

다공성 방풍벽이 설치된 삼각프리즘 주위 유동장의 수치모사 Numerical Simulation of the Wind Flow Over a Triangular Prism with a Porous Windbreak

김 현 구 · 임 회 창¹⁾ · 이 정 목
첨단유체공학연구센터, 포항공과대학교
¹⁾환경공학부 대학원, 포항공과대학교
(1999년 1월 22일 접수, 1999년 3월 8일 채택)

Hyun Goo Kim, Hee Chang Lim¹⁾ and Chung Mook Lee
Advanced Fluids Engineering Research Center, Pohang University of Science & Technology
¹⁾*School of Environmental Engineering, Pohang University of Science & Technology*
(Received 22 January 1999; accepted 8 March 1999)

Abstract

The wind-flow characteristics over a two-dimensional triangular prism with a porous windbreak are numerically investigated. The geometry is a simplified model of large outdoor stack with a frontal wall-type windbreak which is used to prevent particle dispersion by reducing wind speed over stack surface. In the present numerical model, the RNG $k-\epsilon$ model, the orthogonal grid system and the QUICK scheme are employed for the successful simulation of separated flow. The predicted results are compared and validated with the associated wind-tunnel experiments. In addition, the trajectories of dispersed particles and their sedimentation characteristics are quantitatively investigated using a Lagrangian turbulent-dispersion model.

Key words : particle trajectory, porous windbreak, RNG $k-\epsilon$ model, triangular prism, turbulent dispersion

1. 서 론

화력발전소나 제철소에서는 다량 소비되는 원료를 노천 야적장에 방치해 두는데, 이때 바람의 응력(wind shear)에 의하여 비산되는 분말입자로 인하여 원료손실 및 환경피해가 발생하게 된다. 따라서 야적물 표면에서의 풍속을 감속시켜 입자비산을 억제하기 위해 방풍벽(windbreak)을 사용하게 된다. 그런데 기존연구에서는 다공성 방풍벽 주위의 유동장

해석을 주로 다루었으며 방풍벽이 대기경계층 내에 놓인 야적물 표면압력에 미치는 영향에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 최근 박철우 등(1996)과 박철우와 이상준(1997)은 야적물의 간략화 형상인 2차원 삼각프리즘을 지나가는 대기유동장의 풍동실험을 통하여 다공성 방풍벽 설치에 따른 삼각프리즘 표면압력의 특성변화를 연구하였다. 그런데 방풍벽 설치의 최적조건은 야적물의 형상과 배열, 방풍벽의 높이, 설치위치 및 다공도(porosity), 접근 유동조건 등에 의해 크게 변하기 때문에 일반적인 기준을 제

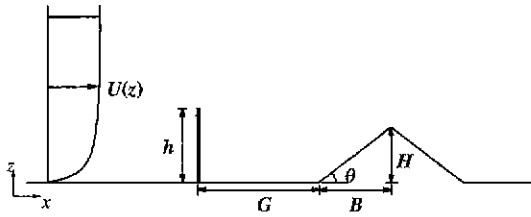


Fig. 1. Schematic diagram of the wind flow over a triangular prism with a frontal windbreak.

시하기는 어렵다. 이러한 측면에서 수치모델은 특정 형상의 야적물 및 유동조건 하에서 최적의 방풍벽 설치기준을 결정하기 위한 효과적인 설계 및 평가 도구이며 더욱이 풍동실험으로서는 파악하기 힘든 비산입자의 평균계적 및 난류분산에 의한 침전특성의 파악이 가능하다는 장점이 있다.

본 연구에서는 선형 풍동실험에서와 동일한 2차원 삼각프리즘 및 다공성 방풍벽으로 이루어진 형상물 주위를 지나가는 대기유동장을 수치해석하고 그 프리즘 표면에서의 압력분포의 예측결과를 측정값과 비교함으로써 수치모델을 검증하고자 한다(그림 1). 또한 유동장 해석결과를 입력조건으로 사용하여 야적물로부터 비산된 입자의 평균계적 및 난류분산을 수치모사함으로써, 궁극적으로는 다공성 방풍벽이 설치된 야적물 주위의 유동장 및 비산입자에 의한 풍환경 예측법을 제공하고자 한다.

2. 수치모델

2.1 대기유동 수치모델

본 연구에서는 복잡지형을 지나는 유동박리를 포함한 대기유동의 수치모사를 위해 개발된 동수력학(hydrodynamic) 유한체적(finite-volume) 수치모델을 사용하였다(김현구 등, 1997). 수치모델의 특징을 간단하게 살펴보면, 비압축성 유동장과 연계된 압력장을 해석하기 위해 SIMPLEC 압력보정법을 사용하며, 복잡한 지면형상을 효과적으로 고려하기 위하여 경계면 일치 좌표계(boundary-fitted coordinates)를 도입하였고, 인공수치확산(artificial numerical diffusion)에 의한 오차를 최소화하기 위하여 고차의 대류항 차분법인 QUICK scheme을 채택하였다. 그리고 난류모델로서는 유동박리를 포함하는 대기유동

장의 신뢰성 있는 예측이 가능한 것으로 검증된(Kim과 Patel, 1999) RNG $k-\epsilon$ 난류모델을 채택하였다.

대기 및 지면에서 열교환 과정이 없는 중립대기 하에서 점성 비압축성 난류유동의 지배방정식은 다음과 같이 연속 방정식과 운동량 방정식이다.

