Atmosphere, **17**(4), 315-326 December 2007

방풍벽에 의한 비산 먼지 저감 효과

송창근[1] · 김재진[2,*] · 송동웅[3]
[1]국립환경과학원 지구환경연구소
[2]부경대학교 환경대기과학과
[3]상지대학교 환경공학과
(2007년 8월 1일 접수; 2007년 10월 11일 승인)

The Effects of Windbreaks on Reduction of Suspended Particles

Chang-Keun Song[1], Jae-Jin Kim[2,*] and Dong-Woong Song[3]
[1]*Global Environment Research Center, National Institute of Environmental Research*
[2]*Department of Environmental Atmospheric Science, Pukyong National University*
[3]*Department of Environmental Engineering, Sang-Gi University*
(Manuscript received 1 August 2007; in final form 11 October 2007)

Abstract

The effects of windbreaks on the reduction of suspended particles are investigated using a computational fluid dynamics (CFD) model with the k-ε turbulence closure scheme based on the renormalization group (RNG) theory. In the control experiment, the recirculation zones behind the storage piles are generated and, as a whole, relatively monotonous flow patterns appear. When the windbreaks with the 0% porosity are constructed, the recirculation zones are generated by the windbreaks and very complicated flow patterns appear due to the interference between the windbreaks and storage piles. The porosity of the windbreaks suppresses the generation of the recirculation zone and decreases the wind velocity in the windbreaks as well as that outside the windbreaks. As the emission of suspended particles from the storage piles are closely related with the friction velocity at the surfaces of the storage piles, variation of the friction velocity and total amount of the emission of the suspended particles with the height and porosity of the windbreaks are investigated. The results show that higher and more porous windbreaks emit less suspended particles and that the reduction effect of the porosity is still more effective than that of the height. In the case of the windbreak with 30 m height and 50% porosity, friction velocities above the storage piles are smaller than the critical friction velocity above which particles would be suspended. As a result, total amount of suspended particles are much fewer than those in other cases.

Key words: CFD model, Windbreaks, Porosity, Suspended particles, Friction velocity

1. 서 론

제품 원료로 사용하기 위해 야적된 석탄가루, 석회가루, 모래 등은 바람에 의해 인근 지역으로 비산되면서 심각한 대기오염과 환경 문제를 야기할 수 있다. 또한, 경제적인 측면에서도 바람에 의한 재료 손실도 심각할 수 있다. 시멘트 제조업 등의 비산 먼지 발생시설의 경우 비산 먼지 발생 억제를 위한 시설의 필요 및 필요한 조치에 관한 엄격한 기준을 법으로 규정하고 있다 (대기환경보존법 제 43조). 특히, 야적으로 인한 비산 먼지 발생의 경우, 대기환경보존법 시행규칙에 야적물질의 최고 저장 높이의 1/3 이상의 방진벽을 설치하고, 최고 저장 높이의 1.25배 이상의 방진망 (막)을 설치할 것을 규정하는 등 엄격한 기준을 적용하고 있다.

야적으로 인한 비산 먼지 발생억제를 위한 시설로는 크게 밀폐식 상옥시설, 방진, 방풍벽 시설로 구분할 수 있다. 밀폐식 상옥시설은 비산 먼지 배출을 근원적으로 차단하는 장점은 있으나 규모가 큰 경우 설치가

*Corresponding Author: Jae-Jin Kim, Department of Environmental Atmospheric Science, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea.
Phone : +82-51-620-6284, Fax : +82-51-620-6284
E-mail : jjkim@pknu.ac.kr

ⓒ Korean Meteorological Society, 2007

용이하지 않다는 점과 경제적 비용이 크다는 점 등으로 비교적 중/소규모의 시설에 적합한 방법이다. 한편 방풍벽에 의한 비산 먼지 발생 억제 시설은 방풍벽 설치구역 내에서 기류의 속도와 그 방향에 영향을 주어 비산 먼지의 발생을 억제시키는 방법으로 방풍벽의 종류와 구조, 야적된 원료와 설치지점 간의 거리, 방풍벽과 야적 높이 등에 따라 그 저감 효과가 결정된다. 그리고 방풍벽 형태나 재질 선택이 중요하다. 방풍벽은 본래의 기능을 유지하면서 태풍과 같이 매우 강한 바람에도 견딜 수 있는 형태나 재질을 갖고 있어야 한다. 이와 같은 이유로 방풍벽 공극률이 비산 먼지 발생에 미치는 영향에 관한 연구가 많이 수행되고 있다 (Bofah and Alhinai, 1986; Park and Lee, 2003). 특히, 공극률이 클수록 강한 바람에도 견딜 수 있기 때문에 비산 먼지 발생 효과적으로 억제하면서 공극률을 극대화할 수 연구에 중점을 두어왔다 (Subhas *et al*., 1997). Raine and Stevenson (1977)에 따르면, 방풍벽 풍하측에서 풍속을 조사한 결과, 비교적 공극률이 큰 방풍벽이 공극이 없는 방풍벽보다 평균 풍속을 더욱 저감시킨다. 공극률 이외에 비산 먼지 발생에 영향을 미치는 요소로는 평균 속도의 크기나 난류 강도 등 주위의 기상 조건과 방풍벽의 크기 등이 있다. 방풍벽의 크기와 평균 속도의 크기는 방풍벽 주위에 형성되는 꼬리흐름 (wake) 경계층의 두께에 영향을 미침으로써 비산 먼지 발생 환경을 변화시킬 수 있다.

본 연구에서는 시멘트 저장 시설에서 방풍벽 높이와 공극률 변화가 풍속 감소율과 비산 먼지 발생에 미치는 영향을 분석하고자 하며, 이를 통해 방풍벽 설치 시 비산 먼지 저감 효율을 증진할 수 있는 가이드라인을 제시하고자 한다.

2. 수치 모형

본 연구에서는 Kim and Baik (2004)의 수치 모형을 사용하였다. 이 모형은 건물이나 장애물 주위의 흐름과 확산 연구에 적합하도록 고안되었고 모형의 검증은 상대적으로 적은 비용이 소요되고 필요한 바람 환경 조절이 용이한 풍동 결과를 주로 이용한다. 풍동 실험과 비교한 결과 (Kim and Baik, 2004), 이 모형은 장애물 주위의 바람장을 비교적 잘 재현하였고 본 연구를 수행하는데 적절하다고 판단된다. 이 모형은 재규격화군 (Renormalization Group, RNG) 이론에 근거한 k-ε 난류 모형을 포함하며 벽면 함수를 이용한 경계 조건을 사용하였다. 이 모형은 3차원, 비정수, 비회전, 비압축 대기 흐름을 가정한다. 레이놀즈 평균한 지배 방정식계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t}+U_j\frac{\partial U_i}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P^*}{\partial x_i}+\nu\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j\partial x_j}-\frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{u_iu_j}), \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j}=0, \quad (2)$$

여기서, U_i 는 i번째 평균 속도 성분, P^* 는 참고 값과의 압력 차이이고 u_i는 U_i의 섭동 성분이고 ρ_0은 대기 밀도이다. ν는 대기의 분자 점성을 나타낸다.

식 (1)에 포함된 레이놀즈 스트레스는 다음과 같이 알려진 변수로 모수화된다.

$$-\overline{u_iu_j}=K_m\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\delta_{ij}k, \quad (3)$$

여기서 K_m는 운동량의 난류 확산 계수이고 δ_{ij}는 Kronecker delta이며 k는 난류 운동 에너지이다. RNG k-ε 난류 모형에서 K_m는 다음과 같이 주어진다.

$$K_m=C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (4)$$

여기서 C_μ는 경험적 상수이다.

