

기상조건별 비산먼지 관리체계 최적화 연구 Optimization of Fugitive Dust Control System for Meteorological Conditions

김 현 구

한국에너지기술연구원

(2005년 7월 28일 접수, 2005년 10월 24일 채택)

Hyun-Goo Kim

Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

(Received 28 July 2005, accepted 24 October 2005)

Abstract

Fugitive dust, which is emitted in the ambient air without first passing through a stack or duct designed to control flow, is frequently generated by means of wind erosion from storage yards at Pohang Steel Works. The size distribution of fugitive dust is mostly in the range of coarse particulate which is deposited as soon as emitted and less harm to human health; however 20% of fugitive dust contains PM10 known as one of most harmful airborne pollutant. Consequently, effective control and reduction of fugitive dust is strongly requested by the local society, but it is not easy so far because the generation and dispersion of fugitive dust highly depends on meteorological conditions, and it being occurred for irregularity.

This research presented a fugitive dust control system for each meteorological condition by providing statistical prediction data obtained from a statistical analysis on the probability of generating the threshold velocity at which the fugitive dust begins to occur, and the frequency occurring by season and by time of the wind direction that can generate atmospheric pollution when the dispersed dust spreads to adjacent residential areas. The research also built a fugitive dust detection system which monitors the weather conditions surrounding storage yards and the changes in air quality on a real-time basis and issues a warning message by identifying a situation where the fugitive dust disperses outside the site boundary line so that appropriate measures can be taken on a timely basis.

Furthermore, in respect to the spraying of water to prevent the generation of fugitive dust from the storage piles at the storage yard, an advanced statistical meteorological analysis on the weather conditions in Pohang area and a case study of fugitive dust dispersion toward outside of working field during 2002~2003 were carried out in order to decide an optimal water-spraying time and the number of spraying that can prevent the origin of fugitive dust emission. The results of this research are expected to create extremely significant effects in improving surrounding environment through actual reduction of the fugitive dust produced from the storage yard of Pohang Steel Works by providing a high-tech warning system capable of constantly monitoring the leakage of fugitive dust and water-spray guidance that can maximize the water-spraying effects.

Key words : Fugitive dust, PM10, Threshold velocity

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)42-860-3376, E-mail : hyungoo@kier.re.kr

1. 서론

현대사회에 있어서 최대의 대기환경 문제는 바로 미세먼지(유효직경 $10\mu\text{m}$ 이하의 먼지; PM10)일 것이다. 미세먼지에 대한 사회적인 관심과 우려를 반영하고 있는 신문 기사를 살펴보면, 존스 홉킨스 보건대, 서울대 보건대학원의 미세먼지 위해성에 대한 연구결과를 인용한 「미세먼지가 사망률 높인다(중앙일보, 2000. 12), 대기수준 OECD 회원국 꼴등(연합뉴스, 2003. 3), 먼지공화국, 천식 없는 세상에서 살고 싶어요(한국경제신문, 2003. 7), 미세먼지 오염 개선 기미 없다, 살인공기 방치할 것인가?(한국일보, 2004. 01), 지름 $10\mu\text{m}$ 의 미니 저승사자, 미세먼지 초과사망자 교통사고 사망자 3배, 미세먼지가 서울을 짓누른다(한겨레, 2004. 2), 미세먼지 수도권 공습(조선일보, 2005. 1), 먼지예보제 실시, 먼지 심하면 휴교(YTN, 2005. 2), 먼지주범 비산먼지 특별단속(경북일보, 2005. 2)」 등의 자극적인 표현이 주를 이루고 있어 그 심각성을 미루어 짐작하게 한다.

대기환경보전법에 의하면 비산먼지(fugitive dust)는 일정한 배출구 없이 대기 중에 직접 배출되는 먼지로 정의되는데, 대기 중의 먼지는 자연발생적 먼지와 인공발생적 먼지로 대별되며, 비산먼지는 이 중 자연발생적 먼지가 대부분을 차지한다. 먼지입경에 따른 분류에 의하면 먼지의 유효직경이 $2.5\mu\text{m}$ 이하인 미세입자(fine particulate; PM2.5)와 그 이상인 조대입자(coarse particulate)로 구분되는데, 미세입자는 연소공정에서 발생하여 빠른 화학적 반응을 수반하며 호흡을 통하여 인체의 폐포에 침적됨으로써 인체 위해성이 큰 대기오염물질인 반면 조대입자는 주로 자연기원의 비산먼지이며 일반적으로 먼지의 유효직경이 $10\mu\text{m}$ 이상이 되면 인체위해성은 거의 없는 것으로 알려져 있다. 그러나 토양기원 비산먼지 입경 분포 중에도 약 40%는 미세먼지이며 미국의 경우 국가전체 미세먼지 배출량 중 89%의 절대적인 양을 비산먼지가 차지하고 있다(U.S. EPA, 2001, 2000). 한편 우리나라는 현재 국가 대기배출량 산정시 비산먼지가 누락되어 있어 이에 대한 실질적인 환경관리가 이루어지기 힘든 형편이었으나 최근 김현구 등(2004)에 의해 전국 시도별 비산먼지 배출목록이 구축됨에 따라 향후 환경관리를 위한 관리항목으로 포

함될 전망이다.

비산먼지는 대기에 노출된 표면에서 바람의 풍속력(wind shear)에 의한 풍식(wind erosion)으로 발생하거나 건설활동과 같은 기계적인 작업 또는 차량운행에 따른 도로표면의 먼지 재비산에 의해 발생하는 먼지로, 비산(飛散)이라는 한자단어가 의미하는 대로 바람에 의해 불규칙적으로 날아올라(飛) 사방으로 흩어지는(散) 성질을 갖기 때문에 발생시간과 발생량 그리고 확산특성을 파악하기가 매우 힘들다.

