

〈논 문〉

다공성 방풍펜스 후방에 놓인 삼각프리즘의 표면압력특성에 관한 풍공학적 연구

박 철 우* · 이 상 준**

(1997년 2월 24일 접수)

Wind Engineering Study on the Surface-Pressure Characteristics of a Triangular Prism Located Behind a Porous Fence

Cheol-Woo Park and Sang-Joon Lee

Key Words : Porous Fence(다공벽), Triangular Prism(삼각프리즘), Wind Engineering(풍공학), Atmospheric Boundary Layer(대기경계층)

Abstract

The effects of porous wind fence on the pressure characteristics around a 2-dimensional prism model of triangular cross-section were investigated experimentally. The fence and prism model were embedded in a neutral atmospheric surface boundary layer over the city suburb. In this study, various fences of different porosity, back fence, inclination angle of prism and location of additional back prisms were tested to investigate their effects on the pressure and wall shear stress of the prism surface. The fence and prism had the same height of 40mm and Reynolds number based on the model height was $Re=3.9 \times 10^4$. The porous fence with porosity 40% was found to be the best wind fence for decreasing the mean and pressure fluctuations on the prism surface. By installing the fence of porosity 40%, the wall shear stress on the windward surface of prism was largely decreased up to 1/3 of that without the fence. This indicates that the porous fence is most effective to abate the wind erosion. Pressure fluctuations on the model surface were decreased more than half when a back fence was located behind the prism in addition to the front fence. With locating several back prisms and decreasing the inclination angle of triangular prism, the pressure fluctuations on the model surface were increased on the contrary.

1. 서 론

바람에 의해 야적된 원료의 표면으로부터 원료 입자들이 떨어져 나와 움직이게 되는 입자의 비산

*회원, 포항공대 대학원 기계공학과

**회원, 포항공대 기계공학과

은 원료의 손실 뿐만이 아니라 주변 환경을 오염시키는 공해의 주요 요인이 되고 있다. 이러한 비산 문제를 해결하기 위해서는 실제의 대기 환경을 모사한 풍공학적 연구가 수행되어야 한다. 본 연구에서는 원료의 비산방지 대책의 일환으로 원료야적장 주위에 설치될 방풍펜스와 야적 원료 표면압력 사이의 상호관계를 조사하였다.

분말 입자의 비산은 지표면 가까이의 유동특성, 특히 표면압력의 변동성분과 난류전단응력등의 영향을 크게 받으며 비산과 이들간의 관계를 밝히는 연구들이 많이 시도되고 있다.⁽¹⁾ 이와 같은 연구에서는 지표면 주위의 유동특성 및 역학적인 상사조건을 만족시키는 축소된 형태의 대기경계층을 풍동내에 모의 생성시켜야 한다.⁽²⁾ Borges & Viegas⁽³⁾는 비산에 직접 영향을 주는 물리량인 지표면 가까이에서의 평균유속과 난류전단력을 측정하여 단순야적모형 주위의 비산억제 장치의 효율성을 검토하였다. Plate⁽⁴⁾는 평활 지역의 바람에 대하여 방풍펜스의 방풍효과가 크게 나타남을 밝혔다. 또한 Perrera⁽⁵⁾는 방풍펜스 후미에 형성되는 재순환 버블은 다공도가 증가함에 따라 사라지고 작은 다공성 펜스에서도 차폐(shelter)효과를 얻을 수 있음을 밝혔다. 방풍펜스의 후류유동은 입사하는 바람의 방향에 민감하며 그 영향은 방풍펜스의 형상비에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다.⁽⁶⁾

Seginer & Sagi⁽⁷⁾는 2차원 방풍벽에 작용하는 항력과 모멘트를 방풍벽 전후의 압력차와 난류전단력의 변화를 측정하여 계산하는 방법을 제시하였고, Ranga 등⁽⁸⁾은 방풍펜스 자체에 작용하는 항력이 펜스의 높이와 다공도의 변화에 따라 영향을 받음을 밝혔다.

한편, 야적원료 표면으로부터 미세 입자를 이탈하게 하는 비산력은 표면 주위 유동의 상대속도와 마찰속도 특성과 관계를 가지고 있으며 이는 곧 야적원료 표면 부근의 압력변동(pressure fluctuation)과 밀접한 관련을 가지게 된다. 표면압력은 야적원료 주위 유동, 특히 와류(vortex)나 박리(separation) 등에 의해 크게 변화하게 되나 이들 사이의 상관관계는 아직 정량적으로 규명되지 않고 있으며 여러가지 경험식들을 사용하여 비산량을 예측하고 있다.^(9,10) 압력변동은 표면 박리가 일어나는 위치 부근에서 주로 불규칙한 정점(peak)을 가지며 큰 규모의 와에 의하여 유도되는 박리점 부근에서 더욱 예리한 정점이 나타난다.⁽¹¹⁾

Ogawa 등⁽¹²⁾은 반원형 프리즘에 작용하는 표면 압력신호를 스펙트럼분석하여 유속과의 상호관계를 구하였으며, 표면압력변동값이 접근하는 유동의 난류강도와 밀접한 관련이 있음을 밝혔다. 또한 Tieleman⁽¹³⁾은 다양한 난류경계층 속에 놓인 사각프리즘의 표면압력특성을 연구하였으며 표면압력변동은 입사하는 유동의 난류특성에 크게 영향을 받

음을 모형과 현장실험을 통해 확인하였다.

방풍펜스에 관한 기존 연구의 대부분은 펜스 주위의 유동장 해석을 주로 다루고 있으며 대기경계층 내에 놓여진 모형의 표면압력에 미치는 영향에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 수평방향의 속도감소와 전단응력의 분포를 측정된 결과⁽¹⁴⁾를 바탕으로 모형의 표면압력 분포를 측정함으로써 원료비산의 메커니즘을 해석하고자 한다. 본 연구에 앞서 수행된 선행 연구⁽¹⁵⁾에서는 평활 지형(plain terrain)에 해당하는 대기경계층 속에 놓여있는 방풍펜스의 다공도, 높이 등이 후방에 놓여있는 삼각프리즘의 표면압력에 미치는 영향을 연구하였다. 연구 결과 방풍효과를 얻기 위해서는 다공도 $\varepsilon=40-50\%$ 의 펜스를 야적모형 높이 이상으로 설치하여야 함을 밝혔다. 본 연구에서는 도시 외곽(city suburb)의 대기경계층 속에 놓여진 삼각프리즘의 표면압력에 미치는 다공성 방풍펜스의 효율성을 검토하고자 펜스의 다공도, 프리즘의 표면기울기, 후방펜스 및 후방 프리즘의 설치 등에 따른 야적모형의 표면압력 및 전단응력 변화를 실험적으로 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험은 풍공학 연구를 위해 개방형으로 개조한 POSTECH 중형 아음속풍동에서 수행되었는데, 개조된 시험부의 크기는 높이 0.6 m, 폭 0.72 m, 길이 6 m이다. 풍동시험부에 도시 외곽의 대기경계층을 생성시키기 위하여 풍동 시험부 입구에 와류 발생장치를 설치하고, 바닥에 직경 1.6 mm의 비닐 튜브를 10 cm간격으로 깔았다. Fig. 1은 풍동 시험부와 측정시스템을 나타낸 것이다.

