

## 와류 생성기를 이용한 수직벽 후류 제어의 실험적 연구

이상혁\* · 강인수\*\* · 차재은\* · 김형범†

### Experimental Study of Manipulating the Vertical Fence Wake using the Vortex Generator

Sang-Hyuk Lee, In-Su Kang, Jae-Eun Cha and Hyoung-Bum Kim

**Abstract.** The effect of vortex generators to manipulate the separated flow region behind the vertical fence was experimentally investigated. The experiments were performed in the circulating water channel. The parameters used in this study were the distance between the fence and vortex generators and size of vortex generators. Digital PIV method was applied to measure the instantaneous velocity fields around the fence. And the obtained flow properties were compared with those of fence flow without the vortex generators. The obtained results quantitatively shows the specific size and distance of vortex generators which were effective to reduce the mean reattachment length of separation bubble behind the fence.

**Key Words:** Vertical fence wake(수직벽 후류), Separation bubble(박리 기포), Vortex generator(와류 생성기), Passive control(수동제어)

#### 기호설명

- $\nu$  : 작동유체의 동점도 계수
- $\lambda$  : Vortex generator 사이의 간격
- H : 수직벽의 높이
- h : Vortex generator의 높이
- $X_v$  : 수직벽과 vortex generator와의 거리
- $X_r$  : 재부착지점 길이
- $U_0$  : 자유흐름속도
- $Re_H$  : 자유흐름속도와 수직벽 높이로부터 계산된 Reynolds 수(= $H \times U_0 / \nu$ )

#### 1. 서 론

표면부착물 주위를 흐르는 유동은 실질적인 중요성에 의해 많은 연구가 진행되고 있다. 기존의 연구로부

터 부착물 주위의 박리 유동은 부착물체의 기하학적 형상(높이(H), 길이(L), 두께(W)), 자유흐름속도( $U_0$ ), 경계층 두께( $\delta$ ), 난류강도 등과 같은 여러 가지 변수에 의해 결정된다고 알려졌다<sup>(1,2)</sup>.

이러한 유동의 대표적인 경우인 수직벽(vertical fence) 유동은 수직벽 전후로 각각 다른 특성을 가지는 두 가지 박리유동이 존재한다. 수직벽 전방에서 역압력구배(adverse pressure gradient)에 기인해 나타나는 전방 박리유동과 수직벽 끝단에서의 기하학적인 형상에 의해 나타나는 후방 박리유동이 그 것이다. 수직벽의 첨단부(tip)에서 발생하는 후방 박리유동(separation bubble)은 앞에서 언급된 다양한 변수들에 의해서 그 길이가 다양한 범위로 존재한다. 이러한 수직벽 주위의 유동은 항력의 감소나 혼합(mixing), 그리고 최근에는 공기광학(aero-optics)과 관련되어 많은 연구가 진행되고 있다.

유동제어를 위한 방법은 크게 외부 에너지의 공급 없이 표면부착물의 기하학적 형상의 변화나 유동조건 변화의 변화를 이용한 수동 제어(passive control)방법과 외부에서 에너지를 공급하여 유동구조를 바꾸는 능동 제어(active control)방법으로 구분된다<sup>(3,4)</sup>. 본 연구에서

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

\*한국원자력연구원 고속로 기술개발부

\*\*경상대학교 기계항공공학부원

는 수직벽 전방에 설치한 와류 생성기(vortex generator)를 이용한 수동 제어로 수직벽 후류에서 생기는 박리기포(separation bubble)의 감소연구를 수행하였다.