포항지역은 매우 건조한 기후특성(이화운 등, 2003)과 철강산업공단과 시가지가 인접한 배치구조 때문에 철강산업공단의 노천야적장, 저탄장, 고철야적장 등에서 발생하는 비산먼지는 지역사회의 중요한 환경이슈 중 하나이다. 포항제철소의 경우에는 비산먼지의 발생억제를 위하여 대규모 방풍림을 조성하고 방풍망을 설치하였으며, 지속적인 살수작업, 야적물 표면 복포작업, 코팅작업 등 다각도의 노력을 기울이고 있지만 기상조건에 따라 불규칙적으로 발생하는 비산먼지를 완전히 차단하기에는 기술적인 한계가 있다. 즉, 비산먼지는 기상조건에 지배적인 영향을 받기 때문에 그 발생시점과 발생량을 예측하기 어려운 관계로 현재까지는 육안식별과 경험적인 판단에 의해 비산먼지 발생 및 외부유출을 판별하고 있으며, 따라서 보다 효과적인 비산먼지 관리를 위해서는 비산먼지 발생여부와 확산특성을 과학적으로 판별하는 것이 급선무라고 판단된다. 본 논문에서는 기상조건에 따른 비산먼지 발생특성을 기상학적으로 분석하고 외부유출 사례를 통계적으로 해석함으로써 기상조건별 비산먼지 관리체계의 최적화 방안을 제안하고자 한다.

2. 포항지역 기상조건 통계분석

비산먼지의 발생과 확산은 기상조건에 가장 지배적인 영향을 받기 때문에 비산먼지의 발생양상과 확산거동을 정확하게 이해하기 위해서는 기상분석이 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 포항지역의 기상특성을 통계분석하기 위하여 포항기상대에서 관측된 지난 30년간의 기상자료를 이용하였다. 선행연구(이화운 등, 2003)에 의하면 포항지역은 철강산업공단과 시가지를 포함한 직경 10여 km의 영역은 영일

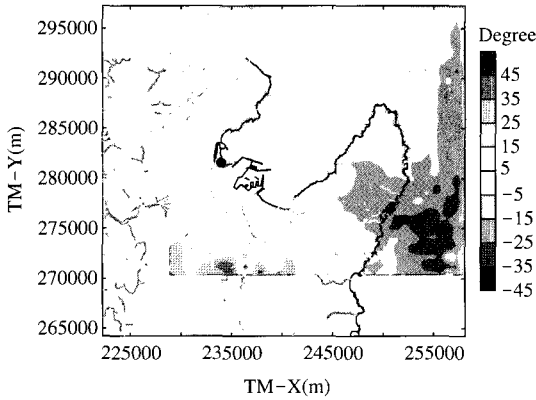


Fig. 1. Deflection map of wind direction against Pohang Weather Station(black circle).

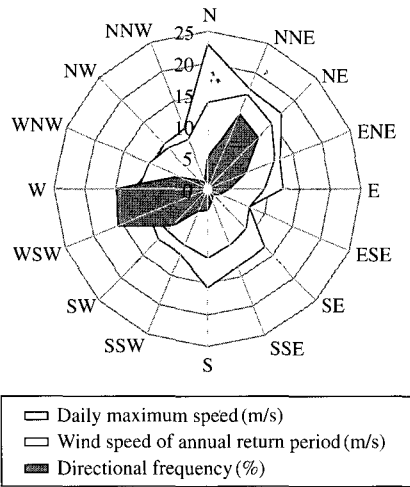


Fig. 2. Wind rose of frequency and maximum wind speeds.

만을 따라 남동쪽으로 열려있는 평지지형으로 풍향, 풍속의 변동이 극지적으로 크지 않기 때문에 포항기상대에서 관측자료는 포항지역 풍향/풍속의 대표성이 있음이 검증되었다. 즉, 포항지역 국지바람장 수치기상모의 결과(정우식, 2003; 이화운 등, 2004)로부터 포항기상대와 각 지점의 상대적인 풍향편차를 산출하여 그 공간분포를 도시한 그림 1을 보면 남쪽의 산지지역을 제외하면 포항시가지와 철강공단을 포함한 영역의 풍향편차는 15도 이내로 나타나고 있어 이 영역은 기상학적으로 동일 풍계임을 확인할 수

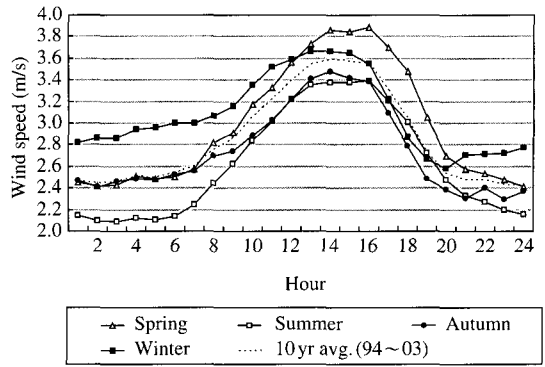


Fig. 3. Diurnal variation of wind speed by season at Pohang area.

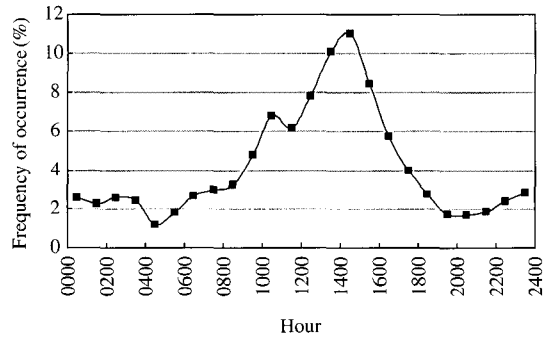


Fig. 4. Frequency of occurrence of instantaneous maximum wind speed at Pohang area.

있다.

포항기상대 관측자료의 기상통계분석에 의하면 포항지역의 연평균풍속은 2.87 m/s(1994~2003년)이며 그림 2의 바람장미(wind rose) 풍향발생빈도에서와 같이 주풍향은 영일만을 따라 바다로 환기되는 서남서풍과 해풍진입 풍향인 북북동풍이 탁월하게 나타난다.

그림 3에 도시된 지난 10년 동안의 시간대별 평균 풍속 변동을 살펴보면, 육풍이 부는 야간 시간대에 비하여 해풍이 불어오는 주간 시간대의 풍속이 강한 것으로 나타나고 있으며 특히 사계절 중 봄철에 15:00시를 전후하여 3.8 m/s를 초과하는 강풍이 출현하고 있다. 또한 겨울철에는 중관계절풍의 영향으로 야간풍속도 2.6 m/s 이상으로 높게 유지되고 있다. 포항

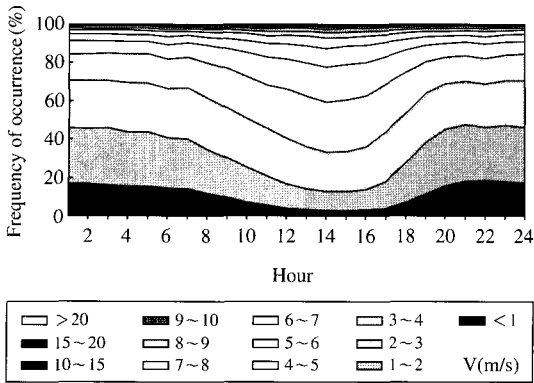


Fig. 5. Frequency of occurrence of wind speed classes at Pohang area.

