 간주할 수 있는 구간은 수직벽 중심을 기준으로 약 1H 정도의 매우 작은 구간임을 알 수 있다. 이는 수직벽 전방 가까이에서는 수직벽 중심을 지나면서 횡방향 속도성분이 증가함을 의미한다.

Figure 4는 $y/H = 1.4$ 에서 횡방향 속도성분(w)의 분포를 보여준다. 그림으로부터 수직벽을 지나 하류로 유동이 흐를수록 횡방향 속도성분의 교대칭이 뚜렷이 나타나면서 또한 속도도 같이 증가하는 것을 보여준다.

3.2 수직벽 후방 유동구조

1000장의 xy 단면 속도장을 앙상블 평균하여 재부착 지점의 길이를 구하였다. 본 연구에 사용된 수직벽의 경우, 뒤로 약 11.2H의 재순환 영역이 존재한다. 재순환 영역내의 최대 역방향 속도는 자유흐름속도의 22%로 나타났다.

Scarano등⁽¹³⁾은 박리 유선의 히스토그램을 가지고 후향계단유동에서의 flapping현상을 설명하였다. Figure 5는 수직벽 후방에 발생하는 전단박리유동에서

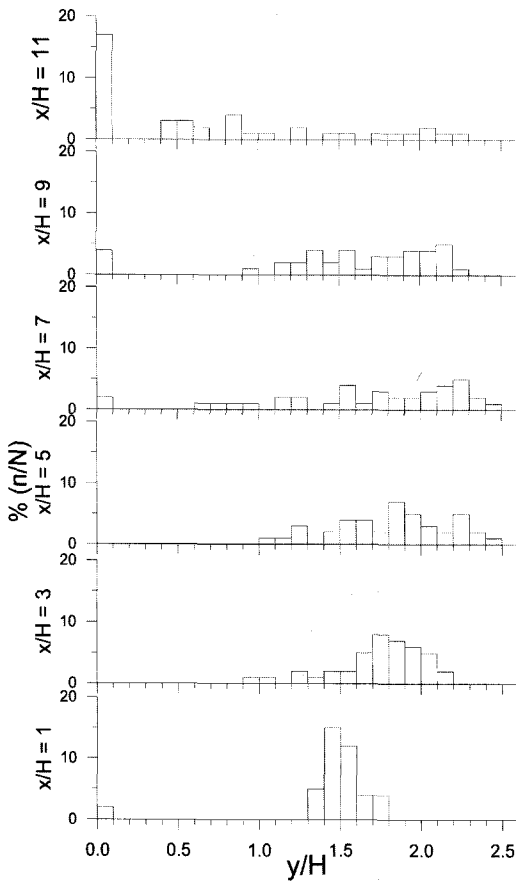


Fig. 5. Histogram of the location of the separation streamline.

박리유선의 히스토그램이다. 그래프로부터 수직벽 직후에서는 박리유선의 일정영역에 집중되어 있음을 알 수 있다. 또한 아래쪽에 박리유선의 히스토그램값이 존재하는 이유는 수직벽 직후에서의 secondary 박리기포의 존재를 나타낸다. 히스토그램의 분포는 유체가 하류로 흐를 때 따라 분산정도가 커지게 된다. 이 결과는 Scarano 등⁽¹³⁾이 보여준 후향계단유동 결과와 일치한다. 다른 점은 후향계단유동과 달리 수직벽 후류유동은 수직벽 끝단에서 박리될 때 위로 상승하는 속도 성분을 갖는다. 이로 인해 전단박리유동은 전체적으로 convex형상을 갖게 된다. 후향계단유동의 경우는 이러한 상승유동이 없기 때문에 하류로 나아가며 전단유동이 처음부터 벽면쪽으로 이동하게 된다. 흐름방향 유동의 xz 평면에서의 분포를 관찰하기 위해 $y/H=0.7$ 과 $y/H=1.4$ 위치에서의 양상불 평균한 속도장을 Fig. 6에

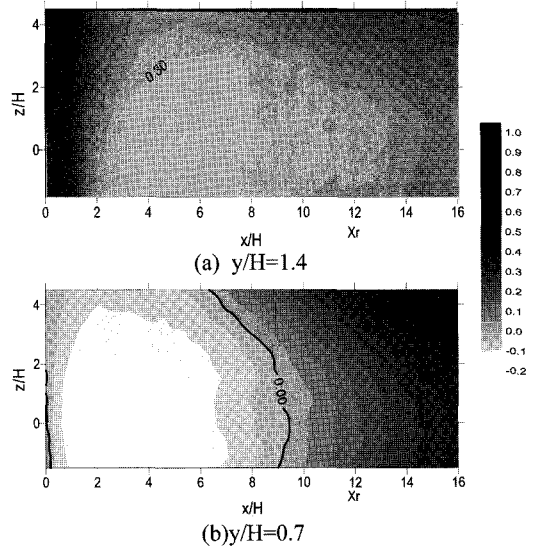


Fig. 6. Mean streamwise velocity contours at two xz -planes.