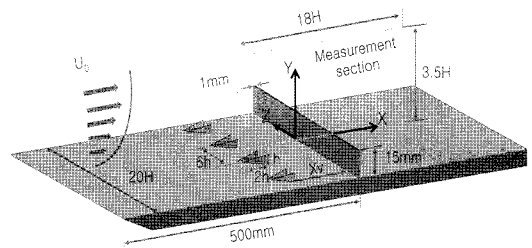
이전부터 와류 생성기는 공력특성의 향상, 열전달 촉진 등을 목적으로 많은 연구가 수행되었다. 일반적인 와류 생성기의 역할은 상부의 운동량이 큰 유체의 경계층 내부로의 혼입을 촉진하는 것이다. 그 동안 와류 생성기의 형상과 크기 등에 대한 많은 최적화 연구가 이루어졌다. Godard와 Stanislas<sup>(5)</sup>는 날개에서의 경계층 제어를 위해 와류 생성기의 크기, 형상, 배열 등의 다양한 최적화 연구를 수행하였다. 그들은 와류 생성기에 의해 변화된 압력분포와 속도 프로파일을 측정하여 전단력을 비교하고 와류 생성기의 효율을 조사하였다.

최와 김<sup>(6)</sup>은 능동제어방법으로 맥동제트를 이용하여 수직벽 전방에 와류를 생성하고, 생성된 와류에 의해 유체가 박리기포 내부로 유입됨에 따라 후방 박리기포의 크기 변화가 생기는 결과를 보였다. 결과로부터 맥동제트의 주파수와 속도, 노즐과 수직벽과의 거리의 최적화를 통하여 최대 35%의 재부착길이 감소효과를 확인하였다.

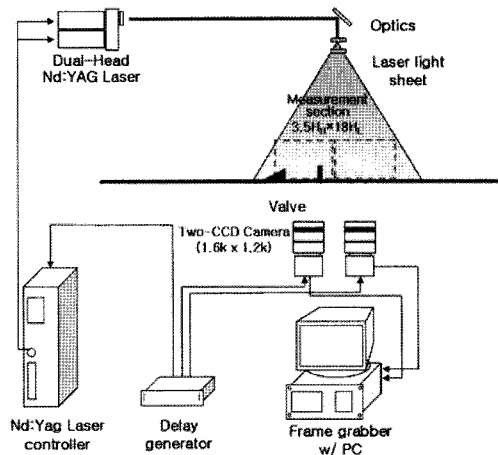
본 연구는 기존 연구<sup>(5,6)</sup>를 바탕으로 수직벽 전방에 와류 생성기를 설치하고, 생성된 와동에 의해 변화된 수직벽 주위 박리유동을 실험적으로 관찰하였다. 여기서, 자유흐름 속도, 와류 생성기의 크기, 그리고 수직벽간의 거리를 변화시켜 가며 박리기포의 크기 변화를 관찰하였고, 그 결과를 제어하지 않은 수직벽 유동과 비교하여 수직벽 후방 박리기포를 최소화하기 위한 최적 값을 찾았다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험은 회류수조에서 자유흐름속도와 수직벽 높이를 기준으로 한 레이놀즈수( $Re_{\eta}$ )를 2000에서 6000까지 변화시키며 수행되었다. 시험부의 크기는  $300^W \times 250^H \times 1300^L$ (mm)이다. 평판에 설치되어진 수직벽은 실험영역 입구로부터 500 mm 하류에 위치하였다. 자유흐름속도는 0.13 m/s에서 0.4 m/s로 바꾸어 가며 실험을 수행하였다. 자유흐름속도와 수직벽의 높이에 의해 계산된 Reynolds 수는 2000~6000이다. 경계층의 높이는 Reynolds 수 변화에 따라  $\delta/H=0.57\sim 0.44$ 로 수직벽 높