Fig. 2는 피토 정압관과 정온형 열선유속계(TSI IFA100)를 사용하여 야적 모형이 놓일 위치인 시험부 입구로부터 4 m지점($X=0$)에서 측정된 대기경계층의 평균속도와 난류강도분포를 나타낸 것으로 야적 모형의 선단 위치($Y=0.04$ m)에서 난류강도는 약 10% 정도이었다. 주유동방향 평균속도의 수직방향분포는 도시 외곽(city suburb)에서의 전형적인 속도분포를 나타내며 멱법칙(power law)에서 지수 $n=0.22$ 에 해당한다.

$$\frac{U(y)}{U_o} = \left(\frac{y}{h}\right)^n$$

여기서 h 는 프리즘 모형의 선단 높이 0.04 m를

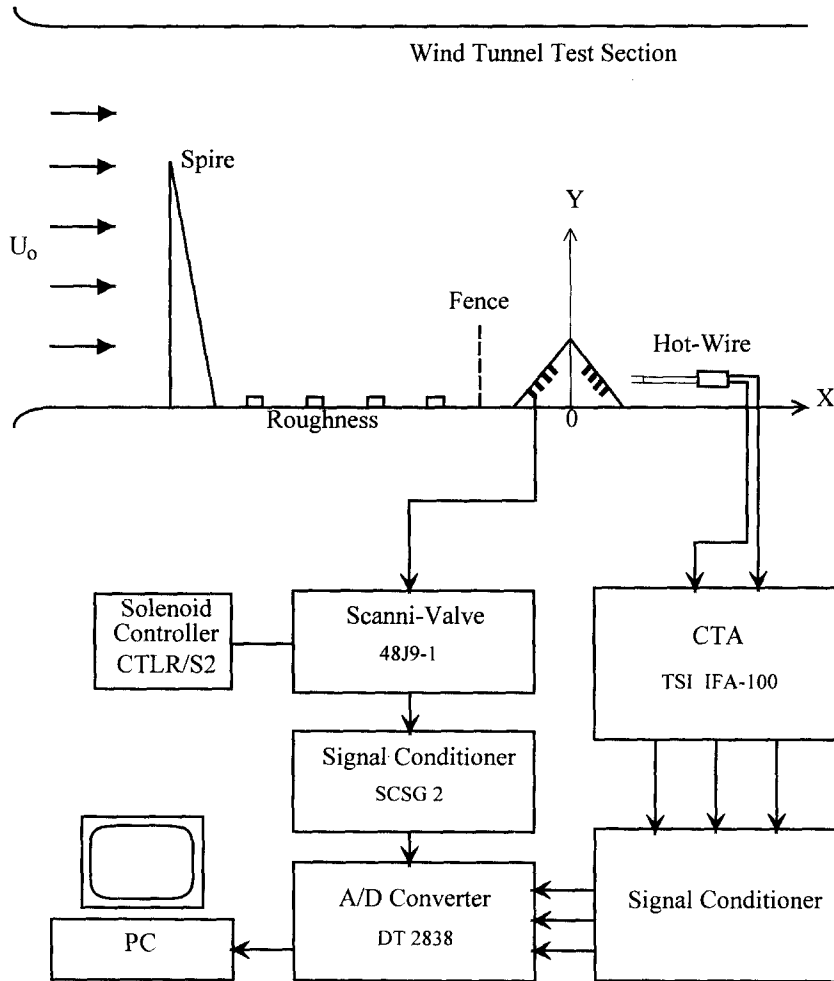


Fig. 1 Wind tunnel test section and measurement system

나타낸다. 야적된 원료 형상을 단순화시킨 2차원 삼각프리즘 모형은 40° 의 경사각을 갖도록 하였다. 표면압력을 측정하기 위해 삼각프리즘의 중간 위치에 표면을 따라 총 16개의 압력공을 5 mm간격으로 배치하였다.

압력 측정은 다점압력측정장치(Scannivalve 48J9-1)와 A/D 변환기(DT2838)를 사용하여 수행하였다. 모형 표면에서의 압력변동 신호는 연결 튜브를 따라 다점압력측정장치내의 압력변환기(PDCR22-1psid)로 전달되어진다. 압력변환기로부터 나온 전압신호는 200 Hz 저역(low-pass) 필터를 거쳐 노이즈를 제거한 후 A/D 변환기(DT2838)를 통해 디지털화하였다. 모형 표면의 압력공과 다점압력측정장치의 각 채널을 안지름

0.8 mm, 길이 300 mm의 비닐 튜브로 연결하여 튜브를 통과하는 동안에 압력신호의 동특성이 변하지 않도록 가능한 한 튜브내 체적을 작게 하였다. 압력 측정시 데이터는 각 채널마다 초당 500개의 비율로 샘플링하여 16,384개를 취득하여 평균하였으며, 솔레노이드 제어기(CTLR/S2)로 채널을 변경할 때 마다 약 10초정도의 압력회복 시간을 주었다.

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 실험 set-up을 나타낸 것으로 다공도가 서로 다른 5가지($\epsilon=20, 30, 40, 50, 65\%$) 방풍펜스를 설치하여 후방 펜스와 후방 프리즘의 존재 여부 및 프리즘의 표면기울기(θ)의 변화에 따른 표면압력특성과 전단응력의 변화를 측정하였다. 여기서 펜스의 높이(H)는 프

