

연구논문

신항만 해사 매립 공사시 비산먼지 발생량 산정 및 주변영향 평가

최원준 · 조기철 · 이은용 · 나하영* · 이순규* · 오광중

부산대학교 환경공학과, (주)한가람 환경사업부*

(2006년 3월 17일 접수, 2006년 7월 27일 승인)

Estimation of Fugitive Dust Emission and Impact Assessment
in Constructing the New Port by Reclamation of Sea SandWon-Joon Choi · Ki-Chul Cho · Eun-Yong Lee · Ha-Young Na* ·
Soon-Kyu Lee* · Kwang-Joong Oh

Department of Environmental Engineering, Pusan National University

Division of Environment, Hangaram Engineering & Consulting Co. Ltd.*

(Manuscript received 17 March 2006; accepted 27 July 2006)

Abstract

In case of studied area located around the sea, the data measured from the regional meteorological office is highly different from the local weather data because the diffusivity of fugitive dust varies considerably with meteorological conditions. Especially, it is very difficult to predict the amount of fugitive dust accurately as wind speed remains high frequently. In this study, the fluxes of suspended particulates as a function of the friction velocity were applied to consider the effect of wind speed on the amount of fugitive dust generated from the reclamation site. The amount of fugitive dust estimated as mentioned above was simulated by using ISCST3 model. As a result, in case of using only the Fugitive Dust Formula which is usually used in Environment Impact Assessment, the predicted PM_{10} concentrations with points were $43.4\sim 67.8\mu g/m^3$. However, in case of applying to the flux of suspended particulates, the predicted values of PM_{10} with points were $43.3\sim 69.1\mu g/m^3$, $49.5\sim 90.4\mu g/m^3$ and $76.0\sim 182.6\mu g/m^3$ with the wind speeds of 4.4, 5.8 and 7.7m/s, respectively. It could be possible to predict the amount of fugitive dust accurately because these predicted values were similar to the measured values. Consequently, we can establish alternatives for reduction of fugitive dust in this area damaged by fugitive dust which is caused by wind.

Key words : Fugitive dust, Impact assessment, Reclamation, Sea sand

1. 서론

최근 국내에서는 재개발과 재건축, 대형건물의 신축공사, 도로공사 등과 같은 주택가에 인접한 지역의 건설공사가 증가하고 있으며, 이로 인해 소음·진동, 대기오염물질에 대한 문제가 점차 크게 대두되고 있다. 그러나, 이에 대한 심각성을 인식하여 각종 대책을 수립하고 있지만 아직까지 효율적인 대책 마련은 어려운 실정이다(이내현·김윤신, 2000). 특히, 대기오염물질 중 미세먼지(PM₁₀)는 황사, 산불, 화산폭발 등의 자연적인 발생원에 의해서 발생하기도 하지만, 대부분은 건설공사장과 탄광, 화력발전소, 제철소 등에 야적된 원료입자들이 바람에 의해 비산되거나, 연구대상지역에서와 같이 매립 시에 사용했던 모래가 강한 바람에 의해 비산되는 등 인위적인 활동의 부산물로서 국지적인 영향과 각종 기상인자에 의해 이류, 확산 및 수송되어 원거리까지 피해를 주고 있다(김인수·장영기, 2000).

한편, 2004년 현재 정부 3대 국정사업 중의 하나로 신항만 건설 사업이 진행중에 있으며, 사업중의 하나인 신항만 민간투자시설사업 1-1단계 부두시설이 진해시 용원동, 안골동, 재덕동 남측 일원 및 부산광역시 강서구 가덕도 북서측 해역 일원에 조성되고 있다. 본 공사는 1,323,729m²의 공유수면에 해사를 매립하는 사업으로 북서계절풍이 부는 겨울철에 해사가 일부 비산되어 사업지구 남쪽에 위치한 가덕도 주민에게 피해를 줄 우려가 있다. 이러한 비산먼지에 대한 피해를 최소화하기 위해서는 사업계획을 수립·시행함에 있어 환경적으로 건전하고 지속가능한 개발이 되도록 하여야하며, 특히 환경영향평가가 적절한 저감대책을 마련하기 위해서 환경적 영향을 정확히 예측할 필요가 있다. 그러나, 환경영향평가서 작성시 주로 사용되고 있는 U.S EPA 실험식 및 fugitive dust 실험식의 경우 사업의 성격, 대상지역의 지역적 특성 및 지형에 따라 많은 오류를 낳고 있는 실정이다(이내현·김윤신, 2000). 또한, 비산먼지의 확산 정도는 기상 조건에 따라 매우 큰 차이를 보이므로 본 대상지역처럼 해안에 위치하는 경우 지방기상대에서 측정한 기상자료와는 큰 차

이가 있으며, 특히 풍속의 세기가 큰 날이 잦으므로 정확한 예측을 하기에 어려움이 있다.

