

다공성 방풍벽의 다공도가 펜스후류 속도장에 미치는 영향에 관한 연구

김 형 범* · 이 상 준**

(1997년 11월 28일 접수)

Effect of Fence Porosity on the Velocity Field of Wake Flow Past Porous Wind Fences

Hyoung-Bum Kim and Sang-Joon Lee

Key Words: Porous Fence(다공성 펜스), Porosity(다공도), Turbulent Wake(난류 후류),
2-frame PTV(2-프레임 입자 추적법), Velocity Field(속도장)

Abstract

Velocity fields of near turbulent wake behind a porous wind fence were measured using the 2-frame PTV method in a circulating water channel. The fences used in this study had different geometric porosity(ϵ) of 0, 20, 40 and 65%. The fence was embedded in a thin laminar boundary layer, i. e., $\delta/H \approx 0.1$. Reynolds number based on the fence height H and free stream velocity (U_o) was about 8,400. As a result, a recirculating flow region was formed behind the fence for the $\epsilon = 0\%$ and 20% wind fence. For the wind fences having porosity larger than $\epsilon = 40\%$, it was difficult to see separation bubbles behind the fence. The $\epsilon = 20\%$ porous fence reveals the maximum velocity reduction, however, the turbulent intensity and Reynolds shear stress are much greater than those of $\epsilon = 40\%$ fence. Among the wind fence tested in this study, the porous wind fence of $\epsilon = 40\%$ porosity is the most effective for abating wind erosion.

기호설명

B	: 다공벽의 두께
H	: 다공벽의 높이
W	: 다공벽의 폭
U, V	: 흐름방향 및 수직방향 평균 속도
U_o	: 자유흐름 속도
Re	: 다공벽 높이를 기준으로한 레이놀즈 수
Re_x	: 국부 레이놀즈 수
X, Y, Z	: 다공벽을 기준으로 한 직각 좌표계
ω_z	: Z방향 와도
ϵ	: 다공벽의 다공도

1. 서 론

대기경계층(atmospheric boundary layer)내에 놓인 방풍벽(wind fence)은 바람에 의한 농작물 피해방지에서부터 원료야적장의 원료비산 방지, 도로에 모래나 눈이 쌓이지 않게 하는등 바람에 의한 물질 전달을 억제 또는 조절하기 위한 수단으로써 사용되어오고 있다. 이와같은 방풍벽의 방풍효과(shelter effect)를 향상시키기 위하여 그동안 방풍벽 주위 유동특성에 관한 연구가 이루어져왔다. 그러나, 다공벽 후류유동은 다공도의 변화와 유동의 초기조건에 따라 유동특성이 복잡하게 변화하기 때

* 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 포항공과대학교 기계공학과

분에 주어진 조건하에서 다공도나 설치 형태의 최적화에 대한 지식을 얻기가 쉽지 않다.

지금까지의 다공벽 주위유동에 관한 대부분의 연구들은 방풍벽후류의 평균속도 감소와 방풍벽에 걸리는 항력을 주로 다루어 왔다. 대기경계층내에 잠긴 다공벽 후류유동에 관한 연구로 Raine & Stevenson⁽¹⁾은 다양한 다공도를 갖는 방풍벽 후류의 속도와 난류강도를 열선유속계로 측정하여 후류영역을 다공벽 구멍을 통과한 틈새 유동(bleed flow)이 지배적인 구간과 다공벽 상부의 자유흐름(displacement flow)이 지배적인 구간으로 구분하였다. 그러나 그들은 열선유속계의 제한성으로 인하여 높은 난류강도와 역류(reverse flow)가 존재하는 펜스후방의 재순환유동영역에서 정확한 결과를 얻지 못하였다. Perera⁽²⁾는 PWA(pulsed wire anemometry)를 이용하여 다공벽 후류의 역류유동을 측정하고 난류강도가 큰 유동에서 PWA가 열선유속계보다 정확하며 방풍벽의 구멍형상보다는 다공도가 펜스후류의 유동특성을 결정짓는 가장 큰 변수임을 밝혔다. Ranga등⁽³⁾은 난류경계층내에 잠긴 다공도 $\epsilon=40\%$ 인 수직벽의 경우 후방 $x/H < 5$ 인 근접후류에서 난류강도의 국부 최대값이 두곳에 존재함을 보여주었다. 대기경계층 혹은 난류경계층에 잠기지 않고 균일유동속에 놓여있는 다공벽의 후류에 관한 연구는 Castro⁽⁴⁾에 의해 수행되었는데 그는 펜스 다공도가 증가함에 따라 박리기포가 뒤로 후퇴하다가 다공도가 $\epsilon=30\%$ 보다 크게 되면 박리기포가 사라진다고 하였다. Perera⁽²⁾의 연구에서도 다공도가 30%이상인 수직벽 후류영역에서 박

리 기포가 존재하지 않았다.

지금까지 수행된 다공벽 후류에 관한 대부분의 연구는 대기경계층 속에 다공벽이 잠겨있는 경우에 대해 수행되어져 왔으나, 아주 얇은 경계층이나 균일유동내에 놓인 다공벽 후류유동에 관한 연구는 거의 수행되지 않았다. 또한 열선유속계, LDV, PWA등과 같은 점측정(pointwise measurement) 방법을 사용하여 몇 개의 하류위치에서 주로 주류동방향 속도성분만을 측정하여 후류유동장 전체를 해석하는데 필요한 정보를 충분하게 제공하지 못하였다.

본 연구에서는 얇은 층류경계층의 유동조건에서 여러가지 다공도를 갖는 방풍벽을 설치한 후, 펜스 후류의 순간속도장을 2-프레임 PTV(Particle Tracking Velocimetry)⁽⁵⁾를 이용하여 측정된 후 이들을 평균하여 평균속도장 및 난류운동량등을 구하여 다공도변화가 펜스후류의 유동특성에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 시험부 크기가 $20^H \times 30^W \times 120^L$ cm인 회류수조(CWC)내에 2차원 다공벽을 수직으로 설치하여 펜스후류의 속도장을 측정하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용되어진 다공벽의 형상과 좌표계를 보여주고 있다. 다공벽 모델은 두께 $B=4$ mm, 높이 $H=40$ mm인 알루미늄판을 NC가공으로 구멍의 크기를 변화시켜 4가지의 서로 다른 다공도($\epsilon=0, 20, 40, 65\%$)를 갖도록 만들었다. 이 방