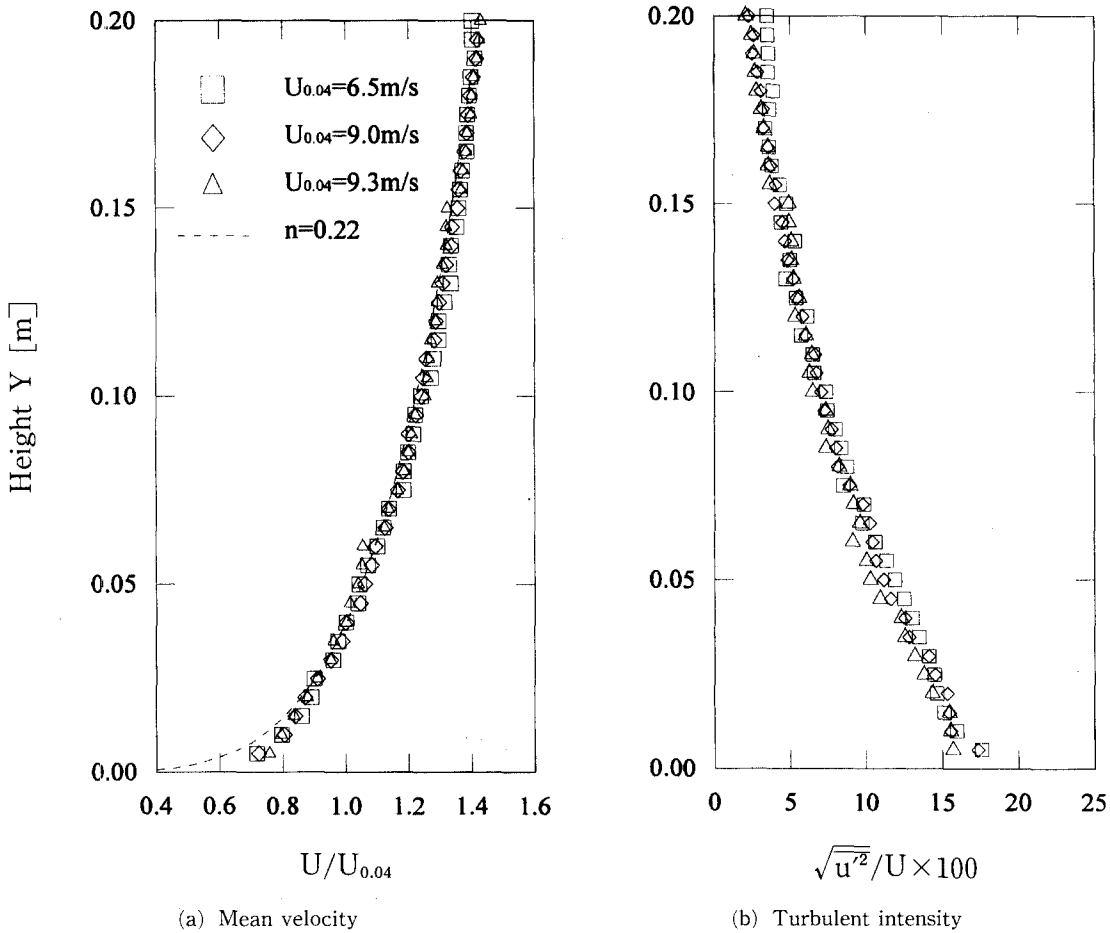


Fig. 2 Mean streamwise velocity and turbulence intensity profiles measured at X=0

리즘의 높이 ($h=40$ mm)와 같게 하였으며, 전후방 펜스로부터 삼각프리즘까지의 거리를 $G=60$ mm로 고정하였다.

프리즘 표면에서의 압력계수 C_p 는 측정된 표면 압력 p 와 기준 정압(static pressure) p_0 와의 압력 차를 프리즘 높이 (h)에서의 평균유속 $U_{0.04}$ 와 공기 밀도 ρ 로 무차원화시켜 다음과 같이 표현하였다.

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_{0.04}^2}$$

여기서 기준압력 p_0 는 삼각프리즘 후단의 끝점에서 수직방향으로 $Y=0.4$ m인 지점에서 피토 정압관을 설치하여 구하였는데, 이곳은 모형의 영향이 적은 비점성 유동 구간이다. 본 연구에서는 평균유속을 $U_0=14$ m/s로 맞추어 실험하였는데 이때 모형

높이에 기초한 레이놀즈수 ($Re=U_0 h/\nu$)는 $Re=3.9 \times 10^4$ 이었다. 이 경우 레이놀즈수는 천이구간에 속하지만 시간평균화된 압력계수에 대한 영향은 적은 것으로 판단되어 진다.

삼각프리즘 표면에 작용하는 전단응력을 측정하기 위하여 효율이 우수한 부착식 hot-film gauge (Dantec 55R47)를 정온형 열선유속계(CTA)에 연결하여 사용하였다. Ramaprian⁽¹⁶⁾ 등은 표면전단응력과 열선유속계의 전압출력 사이의 관계를 다음과 같은 식으로 표현하였다.

$$z_w^{1/3} = AE^2 + B$$

여기서 A와 B는 보정실험으로 구할 수 있는 상수들이며, E는 열선유속계로부터 측정하여 얻어진 전압값이다. 표면전단응력 측정에 사용되어진 hot

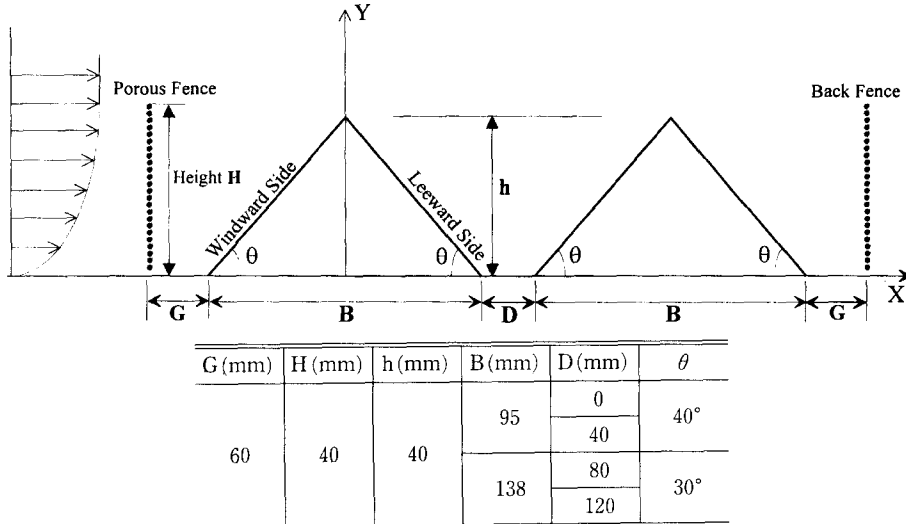


Fig. 3 Experimental set-up and coordinate system

film gauge의 보정은 작은 내경을 가진 Preston 튜브를 사용하여 수행하였다. 이때 Preston 튜브에서의 압력과 기준 정압과의 압력차를 측정 한 후 Patel⁽¹⁷⁾ 등이 제안한 방법으로 계산하여 전단응력을 구하였다. Hot-film gauge의 전압신호는 800 Hz 저역 (low-pass) 필터를 사용하여 한 지점에서 초당 2,000개의 비율로 샘플링하여 32,000개의 데이터를 얻었다. Fig. 4는 Preston 튜브를 사용하여 hot-film gauge를 보정한 결과를 나타낸 것으로 우수한 선형성을 보여주고 있다.

삼각프리즘 모형 표면에서의 마찰계수 C_f 는 부착식 hot-film gauge를 사용하여 구한 표면 전단응력을 모형 높이 (h)에서의 평균유속 $U_{0.04}$ 와 공기 밀도 ρ 로 무차원화시켜 다음과 같이 표현하였다.

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho U_{0.04}^2}$$

일반적으로 본 연구에서 다룬 유속 범위에서 C_f 값은 유속 변화에 따라 $Re^{-1/2}$ 에 비례하여 감소하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁸⁾

방풍펜스와 삼각프리즘 주위 유동의 정성적인 특성을 관찰하기 위하여 입자주입법 (tracer method)을 사용하여 유동을 가시화 하였다. 이 실험은 시험부의 크기가 폭 300 mm, 높이 200 mm, 길이 1200 mm인 소형 회류수조에서 수행하였는데 이때의 자유흐름속도는 12 cm/s이었다. 이 경우에도 삼각프리즘이 위치한 곳에서 실험조건에 맞는 경계

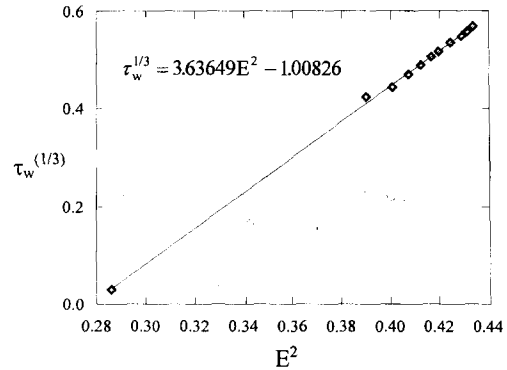


Fig. 4 Calibration result of hot-film gauge used for wall shear stress measurement

층을 생성시키기 위하여 시험부 입구쪽에 스파이어 (spire)를 부착시켰다. 유동가시화를 위하여 사용된 입자는 직경이 300 μ m인 폴리스티렌 (polystyrene)으로 상온에서의 비중은 약 1.02이며 사진기의 노출시간을 조절하여 입자의 유적선 (pathline)을 촬영하였다. 할로겐램프 (150W)에서 나온 빛을 절연필터, 광섬유케이블 및 원주형 렌즈를 지나게 함으로써 원하는 유동단면을 시트 (sheet) 형태로 조명하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동가시화

