

# 다공성 방풍벽 뒤에 놓인 삼각 프리즘 주위 유동의 PTV 속도장 측정

김 형 범\* · 이 상 준\*\*

(1997년 11월 28일 접수)

## PTV Velocity Field Measurements of Flow Around a Triangular Prism Located Behind a Porous Fence

Hyoung-Bum Kim and Sang-Joon Lee

**Key Words :** Porous Fence(다공벽), Turbulent Boundary Layer(난류경계층), 2-Frame PTV(2-프레임 입자추적법), Triangular Prism(삼각 프리즘)

### Abstract

The shelter effect of a porous wind fence on a triangular prism was experimentally investigated in a circulating water channel. A porous fence of porosity  $\epsilon=38.5\%$  was installed in front of the prism model. The fence and prism model were embedded in a turbulent boundary layer. The instantaneous velocity fields around the fence and prism model were measured by using the 2-frame PTV (Particle Tracking Velocimetry) system. By installing the fence in front of the prism, the recirculation flow region decreases compared with that of no fence case. The porous fence also decreases the mean velocity, turbulent intensity and turbulent kinetic energy around the prism. Especially, at the top of the prism, the turbulent kinetic energy is about half of that without the fence.

### 기 호 설 명

- B : 다공벽의 두께
- H : 다공벽의 높이
- h : 삼각 프리즘의 높이
- W : 다공벽의 폭
- U, V : 흐름방향 및 수직방향 평균 속도
- $U_o$  : 자유흐름 속도
- $Re_H$  : 다공벽 높이를 기준으로한 레이놀즈 수
- $Re_x$  : 국부 레이놀즈 수
- $Re_\theta$  : 난류 레이놀즈 수
- $T_k$  : 난류운동에너지
- X, Y, Z : 다공벽을 기준으로 한 직각 좌표계

- $\omega_z$  : Z방향 와도
- $\epsilon$  : 다공벽의 다공도

### 1. 서 론

바람에 의한 야적원료의 비산은 환경 오염뿐만 아니라 경제적 손실을 야기시킨다. 이런 입자 비산 문제는 화력 발전소나 제철소의 원료야적장에서 흔히 볼 수 있다. 일반적으로 바람에 의한 입자의 비산을 막기 위하여 살수나 표면경화제를 사용하여 입자의 밀도를 높이거나 방풍림 혹은 다공성 방풍벽 등을 사용하고 있다. 야적높이가 15m 이상인 대형 야적장의 경우 방풍림으로는 비산을 효과적으로 억제할 수 없다고 알려져 있으며, 연간 살수나 표면

\*포항공과대학교 대학원 기계공학과  
\*\*회원, 포항공과대학교 기계공학과

경화제의 사용에 들어가는 비용은 매우 크다. 반면에 다공성 방풍벽은 초기투자자가 크다는 단점이 있으나 제작과 설치가 용이하고 방풍 효과를 극대화시킬 수 있다.

다공성 방풍벽은 그 형상과 다공도에 따라 후류 영역에 높은 난류강도와 압력구배를 가지며 후면에 박리기포가 생성되는 등 복잡한 유동형태를 갖는다. 그동안 다공벽의 방풍효과 향상을 위하여 방풍벽 주위유동에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다.

기존의 연구들은 대부분 다공성 방풍벽 후류의 속도 감소 및 다공성 방풍벽에 걸리는 항력측정에 집중되어 왔고, 이와같은 연구로부터 다공성 방풍벽 후류유동에 가장 크게 영향을 주는 지배변수가 방풍벽의 다공도임이 밝혀졌다.

Raine과 Stevenson<sup>(1)</sup>은 대기경계층내에 놓여진 방풍벽 모델의 다공도를 바꾸어가면서 후류유동을 연구하여 다공벽 후류영역을 방풍벽 구멍을 통과한 틈새유동(bleed flow)과 다공벽 위를 흘러 지나는 유동(displacement flow)이 지배적인 두 구간으로 나누었으며 평균속도와 난류강도사이의 실험적 상관식을 구하였다. Ranga 등<sup>(2)</sup>은 기하학적 다공도가 30%이상인 방풍벽 후방에는 재순환 영역이 존재하지 않으며, 방풍벽 후류에서 난류강도의 국부 최대값이 두곳에 존재함을 밝혔다. 그러나, 방풍벽 후류유동의 속도측정에 열선유속계를 사용함으로써 측정 정확도에 문제점을 안고 있다. Perera<sup>(3)</sup>는 열선유속계의 단점을 보완한 맥동유속계(pulsed wire anemometry)를 이용하여 방풍벽의 다공도가 증가함에 따라서 방풍벽후방에 생기는 재순환 영역의 정체점이 뒤로 후퇴함을 밝혔다.

