저탄장 시설에 설치된 방풍벽 높이에 따른 비산탄진 확산특성에 관한 수치해석

정찬호* · 이진운** · 신동환* · 김명민* · 이성혁†

Numerical Investigation on Influence of Windbreak Wall Height on Dust Scattering Characteristics

Chan Ho Jeong, Jin Woon Lee, Dong Whan Shin, Myeongmin Kim and Seong Hyuk Lee

Key Words: Windbreak wall(방풍벽), Coal storage pile(저탄장), Computational fluid dynamics(전산유체해석), Scattering dust(비산분진)

Abstract

This study reports numerically the characteristics of dust scattering around the coal storage pile yards, substantially affected by the windbreak wall height. The dust scattering is closely associated with the frictional effect of wind flows as well as the pressure variation that consequently affect the dust particle behavior. In the present study, with the use of the commercial code of FLUENT, the distribution of wind velocity and pressure are predicted around coal storage pile yard for four different heights of the wind break wall. From the results, it was found that for the case 1 with the outer windbreak wall height of 3 m and inner windbreak wall height of 6 m, the amount of scattering dust for a year was estimated to be 1451 kg, whereas for the case 4 where a height of outer windbreak wall is 10 m and a height of inner windbreak wall is 16 m, the amount of scattering dust for a year was 358 kg. It shows that the dust scattering can be reduced by 75%, indicating important role of windbreak wall height on particle scattering. The numerical results would be useful in decision of the appropriate height of windbreak wall for decreasing the amount of scattering dust under various environmental conditions.

1. 서 론

화력발전소나 제철소의 대규모 원료 야적장에서 발생하는 석탄가루와 같은 분말입자의 비산, 특히 바람에 의해 표면으로부터 입자들이 떨어져 나오는 풍식작용(wind erosion)은 원료 손실뿐만 아니라 심각한 환경오

염을 유발시킨다⁽¹⁾. 야적장은 발전소의 입지조건에 따라 차이는 있지만, 여름철 빈번하게 발생하는 태풍이나 돌풍 등에 의해 인근 주거지역이 피해를 입는다. 이와 같은 원료비산에 의한 대기오염 가능성을 예측하고, 비산 억제대책을 강구하는 것은 환경적 관점에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 야적원료 표면으로부터 미세입자를 이탈하게 하는 비산력은 야적원료 표면 주변 유동의 마찰속도 특성과 관련이 있으며, 이는 야적원료 표면의 압력변동 성분과 밀접한 관계를 가지고 있다⁽²⁾. 그러나 상기 두 인자들 사이의 상관관계는 아직도 정량적으로 규명되지 않고 있으며 경험식들을 이용하여 비산량을 예측하고 있는 실정이다⁽³⁻⁵⁾. 실제 야적현장에서는 강한 바람이 예상될 경우, 살수장치로 야적원료의 표면습도를

Received: 20 Aug 2014, Received in revised form: 15 Sep 2014, Accepted: 16 Sep 2014

*중앙대학교 기계공학부

**두산중공업 보일러 PLM팀

†책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부

E-mail : shlee89@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5254 FAX : (02)814-9476

증가시키거나 표면 경화제를 살포하여 표면마찰력을 증가시킴으로써 입자의 비산을 억제시키고 있다⁽⁶⁾. 그러나 원료비산 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 비산량에 큰 영향을 미치는 풍속을 감소시키고자 하는 노력이 필요하다. 상기 이유에서 풍속을 저감시키기 위하여 방풍벽(windbreak wall)을 설치하고 있으며, 방풍벽의 형상이 저탄장 내부 풍속에 미치는 영향에 대한 연구가 산업현장에서 요구된다. 그러나 저탄의 풍식작용에 관한 연구는 학문적으로 미비한 수준으로, 방풍벽 주위 유동현상이 복잡하고 주변지형이나 기후 등에 크게 의존하기 때문이다. 현재, 비산문제의 원인을 규명하기 위해서 실제의 대기 환경을 모사한 풍공학적 실험이 수행되고 있지만, 풍동 실험 장치를 이용한 모형화 실험이 전부이다⁽⁷⁾. 그러나 풍동 실험을 통해서서는 다양한 기후와 지형의 영향을 받는 실제 저탄장의 비산량을 정량적으로 예측하기란 쉽지 않은 한계를 가진다. 따라서 본 연구에서는 전산유체해석기법을 이용하여 서해 지역의 기후조건을 고려한 옥외저탄장 주변 방풍벽의 높이에 따른 속도장과 압력장을 예측하고 탄소의 비산량 저감 정도를 비교하기 위해 4가지 방풍벽 형상 조건에 대해 수치해석 연구를 수행하였다.