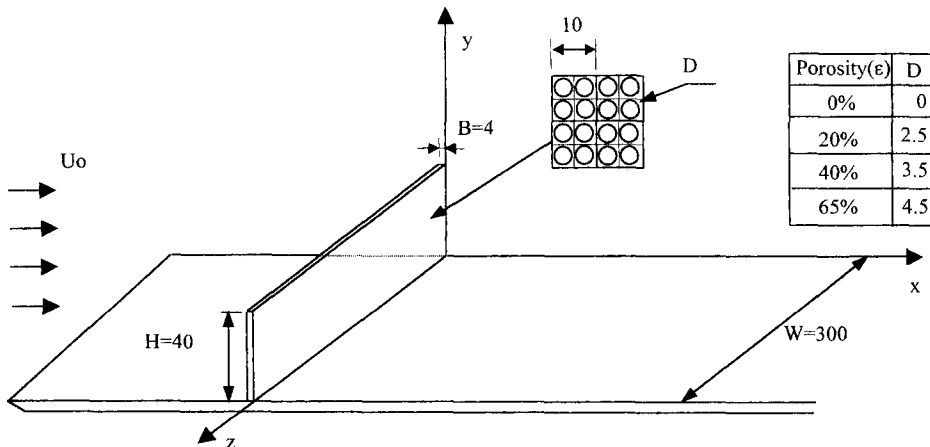


Fig. 1 Porous wind fence models with a coordinate system(unit : mm).

풍벽은 종횡비(W/H)=7.5, 형상비(B/H)=0.1의 기하학적 형상을 갖는다. 여기서 형상비 B/H=0.1은 수직벽과 블럭(block) 유동의 경계조건인 0.33보다 충분히 작은 값으로 본 연구에서 다분 다공벽 후류는 수직펜스 유동으로 간주할 수 있다.⁽⁶⁾

앞부분을 40°로 모서리를 낸 평판을 회류수조 바닥위에 설치한 후 평판의 선단으로부터 10 cm 후방 위치에 방풍벽 모형을 수직으로 설치하였다. 수직벽의 높이(H)와 자유흐름속도 $U_0=21$ cm/s를 기준으로 한 Re수는 약 8,400이고 방풍벽 설치위치에 기준한 국부 Re수(Re_x)는 약 21,000이었다. 다공벽 설치위치에서의 경계층의 두께를 LDV를 이용하여 측정된 결과 약 $\delta=3$ mm이었다. 이것은 층류경계층에서의 Blasius식($\delta/x \approx 5.0/Re_x^{0.5}$)을 이용하여 계산한 이론값인 약 3.5 mm와 비슷한 값이다.

2.1 유동가시화

다공벽 후류 유동장의 시간선(time line)과 유적선(streak line)을 관찰하기 위하여 수소기포법을 사용하여 유동을 가시화하였다. 할로겐 램프(halogen lamp)로부터 나온 백색광을 광섬유(fiber optic cable), 단열필터와 원주형 렌즈를 이용하여 두께가 약 5 mm인 평면광(light sheet)을 만들어 측정하고자 하는 유동단면을 조명하였다. 직경이 0.05 mm인 니크롬선을 음극으로 알루미늄 플레이트를 양극으로 사용하였으며 수소기포발생장치(KENEK HV-201)로 음극(수소기포발생선)에 공급되는 전압과 시간선(time line)의 주기(period)를 결정하였다. 이때 비량의 황산수소나트륨(Na_2SO_4)을 물에 녹여 기포가 잘 발생되도록 하였다. 실험시 수소기포의 부력효과를 최소화하기 위하여 전압을 낮게(20V) 유지시키고 시간선의 주기를 100 Hz와 10 Hz로 바꾸어가며 후류유동의 특성을

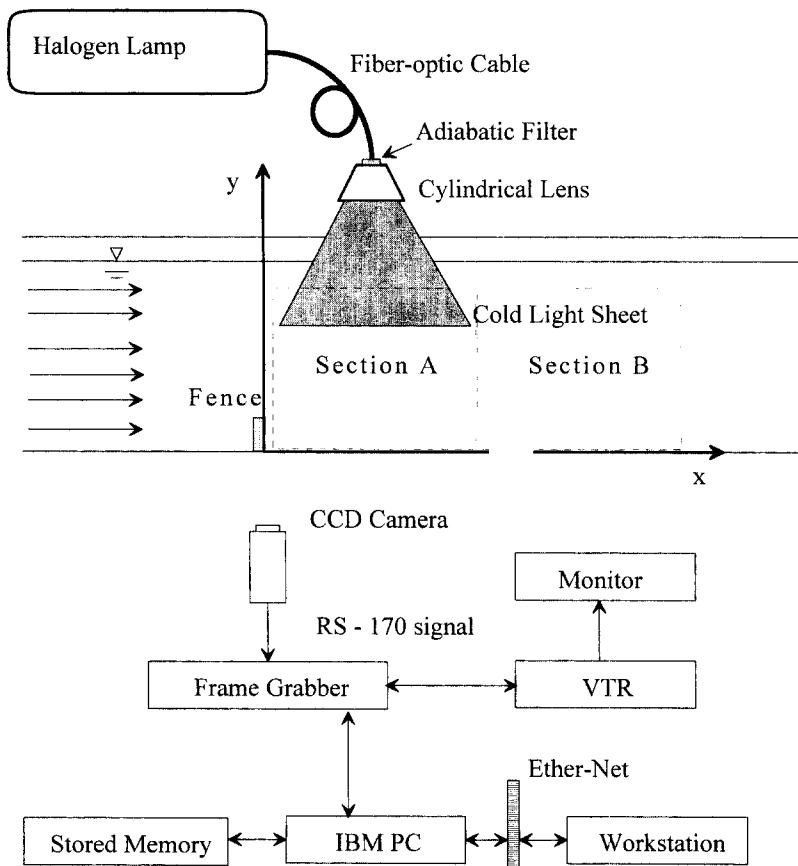


Fig. 2 Schematic diagram of the 2-frame PTV velocity field measurement system.

관찰하였다. 수소기포발생선을 방풍벽의 전후 $x = \pm 1H$ 위치에 설치하여 방풍벽 주위유동과 후류유동을 가시화하였다.