따라서, 본 연구에서는 연구대상지역과 같이 해안에 위치하여 바람의 영향이 크고 매립이 진행되는 지역에서의 보다 정확한 예측을 위하여 환경영향평가서에서 비산먼지 발생량 예측시 주로 사용되는 fugitive dust 실험식에서 바람에 의한 발생량 대신 마찰속도의 함수인 부유분진 플럭스(flux)를 이용한 풍속에 따른 비산먼지 발생량을 적용하였다. 이를 통하여 산정된 발생량을 ISCST3 모델을 이용하여 예측치를 비교·분석함으로써 부유분진 플럭스의 적용 가능성을 파악하고, 더 나아가 바람의 영향이 큰 지역에 대한 비산먼지 피해 예상지역의 보다 정확한 예측을 통하여 적절한 저감대책을 마련하는데 기여하고자 한다.

II. 이론적 배경

1. Fugitive dust 실험식

비산먼지 발생량 산정시 세부 발생원별로 고려하고 있는 fugitive dust 실험식은 비포장도로에서 덤프트럭 이동에 의한 발생량; 식 (1), 작업장비(덤프트럭 제외)의 운행에 의한 발생량; 식 (2), 바람에 의한 발생량; 식 (3), 토공물량의 상·하적시 발생량; 식 (4) 등 4가지로 구성되며, 각각의 식은 다음과 같다(Orlemann, 1983).

$$EF_1 = 0.81 \cdot K \cdot A \cdot (S/30) \cdot [(365-P)/365] \cdot (N/A) \quad (1)$$

$$EF_2 = 0.1 \cdot T \cdot (A/1.5) \cdot (d/235) \quad (2)$$

$$EF_3 = 0.05 \cdot (A/1.5) \cdot (D/90) \cdot (d/235) \cdot (f/15) \quad (3)$$

$$EF_4 = 0.0018 \cdot [(A/5) \cdot (U/5)] / [(M/2)^2 \cdot (Y/6)] \quad (4)$$

여기서, EF는 배출 계수(EF₁; lb/VMT, EF_{2~4}; lb/ton), K는 입자크기 계수, A는 실트 함량(%), S는 평균 차량속도(mile/hr), P는 연간 강우일수(0.254mm이상), N은 평균 차량 바퀴수, T는 공사장비의 활동계수, d는 연간 건조일수(365-P), D는 토사의 저장기간, f는 풍속 12mile/hr 초과시간빈도, U는 풍속(mile/hr), M은 토사의 수분함량(%), Y는 상·하적용 장비의 용량(yd³)이다.

2 풍속에 따른 비산먼지 발생

풍속에 따른 비산먼지 발생량은 마찰속도 함수인 부유분진 플렉스로써 산정할 수 있으며, 부유분진 플렉스는 임계속도, 마찰속도 및 임계마찰속도로써 나타내어진다.

1) 임계속도

바람이 건조한 토양에 응력을 가하면 토양입자가 공기 중으로 부유하게 되며, 이 때 토양입자가 부유하기 시작하는 풍속을 임계속도라 한다. 해사를 부유시키는 입구 바람속도의 결정에 있어서 임계속도는 매우 중요한 인자이며, Ginoux et al.(2001)에 의해 받아들여진 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다. 임계속도는 입자크기, 입자밀도, 공기밀도 및 수분량에 따라 달라지며, 수분량이 0.5보다 클 경우에 비산되는 모래는 없는 것으로 가정하여 계산하게 된다(Lee et al., 2003).

$$U_t = \begin{cases} 6.5 \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho_a)}{\rho_a}} g \phi_p (1.2 + 0.2 \log \omega_s) & \text{for } \omega_s \leq 0.5 \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

여기서, U_t 는 임계속도(m/s), ρ_p 는 입자밀도(kg/m³), ρ_a 는 공기밀도(kg/m³), g 는 중력가속도(m/s²), ϕ_p 는 입자직경(10⁻⁵ m), ω_s 는 수분량이다.

2) 마찰속도

대상지역의 배출계수를 계산하기 위해서는 같은 풍속이라 할지라도 대기의 안정도에 따라 비산 입자가 받는 응력에 따라 달라지므로 마찰속도를 구해야 한다. 마찰속도는 지표층 상사 이론으로부터 추정될 수 있으며, 식 (6)에 적용하여 구할 수 있다(정관영 · 박순웅, 1998; Brandt et al., 1998; Chang et al., 1996).

$$U^* = kU_{10} / [\ln(Z_s/Z_0) - \phi_m(Z_s/L)] \quad (6)$$

여기서, U^* 는 마찰속도(m/s), k 는 von Karman 상수(0.4), U_{10} 은 관측고도 Z_s 에서의 풍속(m/s), Z_s 는 관측고도(m), Z_0 은 지표면 거칠기 길이(m), ϕ_m 은 운동량에 대한 안정도 함수, L 은 Monin-Obukhov 길이이며, 중립조건에서는 $Z_s/L=0$,

$\phi_m=0$ 이다(UCAR, 2003).

