

건설현장의 공사장비에 의한 미세먼지 배출계수 평가

Assessment of PM Emission Factors Made by Construction Machineries

이임학 · 이경빈¹⁾ · 김진식¹⁾ · 김신도^{1),*}

서울시립대학교 도시과학연구원, ¹⁾서울시립대학교 도시과학대학 환경공학과

(2014년 4월 29일 접수, 2014년 6월 5일 수정, 2014년 7월 10일 채택)

Im Hack Lee, Kyoung Bin Lee¹⁾, Jin Sik Kim¹⁾ and Shin Do Kim^{1),*}

Urban Institute, University of Seoul

¹⁾Department of Environmental Engineering, University of Seoul

(Received 29 April 2014, revised 5 June 2014, accepted 10 July 2014)

Abstract

The goals of this study were that we calculated the difference between the emission factors currently used officially and the emission factors that calculated by atmospheric dispersion modeling results and actual field measurements of dust concentrations and that we investigated how we applied to the emission factors appropriate to the reality in Korea. At the results, we calculated the Business As Usual ambient dust concentration concerning U.S. EPA method emissions, and we thought that the emission reduction efficiency had to be 99.7% if the ambient dust concentration that measured in this study could be satisfied. In other words, U.S. EPA dust emission calculation method is very overestimated than reality, so it is important that our country obtain reliable construction site dust emissions estimation methods by continuous researches.

Key words : Construction, Dust, Dispersion modeling, Emission, Factor

1. 서 론

건설현장은 토지정리, 파괴, 굴삭, 운송 등의 공정에서 비산먼지가 발생한다. 건설공사는 다단계의 공정이 특정기간동안 순차적으로 수행되는 특성을 갖고 있으며, 그 과정에서 발생하는 비산먼지의 양은 각 공정의 규모와 기간에 따라 결정된다(NIER, 2010).

건설장비를 이용한 공사로 인하여 미세먼지가 발생하며, 주변 지역 주민에게도 영향을 미칠 가능성이 존재한다. 이로 인해 주변 민원이 발생할 소지가 있으므로 환경영향평가 및 사전환경성 검토 등에서는 대기분산모델링을 수행하여 먼지에 의한 피해여부를 예측한다.

그런데, 지금까지 수행된 건설장비의 오염물질 배출량 산정에 사용되는 배출계수는 대부분이 외국의 배출계수를 사용하였다. 이 때문에, 현업에서 환경영향평가 수행을 위한 대기분산모델링 결과와 현장 먼지 측정결과를 맞추기 위해서는 배출계수는 정해져

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-6490-2860, E-mail : sdkim@uos.ac.kr

Table 1. Average temperature and humidity in measuring period of each point.

Date	6/24				6/25				6/26				6/27			
Weather	Cloud (S) Wind (S)				Cloud (H) Wind (S)				Cloud (H) Fog (S)				Cloud (H) Wind (S)			
Point	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Temp. (°C)	25.2	26.1	25.9	24.7	25.6	25.9	25.6	24.3	24.8	25.2	24.8	23.7	25.7	26.0	26.0	24.2
Hum. (%)	62.9	62.2	64.2	65.7	66.2	67.7	70.0	70.4	71.5	72.4	74.6	74.0	71.8	71.6	72.6	73.1

(S): slightly, (H): heavy

있기 때문에 현실에 맞지 않는 장비의 활동도(대수 혹은 운행거리 등)를 조정해야 하는 경우도 빈번히 발생한다.

Shin *et al.* (2003)은 건설장비와 농기계에서 배출되는 연도별 대기오염 배출량 변화추세를 연구하였는데, 이때 사용된 배출계수는 국립환경과학원 방법으로 건설장비의 배출량을 장비의 정격출력(kw)에 의하여 산정하는 방법으로서 장비활동에 의한 비산먼지 산정에는 한계가 있을 것으로 판단된다.

