기상 조건과 매립 조건이 비산 먼지 발생에 미치는 영향

최재원 · 이영수 · 김재진*

부경대학교 환경대기과학과

(2010년 9월 30일 접수; 2010년 10월 30일 수정; 2010년 11월 24일 채택)

Effects of Meteorological and Reclaiming Conditions on the Reduction of Suspended Particles

Jae-Won Choi, Young-Su Lee, Jae-Jin Kim*

Department of Environmental Atmospheric Science, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

(Manuscript received 30 September, 2010; revised 30 October, 2010; accepted 24 November, 2010)

Abstract

The effects of meteorological and reclaiming conditions on the reduction of suspended particles are investigated using a computational fluid dynamics (CFD) model with the $k-\varepsilon$ turbulence closure scheme based on the renormalization group (RNG) theory. Twelve numerical experiments with different meteorological and reclaiming conditions are performed. For identifying the meteorological characteristics of the target area and providing the inflow conditions of the CFD model, the observed data from the automatic weather station (AWS) near the target area is analyzed. Complicated flow patterns such as flow distortion, horse-shoe vortex, recirculation zone, and channeling flow appeared due to the topography and buildings in the domain. Specially, the flow characteristics around the reclamation area are affected by the reclaiming height, reclaiming size and windbreak height. Reclaiming height affected the wind speed above the reclaiming area. Windbreak induces more complicated flow patterns around the reclaiming area as well as within the reclaiming area. In front of the windbreak, flow is distorted as it impinges on the windbreak. As a result, upward flow is generated there. Behind the windbreak, a secondary circulation, so called, a recirculation zone is generated and flow is reattached at the end of the recirculation zone (reattachment point). At the lower part of the recirculation zone, there is a reverse flow toward the windbreak. Flow passing to the reattachment point starts to be recovered. Total amounts of suspended particles are calculated using the frictional and threshold frictional velocities, erosion potential function, and the number of surface disturbance. In the case of a 10 m-reclaiming and northerly wind, the amount of suspended particles is largest. In the presence of 5 m windbreak, the friction velocity above the reclaiming area is largely reduced. As a result, the total amount of the suspended particles largely decreases, compared to the case with the same reclaiming and meteorological conditions except for the windbreak. The calculated suspended particle amounts are used as the emission rate of the dispersion model simulations and the dispersion characteristics of the suspended particles are analyzed.

Key Words : Meteorological and reclaiming conditions, Wind break, Suspended particles

*Corresponding author : Jae-Jin Kim, Department of Environmental Atmospheric Science, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea
Phone: +82-51-629-6645
E-mail: jjkim@pknu.ac.kr

1. 서론

화력발전소에서는 유·무연탄을 원료로 전기를 생산·공급하고 있다. 유·무연탄의 연소로부터 발생되

는 석탄회(coal ash)는 그 양이 지속적으로 증가하는 추세이다. 화력발전의 부산물로 발생하는 석탄회는 시멘트 원료나 콘크리트 혼화재로서 사용되는 등 재 활용되고 있으나 수요량이 극히 일부이기 때문에 상당 부분은 야적장에 야적되고 있는 실정이다. 석탄회는 비산재(fly ash)와 바닥재(bottom ash)로 구분할 수 있는데, 비산재는 보통 1 mm ~ 30 mm의 크기를 갖고 있다. 비산재는 시멘트 또는 시멘트 콘크리트의 광물성 혼화재로 많이 사용되고 있으나 상당량은 바닥재와 함께 매립되거나 야적되고 있는 실정이다(산업자원부, 2002). 야적된 비산재는 그 크기가 매우 작고 비중(약 2.0)도 작기 때문에 바람에 의해 인근 지역으로 비산되면서 심각한 대기오염과 환경 문제를 야기할 수 있다. 이와 같은 이유 때문에 대기환경보존법 제43조에서는 비산 먼지를 발생 시킬 수 있는 시설물(예, 시멘트 제조업 등)에서는 비산 먼지 발생을 억제할 수 있는 시설물을 설치하거나 필요한 조치를 취할 것을 규정하고 있다.

야적된 석탄회의 비산을 억제할 수 있는 시설에는 밀폐식 시설, 방진 시설, 방풍벽 등이 있다. 밀폐식 시설은 석탄회의 비산을 근원적으로 차단할 수 있으나, 설치 비용이 너무 비싸기 때문에 대규모 야적지에 적용하기에 적합하지 않다. 따라서, 대규모 야적지에서는 주로 방풍벽 설치를 통한 비산 먼지 억제를 도모하고 있다. 방풍벽은 설치 구역 내의 대기 흐름에 영향을 미쳐 비산을 억제시킬 수 있는 시설로서 방풍벽의 높이, 재질, 공극률 등에 따라 비산 억제 효과가 크게 달라질 수 있다. 특히, 방풍벽은 비산 먼지를 억제하는 기능을 유지하고 태풍이나 돌풍과 같은 강풍에도 견딜 수 있어야 하기 때문에 방풍벽 공극률과 비산 억제를 고려한 방풍벽 설계에 관한 연구가 많이 수행되어져 왔다(Bofah와 Alhinai, 1986; Subhas 등, 1997; Park과 Lee, 2003). 송 등(2007)에 의하면 공극이 없는 방풍벽의 풍하 지역에서는 방풍벽에 의한 재순환 영역(recirculation zone)과 이중 에디 순환(double eddy circulation)이 형성되지만 공극이 큰 방풍벽의 풍하 지역에서는 공극을 통한 대기 유입이 방풍벽 후면 근처의 저압 지역으로의 흐름과 이 흐름을 보상하기 위한 역류(reverse flow)를 억제시킴으로써 재순환 영역과 이중 에디 순환의 형성을 방해하게 된다. 이와

같은 이유로 방풍벽 풍하 지역의 풍속이 약화되면서 비산 먼지 발생이 억제되는데, 이 현상은 Martin (1995)의 풍동 실험에서도 확인되었다.

본 연구에서는 화력발전소 석탄회 야적 시설로부터 발생한 석탄회 발생량을 추정하고 이를 입력 자료로 사용하여 비산 석탄회가 확산되어 인근 지역으로 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위하여 자동기상관측기로부터 관측된 관측 자료를 분석하여 수치 모델의 입력 자료 구축에 이용하였다. 이로부터 인근 주거 지역으로 영향을 미칠 수 있는 3가지 풍향을 선정하여 4가지 매립조건에 대한 수치 실험을 수행하였다. 수치 모의된 결과를 이용하여 비산 석탄회량을 추정하였고 이를 입력 자료로 사용하여 대기확산 모델링을 수행하였다.

