

매립공사 시 비산먼지 발생량 및 AERMOD를 이용한 영향예측에 관한 연구

윤배근 · 서종범 · 김영식 · 최원준* · 김윤수** · 오광중†

부산대학교 사회환경시스템공학과, *한국에너지기술연구원 온실가스연구센터, **코오롱건설
(2009. 5. 14. 접수/2009. 5. 28. 수정/2009. 6. 29. 채택)

A Study of the Amount of Fugitive Dust Generated from New Harbor Construction Site and the Prediction of Effect using AERMOD

Bae-Geun Yoon · Jong-Beom Seo · Young-Seek Kim · Won-Joon Choi* ·
Yun-Su Kim** · Kwang-Joong Oh†

Department of Environmental Engineering, Pusan National University

*Greenhouse Gas Research Center, Korea Institute of Energy Research

**Kolon Engineering & Construction

(Received May 14, 2009/Revised May 28, 2009/Accepted June 29, 2009)

ABSTRACT

A new harbor as been constructing in Gadukdo. However, a lot of fugitive dust gas been often generated from construction site reclaiming sea sand, especially when the Northwester is blown strongly. It has resulted insome appeals of residents in Gadukdo. In this study, we estimated the amount of fugitive dust caused by new harbor construction using Fugitive dust formula. Also, the concentration of PM10 for recipient is predicted by AERMOD. The amount of fugitive dust is $26.56 \mu\text{g}/\text{sec}\cdot\text{m}^2$ and $11.84 \mu\text{g}/\text{sec}\cdot\text{m}^2$ respectively by the Fugitive dust formula. PM10 outlet concentration and the amount of fugitive dust increase according to wind velocity and directions. AERMOD is performed on the basis of weather data and the amount of fugitive dust generated with wind velocity. As a result of AERMOD, the PM10 concentration of Sunchang and Oinul are predicted over $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The PM10 concentration of Sunchang and Oinul are predicted over $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ when wind velocity of northwester in winter is over 11 m/s (Air Quality for Particulate Matter ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for 24 hours)). Also, the measured error between AERMOD and actual measurement is lower than 5%.

Keywords: Fugitive dust, Impact assessment, AERMOD, Reclamation, Sea sand

I. 서 론

대기환경보전법에 따르면 비산먼지(fugitive dust)는 “일정한 배출구 없이 대기 중에 직접 배출되는 먼지”로 정의되며, 연소과정에서 배출되는 먼지는 대부분 입경 $10 \mu\text{m}$ 이하의 미세입자인 반면 건설공사 배출먼지나 도로 또는 토양먼지와 같이 비교적 큰 입경의 토양입

자가 분쇄되면서 발생하는 비산먼지는 입경분포 중 입경 $10 \mu\text{m}$ 이상의 조대입자와 그 이하인 미세입자가 절반씩을 차지하는 비율을 보인다. 비산먼지와 관련된 환경문제로는 먼지 돔효과(dust dome effect), 가시악화, 진폐증 등의 호흡기 질환 유발과 설비의 열화 등이 있으나 비산먼지의 절반이 인체에 직접적인 위해성을 미치는 미적 사망자수(연간 인구집단 위해도)는 미세먼지(PM10)임에 주목할 필요가 있다. 수도권 대기환경 개선대책의 일환으로 수행된 대기오염물질의 관리 우선순위 산정연구에 의하면 대기오염물질별 이론치가 가장 높게 나타나 미세먼지가 관리의 필요성과 절실함을

†Corresponding author : Department of Environmental Engineering, Pusan National University
Tel: 82-51-510-2417, Fax: 82-51-583-0559
E-mail : kjoh@pusan.ac.kr

입증해 주고 있다.¹⁾

최근 국내에서는 재개발과 재건축, 대형건물의 신축 공사, 도로공사 등과 같은 주택가에 인접한 지역의 건설공사가 증가하고 있으며 이로 인해 건설소음, 건설진동, 비산 먼지에 대한 문제가 점차 크게 대두되고 있다. 이에 대한 심각성을 인식하여 각종 대책을 수립하고 있지만 아직까지 효율적인 대책마련은 어려운 실정이다. 특히 비산먼지의 경우 비산먼지 발생사업장에 대한 관리를 실시하고 있으나 신고 위주의 관리 방식과 비효율적인 대책으로 인해 규제의 효율성이 많이 저감되고 있어 보다 적극적인 대책이 요구되고 있다.²⁾

이처럼 건설사업장에서 발생하는 비산먼지는 주변 생활환경 및 작물 등에도 적지 않은 피해를 주고 있으며, 특히 공사현장 주변에서는 비산먼지로 인한 피해가 민원으로 많이 접수되고 있는 실정이다.

배후 수송체계와 연계된 충분한 항만시설을 확보하고, 선박의 대형화에 따른 해운환경변화에 능동적으로 대처하고자 동북아 국제 물류거점 항만을 구축하기 위해 진해시 용원동, 안골동, 계덕동, 웅동만 일원과 부산시 강서구 가덕도 일원을 중심으로 해사를 매립 재료로 한 신항만 건설 사업이 이루어지고 있으며, 이에 따른 가덕도 인근에 부두시설 축조공사를 시행하고 있다.

본 부산신항 민간투자시설사업 2·2단계 부두시설 축조공사는 이미 부두시설 건설을 위한 매립공사는 끝난 상태이나 신항만 건설에 따른 부대시설 부지확보를 위한 매립공사를 가덕도 일원에 실시함에 따라 추계 및 동절기에 계절풍에 의한 모래 비산으로 인하여 가덕도 일원 주민들에게 피해를 줄 우려가 있다.³⁾ 따라서 본 연구에서는 비산먼지로 인한 피해예상지역인 가덕도 주변에 모래비산에 대한 영향과 재하성토용 바다모래 특성 등의 기초자료를 조사한 후, 유출계수를 산정하여 사업시행으로 인한 비산먼지(PM-10) 발생량 산정에 적용하고자 한다. 이를 위하여 연구에서는 자동기상관측장비(Automatic Weather System)를 연구대상지역에 설치하여 운용함으로써 국지기상자료를 확보하고 있으며, 이를 고도에 따른 연기확산계수 및 풍속의 변화를 대기경계층 상사이론을 이용하여 계산해 확산모델에 반영하도록 개정된 3D 모델인 AERMOD 에 적용시켜서 지역 특성을 최대한 고려하였다. 이를 통해 공사 시에 비산먼지가 풍속 및 계절에 따라 인근 주민에게 어느 지역까지 얼마만큼의 피해를 주는지를 예측하며 이를 유출계수를 통하여 산정된 발생량과 비교·분석함으로써 바람의 영향이 큰 지역에 대한 비산먼지 피해 예상 지역의 보다 정확한 예측이 가능할 것으로 기대된다.