또한 Chung *et al.* (1999), NIER (2007a) 등의 연구에서도 건설장비 먼지 배출량을 연료의 소비량을 중심으로 연구를 하여 장비의 이동, 토사의 상차/하차 등에 의한 배출량은 연구되지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 현재 공식적으로 사용되는 배출계수에 의하여 산정된 배출량을 입력하여 수행한 대기분산모델링의 결과와 실제 현장에서 측정된 먼지농도를 비교하고, 부지경계선에서의 허용 농도를 만족할 수 있는 공사장 먼지배출계수에 의하여 산출한 배출량을 비교하여 기존의 배출계수와 본 연구에서 산출한 배출계수가 어느 정도의 차이가 있는지를 파악하고 어느 정도의 배출계수를 적용하는 것이 우리나라 현실에 적절한지를 판단하는 것을 연구의 목표로 하였다.

2. 연구 방법

2.1 먼지 배출량 산정과 분산모델링 수행

본 연구방법의 흐름을 설명하면 다음과 같다. 우선 건설 현장에 투입되는 장비와 활동도를 수집하였다. 장비물량, 기존의 배출계수, 활동도를 활용하여 배출량을 산정하였다. 먼지배출량 산정근거는 다음 5가지

Table 2. Sampling instrument and measuring method.

Sampling instrument	Digital dust monitor (Model LD-3, Sibata, Japan)
Measuring principle	Light scattering method
Light Source	Laser diode
Measuring range	0.001 to 10 mg/m ³
Operating temp.	0 to 40°C
Operating humidity	5 to 90% RH
Interval	5 minute

경우에 기인하였다.

- ① 투입장비의 연료사용에 의해 배출되는 미세먼지
- ② 불도저와 백호우의 현장작업으로 인해 발생하는 비산먼지
- ③ 공사장에서 바람으로 인해 발생하는 비산먼지
- ④ 덤프트럭 및 레미콘의 이동시 차륜에 의해 발생하는 비산먼지
- ⑤ 덤프트럭의 토공물량 투하시 발생하는 비산먼지

먼지 배출량을 대기분산모델의 하나인 ISC3 모델에 입력하여 부지경계선 상에서의 기여농도를 구하였다. 다음으로 부지경계선 상에서 측정기를 활용하여 먼지농도를 측정된 후, 모델링 결과 농도와 배경농도를 합한 농도와 비교 검토하였다.

2.2 공사장 주변 먼지측정

먼지측정은 2013년 6월 24일부터 6월 27일까지 경기도 소재 A 건설현장을 대상으로 하였다. 현장 내 작업위치 주변에 총 4개의 지점(동, 서, 남, 북)에서 측정을 수행하였다. 1지점은 건설현장내 현장사무실 앞(동), 2지점은 건설현장내 다른 사업장 쪽 방향의 위치(북), 3지점은 이미 완공되어 운영중인 사업장 쪽 방향의 위치(서), 4지점은 주변지역의 아파트단지

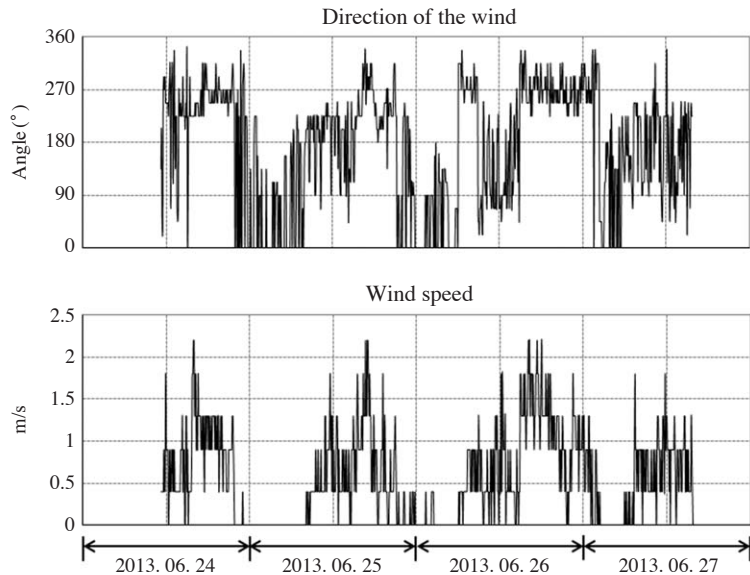


Fig. 1. W.D. and W.S. on the spot.