Fig. 5는 전방 및 후방펜스의 설치, 연속으로 배

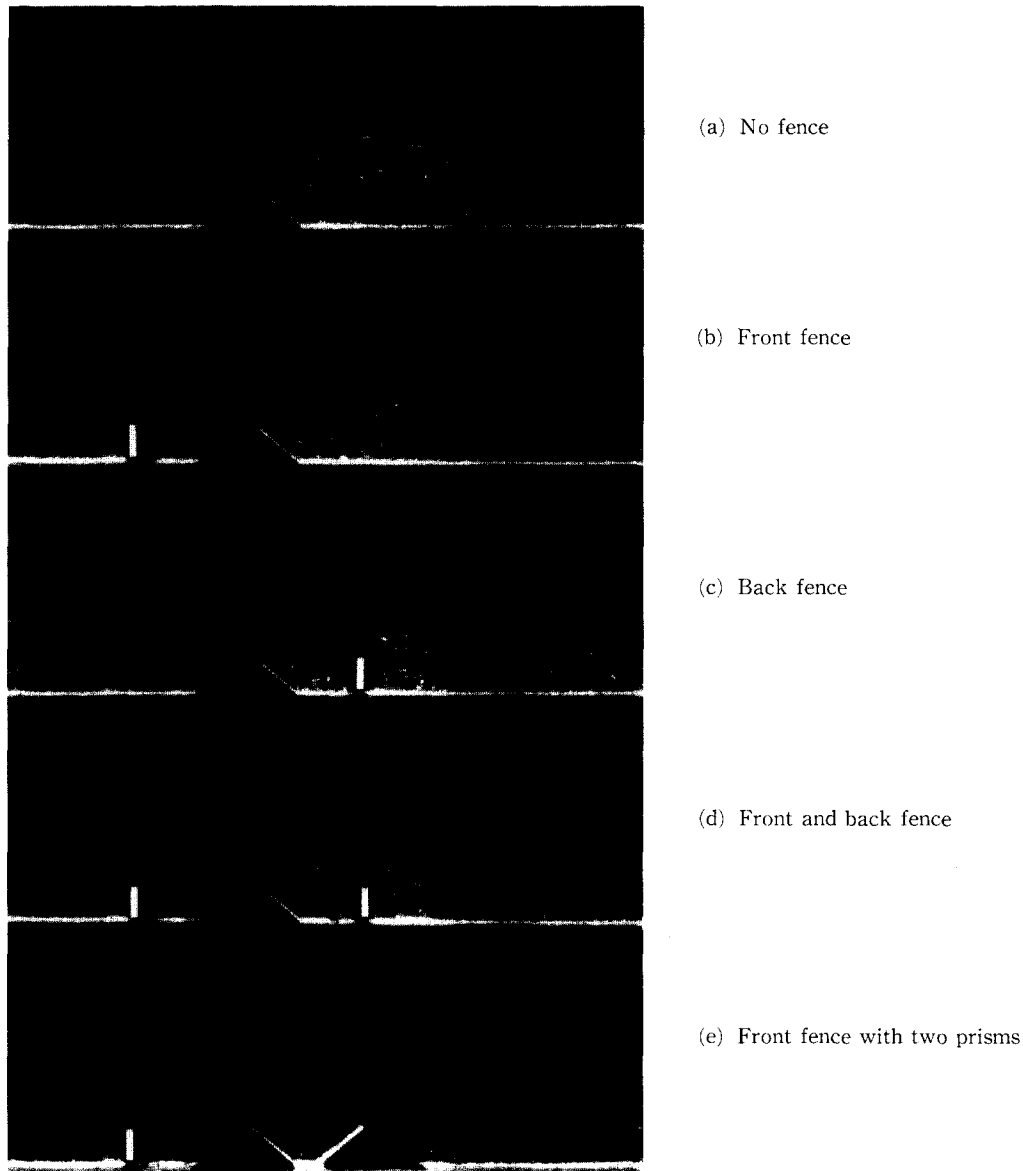


Fig. 5 Flow visualization around wind fence and triangular prisms

치된 프리즘의 경우에 대한 유동가시화 결과이다. 전방과 후방에 설치된 펜스는 다공도 $\epsilon=40\%$, 높이 $H=1.0$ h의 압력측정기와 동일한 펜스를 사용하였다. 시험부 앞에 설치된 스파이어와 거친 바닥면의 영향으로 펜스에 접근하는 자유흐름은 수직방향으로 속도구배를 가지고 있음을 볼 수 있다. 먼저 펜스가 설치되지 않은 경우를 보면 자유흐름이 프리즘 전면을 따라 가속된 후 프리즘 정점을 지나면서는 날카로운 모서리를 가진 물체 등에서 나타

나는 박리유동 특성이 관찰되고 있다. 또한 프리즘 후면에서는 역방향 속도성분을 가진 재순환유동과 프리즘 상단에서 박리되면서 유입되는 유동이 혼합되어 약한 주기성의 에디들이 유출되며 하류로 나아가고 있음을 볼 수 있다.

그러나 전방에 다공도 $\epsilon=40\%$ 의 펜스가 설치된 경우, 직접 프리즘에 맞닥드리던 유동이 전방펜스에 의해 차단되고 펜스의 상부에서 유동이 박리되어지게 되어 프리즘의 전면에서의 표면압력변동성

분이 감소되어짐을 유추할 수 있다. 그러나 프리즘의 후면에서는 프리즘과 펜스상부의 박리유동의 영향으로 역방향 재순환 유동이 관찰되어 지고 있다.

전방뿐만 아니라 프리즘 후방에도 다공도 $\epsilon=40\%$ 인 펜스를 설치할 경우, 프리즘 후면을 따라 역방향으로 순환하면서 접근하던 재순환 유동이 후방펜스에 의해 차단되어짐을 볼 수 있다. 그러나 프리즘 상단에서 박리된 유동의 일부가 후방펜스의 전면 상부에 부딪히면서 프리즘과 후방펜스 사이에 시계방향으로 순환하며 상부 전단유동 속으로 재유입되는 재순환 버블이 존재함을 관찰할 수 있다. 이러한 재순환 버블은 연속된 프리즘들 사이에서도 전단유동의 유입으로 인해 발생되어지고 있음을 관찰할 수 있다.

3.2 Fence 다공도의 영향

Fig. 6은 다공도(ϵ)가 서로 다른 펜스를 높이 $H=4\text{ cm}$ 로 설치했을 때 펜스 후방 $G=6\text{ cm}$ 지점에 놓여있는 삼각프리즘 모형 표면에서의 평균표면압력계수의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 보면 다공성 펜스를 설치함으로써 바람을 맞닥뜨리는 전면에서 평균표면압력을 크게 낮출 수 있음을 알 수 있다. 또한 모형의 전면에서는 방풍펜스의 다공도(ϵ)가 감소할수록 표면압력이 거의 선형적으로 감소하고 있다.

먼저 야적모형 전방에 펜스가 설치되지 않은 경우, 즉 $\epsilon=100\%$ 일 때는 자유흐름 유동이 모형 전면쪽에 부딪혀 모형 상단쪽으로 가속되어지면서 압력이 감소하며, 정점을 지난 직후 유동 박리현상이 일어나게 된다. 그러므로 모형 전면쪽의 표면압력은 전체적으로 양압을 나타내게 되며 박리가 일어난 정점 주위에서는 난류강도의 증가와 함께 음압을 가지게 된다. 모형 배면(leeward side)은 역방향 속도성분이 있는 느린 재순환 유동속에 놓여지게 되어 전체적으로 거의 일정한 음압 분포를 보여주고 있다.