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0, \frac{\partial(U_i U_j)}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) - K |U| U_i \delta(x, x_j) \quad (1)$$

여기서 U_i 와 u_i 는 각각 x_i 좌표방향으로의 평균 및 변동유속이며, ρ 는 밀도, p 는 동압, ν 는 점도이다. 참고로 운동량 방정식 우변 마지막 항의 delta 함수는 방풍벽의 설치위치 $x=x_j$ 에서만 압력손실계수 K 가 값을 갖도록 한다. 위의 방정식이 해석 가능하기 위해서는 레이놀즈 응력 $-\overline{u_i u_j}$ 가 정의되어야 한다. 등방성(isotropic) 선형 난류를 가정하면 Boussinesq approximation에 의해 레이놀즈 응력은 다음과 같이 주어진다.

$$-\overline{u_i u_j} = 2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}; \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

여기서 $\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon$ 는 난류와점도(turbulent eddy viscosity)이고 S_{ij} 는 평균변형률 텐서(mean strain-rate tensor)이다. 난류와점도는 난류운동에너지($k \equiv \overline{u_i u_i}$) 및 그 소산률(ϵ) 전달방정식의 해로써 결정된다.

$$\frac{\partial(U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \overline{u_i u_i} S_{ij} - \epsilon$$

$$\frac{\partial(U_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) - \frac{\epsilon}{k} (C_1 \overline{u_i u_i} S_{ij} + C_2 \epsilon) \quad (3)$$

RNG $k-\epsilon$ 난류모델에서는 renormalization group theory를 통해 난류상수를 이론적으로 유도하였으며 그 값은 다음과 같다(Yakhot과 Orszag, 1986).

$$C_\mu = 0.085, \quad C_1 = 1.42 - C_{1R}, \quad C_2 = 1.68, \\ \sigma_k = 0.7179, \quad \sigma_\epsilon = 0.7179 \quad (4)$$

여기서 $C_{1R} = \eta(1 - \eta/4.38) / (1 + 0.015 \eta^3)$ 이며, $\eta = \sqrt{2S_{ij} S_{ij}} k / \epsilon$ 는 난류시간 척도와 평균변형률 척도의 비이다.

지표면에서는 다음과 같은 거친 지면에 대한 벽 법칙(wall function) 경계조건을 적용하였다. 아래에

서 u_* , z_0 는 각각 마찰속도 (friction velocity) 및 거칠기 높이 (roughness height)이며 κ 는 von Kármán 상수이다 (=0.41).

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}, \quad k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_D}}, \quad \varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z} \quad \text{at } z = z_p > z_0 \quad (5)$$

Kim *et al.* (1997)은 산지후면 박리유동의 수치모사에서 비직교격자계에 비하여 직교격자계가 수치확산 오차가 적음을 확인하였으므로, 본 연구에서도 수치확산 오차를 최소화하기 위해 직교격자계를 사용하였다.

2.2 다공성 방풍벽 수치모델

본 수치모델에서는 다공성 방풍벽을 모델링함에 있어 Wilson(1985)의 연구결과를 근거로 운동량 방정식에서 다공성 방풍벽에 의한 압력손실만을 고려하였다. Wang과 Tackle(1995)은 압력손실 외에도 다공벽에 의한 난류특성의 변화를 추가로 고려하였으나, Wilson과 Mooney(1997)은 이들이 오류가 있는 실측결과와 비교하였음과 수치계산 영역에 따라 수치해의 변화가 심하게 나타남을 지적하였으며, 현재로서는 다공성 방풍벽에 대한 정확한 수치모델이 확립되지 못한 실정이므로 보수적인 선택으로 압력손실만을 고려할 것을 추천하였다. 따라서 본 수치모델에서는 다공벽의 대표적인 물리작용인 압력손실만을 고려하였다. 즉, 운동량 방정식 (1)의 우변 마지막 항이 다공성 방풍벽에 의한 압력손실에 해당하며, 방풍벽의 다공도 (β)가 결정되면 그에 해당하는 압력손실계수 K 를 다음의 실험식 (Reynolds, 1969)으로부터 계산하여 수치모델에 적용하였다.

$$K = 0.52 (1 - \beta^2) / \beta^2 \quad (6)$$

다공도 β 는 다공영역 내 다공물질에 의한 차폐체적비 (volume porosity)로, 다공영역 외부의 유동영역에서는 $\beta = 1$ 이며 고체벽 (solid fence)인 경우는 $\beta = 0$ 의 값을 갖는다

2.3 입자거동 수치모델

본 연구에서는 비산입자를 구형 (spherical) 고체입자로 가정하고 다음의 Lagrangian 운동방정식을 시간에 대하여 적분하여 비산입자의 유동장 내 평균

이동속도를 예측하였다.

$$\begin{aligned} \rho_* \frac{dU_*}{dt} &= F_d + F_p + F_b + F_a \\ &= -\frac{3}{4} \rho C_D |U_* - U| (U_* - U) + \rho \frac{DU}{Dt} \\ &\quad + (\rho_* - \rho) g - \rho C_a \frac{dU_*}{dt} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 ρ , U 는 각각 이송유체의 밀도와 유속벡터이며 ρ_* , U_* 는 입자의 밀도와 이동속도벡터이다. g 는 중력가속도 벡터, C_a 는 부가질량계수 (= 0.5)이며 $D/Dt \equiv \partial/\partial t + U \cdot \nabla$ 는 전미분이다. 식 우변의 F_d , F_p , F_b , F_a 는 각각 상대속도에 의한 항력, 압력구배력, 밀도차에 의한 부력 그리고 부가질량력이나 본 경우에는 다른 힘들에 비하여 압력구배력이나 부가질량력은 무시할 정도로 작다. 항력계수는 주위유속과 입자속도의 상대속도와 입자직경을 기준으로 한 레이놀즈 수 $Re_* = |U - U_*| d_* / \nu$ 의 함수로 주어지는 다음의 실험식을 사용하였다.

$$C_D = \frac{24}{Re_*} (1 + 0.15 Re_*^{0.687}) \quad \text{for } Re_* < 200 \quad (8)$$