2.2 2-frame PTV측정

본 연구의 속도장 측정에 사용되어진 2-frame PTV측정시스템의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 먼저 라이트 시트(light sheet)로 측정하고자 하는 유동단면 내부를 조명하여 산란된 입자영상(particle image)을 CCD 카메라로 취득한다. CCD 카메라는 682×492 화소(pixel)를 갖는 인터라인 트랜스퍼형이며 1초에 30프레임(even field와 odd field로 구성)을 RS-170 흑백 신호형식으로 전송한다. 동기화된 유동화상은 IBM-PC와 프레임 그래버(DT2862)를 이용하여 획득된다. 프레임 그래버는 실시간(1/30sec)으로 512×480 화소의 화상을 4장 연속해서 디지털값으로 취득하게 된다. 이렇게 디지털값으로 저장된 유동화상은 공학계산용 워크스테이션으로 전송되어 노이즈 제거, 입자 중심추출 등의 전처리 과정과 추출된 입자의 경로 결정, 그리고 속도보간 및 평균속도장 계산등의 후처리 과정을 거치게 된다.⁽⁷⁾

속도장 측정을 위해 비중이 약 1.02이며 평균직경이 $150 \mu\text{m}$ 인 폴리스티렌을 산란입자로 작동유체 속에 주입하였다. PTV속도장 측정시 다공벽 후류영역을 각각 약 $130 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 의 크기를 갖는 두 단면(field of view)으로 나누어 유동화상을 취득하였다. 획득되어진 유동화상과 실제 물리적인 좌표를 일치시키기 위하여 보정영상(calibration image)을 실험전에 획득하여 후처리 과정에서 활용하였다. 유동화상은 실시간(1/30 sec)으로 4장씩 연속으로 24번 반복하여 획득하였다. 각각의 영상은 먼저 짝수 필드와 홀수 필드영상으로 화상분리(image splitting)를 한 후, 저대역 필터링(low-pass filtering)과 입자의 중심위치 추출등의 전처리 과정을 거친다. 시간간격 $\Delta t_0 = 1/60 \text{ sec}$ 인 이들 두장의 필드영상으로부터 구한 입자중심위치 데이터에 2-프레임 PTV알고리즘을 적용하게되면 각각의 입자위치에서의 순간속도벡터들을 구하게 된다. 여러장의 순간속도장을 앙상블(ensemble) 평균하여 난류불리량을 구하기 위하여 순간 속도벡터들을 연립 이차(multi-quadratic)보간법을 이용하여 일정간격의 사각격자상(50×50)에 보간하였다. 본 연구에서는 시간 평균화된 평균속도 및 난류강도의 공

간분포결과를 얻기위하여, 168장의 순간속도장을 앙상블 평균하였다. 또한 평균속도장 결과로부터 다음의 식을 이용하여 평균와도를 계산하였다.

$$\omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \approx \frac{1}{2} \left(\frac{v_{i+1,j} - v_{i-1,j}}{2\Delta x} - \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2\Delta y} \right)$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 니크롬선을 펜스후방($x/H=1$)에 설치한 후 수소기포법을 이용하여 다공벽 후류유동을 가시화한 결과이다. 여기서 보면 다공도에 상관없이 4가지 경우 모두 다공벽 끝에서 박리되어 발달하는 전단유동을 볼 수 있다. 다공도가 $\epsilon=20\%$ 인 방풍벽의 경우에는 막힘벽($\epsilon=0\%$)에 비해 다공벽 구멍을 통과하는 틈새유동(bleed flow)에 의해 다공벽 직후 형성되었던 박리점이 펜스의 뒤로 $x/H \approx 1$ 떨어진 바닥면으로 후퇴하고 있는데, 이것은 Castro⁽⁴⁾의 연구결과와 일치하는 것이다. 다공도가 $\epsilon=40\%$ 인 수직벽의 경우에는 재순환영역을 관찰할 수 없었고, 펜스 상, 하부 두 곳에서 전단유동이 발달하면서 시계방향으로 회전하는 뚜렷한 와류동이 존재함을 알 수 있다. 다공도가 가장 큰 $\epsilon=65\%$ 경우에는 펜스 구멍을 통과하는 틈새 유동효과를 뚜렷이 볼 수 있으며, $\epsilon=40\%$ 인 다공벽과 마찬가지로 펜스 후방에 재순환하는 역류유동은 나타나지 않았다. 수직벽 끝으로부터 발달하기 시작하는 전단유동의 폭도 다른 3가지 다공벽의 경우와 비교하여 가장 작으며, 전단층내에 와의 크기도 매우 작게 나타나고 있다. 반면에 다공도가 $\epsilon=20\%$ 이하인 경우에는 다공벽의 끝에서 생성, 발달하는 전단유동내에서 간헐적으로 유출되는 큰 크기의 와류를 관찰할 수 있었다.

Fig. 4는 4가지 서로 다른 다공도를 가진 방풍벽 후류 각각에 대해 측정한 순간속도장 168장을 앙상블 평균하여 구한 평균속도장을 나타낸 것이다. 실험시 자유흐름속도를 $U_0 = 210 \text{ mm/sec}$ 로 고정하여 다공벽의 막힘비에 의한 자유흐름의 가속은 고려하지 않았다. 여기서 보면 유동가시화 결과에서와 같이 다공도가 $\epsilon=0\%$ 인 방풍벽 경우 다공벽 바로 뒤쪽 바닥면에서 박리되던 유동이 다공도가 $\epsilon=20\%$ 로 증가함에 따라 틈새유동이 증가하여 박리점

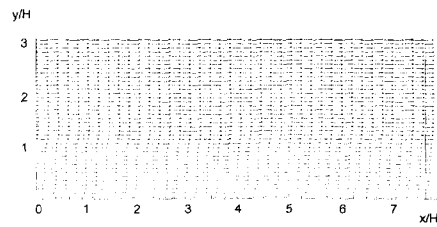
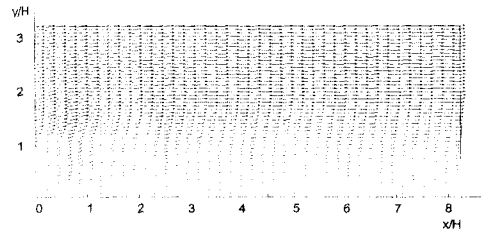
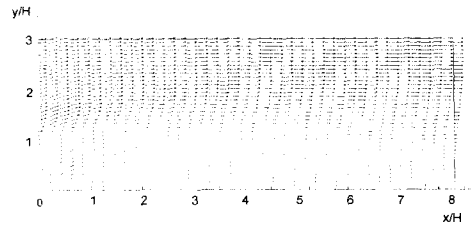
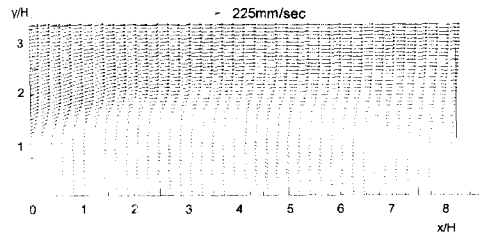
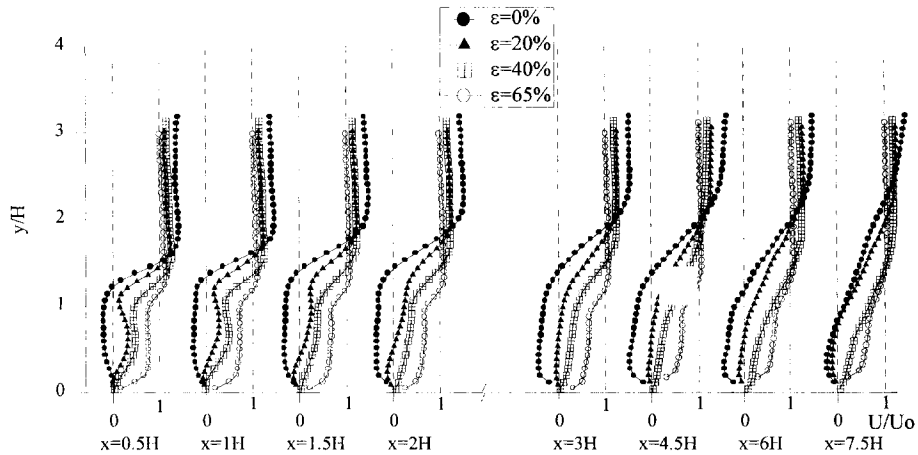


Fig. 3 Flow visualization of fence wake past porous fences.