이 전산 유체 역학 모형에서, RNG k-ε 난류 모형은 Yakhot *et al*. (1992)이 제시한 것을 이용하였다. 이 모형은 난류 운동 에너지의 소멸률 방정식에서 비평형 응력 변형률 (strain rate)을 설명하기 위해 추가적인 소실항을 포함하고 다른 상수 값을 사용한다는 점에서 표준 k-ε 난류 모형과 다르다 (Tutar and Oguz, 2002). 난류 운동 에너지와 그 소멸률(ε)에 관한 예단 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t}+U_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=-\overline{u_iu_j}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu+\frac{K_m}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)-\varepsilon, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+U_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}= -C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\overline{u_iu_j}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu+\frac{K_m}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right)-C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k}-R \quad (6)$$

여기서, σ_k, σ_ε, $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$는 실험적 상수이다. 식 (8)의 우변 마지막 항이 추가된 응력 변형률이며 다음과 같이 주어진다.

$$R = \frac{C_\mu \eta^3 (1-\eta/\eta_0)\varepsilon^2}{(1+\beta_0 \eta^3)k}, \tag{7}$$

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon}\left[\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right]^{1/2}. \tag{8}$$

RNG k-ε 난류 모형에서 상수 값은 다음과 같다 (Yakhot *et al*., 1992).

$$(C_\mu,\ \sigma_k,\ \sigma_\varepsilon,\ C_{\varepsilon 1},\ C_{\varepsilon 2},\ \beta_0,\ \eta_0) = (0.0845, 0.7179, 0.7179, 1.42, 1.68, 0.012, 4.377). \tag{9}$$

도시 지역의 흐름과 확산을 시뮬레이션 할 때, 건물 근처의 흐름과 확산을 보다 잘 분해하기 위해서는 보다 작은 격자가 선호되고 건물과 떨어진 곳에서는 비교적 큰 격자를 사용할 수 있다. 주어진 계산 조건 하에서 전산 유체 역학 모형의 계산 효율을 높이기 위해 비균등 격자 계를 이용하였다. 비균등 격자계의 규준 공간 (Fig. 1)에서 임의의 경계값 (Γ)은 다음과 같이 계산된다 (Versteeg and Malalasekera 1995).

$$\Gamma_w = (1-f_W)\Gamma_W + f_W\Gamma_P, \tag{10}$$

$$\Gamma_e = (1-f_P)\Gamma_P + f_P\Gamma_E. \tag{11}$$

여기서, 내삽 가중 인자, f_w와 f_p는 다음과 같이 정의 된다.

$$f_W = \frac{\delta x_{Ww}}{\delta x_{Ww}+\delta x_{wP}}, \tag{12}$$

$$f_P = \frac{\delta x_{Pe}}{\delta x_{Pe}+\delta x_{eE}}. \tag{13}$$

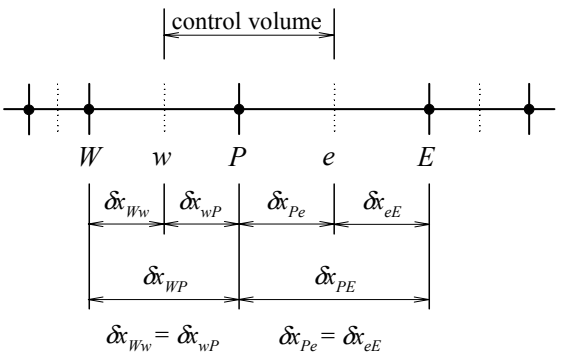

Fig. 1. Typical grid-point cluster for a non-uniform grid system. Nodal points are defined first and the control volume faces are located at a mid-point between grid points.

지배 방정식 계는 유한 체적법 (Finite Volume Method)과 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘 (Patankar, 1980)을 이용하여 엇갈림 격자 계에서 수치적으로 푼다. 이에 대한 자세한 수치 과정은 Baik *et al*. (2003)에 제시되어 있다.

3. 실험 설계

연구 대상은 충북 단양군 매포읍 매포리에 위치한 시멘트 공장에 야적파일이다 (Fig. 2). Fig. 2에서 하단에 위치한 야적파일이 1호기이고 상단에 위치한 야적파일이 2호기이다. 야적파일의 비산을 방지하기 위한 방풍벽의 효과를 수치 모의하기 위해서 다음과 같이 실험을 설계하였다. x, y 그리고 z 방향 셀의 개수는 각각 130, 86, 60이다. 가장 작은 셀 크기는 0.5 m × 0.5 m × 1 m 이고 가장 큰 셀의 크기는 11.1 m × 11.1 m × 10.3 m이다. 수치 도면의 크기는 920.8 m × 241.8 m × 204.4 m이다. 셀의 팽창률은 1.2 이하이다 (Fig. 3). 1호기의 크기는 400.5 m × 31.0 m × 10.0 m이고 2호기의 크기는 467.3 m × 31.0 m × 10.0 m이다. 시간 간격은 0.2초이고 1800초 동안 수치 적분하였다.

바람과 난류 운동 에너지 그리고 그 소멸률에 대한 유입 경계 조건은 다음과 같다.

$$U_{in}(z) = \frac{U_*}{\kappa}\ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \tag{14}$$

$$V_{in}(z) = 0, \tag{15}$$

$$W_{in}(z) = 0, \tag{16}$$

$$k_{in}(z) = \frac{1}{C_\mu^{1/2}}U_*^2\left(1-\frac{z}{\delta}\right)^2, \tag{17}$$

$$\varepsilon_{in}(z) = \frac{C_\mu^{3/4}k_{in}^{3/2}}{\kappa z}. \tag{18}$$

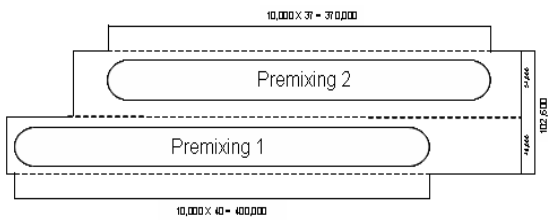

Fig. 2. Top view of the storage piles. Dimensions are in mm. The lower and upper storage piles are the premixing 1 and 2, respectively.

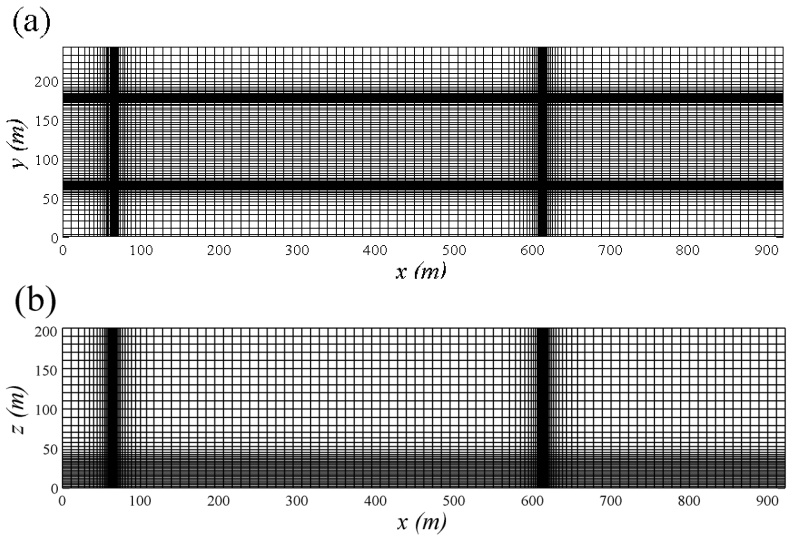

Fig. 3. (a) Top view and (b) side view of the computational domain and grid system.