입자의 평균궤적은 식 (7)에서 구한 입자의 평균 이동속도를 적분하여 구하게 된다. 즉, $dX = dU dt$ 그런데 평균궤적만으로는 비산입자의 난류분산 (turbulent dispersion) 및 침전특성을 파악할 수 없으므로 환경영향평가에 필요한 충분한 정보를 제공하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Lu *et al.* (1992)의 난류분산 모델을 채택하였다. 이 모델에서는 입자거동을 평균유동 및 난류에 의한 변동성분으로 나누어 고려함으로써 입자의 무작위 (random) 거동까지도 예측이 가능하다. 즉, 적분시간척도 및 길이척도의 함수로 표현되는 난류유속의 자기상관함수로부터 난수발생 처리를 통하여 난류분산을 결정하게 된다. 본 연구에서는 Lu *et al.* (1992)과 동일한 모델 및 적분시간척도 및 길이척도의 정의를 사용하였으므로 이에 대한 설명은 해당논문은 참고할 것을 권고하는 바이다. 참고로 Lu *et al.* (1992)은 균질 등방성 난류유동 문제뿐만 아니라 재부착 유동인 후향계단 문제에서도 그들의 모델을 적용하여 만족할만한 성과를 얻었음을 보고하였다.

3. 연구결과

3.1 수치모델의 검증

실제 문제의 적용에 앞서 본 연구에서 채택한 박리유동 해석을 위한 $k-\epsilon$ 난류모델 및 다공성 방풍벽 수치모델을 검증하였다.

첫 번째로, 삼각프리즘 형상을 주위를 지나는 대기유동장에 대한 Arya와 Shipman (1981)의 풍동실험

결과 및 Mouzakis와 Bergeles (1991)의 수치해석 결과와 본 수치모델의 해석결과를 상호 비교하였다. 한 가지 언급할 사항은, 3.2절에서 사용된 박철우 등 (1996)과 박철우와 이상준 (1997)의 풍동실험은 입자비산의 지배적인 영향인 야적물 표면압력 변동특성의 측정에 관점을 두었기 때문에 평균 및 난류유속 측정이 수행되지 않았다. 따라서 본 절에서는 차선책으로 동일한 삼각프리즘 형상을 지나는 대기유동장의 풍동실험인 Arya와 Shipman (1981)으로 수

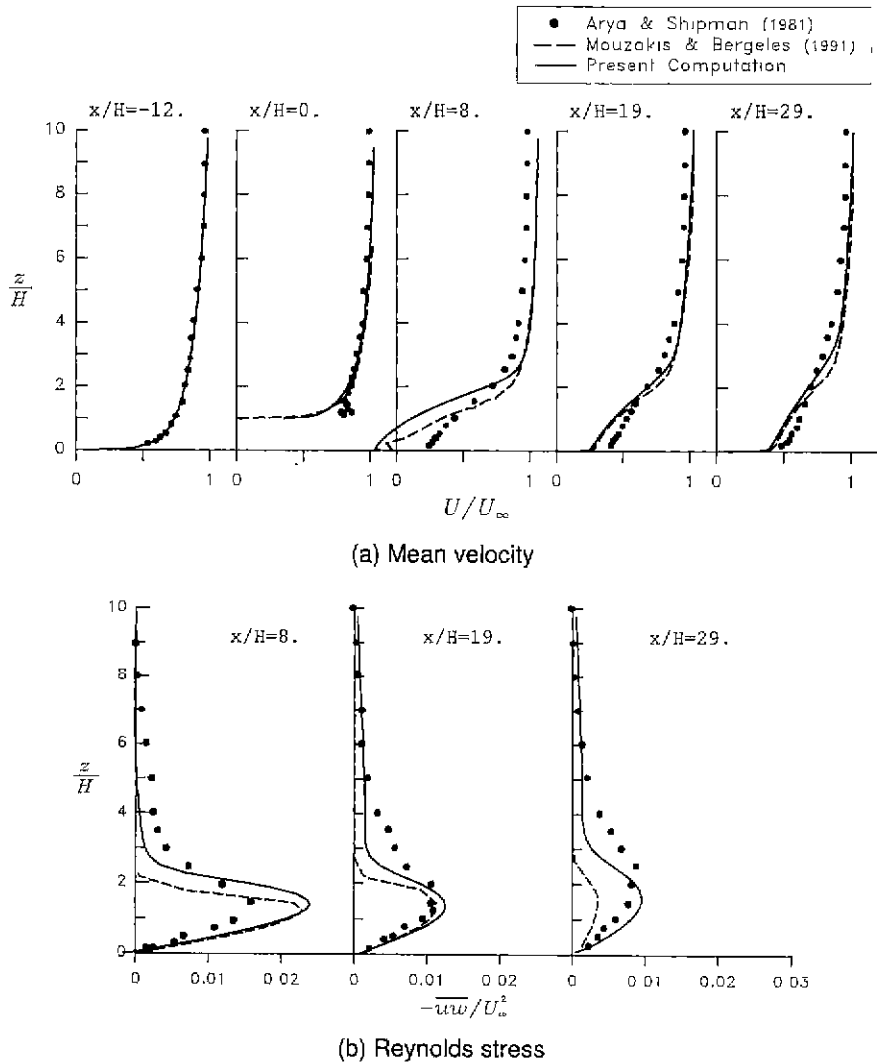


Fig. 2. Comparison of vertical profiles at various locations relative to the prism (Case I; symbols: experiments, lines: predictions).

치모델을 검증하였다.

