Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 35, No. 3, June 2019, pp. 346-356
https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.3.346
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

논 문

외부에서 도시공간으로 유입된 고농도 미세먼지 저감을 위한 공기정화 탑과 차량부착 정화장치의 효과 추정

Estimating the Reduction Amount of the High Level Particulate Matter Concentrations, Caused by External Transport, by Operating Air Cleaning Tower Buildings or Cleaning Devices Installed on Vehicles in Urban Ambient Air

김석철*, 윤정임
(주)볼트시뮬레이션

Seogcheol Kim*, Jeongim Yun
BOOLT Simulation, Inc

접수일 2019년 4월 8일
수정일 2019년 5월 29일
채택일 2019년 6월 3일

Received 8 April 2019
Revised 29 May 2019
Accepted 3 June 2019

***Corresponding author**
Tel : +82-(0)2-3477-1963
E-mail : sckim@boolt.co.kr

Abstract The effectiveness of the direct ambient air cleaning devices such as the fine particle cleaning tower buildings or vehicle installed filter devices is assessed in the metropolitan Seoul area for the periods of the highly polluted air entrain from abroad. A conceptual model similar to the traditional box model is derived to analyze the dynamics of the particulate matter concentration averaged over the modeling domain, here the metropolitan Seoul with those cleaning devices applied. The effectiveness of the devices is sensitively dependent upon the wind speed and mixing height: the lower the mixing height and the lower the wind speed are, the greater the effects are. The overall performance of the cleaning tower buildings is estimated fairly poor, for number of million orders of units are required to reduce the ambient air dust concentration level down to 1/10 of the initial ambient value during night, while number of ten million orders of units, required for day time. The vehicle installed devices appears to be the better option. When the devices are installed to all 200,000 commercial vehicles registered in Seoul, the ambient dust concentrations are reduced by 39% under the calm wind conditions in night, which is about the maximum possible reduction.

Key words: Box model, Particulate matter, Ambient air cleaning devices

1. 서 론

국내·외 환경정책의 방향이 '안전과 건강' 중심으로 진행되는 상황에서 미세먼지 예·경보제에 따라 실시간 농도현황 정보가 공개되며 일반인들이 미세먼지 측정결과를 접할 기회가 많아졌다. 이에 더하여 몇 해 전부터는 고농도의 미세먼지 발생이 지속되며 미세먼지에 대한 국민적 관심이 고조되고 있다. 미세먼지에 대한 노출을 줄이기 위해 개인차원의 자구책으로 실내용 공기청정기와 마스크의 사용은 이제 보편화되고 있는 추세이다. 실외의 경우 고농도의 미세먼지 발생 시 발생원을 규제하는 차원에서 차량을 제한하거나 석탄발전소 운영율을 낮추는 등의 저감대책이 시행되고 있다. 그럼에도 불구하고 고농도의 미세먼지 체감오염도 개선은 미미한 수준이다.

미세먼지는 한국, 중국뿐만 아니라 유럽에서도 심각한 문제로 부상하고 있다. 실례로 파리, 런던 등 주요 도시가 미세먼지 발생의 주요 원인인 경유차를 퇴

출할 정도로 미세먼지로 인한 대기오염을 개선하기 위해 노력하고 있다. 이외에도 실외에 공기정화 탑을 설치하거나 자동차 배기가스를 걸러내는 필터를 응용해 미세먼지로 오염된 도시 공기를 깨끗하게 정화하려는 시도가 세계 여러 곳에서 진행되고 있다는 언론보도가 있다. 격리된 공간에서 운용되는 실내용 공기청정기와는 달리 실외용 미세먼지 저감장치는 대상공간이 개방되어 있기 때문에 효과를 정량적으로 가늠하기가 현실적으로 어렵다. 아울러 외기용 정화장치를 도시공간 전체에 적용하는 방안은 상대적으로 최근에 거론되기 시작하였기 때문에 관련 연구가 많지 않다. 그 결과, 외기용 정화장치의 운용효과를 평가할 수 있는 이론이나 모델에 대한 연구사례는 현재까지 찾아보기가 어렵다.

박스모델(box model)은 모델링 대상공간의 평균농도를 묘사할 수 있는 대기질 모델이다. 모델링 대상공간 내 위치별 농도변화를 구분하지 않기 때문에 모델형태는 단순하지만 명시해야 할 모델링 파라미터가 적어 제한된 입력정보만으로 공간평균 농도를 표현할 수 있어 기능적이다. 평균 오염농도에 기초한 도시지역 대기오염에 관한 해외 연구에서 박스모델이 사용된 바 있다(Dirks *et al.*, 2003; Jorquera, 2002a, b). 국내에서도 Kim and Joh (2005)는 박스모델을 구성하여 서울시 평균농도의 시간별 변화를 모델링한 바 있다. 모델링 정확도는 오염물질에 따라 상이하였는데, 서울시 측정소 평균농도에 대한 박스모델의 RMSE (Root Mean Square Error)는 16%~32% 사이인 것으로 나타났다.

본 연구에서는 도시공간의 미세먼지를 저감하기 위한 방안으로 최근에 거론되고 있는 공기정화 탑과 차량탑재형 공기정화 장치의 효과를 추정하였다. 외부에서 도시공간 내부로 고농도 미세먼지가 유입되는 조건에서 외기에 대한 공기정화 장치의 효과를 계량할 수 있도록 분석모델을 만들었다. 특별히 중국 등지로부터 고농도의 미세먼지가 한반도로 유입되는 상황을 고려하였다. 현상 변수의 가장 큰 자릿수(order of magnitude)를 맞추는 수준의 개략적인 추산을 위해 전통적인 박스모델 구성이론(Sportisse, 2001; Seinfeld and Pandis, 1998)을 토대로 국내 도시공간에 적용 가능한 미세먼지 농도모형을 구성하였다.