II. 이론적 고찰

1. AERMOD(AMS[The American Meteorological Society]/EPA Regulatory Model)의 특징

AERMOD 모델링 시스템은 크게 기상적 시스템인 AERMET과 지형시스템인 AERMAP으로 구분된다. AERMET은 AERMOD에 의해 사용하기 위하여 마찰속도, Monin-obukhov length, 대류속도영역, 온도영역, 대류범위의 범주를 갖는 높이, 안정도높이 그리고 표면 열의 흐름을 포함하는 시간적 범위의 범주를 가지는 변수로서 계산되어진다. 또한 AERMET는 조사를 통해서 얻어진 모든 기상변수데이터를 AERMOD로 전송한다. 여기에는 풍향, 풍속 그리고 기온이 포함되어 지며 다음과 같은 특징을 가진다.

- 대류의 흐름을 보이는 때와 안정을 보이는 범주의 분산을 동시에 modeling 할 수 있다.
- 오염물질의 상승 또는 부력을 가졌을 경우에 대한 modeling이 가능하다.
- 높은 곳으로의 전도력을 보이는 물질에 대한 modeling도 가능하다.
- 높은 곳 또는 표면근처, 그리고 표면에서의 sources에 대한 고려가 가능하다.
- 바람, 대기의 흐름(turbulence) 그리고 온도의 수직적 계산이 가능하다.
- 지표에서부터 오염물질이 이동하는 높이 이상의 모든 지형에 대한 연속적인 수용이 가능하다.

2. 비산먼지 발생량 산정

매립 해사를 이용한 본 대상지역의 경우 동절기에 부는 강한 북서풍에 의해 해사가 비산될 우려가 있으므로 풍속에 따른 발생량을 경험식들을 이용하여 비산먼지 발생량을 산정할 수 있으며 풍속에 따른 비산먼지 발생량 산정 방법은 Fig. 1에 나타나 있다.

바람이 건조한 토양에 응력을 가하면 토양입자가 공기 중으로 부유하게 되며, 이 때 토양입자가 부유하기 시작하는 풍속을 임계속도(u_t)라 하며, 먼지 배출 flux는 10m 높이에서의 풍속인 U_{10} 와 이론적 평균 임계속도인 6.5 m/s를 기준으로 임계속도를 계산하게 된다. 해사를 부유시키는 입구 바람속도의 결정에 있어서 임계속도는 매우 중요한 인자이며, 식 (1)은 Gillete dust 경험식을 근거로 하여 임계속도를 구하게 된다. 임계속도는 수분량(W_s)에 따라 계산방법이 달라지며, 수분량이 0.5보다 클 경우에 비산되는 모래는 없는 것으로 가정하여 계산하게 된다.⁴⁾

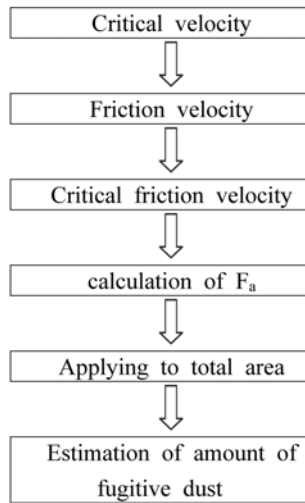


Fig. 1. Procedure of PM10 amount calculation with wind velocity.

$$u_t = \begin{cases} 6.5 \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho_a)}{\rho_a}} g \Phi_p (1.2 + 0.2 \log_{10} \omega_s) & \text{for } \omega_s \leq 0.5 \\ \alpha & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

매립지의 배출계수를 계산하기 위해서는 같은 풍속이라 할지라도 대기의 안정도에 따라 비산 입자가 받는 응력에 따라 달라지는 마찰속도(U^*)는 지표층 상사 이론으로부터 추정될 수 있으며, EPA 공식인 식 (3)에 적용하여 구할 수 있다.^{5,6)}

$$U^* = AU_{10} \quad (2)$$

따라서,

$$A = K / \ln(Z_g / Z_0) \quad (3)$$

임계마찰속도는 Louis's(1979) 이론을 변형한 Lee (1997)을 토대로 하여 관측고도 10 m일 때 식 (1)에서 산출한 임계속도를 식 (4)에 적용하여 산정하게 된다. 임계마찰계수는 마찰속도와 비교하여 부유분진 플럭스 추정 시 사용되는 식 (4)와 (5)의 적용 여부를 결정하는데 이용되어진다.^{7,8)}

$$U_t^* = C_a^{0.5} \times u_t \quad (4)$$

따라서,

$$C_a = (0.23 / \ln Z_s)^2 \quad (5)$$

부유분진의 플럭스는 마찰속도의 함수로서 Gillette

(1980)의 방법에 따라 추정하게 되며 분진의 플럭스(F_a , $gcm^{-2}s^{-1}$)는 식 (6)와 (7)에 적용하여 계산하게 되며, 도출된 부유분진 플럭스와 전체 사업면적과의 곱으로써 미세먼지 발생량을 산정하게 된다.^{9,10)}

$$F_a = 10-14U^*4 \quad \text{if } U^* \geq U^*t \quad (6)$$

$$F_a = 0 \quad \text{if } U^* < U^*t \quad (7)$$

III. 연구범위 및 방법

1. 연구 대상지역

국제 경쟁력을 보유한 중추 항만으로서의 역할을 수행하고, 항만과 도시 기능의 조화에 따른 종합 항만으로서의 위상을 높이며, 아울러 2000년대 항만 물동량의 원활한 처리를 위해 항만시설을 확충하여 세계 해운의 주항로에 인접한 부산 가덕도 일원과 진해시 용원동, 안골동, 재덕동 일원을 동북아 국제 물류 중심항만으로 육성하고자 신항만 건설 사업이 진행되고 있다. 본 연구 대상 지역의 위치는 부산신항만 남컨테이너 부두 [2-2단계하부] 축조공사 예정지역으로 부산광역시 강서구 가덕도 북서측 해역 일원에 위치하고 있다. Fig. 2에서 나타난 바와 같이 발생원지점(A_1)을 기준으로 동남 및 동남동 방향에 위치하고 있는 (A_2)에서 (A_3)까지의 네 지점을 연구 대상 지역으로 선정하여 예측 및 현장 실측을 통해 계절풍으로 인한 영향을 살펴보고자 하였다. 매립지의 북서쪽 경계면(G_1)의 거리는 1130 m, 남서쪽 경계면(G_2)의 거리는 650 m, 북동쪽 경계면(G_3)의 거리는 540 m로 조사되었으며, 계획구간의 총 면적은 앞서 나타난 바와 같이 637,000 m^2 으로 나타났다. 본 연구의 발생원지점으로부터 영향을 받을 수 있는 가덕도지역은 산악과 구릉지대로 이루어져 있어 지형의 영향을 크게 받는 것으로 판단되었다. 따라서 미국 EPA에서 권장하고 있는 모델 중 지형을 고려하여 산업단지, 발전소, 소각시설과 같은 복합오염원과 점오염원에 대한 대기오염농도를 예측할 수 있는 대기확산모델인 AERMOD 모델을 이용하였다.