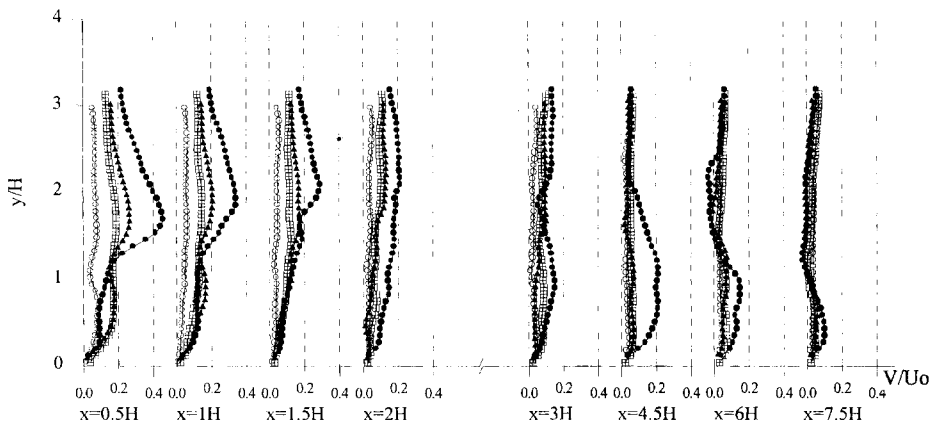
Fig. 4 Comparison of mean velocity field of turbulent fence wake past porous fences.

이 하류방향으로 후퇴하여 약 $x/H \approx 1$ 지점에서부터 재순환유동이 생성되는 것을 알 수 있다. 또한 재순환유동 내부의 역방향 속도크기도 다공도가 증가함에 따라 감소하고 있다. 다공도가 $\varepsilon=40, 65\%$

의 경우에는 후방에 재순환영역이 존재하지 않았다. 본 연구에서 다분 4가지 다공벽 모두 팬스 후방에서 팬스 전방의 속도와 비교하여 평균속도가 감소하였는데, 다공도가 $\varepsilon=20\%$ 인 방풍벽의 경우



(a) Mean streamwise velocity



(b) Mean vertical velocity

Fig. 5 Variations of mean streamwise and vertical velocity profiles.

평균속도가 가장 크게 감소하여 자유흐름속도의 약 20%크기로 줄어들었다. 다공도가 가장 큰 $\epsilon=65\%$ 인 경우에는 펜스구멍을 통과한

틈새유동이 증가하여 주유동방향 속도성분은 작은 다공도를 갖는 펜스의 경우에 비해 증가하고 수직방향 속도성분은 감소하며 역방향속도성분은 존재하지 않았다.

평균속도장 결과로부터 펜스 후방 몇 위치에서의 평균속도분포를 비교하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 다공도가 $\epsilon=20\%$ 인 다공벽의 경우, 펜스 직후에서는 다공도가 $\epsilon=40\%$ 인 수직벽과 비슷한 평균속도분포를 가지지만 약 $x/H=1$ 지점부터 하류로 나아감에 따라 음의 주유동방향 속도성분을 갖는다. 또한 펜스 구멍을 통과한 틈새유동의 영향

으로 박리점이 뒤로 후퇴하나 막힌벽($\epsilon=0\%$)에 비하여 역방향 속도의 크기는 작다.

다공도가 $\epsilon=40\%$ 인 수직벽에서는 역방향속도는 나타나지 않았으며, 다공벽의 직후 영역에서 높이 $y/H=0.25$ 부근과 다공벽의 높이보다 높은 $y/H=1.25$ 부분에서 큰 속도구배를 가지고 있다. 바닥면에 가까운 이랫쪽 부분($y/H=0.25$)의 속도구배는 틈새유동과 바닥면을 따라 발달하는 경계층의 상호작용에 기인한 것으로 $x/H=1.5$ 지점부터 감소하였다. 상부쪽의 큰 속도구배는 펜스끝에서 박리되어 발달하는 난류전단층에 의한 것으로 하류로 나아갈수록 속도구배는 완만해진다.

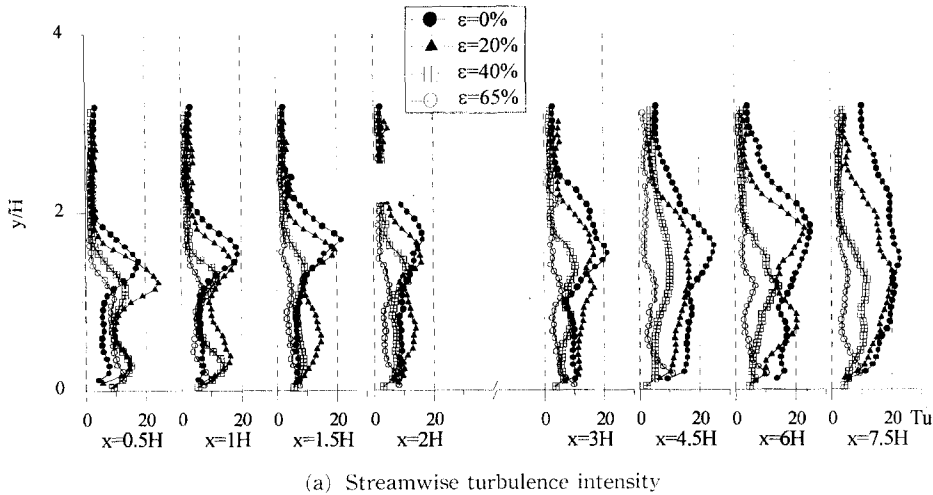
다공도(ϵ)가 증가할수록 구멍을 통과하는 틈새유동의 속도가 증가하여 다공도가 $\epsilon=65\%$ 인 경우

틈새유동의 평균속도값이 가장 크게 나타났다. 반면에 수직벽의 끝단으로부터 발달하는 전단층의 폭은 $\epsilon=65\%$ 인 다공벽이 다른 방풍벽과 비교하여 가장 작게 나타났다. 펜스로부터 후방으로 멀리 나아갈수록($x/H > 6$) 주유동방향 평균속도는 $\epsilon=0\%$ 와 $\epsilon=20\%$ 의 낮은 다공도를 갖는 수직벽과 $\epsilon=40\%$ 와 $\epsilon=65\%$ 의 높은 다공도를 갖는 수직벽의 경우로 구분되어진다. 이것은 펜스 후방에 재순환 유동의 생성여부에 따라 후류의 유동특성이 크게 달라지기 때문이다.