여기서 U_*, z_0, κ, δ는 각각 마찰 속도, 거칠기 길이, von Karman 상수 (= 0.4), 그리고 경계층 두께 (= 1000 m)를 의미한다. 상층 경계에서는 바람시어가 0인 경계 조건이 적용되고 측면 경계와 유출 경계에서는 경도의 크기가 0인 경계 조건을 사용하였다. 하층 경계와 구조물 표면에서는 벽면 함수 (wall function)를 이용한 경계 조건을 사용하였다. 이에 대한 자세한 내용은 김재진과 백종진 (2005)에 기술되어 있다.

4. 결과와 토의

4.1 방풍벽에 의한 풍속변화

방풍벽이 흐름과 확산에 미치는 영향을 조사하기 위하여 방풍벽 설치전과 설치 후로 구분하여 수치 모의하였다. 방풍벽이 없는 경우를 규준 실험 (control experiment)으로 정하였다. 방풍벽의 높이를 20 m, 30 m로 설정 (H20과 H30)하였고 각각의 경우에 공극률을 0%, 50%로 변화 (P00과 P50)시켜 총 4가지 경우 (e.g., H20P00, H20P50, H30P00 그리고 H30P50)에 대해 모델링을 수행하였다.

Fig. 4는 규준 실험에 대한 바람 벡터장을 나타낸다. 1 m 고도에서 취한 수평 평면상의 바람 벡터장 (Fig. 4a)을 보면, 1호기와 2호기 풍하측 재순환 지역 (recirculation zone)에 형성된 이중 에디 순환 (double-eddy circulations)을 확인할 수 있다. 유체가 장애물 주위를 통과할 때, 장애물 풍하측 모서리 부근의 압력이 낮아지면서 이 지역으로 흐름이 발생하고 이를 보상하기 위한 역류 (reverse flow)가 동시에 발생하면서 이중 에디 순환이 형성된다. 1호기와 2호기의 중앙에서 취한 연직 평면상의 바람 벡터장 (Fig. 4b와 4c)을 보면, 지면 근처의 바람이 1호기와 2호기를 만나면서 약해졌다가 1호기와 2호기 상단에서 풍하측으로 갈수록 점차 강해지는 것을 볼 수 있다.

방풍벽이 흐름에 미치는 영향을 조사하기 위하여 1호기와 2호기 주위에 높이와 공극률이 다른 방풍벽을 설치한 경우에 대해 수치 모의를 실시하였다. Fig. 5는 방풍벽이 설치된 경우에 z = 1 m에서 조사한 바람 벡터장을 나타낸다. 규준 실험과의 차이를 보기 위하여 바람 편차 벡터장 (Figs. 5b, 5d, 5f 그리고 5h)을 같이 나타내었다. 높이가 20 m이고 공극률이 0%인 경우 (Figs. 5a와 5b)를 보면, 방풍벽의 풍상측 내부에 이중 에디 순환이 형성됨을 확인할 수 있다. 그러나 방풍벽과 1, 2호기 사이의 공간적 차이에 의해 비대칭적으로 이중 에디 순환이 형성되었다. 풍하측 방풍벽의 후면에도 이중 에디 순환이 대칭적으로 형성되었다. 규준 실험과의 차이 (Fig. 5b)를 보면, 방풍벽으로 인해 풍속이 감소한 풍상측 방풍벽, 이중 에디 순환이 형성된 풍상측 방풍벽의 후면 그리고 풍하측 방풍벽의 전/후면에서 규준 실험과의 차이가 크게 나타남을 볼 수 있다. 높이가 20 m이고 공극률이 50%인 경우 (Fig. 5c)에는 방풍벽 후면에 이중 에디 순환이 형성되지 않음

을 확인할 수 있다. 이는 방풍벽의 공극을 통한 대기의 유입이 방풍벽 풍하측 모서리 부근의 저압 지역으로의 흐름과 이 흐름을 보상하기 위한 역류의 발생을 억제함으로써 이중 에디 순환 형성을 차단하는 것으로 판단된다. 이와 같은 영향으로 방풍벽 풍하측의 풍속이 크게 감소함을 확인할 수 있다. 방풍벽 높이가 30 m인 경우 (Figs. 5e, 5f, 5g 그리고 5h)에도 20 m인 경우와 유사한 흐름이 나타났다. 그러나 20 m인 경우에 비해 방풍벽 풍하측의 이중 에디 순환이 더 강하게 나타남을 확인할 수 있다. 공극률이 50%인 경우에 방풍벽의 풍상측 내부에서는 높이가 20 m인 경우보다 풍속이 다소 강하게 나타나지만 풍하측으로 갈수록 풍속 감소가 더 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 2호기 중앙에서 취한 연직 평면상의 바람 벡터장을 나타낸다. 공극률이 0%인 경우 (Figs. 6a와 6e)에는 방풍벽의 높이가 높아지면서 방풍벽 풍하측의 재순환 지역의 크기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히, 재순환 지역 크기가 증가하면서 2호기 상단의 흐름 재부착점 (reattachment point)의 위치가 방풍벽으로부터 멀어지는데, 이에 따라 높이가 30 m인 경우 (Fig. 6e)에 재부착점 후면의 풍속이 다소 낮게 나타남을 확인할 수 있다.

위 결과에서 보았듯이, 방풍벽을 설치했을 경우에는 방풍벽과 1호기와 2호기에 의한 흐름의 변화가 매우 복잡하게 나타난다. 따라서 방풍벽에 의한 흐름의 변화를 지점별 결과를 토대로 설명하기는 매우 어렵다. 방풍벽에 의한 흐름의 평균적인 변화를 조사하기 위하여, 방풍벽 내부 지역에서 y 방향에 대해 수평 성분 속도를 평균하여 x 방향으로의 변화를 3 고도 (z = 1, 9, 19 m)에서 조사하였다. 규준 실험의 경우, 지면 근처에서는 풍하측으로 갈수록 풍속이 다소 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히, 야적파일 높이보다 낮은 고도에서는 1호기와 2호기의 풍상측 부근과 풍하측 부근에서 풍속이 감소하고 (Figs. 7a와 7c) 야적파일 높이보다 높은 고도에서는 풍속 변화가 작게 나타남 (Figs. 7e)을 확인할 수 있다. 방풍벽을 설치한 경우에는 세 고도에서 모두 방풍벽에 의한 수평 풍속이 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. 이 영향은 공극률이 0%인 경우