입자의 비산문제와 관련하여 Xuan과 Ye<sup>(4)</sup>는 야적표면 근처에서의 유속과 표면전단응력이 입자 비산을 결정하는 지배적인 인자임을 밝혔다. 다공성 방풍벽과 야적원료 모델이 같이 놓여있는 경우에 대한 연구로 Borges와 Viegas<sup>(5)</sup>는 다공성 방풍벽 뒤에 놓인 야적모델주위의 국부 벽면전단응력을 측정하여 야적모형과 방풍벽의 높이비가 작을수록 벽면전단응력의 크기가 작아짐을 보였다. 최근의 연구로 박철우 등<sup>(6)</sup>은 다공도가 서로 다른 방풍벽 뒤쪽에 위치한 삼각 프리즘의 표면압력을 측정하여 다공도 변화가 표면압력에 미치는 효과를 연구하여 다공도가  $\epsilon=40\%$  정도인 방풍벽이 표면압력감소에 가장 효과적임을 밝혔다. 기존의 연구들 대부분은 방풍벽과 야적 모형주위 유동에 관한 정확한 속

도장 정보에 기초한 것이 아니라 국부적인 유동해석을 위주로 하였다. 왜냐하면 기존의 열선유속계나 LDV와 같은 점측정(point measurement)방법으로 복잡한 기하학적 형상, 역방향 속도성분과 압력구배가 존재하는 방풍벽과 원료야적 모델주위의 유동 현상을 연구하기에는 제한이 따르기 때문이다.

본 연구에서는 2-프레임 PTV(Particle Tracking Velocimetry)<sup>(7)</sup>를 이용하여 다공성 방풍벽 후방에 놓인 삼각형 야적모형 주위 유동의 속도장을 측정하여 방풍벽이 삼각 프리즘 주위 유동장에 미치는 영향에 대해서 실험적으로 연구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 실험은 순환형 회류수조(circulating water channel)에서 수행되었다. 측정부는 높이 0.2m, 폭 0.3m의 사각 단면이며 길이는 1.2m이다. 실험에 사용된 다공성 방풍벽과 삼각 프리즘의 기하학적 형상 및 좌표계를 Fig. 1에 나타내었다.

다공성 방풍벽 모델은 두께(B)가 0.3mm인 스테인레스 강판을 에칭(etching) 가공하여 만들었는데 높이(H)와 길이(W)는 각각 25mm, 300mm이다. 따라서 종횡비(W/H)가 12이고 형상비(B/H)가 0.012로 되어 Durst<sup>(8)</sup>가 제안한 펜스유동과 블럭유동간의 경계값인 0.33보다 작아 본 연구에서 다른 유동은 펜스유동으로 간주할 수 있다. 본 연구에 사용한 다공성 방풍벽은 직경 3.5mm의 구멍을 균일하게 뚫어  $\epsilon=38.5\%$ 의 다공도를 갖도록 만들었다. 측정부 입구로부터 80cm되는 하류지점에 설치한 이 방풍벽은 다공도를 변화시키면서 수행한 예비실험에서 방풍벽 후류의 속도 및 난류 운동량을 가장 크게 감소시키는 것으로 나타났다.<sup>(9)</sup>

야적원료 삼각 프리즘 모델은 사잇각이 40°인 이등변 삼각형 단면을 가지며 높이(h)가 17mm이다. 삼각 프리즘은 다공성 방풍벽 후방으로  $x/H=1$ 되는 지점에 위치시켰다. 실험중 자유흐름속도( $U_0$ )는 12.5cm/s로 고정하였는데 다공벽의 높이(H)를 기준으로한 레이놀즈 수( $Re_H$ )는 약 3,460이다. 또한 다공벽이 설치된 지점에서의 국부 레이놀즈 수( $Re_x$ )는 약  $1.1 \times 10^5$ 이다. 다공벽과 삼각 프리즘이 난류경계층속에 잠기게하기 위하여 측정부 입구에 직경이 2.5mm인 트리핑 와이어(tripping wire)를 부착하였다.