그림 2는 수평방향 각 지점에서 수직방향 유속분포를 상호비교한 것으로 x -축의 양(+)방향은 주풍향과 일치하고 z -축은 수직방향 좌표계를 의미한다. 좌표계의 설정상 프리즘의 꼭지점은 $(x,z)=(0,H)$ 가 된다. 수평방향 평균유속 분포도를 도시한 그림 2(a)를 보면 수정 $k-\epsilon$ 난류모델을 채택한 Mouzakis와 Bergeles (1991)의 수치결과보다 RNG $k-\epsilon$ 난류모델 및 QUICK Scheme을 채택한 본 수치모델의 해석결과가 뚜렷한 개선효과를 보이고 있지는 않지만, 레이놀즈 응력 $-\overline{wv}$ 를 비교한 그림 2(b)에서는 Mouzakis와 Bergeles (1991)의 예측값이 $x/H=29$ 에서 급속히 감소한 반면 본 수치결과는 실험과 비슷한 크기의 단면 최대값을 예측하고 있음을 확인할 수 있다. RNG 난류모델을 사용한 본 수치해석에서는 박리영역의 크기를 $13.5H \times 1.8H$ (길이 \times 높이)로 예측하였는데, 이는 풍동실험에 의한 $13H \times 2.5H$ 와 근사한 값이다. 다만 실험에서 박리영역의 높이가 $2.5H$ 로 수치해석보다 크게 나온 것은 실험상의 문제점 때문인 것으로 추측되는데, 그 근거로 밑에 제시한 Hosker(1984)의 프리즘 길이 L 과 높이 H 를 변수로 한 박리공동(separation cavity) 높이에 대한 실험식에 의하면,

$$\frac{z_s}{H} = 1.0 + 1.5 \exp\left(-1.3 \frac{L}{H}\right) \quad (9)$$

박리영역의 높이가 $1.45H$ 로 역시 박리영역의 높이를 실험결과보다는 40% 정도 작게 예측하고 있다는 사실이다. 참고로 Mouzakis와 Bergeles (1991) 역시 $1.5H$ 의 높이를 예측하였다.

두 번째로, 다공성 방풍벽 수치모델을 평지에 설치된 단일 방풍벽($\beta=0.5$)을 지나가는 대기유동장의 실험도 실험인 Bradley와 Mulhearn(1983)의 측정결과와 비교검증하였다. 그림 3과 4에 도시한 바와 같이 수치예측한 무차원 수평방향 유속분포 및 수직방향 유속분포 모두가 실측과 잘 일치함을 확인하였다. 반면 Svensson과 Häggkvist(1990)의 캐노피(canopy) 모델을 사용한 계산결과는 실측과 상당한 차이를 보이고 있다. 본 연구에서는 계산의 편의상 Wang과 Tackle(1995)의 $k-l$ 난류모델 대신 동일한 다공영역 난류모델을 채택한 Svensson과 Häggkvist(1990)의 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다. 이 모델

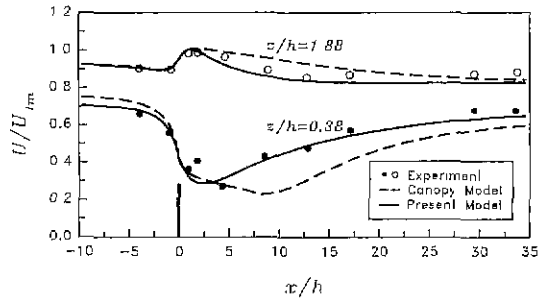


Fig. 3. Horizontal distributions of the normalized wind speed through the porous windbreak ($\beta=0.5$).

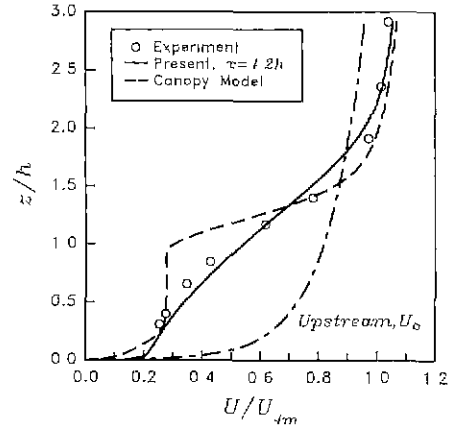


Fig. 4. Vertical profiles of the normalized wind speed at $x=4.2h$ ($\beta=0.5$).

은 농작물이나 삼림으로 이루어진 영역에 적용하여 그 타당성이 검증되었다. 그림에서 h 는 방풍벽의 높이(1.2m)이고 U_{4m} 는 지면으로부터 4m 높이(=3.33h)에서의 원방 접근유속값이다.

3.2 방풍벽이 설치된 삼각프리즘을 지나는 대기유동장의 수치예측

검증과정을 통하여 예측결과의 타당성이 확인된 수치모델을 박철우 등(1996)과 박철우와 이상준(1997)의 풍동실험에 적용하였다. 수치해석에 사용된 삼각프리즘 모델은 실험에서 사용했던 모형으로 표 1에 그 치수와 규격을 제시하였다. 삼각프리즘, 방풍벽의 설치위치 및 규격의 정의는 그림 1에 도시하였다. 수치해석에서 경계조건으로 사용된 원방

Table 1. Dimensions of a triangular prism and fence.

Parameters		Case 1	Case II
Reynolds number	Re_H	2.1×10^5	3.9×10^4
Prism height	H	15 cm	40mm
Fence height	h	$2/3H, H, 4/3H^*$	H
Base length	B	$1.28H$	$1.1875H$
Fence location	x_f	$-3.42H$	$\pm 2.6875H$
Inclination angle	δ	40°	40°
Porosity	β	0, 0.2, 0.5*, 0.65, 1.0	0.4
References		박철우 등 (1996)	박철우와 이상준 (1997)

Note: The upper asterisk means the representative dimensions

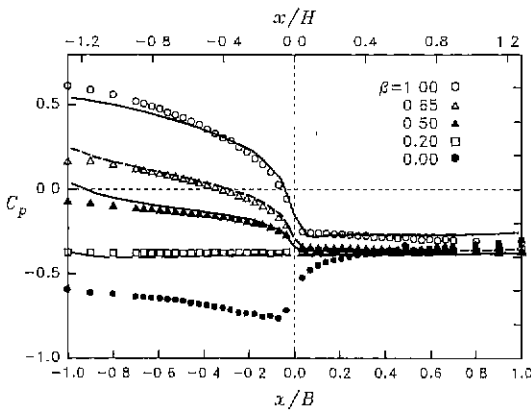
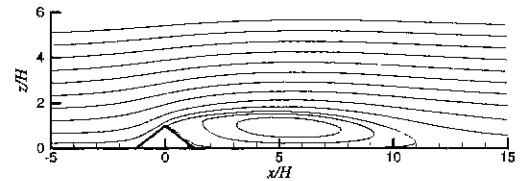


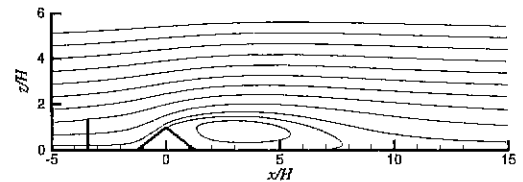
Fig. 5. Effects of fence porosity on the surface pressure coefficient (Case I; symbols: experiments, lines: predictions).

