

## 다양한 위해성평가 방법에 따라 도출한 토양오염 판정기준의 차이에 관한 연구 (II): (구)장항제련소부지의 기상 및 부지 특성을 반영한 비산계수 결정

정재웅<sup>1</sup> · 양 경<sup>1</sup> · 이광현<sup>2</sup> · 류혜림<sup>3</sup> · 남경필<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 건설환경공학부

<sup>2</sup>서울대학교 환경정화기술 및 위해성평가연구센터

<sup>3</sup>삼성물산 토목엔지니어링센터 물·환경팀

### Analysis on the Risk-Based Screening Levels Determined by Various Risk Assessment Tools (II): Derivation of Particulate Emission Factor at Former Janghang Smelter Site

Jae-Woong Jung<sup>1</sup> · Kyung Yang<sup>1</sup> · Gwanhun Lee<sup>2</sup> · Hyerim Ryu<sup>3</sup> · Kyoungphile Nam<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

<sup>2</sup>Center of Environmental Remediation & Risk Assessment, Seoul National University

<sup>3</sup>Water & Environment Team, Civil Engineering Center, Samsung C&T

#### ABSTRACT

This paper presents the short-term and long-term measures to determine the fugitive dust concentration in a contaminated site, which is a crucial step for the determination of particulate emission factor (PEF) for risk assessment. As a long-term measure, USEPA method employing Q/C value (inverse of the ratio of the geometric mean air concentration to the emission flux at center of a 0.5-acre square source) seems to be suitable as it reflects regional-specific meteorological conditions. However, it requires nation-wide database collection and interpretation. Use of ASTM method is an alternative as a short-term measure. The method is readily field-applicable as PEF calculation equation is simple and input parameters can be easily derived at the site of interest as well without the nation-wide efforts. Using ASTM method, PEF at the Former Janghang Smelter Site was determined. According to various mode of aggregate size distribution and fractions of vegetative cover, which are the most important factors in PEF calculation, PEF values at the Former Janghang Smelter Site varied greatly. When the mode of aggregate size distribution was set at 0.25 mm, PEF values at the Former Janghang Smelter Site was 5~20 times higher than the default PEF value (i.e., 35 µg/m<sup>3</sup>) shown in the current Korean Soil Contamination Risk Assessment Guidance. On contrast, when the mode was set at 2 mm, PEF values at the Former Janghang Smelter Site was 160~640 times lower than the default PEF value in the Korean Guidance.

**Key words :** Particulate emission factor, Fugitive dust, Risk assessment, Mode of aggregate size distribution, Meteorological conditions

#### 1. 서 론

USEPA(United States Environmental Protection Agency), ASTM(American Standards for Testing and Materials), 환경부 토양오염물질 위해성평가지침(환경부, 2011a) 등의 위해성평가 방법을 이용하여 토양오염 판정기준을 산정해

보면, 토양 섭취와 토양 접촉 등의 노출경로에서는 거의 유사한 값을 보이는 반면, 흡입을 통한 노출경로의 경우, 토양입자의 비산(particulate emission) 정도에 대한 해석 방법의 차이에 따라서 토양오염 판정기준이 최대 10,000 배 이상의 큰 차이를 보인다. 예를 들어, 비소로 오염된 비산먼지를 흡입하는 경로의 선별기준의 경우 USEPA 방

\*Corresponding author : kpnam@snu.ac.kr

원고접수일 : 2011. 6. 10 심사일 : 2012. 5. 18 게재승인일 : 2012. 5. 18  
질의 및 토의 : 2012. 8. 31 까지

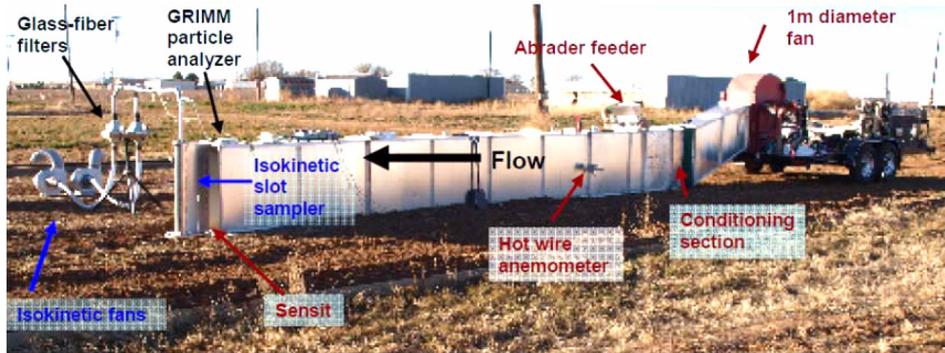


Fig. 1. Field wind tunnel used by Cox (Cox, 2009).

법으로 도출한 선별기준이  $7.70 \times 10^2$  mg/kg입에 반해 ASTM 방법으로 도출한 선별기준은  $8.20 \times 10^4$  mg/kg이었다(정재용 등, 2011). 참고로 USEPA와 ASTM 방법에 의한 위해성평가 시 사용되는 비산토양입자는 입경 10 mm 이하(PM<sub>10</sub>)의 입자를 의미한다(ASM, 2010; USEPA, 1996a).

위해성평가에 있어 비산먼지는 중요한 의미를 가진다. 비산먼지는 다양한 경로로 인체에 노출될 수 있다. 인체는 흡입을 통해 공기로 부유한 비산먼지(air-suspended dust)를 기도를 통해 흡입하기도 하지만, 식도를 통해 삼키기도(swallow) 하며, USEPA에서는 먼지를 삼키는 것을 토양섭취의 노출경로 중 하나로 설정한다(USEPA, 2009). 또한 몇몇 오염물질의 경우 매우 높은 흡입독성으로 인해 비산먼지 흡입에 대한 매우 엄격한 기준이 적용되기도 한다. 우리나라 토양환경보전법 상 규제물질인 폴리클로리네이티드비페닐(polychlorinated biphenyls, PCBs) 및 잔류성유기오염물질 관리법 상 규제물질인 다이옥신(polychlorinated dibenzo-p-dioxins, PCDD)의 경우 높은 흡입독성을 보여 USEPA Region 3, 6, 9에서는 PCB의 일종인 3,3',4,4',5-pentachlorinated biphenyl(PCB 126)과 다이옥신의 일종인 2,3,7,8-tetrachlorinated dibenzo-p-dioxin, 2,3,7,8-TCDD의 선별기준(screening level)을 각각 0.87 mg/kg 및 0.087 mg/kg으로 제시한다(USEPA Regions 3, 6, and 9, 2012).