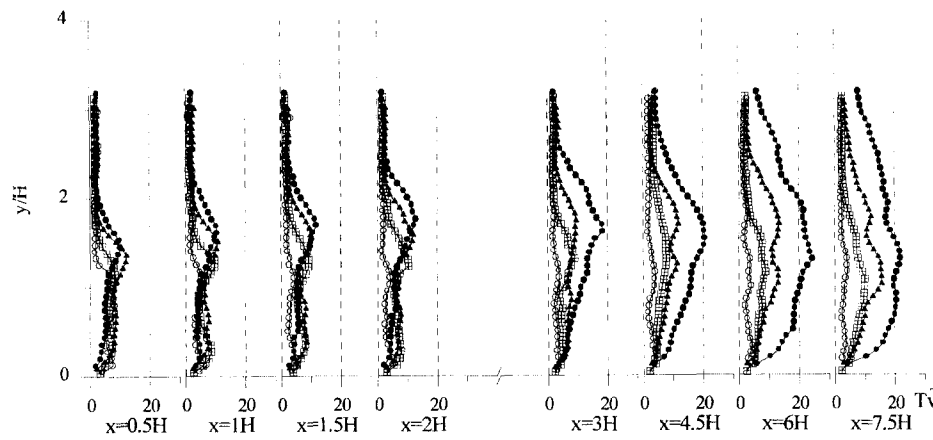
Fig. 5(b)를 보면 방풍벽 직후 $x/H < 2$ 구간에서 펜스높이보다 낮은($y/H < 1$)영역에서는 다공도 변화가 수직방향 속도분포에 미치는 영향이 크지 않으나 하류로 나아갈수록 큰 차이를 보여주고 있다.

$x/H > 3$ 구간에서는 다공도가 작을수록 수직방향 속도가 증가하는데, 막힌벽($\epsilon=0\%$)의 경우 다공도가 $\epsilon=40\%$ 인 펜스에 비해 2배이상 큰 값을 갖는다. 다공도 $\epsilon=20\%$ 인 수직벽의 경우, 펜스 직후에서 다른 다공벽에 비해 미소하나마 다소 큰 수직방향속도를 갖는데, 이것은 바닥면을 따라 재순환하는 박리기포를 틈새 유동이 타고 올라가기 때문으로 생각되어진다.

Fig. 6은 각 위치단면에서의 주유동방향과 수직방향 속도성분의 난류강도 분포를 비교한 것이다. 난류강도는 주유동방향 및 수직방향 속도성분의 변동치를 자유흐름속도(U_0)로 나누어 무차원화하였다($\sqrt{u'^2}/U_0, \sqrt{v'^2}/U_0$). 여기서 보면 두가지 난류강도값 모두 다공도가 작을수록 큰 값을 갖는다. 그



(a) Streamwise turbulence intensity



(b) Vertical turbulence intensity

Fig. 6 Comparison of turbulence intensity profiles.

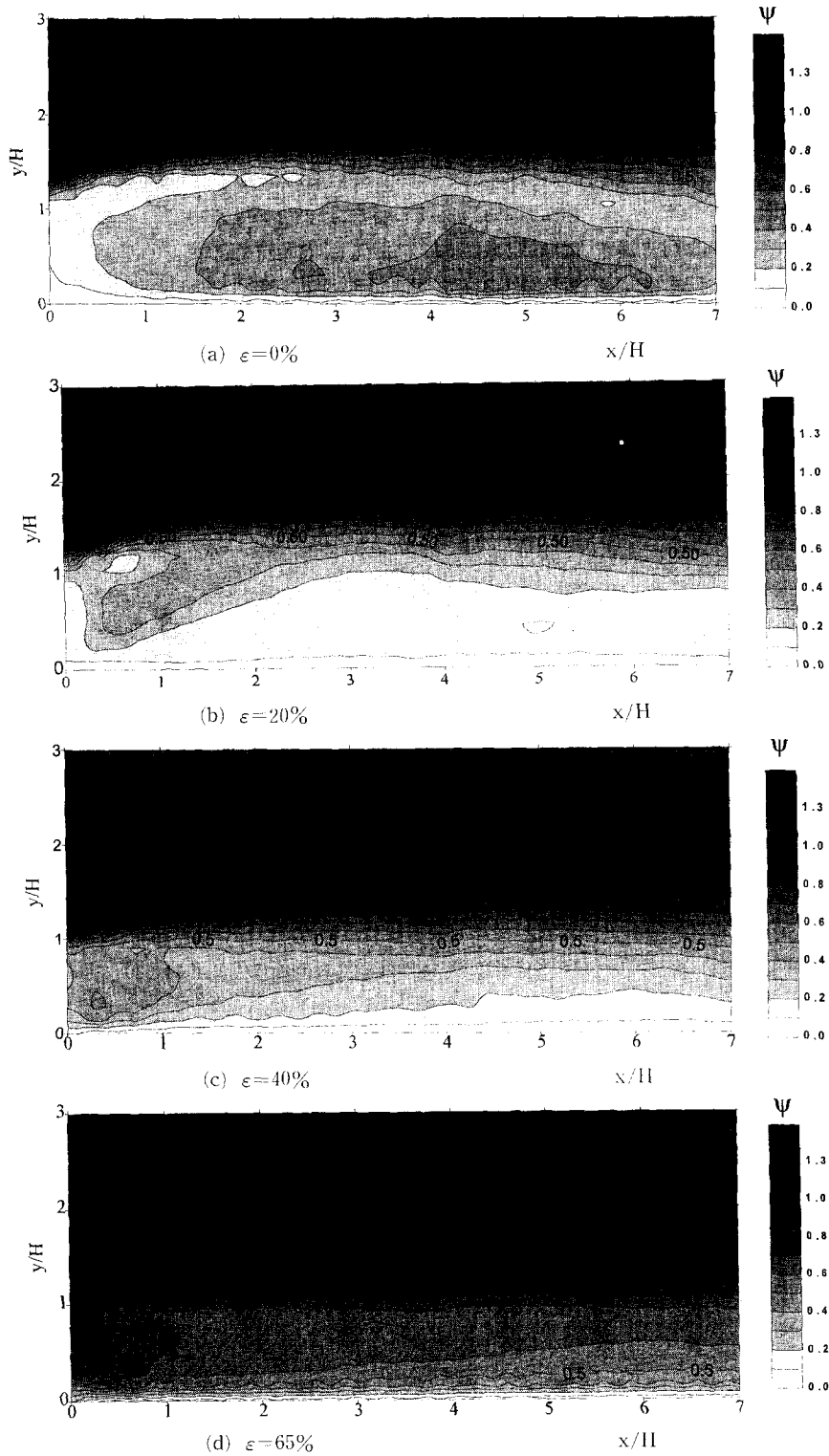


Fig. 7 Contour plot of shelter parameter ψ for different fence porosities.