(a) Geometries of experimental model and coordinate system

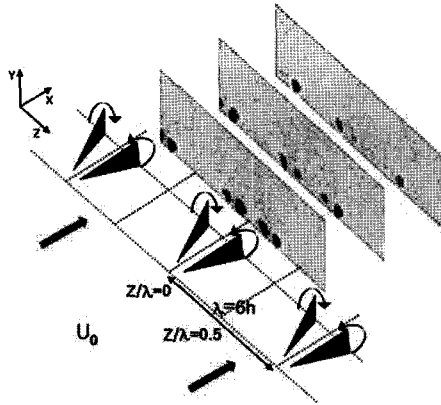


(b) Schematics of experimental apparatus

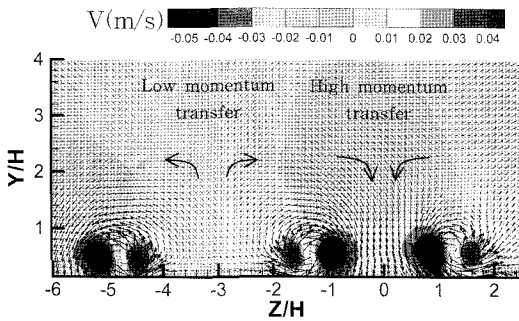
Fig. 1. Schematic diagrams of experimental model and apparatus

이보다 낮다. 실험에 사용한 수직벽의 높이(H)는 15 mm이고 폭은 20H, 두께는 1 mm이다. 설치된 와류 생성기는 직각 삼각형 날개(delta wing)의 형상을 하고 있으며 높이는  $h/H=0.54$ , 1의 두 가지를 사용하였다. 와류 생성기는 자유흐름 방향과  $18^\circ$ 의 각을 이루며, 와류 생성기 높이의 6배( $\lambda/h=6$ ) 간격으로 counter-rotating 방식으로 배열되게 설치되었다. 이는 기존의 연구 결과를 참고하여 결정하였다<sup>(5)</sup>.

Fig. 1(a)에 실험에 사용한 모델과 좌표축을 나타냈고, Fig. 1(b)에 PIV 시스템을 포함한 전체적인 실험장치의 구성도를 나타내었다. 속도측정은 수직벽의 전방-5H부터 수직벽 후방 13H 길이에 3.5H의 높이를 갖는 구간에서 두 대의 CCD카메라를 사용하여 이루어졌다. 각 경우마다 400장의 순간 속도장을 획득하고, 그 결과를 앙상블 평균하여 평균재부착지점을 구하였다. 이 결과



(a) Configuration of vortex generator



(b)  $h/H=1, X_v/H=5, Re_H=6000$  (Y-Z plane)

Fig. 2. Mean velocity fields (Y-Z Plane)

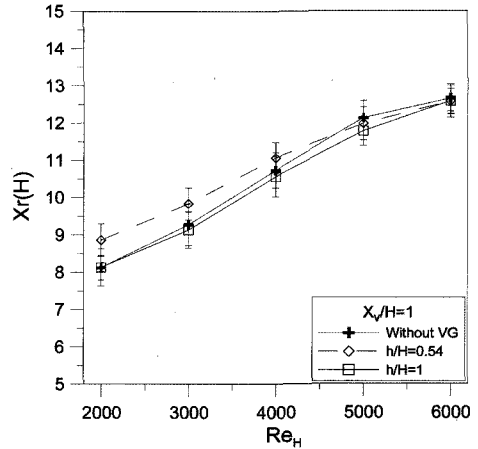
를 와류 생성기가 없는 수직벽 후류와 비교하였다.

### 3. 실험결과

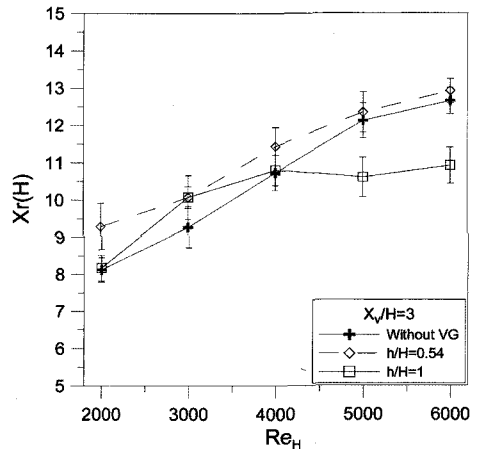
본 연구에서는 수직벽 전방에 설치한 와류 생성기를 이용하여 수직벽 후방 박리기포의 크기 감소를 위한 연구를 수행하였다. 제어하지 않은 수직벽 유동과 와류 생성기에 의해 변화된 수직벽 유동 모두 400장의 순간속도장을 앙상블 평균하여 속도장을 계산하였고, 평균재부착지점 길이 비교를 통해 각 경우의 제어효과를 측정하였다.