유속분포 등은 해당 실험논문들을 참고하기 바란다.

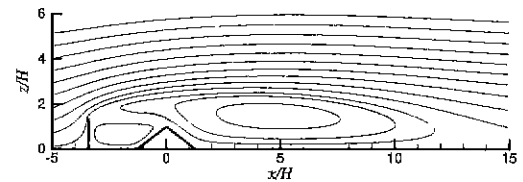
그림 5는 삼각프리즘 풍상부 $x/H = -3.42$ 에 높이 $h = 4/3H$ 인 방풍벽을 설치한 경우, 프리즘 표면에서의 실험과 본 수치해석으로 얻은 압력계수 (pressure coefficient) 분포도이다. 압력계수는 $C_p = 2(p - p_o) / (\rho U_o^2)$ 로 정의되는데, 여기서 U_o 는 자유흐름의 유속이며 p_o 는 프리즘 끝단 ($x=B$) 상방 $z=1.2$ m에서 피토정압관으로 측정된 자유흐름에서의 정압이다. 그림에서 보면 다공도가 증가할수록 삼각프리즘 풍상부 경사면 및 꼭지점에서 압력계수 즉, 유속이 감소하는 경향이 뚜렷하며, 여러 다공도에 대한 수치에 측과 실험결과가 잘 일치함을 확인할 수 있다. 또한 풍동실험(박철우 등, 1996)에 따르면 방풍벽이 설치되지 않은 경우 삼각프리즘 후면에서의 유동박리 영역의 길이는 $11H$ 였으며, 50%의 다공도를 가지는



(a) Triangular prism alone ($\beta=1.0$).



(b) Triangular prism with the porous windbreak ($\beta=0.5$).



(c) Triangular prism with the solid windbreak ($\beta=0.0$).

Fig. 6. Streamline plots over the triangular prism with a porous windbreak (Case I).

방풍벽을 전방에 설치한 경우는 $8H$ 로 감소하였다.

그림 6은 각각 방풍벽이 없는 경우, 50%의 다공성 방풍벽 그리고 고체벽이 $x/H = -3.42$ 에 $h = 4/3H$ 로 설치된 경우 삼각프리즘 형상물 주위의 유선 (streamline)을 도시한 것으로, 수치해석에서도 실험과 동일한 크기의 박리영역을 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 다공성 방풍벽을 설치하게 되면 유속

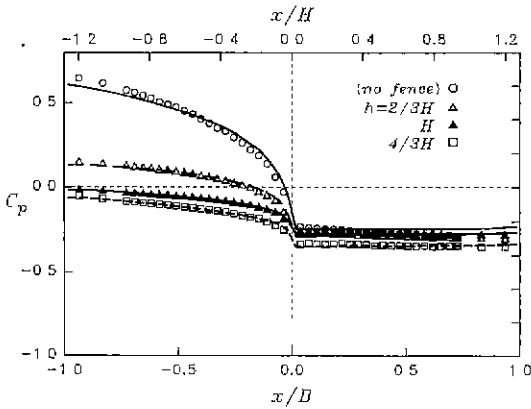


Fig. 7. Effects of fence height on the surface pressure coefficient (Case I; symbols: experiments, lines: predictions).

감속에 의해 삼각프리즘 후면에서의 박리영역이 감소하게 되지만, 다공도가 0인 고체벽을 설치한 경우에는 그림 6(c)에서 볼 수 있듯이 프리즘 후면의 박리유동 외에도 전방의 방풍벽과 프리즘 사이에도 박리유동이 발생하는 등의 복잡한 양상을 가진다. 따라서 전체적으로 유속은 감소되지만 박리영역 내에서 난류강도가 증가함에 따라 입자비산이 촉진되는 바람직하지 않은 결과를 일으키게 된다.

그림 7은 전방 $x/H = -3.42$ 에 설치된 방풍벽 ($\beta = 0.5$)의 높이를 $2/3H, H, 4/3H$ 로 변화시켰을 때 프리즘의 표면압력계수 분포를 비교한 것으로, 방풍벽의 높이가 증가할수록 특히 프리즘의 풍상부 경사면에서 압력계수가 급격히 감소하는 경향이 관찰된다. 그러나 후방 경사면에서는 박리유동에 의하여 거의 일정한 배면압력이 유지됨을 알 수 있다. 수치해석 결과는 측정된 압력분포와 잘 일치하고 있다.

방풍벽의 설치위치에 의한 표면압력분포의 변화 특성을 보다 자세히 알아보기 위하여 프리즘의 풍상부, 풍하부 그리고 양쪽에 모두 방풍벽을 설치한 경우에 대한 풍동실험(박철우와 이상준, 1997)과 본 수치해석을 비교하여 보았다. 이때 높이 $h = H$ 이며 40% 다공도를 갖는 방풍벽을 프리즘의 풍상부 또는 풍하부 $x/H = \pm 2.6875$ 위치에 설치하였다. 그림 8에 도시한 결과를 분석하여 보면 풍하부에만 방풍벽을 설치한 경우에는 배면압력이 감소하기는 하였지만 전반적으로 방풍벽이 설치되지 않은 경우와

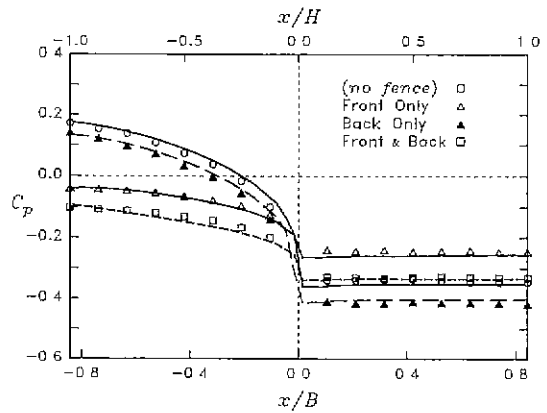


Fig. 8. Effects of fence location on the surface pressure coefficient (Case II; symbols: experiments, lines: predictions).