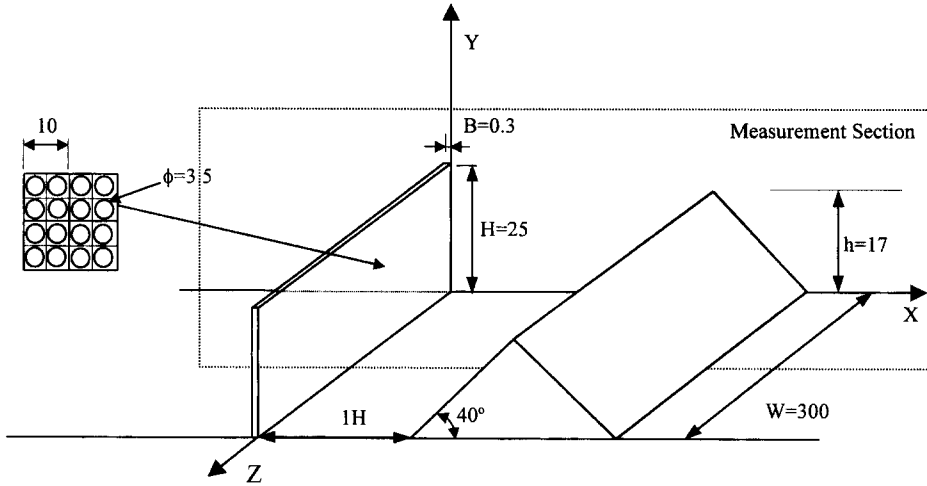


Fig. 1 Schematic diagram of fence and prism model with a coordinate system (unit:mm).

Fig. 2는 다공성 방풍벽이 설치된 위치 ( $x/H=0$ )에서 생성된 경계층의 속도분포를 나타낸 것이다. 운동량 두께 (momentum thickness :  $\theta$ )에 기초한 난류 레이놀즈 수 ( $Re_\theta$ )가 약 750으로 저난류 레이놀즈 수 난류경계층의 유동특성을 보여주고 있다.

속도장 측정에 사용된 2-프레임 PTV 실험장치는 레이저 시트, CCD 카메라, 프레임 그래버와 연산용 컴퓨터로 이루어져 있다. 유속측정을 위한 산란 입자로 밀도 ( $\gamma$ )가 1.02이고 평균직경이  $150\mu\text{m}$ 인 폴리스티렌입자를 작동유체에 첨가하였다. 속도 측정은 회류수조의 중앙 종단면에서 주유동방향으로 연속된 3개의 측정구간 (크기 약  $90 \times 80\text{mm}$ )에서 수행되었다. 각 단면에서  $512 \times 480$  픽셀의 256 회색 계조 (gray level)를 갖는 입자영상 350장을 연속적으로 얻었다. 한장의 입자영상을 even field와 odd field로 이미지 분리를 하게되면 1/60초의 시간간격을 갖게된다. 따라서 하나의 입자 영상으로부터 유동속에 놓여있는 입자들의 순간 속도벡터를 구할 수 있다. 이 각각의 순간 속도 벡터들을 수치 해석에서처럼 일정 격자계 ( $50 \times 50$ )로 보간한 후, 350장의 순간속도장을 앙상블 (ensemble) 평균하여 평균속도장 및 난류강도 결과를 얻었다. 또한 평균 속도장 결과로부터 다음의 식을 이용하여 와도를 계산하였다.

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

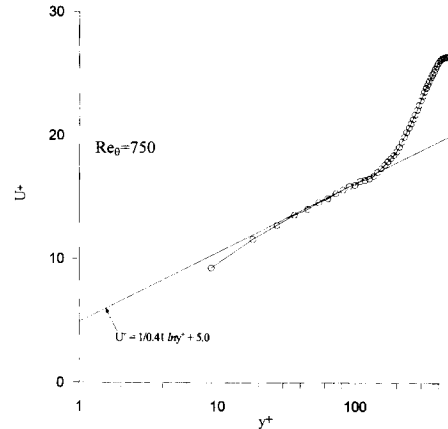


Fig. 2 Logarithmic velocity profile at the fence location.

난류운동에너지는 비압축성 유동의 등방성 (isotropy) 가정으로부터 다음과 같이 계산하였다.

$$\overline{w^2} = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2}) \\ T_k = \frac{1}{2} \rho (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \approx \frac{3}{4} \rho (\overline{u^2} + \overline{v^2})$$