비산먼지는 대기에 노출된 표면(예: 지표면)에서 풍응력(wind shear)에 의한 풍식(wind erosion)으로 발생하는 먼지로 바람에 의해 불규칙적으로 날아올라 사방으로 흩어지는 성질을 갖기 때문에 발생시간, 발생량 및 확산특성을 예측하기 매우 어렵다(김현구, 2005). 즉, 대기 중 먼지농도를 측정한다 하더라도 이것이 비산에 의해 발생한 것인지 혹은 부지 외부에서 유입된 것인지 구분하기는 매

Table 1. Meteorological and site factors for the derivation of particulate emission factor (PEF)

Factor	Unit
Meteorological factor	
Mean annual windspeed	m/s
Diffusion height	m
Site factor	
Roughness height	cm
Fraction of vegetative cover	-
Mode of aggregate size distribution	mm
Width of contaminated area	m
Area of soil contamination	m <sup>2</sup>

우 어렵다. Cox는 미국 Texas 주의 농약이 살포된 농경지에서의 토양입자 비산량을 측정하기 위해 Fig. 1과 같은 wind tunnel을 사용하기도 하였으나(Cox, 2009), 그 크기가 10 m (L) × 1 m(H) × 0.5 m(W)에 달해 모든 오염부지에 대해 비산먼지 실측을 하는 것은 바람직하지 않아 보인다. 미국 Superfund 부지에서 비산먼지 흡입에 대한 위해성평가를 수행할 때에도 실측치가 아닌 예측치를 사용하여 대기 중 비산먼지량을 예측한다(USEPA, 2002a; USEPA, 2006).

USEPA는 1991년 처음으로 비산계수를 결정하는 식을 제시하였다(USEPA, 1991). 당시 USEPA 방법을 따라 비산계수를 도출하기 위해서는 연평균풍속(mean annual windspeed), 식생면적 비율(fraction of vegetative cover), 대기 확산층 높이(diffusion height), 대기 확산층에서의 풍속(wind speed at diffusion height) 등의 요소들이 필요하다(Table 1). ASTM에서도 동일한 방법을 사용하여 비산계수를 결정하고 있다(ASM, 2010). 그러나 1996년 USEPA에서는 지역에 따라 기상요소가 변화하기 때문에 미국 전역에 대해 동일한 비산계수를 적용하는 것은 바람



Fig. 2. Climate zone of United States classified by USEPA (USEPA, 1996a).

직하지 않다는 인식을 바탕으로 미국 전역을 9개 기후구 (climate zone)로 구분한 후(Fig. 2), 9개의 기후구에 있는 29개 Superfund 부지에서 Industrial Source Complex Short-Term(ISCST-3) Dispersion Model이라는 소프트웨어를 이용한 모델링을 통해 각 지역에 맞는 비산계수를 결정하는 새로운 방법을 제안, 발표하였으며(USEPA, 1996a), 현재에는 이 방법이 USEPA의 비산계수 결정에 사용된다.

우리나라의 토양오염물질 위해성평가지침(환경부, 2011a)에서는 네덜란드에서 제작한 지침에 근거하여, 비산먼지량을 대기 중 총 먼지량(실외 70 µg/m<sup>3</sup>, 실내 52.5 µg/m<sup>3</sup>)의 일정비율(실외 50%, 실내 80%)로 가정하고 있으나 (Brand 등, 2007), 이는 대기 중 총 먼지량이 동일하다는 가정이 전제조건이며, 우리나라에 동일하게 적용할 수 있는지에 대한 근본적인 검토는 이루어지지 않았다.

우리나라에서는 전국에 산재한 사격장, 휴폐광산 및 제련소 등지에서서도 표토 중금속 오염이 보고되고 있으며, 중금속으로 오염된 표토는 비산되어 주변의 주거지로 이동할 가능성이 높기 때문에 보다 정확하고 과학적인 비산계수의 결정은 주변 위해성평가에 결정적인 역할을 할 것으로 예상된다. 이를 위해서는 USEPA에서 수정, 제안한 방법과 같이 오염특성 및 기상특성 등에 관한 국가적 데이터베이스 구축 등이 필요하며, 이는 다학제간 연구를 통해 달성 가능한 장기적인 대책이다. 본 연구에서는 현재 사용되고 있는 USEPA 방법을 분석하여 우리나라에서 향후 장기적 대책을 수립하는데 도움을 주고자 하며, 보다 실질적으로는 현재 ASTM 방법(1996년 개정 이전 USEPA 방법)을 활용하여 특정 오염부지의 비산계수를 예측할 수 있는 단기적인 대책을 소개하고자 한다. 본 연구에서는 이를 이용하여 중금속 오염이 심각하여 국가적인 대책 마련

이 필요한 (구)장항제련소부지에 적용하여 비산계수를 도출하고, 그 결과를 우리나라 토양오염 위해성평가지침에 명시된 비산계수와 비교하였다. 이를 위해 환경부에서 2008년부터 2009년까지 수행한 (구)장항제련소부지 토양 정밀조사 결과를 활용하였다.

## 2. 비산계수 도출방법 비교

### 2.1. USEPA 방법(장기적 대책)

USEPA에서는 토양입자의 비산을 2단계로 해석한다. 1 단계는 토양입자가 대기로 이동하는 단계(emission)이며, 2단계는 대기로 이동한 토양입자가 대기 중에서 확산되는 단계(dispersion)이다. 1단계(emission)에 대한 해석은 아래 식 (1)을 이용한다.

$$P_e = \frac{0.036 \times (1-G) \times \left(\frac{U_m}{U_t}\right)^3 \times F(x) \times 0.000001}{3600 \text{ s/h}} \quad (1)$$

여기서,

$P_e$  = 비산면지 발생률(areal total respirable particulate emission flux from source(g/cm<sup>2</sup>-sec))

$G$  = 식생이 존재하는 면적의 비율(fraction of vegetative cover(unitless))

$U_m$  = 연평균풍속(mean annual wind speed (m/s))

$U_t$  = 7 m 상공에서의 임계풍속(equivalent threshold value of wind speed at 7 m (m/s) =  $2.5 \times \ln\left(\frac{700}{Z_0}\right) \times U^*$ )

$Z_0$  = 마찰높이(roughness height (cm))

$U^*$  = 마찰풍속(friction velocity (m/s))

$F(x)$  = 연평균풍속 및 7 m 상공에서의 임계풍속을 변수로 하는 함수(function dependent on  $U_m/U_t$ (unitless) = 0.18  $(8x^3 + 12x) \times \exp(-x^2)$ )

$x$  = 연평균풍속과 7 m 상공에서의 임계풍속 비율(ratio between  $U_m$  and  $U_t$  (unitless) =  $0.886 \times \left(\frac{U_m}{U_t}\right)$ )

0.036 = 시간 당 흡입하는 비산면지량(respirable fraction (g/m<sup>3</sup>-hr))

0.000001 = 단위환산계수(unit conversion factor (m<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)) 이다.