3) 임계마찰속도

임계마찰속도는 Louis(1979)의 이론을 변형한 Lee(1997)의 보고 내용을 토대로 하여 관측고도 10 m일 때 식 (5)에서 산출한 임계속도를 식 (7)에 적용하여 산정하게 된다(Lee et al., 2003).

$$U^* = C_d^{0.5} \times U_t \quad (7)$$

$$C_d = (0.23/\ln Z_s)^2 \quad (8)$$

여기서, U_t^* 는 임계마찰속도(m/s), C_d 는 유체저항 계수이다.

4) 발생량 추정

입자의 크기가 0.1 μ m에서 10 μ m까지 바람에 의해 지면에서 대기로 부유하는 부유분진의 플렉스는 마찰속도의 함수로서 마찰속도와 임계마찰속도의 관계에 따라 식 (9)에 적용하여 산출할 수 있다(Lee et al., 2003).

$$F_a = C \left[(U^*)^4 \left(1 - \frac{U_t^*}{U^*} \right) \right] \quad \text{for } U^* \geq U_t^* \quad (9)$$

여기서, F_a 는 부유분진 플렉스(kg/m²/s)이며, C 는 상수($1.4 \pm 0.1 \times 10^{-6}$)로써 Gillette and Passi(1988)로부터 얻어졌다.

III. 연구범위 및 방법

1. 대상지역

본 연구 대상 지역의 위치는 신항만 민간투자시설사업 1~1단계 부두시설 예정지역으로 진해시 용원동, 안골동, 재덕동 남측 일원 및 부산광역시 강서구 가덕도 북서측 해역 일원으로 진해시와 부산광역시의 중간지점에 위치하고 있다.

그림 1에서 나타낸 바와 같이 총 매립지 면적은 1,323,729m²이다. 그 중 본 대상지역에 대한 연구 수행기간 동안 site 3(574,637m²)은 매립이 완료되어 방진막을 이용하여 비산먼지 발생을 방지하고 있었으며, site 2(341,883m²)는 수분량 10%의 젖은 모래로 구성되어 있었으며, 스프링클러를 설치하여

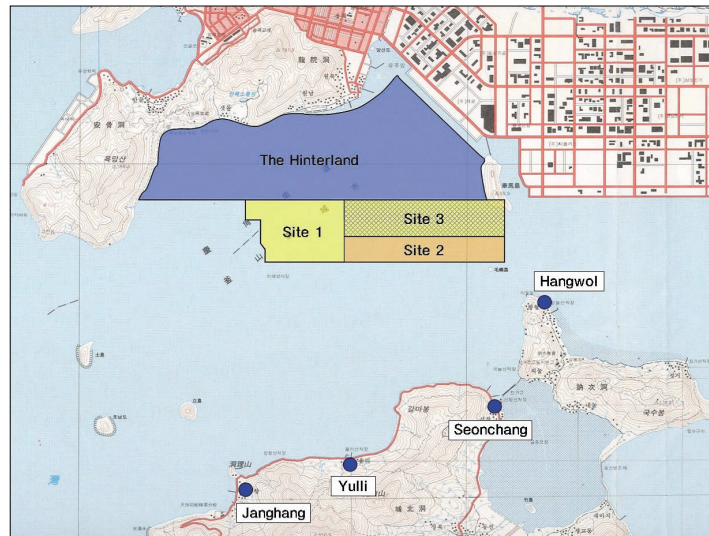


Fig. 1. The studied area.

해사가 비산하는 것을 방지하고 있었다. 따라서, 본 연구에서는 이를 제외한 site 1(407,209m²)의 건조 모래에 대한 주변지역 영향을 살펴보았다. 한편, 주변 영향 예상지역으로는 각각 2,729m, 1,985m, 2,225m, 2,093m 이격된 장항, 울리, 선창, 항월 등 4 지점을 선정하여 현장 실측 및 ISCST3 모델을 통한 예측을 수행하였으며, 이를 통해 겨울철 북서계절풍으로 인한 영향을 살펴보았다.

2. 현장조사

발생량 산정을 위한 입력자료(silt 함량, 10 μ m 이하의 입자백분율, 함수율, 밀도 등)를 얻기 위하여 대상지역의 매립에 사용된 해사를 채취하여 분석하였다. 중량비 및 silt 함량비는 KS A 5101에 규정되어 있는 표준체 #10(2000 μ m), #20(850 μ m), #40(425 μ m), #60(250 μ m), #80(180 μ m), #100(150 μ m), #140(106 μ m), #200(75 μ m)을 각각 통과한 토양의 무게를 측정하여 구하였고, 75 μ m 이하의 입자백분율은 입도분석기(BI-XDC, Brookhaven Ins. Co.)를 이용하여 분석하였다. 또한, 함수율 및 밀도는 토양 오염공정시험법에 준하여 분석을 실시하였다.

매립 해사의 겨울철 북서계절풍에 의한 비산에 따른 주변지역의 영향을 살펴보고, 현장 측정치와

임계마찰속도를 적용하여 풍속에 따른 영향을 고려한 모델 예측치의 비교·분석을 위하여 주변 영향지역(4개 지점)에 대하여 β -선 흡수선법의 PM₁₀ 분석기(BAM-1020, MET ONE))를 이용, 대기오염공정 시험방법에 준하여 24 시간 동안 시간별 시료채취 및 분석을 실시하였다.