다공도가 $\epsilon=40\%$ 인 펜스의 경우를 보면 작은 다공도를 가진 펜스에서 나타났던 차폐효과가 감소되며 유입 유동이 증가하게 되어 음압이 감소되며 배면에서도 전체적으로 재순환되는 유동의 영향으로 일정한 압력분포를 보여주고 있다. 펜스의 다공도가 40% 이상인 경우에는 차폐(shelter)효과가 감소하며 펜스와 프리즘 사이의 재순환유동이 억제되어 펜스 구멍(hole)을 통과하는 유동(bleed

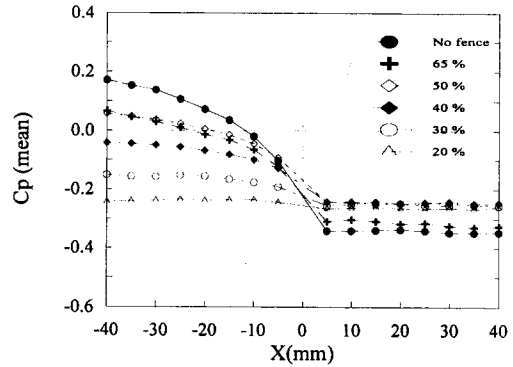


Fig. 6 Effect of fence porosity on the mean surface pressure distribution

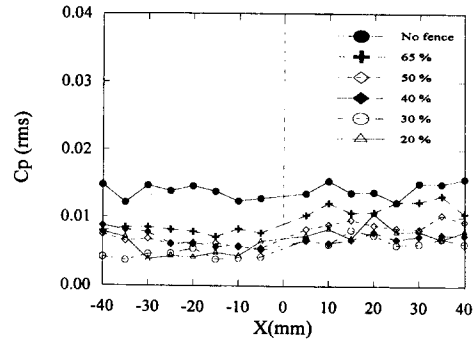


Fig. 7 Effect of fence porosity on the rms pressure distribution

flow)이 증가하게 되어 삼각프리즘 전면에서 압력이 증가하게 된다. 따라서 원료 비산을 야기시키는 음압이 감소하게 되어 비산방지에 효과적임을 알 수 있다. 그러나, 다공도가 $\epsilon=65\%$ 이상으로 증가하게 되면 프리즘 전면에서 양압 분포를 가지게 되어 표면압력변동에 의한 수직방향의 운동보다 빠른 주유동 방향 유속에 의해 수평방향의 항력이 크게 작용하게 되어 오히려 비산방지효과가 떨어지게 된다.

Fig. 7은 프리즘 모형 표면에서 측정된 압력변동 신호로부터 구한 rms 압력분포를 나타낸 것인데 다공도 $\epsilon=65\%$ 인 경우를 제외하고는 펜스 다공도(ϵ)에 따라 조금씩 차이가 있지만 대체로 유사한 분포형태를 가진다. 특히 다공도 $\epsilon=40\%$ 인 펜스의 경우 프리즘 전후면에서 거의 일정한 압력 rms 값을 보여주고 있다. 이것은 평활 지형에 해당하는 대기경계층에 대해 수행된 선행 연구⁽¹⁵⁾에서와 유사한 결과로 $\epsilon=40\%$ 인 펜스가 대기경계층의 형태에 크게 상관없이 비산억제에 효과적인 것으로 나

타났다. 또한 방풍펜스의 높이에 대한 영향도 선행 연구 결과를 활용하여 아적모형 높이와 같게 하였다. 따라서 이후의 연구에서는 $\epsilon=40\%$ 인 방풍펜스만을 사용하여 다른 여러 가지 인자들의 영향을 연구하였다.

3.3 후방 Fence의 영향

Fig. 8과 Fig. 9는 모형의 전방뿐만 아니라 후방 ($G=6\text{cm}$)에도 다공도 $\epsilon=40\%$ 를 가진 펜스를 설치하였을 경우 후방 펜스의 설치가 프리즘의 표면 압력에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 프리즘의 후방에만 펜스를 설치할 경우 프리즘 전면의 평균압력은 펜스가 전혀 설치되지 않은 경우와 유사하지만 배면에서는 프리즘 정점에서 박리되어 길게 재순환되며 모형 배면으로 유입되던 유동이 후방펜스에 의해 차단되어 상대적으로 낮은 음압 분포를 보여주고 있다. 그러나 전방 펜스만 설치된 경우에 비해서 전면에서는 높은 압력을, 후면에서는 보다 낮은 압력을 가짐으로써 비산역제 측면에서 효과적

이지 못함을 알 수 있다.

프리즘의 전방과 후방에 동시에 다공성 펜스를 설치한 경우에는 모형 정점을 지나 내려오던 유동이 후방펜스의 차단으로 인해 프리즘 배면으로 재순환됨에 따라 전방 펜스를 통과하면서 프리즘 전면을 따라 가속되던 유동을 전체적으로 막게 되어 모형 전면의 표면압력은 낮아지고 배면에서는 상대적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 9는 후방펜스가 압력 rms 분포에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 여기서 보면 후방에만 펜스가 설치된 경우, 모형 전면에서는 펜스가 전혀 설치되지 않은 경우처럼 펜스효과를 거의 볼 수 없으나 배면에서는 rms값을 현저히 감소시켜 전방 펜스만 있는 경우와 유사한 압력 rms 분포를 가진다. 또한 전방과 후방에 모두 펜스를 설치할 경우에는 전면에서의 평균 표면압력이 약간 감소하지만 rms값을 반 이상으로 줄일 수 있어 비산에는 매우 효과적임을 알 수 있다.

3.4 후방 프리즘의 영향

Fig. 10과 Fig. 11은 삼각프리즘 후방에 같은 형상의 프리즘을 하나 더 설치하였을 경우 첫번째 프리즘의 표면압력 특성이 어떻게 변화하는가를 나타낸 것이다. 여기서 보면 근접 후방에 두번째 프리즘을 설치함으로써 펜스를 통과한 후 첫번째 프리즘의 전면을 따라 올라가던 유동이 두 프리즘 사이에서 재순환하고 있는 유동에 의해 약간 정체되어지면서 전면의 평균 표면압력은 보다 낮아지게 된다. 또한 두번째 프리즘의 영향으로 전방프리즘 배면으로 재순환되던 유동에 기인하여 첫번째 프리즘의 배면에서도 낮은 압력계수값을 가지게 된다. Ferreira & Viegas⁽¹⁹⁾는 정현파(sine) 형상의 언덕 지형을 지난 유동은 두번째 언덕 까지의 거리가 약 $6h$ 이내이면 거의 같은 유동형태를 가진다고 하였는데, 본 연구에서도 두 프리즘 사이의 거리가 $0-3H$ 인 경우에는 거의 동일한 압력분포를 보여주고 있다.