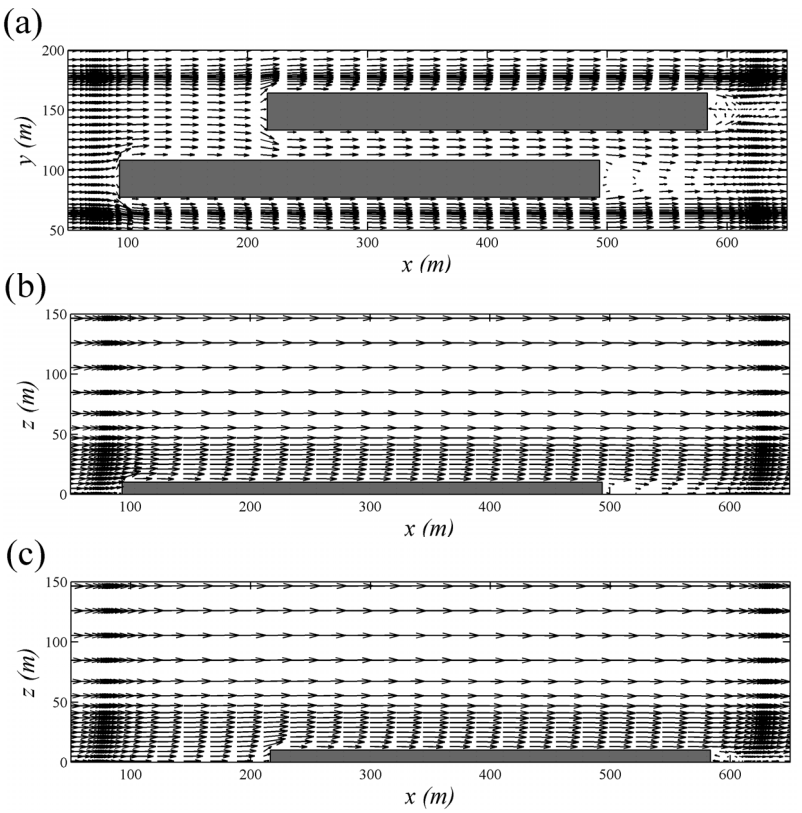

Fig. 4. Wind vector fields at (a) z = 1 m, (b) y = 93.0 m and (c) y = 148.7 m in the control experiment.

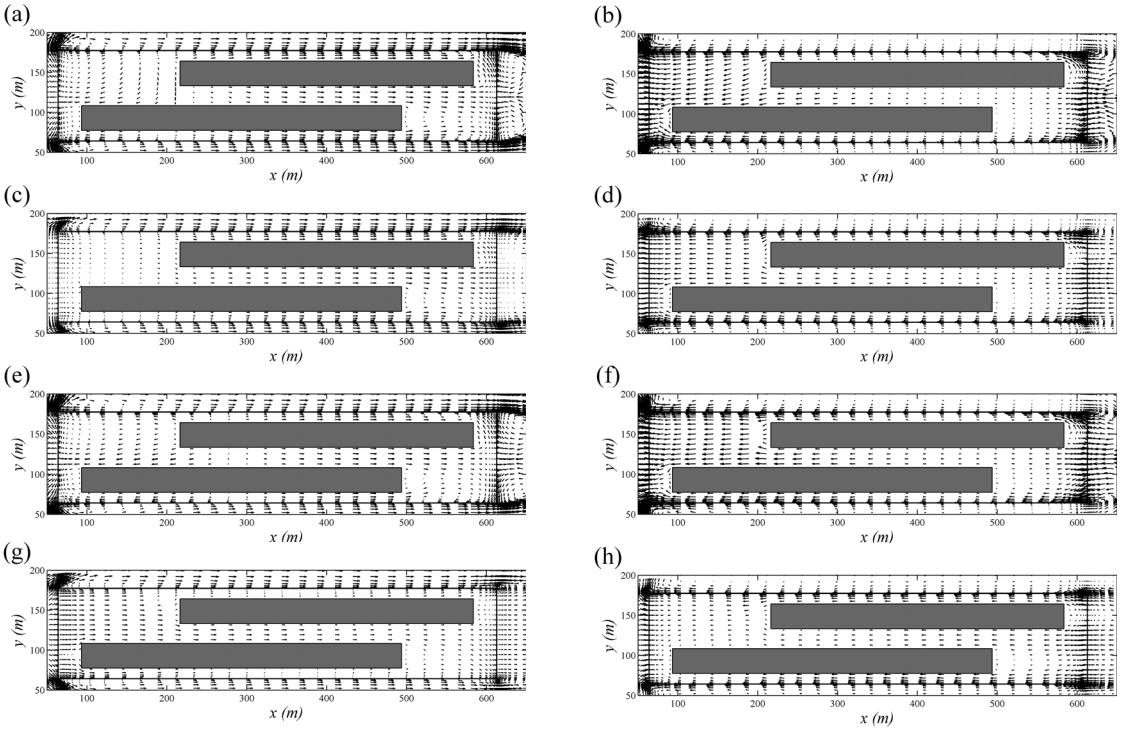

Fig. 5. Wind vector fields at z = 1 m in the cases of the H20P00 [(a) and (b)], H20P50 [(c) and (d)], H30P00 [(e) and (f)] and H30P50 [(g) and (h)] experiments. The wind vector fields in the right represent the difference in wind velocity between each experiment (left) and the control experiment.

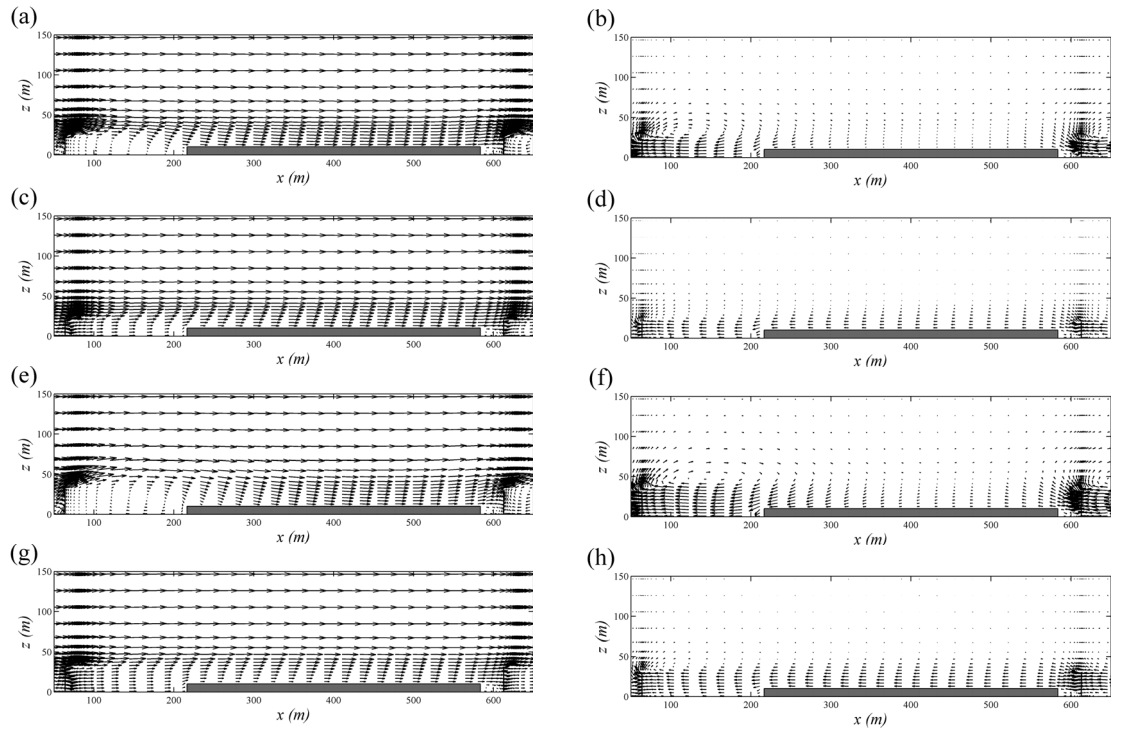

Fig. 6. The same as in Fig. 5 except for y = 148.7 m.