지역을 포함하여 우리나라는 일반적으로 봄철의 풍속이 가장 강하기 때문에 환경부에서는 연례적으로 봄철 비산먼지 특별단속을 시행하고 있다.

그림 4는 순간최대풍속 (instantaneous maximum wind speed)의 시간별 출현빈도를 보여주는 그래프로, 순간최대풍속도 평균풍속과 마찬가지로 출현시간대가 14:00시경에 집중되고 있어 포항지역에서의 비산먼지 발생은 14:00시 전후에 빈번할 것으로 예상된다. 그런데 그림 2의 순간최대풍속 바람장미의 주풍향을 보면 평균풍속의 주풍향과 일치하지 않는 북풍과 남풍에서 최대풍속이 나타나고 있다. 따라서 비산먼지의 발생에 직접적인 영향을 주는 풍향은 순간최대풍속의 주풍향인 북풍, 북동풍, 동풍계열과 남풍, 남서풍계열이며 대기 중으로 비산한 이후에는 평균풍속의 주풍향에 따라 확산거동을 할 것으로 판단된다.

시간대별 풍속등급의 누적출현빈도를 도시한 그림 5를 보면 야간 시간대인 20:00시부터 다음날 07:00시까지는 3 m/s 이상 풍속의 출현빈도가 30% 수준이지만 주간에는 출현빈도가 점차 증가하여 15:00시경에는 최대 65% 정도로 증가하고 있음을 보여준다.

그림 6의 풍향별 출현빈도를 보면 포항지역의 주풍향은 남서, 서남서, 서풍과 북풍으로 해풍과 육풍의 2개의 주풍향이 나타나고 있다. 반면 포항제철소로부터 시내방향으로 진행하는 동풍계열의 바람은 10:00~20:00시 사이의 주간에 출현빈도가 증가하며 겨울철에는 북서풍 계열의 중관풍이 우세하게 나타나지

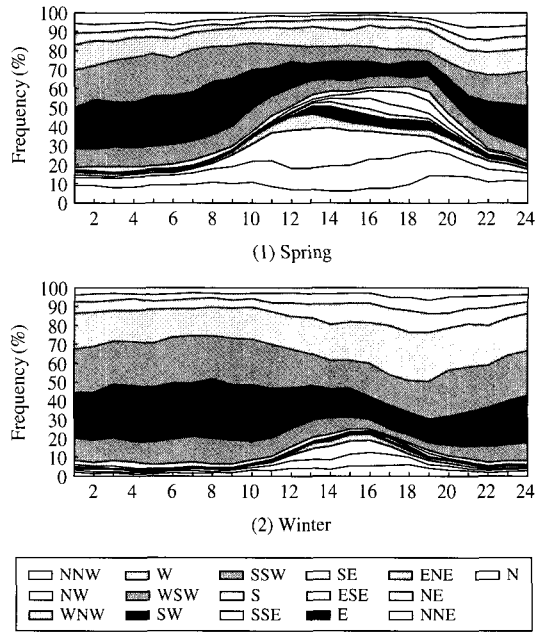


Fig. 6. Frequency of occurrence of wind directions at Pohang area.

만 시내로 유입되는 유의풍향의 출현빈도는 10% 이하로 낮은 빈도를 보이고 있다.

포항지역 기상조건에 대한 통계분석 결과를 종합하여 볼 때, 하루 중에는 해풍 진입시간인 10:00시경부터 풍속이 증가하여 15:00시경에 최고 풍속에 도달하고 육풍으로 전환되는 20:00시경까지 비산먼지 발생이 우려되며 시내방향으로 진행하는 유의풍향도 역시 해륙풍 전환시 출현빈도가 상승하고 있는 것으로 분석된다. 계절적으로는 겨울철 북서계열풍이 강풍임에도 불구하고 시내방향으로는 유출풍향 출현빈도는 가장 낮게 나타나며 봄철 주간 시간대의 풍속이 타계절에 비하여 가장 높게 나타나고 있어 상대적으로 비산먼지 발생 가능성이 높을 것으로 판단된다.

3. 포항지역 비산먼지 발생여건

포항지역의 비산먼지 발생여건을 살펴보면 전국적으로 가장 적은 강우량, 높은 건조율, 낮은 녹지율로 도시건조화가 심각한 상태이며 형산강을 끼고 동서

로 배치된 공단지역과 시가지지역은 먼지발생에 적합한 시가지화 건조지역으로 분류된다. 이러한 경향은 인공위성 원격측정 (remote-sensing) 자료의 영상분석에 의해 작성된 토지이용도(그림 7)에서도 잘 나타나고 있다. 특히 포항제철소에는 철강산업의 연원료로 사용되는 철광석과 코크스, 석회석 등을 노천야적장에 적치하므로 이 지역에서 발생하는 비산먼지의 1차적인 배출원으로 인식되고 있다.

풍식에 의해 비산먼지가 발생하는 과정은 입자가 표면에서 구르는 포복(creep) 단계와 입자가 튀어 오르기 시작하는 도약(saltation) 단계 그리고 유효입경이 70µm 이하의 입자는 대기유동에 실려서 부유/확산되는 난류확산(turbulent diffusion) 단계로 구분되는데 (Shao, 2000), 실제적으로 비산이 시작되는 단계는 도약단계이며 이때 먼지입자의 도약을 결정하는 주요한 변수는 임계풍속(threshold velocity)이다. 따라서 임계풍속을 파악하여야 먼지비산이 시작되는 풍속을 산정할 수 있으며, 더 나아가 비산먼지 발생량을 산출할 수 있다. 원료야드 야적파일에서 풍식에 의해 발생하는 비산먼지량(E)은 다음과 같이 풍속분포의 로그함수식으로부터 산출되는 마찰풍속(friction velocity, u_*)과 대기 중에 노출된 분체물질의 비산을 결정하는 임계마찰풍속(u'_*)의 2차 함수식으로 산정할 수 있다(U.S. EPA, 1995).

$$E = 58(u_* - u'_*)^2 + 25(u_* - u'_*)$$

for $u_* - u'_* > 0$ [g/m²/period]

여기서 마찰풍속의 계산식은 다음과 같다. 아래 식에서 z_0 는 지면거칠기 높이이다.