Fig. 11은 후방에 설치된 두번째 프리즘까지의 거리가 압력 rms값에 미치는 영향을 보여주고 있는데 전방 프리즘만 설치된 경우보다 후방에 프리즘이 하나 더 설치됨으로써 상대적으로 높은 rms 압력값을 가지게 된다. 특히 두 프리즘 사이의 거리가 $D/H=2$ 인 경우 첫번째 프리즘의 전면과 배면에서 rms값의 변화가 크게 나타나고 있음을 보

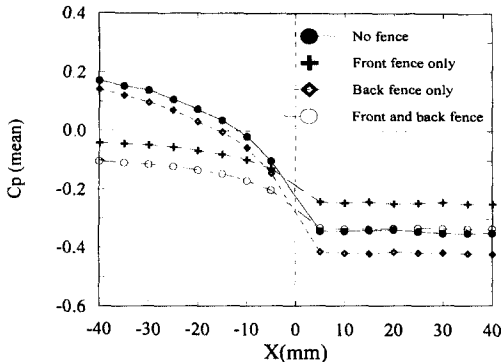


Fig. 8 Effect of back fence on the mean surface pressure distribution

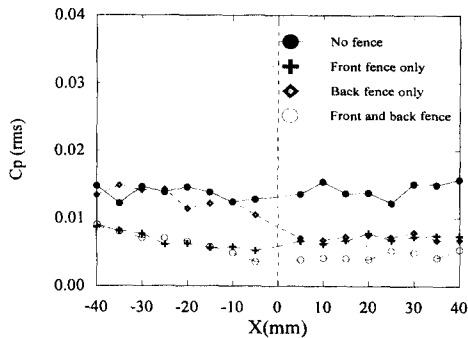


Fig. 9 Effect of back fence on the rms pressure distribution

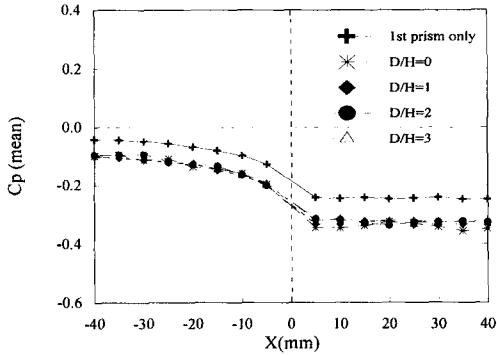


Fig. 10 Effect of second prism on the mean surface pressure distribution

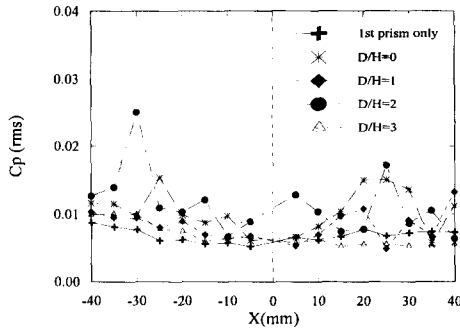


Fig. 11 Effect of second prism on the rms pressure distribution

여주고 있다.

다음으로 다공도 $\epsilon=40\%$ 인 다공성 펜스의 방풍 효과가 어느 정도 거리까지 영향을 미치는가를 알아보기 위하여 같은 형상의 삼각프리즘을 다단으로 설치한 후, 제일 뒷쪽에 놓인 프리즘의 표면압력을 측정하여 그 결과를 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다. 이때 각 프리즘 사이의 간격은 $H/3$ 로 하였다. 후방에 같은 형상의 프리즘들이 연속적으로 설치되는 경우에는 보통 프리즘과 프리즘 사이에 전단유동으로부터 유입되어 순환되는 재순환 유동이 존재하게 된다. 이와같은 재순환 유동의 영향으로 뒷쪽에 설치된 프리즘의 전면에서는 전체적으로 평균 표면압력계수 값이 감소하고 있다. 또한 배면에서도 뒷쪽 프리즘과의 사이에 존재하는 재순환 유동의 영향으로 전면의 표면압력과 거의 비슷한 압력계수 분포를 보여주고 있다. 전방에 설치되어진 펜스 상부에서 박리 되어진 유동은 각 프리즘 사이에서 재순환하며 유입되는 유동과 혼합되면서 하류로 나아감에 따라 운동량의 감소로 인해 약간 하강하

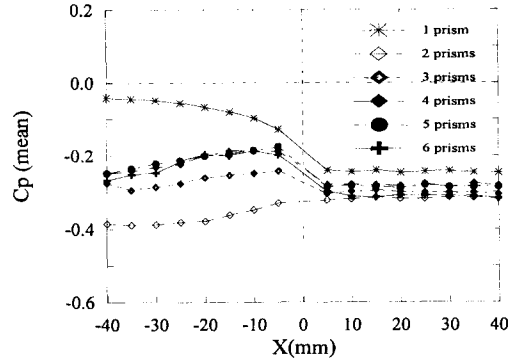


Fig. 12 Mean surface pressure distribution on the last prism model

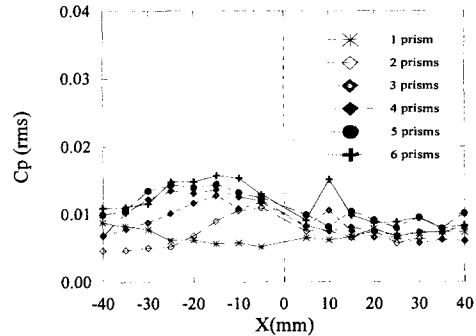


Fig. 13 Rms pressure distribution on the last prism model surface

계 된다. 여기서 보면 펜스 상단에서 박리된 전단 유동은 4-6번째 프리즘 부근에서 하강하고 있으며, 이 부근에 놓여진 프리즘 전면의 표면압력계수는 증가되어져 첫번째 프리즘의 표면압력과 유사한 분포를 보이게 된다.

또한 Fig. 13에 나타나 있는 것처럼 박리된 전단 유동이 하강하기 시작하는 영역에 놓여진 프리즘 전면에서는 상대적으로 높은 압력 rms값을 가지게 된다. 특히 6번째 프리즘의 배면에서 압력변동성분이 국부적으로 높은 값을 가짐을 보여주고 있다.

3.5 표면기울기의 영향

Fig. 14와 Fig. 15는 삼각프리즘의 표면기울기 변화가 표면압력특성에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 여기서 보면 삼각프리즘의 표면기울기가 $\theta=30^\circ$ 로 작은 경우가 $\theta=40^\circ$ 의 경우에 비해 전반적으로 약간 낮은 평균압력 값을 보여주고 있다. 이것은 다공도 $\epsilon=40\%$ 의 펜스를 통과한 후 프리즘 전면을 따라 올라가는 유동이 프리즘의 기울기가 작

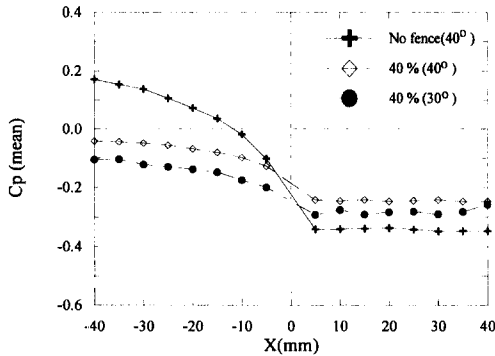


Fig. 14 Effect of prism inclination on the mean surface pressure distribution

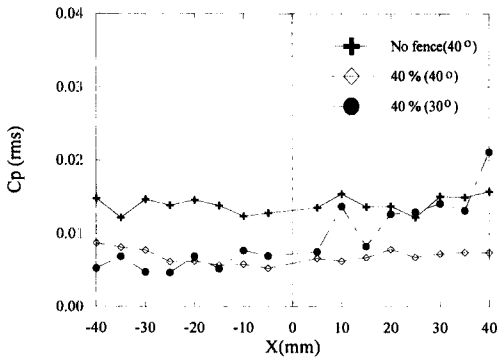


Fig. 15 Effect of prism inclination on the rms pressure distribution

아질수록 맞닥뜨리는 거리가 멀어지고 가속되는 정도가 낮아지게 되기 때문에 생각되어진다. 또한 프리즘 배면에서도 모형 선단을 지나 박리되면서 길게 재순환하며 배면으로 유입되던 유동이 상대적으로 낮은 기울기 때문에 적어지게 되어 낮은 압력계수 값을 가지게 된다. 그러나 펜스가 설치되지 않은 경우 보다는 모형 선단에서 박리되는 유동의 각도가 작으며 상대적으로 재순환영역의 길이가 줄어들기 때문에 프리즘 배면에서는 높은 압력계수 값을 가진다.