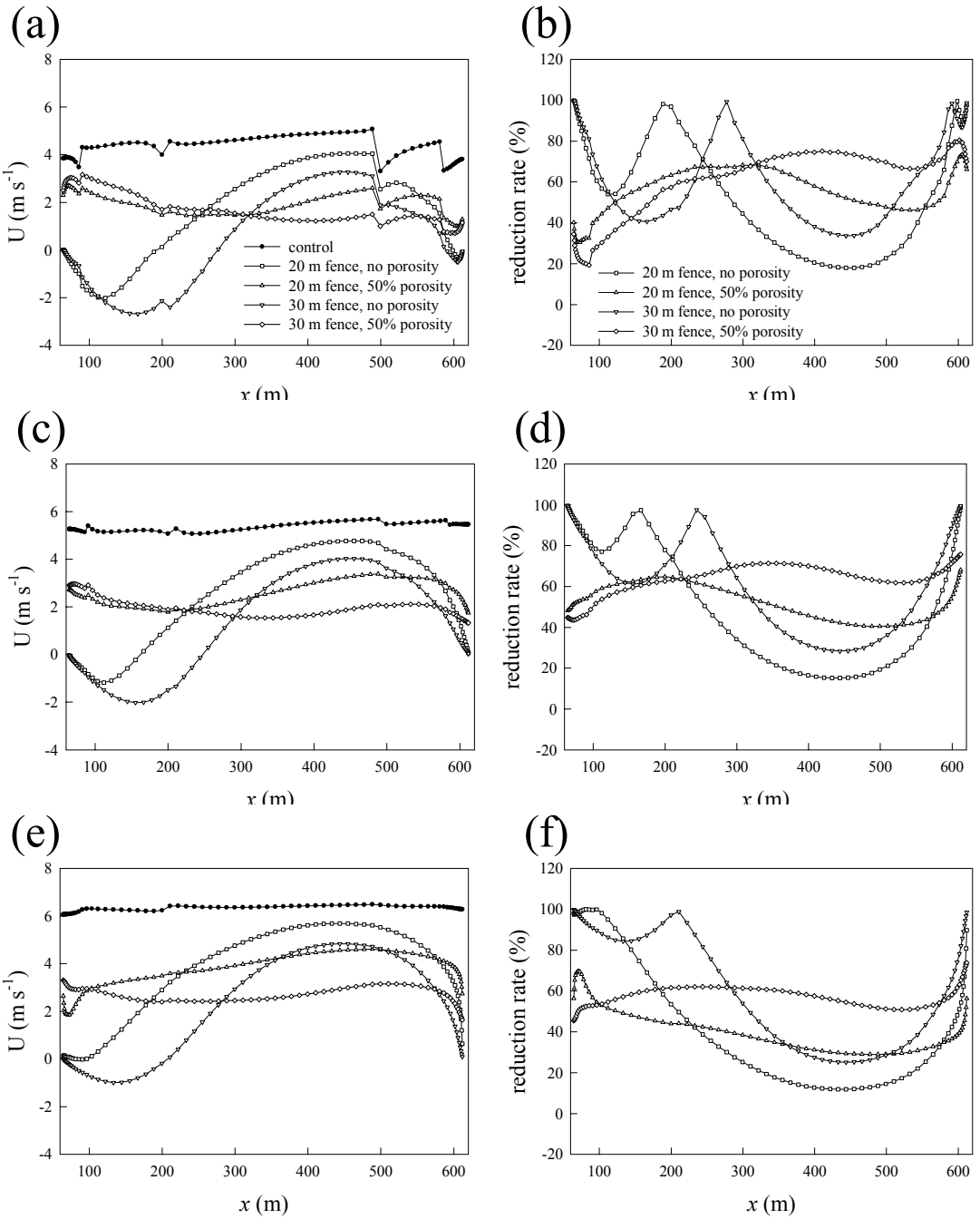

Fig. 7. Wind velocity and its reduction rate averaged in the y direction within the windbreaks (left and right) at z = 1 m [(a) and (b)], z = 9 m [(c) and (d)] and z = 19 m [(e) and (f)].

에 매우 크게 나타난다. 공극률이 0%인 경우에는 풍상측 방풍벽 후면에 재순환 영역이 형성되어 역류가 나타나는데 방풍벽의 높이가 높을수록 영향 범위가 넓어지고 상층보다는 하층에서 멀리까지 영향이 나타난다. 공극률이 50%인 경우에 높이가 30 m일 때 풍상측 방풍벽 부근에서는 풍속이 높게 나타나지만 풍하측으로 가면서 점차 풍속이 감소하여 높이가 20 m일 때보다 풍속이 감소한다. 이와 같은 풍속 역전은 하층보다 상

층에서 빨리 나타나는 것을 볼 수 있다. 풍속 감소율을 정략적으로 조사하기 위하여 다음과 같이 풍속 감소율을 정의하여 나타내었다 (Figs. 7b, 7d 그리고 7f).

$$\text{풍속 감소율}(\%) = \frac{(|\text{평균 풍속}_{\text{규준실험}}| - |\text{평균 풍속}_{\text{방풍벽 설치후}}|)}{|\text{평균 풍속}_{\text{규준실험}}|} \times 100 \quad (19)$$

공극률이 0%인 경우에는 방풍벽 풍하측에 형성된 재순환 영역에 나타난 역류가 나타나는데, 역류의 풍속이 상대적으로 약하기 때문에 풍속 감소율이 크게 나타났다. 그러나 풍하측으로 가면서 흐름 재부착점 후면에서 흐름이 회복되면서 풍속 감소율이 급격히 감소하며 풍하측 방풍벽 근처에서 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 높이가 30 m인 방풍벽보다 20 m인 방풍벽 후면에 상대적으로 약한 역류가 형성되면서 풍속 감소율이 크게 나타났다. 흐름 회복이 일어난 이후에는 방풍벽이 높을수록 속도 감소율이 크게 나타났다. 공극률이 50%인 경우에는 방풍벽을 통과한 풍속이 비교적 커서 방풍벽 근처에서의 풍속 감소율은 낮게 나타나지만 풍하측으로 갈수록 풍속 감소율이 점차 증가하는 것을 볼 수 있다. 풍속 감소율은 방풍벽 내부의 풍상측 지역에서는 방풍벽 높이가 작을 때 풍속 감소율이 크게 나타났고 풍하측 지역으로 가면서 풍속이 역전되면서 방풍벽 높이가 높을 때 풍속 감소율이 높게 나타났다.