3. 입력자료

1) 발생량산정

비산먼지 발생량은 연구대상지역인 건조모래가 매립 중에 있는 site 1에 대하여 산정하였다. 발생량 산정을 위해 비산먼지 발생 시점은 해양매립이 완료된 후 육상에서 성토시에 발생할 수 있는 제반요인을 예측시 주로 사용되는 fugitive dust 실험식에 적용하여 산정하였다. 이외에 fugitive dust 실험식에서 바람에 의한 발생량 식 (3) 대신 마찰속도 함수인 부유분진 플럭스 식 (9)를 적용하여 풍속에 따른 영향을 고려한 비산먼지 발생량도 산정하였다.

2) ISCST3 model

입력조건 중 제어정보로는 시골지역, 평균시간을 24 시간으로 설정하였으며, 배출원정보로는 먼오염원으로 지형적 영향을 고려하였으며, 비산먼지 배출량은 각각의 실험식에서 산정한 배출량을 g/m²/s 단

Table 1. The local weathers in winter

Year and month		Temperature(°C)	Relative humidity(%)	Wind direction(Deg.)
2003	December	3.7	40.6	295.2
2004	January	2.3	42.6	306.4
	February	5.6	45.3	295.0

Table 2. The number of days representing maximum wind velocity

Max. wind speed Year and month		≤ 5 m/s	5~7 m/s	7~9 m/s	9~11 m/s	11 m/s over	Total
2003	December	5	8	7	5	6	31
2004	January	6	7	6	6	6	31
	February	4	7	6	5	7	29
Total		15	22	19	16	19	91

위로 입력하였다. 연구대상지역의 기상자료는 지역 특성상 바다와 인접하여 대륙의 영향보다는 해양의 영향을 많이 받으므로 보다 신뢰성 있는 예측을 위하여 일반기상 외에 표 1~2의 국지기상 자료를 이용하였다. 한편, 주변 영향지역은 대상지역의 남쪽에 위치하여 북서풍의 영향을 받으므로 남동풍이 주 풍향인 봄, 여름은 영향이 거의 없다고 가정하여 겨울에 대한 기상자료만 입력하여 예측하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 매립 해사의 특성

본 대상지역의 매립에 사용된 토사는 대상지역에

서 남서쪽으로 105km 이격된 지점, 수심 90m의 해사를 준설한 것으로 비산먼지 발생량 산정을 위한 입력 자료를 도출하기 위하여 입도 분포, 밀도 및 함수율 등 해사의 특성을 파악하였다. 그 결과, 표 3에 나타난 바와 같이 입자크기 분포는 250~425 μ m는 59.14%, 425~850 μ m는 18.47%, 180~250 μ m는 7.17%로 입자크기 250~425 μ m의 해사가 가장 많이 분포하고 있는 것으로 조사되었으며, 비산먼지 배출계수 산정시 필요한 매립된 해사의 10 μ m이하 분포는 0.32%였다. 그리고, 국제토양학회 기준에 따른 토양 특성을 살펴본 결과, gravel(2,000 μ m이상), sand(20~2,000 μ m), silt(2~20 μ m)는 각각 3.34%, 95.50%, 1.16%로 구성되어 토성 구분에서

Table 3. The particle size distribution and characteristics of sea sand

Particle size(μ m)	Particle weight(g)	Particle distribution (%)	Soil property	Soil contents(%)
2,000 이상	16.69	3.34	gravel	3.34
850~2,000	28.00	5.60	sand	95.50
425~850	92.34	18.47		
250~425	295.67	59.14		
180~250	35.86	7.17		
150~180	7.22	1.44		
106~150	6.90	1.38		
75~106	6.00	1.20		
20~75	5.52	1.10		
10~20	4.20	0.84	silt	1.16
10 이하	1.60	0.32		
Total	500.00	100.00	-	100.00

Table 4. Comparison of measured results

Site(Distance(m))	Sampling date	Wind direction	Average wind velocity(m/s)	PM ₁₀ concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Janghang(2,729)	04. 01. 04	WSW	2.5	36.0
	04. 01. 29	WNW	3.5	45.5
	04. 02. 08	NW	4.4	48.8
	04. 01. 13	WNW	5.8	53.6
	04. 02. 14	WNW	7.7	62.2
Yulli(1,985)	04. 01. 04	WSW	2.5	40.1
	04. 01. 29	WNW	3.5	46.1
	04. 02. 08	NW	4.4	54.5
	04. 01. 13	WNW	5.8	66.8
	04. 02. 14	WNW	7.7	94.1
Seonchang(2,225)	04. 01. 04	WSW	2.5	43.6
	04. 01. 29	WNW	3.5	55.6
	04. 02. 08	NW	4.4	71.8
	04. 01. 13	WNW	5.8	85.9
	04. 02. 14	WNW	7.7	139.6
Hangwol(2,093)	04. 01. 04	WSW	2.5	46.2
	04. 01. 29	WNW	3.5	58.4
	04. 02. 08	NW	4.4	65.5
	04. 01. 13	WNW	5.8	79.2
	04. 02. 14	WNW	7.7	127.1

전형적인 모래질 토양의 토성을 띠는 것으로 나타났으며, 비산먼지 배출계수 산정시 필요한 silt 함량은 1.16%였다.