Fig. 15는 프리즘의 표면기울기가 표면압력의 rms값에 미치는 영향을 보여주고 있는데 프리즘 전면에서는 표면기울기에 거의 상관없이 전체적으로 낮은 rms 압력값을 보여주고 있다. 그러나 배면에서는 표면기울기가 $\theta=30^\circ$ 인 경우 프리즘 배면이 상대적으로 높은 난류강도를 가진 재순환 유동 속에 놓이게 되어 $\theta=40^\circ$ 인 프리즘에 비해 높은 rms압력 값을 보여주고 있다. 특히 배면 끝부

분에서는 펜스가 설치되지 않은 경우 보다 압력 rms값이 높게 된다. 이것으로부터 야적원료의 비산을 억제하기 위해서는 가능한 한 야적원료의 표면기울기를 증가시키는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

3.6 표면압력의 스펙트럼

Fig. 16은 다공도 $\epsilon=40\%$, 높이 $H=4$ cm인 펜스를 삼각프리즘 전방 및 후방 $G=6$ cm 지점에 설치한 후 삼각프리즘의 전면과 배면에서 연속적으로 취득한 압력신호를 분석하여 구한 파워스펙트럼 밀도(PSD, Power Spectral Density) 분포를 나타낸 것이다. 압력신호는 저주파수 영역의 특성 변화를 관찰하기 위하여 50 Hz 지역(low-pass) 필터링한 후 330초동안 연속적으로 초당 100개의 비율로 취득하였다. Richardson⁽²⁰⁾은 다공도가 $\epsilon=50\%$ 인 방풍벽의 후류유동의 압력과 항력신호를 분석하여 낮은 주파수영역, 즉 0.14 Hz 이하에서 압력파워가 항력파워에 비해 크게 감소되어짐을 밝혔는데, 본 실험에서도 다공성 펜스($\epsilon=40\%$)의 설치로 인해 낮은 주파수 영역에서 전체적인 압력파워의 감소가 나타나고 있다. 또한 0.5 Hz 정도까지는 높은 압력PSD를 가지고 있다가 그보다 높은 주파수영역에서 압력PSD가 급격히 감소하게 되며 몇 개의 peak들만 나타나는데, Ogawa⁽²¹⁾는 2차원 펜스 후류 실험을 통해 이것이 전방에서 접근하는 유동이 박리면 근처에서 높은 난류강도를 가지고 있고 여기에서 유도된 에디들의 영향 때문이라고 밝혔다.

Fig. 16을 보면 다공성 펜스의 설치는 프리즘 전체 표면에서 저주파수 영역의 압력PSD를 크게 감소시킴을 알 수 있다. 전방펜스 외에 후방펜스의 추가적인 설치가 프리즘 전면의 압력PSD에 미치는 영향은 그리 크지 않으나 모형 정점으로 갈수록 전방펜스만 있는 경우보다 압력PSD가 조금씩 감소하고 있다. 그러나 프리즘 배면에서는 전방펜스만 설치한 경우에 비해 후방펜스의 추가적인 설치의 영향으로 압력PSD가 크게 감소되어짐을 관찰할 수 있는데, 이것은 프리즘 뒷쪽에서 역방향으로 재순환되던 유입유동의 일부가 차단되어지기 때문이다. 따라서 프리즘 전방과 후방에 동시에 펜스를 설치할 경우 삼각프리즘 표면에서 원료비산을 야기시키는 압력에너지를 크게 감소시킬 수 있으므로 비산억제에 효과적임을 알 수 있다.

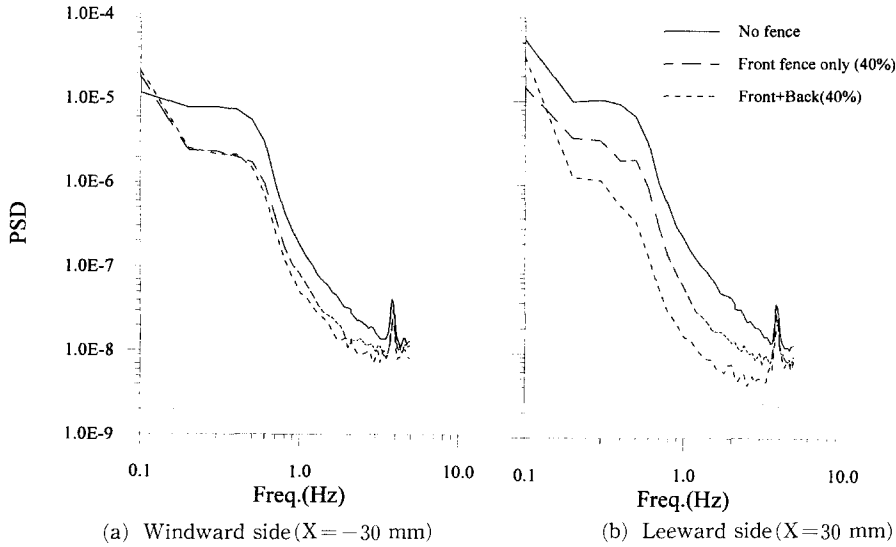


Fig. 16 Power spectral density distribution of pressure signal

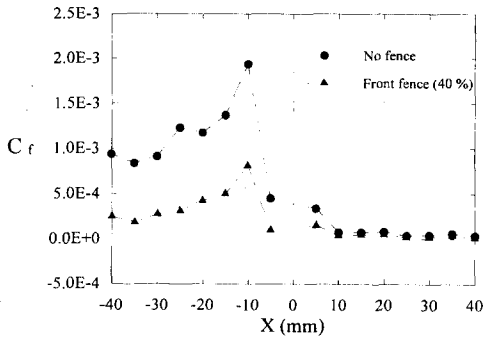


Fig. 17 Comparison of skin friction coefficient on the model surface

3.7 표면전단응력

Fig. 17은 삼각프리즘 전방에 다공도 $\epsilon=40\%$, 높이 $H=4$ cm인 펜스를 거리 $G=6$ cm에 설치하였을 때 삼각프리즘 표면에서 측정된 표면전단응력으로 부터 구한 마찰계수 분포를 나타낸 것이다. 먼저 펜스가 설치되지 않았을 경우 프리즘 전면에서 빠른 속도로 접근하던 유동이 모형 전면을 따라 가속되어지면서 압력구배가 커지게 되어 마찰계수는 점차 증가되어진다. 그러나 모형의 정점에 못미친 $X=-10$ mm 부근에서는 표면압력이 양압에서 음압으로 바뀔때 따라 전단응력이 급격히 감소하게 되어 정점 부근에서는 오히려 낮은 전단응력 값을 가지게 된다. 정점 부근을 제외한 프리즘 배면의 대부분은 모형 정점에서 박리되어 펼쳐진 긴 재순

환유동 속에 놓이게 되어 느린 속도의 재순환유동과 접하게 되어 압력구배가 거의 일정하므로 펜스 설치 유무에 상관없이 거의 일정한 표면전단응력 분포를 보여주고 있다.