따라서, 다공벽의 끝부분이나 삼각 프리즘의 정점과 같이 유동 박리가 일어나는 지점부근에서는 유동의 등방성 가정이 맞지 않으므로 계산된 난류 에너지와 실제 운동에너지가 약간 다를 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 350장의 순간속도장으로부터 앙상블평균하여 구한 평균속도장을 나타낸 것이다. 여기서 보면 다공벽의 설치로 인하여 방풍벽 후방에서 속도가 크게 감소함을 관찰할 수 있다. 다공벽이 없는 삼각프리즘의 경우, 전방에서 접근하는 유동이 프리즘의 전면을 타고 올라가면서 가속되다가 프리즘의 정점에서 박리됨을 보여준다. 반면 전방에 다공벽을 설치한 경우에는 다공벽과 삼각 프리즘사이 영역에서 뚜렷한 속도 감소효과를 볼 수 있다. 다공벽이 있을 경우와 없을 경우의 프리즘 후방에 생기는 박리 기포를 비교하여보면 삼각 프리즘의 설치로 후방에 형성되는 재순환 영역의 크기가 감소하고 내부의 역방향 속도성분의 크기도 작아진다. 전방에 다공벽이 설치된 경우 재순환영역의 길이는 약 4H로 다공벽이 없는 경우보다 0.6H정도 짧다.

이것은 프리즘 상단부분이 방풍벽에서 박리된 전단 유동 내부에 위치하게 되어 프리즘 후방의 박리전단유동의 속도성분이 감소되기 때문으로 보인다.

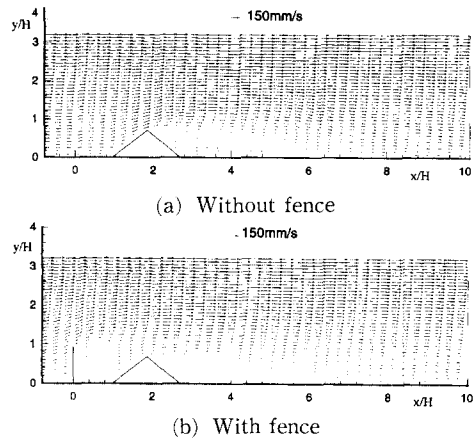


Fig. 3 Comparison of mean velocity vector fields with and without the wind fence.

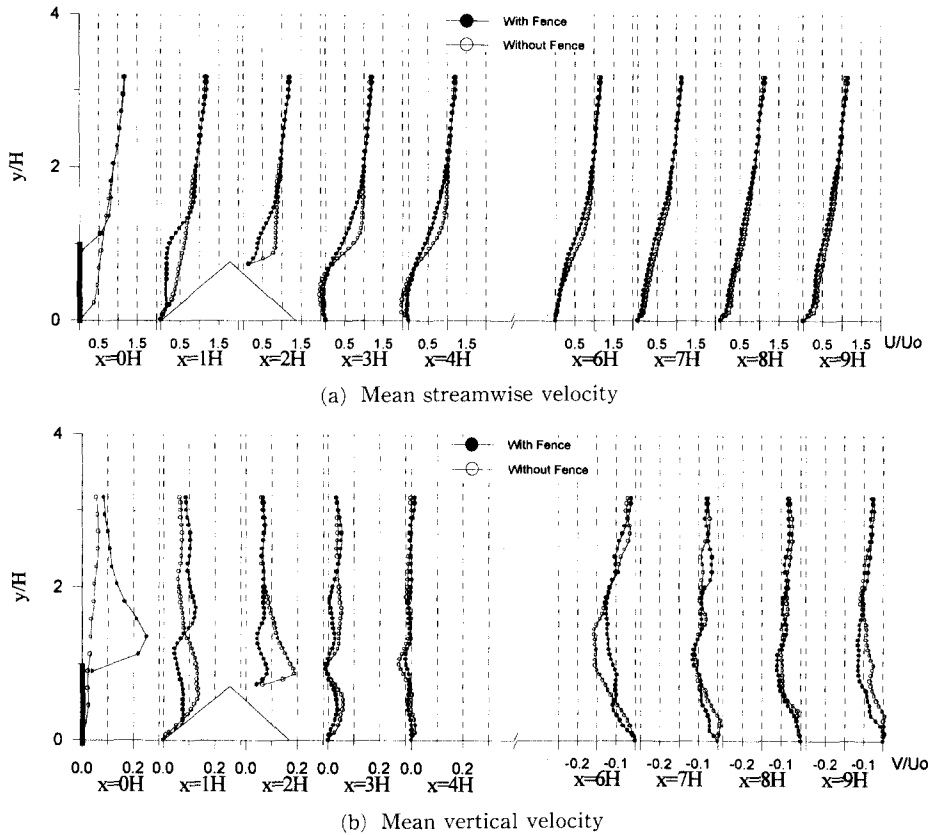


Fig. 4 Variations of mean streamwise and vertical velocity profiles.