위 식 (1)은 Cowherd 등이 제시한 “unlimited reservoir model” 식으로(Cowherd 등, 1985), 연평균풍속( $U_m$ ), 임계 마찰풍속( $U^*$ ), 지면과 바람의 마찰이 일어나는 높이( $Z_0$ ) 및 식생이 존재하는 면적 비율( $G$ )의 함수로 표현된다. 임계마찰풍속은 다시 토양입경의 최빈값(mode of aggregate

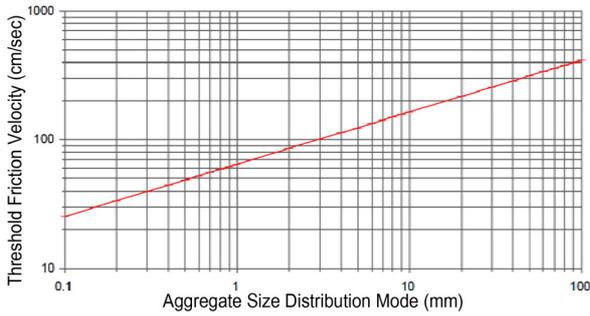


Fig. 3. Relationship of threshold friction velocity to size distribution mode (Cowherd et al., 1985).

size distribution)의 함수로 표현이 되며, USEPA에서는 토양입경분포 최빈값의 기본값으로 0.5 mm를 제시하고 있다. USDA(United States Department of Agriculture) 분류상 0.5 mm는 굵은 모래(coarse sand)와 중간 크기 모래(median sand)를 구분하는 기준이다. 최빈값이 0.5 mm일 때의 임계마찰풍속은 0.5 m/s이나(Fig. 3) 지표면에 크기가 1 cm 이상인 풀이나 자갈 등이 존재할 경우 임계마찰풍속이 0.5 m/s를 넘어도 입자가 부유하지 못할 가능성이 있어 보정계수 1.25를 적용해 최종 임계마찰풍속은 0.625 m/s가 사용된다(USEPA, 1996a). 또한, 연평균풍속의 기본값은 미국 미네소타 주 Minneapolis의 연평균풍속인 4.69 m/s로

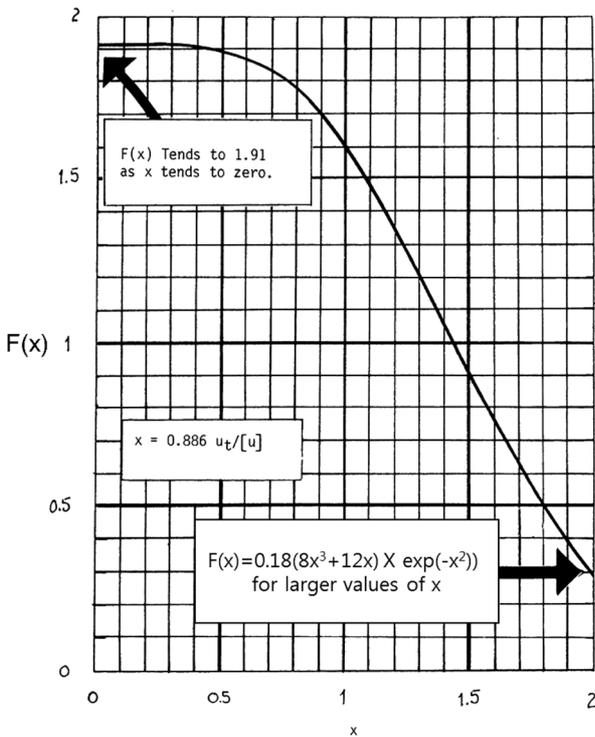


Fig. 4. Graph of Function F(x) (Cowherd et al., 1985).

설정하였는데, 그 이유는 아래에서 설명하기로 한다. 식 (1)에서 사용하는 식생이 존재하는 면적의 비율(G)의 기본값은 0.5이고, 위 기본값들을 이용하여 도출한 7 m 상공에서의 풍속(U<sub>i</sub>)은 11.32 m/s이며, F(x)는 0.194이다. 식 (1)의 F(x)를 구하는 식은 x가 2를 초과하는 경우에 적용 가능한 식이다. 만약 x가 2 이하이면 Fig. 4의 그래프를 이용해 F(x)값을 결정한다.

다음은 표토로부터 비산된 토양입자가 대기 중에서 확산되는 단계(dispersion)이다. 같은 양의 비산면지가 발생하여도 지역별 기상조건(region-specific meteorological condition)에 따라 확산되는 정도가 다를 수 있으므로 비산 먼지 발생 flux에 따른 대기 중 비산먼지 농도의 역수(inverse of the ratio of the geometric mean air concentration to the emission flux at center of a 0.5-acre square source; Q/C)를 통해 확산 정도를 정량화한다(USEPA, 1996b). Q/C는 식 (2)를 이용하여 산정할 수 있다.

$$Q/C = A \times \exp\left[\frac{(\ln A_{\text{site}} - B)}{C}\right] \quad (2)$$

여기서,

A, B, C = 기후구에 따라 결정되는 비산계수 확산계수 결정 상수(constants based on air dispersion modeling for specific climate zones)

A<sub>site</sub> = 오염면적(areal extent of site or contamination (acres))이다.

식 (2)에서 A<sub>site</sub>는 acres 단위로 표현된 부지 면적이며, 적용 가능한 범위는 0.5~500 acres(2,025~2,025,000 m<sup>2</sup>)이다(USEPA, 1996b). A, B, C는 지역별 기상특성에 따라 결정되는 값으로 USEPA에서는 이 값을 도출하기 위해 Industrial Source Complex Short-Term(ISCST-3) Dispersion Model이라는 소프트웨어를 이용하였다. ISCST-3 Model에서는 식 (3)과 같은 Gaussian Equation을 이용하여 바람이 부는 쪽(downwind)으로 x meter, 바람이 부는 방향의 측 방향(crosswind)으로 y meter 떨어진 지점에서의 대기농도(X)를 예측한다(USEPA, 1996a).

$$\chi = \frac{QK}{2\pi u_s} \int_x^{\rho} \frac{VD}{\sigma_y \sigma_z} \operatorname{erfc}\left[\frac{y}{\sigma_y}\right] d\chi \quad (3)$$

여기서,

Q = 비산먼지 발생률(area source emission rate (g/m<sup>2</sup>-s))

K = 단위환산인자(scaling coefficient to convert calculated concentrations to desired units(default value of 1 × 10<sup>6</sup> for Q in g/s and concentration in μg/m<sup>3</sup>))

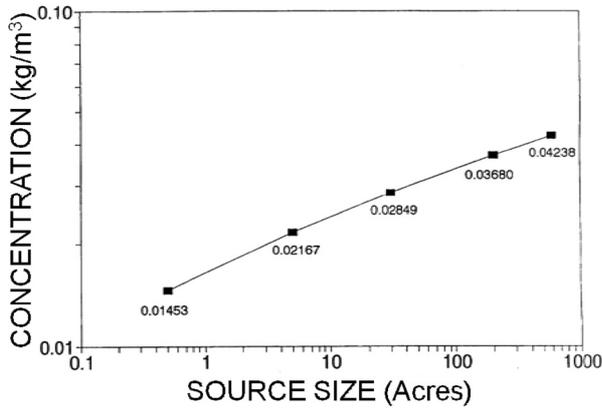


Fig. 5. Normalized annual average concentration versus source size (USEPA, 1996a). Concentration in y-axis represents the concentration of fugitive dust in the air corresponding to C in Eq (2).