한편, 토양공정시험법에 준하여, 함수율, 입자밀도 및 용적밀도를 분석한 결과, 각각 1.05%, 2.65g/cm³, 1.09 g/cm³로 나타났다.

2. 주변 영향지역의 현장측정

대상지역 주변 겨울철 풍속에 따른 비산먼지 영향을 살펴보기 위하여 영향예상지역(장항, 울리, 선창, 항월 등 4지점)에 대하여 5회에 걸쳐 측정하여 표 4에 나타내었다. 비산먼지의 측정은 풍속이 작아 바람에 의하여 비산되는 먼지가 거의 없었던 1월 4일과 바람에 의해 비산먼지가 발생된 1월 29일(최대 풍속 6.7m/s), 2월 8일(최대풍속 8.4m/s), 1월 13일(최대풍속 10.8m/s), 2월 14일(최대풍속 13.5m/s)에 이루어졌다. 비산먼지 측정지점은 공사장 남측에 위치하였으며, 따라서 겨울철 주풍향인 북서풍으로 인해 모든 지점에서 비산먼지의 영향을 받는 것으로

조사되었다.

비산먼지 조사결과, 표 4에서 보는 바와 같이 풍속이 작고 풍향은 영향 예상지역의 반대로 불어 바람에 의한 영향이 없었던 1월 4일 PM₁₀ 농도는 장항 36.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 울리 40.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 선창 43.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 항월 46.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮은 값을 보여 이를 배경농도로 하였다. 그러나, 평균풍속이 3.5~7.7 m/s로 증가함에 따라 각 지점별 PM₁₀ 농도는 장항 45.5~62.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 울리 46.1~94.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 선창 55.6~139.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 항월 58.4~127.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 풍속이 클수록 비산먼지 발생량이 많아짐과 동시에 측정 당일의 주풍향이 풍속이 큰 측정일에는 모두 서북서(WNW), 북서(NW)로 나타났지만 풍속이 작았던 1월 4일에는 서남서(WSW)로 가덕도 지역에 영향을 주지 않은 것으로 판단된다. 또한, 울리 지점이 이격거리가 가장 가까우나 지역적으로 정남쪽에 위치하여 선창이나 항월 지점에 비하여 북서풍의 영향을 덜 받아 PM₁₀ 농도가 낮으며, 풍향과 같은 지역적 위치에 있는 선창, 항월의 경우 이격거리가

Table 5. The parameter value for computation of emission coefficient

Parameter	Content	Parameter value	Note
K	Particle size multiplier, $10 \geq$	0.32	Table 3
A	Silt content (%)	1.16	Table 3
S	Mean vehicle speed (mile/hr)	12.43	-
P	Number of days of precipitation per year(over 0.254 mm)	98	1)
N	Mean number of wheels	10	-
T	Construction equipment of activity factor	0.25	0.06~0.25
d	Number of days dry year (365-P)	267	1)
D	Period of preservation	10	-
f	Wind speed 12 mile/hr over continuous time	6.58	1)
U	Average wind speed (mile/hr)	8.46	1)
M	Moisture content (%)	1.05	measured value
Y	Loader capacity (yd ³)	0.92	0.7m ³

1) Atmospheric phenomena data, 2003, Busan.

Table 6. The amount of PM10 calculated from fugitive dust formula

	EF ₁	EF ₂	EF ₃	EF ₄	Total
Emission coefficient (EF ₁ ; kg/VKT, EF _{2~4} ; kg/ton)	0.0623	0.0100	0.0010	0.0076	-
Calculated amount (g/s)	1.0059	0.2422	0.1211	0.9202	2.2894

Table 7. The amount of PM₁₀ calculated from fugitive dust flux with friction velocities

Wind velocity (m/s)	Threshold velocity (U _t , m/s)	Friction velocity (U*, m/s)	Threshold friction velocity (U _t *, m/s)	Dust emission flux (F _a , g/m ² /s)	Amount of fugitive dust (g/s)
4.4	2.42	0.2548	0.2417	3.0339×10^{-7}	0.1235
5.8		0.3359		4.9981×10^{-6}	2.0353
7.7		0.4459		2.5345×10^{-5}	10.3207