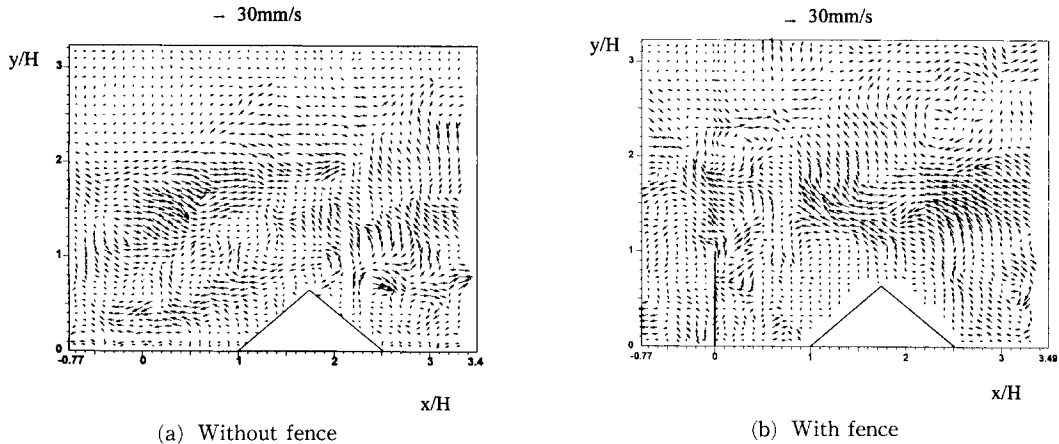


Fig. 5 Comparison of instantaneous fluctuation velocity vector field.

속도장 결과로부터 몇 개의 하류위치에서 추출한 주유동방향과 수직방향의 평균속도분포를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서보면 다공벽과 프리즘 사이 영역에서 양 방향 속도성분 모두 뚜렷한 감소효과를 보여주고 있다. 그러나, 프리즘후방의 재순환영역 이후에서는 다공벽에 의한 속도 감소효과는 프리즘 앞부분과 비교하여 상대적으로(약 20%의 속도감소 효과) 작음을 알 수 있다. 또한 주유동방향 평균속도를 비교하여보면 삼각 프리즘의 전방에서는 다공벽에 의한 전단 유동의 발달로 인하여 다공벽이 없는 경우보다 큰 속도 구배를 보이나 삼각 프리즘 후방영역에서는 방풍벽이 없는 경우가 오히려 더 큰 속도 구배를 보여주고 있다. 이것은 프리즘의 정점에서 박리되어 발달하는 전단 유동이 방풍벽 꼭대기로부터 생성된 박리전단유동의 영향으로 폭이 넓어지기 때문이다.

수직방향 속도성분의 경우 전방에 설치된 다공벽의 영향으로 프리즘의 전방에서 다공벽이 없는 경우에 비해 약 40%이상의 속도 감소효과를 보여주고 있다. 재순환 영역내부의 재부착지점부근에서는 두 경우 모두 음의 수직방향 속도성분을 갖는다. 수직방향 속도성분의 증가는 삼각 프리즘의 정점보다 다공벽의 끝에서 더욱 크게 나타났다. 프리즘의 정점주위는 다공벽으로부터 박리된 전단유동속에 놓이게 되므로 이곳에서 수직방향 속도성분은 다공벽이 없을 경우에 비해 반 이하(약 40%)로 감소하였으며 속도구배 역시 작게 나타났다.

Fig. 5는 순간속도장에서 평균속도장을 뺀 변동속도장을 나타낸 것이다. 다공벽이 없는 경우에는

프리즘의 정점으로부터 큰 규모의 와동이 유출됨을 알 수 있다. 다공벽이 프리즘 전방에 설치되게 되면 프리즘 표면 주위에서의 속도변동 성분이 다공벽이 없는 경우에 비해 현저히 줄어든다. 다공벽높이(H)보다 높은 자유흐름 유동(displacement flow)영역에서 속도 변동성분이 상대적으로 증가됨을 볼 수 있다. 즉 다공벽이 없을 경우 전단유동층이  $y/H=2$ 까지였으나 다공벽의 설치로 인하여 전단층이 바닥으로부터  $y/H=3$  높이이상으로 확장되어진다. 프리즘 표면근처에서의 속도 변동성분의 감소는 압력 변동의 감소를 야기하므로 다공성 방풍벽을 설치함으로써, 압력교란에 의한 야적입자의 비산을 줄일 수 있음을 유추할 수 있다.