2. 수치해석 방법

본 연구에서는 방풍벽의 높이 따른 속도장과 압력장

Fig. 1 Configuration of coal storage pile yard

Fig. 2 The model mesh temperature contour in winter

그리고 비산량을 예측하기 위해 Fig. 1과 같이 2,830 m × 1,990 m × 522 m의 3차원의 저탄장 부지를 설정하였으며 각각의 저탄장의 크기는 108 m × 64 m × 9 m이다. ANSYS ICEM-CFD 13.0을 이용하여 Fig. 2와 같이 약 369만개의 사면체 격자로 3차원 영역을 구성하였다. 서해안을 가정하여 승봉도 기상관측소의 10년간의 데이터를 참조하여 주풍은 북풍이며 평균풍속은 2.77 m/s임을 확인하였다. 계절별로 바람의 방향이나 시간 별 풍속은 달라지지만 계산의 대표성을 위해서 기상조건으로 풍속 2.77 m/s의 북풍을 가정하였다. 저탄장 부지에 설치된 방풍벽은 2개로 Fig. 1과 같이 각각 외부와 내부에 위치하고 있고 방풍벽이 설치되지 않은 주변으로는 방풍림(windbreak forest)이 구성되어 있다고 가정하였다. 해석에 대한 각각의 case별 방풍벽의 높이는 Fig. 3과 같이 결정하였다. Case 1의 경우 외부 방풍벽(outer windbreak wall)의 높이는 3 m이고 내부 방풍벽(inner windbreak wall)의 높이는 9 m이다. 본 경우는 방풍벽의 높이가 저탄장 상단 면의 높이와 일치하는 경우이다. Case 2의 경우 외부 방풍벽의 높이는 6 m이고 내부 방풍벽의 높이는 12 m로 방풍벽의 높이가 저탄장 상단 면의 높이보다 3 m높게 설정한 것이다. Case 3과 case 4에 관한 형상 정보는 Fig. 3과 Table 1에 정리하였다. 속도장과 압력장 그리고 비산량 예측은 ANSYS FLUENT 13.0 코드를 이용하였다. 해석에 사용한 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 난류모델은 표준 k-ε모델을 사용하였다. 비산탄진의 확산도 예측은 상차분모델(discrete phase model)을 사용하였고

Fig. 3 The scheme of different fence height

Table 1 Boundary condition and fence height

Case	Wind direction	Wind velocity	Fence 1 Height	Fence 2 Height
1	North	2.77 m/s	3 m	9 m
2	North	2.77 m/s	6 m	12 m
3	North	2.77 m/s	8 m	14 m
4	North	2.77 m/s	10 m	16 m

탄진의 비산량 예측은 미국환경보호청(U.S EPA, united states environmental protection agency)에서 제시한 식 (1) 과 식 (2)를 사용하였다⁽⁸⁾.

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

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

여기서 w 는 입자 크기 가중치로 입자 크기를 2.5 μm 로

가정하였으며 이 때의 입자 크기 가중치는 0.075이다. P_i 는 바람에 의한 침식 가능성이고 u_o 와 u_{oc} 는 각각 마찰 속도와 임계마찰속도이며 저탄층의 임계마찰풍속은 일반적으로 0.30~0.58 m/s로 알려져 있는데 0.58 m/s를 임계마찰풍속(u_{oc})으로 설정하여 배출률(E)을 계산하였다⁽⁹⁾. 다공성 물질인 방풍벽과 방풍림은 방풍 및 방진 효과가 우수한 개구율 0.4(40%)의 다공성 매질(porous media)로 설정하였다⁽¹⁰⁾.