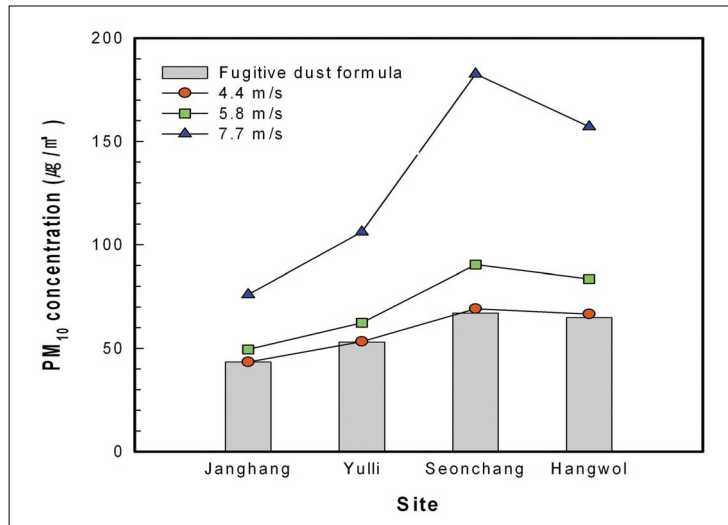
가까운 선창 지점의 농도가 보다 높은 것으로 보아 비산먼지는 풍속 외에 지역적 위치, 이격거리에 따라 큰 영향을 받는 것으로 조사되었다.

3. 비산먼지(PM₁₀) 발생량 산정

비산먼지 발생량은 연구대상지역 중 건조모래가 매립 중에 있는 site 1에 대하여 산정하였다. 우선, 세부 발생원별 발생량 산정이 가능한 fugitive dust 실험식에 표 5에 제시된 공사시 적정 계수를 적용하여 배출계수를 산정한 후 이를 이용하여 비산먼지 발생량을 산정하였으며, 이를 표 6에 나타내었다. 표 6에서 보는 바와 같이 비산먼지에 대한 기여도가 가장 높은 공종은 덤프트럭 운행에 의한 비산먼지

발생량으로 1.0059g/s로 산정되었다. 다음으로 작업장비(덤프트럭 제외)의 운행에 의한 발생량이 0.2422g/s, 바람에 의한 발생량은 0.1211g/s, 토공 물량의 상·하적시 발생량은 0.9202g/s로 비산먼지(PM₁₀) 총 발생량은 2.2894g/s로 산정되었으며, 바람에 의한 발생량은 0.1211g/s로 이에 대한 영향은 다른 발생량에 비하여 미미한 것으로 조사되었다.

표 7은 본 대상지역에서와 같이 바람의 영향이 큰 지역에 대한 비산먼지 피해 예상지역의 보다 정확한 예측을 위하여 마찰속도의 함수인 부유분진 플럭스(식 9)를 이용하여 풍속에 따른 비산먼지 발생량을 산정하였다.

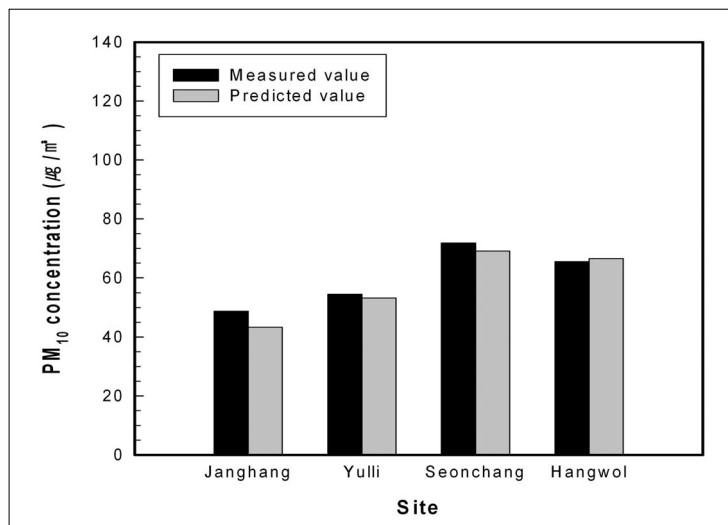
Fig. 2. Predicted values of PM₁₀ with wind velocities.

그 결과, 풍속이 4.4m/s일 때 0.1235g/s, 5.8m/s일 때 2.0353g/s, 7.7m/s일 때 10.3207g/s로 fugitive dust 실험식에 포함된 바람에 의한 발생량(EF₃) 0.1211g/s와 비교하여 풍속에 따라 1.02~85.22배 높게 산정되는 것으로 나타났다. 한편, fugitive dust 실험식 EF₃ 대신 부유분진 플렉스를 이용한 풍속에 따른 발생량을 적용하여 총 발생량을 산정한 결과, 풍속이 4.4m/s일 때 2.2918g/s, 5.8m/s일 때 4.2036g/s, 7.7m/s일 때 12.4890g/s이며, 이를 ISCST3 모델을

이용하여 예측치를 구하여 실측치와 비교·분석함으로써 바람의 영향이 큰 본 대상지역에서의 부유분진 플렉스의 적용 가능성을 파악하였다.

4. ISCST3 model 분석결과

Fugitive dust 실험식을 이용하여 산정한 비산면지 총 발생량 2.2894g/s와 fugitive dust 실험식에서 바람에 의한 발생량 대신 부유분진 플렉스를 이용하여 풍속에 따른 영향(4.4, 5.8, 7.7 m/s)을 적용

Fig. 3. A comparison between measured values and predicted values of PM₁₀ when wind velocity of 4.4 m/s.