러나, 다공벽의 높이보다 낮은 영역($y/H < 1$)에서는 $\epsilon=20\%$ 의 다공도를 갖는 다공벽이 막힌벽($\epsilon=0\%$)보다 큰 난류강도값을 갖는데, 이것은 다공벽 구멍을 통과한 틈새 유동이 역방향 속도성분을 갖는 재순환유동과 만나면서 난류강도가 증가되는 것으로 보인다.

다공도가 $\epsilon=40\%$ 인 방풍벽의 경우 $x/H=2$ 위치보다 하류영역에서는 난류강도의 국부 최대값이 한 곳에만 존재한다. 이 결과는 난류경계층 내부에 완전히 잠긴 같은 다공도($\epsilon=40\%$)를 갖는 수직벽에 대해 국부 난류강도의 최대값이 2곳에 존재한다고 한 Ranga등⁽³⁾의 결과와 다르다. 이것은 본 연구의 경우 다공벽 설치위치에서의 경계층 두께가 $\delta=0.1H$ 정도로 거의 균일유동속에 놓여있기 때문에 펜스구멍을 통과하는 틈새유동에 의한 운동량의 전달이 크며, 바닥면을 따라 생성된 경계층의 영향으로 두번째 난류강도의 국부 최대값이 빨리 사라지기 때문으로 생각되어진다.

수직방향 속도성분의 난류강도 분포는 펜스 후방인 약 $x/H=2$ 위치까지의 근접후류영역을 제외하고는 주유동방향 속도성분의 난류강도와 유사하다. 다공도가 $\epsilon=65\%$ 인 수직벽을 제외하고는 $x/H < 2$ 의 영역에서 수직방향 난류강도($\sqrt{v'^2}$)가 주유동방향 난류강도값($\sqrt{u'^2}$)의 약 50%정도로 펜스후류의 난류구조가 큰 비등방성을 가지고 있음을 알 수 있다. 이것으로부터 다공벽 직후영역에서는 유동의

수직방향 섭동이 주유동방향 속도성분에 비해 크게 억제됨을 나타낸다. 다공도가 $\epsilon=65\%$ 인 수직벽의 경우에는 두가지 속도성분의 난류강도 차이가 크지 않아 측정된 전 후류구간에서 난류구조가 어느정도 등방성을 회복하였음을 알 수 있다.

앞에서 구한 주유동방향 평균속도 및 난류강도의 공간적 분포를 이용하여 Gandemer⁽⁸⁾가 제안한 방풍계수(shelter parameter)를 계산하였다. 여기서 방풍계수란 평균속도와 더불어 유동의 변동속도 성분을 함께 고려하여 방풍벽의 방풍효과(shelter effect)를 나타내는 매개변수로 아래와 같다.

$$\phi = \left(|U| + \sqrt{u^2} \right) / \left(U_0 + \sqrt{u_0^2} \right)$$

여기서 U_0 는 다공성 펜스 전방의 자유흐름속도를 나타낸다.

4가지 서로 다른 다공도를 갖는 방풍벽에 대해 방풍계수를 계산하여 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 보던 $\epsilon=20\%$ 의 다공도를 갖는 수직벽이 가장 낮은 방풍계수값을 가졌다. Perera(2)는 $\epsilon=10\%$ 의 다공벽이 방풍효과가 가장 뛰어나다고 하였다. 본 실험의 경우도 다공도가 작을수록 평균속도의 감소효과가 크기 때문에 방풍효과가 뛰어나다고 할 수 있다. 그러나, 막힌벽($\epsilon=0\%$)의 경우에는 재순환유동 영역내의 역류 속도의 크기가 크기 때문에 $\epsilon=20\%$ 인 수직벽보다 낮은 방풍 효과를 보여주고 있다.

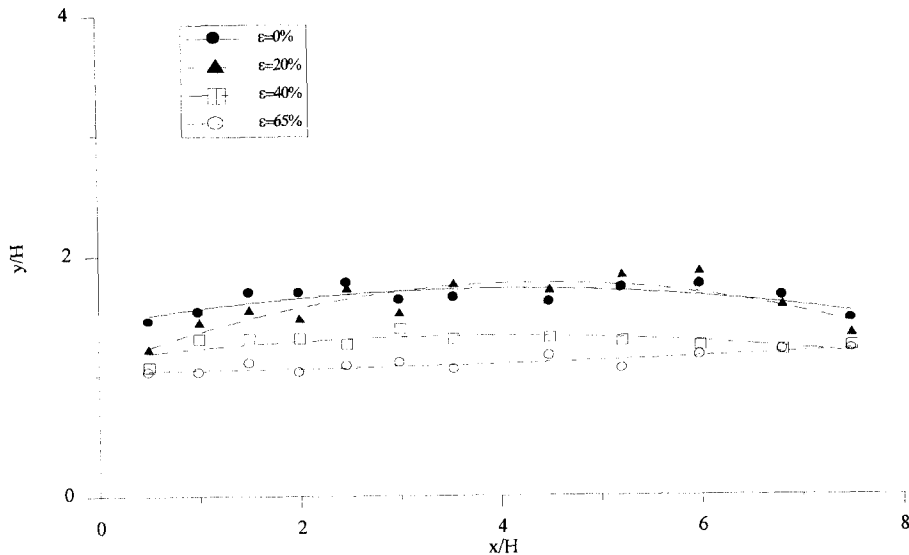


Fig. 8 Variations of the center position of shear layer developed from the porous fences.

한편 펜스후방에 재순환유동이 존재하는 다공도 $\varepsilon=0\%$ 와 $\varepsilon=20\%$ 의 방풍벽의 경우에는 펜스 높이보다 높은 영역($y/H > 1$)에서 1보다 큰 방풍계수 값을 갖는데, 이것은 다공도가 작은 방풍벽의 경우, 틈새유동이 작아 펜스상부에 유동의 가속현상이 존재한다는 것을 나타낸다. 다공도가 $\varepsilon=40\%$ 인 방풍벽의 경우 $x/H > 1$ 인 하류영역에서 높이방향으로 거의 균일한 방풍효과를 보여주고 있는데, 펜스높이보다 낮은 $y/H < 0.9$ 구간에서 방풍계수는 0.4이하의 값을 갖는다. 다공도가 $\varepsilon=65\%$ 인 다공벽은 평균속도장 결과에서 보듯이 본 연구에서 다른 4가지 방풍벽중 방풍효과가 가장 떨어지는 것으로 나타났다.