2. 대기질 측정장치 및 방법

PM10 측정 시 미니볼륨에어 샘플러법을 사용하였다. 측정은 Mini Volume Air Sampler(미국 Air Metreecs사 제품)를 사용하였으며, 흡인유속은 7.0 l/min으로 조정하여 47 mm Quartz Fiber filter에 24시간 동안 PM10 시료를 흡인 포집하였다. 이 포집장치는 진공도가 높고 유량이 크며, 운반이 용이하고 맥동이 없이 고르게 작동하는 것이 특징이다. 측정방법은 대

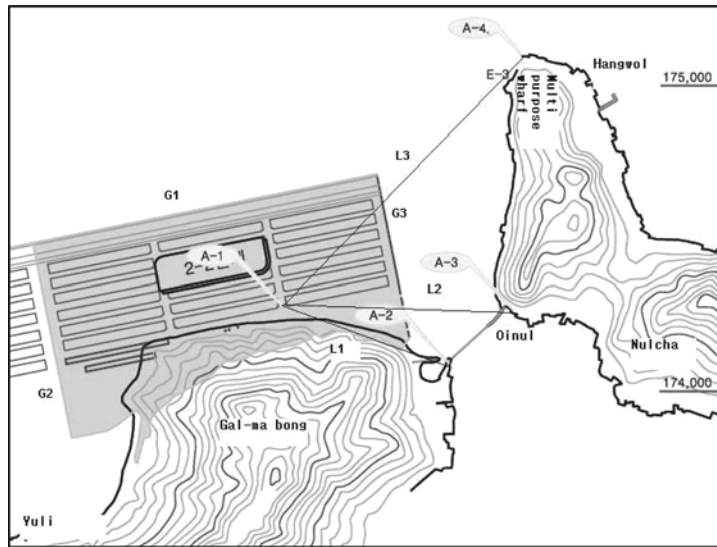


Fig. 2. The studied area.

Table 1. Sampling site

| Point | Site |
|-------|----------------|
| A-1 | Reclaimed land |
| A-2 | Sunchang |
| A-3 | Oinul |
| A-4 | Hangwol |
| A-5 | Yuli |

기 중 부유하고 있는 입자상 물질을 미니볼륨에어 샘플러를 이용하여 10 μm 이하의 질량농도를 측정하는 방법이다.

3. 측정항목

비산먼지에 의한 피해를 조사하기 위해 환경기준 설정항목 중 PM10에 대해서 조사하였고, 현재 국내 PM10 환경기준은 대기환경보전법에 따라 연간평균치는 50 μg/m³ 이하이고 24시간 평균치는 100 μg/m³ 이하이다.

4. 측정일자 및 지역

측정일자는 2007년 9월 10일부터 2008년 11월 30일 사이이며 Table 1과 같이 사업시행으로 인해 피해가 예상되는 사업지역인 신항만 매립지와 주변 지역인 선창 선착장과 외놀이마을 지역을 포함한 총 4개 지역을 선정하여 조사를 실시하였다. Fig. 2과 같이 (A-1) 매립지지점, (A-2) 선창, (A-3) 외놀이, (A-4) 항월, (A-5) 울리지역이 나타나 있으며 (A-1) 매립지지점에서 (A-2)

선창마을까지의 거리(L-1)는 600 m이며, (A-3)외놀이까지의 거리(L-2)는 800 m, 그리고 (A-4) 항월까지의 거리(L-3)는 1000 m로 나타났다.

5. 매립해사특성조사

1) 매립해사의 함수율 분석

함수율 측정은 토양공정시험법에 따라 측정하였으며 분석법은 다음과 같다. 평량병 또는 증발접시를 미리 105~110°C에서 1시간 건조시킨 다음 데시케이터 안에서 방냉하였다. 그리고 이 증발접시의 무게를 정확히 측정한 후(W1) 여기에 시료 적당량을 취하여 평량병 또는 증발접시와 시료의 무게(W2)를 정확히 달았다. 그리고 수욕상에서 수분을 거의 날려 보낸 후 105~110°C의 건조기 안에서 4시간 건조 시 후무게(W3)를 정확히 달고 아래의 식을 이용하여 계산하였으며 그 결과 함수율은 1%였다.

$$\text{함수율}(\%) = (W_2 - W_3) / (W_2 - W_1) \times 100 \quad (8)$$

2) 매립해사의 입자밀도 분석

매립해사의 밀도 측정은 입자밀도(particle density)와 용적밀도(bulk density)로 나눌 수 있으며 측정방법은 다음과 같다. 우선 토양시료의 입자밀도는 graduated cylinder법으로부터 얻었는데 시료의 진부피는 물과 시료를 1:1로 혼합하여 일정시간이 경과 후 시료의 부피를 측정하였으며 시료의 무게는 용기무게를 감한 시료의 무게(g)로 구하였다.

$$\text{입자밀도(kg/m}^3\text{)} : S_a(\text{kg/m}^3) = \frac{(W' - W_v)}{V} \quad (9)$$

여기서 W' = 시료 + 용기무게(g)
 W_v = 용기의 무게(g)
 V = 시료의 진 부피(ml)

토양시료의 용적밀도는 원통(V)에 다짐을 실시한 후에 시료를 완전히 포화시킨 후의 무게(S_{w1})와 건조시킨 후의 무게(S_{w2})차를 이용하여 구하였다.

$$\text{용적밀도(kg/m}^3\text{)} : \rho_b = \frac{S_{w1} - S_{w2}}{V} \quad (10)$$

여기서 S_{w1} = 완전 포화시킨 후의 무게
 S_{w2} = 건조시킨 후의 무게
 V = 원통부피

매립해사의 입자의 밀도는 2.60 g/cm^3 , 용적밀도는 1.02 g/cm^3 로 조사되었다. 다음으로 매립해사에 포함되어 있는 일반모래입자와 해사중의 패류껍질을 분류하여 입자의 밀도와 용적밀도를 구하였으며 그 결과 일반모래의 입자밀도는 2.66 g/cm^3 , 용적밀도 1.02 g/cm^3 으로 나타났으며 매립해사 중 약 94.7%의 구성 비율을 나타냈다. 패류껍질의 입자밀도는 1.35 g/cm^3 , 용적밀도 0.63 g/cm^3 으로 나타났으며 매립해사 중 약

5.3%의 구성 비율을 나타내었다. 이 결과에 나타난 바와 같이 일반모래에 비해 패류껍질이 포함되어 있는 매립해사의 밀도가 더 낮게 나타남으로써 바람에 의한 매립해사 비산면지의 발생량이 더 증가할 것으로 판단된다.