V = 수직적 이동관련 인자(vertical term)

D = 분해 인자(decay term)

$\sigma_y, \sigma_z$  = 비산먼지 농도분포의 수직적 및 수평적 표준편차(standard deviation of lateral and vertical concentration distribution (m))

$u_s$  = 비산먼지가 발생하는 지점의 평균풍속(mean wind speed(m/s) at release height) 이다.

위 식 (3)을 이용하여  $\lambda$ 를 도출하기 위해 비산먼지 발생률(Q)을  $1 \text{ g/m}^2\text{-s}$ 로 가정하였다. 이때 X는 위 Q/C에서 C에 해당되며, Q/C가 의미하는 비는 비산먼지 발생량에 따른 대기 중 비산먼지 농도의 비율이므로 Q를 상수로 고정시킨 후 C값을 도출하는 방법을 사용하였다(USEPA, 1996a). 위 식 (2)의 A, B, C값을 도출하기 위해 위 식 (3)에서 도출된 비산먼지 농도( $\lambda$ )를 y축으로 하고 오염면적을 x축으로 하는 그래프(Fig. 5)를 작성한 후, 최소자승법(least square curve fit, CURVEFIT Version 2.11)을 사용하였다(USEPA, 1996b). V는 오염물질의 수직적 이동과 관련이 있으며, 가스상 오염물질이나 크기가  $20 \mu\text{m}$  미만인 입자상 오염물질에서는 V를 무시한다. D는 대기 중에서 오염물질이 분해되는 정도를 나타내며, 분해가 일어

Table 2. Pasquill stability class (McCormick and Horlworth, 1976)

Stability class	Definition
A	very unstable
B	unstable
C	slightly unstable
D	neutral
E	slightly stable
F	stable

나지 않을 시에는 D가 1이다(USEPA, 1992).

오염물질이 발생하는 고도에서의 풍속( $u_s$ )은 기준 고도에서의 풍속( $u_{ref}$ )에 관한 함수로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다(USEPA, 1992).

$$u_s = u_{ref} \left( \frac{h_s}{z_{ref}} \right)^p \quad (4)$$

여기서,

$u_{ref}$  = 관측된 풍속(observed wind speed (m/s))

$h_s$  = 비산먼지 발생 높이(release height (m))

$z_{ref}$  = 기준표고(reference measurement height (m))

$p$  = 바람과 관련된 지수(wind profile exponent) 이다.

$u_s$ 는 오염물질이 발생하는 지점의 높이로 USEPA에서는  $u_s$ 를 0 m로 설정하였으나, 이와 관련하여 더 이상의 구체적인 언급은 하지 않았다(USEPA, 1996a).  $p$ 는 부지 유형(도시지역, 농촌지역) 및 대기의 안정성(stability)과 관계가 있다. 대기의 안정성은 Pasquill Stability Category를 통해 A부터 F까지 6등급으로 표현되며, A가 가장 불안정하고 F가 가장 안정한 상태로 Table 2에 각 등급별 정의를 나타내었다(McCormick and Horlworth, 1976). Pasquill Stability Category는 풍속, 일출 1시간 후에서 일몰 1시간 전까지의 태양광 입사량(insolation) 및 일몰 1시간 전에서 다음 날 일출 1시간 후까지의 운량(cloud cover)으로 Table 3과 같이 구분된다. 또한 Table 3의

Table 3. Meteorological conditions that define the Pasquill stability class (McCormick and Horlworth, 1976)

Surface windspeed at 10 m (m/s)	Insolation			Night	
	Strong	Moderate	Slight	Thinly overcast or $\geq 4/8$ low cloud	$\leq 3/8$ cloud
< 2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

**Table 4.** Default p values provided as a function of stability category and wind speed class (McCormick and Horlzworth, 1976)

Stability category	Rural exponent	Urban exponent
A	0.07	0.15
B	0.07	0.15
C	0.10	0.20
D	0.15	0.25
E	0.35	0.30
F	0.55	0.30

A-B, B-C 및 C-D는 각각 B, C 및 D로 간주할 수 있다. 대기의 안정성에 따른 p값을 Table 4에 나타내었다.

$\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ 는 오염물질의 대기 중 확산과 관계가 있으며, 풍속과 마찬가지로 부지 유형(도시지역, 농촌지역) 및 대기의 안정성(stability)과 관계가 있다. 또한,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ 는 바람이 부는 방향으로의 오염원에서부터의 거리(downwind distance)와도 관계가 있다. 농촌지역에서는 Pasquill-Gifford 방법을 통해  $\sigma_y$ 와  $\sigma_z$ 를 계산하며, 도시지역에서는 McElroy-Pooler 방법을 통해  $\sigma_y$ 와  $\sigma_z$ 를 계산한다(USEPA, 1992).

USEPA에서는 위와 같은 방법으로 29개 Superfund 부지에 대한 대기농도를 ISCST-3 Model을 이용하여 도출한 후 각 부지 별 A, B, C값을 제시하고, 이중 상위 90%(상위 4번째)에 해당하는 Minneapolis Superfund 부지에서의 A, B, C값 및 연평균풍속을 미국 전역에 대한 기본값으로 설정하였다. 이렇게 하여 도출된 Minneapolis Superfund 부지에서의 Q/C값은  $93.77 \text{ g/m}^2\text{-s per kg/m}^3$ 이다.

위의 방법을 활용해서 비산계수를 도출하기 위해서는 날짜 별 풍속, 시간대별 풍속, 풍향, 기온, 안정도 등급(Pasquill Stability Category) 및 대기 혼합고(mixing height) 등에 대한 자료가 필요하다. 여기서 대기 혼합고는 아래에서 소개되는 ASTM 지침의 대기 확산층(diffusion height)과는 다른 개념으로 지표면에서 대기 역전층(inversion aloft) 최하층까지의 높이를 의미한다. 또한, 안정도 등급을 결정하기 위해서는 10 m 상공에서의 풍속, 태양광 입사량 및 운량에 대한 정보를 필요로 하는 등 국가적인 데이터베이스의 구축이 선행되어야 한다.

## 2.2. ASTM 방법(단기적 대책)

ASTM은 USEPA가 1991년에 제시한 비산계수식을 사용하며, USEPA와 마찬가지로 토양입자의 비산을 2단계로 해석한다. 1단계는 토양입자가 대기 중으로 이동하는 단계(emission)이며, 2단계는 대기 중으로 이동한 토양입자가 대기 중에서 확산되는 단계(dispersion)이다. ASTM에서는 비산

계수를 토양에서 기원한 흡입 가능한 먼지(PM<sub>10</sub>)의 농도(total respirable particulate concentration originating from surfacial soil source; VF<sub>p</sub>)라고 정의하며, 아래 식 (5)와 같이 나타낸다.

$$VF_p = \frac{P_e}{DF_{amb}} \quad (5)$$

여기서,

VF<sub>p</sub> = 지표에서 발생한 흡입 가능한 먼지의 농도(total respirable particulate concentration originating from surfacial soil source(g/cm<sup>3</sup>))

DF<sub>amb</sub> = 확산계수(dispersion factor for ambient air (cm/s))

P<sub>e</sub> = 비산면적 발생률(areal total respirable particulate emission flux from source(g/cm<sup>2</sup>-sec)) 이다.