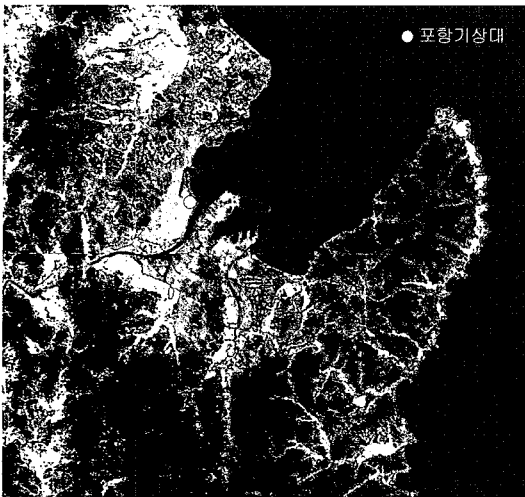
$$u_* = \frac{0.41 \cdot u(z)}{\ln(z/z_0)}$$

위 식에 의하면 비산먼지는 야적물 표면에 작용하는 마찰풍속이 임계마찰풍속을 초과하는 경우에 ($u_* - u'_* > 0$) 불규칙적으로 발생하며 야적물 표면의 미사(silt)가 모두 비산한 이후에는 더 이상 배출되지 않는 시간경화(aging) 특성이 있으며 수분함량이 8% 이상이면 비산먼지 발생량이 현저히 줄어들게 된다. 참고로 마찰풍속은 지면거칠기에 의해 대기경계층 하부에서 발생하는 바람에 의한 전단응력(shear stress)을 표현하기 위해 도출된 풍속이고, 임계마찰풍속은 토양과 같은 분체물질의 비산을 결정하는 풍

속으로 비록 용어는 유사하지만 두 변수간의 물리적인 상관관계는 없다. 즉, 마찰풍속은 풍속이 증가하거나 지면이 거칠어지면 풍응력(wind shear)의 증가에 따라 커지는 특성이 있으나, 임계마찰풍속은 풍응력에 노출된 분체물질의 입경과 질량, 부착상태 등의 요인에 따라 결정되므로 동일한 마찰풍속이 작용하는 조건이라고 하더라도 분체물질의 특성에 따라 임계마찰풍속은 상이하게 결정된다.

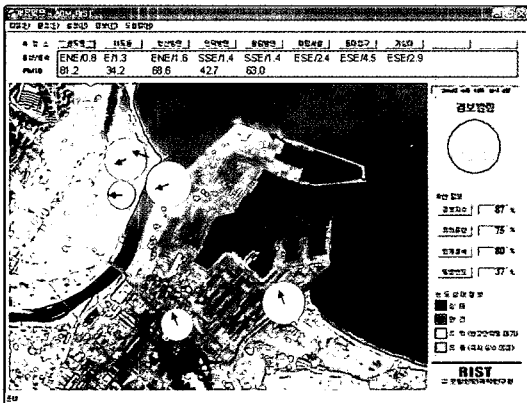
본 연구에서는 포항제철소 원료야드에 야적된 연원료의 임계마찰풍속을 파악하기 위하여 야적파일(storage pile) 전체에 대한 입경조사를 실시하였다. Chepil (1952)의 시험방식에 따른 산정결과에 의하면, 지표토양의 경우 임계마찰풍속은 일반적으로 31 cm/s이지만 (Gillette *et al.*, 1985) 원료야드 야적물의 경우는 평균적으로 30~58 cm/s로 다소 높은 것으로 조사되었으며 (김현구 등, 2003), 이 값을 풍속분포의 로그법칙을 적용하여 야적파일의 상단부에서의 비산풍속으로 환산하면 5 m/s에 해당한다. 이는 원료야드 야적파일(storage pile)의 표면에서 순간최대풍속이 5 m/s를 초과하면 비산이 시작된다는 것을 의미하며, 그림 4의 시간대별 순간최대풍속 변화특성과 비교한다면 비산먼지 발생이 우려되는 시간대는 10:00~17:00시 사이가 된다. 한편 원료야드 야적물 중 부유먼지가 될 수 있는 유효입경 70µm 이하의 먼지에 대하여 레이저회절 입도분석기(HELOS H1366)를 이용하여 실시한 입도분석 결과(김현구 등, 2003)에 의하면 일부 야적물을 제외한 대부분의 경우에 미세먼지(PM10) 분율이 20% 이하로 나타나고 있어 일반적인 토양에 비하여 미세먼지 분율은 상당히 낮은 것으로 확인되었다.

일반적으로 토양기원 비산먼지 중 입경이 70µm 이상인 먼지는 확산범위 2~3 km 이내에서 강하분진으로 지면에 침적된다(Shao, 2000). 그러나 포항제철소 원료야드의 야적물 중 대부분을 차지하는 철광석은 입자밀도가 높기 때문에 상대적으로 중력이 크게 작용하여 강하속도가 빠르기 때문에 실질적인 확산범위는 2 km 이내일 것으로 판단된다. 따라서 그 확산범위는 형산강을 넘어 시내의 일부지역이 포함되지만 포항제철소 대부분의 공장건물과 시설이 원료야드의 좌측에 밀집 배치되어 있기 때문에 건물에 의한 차폐율이 높을뿐 아니라 원료야드로부터 시내 방향으로의 풍향출현 빈도가 연중 5% 이내로 매우



- 1. Water
- 2. Urban
- 3. Dryland
- 4. Damp
- 5. Greens
- 6. Forest
- 9. Crop

Fig. 7. Classification of land cover using satellite image.