가 모여 있는 위치(남)이다.

측정기간 동안의 기상 및 평균 온·습도를 표 1에 나타내었다.

본 연구에서 측정하고자 하는 항목은 미세먼지 (Particulate Matter less than $10\ \mu\text{m}$; PM10)이다. 측정에 사용된 측정기기 및 측정방법을 요약하면 표 2와 같다.

시료채취는 Sibata사의 Digital dust monitor인 LD-3를 이용하였으며, 측정원리는 광산란 방식이다. 모든 측정은 활동도의 변화를 추정하기 위해 5분 간격으로 측정하였다. 또한 총질량의 보정을 위해 미세먼지 연속채취기 (PMS-103, APM社, Korea)를 병용하여 사용하였다.

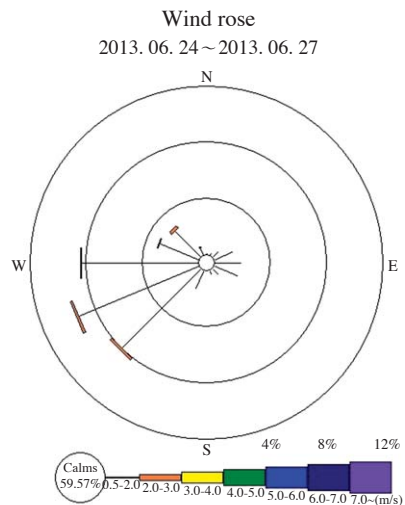


Fig. 2. Wind rose on the spot.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 공사장 주변 먼지농도 측정 분석

공사현장이 주변에 미치는 영향을 판단하기 위한 주요 요소로써 기상자료를 분석하였다. 그림 1은 본 연구의 측정기간인 2013년 6월 24일부터 27일까지 건설현장에서 풍향, 풍속을 측정한 결과이며, 그림 2는 풍배도를 나타낸 것이다. 주풍향은 서풍, 남서풍으

로써 공사현장에서 발생된 오염물질은 주로 동쪽, 북동쪽으로 확산될 것으로 추정된다.

본 연구에서는 공사현장에서 발생하는 미세먼지의 수준을 판단하기 위해서 실시간으로 측정 가능한 측정기기를 이용하여 측정하였다. 그림 3은 본 연구의 측정기간인 2013년 6월 24일부터 27일까지 경기도 소