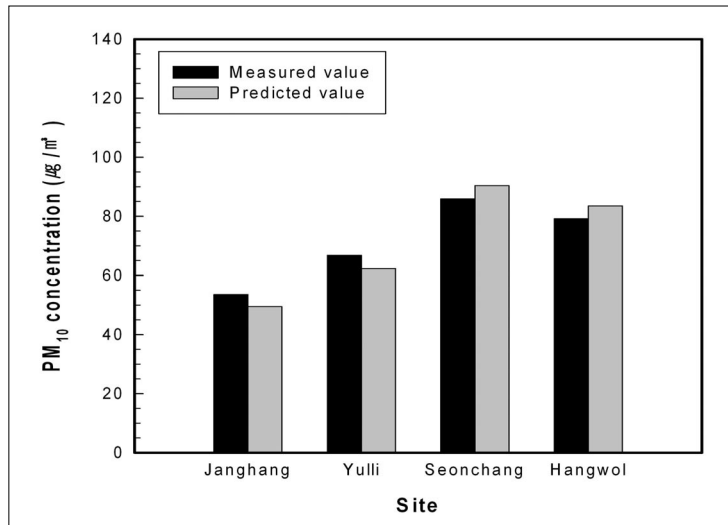


Fig. 4. A comparison between measured values and predicted values of PM_{10} when wind velocity of 5.8 m/s.

하여 산정한 비산먼지 총 발생량(2,2918, 4,2036, 12,4890 g/s)을 각각 ISCST3 모델을 이용하여 피해영향 예상지점별 비산먼지 증가량을 예측하였다. 그리고, 비산먼지 증가량은 IV. 2절에서 선정한 각 지점별 배경농도와 합하여 예측치를 구하였으며, 이를 현장 조사시 실측치와 비교·분석하여 그림 2~5에 나타내었다.

그림 2는 fugitive dust 실험식에 의한 예측치를 기준으로 풍속에 따른 예측치를 비교하여 나타낸 것

이다. 그림에서 보는 바와 같이 fugitive dust 실험식만 이용할 경우 지점별 PM_{10} 예측치는 43.4~67.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 4.4m/s일 때의 부유분진 플럭스를 적용할 경우의 지점별 PM_{10} 예측치 43.3~69.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 비슷하게 예측되었다. 그러나, 풍속이 5.8, 7.7m/s로 증가함에 따라 지점별 PM_{10} 예측치는 각각 49.5~90.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 76.0~182.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 크게 증가하였다. 따라서, 바람의 영향이 큰 지역에서는 fugitive dust 실험식만을 이용시 풍속의 세기에 따른 영향을 고려

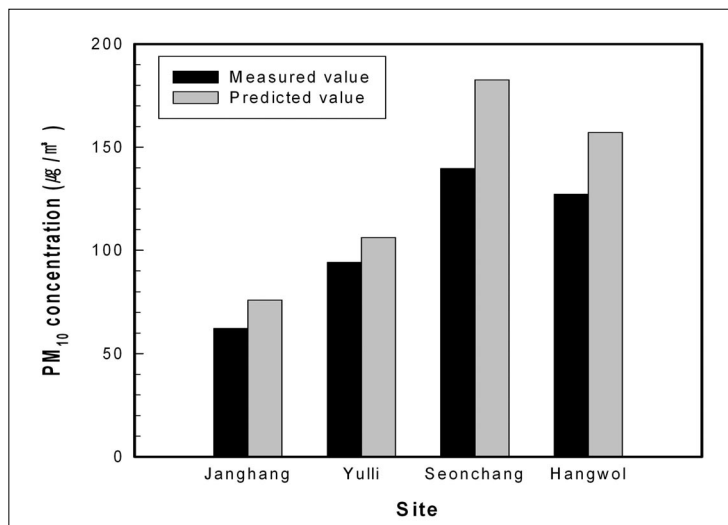


Fig. 5. A comparison between measured values and predicted values of PM_{10} when wind velocity of 7.7 m/s.

할 수 없으므로 풍속의 세기를 고려한 부유분진 플렉스를 적용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

그림 3~5는 풍속에 따른 실측치와 예측치를 비교하여 나타낸 것으로 그림 3에서 4.4m/s일 때, 지점별 실측치는 48.8~71.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 예측치는 43.3~69.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 그림 4에서 5.8m/s일 때, 지점별 실측치는 53.6~85.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 예측치는 49.5~90.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 풍속에 따른 실측치와 예측치가 비슷한 것으로 나타나 부유분진 플렉스를 적용함으로써 풍속에 따른 보다 정확한 예측이 가능하였다. 그림 7은 7.7m/s일 때를 나타낸 것으로 지점별 실측치는 62.2~139.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 예측치는 76.0~182.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 풍속이 커짐에 따라 실측치와 예측치의 차이도 커지는 것으로 나타났으며, 특히 비교적 이격거리가 큰 선창과 항월의 차이가 큰 것으로 조사되었다.