3. 결 과

본 연구에서는 비산탄진의 발생 및 확산 특성을 분석하기 위하여 속도장과 압력장을 예측하였다. 속도는 비산탄진의 이동 경로를 예측하기 위한 인자이며, 압력은 유동의 박리 및 부착, 재순환으로 인한 비산탄진의 발생 가능성을 평가하는 중요한 요소들이다. 상기 언급한 비

Fig. 4 The velocity contour in coal storage yard at an elevation about 9 m which is the top face of coal storage yard

Fig. 5 The pressure contour in coal storage yard elevation about 9 m which is the top face of coal storage yard

탄장 주변의 속도 및 압력을 이용하여 비산탄진의 확산도를 예측할 수 있다. Fig. 4는 각각의 case에 따른 저탄장 상단 면에 해당하는 고도 9 m에서의 속도 분포를 나타낸 것이다. 방풍벽의 높이가 높아질수록 저탄장 부지 내 유속이 점차 느려지는 것을 확인할 수 있으며, 특히 방풍벽과 인접해 있는 저탄장 주변 영역에서는 상기 결과보다 더 낮은 속도가 나타남을 확인하였다. 저탄장 주변으로 발생하는 유동은 저탄장 표면에서의 유동마찰로 비산탄진의 발생 가능성을 높이며 방풍림과 방풍벽의 방진효과를 저감시키게 된다. Fig. 5는 각각의 case에 대해 고도 9 m의 저탄장 상단 면의 압력장을 나타낸 것이다.

특정 영역에서 압력이 높게 나타나는 것은 해당 영역에서 기류의 속도가 느리거나 구조물 등에 의해 저탄장 표면에서 유동의 부착이 발생하고 있음을 의미한다. 임계마찰속도 보다 낮은 기류 속도는 비산탄진의 발생에

큰 영향을 주지 않지만 유동 부착에 의해 생기는 높은 압력의 경우 강한 전단력을 수반하여 비산탄진 발생 가능성이 높다고 볼 수 있다. Fig. 5에 나타난 각각의 case에 따른 압력 분포를 비교해 보면 방풍벽의 후면에서 발생하는 유동 박리로 인해 낮은 압력의 영역이 커지는 것으로 나타났다. 상대적으로 낮은 기류 속도와 더불어 낮은 압력은 비산탄진 발생 가능성을 보다 더 감소시킨다. Fig. 6은 앞서 구한 속도장과 압력장을 바탕으로 이종물질해석(species analysis)을 고려한 유동함수를 계산하여 비산탄진의 확산분포도를 계산한 것을 나타낸다. 비산탄진의 확산은 북풍에 따라 남쪽으로 향하고 있음을 확인할 수 있다. Case 1에서 입자의 확산이 가장 활발하게 것을 알 수 있으며, 방풍벽의 높이가 case 3과 case 4와 같이 증가할수록 비산탄진의 확산이 저감되는 것을 볼 수 있다. Table 2는 각각의 case에 대해 연간 발

Fig. 6 The diffusion contour of scattering dust

Table 2 The comparison of the amount of scattering dust for a year

Case	Total amount of scattering dust for a year [kg/year]	The decreased ratio relative to case 1 [%]
1	1451	0
2	736	49
3	489	66
4	358	75

생하는 비산탄진의 양과 case 1을 기준으로 하여 방풍벽의 높이 별 비산탄진 발생량의 감소비율을 나타내고 있다. Table 2에 나타난 결과에 따르면 외부 방풍벽의 높이가 3 m이고, 내부 방풍벽의 높이가 9 m인 case 1의 경우, 일년 동안 발생하는 비산탄진의 양이 1451 kg으