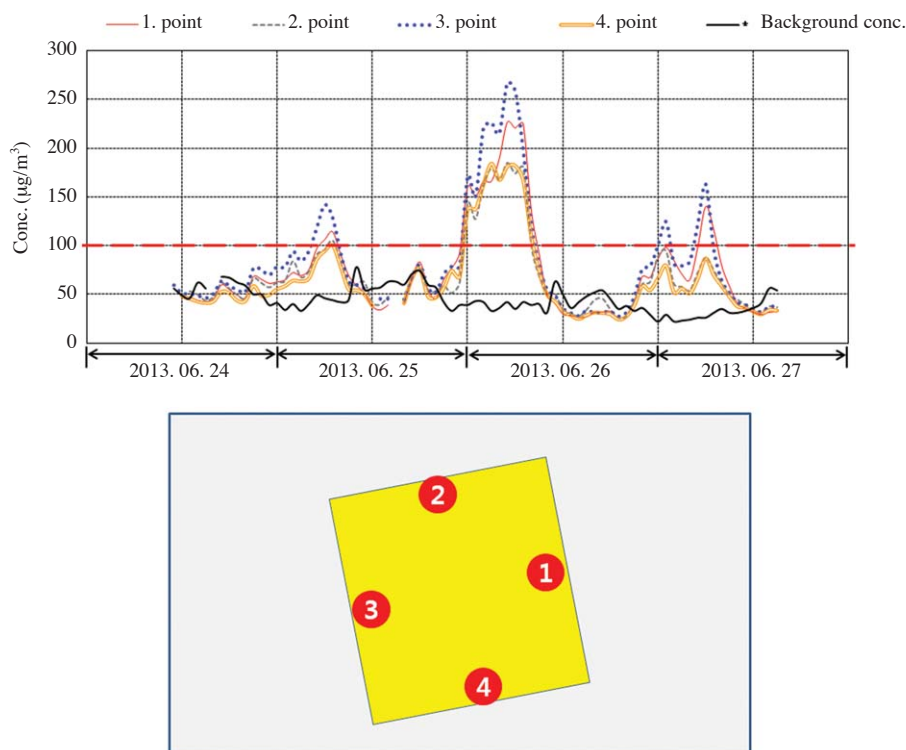


Fig. 3. PM10 results on the spot.

재 A 건설현장의 4 지점에서 미세먼지를 측정된 결과를 나타낸 것이다.

배경농도는 동일 시간대의 경기도 소재 Y 측정소 PM10 자료를 적용하였다.

3.2 모델링 수행결과

배출량산정을 위한 배출계수 적용 시 다음의 원칙을 적용하였다.

- ① 우리나라 NIER 배출계수는 단위가 정격출력 당 배출량으로서 본 연구에서는 연료사용량 당 배출계수를 적용하기 위하여 US EPA의 배출계수를 활용하였다.
- ② 불도저와 백호우의 현장작업, ③ 공사장에서 바람, ⑤ 덤프트럭의 토공물량 투하시 발생하는 미세먼지 배출계수는 국립환경과학원 방법을 사용하였다.
- ④ 덤프트럭 및 레미콘의 이동시 차륜에 의해 발생하는 국내 미세먼지 배출계수인 NIER과 KEI 배출계수는 US EPA 배출계수를 응용한 것으로,

NIER과 US EPA 배출계수의 차이는 크지 않았으나, KEI와 US EPA 배출계수의 차이가 컸기 때문에, 본 연구에서는 원전인 US EPA와 응용하여 제시한 방법 중 KEI 배출계수를 적용하여 비교하는 방법을 사용하였다.

장비별 배출량은 아래의 식(1)과 같이 장비 1대별 PM10 배출량을 계산하였다.

$$\begin{aligned} & \text{PM10 배출량 (g/hr · 대)} \\ & = \text{연료사용량 (L/hr)} \times \text{PM10 배출계수 (g/L)} \quad (1) \end{aligned}$$

공사시 투입되는 공사장비의 배기가스로 인한 오염물질 배출량은 U.S. EPA의 장비별 배출계수를 활용하여 산정하였다.

불도저와 백호우의 현장 작업으로 인해 발생하는 미세먼지의 장비별 배출량은 아래 표 4와 같이 NIER (2007b)에서 제시한 장비별 비산먼지 배출계수 산정식을 활용하였다.

백호우 배출량 산정식의 작업량 Q는 아래 표 5와

Table 3. PM10 emission by fuel consumption.

Equipment type	Fuel consumption (L/hr)	Emission factor of TSP (g/L)	Emission factor of PM10 (g/L)	Emission quantity of PM10 (g/hr)
Bulldozer	45.8	3.03	1.09	49.96
Backhoe (10)	17.7	3.61	1.30	23.01
Backhoe (06)	10.5	3.61	1.30	13.65
Breaker	17.7	3.61	1.30	23.01
Dump truck	23.2	2.12	0.76	17.71
RMC	25.5	2.33	0.84	21.42

Table 4. Calculation fomula of Emission factor.