2. 대상 지역 현황

본 연구에서는 강원도 동해시에 위치한 화력발전소의 석탄회 야적장을 대상 지역으로 선정하였다. 이 지역은 동해안에 위치하고 있고 해륙풍과 계절풍 특성이 뚜렷하게 나타나는 지역이다. 대상 지역의 기상 특성을 파악하기 위해서 가장 인접한 동해시 용정동 동해기상대에 위치한 자동기상관측시스템(AWS 106) 자료 중 2006년 1월부터 2008년 8월까지 1분 간격으로 관측한 지상 관측 자료를 분석하였다. AWS 106 지점은 대상 지역에서 직선 거리로 약 3 km 북서쪽 해안에 위치하며 해발고도 약 40 m에 설치되어 있다. AWS 106 지점은 대체로 남서풍, 서풍, 북서풍, 북풍, 북동풍 계열의 바람이 우세했으며 매년 북풍 계열과 남서풍 계열 바람이 지배적이며 여름철에는 계절풍의 영향으로 인해 동풍 계열 바람 빈도수가 증가하였다(Fig. 1). 조사 기간 동안 10 m 고도 평균풍속은 약 2.9 m s^{-1} 이다. 매립 석탄회를 비산시킬 수 있는 임계풍속을 고려하여 5 m s^{-1} 이상, 10 m s^{-1} 이상으로 구분하여 산출한 결과, 풍속 5 m s^{-1} 이상의 10 m 고도 평균 풍속은 약 6.5 m s^{-1} 로 겨울과 봄철에는 서풍과 북서풍 계열의 바람이 우세하였고, 여름과 가을철에는 북풍과 북동계열 바람이 우세하게 나타났으며, 풍속 10 m s^{-1} 이상에서는 약 11.3 m s^{-1} 로 가을철에 북풍, 북동 계열의 바람이 우세하게 나타났다. 분석 기간 동안의

Fig. 1. Wind roses derived from (a) one-minute averaged and (b) one-hour averaged AWS data.

자료가 대상 지역 풍계를 제대로 대표할 수 있는지를 조사하기 위하여 자동기상관측이 시작된 기간(1992년 5월 ~ 2008년 9월) 동안의 1시간 평균 자료를 이용하여 분석 기간 동안의 전체 평균 자료와 비교하였다. 그 결과 본 연구에서 분석한 기간의 자동기상관측 자료가 대상 지역의 풍계를 제대로 반영하여 나타내는 것을 알 수 있다.

3. 수치실험 설계

본 연구에서 사용한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 모델은 김(2007)이 사용한 것과 동일하다. 이 CFD 모델은 3차원, 비정상, 비회전, 비압축 대기 흐름계를 가정하고 코리올리 효과를 배제한다.

3.1. 대상 지역

Fig. 2는 화력발전소가 위치한 동해시 구호동 일대의 지도이다. 1 회차리장과 2 회차리장에 인접한 해안선은 거의 직선으로 형성되어 있으며 북쪽에서 반시계 방향으로 약 26.5° 정도 기울어져 있는 특징이 있다. 또한 대상 지역의 건물도 해안선에 평행하거나 수직인 방향으로 건축되어 있는 특징이 있다. 매우 작은 규모의 대기 흐름을 고려할 때, 건물이나 구조물 등이 대기 흐름을 결정하는 중요한 외력으로 작용한다. 따라서 수치모델에서 건물이나 구조물을 보다 현실적으로 재현하는 것이 보다 현실적인 수치모델링 결과를 도출하는데 필수적이다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 보다 현실적인 수치모델링 결과를 도출하기 위하여 대상 지역을 시계 방향으로 약 26.5° 회전시켜서 수치 지형 자료와 수치 건물 자료를 수립하였다. 본 연

Fig. 2. Maps of the (a) Yongjeong-dong, Donghae City and (b) target area. The AWS 106 site is located about 3 km northwest of the target area.

구에서는 수차레의 사전 테스트를 거쳐서 계산 능력의 한계 내에서 지형물의 효과를 비교적 잘 반영할 수 있도록 대상 지역을 Fig. 2와 같이 가로 2000 m, 세로 2300 m의 영역으로 제한하여 수치모델링을 수행하였다.

3.2. 수치모델 실험 설계

수평 방향으로는 크기가 일정한 격자계(가로 10 m, 세로 11.5 m)를 사용하였다. 연직 방향으로는 지형물을 보다 상세하게 구현하기 위하여 약 49 m까지는 격자 크기가 2.5 m로 일정하다가 약 49 m 이상의 고도에서는 13.9 m가 될 때까지 약 1.1배씩 증가하며 그 이상의 고도에서는 13.9 m로 일정하다. 수치 도면의 연직 방향 크기는 약 474 m이다. 대상 지역의 지형, 건물 등에 대한 공간 자료를 이용하고 수치 지형물 구축 알고리즘을 적용하여 수치모델에서 구현한 지형과 건물을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2와 비교하였을 때, 본 연구에서 사용한 수치 지형물 구축 알고리즘이 대상 지역의 지형과 건물을 매우 잘 구현하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 3에서는 1 회처리장과 2 회처리장은 포함하지 않았으며, 파란색은 동해, 진한 노랑색은 해발 고도 5 m인 평지, 회색은 건물을 나타내며, 등고선 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m의 지형은 초록색 계통의 색으로 표현하였고 진한 색이 높은 등고선을 의미한다.

Fig. 3. The model buildings and topography constructed in the CFD model as an input data.

시간 간격을 1 초로 하여 3600 초까지 수치 적분하였다. 바람, 난류 운동 에너지 그리고 난류 운동 에너지의 소멸율에 대한 초기 조건은 다음과 같다.