- SAFE ● Safe Situation-Favorable Ventilation
The land breeze ventilates the fugitive dust to the sea and results in a favorable air quality situation.
- WARNING ○ Warning Situation-Fugitive Dust Outflow
The sea breeze with strong wind causes generated fugitive dust to be emitted towards the downtown area.
- CAUTION ● Attention Situation-Statistically Cautious
The situation is presently safe, but the possibility of dust outflow is increasing according to meteorological statistics.
- OBSERVE ● Observation Situation-High Dust Concentration
The situation is presently safe, but dust concentration in downtown is increasing due to dust inflow from outside.

Fig. 8. Fugitive dust warning/forecast system.

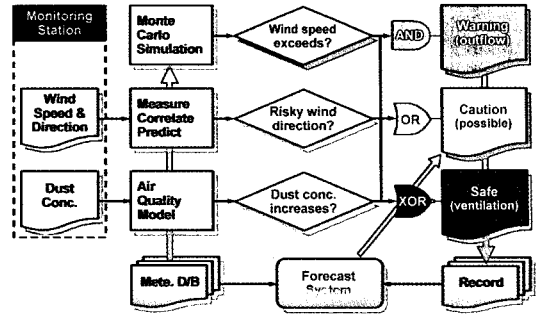


Fig. 9. Algorithm of intelligent monitoring system of fugitive dust.

낮은 관개로 실제적으로 원료야드에서 발생하는 비산먼지의 대부분은 포항제철소 부지 내에 강하분진으로 침적되며 가끔 강풍시 일부의 비산먼지가 외부로 유출되더라도 형산강이라는 자연적인 흡수대가 효과적인 차단역할을 하게된다. 원료야드 발생 강하분진의 공간분포에 대한 수용자모델 및 상관분석 해석결과에 의하면 앞서 언급한 지형지물적 차단효과, 기상학적 차단효과에 의해 비산먼지의 영향범위는 포항제철소 부지 내로 한정적인 것으로 확인되었다 (김병익 등, 2003). 그러나 비록 출현빈도가 낮기는 하지만 시내방향으로 강풍이 부는 경우에 비산먼지가 외부로 유출되는 사례가 발생하며 또한 비산먼지 중 미세먼지는 강하분진에 비하여 침강속도가 낮기 때문에 긴 체공시간으로 인하여 시내지역으로 유출될 가능성이 더 높은 것이 사실이다.

4. 비산먼지 경보/예보시스템

서론에서 설명하였듯이 비산먼지 관리 및 제어에 있어서 최대의 기술적인 난점은 비산먼지의 발생시점을 정확하게 포착하기 매우 어렵다는 것이다. 본 연구의 진행과정에서 벤치마크한 노천야적장에서 발생하는 비산먼지 관리에 있어서 선진기술 사례검토에 의하면, 대규모 석탄야적장을 소유한 미국 발전회사 및 철도운송회사에서는 실시간으로 풍속을 측정하여 임계풍속 초과시 자동적으로 야드살수를 실시하는 관리기술을 적용하고 있기는 하지만 (Emmitt, 1999) 단순히 최대풍속만을 관리하는 기술만으로 포

항지역의 풍환경 변화에 대처할 수는 없는 것으로 평가되었다. 포항제철소에서 이미 풍속검출에 의한 자동살수 시스템을 도입하였으나 실제로 운영한 바에 의하면 하루 중에도 짧은 시간 강풍이 발생하는 수많은 경우마다 넓은 면적의 원료야드 전체에 대한 대규모 살수를 할 수 없기 때문에 이러한 단순 최대 풍속만을 관리하는 시스템의 적용에는 문제가 많은 것으로 들어났다. 또한 강풍출현 시 센 바람에 바람에 의해 살수한 물이 날리게 되어 살수효과가 상실되므로 실제적인 원료야드의 살수관리 측면에서는 사전에 비산먼지 발생여부를 파악하여 예방살수하는 것이 최선의 관리방법인 것이다.

이러한 원료야드 비산먼지 관리의 난점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 포항제철소에서 운영하는 환경관측소의 기상 및 대기질 측정자료를 수합/분석하여 포항지역의 국지바람장 및 대기오염도 정보에 대한 영상분석 이미지를 실시간으로 제공하는 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템의 주화면을 보면(그림 8) 화살표의 방향과 길이는 각각 풍향과 풍속을, 원의 크기는 선택된 오염물질의 농도를 시각적으로 표시하고 있어 기상조건 변화에 따른 대기오염도 변동추이를 기존의 수치자료에만 의존한 복잡한 정보가 아닌 직관적이지만 대기물리학적으로 유효한 상황판별이 가능하다. 또한 본 시스템은 인공지능모델에 의하여 현재의 대기질 상황을 각각 안전상황(청색), 경보상황(적색), 관찰상황(녹색), 주의상황(황색) 등으로 구분하여 판별결과를 실시간으로 표시함으로써 환경관리자에게 효율적인 관리지침을 제공한다. 각각의 상황에 대한 설명은 그림 8에 서술되어 있다.

비산먼지 외부유출의 판별은 그림 9의 알고리즘 순서도에 설명된 바와 같이 세가지 판단기준이 적용된다. 즉, 현재 원료야드 표면에서의 풍속이 비산먼지가 발생하기 시작하는 임계풍속을 초과하고 있는가? 현재 풍향이 시내방향으로 향하고 있는가? 실제로 비산먼지가 발생하여 시내로 유출됨으로써 시내방향 먼지농도가 상승하고 있는가? 이 세가지 조건을 매 5분마다 동시판별하여 모든 조건에 해당되면 유출상황으로 결정하여 경보를 발령하게 된다. 이러한 판별에 있어서 산재한 다수의 환경관측소에서 측정된 기상요소를 실제로 비산먼지가 발생하는 원료야드 야적파일 표면에서의 요소값으로 변환하기 위해 측정-상관-예측(MCP; Measure-Correlate-Predict) 모델

(김현구, 2005)을 적용하였으며, 다수개의 입력자료를 연산하여 하나의 의사결정값을 산출할 때 입력요소의 확률분포를 고려하는 몬테카를로 예측(Monte-Carlo Forecast) 모델을 적용하였다. 또한 유의지역에 환경관측소가 설치되지 못한 경우에 대비하여 유의지역에서의 대기질 농도값을 예측하는 방법으로 대기확산모델 결과로부터 추출된 유의지역과 환경관측소 간의 상관계수를 적용하는 예측모델을 적용하였다.