Equipment type	Emission factor (g/hr · unit)
Bulldozer	$PM_{10}=0.36 \frac{450(s)^{1.5}}{(M)^{1.4}}$
Backhoe	$PM_{10}=0.36 \frac{2.9(d)^{0.7}}{(M)^{0.3}} \times Q$

*M=moisture content (%), s=silt content (%), d=drop height, Q= workload (m³/hr) (applied value : M=8.2%, s=13.8%, d=2 m)

Table 5. Items for calculating the workload of Backhoe.

Items	Definition
Q	Workload (m ³ /hr)
q	Bucket capacity (m ³)
f	Soil volume conversion factor
E	Work efficiency
K	Bucket factor
Cm	Cycle time (sec)

같이 NIER (2007b)에서 제시한 백호우 작업량 산정 식 (2)을 이용하여 산출하였다.

$$\text{백호우 작업량 } Q = \frac{3600 \times q \times K \times f \times E}{C_m} \text{ (m}^3\text{/hr)} \quad (2)$$

토사상차구간, 사토장에서 발생하는 PM10의 양은, 국립환경과학원에서 제시하고 있는 나대지 비산먼지 배출량 산정방법을 적용하였다.

$$\begin{aligned} &\text{나대지배출량 (kg/yr)} \\ &= \text{나대지면적 (m}^2\text{)} \times \text{배출계수 (g/m}^2\text{/yr)} \quad (3) \end{aligned}$$

토사상차 구간과 사토장 간의 덤프트럭 이동경로 산정방법은 비포장 도로에서 차량 이동시 차륜에 의해 발생하는 미세먼지의 배출량 산정 방법으로 우리나라 환경정책평가연구원 (KEI, 2002)과 US EPA

(2011)에서 제안하고 있는 공식으로 산정하였다. 이 중, KEI에서 제안하고 있는 방정식을 나타내면 다음 식 (4)와 같다.

$$E = (1.7)k(s/12)(S/48)(W/2.7)^{0.7}(w/4)^{0.45}[365 - p/365] \quad (4)$$

여기서,

k=0.36 (PM10분율)

s=13.8 (실트함량%)

S=평균차속 (km/hr)

W=트럭 (ton)

p=강우일수

w=바퀴수

덤프트럭에 의해 사토장으로 운송된 토공물량이 투하될 때 발생하는 미세먼지의 배출계수는 NIER (2007b)에서 제시하고 있는 다음 식 (5)에 의해 계산하였다.

$$E = k(0.0012) \frac{\left(\frac{U}{2.2}\right)^{1.3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1.4}} \text{ (g/m}^3\text{)} \quad (5)$$

여기서,

E=배출계수

k=PM10분율

U=평균 풍속 (m/s)

M=수분함량 (%)

사토장에 투하되는 토공물량은 다음 식 (6)과 같이 산출하였다.

$$\text{시간당 토공물량 (m}^3\text{/hr)} = \frac{\text{총토공물량}}{\text{총공사시간}} \times \text{침투계수} \quad (6)$$

모델링의 입력자료로 활용하기 위하여 본 연구에서는 공사장비의 배기가스, 현장 작업으로 인해 발생

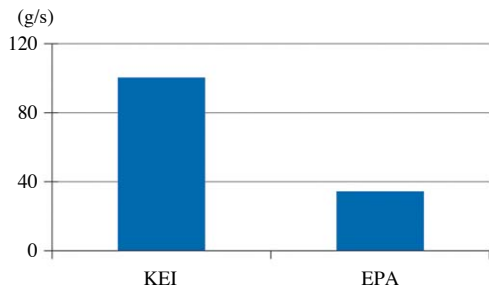


Fig. 4. PM Emission of Business As Usual condition.

하는 장비별 배출, 토사상차구간, 사토장에서 발생, 덤프트럭 이동경로에서의 발생, 토공물량이 투하될 때의 발생 등의 배출량을 통합하는 방법을 사용하였다.