Fig. 6은 각 위치단면에서의 주유동방향과 수직방향 속도성분의 난류강도 분포를 나타낸 것이다. 다공벽끝에서 박리된 전단유동의 영향으로 방풍벽보다 높은 위치에서 주유동 속도성분의 난류강도는 국부최대값을 가지며 프리즘 전면에서 큰 난류강도 구배를 보여주고 있다. 이 최대값을 갖는 위치는 하류로 나아가면서 윗방향으로 올라가며, 난류강도 구배는 완만해진다. Kiya & Sasaki<sup>(11)</sup>처럼 주유동방향 난류강도의 최대값위치를 전단유동의 중심으로 가정하면 유동이 하류로 나아가면서 다공벽의 설치로 인해 전단유동의 중심이 보다 윗쪽으로 올라감을 알 수 있다. 이것은 앞에서 언급하였던 변동속도장 결과와 잘 일치한다. 방풍벽이 없는 경우에는  $x/H=4$ 위치에서 프리즘으로부터 발달한 전단유동에 의하여  $0.5 < y/H < 1.5$ 영역에서 뚜렷한 난류강도의 최대값을 관찰할 수 있으나, 다공벽의 설

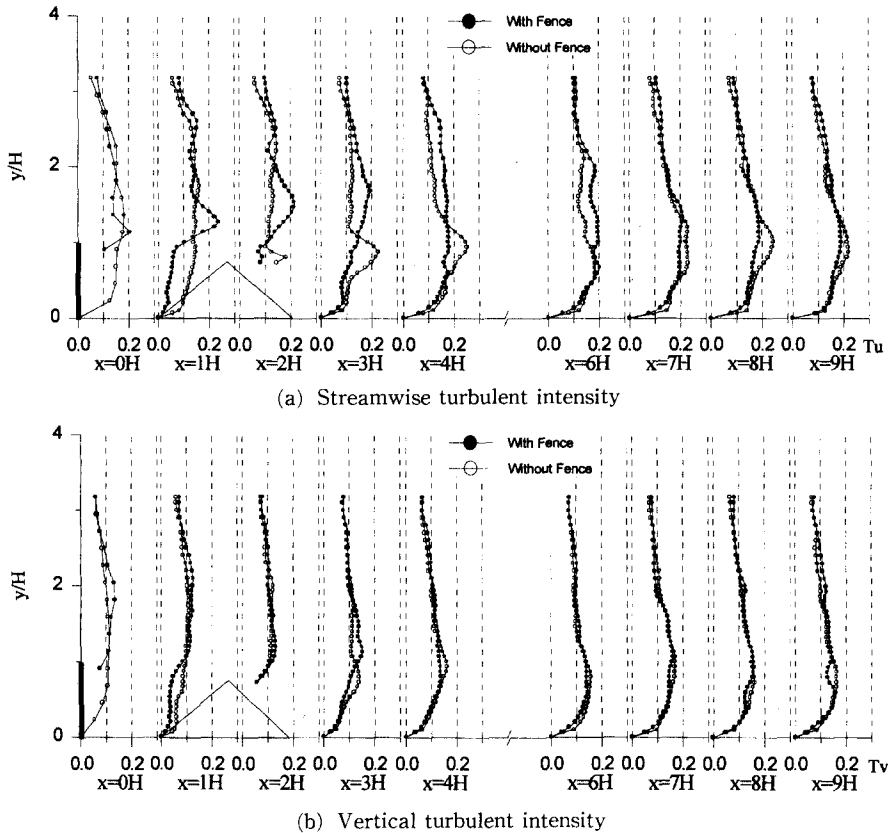


Fig. 6 Variations of streamwise and vertical turbulent intensity profiles.

치로 전단유동의 폭이 넓어지고 높이방향으로 거의 일정한 난류강도분포를 보여주고 있다. 다공벽과 프리즘사이 영역에서의 난류강도를 비교하여보면 다공벽 설치의 영향으로 주유동방향과 수직방향 속도성분의 난류강도 모두 감소함을 알 수 있다. 이것은 다공벽이 평균속도뿐만 아니라 난류강도도 함께 감소시키는 효과가 있음을 나타낸다.