4. 1 측정-상관-예측(Measure-Correlate-Predict) 모델

기상요소 중 풍향, 풍속은 지형지물의 영향을 크게 받으므로 인근의 두 지점이라 하더라도 상당한 편차를 보인다. 이러한 편차를 보정하기 위하기 위한 방법으로 풍력발전 분야에서 사용되는 측정-상관-예측 모델을 적용하였으며, 이때 두 지점간 풍속의 통계적인 선형 상관관계를 나타내는 다음의 보정식을 사용하였다.

$$V_{yard} = a \cdot V_{site} + b$$

$$a = a(V_{sites}, d_{site}; V_{yards}, d_{yard}), b = b(V_{sites}, d_{site}; V_{yards}, d_{yard})$$

여기서 아래첨자 yard와 site는 각각 원료야드와 환경관측소를, V와 d는 풍속과 풍향을 의미하며 a와 b는 각각 원료야드와 환경관측소 풍속간의 선형보간 계수 및 절편으로 환경관측소의 풍속등급 및 풍향구간의 함수로 결정되는 계수값이다. 참고로 a와 b는 원료야드에서 단기간 실측을 수행하여 각각의 환경관측소와의 통계적 상관분석으로 미리 산출된 값을 적용하게 되며 측정기간이 길수록 통계적인 예측정확도는 향상된다. 본 시스템에서는 MCP 방법 중 지형지물에 의한 기상요소의 변동요인이 있더라도 비교적 정확한 것으로 평가된(김현구, 2005) 행렬 MCP(Woods & Watson, 1997) 방법을 적용하였다. 본 논문에서는 지면관계상 MCP 방법 및 적용사례에 대한 구체적인 설명은 생략하지만 김현구(2005)에 MCP 방법에 따른 오차분석과 함께 포항지역에서의 적용 사례를 제시하고 있으므로 참고문헌으로 대신하고자 한다.

그림 10은 참조지점(적색선과 삼각형)과 원료야드(청색선)에서 관측된 풍속의 시계열 그래프로 357~402 시간구간에서는 두 지점간에 상당한 풍속편차가

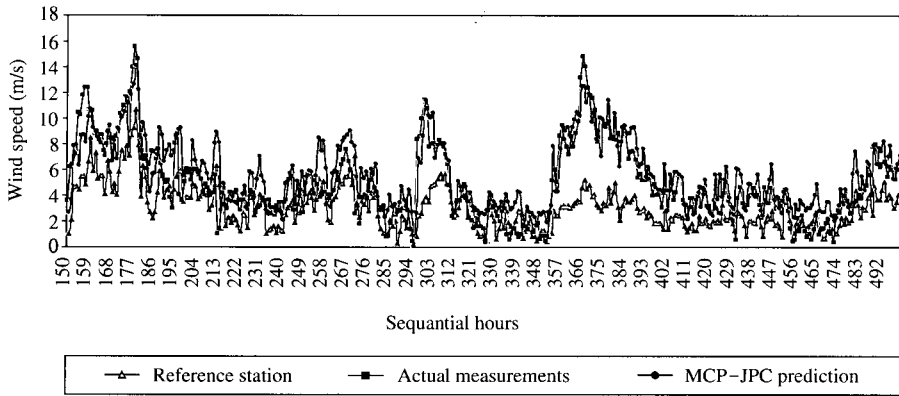


Fig. 10. Comparison of wind speed at the reference site and at the storage yard.

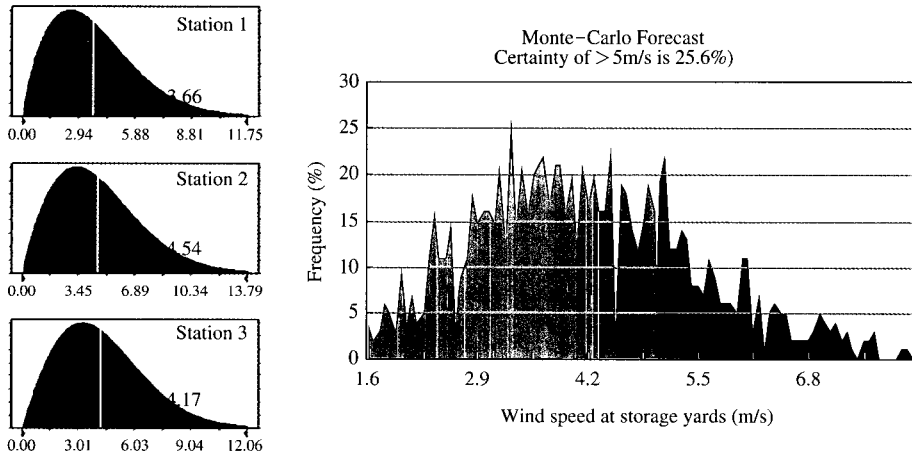


Fig. 11. Monte-Carlo forecast of wind speed at the storage yard from three station data.

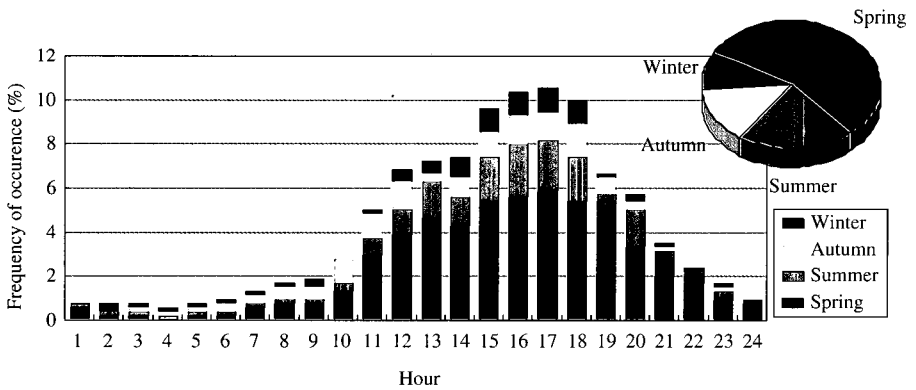


Fig. 12. Frequency of fugitive-dust leakage events during 2002~2003.

발생하고 있음을 보여준다. 한편 MCP 결과(흑색점선)는 이러한 풍속편차 구간에서도 정확한 풍속을 예측하고 있다. 설명한 예시와 같이 참조지점인 포항 기상대에서는 저풍속이 관측되더라도 원료야드에서는 고풍속이 발생하여 비산먼지가 발생하는 빈도가 높기 때문에 MCP를 적용한 풍속보정이 실질적으로 반드시 필요함을 알 수 있다.