먼지 배출량을 투입되는 장비(굴삭기, 도저), 덤프트럭, 토사상차구간, 사토장으로 나누어 산정한 배출량 결과를 통합하여 KEI 방법과 EPA 방법에 따라서, 그림 4와 같이 그래프로 나타낸 결과, KEI 방법의 결과가 EPA 방법의 결과에 비하여 약 2.8배 높게 나타났다. 배출계수는 ④를 제외하고는 ①~⑤까지 동일한 배출계수를 적용하였다.

그 이유를 알아보기 위하여 KEI 방법과 EPA 방법의 원전을 검토한 결과 KEI 방법의 산정 방정식의

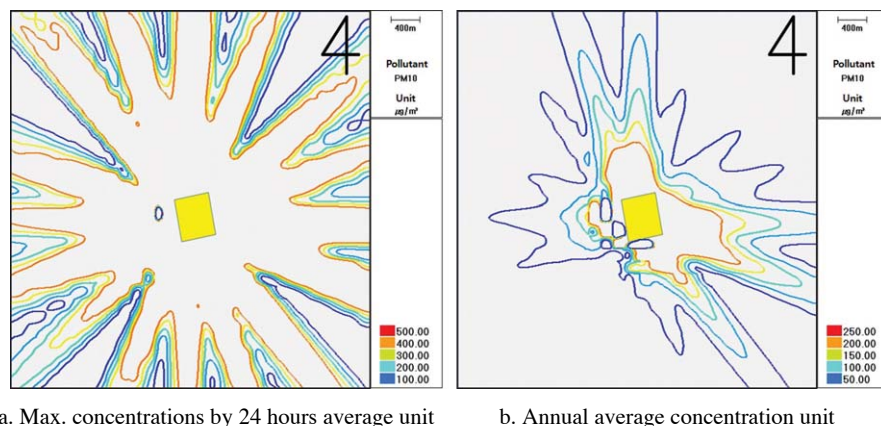


Fig. 5. Modeling results calculated by EPA B.A.U. emissions.

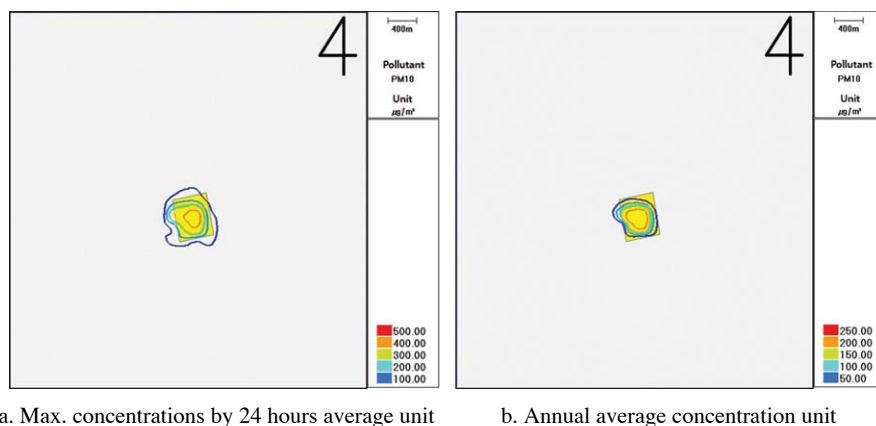


Fig. 6. Modeling results calculated by 99.7% reduced emissions from EPA B.A.U. emissions.

단위가 EPA 단위체제로부터 해석하는 과정 (mile-lb → km-kg)에서의 오류로 발견되었다. 현재 현업에서는 KEI 방법으로 환경영향평가 및 사전환경성 검토를 수행할 소지가 있으므로 이에 대한 수정 작업과 교정의 홍보작업이 필요한 것으로 판단된다.