3) 매립해사와 일반토양의 비교

비산입자의 형성모양 및 표면특성 분석을 위해서 피해예상지역인 선창, 항월 지역의 여지를 분석하여 이포집된 입자의 비교를 위해 매립지의 비산입자 그리고, 일반 토양의 입자를 비교하였다. Fig. 3에서 매립지 및 피해예상지역인 선창과 항월, 그리고 외늘지역의 비산모래입자와 일반 토양입자의 SEM Photograph를 나타내었다. 이중 (a) 매립지와 (b) 선창 그리고 (c) 외늘에서의 입자는 대부분이 그림과 같은 침사형의 모래입자를 가지는 것으로 조사되었다. 하지만 (d) 항월에서의 입자 분석결과 표면이 (d) 일반모래의 입자와 유사한 형태를 가지는 것으로 조사되었다.

이 조사를 통해서 피해지역인 선창 및 외늘지역은 현재 매립공사가 진행 중인 매립지의 모래의 입자와 유사한 것으로 판단되나 항월지역의 경우 대부분 매립공사에 의한 영향이기는 하나 일부 흙과 비슷한 형태의 입자가 분석된 것으로 보아 이는 인근 지역의 공사면지의 영향인 것으로 조사되었다.

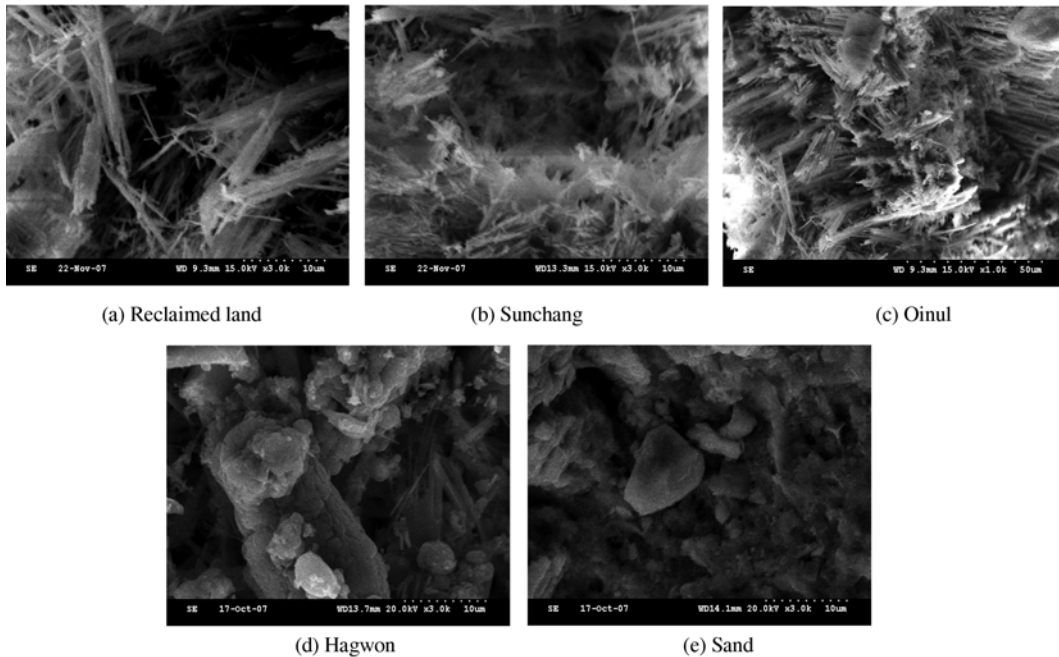


Fig. 3. The result of SEM comparing common sand and sea sand on filter following sampling site.

IV. 결과 및 고찰

1. 비산먼지 발생량 산정 결과

본 대상 지역의 경우, 겨울철 강한 북서풍에 의해 해사가 비산되어 주변지역에 영향을 줄 수 있으므로 여러 경험식들을 토대로 풍속(11 m/s, 9 m/s, 7 m/s, 5 m/s, 3 m/s)에 따른 발생량을 산정하여 AERMOD를 통한 가덕도 인근 지역의 비산먼지 농도 예측하였다.

임계속도는 식 (1)을 이용하여 계산하게 되며, 매립공사 시 사용된 해사의 밀도(ρ)는 2.65 g/cm^3 , 수분량(w_s)은 1%, 입자 직경(ϕ_p)은 10 cm, 공기의 밀도(a)는 0.0012 g/cm^3 , 중력가속도 980 cm/s^2 를 적용하여 계산한 임계속도는 2.4 m/s로 나타났다.

본 연구 대상 지역의 매립 해사의 경우 미국 농무성 범위에 따른 토성 구분에서 전형적인 모래질 토성을 나타내고 있으므로, Table 2에 나타난 바와 같이 지표면의 거칠기(Z_0)는 모래가 많은 사막 지역과 비슷하다고 가정하여 10 cm로 가정하였다. 또한 관측 고도의 높이(Z_s) 10 m이므로 1000 cm이며, Karman 상수인 K 는 0.4의 값을 대입하여 거칠기 높이(A)를 구했으며, 식

(2)를 이용하여 높이 10 m에서의 각각의 풍속(u_{10})과 거칠기 높이(A)를 각각 곱하여 구한 마찰속도는 Table 3에 나타난 바와 같이 26.04~95.48 cm/s였으며, 풍속이 증가함에 따라 마찰속도도 증가하는 것으로 나타났다. 관측 높이 10 m에서 구한 임계속도 2.4 m/s를 식 (3)에 적용하여 구한 임계마찰속도는 23.97 cm/s였으며, Table 4에서 보는 바와 같이 10 m 높이에서 각각의 풍속(u_{10})에 따른 마찰속도가 임계마찰속도보다 크게 나타나 식 (6)에 대입하여 산정한 부유분진 플럭스(F_a)는 $0.0003 \sim 0.0008 \text{ gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 였다.