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \cos q, \quad (1)$$

$$v(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \sin q, \quad (2)$$

$$w(z) = 0, \quad (3)$$

$$k(z) = \frac{1}{C_\mu^{1/2}} u_*^2 \left(1 - \frac{z}{\delta} \right)^2, \quad (4)$$

$$\epsilon(z) = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa z}. \quad (5)$$

여기서, u_* , z_0 , d , k , q 는 각각 마찰 속도, 거칠기 길이(= 0.05 m), 경계층 두께(= 1000 m), von Karman 상수(= 0.4), 풍향을 의미한다. 유입류의 풍속은 상대적으로 발생 빈도는 낮지만 한 번에 가장 많은 비산재를 발생시킬 수 있도록 10 m 고도에서 약 10 m s^{-1} 의 풍속이 나타나도록 설정하였다. 매립 석탄회의 비산 수치모델 실험을 수행하기 위하여 매립 석탄회의 고도, 매립 면적, 매립 석탄회 주위에 설치한 방풍벽 유무, 풍향 등을 고려한 12가지 시나리오(Table 1)를 구성하였다. 앞에서 언급했듯이, 대상 지역의 건물, 석탄회 처리장 등의 구조물을 수치모델에서 보다 현실적으로 구현하기 위하여 시계방향으로 약 26.5° 를 회전시킨 좌표계를 사용하였고, 수치모델에서 용이하게 인식할 수 있도록 풍향을 대상지역 서쪽을 기준으로 입력하였다. 따라서, 북풍(0°)의 경우 모델에서는 243.5° 로 인식하고, 북북동풍(31.75°)의 경우 211.75° 로 인식하며 동북동풍(58.5°)의 경우 185° 로 인식한다. 이를 기준으로 각 시나리오의 명칭을 Table 1과 같이 명명하였다.

Table 1. Summary of the numerical experiments

reclaiming height	reclaiming area	wind break	wind direction		
			0°	31.75°	58.5°
10 m	1	no	F1010_q243	F1010_q211	F1010_q180
10 m	1, 2	no	F1210_q243	F1210_q211	F1210_q180
15 m	1, 2	no	F1215_q243	F1215_q211	F1215_q180
15 m	1, 2	yes	F12WB_q243	F12WB_q211	F12WB_q180

Fig. 4. The model buildings and topographies for different reclaiming conditions, (a) F1010, (b) F1210, (c) F1215, and (d) F12WB.

Fig. 4는 회처리장을 고려한 대상 지역의 지형, 건물, 물을 나타낸다. 여기서 회처리장은 회색으로 나타내었고 방풍벽은 검은색으로 나타내었다. 본 연구에서는 석탄회가 회처리장에 완전히 적재되어 있으며, 적재된 면은 평평하다고 가정하였다. Fig. 4a는 1 회처리장을 10 m 높이로 매립하였을 경우, Fig. 4b는 1, 2 회처리장을 모두 10 m 높이로 매립하였을 경우, Fig. 4c는 1, 2 회처리장을 모두 15 m 높이로 매립하였을 경우, Fig. 4d는 1, 2 회처리장을 모두 15 m 높이로 매립하고 방풍벽을 설치하였을 경우를 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 바람장 특성 분석

대상 지역에 대한 시나리오별 바람 환경 특성 분석을 위해 보행자 높이에 가까운 지표 바람(지표면으로부터 1.25 m 고도의 바람)을 분석하였다.

4.1.1. 회처리장을 10 m 고도로 매립한 경우(F1010)

Fig. 5a는 1 회처리장만 10 m 높이로 매립하고 북풍(0°)이 부는 경우의 지표 바람 벡터장을 나타낸다. 지형물에 의해 복잡한 흐름장이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 1 회처리장과 동해안 경계 지역에서는 바

Fig. 5. The wind-vector fields at the height of 1.25 m above the terrain in the cases of (a) F1010_q243, (b) F1010_q211, and (c) F1010_q180.

람이 회처리장과 거의 평행하게 불어 내려오는 것을 확인할 수 있다. 회처리장 풍하측 후면에서는 역류(reverse flow)가 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 이 지역에 재순환 영역(recirculation zone)이 형성되기 때문이며, 흐름이 재부착(reattachment)된 이후로 흐름 회복이 일어나 점차적으로 풍속이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 발전소와 석탄 저장소 풍하측 후면에서도 재순환 영역이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 회처리장을 통과하는 바람은 일부가 석탄저장소 동쪽으로 불어서 남쪽으로 불어 나가는데, 조각 공원이 위치한 높이 약 20 m의 작은 동산(①)의 서쪽에 위치한 골을 따라서 불어 나가는 것을 확인할 수 있다. 조각 공원이 위치한 동산(①)을 기준으로 일부 바람은 동산 주위를 돌아서, 일부 바람은 작은 동산을 넘어서 A 마을로 진입하는 것을 확인할 수 있다. 비교적 높은 산봉우리의 풍상측에서는 흐름이 산봉우리에 의해 차단되면서 산봉우리를 돌아서 불어나가는 것을 확인할 수 있으며, 풍하측에서는 재순환 영역이 형성되는 것을 확인할 수 있다(②, ③, ④). 특히, 수치 도면의 남쪽에 위치한 두 개의 봉우리 사이(⑤)에서는 질량보존법칙을 만족시키기 위해 풍속이 부분적으로 증가하는 channeling 효과가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 북북동풍(31.75°)이 불 때(Fig. 6b), 회처리장을 통과하는 바람은 A 마을로 진입하지 못하고 북평 산업 단지 방향으로 불어 나가는 것을 볼 수 있다. 회처리장을 통과한 바람은 발전소 건물 주위로 불어나가는데, 발전소에 의한 풍향 변화가 심하게 일어난다. 특히, 회처리장, 발전소, 석탄 저장소, 석탄 저장소 풍하측 동산(⑥) 사이 공간에서의 변화가 매우 심하다.

회처리장을 통과한 바람이 발전소 주위를 돌아가다가 동산과 석탄 저장소 사이 공간을 따라 불어 나오는 것을 볼 수 있다. 이 공간에서 빠져 나온 일부 바람은 동산의 풍하측에 위치한 골을 따라 유입되는 풍향과 관계없이 시계 방향으로 불어 나가는 것을 확인할 수 있다(⑦). 북풍경우와 마찬가지로 남쪽에 위치한 두 개의 봉우리 사이에 channeling 효과가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 동북동풍(58.5°)의 경우(Fig. 6c), 앞의 두 경우에 비해 회처리장 표면 속도가 작은 것을 확인할 수 있다. 바람이 회처리장과 같은 장애물을 향해 불어올 경우에는 장애물에 부딪히면서 흐름 왜곡이 발생하는데, 장애물과 부딪히는 면적이 클수록 흐름 왜곡 정도는 증가하게 되며, 이에 따라 장애물 상층 경계면 부근의 풍속은 감소하게 된다. 북풍이나 북북동풍의 경우에는 흐름 왜곡이 좁은 폭으로 일어나기 때문에 회처리장 표면에서의 풍속 감소가 작지만 동북동풍의 경우에는 흐름 왜곡이 넓은 폭으로 일어나고 흐름 왜곡 범위가 넓어지면서 회처리장 표면 풍속이 크게 감소하였다. 석탄 저장소 풍상측면 부근에서는 풍속이 매우 약하게 나타나고 건물 중앙으로부터 양쪽으로 흐름이 분리되어 불어나가는데, 이는 석탄 저장소 주변에 말편자소용돌이(horse-shoe vortex)가 형성되기 때문이다. 남쪽에 위치한 두 개의 봉우리 사이에서는 앞에서 본 두 경우와 마찬가지로 두 봉우리 사이를 따라서 바람이 불어나가는데, 풍속이 비교적 작다. 이는 동쪽에 위치한 봉우리에 의해 풍하측에 재순환 영역이 형성되고 이에 따라 이 지역의 풍속이 약화된 것으로 판단된다.