앞에서도 언급하였듯이, 방풍벽 공극을 통한 유체의 유입으로 유체의 흐름을 방해하는 장애물 효과가 약하게 나타남으로 인해 에디의 크기가 작아져 유체 흐름을 왜곡 (distortion) 시키기 보다는 운동량 강도에 영향을 미쳐 풍속이 약화되는 현상이 발생한다. 이러한 현상은 Martin (1995)에서도 확인할 수 있는데, 이 연구에서는 공극률이 0%, 50%, 70%인 방풍벽에 대해 풍속 약화 정도를 관측을 통하여 제시하고 있다. 이 연구에서는 장애물 높이가 H일 때, 공극률 50% 방풍벽이 풍하측으로 2H ~ 10H 거리 까지 풍속을 75% 이상 감속시켜 가장 우수한 감속 효과를 보이는 것으로 보고하고 있다. 이와 같은 현상을 조사하기 위하여 Fig. 8에 풍하측 방풍벽으로부터 풍하측 거리 별 평균 풍속과 감속 효율을 제시하였다. 방풍벽을 설치하였을 경우, 방풍벽 부근에서는 풍속이 현저하게 감소하였고 풍하측으로 가면서 점차 증가함을 볼 수 있다. 공극률이 0%인 방풍벽의 경우, 재순환 지역의 형성으로 방풍벽 부근에서는 풍속이 낮게 나타나지만 이 후 흐름이 회복되면서 풍속이 빠르게 증가하는 것을 볼 수 있다. 지면 부근에서는 20 m 방풍벽의 경우에 흐름 재부착점이 방풍벽으로부터 가까운 지점에 형성되면서 풍속 회복이 빠르게 일어나 약 720 m 지점까지는 30 m 방풍벽 경우보다 풍속이 높게 나타났다. 공극률이 50%인 경우, 방풍벽으로부터 가까운 거리에서는 방풍벽이 낮은 경우에 풍속 감소가 다소 컸으나 풍하측으로 멀어지면서 방풍벽이 높은 경우에 풍속 감소가 크게 일어났다. 이와 같은 풍속 역전은 상층으로 갈수록 방풍벽으로부터 가까운 지점에서 일어났다. 풍속 감소율을 보면, 지면 근처의 풍속 감소는 공극률에 따라 뚜렷한 차이를 보이고 있으나 상층으로 갈수록 큰 차이는 나타나지 않았다. 지면 근처 (Fig. 8b)에서는 20 m 방풍벽의 경우, 방풍벽으로부터 풍하측으로 약 2.5H 떨어진 지점 (x = 665 m)까지는 재순환 지역이 형성된 공극률 0%의 방풍벽에 의한 풍속 감소가 크지만 그 이후로는 공극률이 50%인 경우에 풍속 감소율이 현저하게 높게 나타났다. 높이가 30 m인 경우도 방풍벽으로부터 풍하측으로 약 2H 떨어진 지점 (x = 675 m)부터 공극률이 50%일 때, 풍속 감소율이 현저하게 나타났다. 지면 부근에서 최대 풍속 감소율은 높이 20 m (30 m)인 경우에 풍하측 693.4 m (704.5 m) 지점에서 나타났고 최대 풍속 감소율은 73.5% (74.1%)로 나타났다. 이 결과는 Martin (1995)과 비교적 잘 일치한다. 방풍벽 내부와 방풍벽 풍하측에서 조사한 풍속 감소율을 보았을 때, 방풍벽 높이 차이에 의한 영향보다는 공극률 차이에 의한 영향이 상대적으로 크게 나타났다. 또한 방풍벽 공극에 의한 풍속 감소 영향은 지면 부근에서 가장 크게 나타났으며 방풍벽으로부터 풍하측으로 멀리 떨어질수록 현저하게 나타났다.

4.2 비산 먼지 발생에 미치는 영향

야적파일로부터의 비산 먼지 발생은 기상 조건에 크게 좌우될 수 있다. 바람에 의해 포복 (creep), 도약 (saltation), 난류확산 단계를 거쳐 비산 먼지가 발생한다 (Shao, 2000). 실질적인 비산은 도약 단계에서 시작하게 되는데, 임계마찰풍속이 도약을 결정하는 중요한 변수로 작용한다. 야적파일에서 바람에 의해 발생하는 비산 먼지의 배출률 (E, [g m^{-2} year^{-1}])은 다음과 같다 (U.S. EPA, 1995).

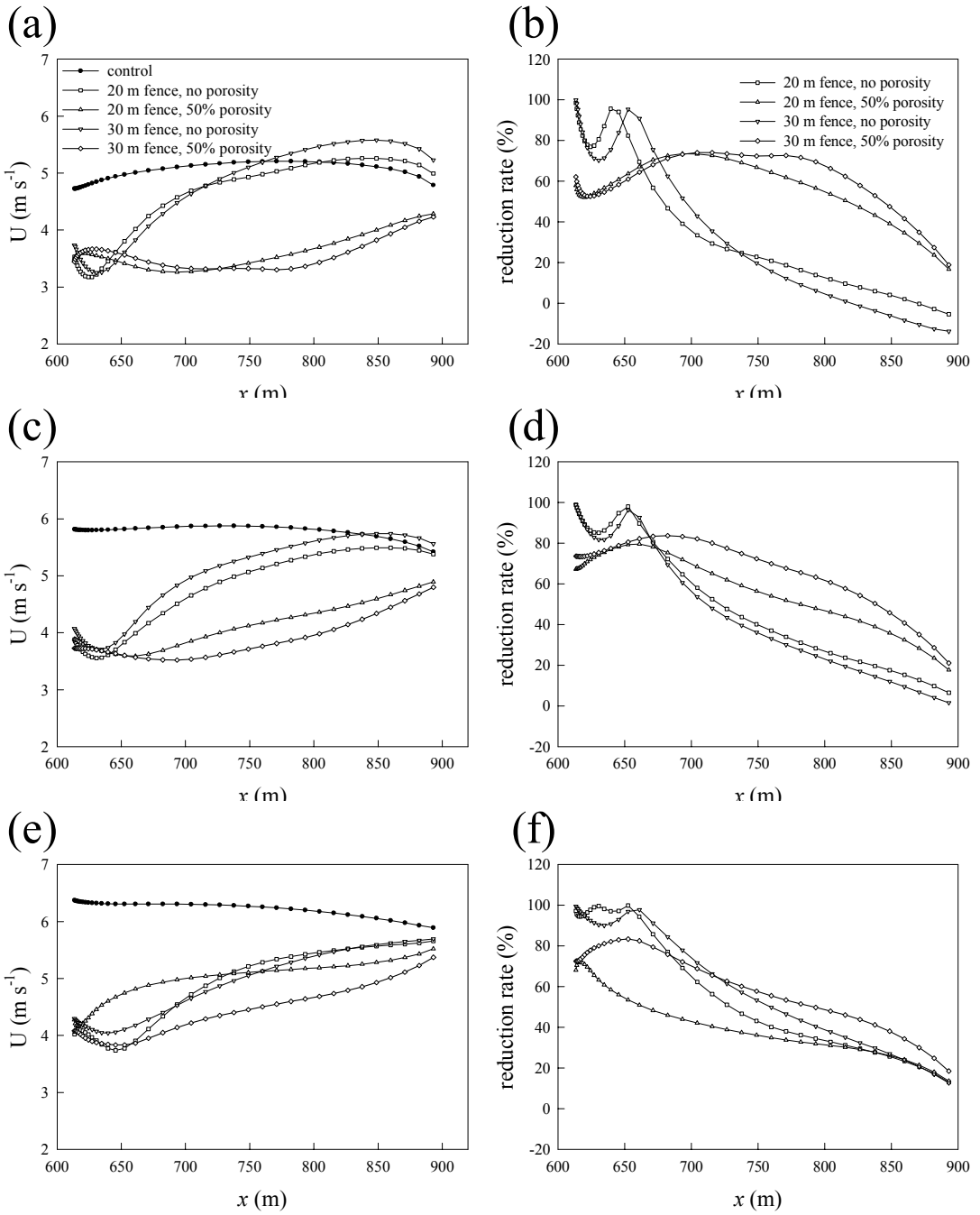

Fig. 8. Wind velocity and its reduction rate averaged in the y direction outside the windbreaks (left and right) at z = 1 m [(a) and (b)], z = 9 m [(c) and (d)] and z = 19 m [(e) and (f)].

$$E = w\sum_{i=1}^{N} P_i, \tag{20}$$

$$P_i = 58(u_* - u_*^c)^2 + 25(u_* - u_*^c) \quad \text{for } u_* - u_*^c > 0. \tag{21}$$