큰 차이가 없다. 양쪽에 모두 설치된 경우에는 프리즘의 꼭지점을 지나 내려오던 유동이 풍하부 방풍벽에 의해 차단되어 프리즘 배면으로 재순환됨에 따라 풍상부 방풍벽을 통과한 후 프리즘 풍상부 경사면을 따라 가속되던 유동이 전체적으로 막히게 되어 프리즘 전방 경사면에서의 표면압력은 낮아지는 반면 후면에서는 상대적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이 경우에도 본 수치모델은 풍동실험과 정성적, 정량적으로 동일한 예측을 하였다. 그림 9는 수치예측에 의한 압력계수 등고선으로 표면압력만이 아니라 압력장의 공간분포를 비교할 수 있다

3.3 유동장 내 비산입자의 평균궤적 및 난류분산 수치예측

서론에서 언급한 바와 같이 풍응력(wind shear)에 의한 입자의 비산거동에 대한 풍침식(wind erosion) 연구는 그 동안의 지속적인 연구에도 불구하고 그 메커니즘이 복잡하고 입자의 성질이나 유동조건, 기 후 등에 민감하게 의존하는 현상이라 아직까지 학문적인 완전한 이해에는 이르지 못하고 있다(이상준, 1995). 따라서 본 연구에서는 일단 삼각프리즘 꼭지점에서 입자비산이 발생한 것으로 가정하고 입자궤적을 변화시켜 가며 유동장 내 입자궤적(particle trajectory)을 수치적으로 예측하였다. 참고로 입자비산은 야적물 표면 최대응력점으로부터 발생되

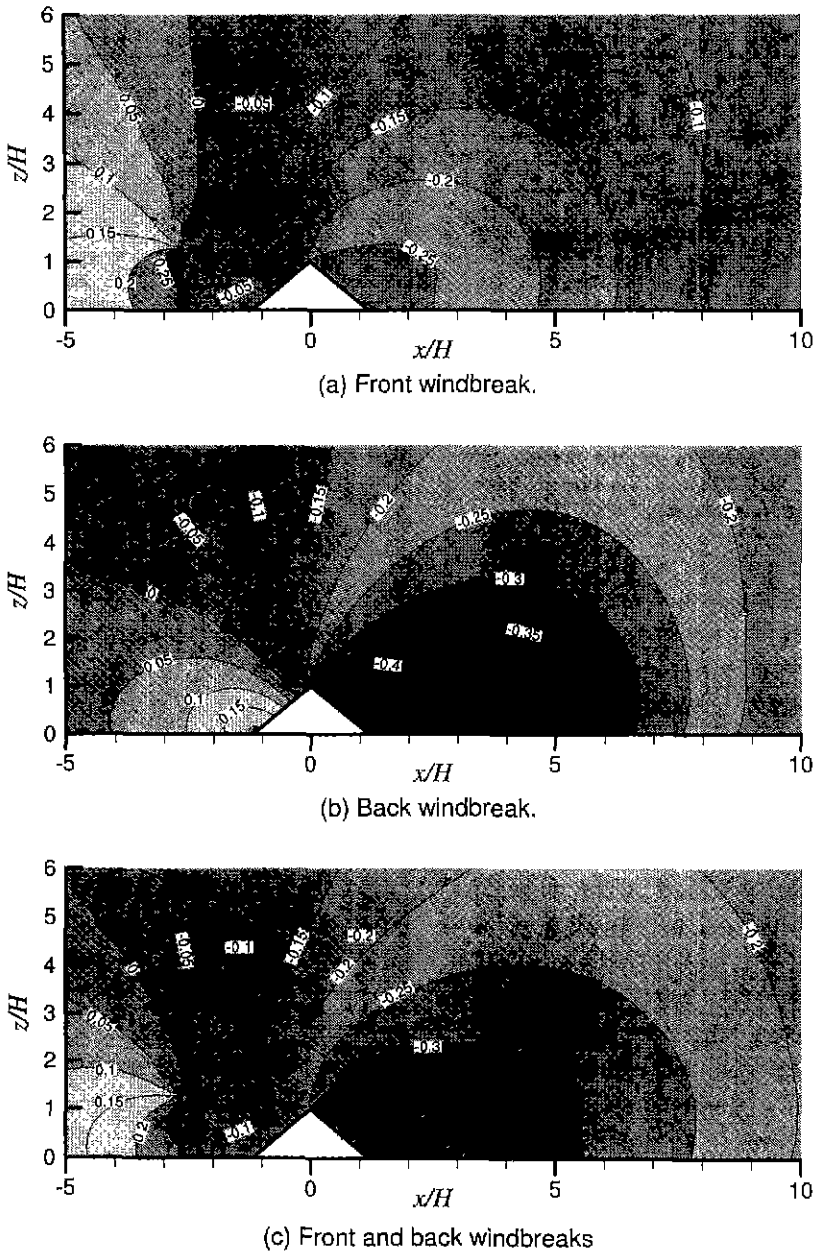
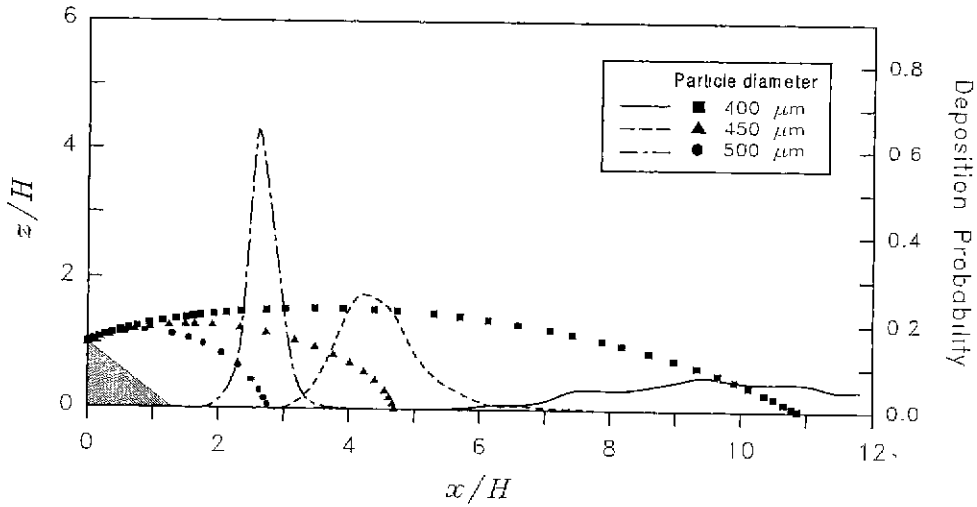