난류전단유동에 대한 연구에서 주류동방향 속도 성분의 난류강도가 최대값을 갖는 점을 전단층의 중심으로 가정하기도 한다.⁽⁹⁾ 이 방법으로 다공벽의 끝에서 생성, 발달하는 박리전단층의 중심위치를 구하여 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 보면 다공도가 작을수록 수직벽으로부터 발달하는 박리전단유동이 바닥으로부터 높게 위치하고 있음을 알 수 있다. 다공도가 $\varepsilon=40\%$ 이하인 낮은 방풍벽의 경우에는 전단층이 전체적으로 위로 불룩한 구조를 갖는데 비해, 다공도가 $\varepsilon=65\%$ 인 경우에는 근접후류영역에서 거의 평평한 분포를 보여주고 있다. 다공도 $\varepsilon=20\%$ 를 갖는 방풍벽에서는 펜스 구멍을 통과한 틈새유동이 역류하는 재순환유동을 위쪽으로 타고 넘겨됨에 따라 전단 유동의 곡률반경이 가장 크며, $x/H=4$ 영역에서는 막힌벽의 경

우보다 전단층의 중심이 더 높게 나타났다.

Fig. 9는 방풍벽의 다공도변화가 레이놀즈 전단응력분포에 미치는 영향을 비교한 것이다. 레이놀즈 전단응력은 펜스에서 생성, 발달되는 전단유동층 내부에서 높게 나타난다. 실제 야적장의 원료파일상부가 전단유동 내부에 위치하므로 낮은 전단응력의 다공성 방풍펜스를 사용하면 원료입자의 비산억제에 있어 좋은 효과를 갖는다.^(10,11) 펜스 직후 영역에서는 낮은 다공도($\varepsilon=0\%, 20\%$)의 경우 음(-)의 전단응력이 존재하며, $\varepsilon=40\%$ 와 65% 의 경우에는 전 측정구간에서 거의 0에 가까운 낮은 전단응력값을 가졌다. 다공도 $\varepsilon=20\%$ 인 다공벽의 경우도 펜스 직후 위치인 $x/H=0.5$ 를 제외하고는 막힌벽($\varepsilon=0\%$)에 비해 약 50%정도의 작은 전단응력값을 가졌다. 즉, 다공도(ε)가 증가할수록 다공벽후류의 전단층에서 난류운동에너지의 생성이 감소됨을 알 수 있다. 다공도(ε)가 레이놀즈 전단응력에 미치는 영향은 하류로 나아가면서 더욱 뚜렷해지며, 수직벽의 다공도가 클수록 바람에 의한 물질비산에 중요한 영향을 끼치는 레이놀즈 전단응력이 크게 감소함을 알 수 있다. 따라서 야적원료나 모래등의 비산억제를 위해서는 평균속도의 감소와 더불어 난류강도와 전단응력감소를 함께 고려해야 하므로 본 연구에서 다른 4가지 다공벽중에서 다공도 $\varepsilon=40\%$ 의 방풍벽이 효과적임을 알 수 있다. 이것으로부터 방풍효과를 나타내는데 사용하고 있는 Gandemer⁽⁸⁾의 방풍계수를 난류강도와 레이놀즈 전단응력에 의한 난류효과를 함께 고려하여야

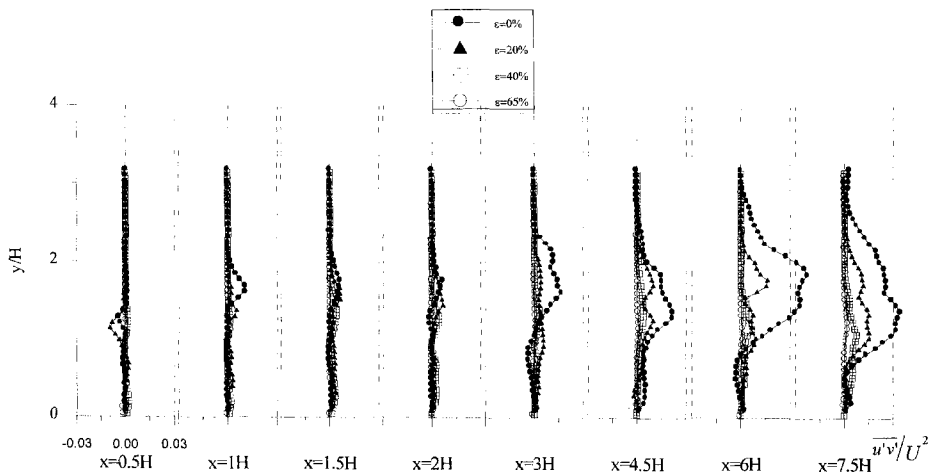


Fig. 9 Comparison of Reynolds shear stress profiles.