4. 2 몬테-카를로(Monte-Carlo) 모델

환경관측소에서 매 5분 간격으로 전송되는 기상요소 및 대기질 항목은 각각 이동평균 구간을 설정하여 해당 구간동안의 입력값을 분산자료로 간주하여 몬테-카를로 모의를 수행하고 최종적으로 현상황 판단을 위한 확률적 의사결정값을 산출하게 된다. 예를 들어 풍속의 경우, 측정-상관-예측 모델에 의하여 각각의 환경관측소에서 측정된 풍속값을 원료야드 야적과일의 상단표면 풍속으로 변환하게 된다. 이때 변환풍속은 설정된 시간구간 동안의 평균풍속이 아닌 개별 측정값으로 구성된 풍속분포로 변환하며, 이때 풍속분포 특성을 고려하여 와이불(Weibull) 분포로 재구성하게 된다. 그림 11의 예제를 보면, 관측지점 3곳에서 전송된 관측값을 풍속분포로 재구성하여 원료야드에서의 풍속분포를 예측하면 임계풍속 5 m/s를 초과할 확률은 약 26%로 예측된다. 그런데 만일 각 측정지점의 평균풍속을 산출평균한 4.1 m/s를 판단기준으로 사용하게 되면 임계풍속을 초과하기 위해서는 0.9 m/s의 여유가 있다고 판단하게 되지만 실제의 경우에는 매초 변화하는 풍속값은 임계풍속을 순간적으로 초과하는 비율이 26%가 된다고 해석할 수 있으므로 상당한 견해차이가 발생하게 된다.

4. 3 비산먼지 외부유출 통계예보

비산먼지 외부유출 가능성에 대한 예보는 비산먼지의 발생 및 외부유출 가능성을 통계적인 정량지수로 산출하여 일정기준 이상일 경우 주의상황으로 판별하게 되는데, 기상통계분석에 의해 시간대별 유출 풍향 출현빈도와 임계풍속 초과확률, 그리고 과거 비산먼지 유출사례 발생빈도의 세가지 항목을 가중평균하여 발생 및 외부유출 확률을 산정하게 된다. 그리고 이러한 외부유출 확률은 비산먼지 경보/예보시스템을 가동하면서 매 5분 간격으로 입력되는 실시간 자료의 판별사례를 데이터베이스에 저장하는 자

가학습기능에 의해 통계적인 예측정확도를 지속적으로 상승시킬 수 있다.

5. 원료야드 최적살수시점

원료야드로부터의 비산먼지 발생억제하기 위해서는 대기 중 노출면적을 최소화 하거나 노출표면에 작용하는 풍응력을 최소화하여야 한다. 즉, 복포 또는 표면경화제를 이용하여 노출부위를 차단하거나 방풍림, 방풍망을 설치하여 야적물 표면에 작용하는 풍속을 감속시켜야 한다. 포항제철소에서는 전 야드에 방풍림과 방풍망을 설치하였고 장기보관 야적물의 경우에는 복포 또는 표면경화제 살포를 실시하고 있으며 상시조업이 필요한 야적물에는 주기적으로 살수를 실시하여 야적물의 수분함량을 증가시킴으로써 비산을 최대한 억제하고 있다. 미국 환경보전청의 제시자료(U.S. EPA, 1995)에 의하면 주기적인 살수는 35%의 저감효과가 있지만 풍속에 따른 능동적 살수는 65%의 저감효율이 있는 것으로 조사되어 있다. 따라서 기존의 비산먼지 억제활동과 더불어 본 연구에서 개발된 비산먼지 경보/예보시스템에 의한 적기 살수 및 예방살수를 실시한다면 실제적인 저감효율은 90% 이상이 될 것으로 기대된다.

본 연구에서는 최적살수방법에 대한 물리적인 모순, 즉 비산먼지의 억제를 위해서는 수분함량의 유지를 위해 지속적인 살수작업이 필요하지만 용수량 및 작업시간 제약에 의해 1일 1~2회의 살수작업 이상은 현실적으로 어렵다는 대립상황을 극복하기 위하여 TRIZ의 시간분리(separation in time) 방법에 의한 모순극복을 시도하였다. 즉, 개발된 자가학습모델에 2002년 1월부터 2003년 12월까지 총 17,520시간의 과거 측정자료를 입력하여 비산먼지 유출사례를 판독함으로써 그림 12와 같은 비산먼지 외부유출 사례의 시간대별 발생빈도 그래프를 작성하였다. 작성된 그래프를 보면 비산먼지 외부유출 사례는 기상조건의 통계분석을 통하여 예상하였던 바와 같이 11:00~19:00시 사이의 해풍 시간대에 90%의 사례가 집중되고 있으며 계절적으로는 춘계 유출사례 가장 높게 나타나고 있다. 이러한 사례분석 결과로부터 직관적으로 최적 살수시점은 비산먼지 유출사례가 집중되기 이전 시간으로 판단할 수 있다. 실제로 본 연구

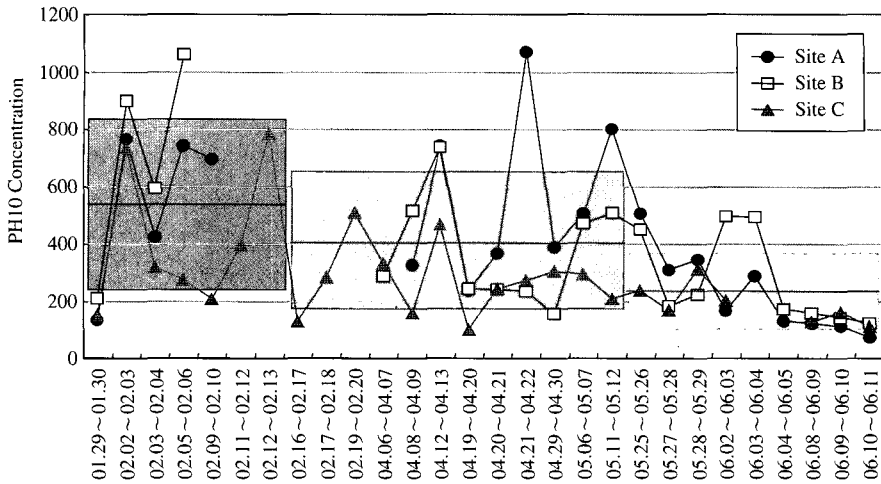


Fig. 13. Measurement results of fugitive dust concentration during January~June, 2004.