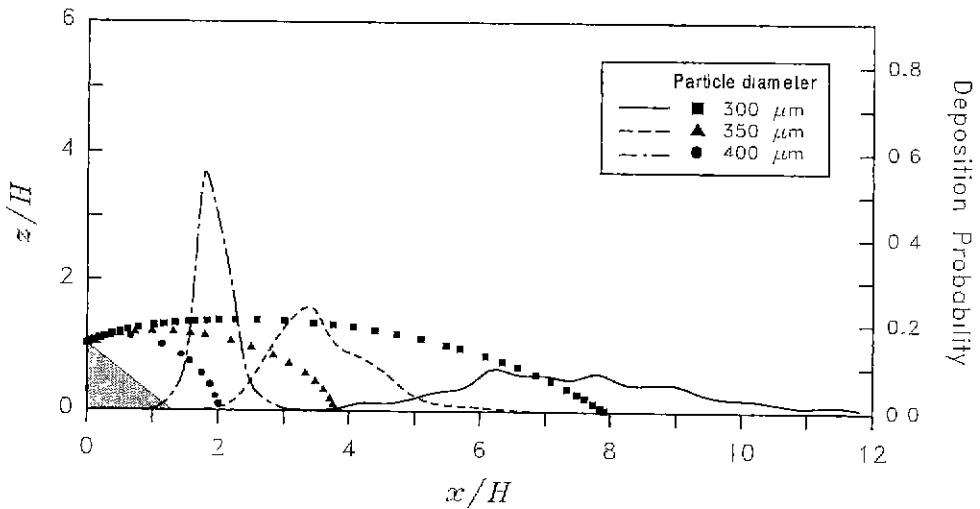
Fig. 9. Contour plots of the pressure coefficient over the triangular prism (Case II).

는데, 이곳은 보통 야적물 꼭지점으로부터 약간 앞 쪽 부근이 된다. 본 연구에서 고려한 입자직경은 풍 침식 현상 중 saltation에 해당하는 크기범위인 100 ~ 1000 μm 에 해당한다. 비산되어 유동을 따라 이동

하던 입자가 지면에 도달하게 되면 실제로는 또다 시 leaping이나 bounding과 같은 재비산을 하게 되 지만 현재로서는 이에 대한 정확한 모델이 확립되 지 않았음을 고려하여 지면에 도달한 비산입자는



(a) Triangular prism alone ($\beta=1.0$).



(b) Triangular prism with the porous windbreak ($\beta=0.5$).

Fig. 10. Mean particle trajectories and distributions of deposition probability (Case I; *symbols*: experiments, *lines*: probabilities).

완전 침전 (deposition)한다고 가정하였다.

그림 10은 (a) 삼각프리즘 단독인 경우와 (b) 전방 $x/H = -3.42$ 지점에 50%의 다공벽이 설치된 경우에 대하여 삼각프리즘 꼭지점에서 출발한 입자궤적을 수치예측한 결과이다. 그림에서 입자궤경에 따른 평균궤적 (mean trajectory)은 도형 (원형, 삼각형, 사각형)으로 나타내었는데, 여기에서 분명하게 관찰되는

것은 방풍벽의 설치에 따른 유속감속의 영향으로, 입자의 이송거리가 삼각프리즘 단독인 경우에 비하여 현저하게 감소한다는 것이다. 예를 들면 직경 $400 \mu\text{m}$ 인 입자는 방풍벽이 없는 경우 $11H$ 까지 날아갔지만 방풍벽이 설치되었을 때는 프리즘 직후방인 $2H$ 에 떨어졌음을 볼 수 있다.