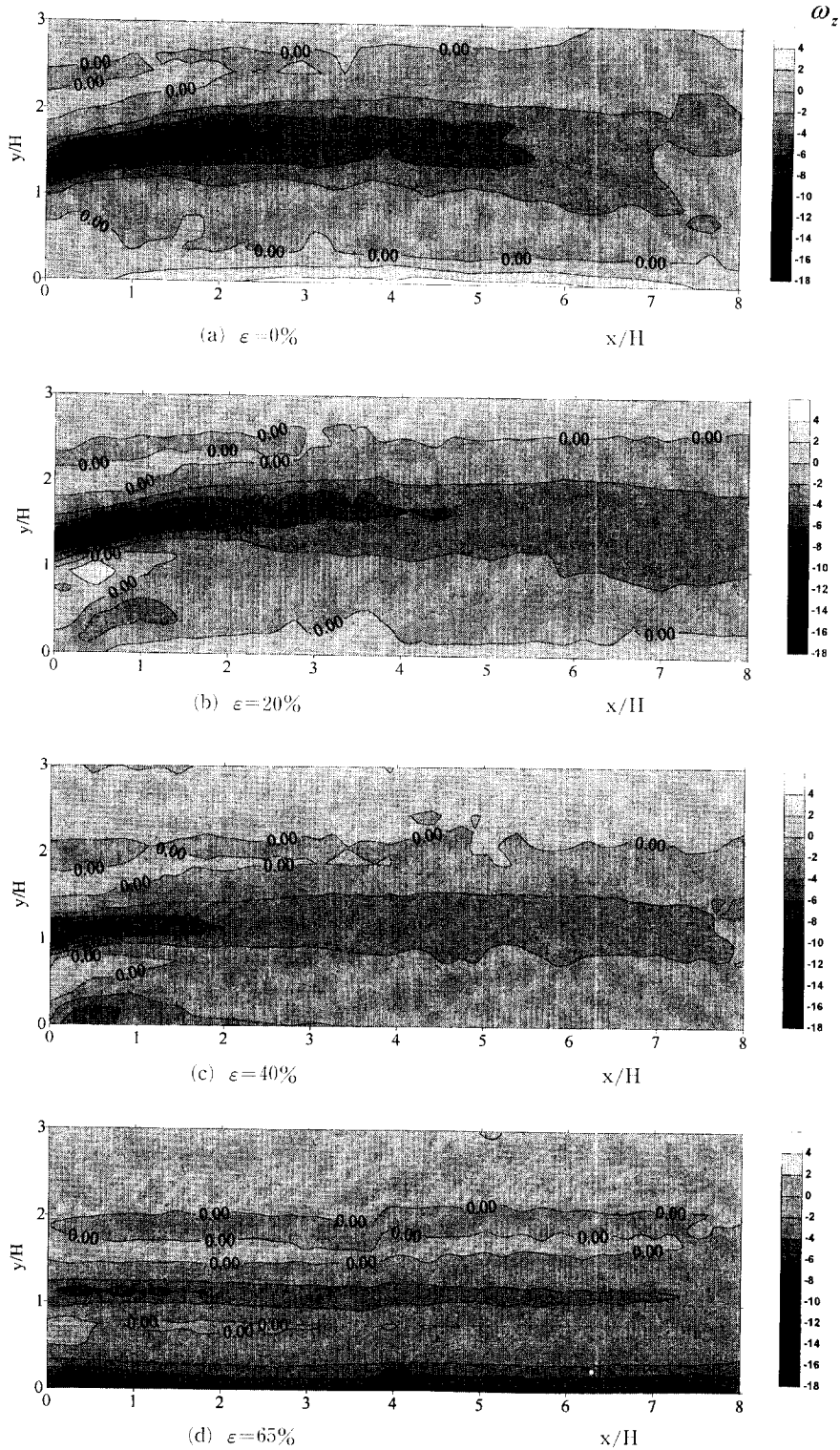


Fig. 10 Contour plot of spanwise vorticity ω_z .

함을 알 수 있으며, 향후 이에 대한 자세한 연구가 필요하다.

주유동방향과 수직방향의 속도성분으로부터 구한 z 방향의 와도분포(z)를 Fig. 10에 나타내었다. 이 와도분포로부터 다공벽의 끝에서 생성, 발달하는 전단유동의 전반적인 거동을 해석할 수 있다. 전단층의 높이 변화(Fig. 8)로부터 유추할 수 있듯이 다공도가 $\varepsilon=40\%$ 이하인 경우에는 와도분포가 대략 $x/H=4$ 를 중심으로 위로 볼록한 형상을 보이나, $x=65\%$ 의 방풍벽은 바닥면에 거의 평행한 와도분포를 갖는다. 또한 다공도가 증가함에 따라 와도의 크기가 감소하고 있다. 막힌벽($\varepsilon=0\%$)은 수직벽의 끝부분에서 가장 큰 와도값을 가졌으며, $\varepsilon=20\%$ 와 40% 인 경우 펜스 직후 $x/H < 2$ 구간에서 수직벽 하부로부터 발달하는 전단유동의 영향으로 와도값이 국부적으로 증가하는 현상을 관찰할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 다공도가 서로 다른 4가지($\varepsilon=0, 20, 40, 65\%$) 방풍벽을 사용하여 다공도변화가 펜스 후류의 유동특성에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 펜스후류의 속도장은 2-프레임 PTV시스템을 사용하여 측정하였는데, 펜스높이(H)와 자유흐름속도에 기초한 레이놀즈수는 약 8,400이었다. 연구결과, 다공벽에 의한 속도 감소효과는 다공도가 $\varepsilon=20\%$ 인 수직벽에서 가장 크게 나타났으며, 다공도가 증가함에 따라서 평균속도의 감소효과는 줄어들었다. 그러나 다공벽에서 생성, 발달하는 전단유동 내부에서 난류강도 및 레이놀즈 전단응력은 다공도가 클수록 작은값을 가졌다. 따라서 난류 강도, 레이놀즈 전단응력 및 평균속도의 감소등을 모두 고려하였을 때, 본 연구에서 다른 4가지 서로 다른 다공도중에서 $\varepsilon=40\%$ 인 방풍벽이 바람에 의한 미세입자의 비산억제에 효과적인 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 교육부 지정 국책대학원인 환경공학부의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Raine, J. K. and Stevenson, D. C., 1977, "Wind

Protection by Model Fences in a Simulated Atmospheric Boundary Layer," *J. Ind. Aerodyn.*, Vol. 2, pp. 159~180.

(2) Perera, M. D. A. E. S., 1981, "Shelter Behind Two-Dimensional Solid and Porous Fences," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 8, pp. 93~104.

(3) Ranga, R. K. G., Garde, R. J., Singh, S. K. and Singh, N., 1988, "Experimental Study on Characteristics of Flow Past Porous Fences," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* Vol. 29, pp. 155~163.

(4) Castro, I. P., 1971, "Wake Characteristics of Two-Dimensional Perforated Plates Normal to an Air-Stream," *J. Fluid Mech.*, Vol. 46, pp. 599~609

(5) Lee, S. J. and Baek, S. J., 1996, "A New Two-Frame Particle Tracking Algorithm Using Match Probability," *Exp. in Fluids.* Vol. 22, pp. 23~32.

(6) Durst, F. and Rastogi, A. K., 1979, "Turbulent Flow over Two-Dimensional Fences," *Turbulent Shear Flow 2* (Ed. Bradbury et al.), Berlin, Springer-Verlag, pp. 218~231.

(7) Baek, S. J., 1997, "Development of Two-Frame Particle Tracking Velocimetry System and Its Applications to Turbulent Separated Flows," Ph. D Thesis, Dept. Mech. Eng., Pohang University of Science and Technology.

(8) Gandemer, J., 1981, "The Aerodynamic Characteristics of Windbreaks, Resulting in Empirical Design Rules," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 29, pp. 155~163.

(9) Kiya, M. and Sasaki, K., 1983, "Structure of a Turbulent Separation Bubble," *J. Fluid Mech.* Vol. 137, pp. 83~113.

(10) 김형범, 이상준, 1997, "다공성 방풍벽 뒤에 놓인 삼각프리즘 주위 유동의 PTV속도장 측정 연구," KSME 추계학술대회 논문집 B, pp. 710~714.

(11) Xuan, J. and Ye, W., 1988, "Wind Tunnel Modeling of Dust Emission and Deposition in Lower Atmosphere: Similarity Principles," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 29, pp. 145~154.