본 연구 대상지역의 매립 해사 중 11.48%의 PM10을 포함하고 있으며 매립지에서 방진망 설치 지역 및 습윤 모래 지역은 비산되는 모래가 없다고 가정하여 두 지역을 제외하고, 건조모래 지역인 637,000에서 비산되는 해사 발생량만을 산정한 결과를 Table 5에서 나타내었다. 각 풍속에 따른 PM10 전체 배출량은 0.395~10.95 g/sec였으며, 풍속에 따른 비산먼지 원단위 발생량은 $0.97 \sim 26.89 \mu\text{g/sec} \cdot \text{m}^2$ 로 11 m/s에서 단위 면적당 가장 많은 비산 먼지가 발생하였다. 풍속이 증가함에 따라 PM10의 배출량은 증가하며 비산먼지 원단위 발생량은 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

Table 2. Value of roughness with topography⁶⁾

| Topography | Roughness | Reference |
|----------------------|-----------|--------------|
| Mountain | 1.5 m | |
| Field | 1.0 m | |
| Building (over 10 m) | 1.0 m | Witrak |
| Water | 0.001 m | |
| Green area | 0.1 m | |
| Desert | 0.1 m | Chung (1996) |

Table 3. Friction velocity with wind velocity in the height of 10 m

| u_{10} , m/s | Z_0 , cm | A, dimensionless | U^* , cm/s |
|----------------|------------|------------------|--------------|
| 11 | 10 | 0.0868 | 95.48 |
| 9 | 10 | 0.0868 | 78.12 |
| 7 | 10 | 0.0868 | 60.76 |
| 5 | 10 | 0.0868 | 43.40 |

Table 4. Friction velocity with wind velocity

| Wind velocity | Dust emission flux (F_a , $\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$) | Friction velocity (U^* , cm/s) | Amount of PM-10 (PM10 : 0.32%) | Concentration of fugitive dust ($\mu\text{g/sec}\cdot\text{m}^2$) |
|---------------|--|-----------------------------------|--------------------------------|---|
| 11 m/s | 0.0083 | 95.48 | 16.92 g/sec | 26.56 |
| 9 m/s | 0.0037 | 78.12 | 7.54 g/sec | 11.84 |
| 7 m/s | 0.0013 | 60.76 | 2.64 g/sec | 4.14 |
| 5 m/s | 0.0003 | 43.4 | 0.61 g/sec | 0.94 |

2. AERMOD를 통한 대상 연구지역 영향 예측 결과

현재 배출량을 적용하여 예측영역의 미세먼지 농도를 예측하였다. 각각의 공사 전 현황농도는 부산신항개발사업 환경영향평가서의 결과를 따른다. 비산 방지망 및 스프링클러에 의한 발생량 저감율은 0.7로 설정하였다. 이는 본 연구의 배출량 산정 시 비산 방지망으로 인한 농도가 고려되지 않았기 때문에 저감율에 대한 factor를 적용하였다.

예측영역내의 미세먼지 농도 등농도 분포를 풍속이 가장 높게 나타났던 2008년 1월을 기준으로 하여 11 m/s, 9 m/s의 경우에 따라 각각의 케이스에 따른 발생량을 중심으로 나타내었으며 배출량이 많은 발생원을 중심으로 고농도가 나타났으며, 대상지역 내 지형에 따른 농도의 변화도 매우 크게 나타났다.

Table 5는 1월의 풍속 11 m/s 대한 발생량에 따른

대기질 측정지점의 평균 농도를 나타낸 것으로써 전반적으로 풍속에 따른 발생량이 감소함에 따라 미세먼지 농도도 감소하는 것으로 나타났다. 선창(A-2)과 외늬(A-3)의 경우 발생 예측량은 각각 134.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 111.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 실제 측정된 발생량에 비하여 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 항월(A-4)의 경우 82.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 발생 예측량이 나타났으며 울리(A-5)의 경우에는 74.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 발생 예측량이 나타났다. 항월에 비해 매립지와 울리의 이격거리가 약 160 m 정도 더 크게 나타났음에도 불구하고 발생 예측량 크게 차이가 나타나지 않는 이유는 항월에 비해 울리와 매립지 사이에는 확산을 저해하는 지형적인 요소가 적기 때문으로 판단된다.

1월의 조건에 따른 미세먼지 농도 변화량의 등농도곡선을 Fig. 4에 나타내었다. 풍속에 따른 발생 예측량에 대한 가덕도 지역의 영향을 살펴보기 위하여 대상지역의 지형에 대하여 등농도 곡선을 나타내었다. 선창마을의 경우 대부분의 지역이 환경기준인 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 것으로 나타났으며 일부 지역은 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 것으로 나타났다. 외늬지역의 경우 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 은 포함되지 않으나 공사지역과 인접한 몇 개의 가구가 대기환경기준치인 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 것으로 나타났다.

1월의 조건에 따른 농도 예측 결과를 보면, 풍속에 따른 예측 배출량이 감소함에 따라 예측 농도도 감소

Table 5. Estimation of PM10 using AERMOD following 11 m/s in January

| Wind velocity | Average concentration of fugitive dust ($\mu\text{g}/\text{sec}\cdot\text{m}^2$) | Reduction efficiency by sprinkler and dustproof curtain (%) | Average emission concentration of fugitive dust ($\mu\text{g}/\text{sec}\cdot\text{m}^2$) |
|---------------|--|---|---|
| 11 m/s | 26.56 | 70 | 7.97 |

| Point | Distance (m) | Concentration before construction ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Weighted concentration before construction ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Predicted concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Measured concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|-------|--------------|--|---|--|---|
| A-1 | 0 | 0 | - | - | 278.0 |
| A-2 | 600 | 37 | 97.3 | 134.3 | 129.2 |
| A-3 | 800 | 37 | 74.7 | 111.7 | 111.7 |
| A-4 | 1000 | 34 | 48.8 | 82.8 | - |
| A-5 | 1160 | 34 | 40.3 | 74.3 | - |