나타내었다. $y/H=0.7$ 과 $y/H=1.4$ 에서 각각 $x/H < 1$, $x/H < 3$ 구간에서는 흐름방향 속도의 횡방향으로의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 이 구간을 지나 유체가 하류로 흐르면서 전체적인 유동장은 수직벽의 중심을 중심으로 대칭되게 존재하는 것을 알 수 있다. 흐름방향 평균속도장 결과로부터 수직벽 후방에 생기는 박리기포의 경우, 횡방향보다 흐름방향 속도구배가 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 DPIV기법을 이용하여 수직벽 주위유동의 2차원성과 전방유동에 대해 연구를 수행하였다. 결과로부터 수직벽 전방에서는 벽면을 따라 흐르는 유체에 의해 두 개의 반대 방향으로 회전하는 와동이나 혹은 하나의 나선형 유동이 발생함을 알 수 있었다. 발생하는 와동은 벽면을 따라 무작위로 이동하지만 와동사이의 간격은 약 $1.6H$ 의 일정한 값을 갖는다. 유동의 2차원성은 횡방향 속도의 경우, $x/H > 1$ 구간에서부터 좌우로 퍼지면서 수직벽 중심을 기준으로 교대칭되는 것을 알 수 있었다. 흐름방향 속도성분의 경우, $y/H=1.4H$ 높이에서는 수직벽 후방 $x/H < 3$ 이하의 구간에서는 횡방향 구배가 없이 일정한 값을 가지나, 하류로 나아가감에 따라 중심선을 따라 대칭되는 분포를 갖는다.

후 기

본 연구는 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업 (2009-0094016)과 나노구조 생체에너지 융합연구단(2009-0082813)의 지원으로 수행되었고 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Chandrsuda, C. and Bradshaw, P., 1981, "Turbulence structure of a reattaching mixing layer", *J. Fluid Mech.*, Vol. 110, pp.171~194.
- 2) Heenan, A. F. and Morrison, J. F., 1998, "Passive control of pressure fluctuations generated by separated flow", *AIAA J.*, Vol. 36, pp.1014~1022.
- 3) Trout, T. R., Scheelke, B. and Norman, T. R., 1994, "Organized structures in a reattaching separated flow field", *J. Fluid Mech.*, Vol. 143, pp.413~427.
- 4) Kiya, M. and Sasaki, K., 1985, "Structure of large-scale vortices and unsteady reverse flow in the reattaching zone of a turbulent separation bubble", *J. Fluid Mech.*, Vol. 154, pp.463~491.
- 5) Castro, I. P. and Haque, A., 1987, "The structure of turbulent shear layer bounding a separation region", *J. Fluid Mech.*, Vol. 179, pp.439~468.
- 6) Martinuzzi, R. and Tropea, C., 1993, "The flow around surface-mounted prismatic obstacles placed in a fully developed channel flow", *J. Fluid Eng.*, Vol. 115, pp.85~91.
- 7) Kim, H. B. and Lee, S. J., 2002, "Time-resolved velocity field measurements of separated flow in front of a vertical fence", *Exp. Fluids*, Vol.31, pp.249~257.
- 8) De Brederode, V. A. S. L., 1975, "Three-dimensional flow in nominally two-dimensional separation flow", Ph.D thesis, Imperial College, London University.
- 9) Ruderich, R. and Fernholz, H. H., 1986, "An experimental investigation of a turbulent shear flow with separation, reverse flow and reattachment", *J. Fluid Mech.*, Vol. 163, pp.283~322.
- 10) Westerweel, J., Dabiri, D. and Gharib, M., 1997, "The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings", *Exp. Fluids*, Vol. 23, pp.20~28.
- 11) Chong, M. S., Perry, A. E. and Cantwell, B. J., 1990, "A general classification of three-dimensional flow fields", *Phys. Fluids*, A 2, pp.765~777.
- 12) Stuer, H., Gyr, A. and Kinzelbach, W., 1998, "3-D PTV applied to laminar separation on a forward facing step", Proc. 8th Int. Symp. on Flow Visualization, Sorrento, Italy.
- 13) Scarano, F., Benocci, C. and Riethmuller, M. L., 1999, "Pattern recognition analysis of the turbulent flow past a backward facing step", *Phys. Fluids*, Vol.11, pp.3808~3818.