수직방향 속도성분의 난류강도는 주유동방향의 난류강도와는 달리 방풍벽과 프리즘사이 영역에서만 난류강도의 감소효과를 크게 보여주고 나머지 측정 영역에서는 다공벽의 유무에 상관없이 거의 유사한 분포를 보여주었다. 즉, 다공벽 설치가 수직방향 난류강도에 미치는 영향은 프리즘 전방영역을 제외한 대부분의 영역에서 그리 크지 않음을 알 수 있다. 재순환영역을 지난  $x/H=7$ 이후의 하류에서는 주유동방향과 수직방향의 난류강도분포가 거의 유사한 형태를 가지고 있다. 이것은 난류구조가 등방성 구조로 변화하고 있음을 나타낸다. 또한

Ranga 등<sup>(2)</sup>이 밝힌 방풍벽 후방에서의 난류강도의 2차 국부 최대값은 본 연구에서는 나타나지 않았다. 이것은 삼각 프리즘의 설치로 인하여 방풍벽만 있는 경우와는 달리 후류의 유동특성이 변화함을 의미한다.

방풍벽 설치유무에 따른 난류운동에너지 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 전체적인 난류운동에너지분포는 주유동방향 난류강도와 유사한 결과를 보여주고 있다. 프리즘 전방에서는 다공벽으로부터 생성, 발달하는 박리전단유동의 영향으로 다공벽 높이보다 조금 높은 위치에서 큰 난류운동에너지가 존재하는 반면, 다공벽의 하류 영역에서는 다공벽이 없는 경우와 비교하여 낮은 난류운동에너지를 갖는다. 삼각 프리즘 정점에서는 방풍벽이 없는 경우와 비교하였을때 난류운동에너지가 약 50%정도 감소하였다. 또한 난류강도 결과에서와 같이 다공벽 높이보다 낮은 영역에서는 난류운동량이 크게 감소하며 프리즘을 지나면서 일정 크기 이상의 난류에너

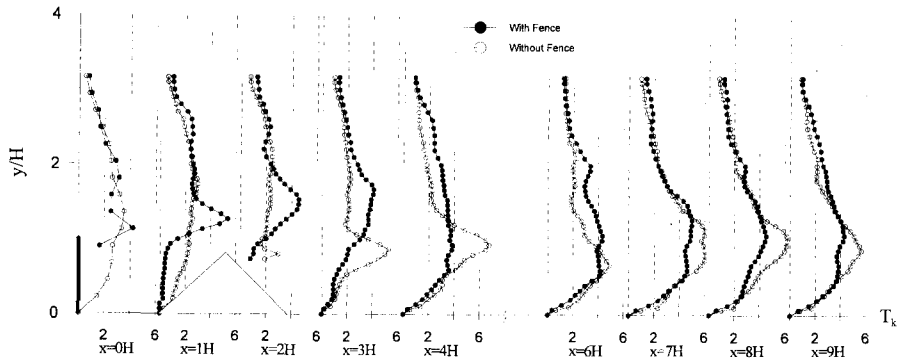


Fig. 7 Comparison of turbulent kinetic energy profiles.