Fig. 6. The wind-vector fields at the height of 1.25 m above the terrain in the cases of (a) F1210_q243, (b) F1210_q211, and (c) F1210_q180.

4.1.2. 1, 2 회처리장을 10 m 고도로 매립한 경우(F1210)

Fig. 6a는 1, 2 회처리장을 10 m 높이로 매립하고 북풍이 부는 경우의 지표 바람이다. 동해안에 인접한 회처리장 옆면에서는 바람이 회처리장에 거의 평행하게 들어가는 것을 볼 수 있다. 이를 제외하고는 1 회처리장만을 10 m 높이로 매립한 경우(F1010_q243)와 거의 유사한 흐름장이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 회처리장을 통과하는 바람은 그대로 풍하 지역의 A 마을 부근으로 불어 나가고, 조각 공원이 위치한 높이 약 20 m의 작은 동산(Fig. 5a, ①)을 기준으로 일부 바람은 동산 주위를 돌아서, 일부 바람은 동산을 넘어서 A 마을로 진입하는 것을 확인할 수 있다. 또한 발전소와 석탄 저장소 풍하측 후면에 재순환 영역이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 북북동풍이 불 때, 지표 바람의 경우(Fig. 6b)도 F1010_q211 경우와 매우 유사하다. 다만, 석탄 저장소 남쪽 후면의 고도가 2 회처리장에 의해 높아지면서 에디 순환이 약화되었고 2 회처리장 남쪽 후면과 조각 공원이 위치한 동산 사이의 풍속이 감소하였다. 그리고 2 회처리장을 통과하는 바람 중 일부는 석탄 저장소와 발전소 사이 공간을 빠져나가지만 대부분은 석탄 저장소 남쪽으로 향해 불어나간다. 이 바람은 2 회처리장 서쪽에 위치한 낮은 구릉지 남쪽 사면을 따라 불어 나가는 것을 확인할 수 있다(⑧). 동북동풍이 부는 경우에도 F1010_q180 경우와 유사하다. 그러나 1 회처리장과 석탄 저장소 사이의 풍속이 약화되었고 2 회처리장 남쪽면과 조각 공원이 위치한 동산 사이의 풍속이 감소하였다. 2 회처리장

표면 풍속을 보면, 1 회처리장 표면에서와 마찬가지로 회처리장 풍상측에서 유입류의 흐름 왜곡 범위가 넓어지면서 풍속이 매우 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 회처리장의 가장 자리보다 1, 2 회처리장 중심 부근의 풍속이 크게 감소하였다.

4.1.3. 1, 2 회처리장을 15 m 고도로 매립한 경우(F1215)

그림으로 나타내지는 않았지만 1, 2 회처리장을 15 m 높이로 매립한 경우는 F1210과 거의 유사한 흐름 패턴이 나타났다. F1210 흐름과의 차이를 알아보기 위하여 바람벡터장 차이를 조사하였다(Fig. 7). 회처리장의 높이가 10 m에서 15 m로 높아지면서 회처리장 부근 지역을 제외하고는 흐름장의 차이가 거의 나타나지 않았다. 주목할 만한 사실은 회처리장 부근에서 F1210 풍속에 비해 F1215 풍속이 대체적으로 감소한 것이다. F1210에 비해 F1215의 회처리장 고도가 5 m 높음에도 불구하고 지표 바람의 크기는 더 감소하였다. 회처리장 방향으로 유입되는 바람은 회처리장의 풍상측 면에 부딪히게 되고 흐름 왜곡이 발생하게 되는데, 회처리장의 높이가 높을수록 흐름 왜곡이 크게 발생하게 되고 이에 따라 회처리장 표면 풍속이 감소하기 때문이다. 북풍이 부는 경우(Fig. 7a), 최대 속도 크기 차이는 약 2.9 m s^{-1} 로 석탄 저장소의 풍상측[(x, y) = (1645 m, 1374 m)]에서 나타났다. 이 지역의 속도는 비교적 작지만, 풍향이 바뀌면서 큰 차이를 나타내었다. 석탄 저장소의 서쪽면 부근과 2 회처리장 남쪽 지역에서는 오히려 F1215의 풍속이 증가하였다. 북북동풍의 경우(Fig. 7b), 회처리장이 위치한

Fig. 7. The distributions of wind-vector difference between the F1215 and F1210 cases at the height of 1.25 m above the terrain in the cases of (a) q243, (b) q211, and (c) q180.

지역의 풍속이 F1210에 비해 거의 모든 지역에서 감소한 것을 볼 수 있다. 풍속 감소는 풍상측이 가장 크고 풍하측으로 갈수록 작아지는 것을 확인할 수 있다. 다시 말하면, 회처리장과 유입류의 충돌로 흐름 왜곡이 발생하는데, 회처리장의 고도가 높을수록 흐름 왜곡이 증가하고 이에 따른 회처리장 지표면 근처 풍속은 감소한다. 그러나 풍하측으로 가면서 흐름 회복이 일어나면서 F1210과의 차이가 감소한다. 특이할만한 사항은 v 차이가 u 차이에 비해 매우 작게 나타났다. 이 경우 최대 속도 크기 차이는 약 3.0 m s^{-1} 로 2 회처리장 남쪽면 부근 $[(x, y) = (1645 \text{ m}, 569 \text{ m})]$ 에서 나타났다. 동북동풍의 경우(Fig. 7c), 바람 벡터 차이의 분포가 북북동풍의 경우(Fig. 7b)와 유사하다. 이 경우에는 유입류가 회처리장에 직교 방향으로 불어오기 때문에, u 성분의 차이가 크게 나타났다. 이 경우 최대 속도 크기 차이는 약 3.2 m s^{-1} 로 1 회처리장의 동쪽 모서리 부근 $[(x, y) = (1745 \text{ m}, 1719 \text{ m})]$ 에서 나타났다. 앞에서 살펴본 바와 같이, 다른 조건이 모두 같고 회처리장의 높이만 다른 경우에는 회처리장 인근 지역에 국한되어 영향이 나타나는 것과 매립 높이가 높아질수록 흐름 왜곡의 커지면서 풍하측의 풍속이 감소함을 확인할 수 있다.