P<sub>e</sub>는 토양입자가 표토에서 대기 중으로 이동하는 정도(emission factor)를 의미하며, DF<sub>amb</sub>는 대기 중으로 이동한 비산면적이 대기 중에서 확산되는 정도(dispersion factor)를 나타낸다. ASTM에서는 P<sub>e</sub>의 기본값으로  $6.9 \times 10^{-14} \text{ g/cm}^2\text{-s}$ 를 제시하고 있으며, DF<sub>amb</sub>의 기본값으로 10 cm/s를 제시하고 있다. P<sub>e</sub>의 기본값은 식 (1)을 통해 도출되었다(USEPA, 1991).

ASTM에서는 토양입경분포 최빈값의 기본값으로 2 mm를 제시하고 있다. 2 mm는 USDA에서 제시하는 자갈(gravel)과 모래(sand)의 구분기준으로 토양입경분포의 최빈값이 2 mm일 때의 임계마찰풍속은 약 0.88 m/s이다(Fig. 3). 또한, ASTM에서는 오염부지에 식생이 존재하지 않는다고 가정하며(G=0), 연평균풍속 기본값은 4 m/s로 제시하고 있다(ASM, 2010).

ASTM에서는 사용하는 DF<sub>amb</sub>의 기본값은 식 (6)을 통해 도출되었다(USEPA, 1991). 식 (6)은 Box Model로 불리며, 일정 구역 내에서 대기가 완전 혼합됨을 가정하고 있다.

$$DF_{amb} = \frac{LS \times W \times DH \times 100 \text{ cm/m}}{A} \quad (6)$$

여기서,

LS = 바람 방향과 평행한 오염 길이(width of contaminated area (m))

W = 혼합고에서의 풍속(wind speed in mixing zone (m/s))

DH = 혼합고(diffusion height (m))

A = 토양오염 면적(area of soil contamination (m<sup>2</sup>)) 이다.

**Table 5.** Summary of the input parameters and their input values used for the particulate emission factor equation described in USEPA and ASTM guidance (ASTM, 2010; USEPA, 1996b)

Parameter	Definition	Unit	USEPA default	ASTM default
Emission factor calculation				
$P_e = \frac{0.036 \times (1 - G) \times \left(\frac{U_m}{U_t}\right)^3 \times F(x) \times 0.000001}{3600 \text{ s/h}}$				
$P_e$	Areal total respirable particulate emission flux from source	g/cm <sup>2</sup> -sec	6.9E-12	6.9E-14
0.036	Respirable fraction	g/m <sup>2</sup> -hr	0.036	0.036
G	Fraction of vegetative cover	unitless	0	0.5
$U_m$	Mean annual wind speed	m/s	4.69	4
$U_t$	Equivalent threshold value of wind speed at 7 m	m/s	11.32	ND <sup>1)</sup>
F(x)	Function dependent on $U_m/U_t$	unitless	0.194	ND
Dispersion factor calculation				
USEPA: $DF_{amb} = \frac{1}{Q/C}$				
ASTM: $DF_{amb} = \frac{LS \times W \times DH \times 100 \text{ cm/m}}{A}$				
Q/C	Inverse of the mean concentration at the center of a 0.5-acre-square source	g/m <sup>2</sup> -s per kg/m <sup>3</sup>	93.77	-
$DF_{amb}$	Dispersion factor	cm/s	-	10
LS	Width of contaminated area	m	-	45
$U_m$	Mean annual wind speed	m/s	-	4
DH	Diffusion height	m	-	2
A	Area of contamination	m <sup>2</sup>	-	2,025

1) Not described in the guidance.

식 (6)에 나타난 인자들의 기본값은 USEPA 지침에 나타나 있다(USEPA, 1991). USEPA에서는 한 축의 길이가 45m인 정방형 오염범위를 가정하여 기본값을 도출하였으므로 오염길이(LS)와 오염면적(A)의 기본값은 각각 45 m 및 2,025 m<sup>2</sup>이다. DH는 대기 확산층으로 실질적으로는 인간이 호흡할 수 있는 높이를 의미하며(Conner 등, 1995), 기본값은 2m이다(USEPA, 1991). V는 대기 혼합 지점에서의 풍속으로 기본값은 2.25 m/s이며, 이는 USEPA에서 식 (6)을 발표할 당시 사용한 연평균풍속인 4.5 m/s의 절반값이다(USEPA, 1986).

상기한 USEPA 지침과 ASTM 지침에서 노출계수 산정에 사용한 입력 파라미터 및 기본값을 Table 5에 나타내었다.

### 3. (구)장항제련소부지 사례 연구 (ASTM 방법의 적용)

#### 3.1. 현재 이용 가능한 자료를 활용한 (구)장항제련소부지의 기상요소 및 부지특성값 도출

Table 1에 나타난 7가지의 기상 및 오염부지 특성에 대

**Table 6.** Values of meteorological and site factors of Former Janghang Smelter Site

Factor	Value	Unit
Meteorological factor		
Mean annual windspeed	3.9	m/s
Diffusion height	2	m
Site factor		
Roughness height	4	cm
Fraction of vegetative cover	0, 0.25, 0.5, 0.75	-
Mode of aggregate size distribution	0.25, 0.5, 1, 2	mm
Width of contaminated area	4000	m
Area of soil contamination	2115000	m <sup>2</sup>

한 값을 도출하여 Table 6에 나타내었다. 연평균풍속의 경우 (구)장항제련소부지가 위치한 서천 지역의 기상자료가 없어 대상 부지와 가장 인접한 군산 지역의 평년 연평균 풍속인 3.9 m/s를 적용하였다. 따라서 대기 확산층에서의 풍속은 연평균 풍속의 절반인 1.95 m/s로 설정하였다. 대기 확산층 높이는 실제로 인체가 호흡할 수 있는 높이이므로 ASTM 지침에 명시된 2m를 그대로 적용하였다.