전체적으로 본 연구대상지역에서와 같이 평균 풍속이 4.4m/s일 경우 fugitive dust 실험식만을 이용하여도 비교적 정확한 예측치를 얻을 수 있으나, 이 보다 큰 풍속에서는 fugitive dust 실험식만으로는 정확한 예측을 할 수 없으므로 부유분진 플렉스를 이용한 풍속에 따른 영향을 적용하여 보다 정확한 예측을 수행함으로써 비산먼지 피해 예상지역에 대한 적절한 저감대책을 수립할 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결 론

해양에 위치하여 바람의 영향이 크고 매립이 진행되는 지역에서의 보다 정확한 예측을 위하여 fugitive dust 실험식에 부유분진 플렉스를 이용한 풍속에 따른 비산먼지 발생량을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Fugitive dust 실험식의 바람에 의한 비산먼지 발생량은 일률적으로 풍속 12 mile/hr 초과시간 빈도만을 고려하기 때문에 본 연구대상지역처럼 해양에 위치하여 일반기상과는 달리 풍속의 세기가 큰 날이 잦은 경우 정확한 예측이 어려움으로 풍속에

따른 영향을 고려한 예측이 필요하다.

2. 풍속의 세기에 따른 영향을 고려하기 위하여 마찰속도 함수인 부유분진 플렉스를 적용하였으며, 그 결과 fugitive dust 실험식만을 이용할 경우 지점별 PM_{10} 예측치는 43.4~67.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 한정적인 예측치를 얻은 반면, 부유분진 플렉스를 이용할 경우 지점별 PM_{10} 예측치는 4.4, 5.8, 7.7m/s일 때 각각 43.3~69.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 49.5~90.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 76.0~182.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 풍속의 세기에 따라 예측치를 얻을 수 있었으며, 이 예측치들은 각 풍속에 따른 실측치와 비슷하므로 보다 정확한 예측이 가능하였다.

3. 본 연구대상지역에서 평균 풍속이 4.4m/s일 경우 fugitive dust 실험식만을 이용하여도 비교적 정확한 예측치를 얻을 수 있으나, 이 보다 큰 풍속에서는 fugitive dust 실험식만으로는 정확한 예측을 할 수 없으므로 부유분진 플렉스를 이용한 풍속에 따른 영향을 적용함으로써 보다 정확한 예측이 가능할 것으로 판단되며, 따라서 비산먼지 피해 예상지역에 대한 적절한 저감대책을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 논문은 (주)한가람 학술연구용역비에 의하여 연구되었습니다. 연구비를 지원해 주신 (주)한가람에 감사드립니다.

참고문헌

- 김인수, 장영기, 2000, MECHANICAL과 Fugitive Dust Model을 이용한 비포장도로에서의 비산먼지 발생량 산정 및 주변영향 평가, 환경영향평가학회지, 9(4), 257-269.
- 이내현, 김윤신, 2000, 대규모 공사시 비산먼지 산정 및 확산분석에 관한 연구, 환경영향평가학회지, 9(3), 249-255.
- 장영기, 1995, 국내 대기오염모델링의 현황과 과제, 한국대기보전학회지, 11(1), 1-14.
- 정관영, 박순웅, 1998, 황사의 크기 및 침착량에 대

- 한 수치 모의, 한국대기보전학회지, 14(3), 191-208.
- Brandt, J., Basyrup-Birk, A., Christensen, J. H., Mikkelsen, T., Thykier-Niesen, S. and Zlatev, Z., 1988, Testing the importance of accurate meteorological input field and parameterizations in atmospheric transport modelling using dream-validation against ETEX-1, Atmos. Environ., 32(24), 4167-4186.
- Chang, Y. S., Arndt, R. L. and Cammichael, G. R., 1996, Mineral base-cation deposition in Asia, Atmos. Environ., 30, 2417-2427.
- Fugitive dust control technology, 1983.
- Gillette, D. A. and Passi, R., 1988, Modeling dust emission caused by wind erosion, J. Geophys. Res., 93(14), 233-242.
- Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J. M., Holben, B., Dubovik, O. and Lin, S. -J., 2001, Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model, J. Geophys. Res., 106(20), 255-273.
- Lee, H. N., 1997, Improvement of surface flux calculations in the atmospheric surface layer, J. Appl. Meteorol., 36, 1416-1423.
- Lee, H. N., Tanaka, T., Chiba, M. and Igarashi, Y., 2003, Long range transport of asian dust from dust storms and its impact on Japan, Water, Air, and Soil Pollution, 3, 231-243.
- Louis, J.-F., 1979, A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, Bound. Layer Meteor., 17, 187-202.
- Orlemann, J. A., 1983, Fugitive dust control technology, Park Ridge, N.J., USA.
- UCAR, 2003, Forecasting dust storms, University Corporation for Atmospheric Research.
- U.S Environmental Protection Agency, 1995, (ISC3)Dispersion model user's guide, EPA-45/B-95-003b, 12-35.