4.1.4. 1, 2 회처리장을 15 m 고도로 매립하고 방풍벽을 설치한 경우(F12WB)

Fig. 8a는 1, 2 회처리장을 15 m 높이로 매립하고 방풍벽을 5 m 세우며 북풍이 부는 경우의 지표 바람이다. F1210, F1215와 마찬가지로 회처리장 옆면으로는 바람이 거의 평행하게 불어 내려오는 것을 볼 수

있다. 1 회처리장에서는 북쪽 방풍벽의 후면에 재순환 영역이 형성되고 동쪽 방풍벽의 서쪽에서는 방풍벽에 거의 평행한 흐름이 나타난다. 2 회처리장에서는 남북 방향 성분의 바람이 주로 불어 내려오는데, 동쪽 방풍벽 근처에서는 방풍벽을 향하는 바람이 부는 것을 확인할 수 있다. 또한 회처리장 표면 풍속이 감소하는데, 1 회처리장에 비해 2 회처리장 표면 바람의 감속 현상이 두드러진 것을 볼 수 있다. 회처리장을 통과하여 회처리장 풍하 지역의 A 마을 부근으로 불어오는 바람도 F1215에 비해 풍속이 감소하였다. 북북동풍의 경우(Fig. 8b), F1210과 F1215에 비해 회처리장 표면 풍속이 감소하였다. 특히, 회처리장 표면 바람 중 방풍벽 부근의 풍향이 F1210이나 F1215와 현저한 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 동북동풍이 부는 경우(Fig. 8c)에도 F1210과 F1215와 비교하였을 때, 회처리장 지역의 풍속이 감소하였고 풍향도 크게 변화하였다. 특히, 동쪽 방풍벽 부근에서는 재순환 영역(recirculation zone)이 형성되면서 풍향이 반대 방향으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 방풍벽은 풍하 지역에 재순환 영역을 형성함으로써 풍하 지역에 복잡한 흐름 패턴을 유발하였고 회처리장 표면의 풍속을 감소시키는 것을 확인할 수 있었다.

4.2. 석탄회 비산량 추정 방법

회처리장에 매립된 석탄회는 바람에 의해 포복(creep), 도약(saltation), 난류확산 단계를 거쳐 비산된다(Shao, 2000). 야적 파일 표면에서 풍속 분포의 로그 함수식으로부터 산출되는 마찰 속도(friction velocity,

Fig. 8. The wind-vector fields at the height of 1.25 m above the terrain in the cases of (a) F12WB_q243, (b) F12WB_q211, and (c) F12WB_q180.

Table 2. The annually averaged numbers of disturbance ($> 10 \text{ m s}^{-1}$) and relative frequencies

northerly		north northeasterly		east northeasterly	
relative frequency	number of disturbance	relative frequency	number of disturbance	relative frequency	number of disturbance
0.049%	258	0.068%	357	0.011%	55

u_*)와 대기 중에 노출된 분체물질의 비산을 결정하는 임계 마찰 속도(threshold friction velocity, u_*^t)의 2차 함수식(U.S. EPA, 1995)을 이용하여 석탄회 비산량(E)을 추정하였다.

$$E = k \sum_{i=1}^N P_i \quad (6)$$

$$P_i = 58(u_* - u_*^t)^2 + (u_* - u_*^t) \quad (7)$$

여기서, P_i 는 마찰 속도와 임계 마찰 속도로 표현한 침식 포텐셜 함수를 의미한다. k 는 입자 크기에 따른 가중치, N 은 연간 요란 발생 횟수이고, 배출량 단위는 $\text{g m}^{-2} \text{ year}$ 이다. 2.5 mm 이하, 2.5 ~ 10 mm, 10 ~ 15 mm, 15 ~ 30 mm에 대한 가중치는 각각 0.075, 0.5, 0.6, 1.0이다. 평평한 야적 파일에 대한 마찰 풍속을 구하는 과정은 다음과 같다.

- 1 단계: 야적 파일 표면에서 가장 가까운 점에서의 풍속(u^+) 결정
- 2 단계: u^+ 를 이용하여 10 m 고도 값으로 보정 ($u_{10}^+ = u^+ \ln(10/0.005) / \ln(z/0.005)$)
- 3 단계: 마찰 속도(u_*) 결정 ($u_* = 0.053u_{10}^+$)

회처리장이 완전하게 매립되어 있어서 파일이 평평하게 매립되어 있으며, 바람을 맞는 면과 모서리에서는 비산은 없다고 가정하였다.

김 등(2005)과 김(2005)에 따르면, 야적 파일 표면에서의 임계 마찰 속도는 $0.30 \sim 0.58 \text{ m s}^{-1}$ 범위의 값을 나타낸다. 석탄회 비산량은 유입류에 의해 결정되는 마찰 속도와 임계 마찰 속도의 차이에 의해 결정되기 때문에 임계 마찰 속도의 설정이 비산량 추정에 매우 민감하다. 보다 정확한 비산량 추정을 위해서는 대상 지역에 대한 실험을 통해 직접 산정해야 하겠지만, 회처리장이 아직 완전하게 매립되어 있지 않은 상태이므로 측정이 불가능하기 때문에, 본 연구에서는 임계 마찰 속도를 범위의 중간값인 0.44 m s^{-1} 라고 가

정하였다. 그림으로 나타내지는 않았지만, 임계 마찰 속도가 0.44 m s^{-1} 일 경우에는 유입류 풍속이 비교적 작을 때에는 비산량이 없거나 매우 작게 나타났다. 요란 발생 횟수는 앞에서 조사한 바람 장미 분석(1분 간격 자료 사용) 결과를 이용하였다. 조사 기간 동안 10 m 고도에서 10 m s^{-1} 이상이 발생한 상대 빈도수는 북풍, 북북동풍, 동북동풍이 각각 0.049%, 0.068%, 0.011%이다(Table 2). 즉, 10 m 고도에서 10 m s^{-1} 이상 풍속이 연 평균으로 각각 258회, 357회, 55회 발생했다. 이를 요란 발생 횟수로 사용하였다. 식 (6)으로부터 계산한 총배출량을 단위 환산을 통해 확산모델의 입력 자료로 사용하였다. 평균적인 대기 확산 특성 분석을 위하여 일 년간 총배출량을 구한 후, 단위 환산을 통해 대기 확산 모델 수행 시간 동안에 일정한 비율로 배출되도록 설정하였다. 미국 환경청 보고서(U.S. EPA, 1995)에 의하면, 매립 석탄회가 컨베이어 시스템을 통해 이송되는 중에 연속적인 살수를 통하여 매립석탄회 중의 수분 함유량을 1% 증가시킬 때, 비산량이 62%까지 감소한다고 보고하고 있다. 또한 바람이 불어 회처리장으로부터 매립 석탄회가 비산될 것으로 예상될 때, 수작업으로 회처리장에 직접적인 살수(watering)를 시행할 경우, 90%까지 비산량을 저감시킬 수 있다고 보고하고 있다(Western Governor's Association, 2006). 대상 지역의 매립 석탄회 회처리장에서는 스프링 쿨러에 의한 살수 작업이 지속적으로 수행되고 있기 때문에 이를 반영하여 매립 석탄회 비산량을 계산하였다.