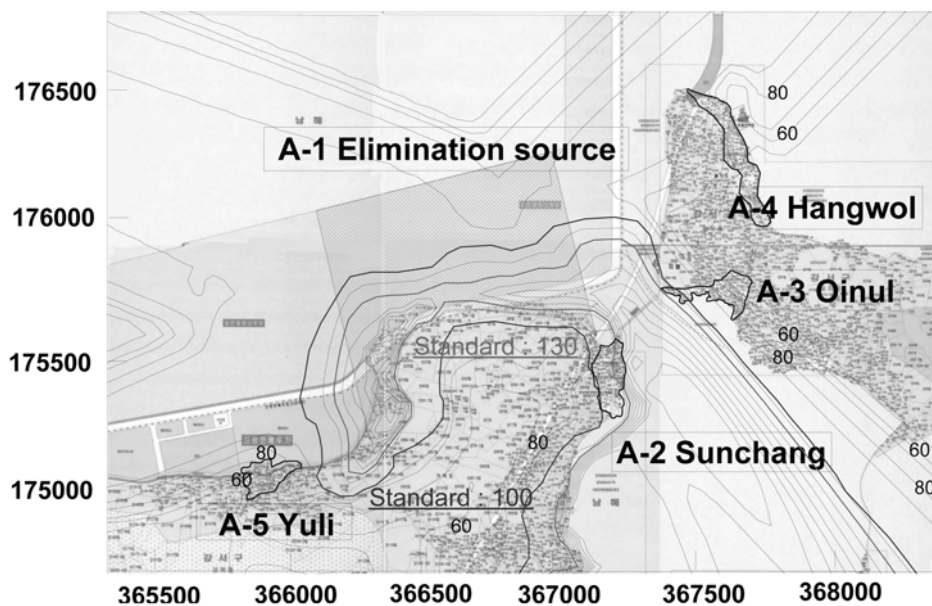


Fig. 4. The result of AERMOD following 11 m/s in January.

하기는 하나, 지역에 따라 동일한 비율로 감소하지는 않는다. Table 6은 9 m/s의 풍속 시 대기질 영향 예측을 나타낸 것으로써 각 지점에 따른 예측 농도는 풍속 9 m/s일 때 선창 121.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 외늘 104.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 11 m/s 풍속에 비해 선창 약 10%, 외늘 7%가 감소되었다. 이러한 감소량은 풍속에 따른 배출량과 관계가 있다.

11 m/s의 풍속에 대한 발생량에 비하여 평균 풍속 및 최대풍속이 적기 때문에 발생량 예측 결과는 감소하였으며 항월의 발생 예측량이 울리의 예측량에 비하여 크게 차이가 없는 것으로 나타났다. 이것은 1월의 풍향이

NNW와 NW의 값이 나타났기 때문이다.

풍속 9 m/s에 대한 발생량에 따른 각 지점의 농도를 살펴보면 선창은 24시간 미세먼지 배출기준인 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과할 것으로 판단되며 외늘의 경우도 일부 초과되는 지역이 포함되는 것으로 나타났다.

9 m/s의 풍속에 따른 발생 예측량을 나타낼 때 각각 선창 121.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 외늘 104.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 항월 78.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 울리 75.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 예측량을 나타냈다. 이 때 실제 측정농도는 매립지 203.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 외늘 65.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 울리 90.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타냈고, 예측량과 실제 측정농도와의 차이를 나타내는 이유는 토요일과 일요일에 걸친 측정일

Table 6. Estimation of PM10 using AERMOD following 9 m/s in January

| Wind velocity | Average concentration of fugitive dust ($\mu\text{g}/\text{sec}\cdot\text{m}^2$) | Reduction efficiency by sprinkler and dustproof curtain (%) | Average emission concentration of fugitive dust ($\mu\text{g}/\text{sec}\cdot\text{m}^2$) |
|---------------|--|---|---|
| 9 m/s | 11.84 | 70 | 3.55 |

| Point | Distance (m) | Concentration before construction ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Weighted concentration before construction ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Predicted concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Measured concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|-------|--------------|--|---|--|---|
| A-1 | 0 | 0 | - | - | 203.7 |
| A-2 | 600 | 37 | 84.1 | 121.1 | - |
| A-3 | 800 | 37 | 67.2 | 104.2 | 65.5 |
| A-4 | 1000 | 34 | 44.6 | 78.6 | - |
| A-5 | 1160 | 34 | 41.7 | 75.7 | 90.3 |

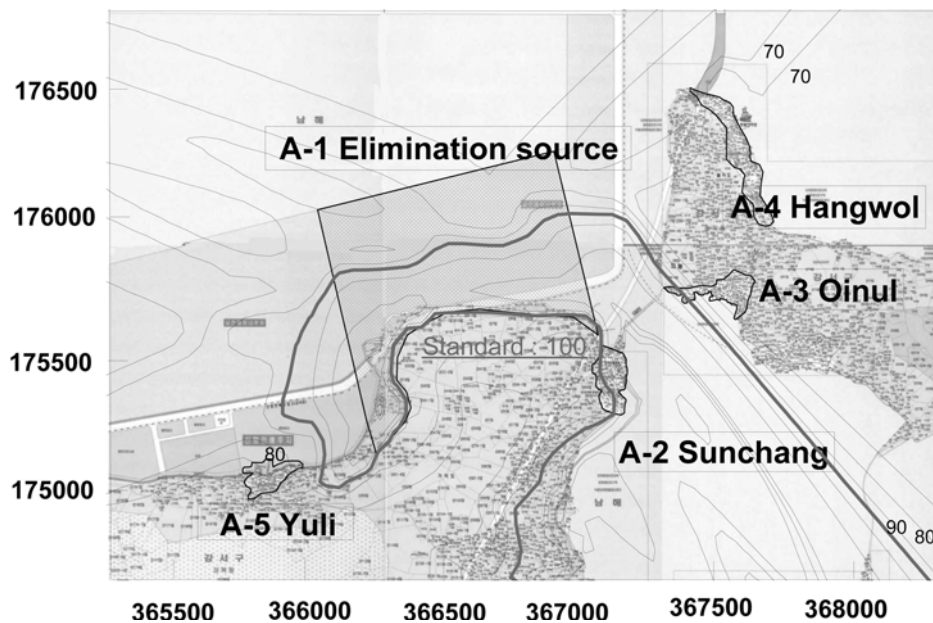


Fig. 5. The result of AERMOD following 9 m/s in January.

에 외놀의 발생량에 영향을 주는 것으로 예상되는 주변지역의 공사현장에서 공사를 하지 않고 있었기 때문으로 판단된다. 매립지 또한 공사가 진행되지 않았으며 공사 전 지점에 걸쳐 방진막이 설치되었기 때문으로 판단된다.