에서는 강우량, 살수량 및 기상조건에 따른 수분함량의 변화를 장기간 측정/분석한 결과 10:00시경에 1일 살수량의 70%를 예방살수하고 15:00시경에 나머지 물을 추가 살수하면 11:00~19:00시에 집중되는 비산먼지 유출사례를 최대한 억제할 수 있다는 결론을 도출하였다.

본 연구를 통하여 개발된 비산먼지 경보/예보시스템을 포함제철소 환경감시센터에 설치하고 원료공장에서 최적살수시점을 실시한 이후 실제적인 비산먼지 저감효과가 나타났는지 검증하기 위해 비산먼지 농도의 공정시험법에 의거하여 원료야드 주변 풍상부와 풍하부 총 9개 지점에 미니볼(MiniVol) 먼지측정기를 설치하여 2004년 1월부터 6월까지 6개월간 장기측정을 실시하였다.

먼지농도의 저감효과의 측정결과에 의하면 그림 13에 제시된 비산먼지 농도의 변화경향에서 분명히 확인되듯이 초기(2004. 1. 29~2. 13) 미관리 상태에서는 비산먼지법을 부분적으로 초과하는 상황이었으나 살수량을 적정수준으로 증가시킴에 따라 비산먼지법 준수상황으로 개선되었으며(2004. 2. 16~5. 12) 마지막 단계로 비산먼지 경보/예보시스템에 의한 즉각 대응과 최적살수시점 예방살수를 실시함에 따라(2004. 5. 25~6. 11) 비산먼지 배출농도는 미관리 상태 대비 70% 이상 감소한 것으로 확인되어 개발된 비산먼지 최적관리시스템의 효과를 정량적으로 확인

할 수 있었다.

6. 결 론

비산먼지라고 하더라도 그 중 상당량이 인체 위해도가 높은 미세먼지를 포함하고 있기 때문에 향후 비산먼지에 대한 집중적인 단속 및 저감노력이 진행될 것으로 예상된다. 이러한 배경 하에 본 연구에서는 원료야드 야적물로부터 풍식에 의해 비산먼지가 발생하여 부지경계선 외부로 유출확산되는 상황을 실시간으로 판별하여 환경관리자에게 영상정보로 제공함으로써 즉각적인 대응이 가능하도록 하며 더 나아가 비산먼지 발생확률을 예보함으로써 사전대비를 할 수 있는 비산먼지 경보/예보시스템과 이를 이용하여 최적살수시점을 도출할 수 있는 비산먼지 최적관리시스템을 구축하였다. 개발된 비산먼지 경보/예보시스템은 비산먼지 외부유출을 근원적으로 차단함으로써 지역 대기질의 실질적인 개선효과가 기대되며 향후 대규모 노천야적장 보유업체로의 파급효과가 기대된다.

감사의 글

본 연구는 저자가(재)포항산업과학연구원 책임연구원으로 재직시 포스코 현업과제로 수행하였던 연

구과제의 결과임을 밝힙니다. 본 연구에 의해 개발된 「비산먼지 경보/예보시스템」은 특허출원(출원번호 2004-0071947 외 4건) 되었으며, 본 연구의 핵심기술인 「기상조건별 비산먼지 최적관리 기술」은 2004년도 RIST 대표기술상을 수상하였습니다.

참 고 문 헌

김병역, 김민균, 김현구 (2003) 제철소 인근지역 강하분진 상
 분별 분포현황 조사, (재)포항산업과학연구원 연
 구보고서, 2002A344.
 김현구, 김민균, 김병역 (2003) 제철소 면오염원 비산먼지 배
 출량 조사 및 저감방안 연구, (재)포항산업과학연
 구원 연구보고서, 2002A308.
 김현구, 정용원, 홍지형 (2004) 전국 시도별 비산먼지 배출량
 산정 (2001년도), 한국대기환경학회지, 20(2),
 263-276.
 김현구 (2005) 포항지역 풍속전단 양상분석 및 측정-보정-
 예측법의 응용, 한국신재생에너지학회지, 1(2),
 26-33.
 이화운, 정우식, 김현구, 이순환 (2003) 포항지역의 기후요소
 별 분석, 한국지구과학회지, 24(5), 449-455.
 이화운, 정우식, 김현구, 이순환 (2004) 대기오염 확산해석을
 위한 포항지역 기상장 연구-바람장 수치모의, 한
 국대기환경학회지, 20(1), 1-15.
 정우식, 이화운, 김현구 (2003) 포항지역의 겨울철 남서계열

탁월풍 현상에 관한 분석 및 수치모의, 한국지구
 과학회지, 24(6), 533-548.
 Chepil, W.S. (1952) Improved Rotary Sieve for Measuring
 State and Stability of Dry Soil Structure, Soil
 Science Society, 16, 113-117.
 Emmitt, G.D. (1999) Fugitive coal dust: An old problem de-
 manding new solutions, Port Technology Interna-
 tional, 9, 125-128.
 Gillette, D.A. (1985) Threshold Velocities for Input of Soil
 Particles into the Air by Desert Soils, J. Geop-
 hysical Research, 85, 5621-5630.
 Shao, Y. (2000) Physics and Modeling of Wind Erosion,
 Kluwer Academic Publishers.
 U.S. Environmental Protection Agency (1995) Emission factor
 documentation for AP-42, Section 13.2.5, Indust-
 rial wind erosion, Research Triangle Park, NC,
 USA.
 U.S. Environmental Protection Agency (2000) National Air
 Pollutant Emission Trends, 1900-1998, EPA-
 454/R-00-002, Research Triangle Park, NC,
 USA.
 U.S. Environmental Protection Agency (2001) Procedures
 Document for National Emission Inventory, Criteria
 Air Pollutants 1985-1999, EPA-454/R-01-006,
 Research Triangle Park, NC, USA.
 Woods, J.C. and S.J. Watson (1997) A new matrix method of
 predicting long-term wind roses with MCP, J. Wind
 Eng. & Ind. Aerodyn., 66, 85-94.