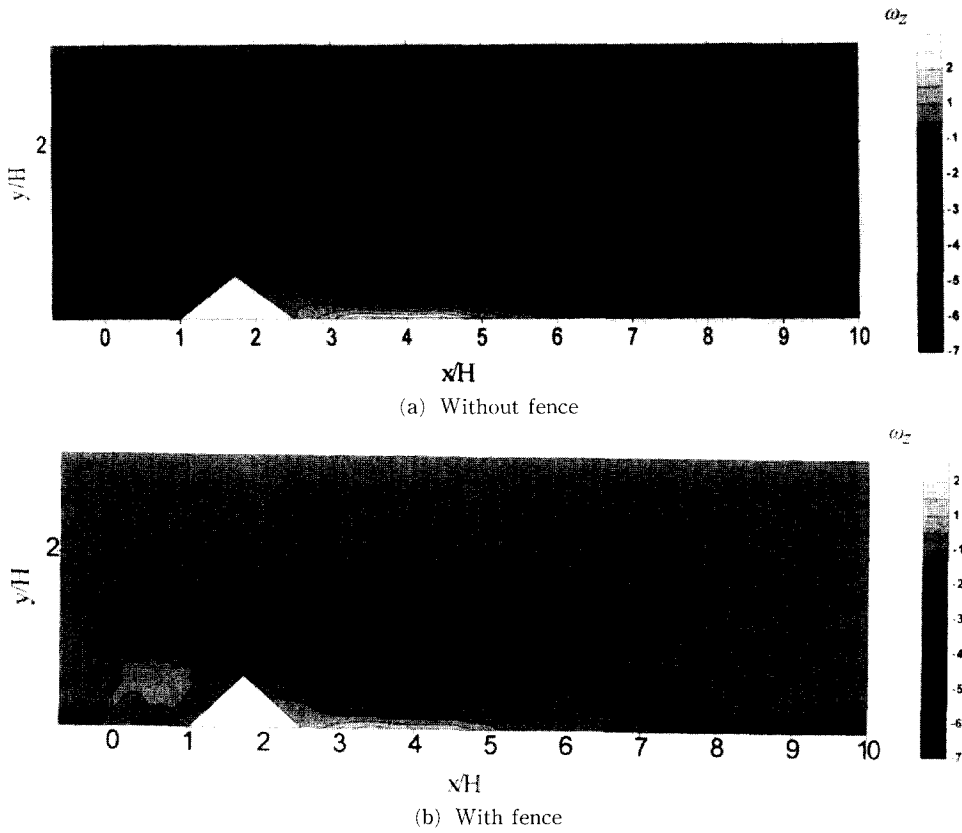


Fig. 8 Contour plot of vorticity  $\omega_z$ .

지를 갖는 전단유동영역이 넓어짐을 볼 수 있다. 프리즘 하류영역( $x/H=3$ )에서는 삼각 프리즘만 있을 경우와 비교하여 난류운동에너지의 최대값이 약 30%정도 줄어들었다.

Fig. 8은 다공벽과 삼각 프리즘 주위 유동의 z방향 와도분포( $\omega_z$ )를 비교한 결과이다. 여기서 보면

바닥면을 따라 발달해온 난류경계층 내부에 음의 와도가 존재하며 다공벽 설치 유무에 상관없이 프리즘 후방에는 시계방향으로 회전하는 음의 와도가 존재함을 알 수 있다. 다공벽이 프리즘 전방에 놓여있을 경우에는 다공벽의 끝부분에서 최대 와도값을 가지며, 방풍벽이 없는 경우에 비해 박리전단유

동의 혼합특성과 변동속도성분이 감소하여 프리즘의 정점 부분에서 상대적으로 매우 작은 와도값을 갖는다. 재순환영역 내부에서의 와도분포를 비교하여 보면 다공벽의 끝에서 박리된 전단 유동이 삼각 프리즘의 정점에서 발달하는 전단 유동층과 만나면서 전단 유동영역의 폭이 넓어지며 와도의 크기는 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 다공벽과 프리즘사이에는 반시계방향으로 회전하는 양(+)의 와도영역이 넓게 존재하고 있다. 이상의 결과들로부터 방풍벽을 야적원료전면에 설치하게 되면 야적원료 정점부근에서의 원료비산을 크게 억제할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 난류경계층내부에 잠겨있는 다공도  $\varepsilon=38.5\%$ 의 방풍벽과 삼각 프리즘 주위의 속도장을 2-프레임 PTV 시스템으로 측정하여 다공벽설치가 프리즘주위의 유동장에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다.

프리즘 전방에 다공벽을 설치함에 따라 다공벽높이보다 낮은 프리즘 전후방영역에서 평균속도 및 변동 속도가 크게 감소하였다. 또한 방풍벽이 없는 경우와 비교하여 재순환 영역의 크기가 감소하며 난류강도와 난류운동에너지의 감소도 현저하였다. 특히 야적입자의 비산이 가장 크게 일어나는 프리즘 정점부근에서 주유동방향 난류강도, 난류운동에너지 및 와도를 다공벽이 없는 경우에 비해 절반이하로 감소시켰다. 따라서 다공성 방풍벽을 야적원료 전면에 설치함으로써 입자 비산을 매우 효과적으로 억제할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 교육부지정 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) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Borges, A. R. and Viegas, D. X., 1988, "Shelter Effects on a Row of Coal Piles to Prevent Wind Erosion," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* Vol. 29, pp. 145~154.
- (6) 박 철우, 성 승학, 이 상준, 1996, "다공성 펜스 후류속에 놓인 삼각 프리즘 표면압력에 관한 연구," 대한기계학회 '96년도 춘계학술대회논문집(B) pp. 213~217.
- (7) 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.
- (8) Durst, F. and Rastogi, A. K., 1980, "Turbulent Flow over Two-Dimensional Fences," *Turbulent Shear Flow 2* (Ed. Bradbury et al.), Berlin, Springer-Verlag, pp. 218~231.
- (9) 김 형범, 백 승조, 이 상준, 1996, "2차원 다공벽 후류유동의 실험적 연구," 대한기계학회 '96년도 추계학술대회논문집(B) pp. 531~536.
- (10) Kiya, M. and Sasaki, K., 1983, "Structure of a Turbulent Separation Bubble," *J. Fluid Mech.*, Vol. 137, pp. 83~113.