여기서, w는 입자 크기 가중치, P_i[g m^{-2}]는 바람에 의한 침식 가능성, N은 일 년 동안 발생하는 교란 회수를 나타낸다. u_*, u_*^c는 각각 마찰속도와 임계마찰속도이다. 입자 크기 가중치는 입자의 크기에 따라 다른 값을

갖는데, 본 연구에서는 2.5 μm 이하의 작은 입자를 가정하였으며 이때의 입자 크기 가중치는 0.075이다. 김현구 (2005)에 의하면, 야적파일의 임계마찰풍속은 평균적으로 0.30 ~ 0.58 m s^{-1}로 지표토양 (0.31 m s^{-1})보다 다소 높은 것으로 파악된다. 본 연구에서는 비산 먼지 확산 분석에 앞서서 야적파일의 마찰풍속을 조사하였다. 야적파일에 인접한 격자점의 풍속을 이용하고 풍속이 야적파일 경계면에서부터 로그규모로 증가한다고 가정하여 마찰풍속을 구하였다. Fig. 9는 *x*-*y* 평면으로 투영한 야적파일 상면의 마찰풍속을 나타낸다. 규준 실험의 경우 (Fig. 9a), 야적파일 상의 마찰속도가 가장 높게 나타남을 볼 수 있다. 즉, 방풍벽이 없는 경우에

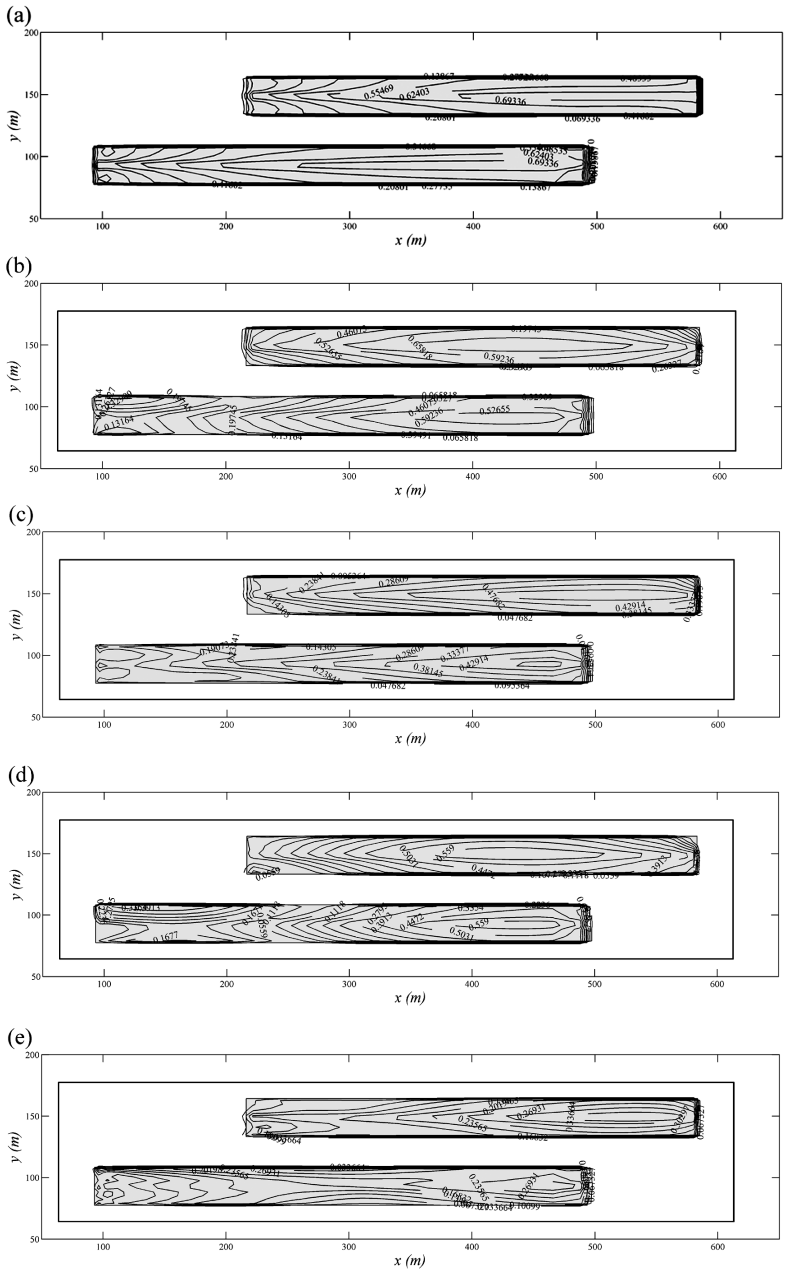

Fig. 9. Friction velocity at the upper surface of the storage piles in the (a) control, (b) H20P00, (c) H20P50, (d) H30P00 and (e) H30P50 experiments.

는 야적파일의 마찰속도가 크게 나타나기 때문에 비산 먼지가 발생할 수 있는 가능성이 높아지게 된다. 공극률이 0%인 방풍벽을 설치할 경우 (Figs. 9b와 9d), 규준 실험에 비해 마찰속도가 전반적으로 낮아지는 것을 볼 수 있다. 방풍벽 풍상측 내부의 재순환 영역에서는 마찰속도가 임계마찰속도에 비해 부분적으로 낮아지지만 풍하측으로 가면서 비산 먼지를 발생시킬 수 있을 정도로 마찰속도가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그리고 방풍벽이 높아질수록 마찰속도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 공극률이 50%인 방풍벽을 설치할 경우 (Figs. 9c와 9e), 마찰속도의 감소폭이 더욱 증가하는 것을 볼 수 있다. 공극률이 0%인 방풍벽과 비교하였을 때, 마찰속도가 임계마찰속도보다 낮은 영역이 더욱 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히, 방풍벽의 높이가 30 m이고 공극률이 50%인 경우 (Fig. 9e)에는 마찰속도가 대부분 영역에서 임계마찰속도보다 낮게 나타났다.

Fig. 9에서 보았듯이, 높이가 30 m이고 공극률이 50%인 방풍벽을 설치할 경우에는 마찰속도가 매우 낮아진다. 이 경우의 마찰속도가 임계마찰속도보다 매우 작기 때문에 비산 먼지가 거의 발생하지 않는다. 본 연구에서는 임계마찰풍속을 0.32 m s^{-1}로 설정하였고 바람에 의한 비산 먼지 발생이 하루에 한 번 일어난다고 가정하여 배출율을 계산하였다. Fig. 10은 총배출량을 나타낸 것이다. 비산 먼지는 주로 야적파일의 상단에서 발생하였고 풍상측 사면과 풍하측 사면에서는 발생하지 않았다. 규준실험의 경우, 비산 먼지 발생 총량은 약 8785.1 g이였고 높이가 30 m이고 공극률이 50%인 경우에는 7.9 g이 발생하였다. 방풍벽이 클수록 비산 먼지 발생은 감소하였고 높이가 같은 경우라도 방풍벽 공극이 50%일 때 비산 먼지 발생이 감소하였다. 공극률이 0%이고 높이가 20 m와 30 m일 때, 규준실험에 비해 각각 39.0%와 62.8%가 감소하였다. 공극률이 50%일 때에는 규준실험에 비해 각각 91.8%, 99.9% 감소하였다. 그리고 방풍벽이 20 m이고 공극이 50%인 경우가 방풍벽이 30 m이고 공극률이 0%인 경우에 비해 30% 정도의 비산 먼지를 발생시켰다. 다시 말해서, 방풍벽의 높이를 20 m에서 30 m로 높이는 것보다 20 m 높이의 방풍벽에 공극을 두는 것이 비산 먼지 발생 억제에 더 효과적임을 알 수 있다.