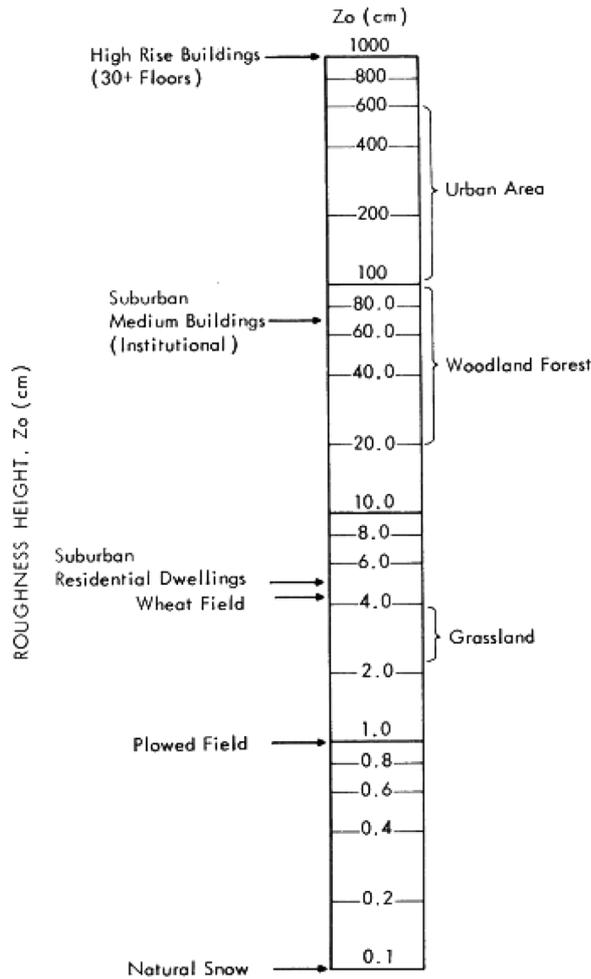


Fig. 6. Roughness heights for various surfaces (Cowherd et al., 1985).

지면과 바람의 마찰이 일어나는 높이(roughness height)는 부지의 식생이나 시설물의 종류에 따라 Fig. 6과 같이 달라진다(Cowherd 등, 1985). (구)장항제련소부지 주변은 주로 전답으로 이루어져 있으며 민가가 존재하므로 suburban residential dwelling의 마찰높이인 5 cm를 사용하였다(Fig. 6). 식생면적비율의 경우 계절별로 식생면적이 달라질 수 있기 때문에 식생면적비율을 0, 0.25, 0.50, 0.75로 변화시켜 적용해 보았다.

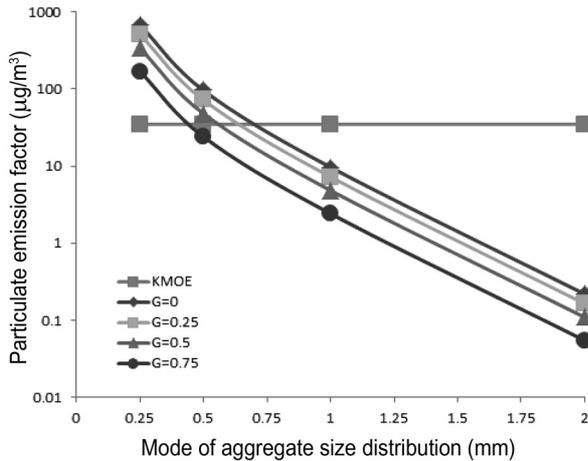
토양입경분포 최빈값은 입경분포 분석을 통해 수행되어야 한다. 그러나 비산계수 측정 시 사용하는 입경분포 분석은 토성(texture)을 판단할 때 사용하는 질량 기준의 입경분포가 아닌 부피 기준의 입경분포이며, 이는 대상토지의 현재 사용용도에 따라 달라질 수 있다. (구)장항제련소부지가 넓고 토지사용 용도도 임야, 논, 밭, 나대지, 주거지 등으로 다양하므로 본 연구에서는 토양입경분포 최빈

값을 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 mm 등으로 변화시켜 적용해 보았다. 또한, 지표면에 크기가 1 cm 이상인 풀이나 자갈 등이 존재할 경우 실제 풍속이 임계마찰풍속을 넘어도 입자가 부유하지 못할 가능성이 있어 보정계수 1.25를 적용해 임계마찰풍속을 결정하였다(USEPA, 1996a). 오염길이는 풍향과 평행한 방향의 오염길이로 (구)장항제련소부지에서는 4 km까지 오염이 확산된 것으로 나타났기 때문에, 오염길이를 4,000 m로 설정하였다. 오염면적은 표토의 오염면적을 의미하며, (구)장항제련소부지 정밀조사 결과에 따르면 표토(0~30 cm)오염면적은 2,115,000 m<sup>2</sup>인 것으로 나타났다.

### 3.2. (구)장항제련소부지의 비산계수 도출

Table 6의 기상요소 및 부지특성값을 식 (1)에 대입하여 도출한 (구)장항제련소부지의 비산먼지 발생률(P<sub>0</sub>)은 4.0 × 10<sup>-14</sup> g/cm<sup>2</sup>-sec에서 5.0 × 10<sup>-10</sup> g/cm<sup>2</sup>-sec이었다. 비산먼지 발생률이 가장 높다고 가정할 경우(부지 내에 식생이 없고(G=0) 토양입경분포 최빈값이 0.25 mm로 작은 경우)의 비산먼지 발생률은 5.0 × 10<sup>-10</sup> g/cm<sup>2</sup>-sec이었고, 그 반대로 비산먼지 발생률이 가장 낮다고 가정한 경우(전체 부지 중 식생이 존재하는 면적이 75%이고 최빈값이 2 mm로 상대적으로 큰 경우)의 비산먼지 발생률은 4.0 × 10<sup>-14</sup> g/cm<sup>2</sup>-sec이었다.

Table 6의 기상요소 및 부지특성값을 식 (6)에 대입하여 도출한 (구)장항제련소부지의 비산먼지 확산계수(DF<sub>amb</sub>)는 0.74 cm/sec로 ASTM의 기본값인 10 cm/sec보다 약 14배 낮았다. 즉, (구)장항제련소부지에서는 토양에서 부유한 비산먼지가 잘 확산되지 않는다는 의미이다. 이렇게 낮은 확산계수는 오염 면적(A)과 바람 방향의 오염 길이(LS)의 비율과 관계가 있다. 식 (6)에서 볼 수 있듯이 오염 면적이 분모에 있고, 오염 길이가 분자에 있기 때문에 오염 길이에 비해 오염 면적이 크면 확산계수가 낮게 산정된다. ASTM 기본값에서는 오염 면적을 2,025 m<sup>2</sup>으로, 바람 방향의 오염 길이를 45 m로 가정하기 때문에 오염 면적과 오염 길이의 비율이 45 : 1이 된다. 반면, (구)장항제련소부지에서는 오염 면적이 2,115,000 m<sup>2</sup>이고, 오염 길이가 4,000 m이므로 오염 면적과 오염 길이의 비율이 약 530 : 1이다. 이와 같이 (구)장항제련소부지에서는 오염 면적에 비해 오염 길이가 짧아 확산계수가 낮게 도출된다. ASTM 지침에서는 비산계수 계산의 적용이 가능한 면적을 제시하지는 않는다. 그러나 USEPA에서는 비산계수 계산이 가능한 면적을 0.5 acre(2,025 m<sup>2</sup>)에서 500 acre(2,025,000 m<sup>2</sup>)으로 제시하며(USEPA, 2002b), (구)장항제련



**Fig. 7.** Variation of the derived PEF with respect to the fraction of vegetative cover and the mode of aggregate size distribution (KMOE; the default PEF value shown in Korean Soil Contamination Risk Assessment Guidance (KMOE, 2011a)).