EPA 방법에 의한 BAU 배출량을 입력하여 수행한 모델링 결과를 나타내면 그림 5와 같다. 일평균 농도의 최대값은 KEI 방법보다는 약했으나, 반경 2.5 km 이내의 지역 대부분이 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 연평균 농도는 공사부지 경계선으로부터 북, 동, 동남쪽으로는 2.5 km까지 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였으나, 서쪽으로는 약 2 km까지 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 것으로 나타났다.

다음으로 1일 기준농도인 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 연평균 기준인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 충족시키기 위한 배출량을 역산하였다. 본 연구에서 측정기간 중 측정했던 배경농도가 $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 추정하여 모델링 배경농도를 $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가정하면 공사장의 1일 기준 기여농도는 $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 연평균 기여농도는 $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 충족시키기 위한 배출량을 EPA 방법의 배출량의 0.3%를 적용하여 모델링을 수행한 결과를 그림 6에 나타내었다.

즉, EPA에서 추천하는 방법으로 수행한 배출량의 저감효율을 99.7%를 저감했을 때, 대기환경기준을 만족할 수 있다는 것이다. 물론 KEI 방법을 적용하면 99.9%의 제거효율을 적용해야만 대기환경기준을 만족할 수 있다고 해석할 수 있다.

이를 측정자료로 검증하기 위하여 EPA 방법으로 산정한 BAU 배출량의 0.3%를 적용한 모델링 결과와 현장의 PM10 측정결과와의 비교분석 그래프를

그림 7에 나타내었다.

6월 26일 03시~06시의 3번 측정소 좌표에서의 모델링 결과의 평균과 측정결과가 차이가 적음을 알 수 있었다. 따라서, 실측값과 동일한 날짜와 지점에서 모델링 결과농도를 비교하여, 배출계수 적정성을 평가하는 방법이 필요할 것이다.

현재 알려져 있는 저감방법으로 99.7%의 공사장 먼지 저감효율을 달성할 수 있을지 검토할 필요가 있다.

첫 번째, US EPA (2011)은 비포장 도로의 함수율을 5%까지 올리면 먼지제어 효율을 95%가 될 수 있음을 보고하였다. 따라서, 본 연구의 추가 저감방안에서는 덤프트럭 이동경로의 함수율을 9% 이상으로 유지하여 덤프트럭의 차륜에 의한 먼지발생량 제거 효율을 95%로 함을 첫 번째로 제안한다.

두 번째로, Jang *et al.* (1999)은 건설공사장에서 방진망의 설치로 먼지 배출량을 저감할 수 있음을 보고하였다. 따라서, 본 연구에서는 추가 저감방안의 두 번째로 토사상차 시, 토공물량 투하시 등에서 방진망의 설치를 제안한다.

세 번째, 국내·외 공사장 및 비포장도로에서는 화학 안정제가 상용화되어 활용되고 있다. 그러나, 본 연구에서 조사 대상으로 설정한 공사현장에서는 화학안정제를 사용하지 않았으며, 방진막, 방진망은 주로 부지경계선에 설치되어 공사장 내부에서 측정하는 먼지농도의 저감에서는 거의 영향을 미치지 못했을 것으로 사료되었다.

이상의 조치를 모두 긍정적으로 가정하여도 99.7

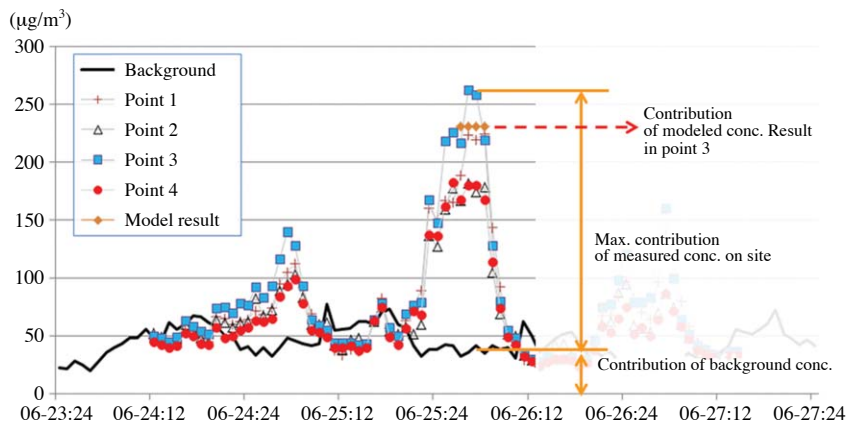


Fig. 7. Modeling results verification calculated by 0.03 % emissions of EPA B.A.U. emissions.