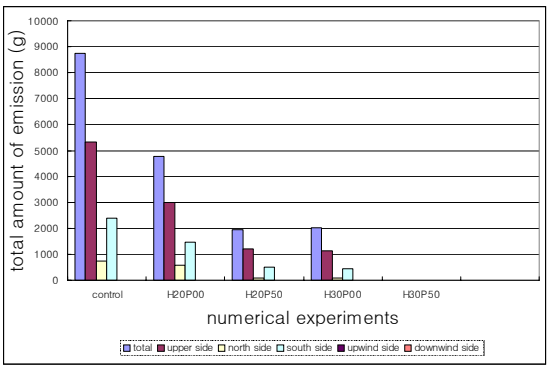

Fig. 10. Total amount of emission estimated using friction velocity.

5. 요약과 결론

본 연구에서는 충북 단양군 매포읍 매포리에 위치한 시멘트 공장의 야적파일에 대해 방풍벽 설치로 인한 시멘트 저장시설에서의 풍속의 변화와 비산 먼지 발생 저감 효과를 분석하였다. 이를 위하여 재규격화군 (Renormalization Group, RNG) 이론에 근거한 k-ε 난류 종결 방법을 포함한 전산유체역학 모형을 사용하였다. 방풍벽 설치 전과 후를 비교함으로써 방풍벽이 야적파일로부터의 비산 먼지 발생에 미치는 영향을 조사하였다. 규준실험의 경우, 야적파일 풍하측 지역에 재순환 지역이 형성되었고 비교적 단조로운 흐름 패턴을 보였다. 그러나 방풍벽을 설치한 후에는 공극률이 0%인 방풍벽에 의해 재순환 지역이 형성되었고 이것이 야적파일의 간섭을 받으면서 매우 복잡한 흐름 패턴을 형성하였다. 공극률이 50%인 경우에는 방풍벽을 통과한 대기 흐름이 재순환 지역의 형성을 억제하는 역할을 하였다. 방풍벽 내부에서 y 방향으로 평균한 지점별 풍속 감소율을 조사한 결과, 공극률이 0%인 경우에는 방풍벽 풍하측에 형성된 재순환 지역에 나타난 역류에 의해 풍속이 크게 감소되었다. 그러나 풍하측으로 가면서 흐름 재부착점 후면에서 흐름이 회복되면서 풍속이 급격히 증가하였다가 풍하측 방풍벽 근처에서 다시 감소하였다. 방풍벽이 높을 때 방풍벽 후면에 상대적으로 약한 역류가 형성되었고 흐름 회복이 일어난 이후에도 속도가 크게 감소하였다. 공극률이 50%인 경우에는 방풍벽을 통과한 후에도 풍속이 컸지만 풍하측으로 갈수록 풍속이 감소하였다. 방풍벽 시설 풍하측 지역에서는 공극률이 0%인 경우, 재순환 지역의 형성으로 방풍벽 부근에서는 풍속이 낮게 나타났지만 이 후 흐름이 회복되면서 풍속이 빠르게 증가하였다. 공극률이 50%인 경우, 방풍벽에서 가까운 지역에서는 공극률이 0%인 경우보다 풍속이 높게 나타났지

만 방풍벽에서 점차 멀어지면서 풍속 감소율이 현저하게 증가함을 볼 수 있었다.

야적파일로부터의 비산 먼지 발생은 마찰속도와 관련이 매우 높기 때문에 단순히 고도별 평균 풍속으로 발생률을 비교하기는 어렵다. 따라서 야적파일 표면의 마찰속도를 산출하여 비산 먼지 발생률을 산출하였다. 조사 결과, 방풍벽의 높이가 증가할수록 야적파일 표면의 마찰속도가 감소하였고 높이가 같은 경우 공극률이 큰 경우에 마찰속도가 더 작았다. 특히, 높이가 30 m이고 공극률이 50%인 경우에는 마찰속도가 비산 먼지를 일으킬 수 있는 임계마찰속도보다 매우 낮아서 비산 먼지 발생을 억제할 수 있는 조건을 형성하였다. 마찰속도에 따른 비산 먼지 발생량을 조사한 결과, 방풍벽을 설치함으로써 비산 먼지 발생을 억제할 수 있었다. 그리고 방풍벽이 높을수록 그리고 공극률이 클수록 비산 먼지 발생량이 작았는데, 방풍벽의 높이 증가에 의한 비산 먼지 발생 억제 효과보다는 공극을 포함하는 방풍벽의 비산 먼지 발생 억제 효과가 탁월하였다.

본 연구에서는 바람에 의한 비산 먼지 발생량을 산정하여 방풍벽의 영향을 조사하였다. 향후, 건성 침적 효과를 고려하여 주변 기상 조건의 변화에 따른 비산 먼지의 확산 특성을 분석하고자 한다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업 (CATER 2007-3307)의 지원으로 수행되었습니다. 논문에 대해 유익한 지적을 해주신 심사위원님께 감사드립니다.

참고문헌

김재진, 백종진, 2005: CFD 모형을 이용한 도시 도로 협곡에서의 흐름 체계 분류. *한국대기환경학회지*, **21**, 525-535.

김현구, 2005: 기상조건별 비산먼지 관리체계 최적화 연구. *한국대기환경학회지*, **21**, 573-583.

Baik, J.-J., J.-J. Kim, and H. J. S. Fernando, 2003: A CFD model for simulating urban flow and dispersion. *J. Appl. Meteorol.*, **42**, 1636-1648.

Bohah, K. K., and K. G. Alhinai, 1986: Field tests of porous fences in the regime of sand laden wind. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, **23**, 309-319.

Kim, J.-J., and J.-J. Baik, 2004: A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons. *Atmos. Environ.*, **38**, 3039-3048.

Martin, P., 1995: Wind protective fences of PARAWEB composites. *Techtextil-Symposium 1995*, Lecture No. **537**, 1-8.

Park, C.-W., and S.-J. Lee, 2003: Experimental study on surface pressure and flow structure around a triangular prism located behind a porous fence. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, **91**, 165-184.

Patankar, S. V., 1980: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow,* McGraw-Hill, New York, 197 pp.

Raine, J. K. and, D. C. Stevenson, 1977: Wind loading of sheltered semi-cylindrical structures. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, **2**, 159-180.

Shao, Y., 2000: *Physics and Modeling of Wind Erosion,* Kluwer Academic Publishers, 393 pp.

Subhas, C., H. S. Yaragal, R. Govinda and, K. K. Murthy, 1997: An experimental investigation of flow fields downstream of solid and porous fences. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, **66**, 127-140.

Tutar, M. and, G. Oguz, 2002: Large eddy simulation of wind flow around parallel buildings with varying configurations. *Fluid Dyn. Res.*, **31**, 289-315.

U.S. Environmental Protection Agency, 1995: *Emission Factor Documentation for AP-42, Section 13.2.5., Industrial Wind Erosion*, Research Triangle Park, NC, USA.

Versteeg, H. K., and W. Malalasekera, 1995: *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method,* Longman, Malaysia 257 pp.

Yakhot, V., S. A. Orszag, S. Thangam, T. B. Gatski, and C. G. Speziale, 1992: Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Phys. Fluids*, **A4**, 1510-1520.