9 m/s의 풍속에 대한 발생량에 따른 미세먼지 농도 변화량의 등농도곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 풍속에 따른 발생 예측량에 대한 가덕도 지역의 영향을 살펴보기 위하여 대상지역의 지형에 대하여 등농도 곡선을 나타내었다. 모든 케이스가 예측 배출량에 따라 농도만 다르게 나타날 뿐, 수평 분포는 거의 동일하게 나타났다. 농도의 변화량은 매립지 인근에서 높게 나타났으며 매립지에 근접할수록 이격거리에 대한 매립지의 농도 변화량이 커짐을 볼 수 있다.

3. 연구대상지역에서의 현장 실측결과

Table 7에서 보는 바와 같이 실측값은 40.7~129.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며 각 측정 시 마다 비산먼지의 측정값이 큰 차이를 보이고 있는 것은 풍속에 비례하여 비산먼지 발생농도가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 측정지점별로 살펴보면 선창은 2007년 12월 3일에 가장 높은 농도인 129.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 보였으며 그때의 평균풍속은 5.8 m/s였으며 최대풍속은 10.1 m/s로 나타났다. 또한 당시의 풍향빈도는 WNW를 나타내었다.

외놀지역의 경우 대기질 조사결과 비산먼지의 농도는 47.6~118.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 11월 17일의 피해예측 농도가 118.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 값을 나타냈으며 주풍향은 NNW로 나타났다. 항월지역의 경우에는 2007년 11월 18일 측정결과 79.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 측정결과를 보였으며 매립지는 항월로부터 SSW, SW, WSW에 위치하고 있기 때문에 선창 지역이나 외놀지역과는 매립지가 영향을 미치는 풍향이 차이가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 6을 살펴보면 선창지역의 경우 11월 17일의 풍향별 평균풍속은 가장 높은 빈도를 보이는 NNW에 집중되어 있는 것을 알 수 있으나 12월 3일의 경우를 살펴보면 풍향빈도는 WNW이 가장 높은 빈도를 보이고 있었으며, 풍향별 평균풍속을 살펴보면 오히려 NNW에서 더 높은 풍속을 보이고 있다. 따라서 12월 3일은 NNW의 영향이 더 큰 것으로 판단된다. 외놀지역의 경우 주풍향이 NNW로 나타난 11월 1일, 17일 그리고 NW로 나타난 11월 18일의 풍향별 평균풍속 또한 주풍향이 높은 값을 나타내고 있기 때문에 측정일에 가장 영향을 미친 것은 NNW로 판단된다. 11월 17일과 18일을 비교했을 때 평균풍속은 3.64 m/s와 3.44 m/s로

Table 7. Variation of PM10 concentration with wind velocities and directions

| Site | Sampling date | Wind direction | Concentrations | |
|----------------|---------------|----------------|----------------------------------|------------------------------------|
| | | | TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | PM-10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
| Reclaimed land | 07.09.10 | WNW | 177.1 | - |
| | 07.10.16 | WNW | 162.1 | - |
| | 07.11.01 | NNW | 166.4 | - |
| | 07.11.17 | NNW | 283.1 | - |
| | 07.11.18 | NW | 196.8 | - |
| | 07.12.03 | WNW | 278.0 | - |
| | 08.01.16 | W | 192.1 | - |
| | 08.02.23 | WNW | 203.7 | - |
| | 08.02.24 | N | 214.2 | - |
| | 08.03.17 | N | 208.1 | - |
| Sunchang | 07.09.10 | WNW | - | 42.7 |
| | 07.10.16 | WNW | - | 40.7 |
| | 07.11.01 | NNW | - | 41.9 |
| | 07.11.17 | NNW | - | 129.0 |
| | 07.11.18 | NW | - | - |
| | 07.12.03 | WNW | - | 129.2 |
| | 08.01.16 | W | - | 59.5 |
| | 08.02.23 | WNW | - | - |
| | 08.02.24 | N | - | - |
| | 08.03.17 | N | - | - |
| Oinul | 07.09.10 | WNW | - | 47.6 |
| | 07.10.16 | WNW | - | 46.6 |
| | 07.11.01 | NNW | - | 47.8 |
| | 07.11.17 | NNW | - | 118.8 |
| | 07.11.18 | NW | - | 99.2 |
| | 07.12.03 | WNW | - | 117.1 |
| | 08.01.16 | W | - | 89.3 |
| | 08.02.23 | WNW | - | 65.5 |
| | 08.02.24 | N | - | 62.5 |
| | 08.03.17 | N | - | 94.2 |
| Hangwol | 07.11.18 | NW | - | 79.4 |
| | 08.02.23 | WNW | - | 90.3 |
| Yuli | 08.02.24 | N | - | 95.2 |
| | 08.03.17 | N | - | 85.3 |

그 차이가 크지 않은 것으로 나타났으나 최대풍속이 10.1 m/s와 6.8 m/s로 큰 차이를 보였기 때문에 측정농도도 118.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 99.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 마찬가지로 차이가 크게 나타났다. 따라서 피해예측지역의 농도는 평균풍속뿐만 아니라 최대풍속의 영향도 고려해야 할 것으로 판단된다.