소부지의 오염면적은 USEPA가 제시한 비산계수 계산이 적용가능 한 최대면적과 거의 일치한다.

위에서 산정한 비산먼지 발생률과 확산계수를 식 (5)에 대입하여 도출한 비산계수는  $5.5 \times 10^{-14} \text{ g/cm}^3$ 에서  $6.8 \times 10^{-10} \text{ g/cm}^3$ 에 분포하고 있었으며 부지 내 식생면적 비율과 토양입경분포 최빈값을 어떻게 설정하는지에 따라 큰 차이를 보였다(Fig. 7). 특히, 비산계수는 부지 내 식생면적비율 보다는 토양입경분포 최빈값에 더 큰 영향을 받았으며 토양입경분포 최빈값을 0.25 mm라고 가정한 경우, 최빈값이 2 mm인 때보다 비산계수가 약 3000배 더 높았다(Table 7). 주목할만한 점은 본 연구에서 도출한 비산계수와 현행 국내 지침에 명시된 비산계수 역시 큰 차이를 보였다는 것이다. 오염구역에 식생이 존재하지 않으며(G=0) 토양입경분포 최빈값이 0.25 mm라고 가정하여 도출된 비산계수 ( $678.7 \mu\text{g/m}^3$ )는 현행 지침에 명시된 비산계수 기본값 ( $35 \mu\text{g/m}^3$ )보다 약 20배 높았으며, 0.5 mm라고 가정하여 도출된 비산계수( $96.1 \mu\text{g/m}^3$ )는 현행 지침의 기본값보다 약 2.75배 높았다(환경부, 2011a). 반면 오염구역의 식생면적 비율이 75%이고 토양입경분포 최빈값이 2 mm라고 가정하여 도출된 비산계수는 약  $5 \times 10^{-2} \mu\text{g/m}^3$ 으로 현행 지침의 비산계수 기본값보다 약 640배 낮았다(Table 7).

위에서 계산된 (구)장항제련소부지의 비산계수(토양입경분포 최빈값이 0.25 mm이고 식생면적비율이 0.75일 때의 비산계수인  $169.7 \mu\text{g/m}^3$ )를 이용하여 토양오염 위해성평가지침(환경부, 2011a)에 제시된 실외 비산먼지 흡입 경로에 대한 As의 발암 정화목표치를 주거지역으로 가정하여 계산한 결과,  $10^{-5}$ 의 목표위해도를 만족시킬 수 있는 토양

**Table 7.** Derived particulate emission factor (PEF) of Former Janghang Smelter Site (unit:  $\mu\text{g/m}^3$ )

M <sup>1)</sup> (mm)	G <sup>2)</sup>			
	0	0.25	0.5	0.75
0.25	678.697	509.023	339.349	169.674
0.5	96.088	72.066	48.044	24.022
1	9.651	7.238	4.825	2.413
2	0.218	0.164	0.109	0.055

1) Mode of aggregate size distribution

2) Fraction of vegetative cover

농도는 약  $36.2 \text{ mg/kg}$ 으로 계산되었다. (구)장항제련소부지의 As 평균 농도는  $70 \text{ mg/kg}$  수준으로, 섭취 및 접촉의 노출을 제외해도 비산먼지 흡입 만으로도 목표위해도를 초과한다. Cowherd 등(1985)은 비산먼지 흡입에 대한 위해도를 고려할 때, 가능하다면 실제 흡입되어 인체에 영향을 미칠 가능성이 높은 토양 미세입자 중 오염물질의 농도를 반영할 것을 권고하고 있으며, 토양 중  $10 \mu\text{m}$  이하의 입자(PM10) 중 중금속 농도는 일반 토양(2 mm 이하)에 비해 최고 3배 가량 높은 것으로 알려져 있어(Ajmonemarsan 등, 2008), 이러한 요소들을 고려할 경우, 비산먼지 흡입의 위해도는 더욱 커진다. 따라서 비산먼지로 인한 위해여부를 정확히 판별하기 위한 조사 및 평가가 필요하다.

(구)장항제련소부지처럼 오염면적이 광범위한 경우 구역별로 식생이 존재하는 면적이나 토양입경분포 최빈값이 상이할 수 있으며, 이러한 경우 동일 오염부지라 하더라도 구역별로 비산계수는 달라질 수 있다. 그럼에도 불구하고 현행 위해성평가 지침처럼 일정한 비산계수를 사용하는 것은 비산먼지 흡입에 의한 위해도를 과대평가할 수도 있으며 과소평가할 수도 있게 되어 평가의 신뢰성이 떨어지는 원인이 된다. 따라서 부지특성평가(예: 식생이 존재하는 면적 조사, 토양입경분포 최빈값 조사 등)를 통한 비산계수 도출이 필요하다고 할 수 있다.

#### 4. 단기적 대책(ASTM 방법)을 활용한 현행지침 보완책

환경부 보도자료에 따르면 2010년 우리나라 평균 미세먼지 농도는  $51 \mu\text{g/m}^3$ 으로, 우리나라 위해성평가지침에서 제시하는 미세먼지 기본값인  $70 \mu\text{g/m}^3$ 에 비해 약 30% 낮았다(환경부, 2011b). 또한 전국 어디에서나 전체 미세먼지 농도 중 일정 비율이 토양유래 먼지라고 가정하는 것은 무리가 있어 보인다. 비산계수는 기상특성과 부지특

**Table 8.** Field procedure for determination of mode of aggregate size distribution (Cowherd et al., 1985)

Step	Procedure
1	Prepare a nest of sieves with the following openings: 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm. Place a collector pan below the bottom sieve (0.25 mm opening).
2	Collect a sample representing the surface layer of loose particles (approximately 1 cm in depth for an uncrushed surface), removing any rocks larger than about 1 cm in average physical diameter. The area to be sampled should not be less than 30 cm × 30 cm.
3	Pour the sample into the top sieve (4 mm opening), and place a lid on the top.
4	Rotate the covered sieve/pan unit by hand using broad sweeping arm motions in the horizontal plane. Complete 20 rotations at a speed just necessary to achieve some relative horizontal motion between the sieve and the particles.
5	Inspect the relative quantities of catch within each sieve and determine where the mode in the aggregate size distribution lies, i.e., between the opening size of the sieve with the largest catch and the opening size of the next largest sieve.