로 큰 값을 가진다. 또한, 외부 방풍벽의 높이가 10 m이고 외부 방풍벽의 높이가 16 m인 case 4에서는 연간 358 kg으로 case 1에 비해 연간 비산탄진의 발생량이 75%가 감소된 것을 확인할 수 있다. 비산탄진의 양의 감소는 저탄장 내 기류속도의 감소로 표면 마찰속도를 감소시키고, 방풍벽의 영향으로 인해 방풍벽 후류에서의 압력이 감소하기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 전산유체해석기법을 이용하여 저탄장 부지 주위의 유동장을 3차원으로 해석하여 방풍벽의 높이에 따른 저탄장 부지의 속도 및 압력 분포를 분석하였다. 또한, 상기 결과를 바탕으로 이중물질해석을 수행하여 비산탄진이 확산도를 예측하였다. 본 연구를 통해

다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수치해석을 통해 저탄장 부지의 속도 및 압력 분포를 예측하여 저탄장의 비산탄진 발생량을 예측할 수 있다.
2. 방풍벽의 높이가 높을수록 저탄장 부지 내의 기류 속도가 감소함으로 비산량은 감소하게 된다. 해석 결과, 외부 방풍벽의 높이가 10 m이고 내부 방풍벽의 높이가 16 m인 case 4의 비산탄진 발생량이 외부 방풍벽의 높이가 3 m이고 내부 방풍벽의 높이가 9 m인 case 1의 비산탄진의 발생량보다 75% 감소한다는 것을 확인하였다.
3. 본 연구에서 사용한 해석기법은 저탄장 주변의 기후 등 환경 조건 및 저탄장의 형상을 고려할 수 있으며, 이를 통해 비산탄진의 수치를 효과적으로 감소시키는 방풍벽의 높이를 계산할 수 있다. 본 연구결과는 저탄장의 원료손실을 줄이는 경제적 효과 및 인근지역의 환경 오염을 예방하는 환경적 효과를 가진다.

참고문헌

- (1) 윤명조, 이복환, 임홍재, “저탄장의 비산탄진 방지대책”, 한국대기환경학회, 제1권, 1988, pp. 3-37.
- (2) Diego, I., Pelegry, A., Torno, S., Toraño, J., and Menendez, M., “Simultaneous CFD evaluation of wind flow and dust emission in open storage piles”, Applied Mathematical Modelling, Vol. 33, 2009, pp. 3197-3207.
- (3) Xuan, J. and Ye, W., “Wind Tunnel Modeling of Dust Emission and Deposition in Lower Atmosphere Similarity Principles”, Asia-Pacific Symposium on Wind Engineering, Vol. 3, 1993, p. 1053-1058.
- (4) Launder, B. E. and Spalding, D. B., “The Numerical Computation of Turbulent Flows”, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, p. 269-289.
- (5) Cong, X. C., Yang, S. L., Cao, S. Q., Chen, Z. L., Dai, M. X. and Peng, S. T., “Effect of aggregate stockpile configuration and layout on dust emissions in an open yard”, Applied Mathematical Modelling, Vol. 36, 2012, pp. 5482-5491.
- (6) 안종구, “옥외 저탄장에서 발생하는 석탄분진의 효율적인 저감방안 연구”, 대한기계학회 추계학술대회, 2012, pp. 501-506.
- (7) Lee, S., Park, K. and Park, C., “Wind tunnel observations about the shelter effect of porous fences on the sand particle movements,” Atmospheric Environment. Vol. 36, Issue 9, 2002, pp. 1453-1463.
- (8) U. S. EPA, 1995.
- (9) Cong, X. C., Chen, Z. L. and Zhan, S. F., “Experimental study of static dust emission of coal pile in the open air”, Journal of China University of Mining & Technology, Vol. 39, pp. 6849-6853. 2010.
- (10) 박철우, 이상준, “다공성 방풍펜스가 후방에 다단으로 설치된 삼각프리즘의 표면압력에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국풍공학회지, 제2권, 제1호, 1998, pp. 104-114.