%의 저감은 상당히 납득할 수 없는 점이 많다. 왜냐하면 Laitinen *et al.* (1997)은 습식 스크러버의 방지장치효율도 60%를 넘지 못한다고 보고하고 있으며, Hong *et al.* (1997)은 강수전후 대기 중 먼지농도 차이가 분석에서 강수에 의한 먼지농도 저감율이 38%에 그친다고 보고하였기 때문이다.

그래서 현행 환경영향평가서에서는 사용장비의 수를 줄이거나 배출량을 일부 누락시켜서 만족하는 듯이 표현되는 경우가 많다. 따라서 배출계수를 조정하여 실제 현장에 맞는 조치가 이루어지도록 하여야 할 것이다.

4. 결 론

현재 공식적으로 사용되는 배출계수에 의하여 산정된 배출량을 입력하여 수행한 대기분산모델링의 결과와 실제 현장에서 측정한 먼지농도를 고려하여 부지경계선에서의 허용 농도를 만족할 수 있는 공사장 먼지배출계수에 의하여 산출한 배출량을 입력하여 계산한 모델링 결과를 비교하여 기존의 배출계수와 본 연구에서 산출한 배출계수가 어느 정도의 차이가 있는지를 파악하고 어느 정도의 배출계수를 적용하는 것이 우리나라 현실에 적절한지를 검토하였다.

EPA에서 제시하는 공사장 미세먼지 배출량 산정방법이 현실보다 매우 과대평가되고 있다고 판단되므로, 향후 우리나라의 공사장 미세먼지 배출량 산정방법 도출을 위한 연구가 시급히 요구된다.

감사의 글

이 논문 또는 저서는 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2012S1A5B8A03045234).

References

- Chung, I.-R., M.-D. Eom, J.-H. Yoo, and C.-S. Lim (1999) A Study on the Estimation of Exhaust Emission by Nonroad Construction Equipment, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 15(3), 317-325. (in Korean with English Abstract)
- Hong, N., G. Lee, Y. Park, C. Park, K. Ham, J. An, G. Choi, and S. Park (1997) Variation of Air Pollutants Concentration by the Effect of Precipitation at Chunchon, Rep. Inst. Health & Environ., 8, 86-92. (in Korean with English Abstract)
- Jang, Y., H. Kim, and S. Kim (1999) A study on the effectiveness in construction site, Architectural Institute of Korea, 15(6), 189-196.
- KEI (Korea Environment Institute) (2002) A study on Reasonable Estimation and Assessment Method of Environmental Impact, Korea Environment Institute. (in Korean with English Abstract)
- Laitinen, A., J. Hautanen, and K. Keskinen (1997) Effect of the space charge precipitation on wet scrubber fine particle removal efficiency, J. Aerosol Sci., 28(1), 287-288.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2007a) A Study on the Calculation of Pollutant Emission Factors for Vehicles (V) - Calculation of Pollutant Emission Factors for Construction equipment.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2007b) Improvement of emission estimate methods for amount of fugitive dust and development of real time measuring method on road dust emission (I).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2010) National air pollution emissions calculation methods handbooks.
- Shin, M.-K., H.-J. Kim, Y.-K. Jang, and J.-H. Hong (2003) Annual Trends of Air Pollution Emission from Construction and Agricultural Equipments, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 19(6), 805-810. (in Korean with English Abstract)
- US EPA (2011) AP42, Section 13.2.2 Unpaved Roads.