Table 3은 3600초 동안 비산된 매립 석탄회 총량을 나타낸다. 1 회처리장은 전체 매립 면적의 48.14%를 차지하고 2 회처리장은 전체 매립 면적의 51.86%를 차지한다. 매립 높이가 같은 F1010과 F1210를 비교해 보면, 북풍이 불 경우, F1010이 F1210의 37.8%를 차지한다. 즉, 북풍이 불 때에는 전체를 매립한 경우에 매립 면적비보다 많은 비율로 매립 석탄회 비산이 일어난다. 이는 전체를 매립한 경우(F1210)에 2 회처리장 매립 석탄회 표면에서 흐름 회복이 진행되면서 풍

Table 3. Total amounts of suspended particles for 3600 sec (unit: g)

	northerly (0°)		north northeasterly (31.75°)		east northeasterly (58.5°)	
	before watering	after watering	before watering	after watering	before watering	after watering
F1010	6,130.0	613.0	1,057.3	105.7	3.1	0.3
F1210	16,231.5	1,623.1	1,180.0	118.0	4.2	0.4
F1215	13,934.1	1,393.4	937.1	93.7	4.9	0.5
F12WB	5,998.1	599.8	7.1	0.7	0.0	0.0

속이 강해지기 때문에 판단된다(Figs. 5a and 6a). 그러나 북북동풍과 동북동풍이 불 때에는 F1010이 매립 면적비에 비해 높은 비율로 매립 석탄회 비산량이 발생한다(북북동풍 - 89.6%, 동북동풍 - 75.0%). 이는 북풍이 불 때와는 달리 바람이 회처리장으로 입사되는 각도가 커지면서 회처리장 표면 바람 속도가 감소하는데, 제 2 회처리장 표면에서의 감속이 더 크게 나타나기 때문이다(Figs. 5b, 5c, 6b and 6c). 주목할 만한 것은 매립 면적이 같고 매립 높이가 다른 F1210과 F1215의 결과이다. 매립 높이가 낮은 F1210이 매립 높이가 높은 F1215에 비해 매립 석탄회 비산이 많이 일어난다. 이는 매립 석탄회 높이가 증가할수록 매립 석탄회 풍상측에 바람이 부딪히면서 발생하는 흐름 왜곡이 커지면서 매립 석탄회 위쪽 표면의 바람 속도가 감소하기 때문이다. 그리고 해안선과 유입되는 바람이 이루는 각도가 커질수록 증가 비율이 훨씬 증가하는데(북풍 - 16.5%, 북북동풍 - 25.8%), 이는 각도가 커질수록 매립 석탄회에 의한 흐름 왜곡이 커지면서 매립 석탄회 표면 바람 속도가 감소하기 때문이다. 매립 면적과 높이가 같으나 방풍벽 설치 유무만 다른 F1215와 F12WB의 경우, 방풍벽에 의한 풍속 감소 효과와 방풍벽 자체의 높이가 증가하면서 발생하는 흐름 왜곡 증가가 매립 석탄회 표면 바람 속도를 감소시키면서 매립 석탄회 비산을 감소시켰다. 이와 같은 매립 석탄회 비산량 감소 효과는 매립 석탄회와 유입되는 바람이 이루는 각도가 증가하면서 증가하였다. 방풍벽을 설치한 후에는 설치 전과 비교하였을 때, 북풍, 북북동풍, 동북동풍의 경우, 각각 43.0%, 0.8%, 0%만이 발생하였다.

4.3. 매립회 비산 확산 특성 분석

앞 절에서 산정한 매립 석탄회의 비산량을 대기확산모델의 입력 자료로 이용하였다. 매립 석탄회 비산은 3600초 동안 연속적으로 일어난다고 가정하였다. 환경부 『환경정책기본법 시행령』에 제시된 환경기준에 따르면, 미세먼지(PM10)의 연간 평균 허용 농도를

50 mg m⁻³ 이하로 규정하고 있다. 본 연구에서 산정한 매립 석탄회 비산량은 30 mm 이하 입자에 대한 총량을 나타낸 것이고 PM10 비산량은 그 가중치가 0.5이므로 PM10 이하의 비산량은 전체 비산량의 50%로 가정하였다. 따라서 총비산면지 농도의 50%가 PM10 농도에 해당되므로 PM10 50 mg m⁻³ 등농도선은 전체 비산량 농도 100 mg m⁻³에 해당한다. 기상청의 황사 특보 발표 기준에 의하면, 1시간 평균 미세먼지(PM10)가 300 mg m⁻³ 이상의 농도로 2시간 이상 지속될 때에 황사 정보를 발표하고 1시간 평균 미세먼지가 400 mg m⁻³ 이상의 농도로 2시간 이상 지속될 것으로 예상될 때에 황사 주의보를 발표하며 1시간 평균 미세먼지가 800 mg m⁻³ 이상의 농도로 2시간 이상 지속될 것으로 예상될 때에 황사 경보를 발표한다. 매립 석탄회의 비산 범위를 분석하기 위하여 비산량 중에서 PM10 농도가 0.1, 5, 10, 20, 50, 100, 300 mg m⁻³ 인 등농도선을 조사하였다. 0.1, 5, 10, 20 mg m⁻³ 선은 검은 파선으로 표현하여 비산재가 미치는 최대 범위를 조사하였다. 연 평균과 24시간 평균 환경 기준(PM10)에 해당하는 50, 100 mg m⁻³ 선과 기상청 황사 정보 발표 기준에 해당하는 300 mg m⁻³ 선은 검은 실선으로 표현하였다. 본 과업에서는 황사 주의보와 경보 발표 기준에 해당하는 400, 800 mg m⁻³ 이상의 농도가 나타나지 않았다.