우선, 와류 생성기에 의해 발생하는 흐름방향 와동 (streamwise vortex)을 측정하기 위하여 와류 생성기 후방에서의 흐름방향 와동을 측정하였다.

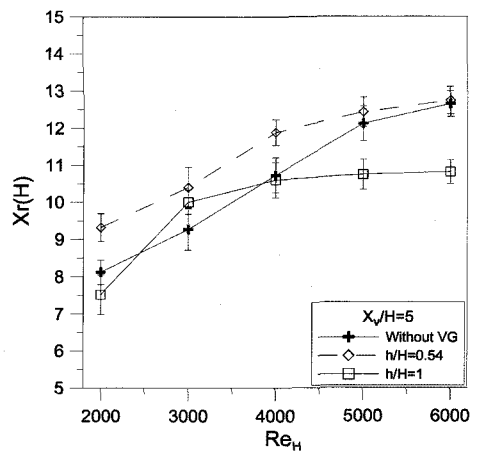
Fig. 2에 본 연구에 사용되어진 와류 생성기의 기하학적 형상 및 좌표계와 Y-Z 평면에서의 속도장 결과를 나타내었다. Fig. 2(a)와 같이 배치된 와류 생성기는 Z/



(a)  $X_v/H=1$



(b)  $X_v/H=3$



(c)  $X_v/H=5$

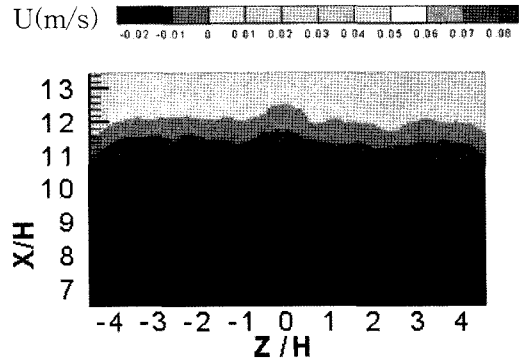
Fig. 3. Reattachment length comparison according to the distance between vortex generator and fence

$\lambda = 0$ 의 위치에서는 상부의 큰 운동량의 유체를 아래로 전달하고,  $Z/\lambda = 0.5$ 의 위치에서는 낮은 운동량의 유체가 상부로 이동하게 된다. Fig. 2(b)는 Reynolds 수가 6000일 때, 크기가 1H인 와류 생성기의 하류 5H 위치에서의 Y-Z 평면상의 평균속도장 결과이다. 결과로부터 서로 반대방향으로 회전하는 흐름방향 와동에 의해 상하로의 유동이 존재함을 알 수 있다.

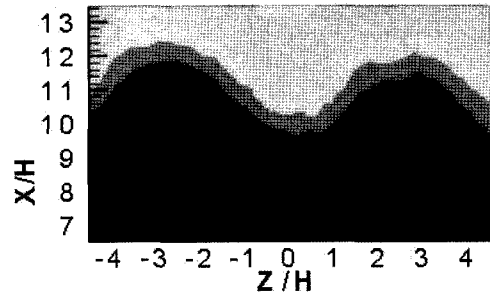
Fig. 3은 와류 생성기의 크기와 위치 변화가 재부착길이 변화에 미치는 영향을 보여주고 있다. 본 그림에서의 재부착길이는  $Z/\lambda = 0$  단면에서의 결과이다. 수직벽과 와류 생성기의 사이의 거리가 1H (Fig. 3(a))일 때 와류 생성기의 크기나 Reynolds 수의 변화에 상관없이 재부착길이의 감소는 나타나지 않았다. 자유흐름 속도의 증가에 따라, 모든 실험조건에서 재부착길이가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 0.54H 높이의 와류 생성기를 부착하였을 경우, 낮은 속도영역에서는 재부착지점의 길이가 약 10% 정도 증가하는 결과가 나타났다. 와류 생성기의 높이가 0.54H인 경우, 낮은 Reynolds 수에서의 재부착 길이의 증가현상은 수직벽과 와류 생성기 사이의 거리가 3H와 5H인 경우(Fig. 3(b), (c))에서도 발생하여 최대 15%의 재부착길이의 증가가 나타났다. Reynolds 수가 증가함에 따라 이 차이는 와류 생성기가 없는 수직벽의 길이에 접근하고 있다.