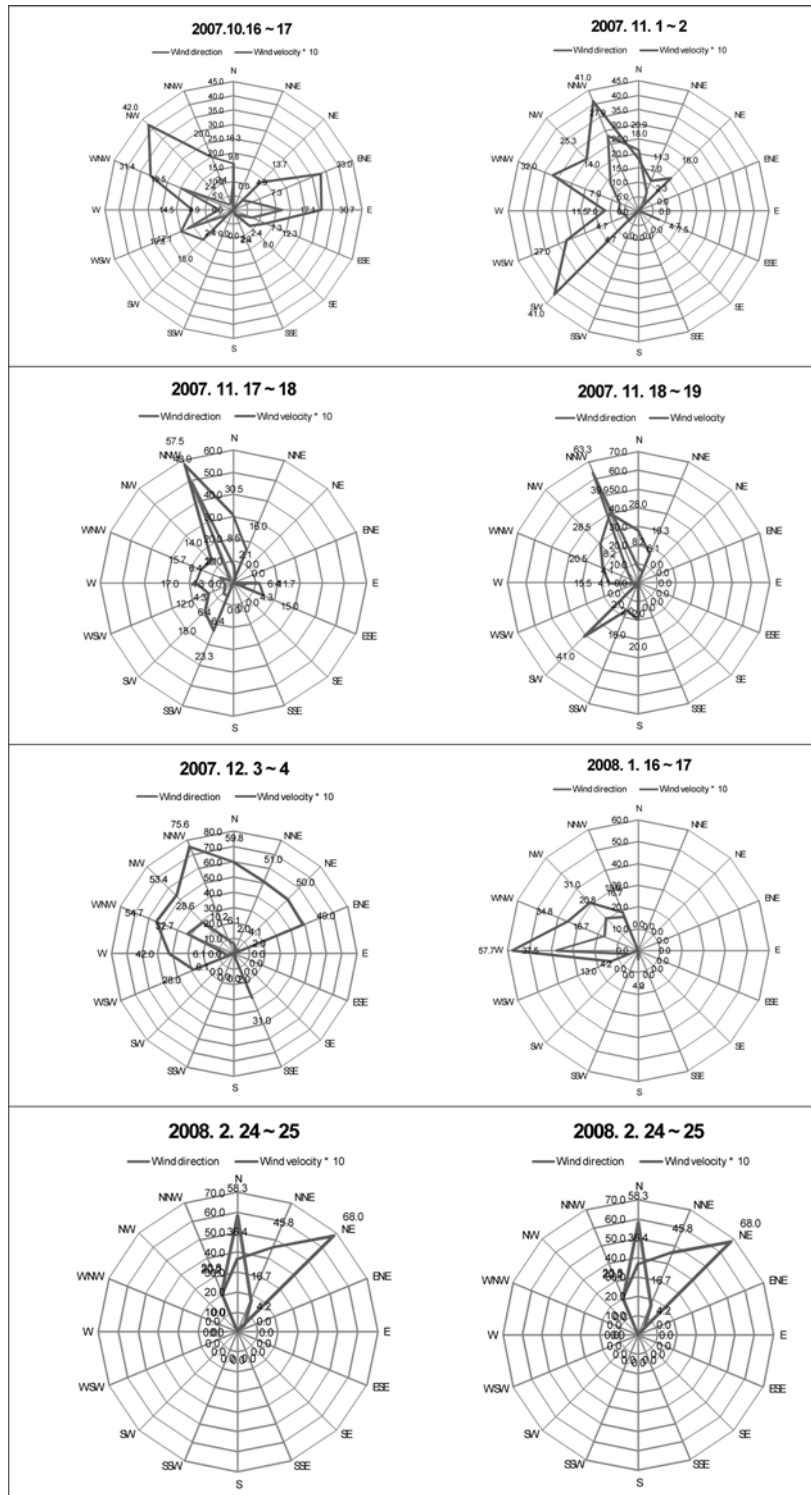


Fig. 6. The wind direction frequencies and the average wind velocities at sampling date.

V. 결 론

매립해사를 이용하여 신항만 배후부지 조성을 하고 있는 신항만 건설공사사업으로 인해 발생하는 비산먼지 발생량산정 및 주변지역의 비산먼지에 의한 피해 예측을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

Fugitive Dust 실험식을 통하여 풍속 11 m/s와 9 m/s의 비산먼지 원단위 발생량은 각각 26.56 $\mu\text{g}/\text{sec} \cdot \text{m}^2$, 11.84 $\mu\text{g}/\text{sec} \cdot \text{m}^2$ 로 산정되었으며, 11 m/s에서 단위 면적당 가장 많은 비산 먼지가 발생하였다. 아울러, 풍속이 5 m/s에서 11 m/s로 증가함에 따라 PM10의 배출량은 0.395~10.95 g/sec로 증가하였으며 비산먼지 원단위 발생량 또한 0.94 $\mu\text{g}/\text{sec} \cdot \text{m}^2$ ~26.56 $\mu\text{g}/\text{sec} \cdot \text{m}^2$ 로 증가하는 것을 알 수 있었다.

AERMOD를 이용한 매립해사의 피해영향 연구결과, 실측 시 겨울철 주 풍향 NW, NNW, WNW일 때 각각 최대풍속 9.0 m/s 초과 시 환경기준(24시간 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 근접하였다. 이에 따라 9.0 m/s의 풍속을 고려하여 model을 수행한 결과 선창지역의 경우 121.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 외놀이지역의 경우 104.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 환경기준을 초과하는 것으로 조사되었다. 11.0 m/s의 최대풍속 발생 시 선창지역 전체는 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 나타났으며 일부 지역은 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 것으로 예상되었고, 외놀이지역의 경우 발생지역과 인접한 지역이 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 것으로 나타났다.

감사의 글

This work is financially supported by Korea Ministry of Environment(MOE) as Human resource development Project for Waste to Energy.

참고문헌

1. Choi, W. J., Cho, K. C., Lee, E. Y., Na, H. Y., Lee, S. K., Oh, K. J. : Estimate of fugitive dust emission and impact assessment in constructing the new port by reclamation of sea sand. *Journal of Environmental Impact Assessment*, **15**(4), 237-247, 2006.
2. Kim, Y. S., Lee, N. H. : A study on estimation and dispersion analysis of fugitive dust in amount the large scale construction. *Journal of Environmental Impact Assessment*, **9**(3), 257-269, 2000.
3. Jang, Y. G., Song, D. W. : Review of air pollution modeling in Korea. *Journal of Korean Society for Atmosphere Environment*, **11**(1), 1-14, 1995.
4. Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J. M., Holben, B., Dubovik, O., Lin, S. J. : Source and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *Journal Geophysical Research*, **103**(20), 255-273, 2001.
5. Brandt, J., Basyrup-Birk, A., Christensen, J. H., Mikkelsen, T., Thykier-Niesen, S., Zlatev, Z. : Testing the importance of accurate meteorological input field and parameterizations in atmospheric transport modelling using dream validation against ETEX-1. *Atmospheric Environment*, **32**(24), 4167-4186, 1988.
6. Chang, Y. S., Arndt, R. L., Carmichael, G. R. : Mineral base-cation deposition in Asia. *Atmospheric Environment*, **30**, 2417-2427, 1996.
7. Louis, J. F. : A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Boundary Layer Meteorology*, **17**, 187-202, 1979.
8. Lee, H. N. : Improvement of surface flux calculations in the atmospheric surface layer. *Journal of Applied Meteorology*, **36**, 1416-1423, 1997.
9. Gillette, D. A., Passi, R. : Modeling dust emission caused by wind erosion. *Journal of Geophysical Research*, **93**(14), 233-242, 2003.
10. Lee, H. N., Tanaka, T. : Long range transport of asian dust from dust storm and its impact on Japan. *Water Air and Soil Pollution Focus*, **3**(2), 231-243, 2003.