4.3.1. 1 회처리장을 10 m 고도로 매립한 경우(F1010)

Fig. 9a는 북풍(0°)이 부는 경우(F1010_q243), 3600초 후의 비산재 중 PM10 농도장을 나타낸다. 회처리장 주변 지역은 높은 농도가 나타나지만 회처리장과 멀어질수록 농도가 급격하게 감소한다. 최고 농도는 524.9 mg m⁻³로 1 회처리장 풍하 지역 모서리 부근에서 나타났다. 환경부 환경 기준에 따른 미세먼지(PM10) 연간평균치에 해당하는 50 mg m⁻³ 선은 회처리장 부근과 석탄 저장소 부근에 한정되어 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 9b는 1 회처리장을 10 m 높이로

Fig. 9. The PM10 concentration fields in the cases of (a) F1010_q243 and (b) F1010_q211.

매립하고 북북동풍(31.75°)이 부는 경우이다. 회처리장 주변 지역은 비교적 높은 농도(최고 농도 = 233.0 mg m^{-3})가 나타나지만 회처리장과 멀어질수록 농도가 급격하게 감소한다. 이 경우에는 A 마을로는 전혀 비산되지 않음을 확인할 수 있다. 북평 산업 단지 방향으로 매립 석탄회가 비산되지만 환경부 환경 기준에 따른 미세먼지 연간평균치에 해당하는 50 mg m^{-3} 선은 회처리장 근거리에서 국한되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그림으로 나타내지는 않았지만, 동북동풍(58.5°)이 부는 경우에는 모든 지점에서 환경부 환경 기준에 따른 미세먼지 연간평균치보다 매우 낮은 농도(최고 농도 = 3.0 mg m^{-3})가 나타났다.

4.3.2. 1, 2 회처리장을 10 m 고도로 매립한 경우(F1210)

Fig. 10a는 북풍(0°)이 부는 경우의 PM10 농도장을 나타낸다. 회처리장 주변 지역은 높은 농도가 나타나지만 회처리장과 멀어질수록 농도가 급격하게 감소한다. 비산재 최고 농도는 640.1 mg m^{-3} 로 2 회처리장

풍하 지역 모서리 부근에서 나타났다. 북북동풍(31.75°)이 부는 경우에는 매립 석탄회 비산재가 주로 1 회처리장에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 2 회처리장에서 발생한 비산재 양은 상대적으로 매우 적은 것을 확인할 수 있다. 1 회처리장 주변 지역에서 비교적 높은 농도(비산재 최고 농도 = 234.5 mg m^{-3})가 나타나지만 회처리장과 멀어질수록 농도가 급격하게 감소한다. 이 경우에는 북평 산업 단지 방향으로 매립 석탄회가 비산되지만 환경부 환경 기준에 따른 미세먼지 (PM10) 연간평균치에 해당하는 50 mg m^{-3} 선은 회처리장에 국한되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그림으로 나타내지는 않았지만, 동북동풍(58.5°)이 부는 경우에는 모든 지점에서 50 mg m^{-3} 보다 매우 낮은 농도(비산재 최고 농도 = 3.1 mg m^{-3})가 나타났다.

4.3.3. 1, 2 회처리장을 15 m 고도로 매립한 경우(F1215)

Fig. 11a는 북풍(0°)이 부는 경우의 PM10 농도장을 나타낸다. 회처리장 주변 지역은 높은 농도가 나타나

Fig. 10. The PM10 concentration fields in the cases of (a) F1210_q243 and (b) F1210_q211.

Fig. 11. The PM10 concentration fields in the cases of (a) F1215_q243 and (b) F1215_q211.

지만 회처리장과 멀어질수록 농도가 급격하게 감소한다. 비산재 최고 농도는 527.2 mg m^{-3} 로 1 회처리장 풍하 지역 모서리 부근에서 나타났다. 환경부 환경 기준에 따른 미세먼지 연간평균치에 해당하는 50 mg m^{-3} 선은 A 마을 근접 지역에는 미치고 있으나 A 마을에서는 나타나지 않았다. 북북동풍(31.75°)이 부는 경우에는 매립 석탄회 비산재가 주로 1 회처리장에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 2 회처리장에서 발생한 비산재 양은 상대적으로 매우 적은 것을 확인할 수 있다. 1 회처리장 주변 지역에서 비교적 높은 농도(비산재 최고 농도 = 212.8 mg m^{-3})가 나타나지만 회처리장과 멀어질수록 농도가 급격하게 감소한다. 이 경우에는 북평 산업 단지 방향으로 매립 석탄회가 비산되지만 환경부 환경 기준에 따른 미세먼지 연간평균치에 해당하는 50 mg m^{-3} 선은 회처리장 근거리에서 국한되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 동북동풍(58.5°)이 부는 경우에도 주로 1 회처리장에서 비산재가 발생하였으며 모든 지점에서 50 mg m^{-3} 보다 매우 낮은 농도(최

고 농도 = 5.0 mg m^{-3})가 나타났다.

4.3.4. 1, 2 회처리장을 15 m 고도로 매립하고 방풍벽을 설치한 경우(F12WB)

Fig. 12a는 북풍(0°)이 부는 경우의 PM10 농도장을 나타낸다. 비산재 최고 농도는 394.4 mg m^{-3} 로 1 회처리장 풍하 지역 모서리 부근에서 나타났다. 2 회처리장 농도 분포를 보면, 방풍벽을 설치하지 않을 경우에 비해 고농도 선이 해안선 쪽으로 치우쳐 나타나는 특징이 있다. 방풍벽을 설치하지 않을 경우에 비해 전체적으로 농도가 낮게 나타나고 50 mg m^{-3} 선은 회처리장 지역에만 나타나는 것을 확인할 수 있다. 북북동풍(31.75°)이 부는 경우에도 매립 석탄회 비산재가 주로 1 회처리장에서 발생하였고 PM10 농도도 극히 낮게 나타났다(최고 농도 = 7.0 mg m^{-3}).

본 연구에서는 석탄회가 회처리장에 완전하게 적재되어 있고 회처리장 표면이 평평하다고 가정하여 수치 실험을 수행하였다. 그러나 회처리장이 적재되어 가는 과정에서는 적재된 회처리장의 형상이 본

Fig. 12. The PM10 concentration fields in the cases of (a) F12WB_q243 and (b) F12WB_q211.