와류 생성기의 크기가 1H인 경우, 수직벽과 와류 생성기의 거리가 3H와 5H(Fig. 3(b), (c))에서 감소효과를 확인할 수 있다. 이 경우, 4000이하의 Reynolds수에서는 재부착길이의 변화가 없거나 약간의 증가를 보이지만 Reynolds 수가 4000이상부터는 Reynolds 수를 증가시켜도 재순환 영역의 크기가 일정하게 유지되어 Reynolds 수 5000과 6000에서 와류 생성기가 없는 수직벽과 비교하여 감소효과를 보이고 있다.

Fig. 4는 와류 생성기가 부착되지 않은 경우 (a)와 1H 높이의 와류 생성기가 수직벽의 5H 전방에 부착된 경우 (b)의 X-Z 단면 속도장을 나타낸 것이다. 와류 생성기가 설치되지 않은 경우에는 수직벽의 중심을 기준으로 동일한 재부착길이가 나타나 수직벽 중심에서의 유동의 2차원성을 확인할 수 있다. 하지만 와류 생성기가 설치된 경우에는 Z 방향에 따라 다른 재부착길이가 나타난다. 생성된 와류에 의해 높은 운동량의 유체가 아래로 이동하는  $Z/\lambda = 0$ 의 위치영역에서는 작은 재부착지점이 나타나고, 반대로 낮은 운동량의 유



(a) Without vortex generator,  $Re_H=6000$



(b)  $h/H=1, X_v/H=5, Re_H=6000$

Fig. 4. Mean streamwise velocity contour at X-Z plane ( $y/H=0.33$ )

체가 상승하는  $Z/\lambda = 0.5$ 의 위치영역에서는 상대적으로 큰 재부착지점이 나타났다.

재부착길이의 감소효과가 나타났던 와류 생성기의 크기가 1H인 경우의  $Z/\lambda = 0$ 와  $Z/\lambda = 0.5$  위치에서의 재부착길이 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 3에서의 결과와 같이 Reynolds수가 4000이상에서 재부착지점의 길이변화는 일정한 값에 수렴하는 형태를 가진다. Reynolds 수가 4000이하인 경우,  $Z/\lambda = 0$ 인 위치에서의 재부착길이는 와류 생성기가 부착되지 않은 경우와 큰 차이를 보이지 않는다. 하지만  $Z/\lambda = 0.5$ 인 위치에서는 최고 25%의 재부착길이 증가를 보이고 있다. 그 결과, Fig. 6에서 나타나는 것과 같이 Reynolds 수 4000 이하에서는 재부착길이의 평균값이 와류 생성기가 없는 경우보다 큰 값을 나타낸다. 그와 반대로 Reynolds 수가 5000 보다 큰 경우에는 재부착길이의 평균값이 와류 생성기가 없는 수직벽의 경우와 비교하여 작게 나타난다. Reynolds 수가 5000 이상의 경우  $Z/\lambda = 0$ 인 위치에서는 최대 14.7%의 감소를 보이고 있으며,  $Z/\lambda = 0.5$ 인