다공성 펜스가 전방에 설치될 경우 프리즘 전면에서의 표면마찰계수는 펜스가 설치되지 않은 경우에 비해 약 1/3 정도로 크게 감소하고 있다. 이것은 전방에서 직접 프리즘 전면에 맞닥뜨리던 유동이 펜스가 설치됨에 따라 속도가 감소하게 되어 상대적으로 낮은 전단응력값을 가지게 되기 때문이다. 또한 펜스 구멍을 통과하는 bleed유동이 전면을 따라 가속되기 때문에 표면마찰계수는 펜스가 없는 경우와 유사하게 모형 전면을 따라 증가하는 형태를 보이고 있다. 따라서 프리즘 전방에 설치한 다공성 펜스는 원료 비산의 주요인으로 작용하는 표면전단응력을 크게 줄일 수 있어 비산 억제에 매우 효과적임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 도시 외곽(city suburb) 지형에 해당하는 대기경계층내에 놓여진 2차원 삼각프리즘 모형 앞에 다공성 펜스를 설치하고, 이 방풍펜스의 다공도, 표면기울기, 후방 펜스 및 후방 프리즘의 설치 등에 따른 야적 모형의 표면압력 및 표면전단응력의 변화를 실험적으로 연구 하였으며 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 다공 방풍펜스 중 다공도 $\varepsilon=40\%$ 의 펜스가 도시 외곽 지형에 해당하는 대기경계층 하에서 삼각프리즘 표면에 작용하는 평균압력 및 압력rms 값 감소에 가장 효과적이었다. 이 다공도 $\varepsilon=40\%$ 의 펜스를 전방에 설치함으로써 프리즘 전면에서 비산의 주요인으로 작용하는 표면마찰계수를 $1/3$ 정도로 줄일 수 있었다.

(2) 프리즘 전후방에 동시에 펜스를 설치할 경우, 펜스가 설치되지 않은 경우에 비해 프리즘 표면에서의 압력 rms 값을 절반 이하로 감소시켰다. 또한 프리즘의 표면기울기는 $\theta=40^\circ$ 인 경우가 30° 의 경우에 비해 평균압력 및 압력rms 값을 낮출 수 있어서 비산 억제에 효과적이었다.

(3) 근접 후방에 같은 형상의 프리즘이 연속적으로 설치될 경우에는 평균압력은 감소하지만 후방 프리즘에 의해 재순환되는 유동의 영향으로 전체적으로 높은 rms 압력 값을 갖는다.

후 기

본 연구는 포항제철 연구과제와 첨단유체공학연구센터의 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Xuan, J. and Ye, W., 1993, "Wind Tunnel Modeling of Dust Emission and Deposition in Lower Atmosphere: Similarity Principles," *Proc. Third Asia-Pacific Symposium on Wind Engineering*, pp. 1053-1058.
- (2) Cermak, J. E., 1987, "Advances in Physical Modeling for Wind Engineering," *J. Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 113, No. 5, pp. 737~756.
- (3) Borges, A. R. and Viegas, D. X., 1988, "Shelter Effects on a Row of Coal Piles to Prevent Wind Erosion," *J. Wind Eng. & Industrial Aero.*, Vol. 29, pp. 145~154.
- (4) Plate, E. J., 1971, "The Aerodynamics of Shelter Belts," *Agric. Meteorol.*, Vol. 8, pp. 203~222.
- (5) Perrera, M. A. E. S., 1981, "Shelter behind Two-Dimensional Solid and Porous Fences," *J. Wind Eng. & Industrial Aero.*, Vol. 8, pp. 93~104.
- (6) Bradley, E. F. and Mulhearn, P. J., 1983,

- "Development of Velocity and Shear Stress Distribution in the Wake of a Porous Shelter Fence," *J. Wind Eng. & Industrial Aero.*, Vol. 15, pp. 145~156.
- (7) Seginer, I. and Sagi, R., 1972, "Drag on a Windbreak in Two-Dimensional Flow," *Agric. Meteorol.*, Vol. 9, pp. 323~333.
- (8) 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. & Industrial Aero.*, Vol. 29, pp. 155~163.
- (9) Gillette, D. A., 1974, "On the Production of Soil Wind Erosion Aerosols Having the Potential for Long Range Transport," *J. Rech. Atmos.*, Vol. 8(3/4), pp. 735~774.
- (10) Owen, P. R., 1964, "Saltation of Uniform Grains in Air," *J. Fluid Mech.*, Vol. 20, pp. 225~242.
- (11) Peridier, V. J., Smith, F. T., and Walker, J. D. A., 1991, "Vortex-induced Boundary-layer Separation, Part2. Unsteady Interacting Boundary-layer Theory," *J. Fluid Mech.*, Vol. 232, pp. 133~165.
- (12) Ogawa, T., Nakayama, M., Murayama, S. and Sasaki, Y., 1991, "Characteristics of Wind Pressure on Basic Structures with Curved Surfaces and Their Response in Turbulent Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 38, pp. 427~438.
- (13) Tieleman, H. W., 1993, "Pressures on Surface-Mounted Prisms: The Effects of Incident Turbulence," *J. Wind Eng. & Industrial Aero.*, Vol. 49, pp. 289~300.
- (14) Lee, S. J., Baek, S. J. and Kim, H. B., 1996, "Velocity Field Measurement of Wake behind a 2-D Wind Fence by using 2-Frame PTV," *Proc. 4th Asian Symp. on Visualization, Beijing, China, May 15-18*, pp. 337~340.
- (15) 박철우, 성승학, 이상준, 1996, "다공성 방풍펜스가 대기경계층 내에 놓인 삼각프리즘 표면압력에 미치는 영향에 관한 연구," *대한기계학회 논문집*, Vol. 20(8), pp. 2670~2680.
- (16) Ramaprian, B. and Tu, S. W., 1983, "Calibration of Heat Flux Gage for Skin Friction Measurement," *J. Fluids Engineering*, Vol. 105, pp.

- 455~457.
- (17) Patel, V. C., 1965, "Calibration of the Preston Tube and Limitation on Its Use in Pressure Gradients," *J. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 185~208.
- (18) Jovic, S. and Driver, D., 1995, "Reynolds Number Effect on the Skin Friction in Separated Flows behind a Backward-Facing Step," *Experiments in Fluids*, Vol. 18, pp. 464~467.
- (19) Ferreira, A. D. and Viegas, D. X., 1995, "Wind Tunnel Simulation of the Adiabatic Flow Around a Set of Sinusoidal Hills," *9th ICWE*, pp. 311~321.
- (20) Richardson, G. M., 1989, "A Permeable Windbreak : Its Effect on the Structure of the Natural Wind," *J. Wind Eng. & Industrial Aero.*, Vol. 32, pp. 101~110.
- (21) Ogawa, Y. and Diosey, P. G., 1980, "Surface Roughness and Thermal Stratification Effect on the Flow Behind a Two-Dimensional Fence-I. Field Study," *Atmospheric Environment*, Vol. 14, pp. 1301~1308.