연구와 다를 수 있다. 이는 회처리장으로 불어오는 흐름장에 영향을 미칠 수 있으며, 이에 따른 회처리장 표면에서의 마찰 속도와 비산량에도 영향을 미칠 수 있다. 흐름장 변화는 비산된 석탄회의 확산 특성에도 영향을 미칠 수 있기 때문에, 향후, 적재 과정에서 발생하는 석탄회 비산에 대한 확산 특성에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

석탄회 야적장의 매립 조건과 기상 조건이 매립 석탄회 비산에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위하여 인근 지역의 자동기상관측시스템(AWS 106) 관측 자료를 분석하여 수치모델의 입력 자료로 활용하였다. 계절풍과 해륙풍이 나타나는 동해시 구호동 일대에서 화력발전소 회처리장에서 비산된 비산재가 인근 주거 지역이나 산업 단지의 대기질에 미치는 영향을 평가하기 위해서 영향 가능성이 높은 3 방향의 풍향을 선정하였다. 유입류의 풍속은 상대적으로 발생 빈도는 낮지만 한 번에 가장 많은 비산재를 발생시킬 수 있도록 10 m 고도에서 약 10 m s^{-1} 의 풍속이 나타나도록 설정하였고 유입 풍속 변화에 따른 비산재 발생량을 계산하였다.

12가지 시나리오에 대한 수치모델링을 수행하였다. 대상 지역의 지형물에 의해 복잡한 흐름 패턴이 나타났고 회처리장의 매립 면적, 매립 높이, 방풍벽 설치 유무에 따라 회처리장 주변의 흐름 특성이 변화하였다. 특히, 매립 높이가 높아지면서 회처리장 풍상측에서 발생하는 흐름이 요란이 증가하였고, 이는 회처리장 표면에서의 마찰 속도의 감소를 유발하였다. 또한 방풍벽 설치하는 방풍벽 풍하측에 2차 순환(재순환 영역)을 형성시킴으로써 회처리장 표면 속도와 마찰 속도를 더욱 감소시켰다. 수치모델링을 수행한 결과를 이용하여 각 시나리오별로 회처리장에서 발생한 비산재 발생량을 조사하였다. 매립 조건이 같은 경우에는 북풍이 부는 경우에 가장 많은 비산재가 발생했고 동북동풍이 부는 경우에 비산재가 가장 적게 발생했다(예, 1, 2 회처리장을 15 m로 매립하고 동북동풍이 부는 경우는 북풍이 부는 경우에 비해 비산량이 약 0.035% 발생). 회처리장 매립 고도 증가에 따른 회치

리장 표면 고도에서의 풍속 증가 효과보다는 매립 고도 증가에 따른 회처리장 풍상측에서의 흐름 왜곡 증가 효과가 더 크게 나타났다. 흐름 왜곡의 증가는 회처리장 풍상 부분의 표면 속도를 감소시키고 풍하 지역에서의 흐름 회복을 지연시킴으로써 회처리장 표면의 마찰 속도를 감소시켰다. 이와 같은 이유 때문에 1, 2 회처리장을 모두 10 m로 매립한 경우의 비산재 발생량이 1, 2 회처리장을 모두 15 m로 매립한 경우보다 많았다(예, 북풍 - 16.5%, 북북동풍 - 25.9%). 1, 2 회처리장을 모두 15 m로 매립하고 주위에 방풍벽을 설치한 경우에는 방풍벽이 회처리장 풍상측의 흐름 왜곡을 증가시키고 방풍벽 풍하 지역에 재순환 지역을 형성하여 흐름 회복 정도가 약해지면서 표면 마찰 속도를 크게 감소시켰다. 이에 따라 비산재 발생량이 크게 감소하였다. 본 연구를 통하여 회처리장 지역의 기상 조건과 매립 조건이 비산재 발생량과 확산 특성을 결정하는 매우 중요한 요인임을 확인할 수 있었다. 특히, 방풍벽 설치하는 강한 유입류가 회처리장에 직접적으로 불어오는 것을 방지하고 2차 순환을 발생시킴으로써 매립된 석탄회로부터 발생하는 비산량을 감소시킬 수 있는 효과적인 방진 시설임을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 임계 마찰 속도가 나타날 수 있는 범위의 중간값을 임계 마찰 속도로 사용하였고 비산 석탄회가 생성될 수 있는 유입류 풍속을 가정하였다. 그러나 보다 정확한 비산 석탄회량을 추정하기 위해서는 대상 지역에서 실험을 통해 임계 마찰 속도를 산정하여야 할 것으로 판단된다. 그리고 본 연구에서는 대상 지역의 풍계 특성을 반영하기 위하여 가장 인접한 동해기상대 자동관측시스템 자료를 사용하였는데, 비록 가장 인접한 지점의 자료지만 자동관측시스템이 위치한 지역의 국지적인 기상 특성이 반영되었을 개연성이 있다. 보다 현실적인 풍계 특성 반영을 위해서는 비교 관측 등을 통한 자료의 신뢰도 확보도 병행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2007-3303)의 지원으로 수행되었습니다. 유익한 지적을 해 주신 심사위원들께 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

- 김재진, 2007, 장애물 외관비가 주변 흐름에 미치는 영향, 대기, 17, 381-391.
- 김현구, 2005, 기상조건별 비산먼지 관리체계 최적화 연구, 한국대기환경학회지, 21, 573-583.
- 김현구, 김민균, 김병억, 윤황영, 2005, 기상조건별 비산먼지 관리체계 최적화 연구, RIST 연구논문, 19, 21-31.
- 산업자원부, 2002, 석탄회를 이용한 성형제품의 저온제조 기술개발에 관한 연구, 00-A-AA01-A-08.
- 송창근, 김재진, 송동웅, 2007, 방풍벽에 의한 비산 먼지 저감 효과, 대기, 17, 315-326.
- Bohah, K. K., Alhinai, K. G., Alhinai, 1986, Field tests of porous fences in the regime of sand laden wind, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 23, 309-319.
- Martin, P., 1995, Wind protective fences of PARAWEB composites, Techtextil-Symposium 1995, Lecture No. 537, 1-8.
- Park, C. W., Lee, S. J., 2003, Experimental study on surface pressure and flow structure around a triangular prism located behind a porous fence, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91, 165-184.
- Shao, Y., 2000, Physics and Modeling of Wind Erosion, Kluwer Academic Publishers, 393.
- Subhas, C., Yaragal, H. S., Govinda, R., Murthy, K. K., 1997, An experimental investigation of flow fields downstream of solid and porous fences, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 66, 127-140.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1995, Emission Factor Documentation for AP-42, Section 13.2.5., Industrial Wind Erosion, Research Triangle Park, NC, USA.
- Western Governor's Association, 2006, WRAP Fugitive Dust Handbook. Countess Environmental 4001 Whitesail Circle, 244.