그림 10에서 지면에 실선, 점선 그리고 일점쇄선

으로 도시한 수평방향 분포도는 난류분산 수치예측 결과로, 각각 입자직경에 따른 침전확률(deposition probability) 분포도이다. 침전확률을 구하기 위하여 삼각프리즘 꼭지점에서 입자를 각각 1,000개씩 출발시킨 후 지면 각 지점에 침전되는 입자개수(n)를 셈하여 이를 총 입자개수($N=1,000$)로 무차원화 하였다. 예를 들어 그림 10(a)에서 $400\ \mu\text{m}$ 직경의 먼지의 평균계적(사각형)을 보면 $x/H=3$ 부근에 침전되며, 평균계적을 따라 침전될 확률(실선)은 우측 종축을 읽어보면 약 65%가 됨을 알 수 있다. 그림에서 명확히 나타나듯이 입자직경이 큰 경우에 비산입자는 삼각프리즘 직후방에 떨어지며 이때의 침전확률은 정규분포에 가깝다. 아울러 평균계적에 의한 침전위치에서 침전확률의 최대값을 보이는 반면 입자크기가 작은 경우에는 멀리 날아갈 뿐만 아니라 난류분산도 넓게 퍼지는 경향이 뚜렷하다. 특히 그림에서 사각형으로 나타난 입자는 박리영역 내 혼합유동에 의해 난류운동에너지가 크게 증가한 영역을 지나게 됨에 따라 침전확률이 상당히 큰 분산을 보이게 된다. 따라서 평균계적을 통해 예측한 침전위치에 침전될 확률은 상대적으로 줄어들게 되며 실제로는 넓은 영역에 걸쳐 침전이 일어나게 된다. 그런데 수치계산에 의한 침전확률은 충분한 입자개수를 사용한 해석이 아닌 관계로 다소간의 정량적 오차가 포함되었을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 다공성 방풍벽이 설치된 2차원 삼각프리즘을 지나는 대기유동장을 수치예측하고 해석결과를 선행 풍동실험의 측정결과와 비교하여 정성적, 정량적으로 일치하는 결과를 얻었다. 즉, 방풍벽의 다공도, 높이 및 설치위치에 따른 프리즘 표면 압력계수를 비교하여 정량적으로 일치하는 결과를 얻었으며 유동가시화로 관찰된 유동특성과 수치예측 결과가 정성적으로 동일함을 확인하였다. 프리즘 꼭지점에서 입자비산이 발생한다고 가정하여 그 평균계적 및 난류분산을 수치예측하였으며 이를 통하여 박리유동장 내에서 비산입자 거동특성을 파악하였다.

본 연구를 통하여 검증된 수치모델은 방풍벽이 설치된 야적물의 풍환경에서 입자비산 억제를 위한

최적의 방풍벽 설계수단으로 이용될 수 있으므로, 차후로는 소요경비와 실험시간 등이 많이 소모되는 풍동실험 대신 본 수치예측법을 이용함으로써 신속, 간편, 저렴하게 원료야적장의 풍환경 설계를 할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 입자거동의 난류분산 수치예측법은 실험으로는 예측이 곤란한 입자크기에 따른 침전분포 등의 물리현상을 파악할 수 있으므로, 입자비산에 따른 환경영향평가에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 공학적인 응용에 관점을 두어 기본적으로 균질 등방성 난류가정에 근거한 난류모델 및 난류분산 계적법을 사용하여 만족할만한 결과를 얻었으나, 궁극적으로 재순환 유동과 같은 비균질 비등방성 난류유동장의 엄밀한 물리적 이해와 비산입자의 유동장 내 난류분산 거동의 정확한 특성과 악을 위해서는 Large-Eddy Simulation과 같은 고차의 수치해석이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 포항공과대학교 부설 과학재단지정 우수연구센터인 첨단유체공학연구센터와 국책대학원 환경공학부의 지원으로 수행되었기에 감사를 표하고, 본문에 사용한 실험치를 제공해주신 이상준 교수님과 박철우군에게도 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- 김현구, 이정목, 경남호(1997) 언덕지형을 지나는 유동의 수치해석적 연구, 대기보전학회지, 13, 65-77.
- 박철우, 성승학, 이상준(1996) 다공성 방풍웬스가 대기경계층 내에 놓인 삼각프리즘 표면압력에 미치는 영향에 관한 연구, 대한기계학회논문집, 20B, 2670-2680.
- 박철우, 이상준(1997) 다공성 방풍웬스 후방에 놓인 삼각프리즘의 표면압력특성에 관한 풍공학적 연구, 대한기계학회논문집, 21B, 1496-1508.
- 이상준(1995) 민지비산 메카니즘에 관한 연구, 95ER303, 포항공과대학교 환경공학부.
- Aiya, S. and M. Shipman(1981) An experimental investigation of flow and diffusion in the disturbed boundary layer over a ridge-I. Mean flow and turbulence structure. Atmos Environ., 15, 1173-1184.
- Bradley, E.F. and P.J. Mulhearn(1983) Development of

- velocity and shear stress distributions in the wake of a porous shelter belt, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 15, 145-156.
- Hosker, R.P (1984) Flow and diffusion near obstacles, *Atmospheric Science and Power Production*, Randerson, D. ed., 241-325.
- Kim, H.G , C.M. Lee, H.C Lim and N.H. Kyong (1997) An experimental and numerical study on the flow over two-dimensional hills, *J Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 66, 17-33.
- Kim, H.G. and V.C. Patel (1999) Test of turbulence models for wind flow over terrain with separation and recirculation, *Boundary-Layer Meteorol.*, accepted.
- Lu, Q.Q , J.R. Fontane, G. Aubertin (1992) Particle motion in two-dimensional confined turbulent flow, *Aerosol Sci Tech.*, 17, 169-185.
- Mouzakis, F.N. and G.C. Bergeles (1991) Numerical prediction of turbulent flow over a two-dimensional ridge, *Int'l J. Numer. Methods in Fluids*, 12, 297-296
- Reynolds, A.J. (1969) Flow deflection by gauze screens, *J. Mech. Eng. Sci.*, 11, 290-294.
- Svensson, U. and K. Haggkvist (1990) A two-equation turbulence model for canopy flows, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 35, 201-211.
- Wang, H. and E.S. Takle (1995) A numerical simulation of boundary-layer flows near shelterbelts, *Boundary-Layer Meteorol.*, 75, 141-173
- Wilson, J.D (1985) Numerical studies of flow through a windbreak, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 21, 119-154.
- Wilson, J.D. and C.J. Mooney (1997) Comments on 'A numerical simulation of boundary-layer flows near shelterbelts' by H. Wang and E. Takle, *Boundary-Layer Meteorol.*, 85, 137-149.
- Yakhot, V. and S.A. Orszag (1986) Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory, *J. Scientific Computations*, 1, 3-51.