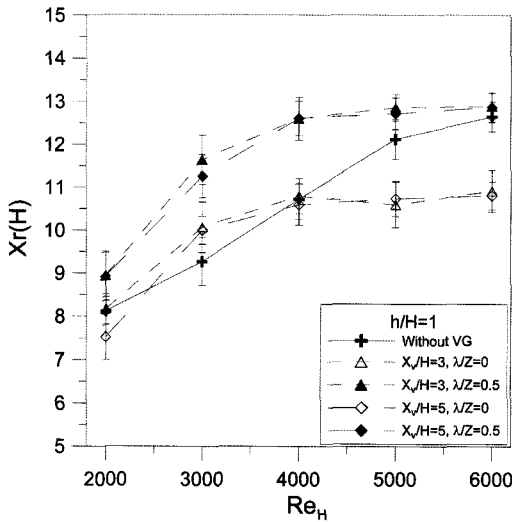


Fig. 5. Reattachment length comparison according to different Z-direction ( $Z/\lambda=0$ ,  $Z/\lambda=0.5$ )

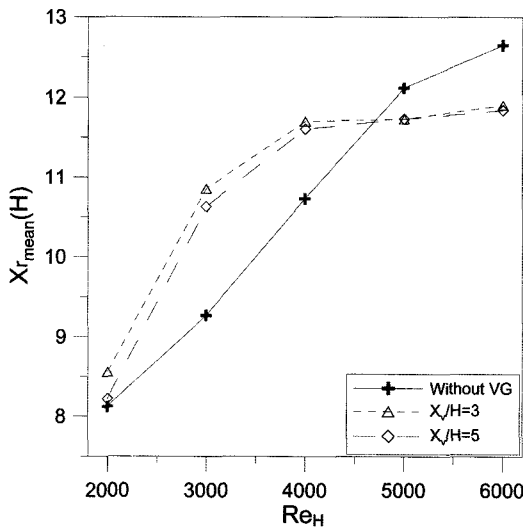


Fig. 6. Averaged reattachment length comparison according to the distance between vortex generator and fence

위치에서의 재부착길이는 Reynolds수가 6000에서는 와류 생성기가 없는 수직벽의 경우와 같아진다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 와류 생성기를 이용하여 수직벽 후방

박리기포의 크기 감소를 위한 연구를 수행하였다. 수직벽 전방에 설치된 와류 생성기를 이용해 각각의 경우에서 박리기포의 크기 감소가 나타는 조건을 찾았다. 결과로부터 특정 조건에서 와류 생성기가 없는 경우와 비교하여 최대 14.7%의 재부착지점 길이 감소가 나타났다.

#### 후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업(KRF-2009-0094016)과 나노구조 생체에너지 융합연구단의 지원으로 수행되었고 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 1) Good, M. C. and Joubert, P. N., 1968, "The form drag of two-dimensional bluff-plates immersed in turbulent boundary layers", *J. Fluid Mech*, Vol. 31, pp. 547~582.
- 2) Castro, I. P. and Fackrell, J. E., 1978, "A note on two-dimensional fence flows, with emphasis on wall constraints", *J. I. Aerodynamics*, Vol. 3, pp. 1~20.
- 3) Gad-el-Hak. M., 2006, "Flow Control : Passive, Active, and Reactive Flow Management", Cambridge, New York.
- 4) Chun, K. B. and Sung, H. J., 1996, "Control of Turbulent Separated Flow over a Backward-facing Step by Local Forcing", *Exp. in Fluids*, Vol. 21, pp. 417~426.
- 5) Godard. G. and Stanislas. M., 2006, "Control of a decelerating boundary layer. Part 1 : Optimization of passive vortex generators", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 3 pp. 181~191.
- 6) Kim, H. B. and Choi, Y. H., 2009, "Pulsating jet control for manipulating the separation bubble behind the fence", *J. Visualization*, Accepted.
- 7) De Brederode, V. A. S. L., 1975, "Three-dimensional flow in nominally two-dimensional separation flow", Ph. D thesis, Imperial College, London University.
- 8) Durst, F. and Rastogi, A. K., 1979, "Turbulent flow over two-dimensional fence. Turbulent shear Flow 2 (Bradbury *et al.*, editors)", Berlin, Springer Verlag.