성에 큰 영향을 받으며 특히 식생면적비율과 토양입경분포의 최빈값에 매우 큰 영향을 받으므로 현행 지침과 같이 전국에 대해 일괄적인 수치를 적용하는 것은 무리가 있다. 그렇다고 해서 1996년 발표된 USEPA 방법(1996a)을 따라 비산계수를 산정하는 것은 현재 우리나라 실정에 맞지 않다. 그 대안으로서 현재 가용한 대상 오염부지의 기상자료와 부지특성자료(특히, 식생면적비율과 토양입경분포 최빈값)를 확보한 후, ASTM 방법에 따라 대상 오염부지의 특이적인 비산계수를 도출하는 것은 현실적으로 가능한 일이며, 이를 통하여 비산먼지에 의한 위해성을 보다 정확하게 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

연평균풍속 등 기상자료의 경우 기상청에서 자료를 쉽게 확보할 수 있으나 부지특성의 경우 현장조사 시 필요한 자료를 실측 등의 방법을 통해 확보하여야 한다. 현장조사 시 오염길이 및 오염면적을 정확하게 측정하여야 하며, 식생이 존재하는 면적의 비율이나 부지 유형에 따른 마찰높이도 현장을 방문한 후 결정하여야 한다. 또한, 비산계수 도출 시 가장 중요한 것은 토양입경분포 최빈값이며, Cowherd 등(1985)은 현장에서 신속하게 토양입경분포 최빈값을 결정하는 방법을 Table 8과 같이 제시하고 있으므로 이를 이용하면 최빈값을 현장에서 용이하게 측정할 수 있다. USDA에서는 농경지에 살포된 농약이 흡착되어 있는 토양입자의 대기 중 비산을 측정하기 위해서 Lubbock Dust Generation, Analysis, and Sampling System(LDGASS)이나 Field Wind Tunnel장치를 이용하기도 하는데, 이런 장치를 활용하는 방안도 고려해볼 만 하다(Amente-Orozco and Zobeck, 2002; Cox, 2009).

대기 확산층의 경우 인체가 실제로 호흡할 수 있는 높이이므로, ASTM에서 사용하는 기본값인 2 m를 그대로 적용하고, 대기 확산층에서의 풍속은 USEPA의 설정(연평균풍속의 절반)을 따르는 것이 바람직하다고 여겨진다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 USEPA와 ASTM에서 사용하고 있는 비산계수 도출 방법에 대해 분석하고, 우리나라에 반영하기 위한 방안을 모색하였다. 궁극적으로는 지역별 기상특성을 가장 잘 반영할 수 있는 USEPA 지침을 활용하는 것이 바람직하겠지만, 이를 위해서는 시간대별 풍속, 풍향, 기온, 태양광 입사량, 운량, 10 m 상공에서의 풍속 및 대기 혼합고 등에 대한 데이터베이스 구축 등 국가적인 관점에서의 장기적인 대책이 필요하다. 반면, ASTM 지침은 비교적 산정식이 간단하고 영향인자 값의 도출이 용이하므로 대상 부지에 대한 추가적인 현장조사만으로도 비산계수를 도출할 수 있는 장점이 있다. 위 두 가지 방법 모두 비산계수 산정에 있어 가장 중요한 요소는 토양입경분포의 최빈값이므로 정확한 부지조사를 통하여 이를 결정하고, 대상 부지의 기타 현장 특성과 가용한 기상자료를 적절히 활용한다면, ASTM에서 제안하는 방법에 따른 비산계수 산출법을 활용하는 것이 현실적으로 가장 적합할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 환경부 “토양·지하수오염방지기술개발사업”의 지원을 받은 과제입니다. 또한 서울대학교공학연구소의 기술적 지원에도 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 김현구, 2005, 기상조건별 비산먼지 관리체계 최적화 연구, 한국 대기환경학회지, **21**(6), 573-583.
- 정재웅, 류혜림, 남경필, 2011, 다양한 위해성평가 방법에 따라 도출한 오염토양 선별기준의 차이에 관한 연구(I): 매체 간 이동현

상 해석에 따른 차이, 지하수토양환경, **16**(2), 12-29.

환경부, 2011a, 토양오염물질 위해성평가지침, 환경부고시 제 2011-139호.

환경부, 2011b, 보도자료: 작년 서울시 미세먼지농도 49  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 최초로 대기환경기준 달성.

Amante-Orozco, A. and Zobeck, T.M., 2002, Clay and Carbonate Effect on Fine Dust Emissions Measured in a Rotating-Tube Dust Generation System, *Proceedings of ICAR5/GCTE-SEN Joint Conference*, International Center for Arid and Semiarid Land Studies, Texas Tech University, Lubbock, Texas, USA.

Ajmone-Marsan, F., Biasioli, M., Kralj, T., Grèman, H., Davidson, C.M., Hursthouse, A.S., Madrid, L. and Rodrigues, S., 2008, Metals in Particle-size Fractions of the Soils of Five European Cities, *Environmental Pollution*, **152**(1), 73-81.

ASTM, 2010, Standard Guide for Risk-Based Corrective Action (Designation: E 2081-00 (Reapproved 2010)), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 95 p.

Brand, E., Otte, P.F., Lijzen, J.P.A., 2007, CSOIL 2000: An Exposure Model for Human Risk Assessment of Soil Contamination, RIVM, Bilthoven, Netherlands, 90 p, RIVM Report 711701054/2007.

Cowherd, Jr., C., Muleski, G.E., Englehart, P.J. and Gillette, D.A., 1985, Rapid Assessment of Exposure to Particulate Emissions from Surface Contamination Sites, USEPA, Office of Health and Environmental Assessment and Office of Research and Development, Washington, DC., USA, EPA/600/8-85/002.

Cox, J.J., 2009, Field Testing a Portable Wind Tunnel for Fine Dust Emissions, MS Dissertation, Texas Tech University, Lubbock, Texas, USA.

McCormick, R.A. and Holzworth, G.C., 1976, Air Pollution Climatology, Stern, A. C., *Air Pollution Volume I: Air Pollutants, Their Transformation and Transport*, Third Edition, Academic Press, New York, NY, USA.

USEPA, 1986, Development of Advisory Levels for Polychlorinated Biphenyls (PCBs) Cleanup, Office of Health and Environmental Assessment, Washington, DC., USA, EPA/600/21.

USEPA, 1991, Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume I - Human Health Evaluation Manual (Part B, Development of Risk-Based Preliminary Remediation Goals), Interim, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC, USA, EPA/540/R-92/003.

USEPA, 1992, User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC2) Dispersion Models: Volume II - Description of Model Algorithms, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC, USA, EPA-450/4-92-008b.

USEPA, 1996a, Soil Screening Guidance: Technical Background Document, Second Edition, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC, USA, EPA/540/R-95/128.

USEPA, 1996b, Soil Screening Guidance, Second Edition, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, USA, EPA/540/R-96/018.

USEPA, 2002a, Record of Decision: Castle Air Force Base (6 Areas) OU 04, EPA/ROD/R09-02/070.

USEPA, 2002b, Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC, USA, OSWER 9355.4-24.

USEPA, 2006, Record of Decision: Coleman-Evans Wood Preserving Co. OU 02, EPA/ROD/R2006040001242.

USEPA, 2009, Exposure Factors Handbook: 2009 Update, Office of Research and Development, and National Center for Environmental Assessment, Washington, DC, USA, EPA/600/R-09/052A.

USEPA Regions 3, 6, and 9, 2012, Regional Screening Levels for Chemical Contaminants at Superfund Sites, available at [http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/rb-concentration\\_table/index.htm](http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/rb-concentration_table/index.htm)