2. 미세먼지 농도모형의 구성

대기 중 미세먼지 농도 $C(t,\vec{r})$는 시간(t)과 3차원 공간벡터($\vec{r}$)의 함수이다. $C(t,\vec{r})$에 대해서 다음 방정식이 성립한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}C + \nabla \cdot C(\vec{v} - \overrightarrow{v_{\perp}}) = \dot{E} - \dot{R} \quad (1)$$

여기서 $\vec{v}$는 3차원 기류벡터이고, $\overrightarrow{v_{\perp}}$는 미세먼지의 침강속도 벡터이다. 침강속도 벡터는 중력 방향을 향하고 그 크기는 미세먼지의 공기역학적 직경과 밀도에 따라 달라진다. 식(1)에서 $\dot{E}$와 $\dot{R}$는 각각 미세먼지 생성 항과 소멸 항으로 단위공간 당 미세먼지 질량의 생성 및 소멸 속도이다. 생성 항과 소멸 항의 단위는 MKS 단위계에서 kg/m^{3}s이다. 유한한 체적을 지니는 임의 형태의 공간(Q)에 대해서 식(1)을 적분하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}\left(\overline{C}^{Q}Q\right) + \overline{C_o v_o}^{A}A_o - \overline{C_i v_i}^{A}A_i + \overline{C_{\perp} v_{\perp}}^{A}A_{\perp} = \overline{\dot{E}}^{Q}Q - \overline{\dot{R}}^{Q}Q \quad (2)$$

여기서 A_i는 기류가 공간 Q로 유입되는 단면적이고, A_o는 유출단면적이며, $A_{\perp}$는 침강단면적으로 공간 Q의 바닥면적이다. 식(2)에서 연산자 over-line ($\overline{\phi}^{Q}$)와 over-line ($\overline{\phi}^{A}$)는 각각 공간(Q)과 면적(A)에 대한 적분평균으로 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{\phi}^{Q} = \frac{1}{Q}\int_{Q} \phi \, \delta Q \quad (3)$$

$$\overline{\phi}^{A} = \frac{1}{A}\int_{A} \phi \, \delta A \quad (4)$$

공간의 크기가 유한하고 시간에 대해서 고정된 경우 식(2)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Q\frac{d\overline{C}}{dt}+\left(\overline{C_o}-\overline{C_i}\right)\overline{v}A+\overline{C_\perp v_\perp}A_\perp = \dot{\overline{E}}Q-\dot{\overline{R}}Q \quad (5)$$

한편, 기류벡터($\vec{v}$)에 대해서는 다음과 같이 질량 보존 법칙이 성립한다.

$$\nabla\cdot\vec{v}=0 \quad (6)$$

식(6)을 공간 Q에 대해서 적분하면 다음의 관계가 성립한다.

$$\overline{v_o}^{A}A_o-\overline{v_i}^{A}A_i=0 \quad (7)$$

본 연구에서 도시 대기공간 Q는 하부 면은 지면이고, 상부 면은 역전층인 공간으로 설정하였다. 따라서 Q의 하부와 상부를 통해서 기류가 차단되고, 기류 유입 및 유출은 지면에 평행한 바람에 의해서 발생한다. 이때 공간 Q의 형태는 육면체, 곧 전통적인 박스 형태가 아니어도 무방하다. 공간 Q의 유입 및 유출 단면적은 동일하다고 가정한다.

$$A_i=A_o=A \quad (8)$$

식(7)과 식(8)로부터 다음 등식이 성립한다.

$$\overline{v_o}^{A}=\overline{v_i}^{A}=\overline{v} \quad (9)$$

공간 Q로 유입되는 미세먼지 농도는 배경대기 농도이고, 모델링 공간 내의 농도편차를 무시하는 박스 모델 이론에 따라 유출농도($\overline{C_o}^{A}$)와 지면 근처의 침강농도($\overline{C_\perp}^{A}$)는 Q 공간 내 평균농도($\overline{C}^{Q}$)와 같다고 가정한다. 이러한 가정 하에 식(8)과 식(9)를 이용하면 식(5)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Q\frac{dC}{dt}+CvA-C_BvA+Cv_\perp A_\perp=\dot{E}Q-\dot{R}Q \quad (10)$$

여기서 C_B는 배경대기 농도이다. 식(10)의 각 항에서 연산자 over-line 표시는 생략하였다. 미세먼지의 침강속도($v_\perp$)는 풍속(v) 비해서 일반적으로 매우 낮다. 도시공간 Q에서 침강에 의해 소멸되는 미세먼지 양은 배출이나 화학반응에 의한 생성량에 비해 미미하다. 따라서 식(10)에서 좌변의 네번 째 항은 무시할 수 있다. 실외 공기정화 장치 가동이 절실한 고농도 이벤트는 중국 등의 해외에서 유입되는 배경농도가 매우 높을 경우에 자주 발생한다. 이에 본 연구에서는 유입농도가 매우 높은 경우를 분석 대상으로 설정하였다. 즉, 배경농도가 매우 높을 때 공기정화 탑과 같은 설비에 의한 직접적인 외기정화 효과를 살펴보기 위해서 식(10)에서 생성 항($\dot{E}Q$) 또한 무시한다.

공기정화 탑이나 차량탑재형 공기정화 장치는 모두 필터에 의해서 미세먼지를 제거한다. 제거되는 미세먼지량은 필터를 통과한 공기에 포함된 미세먼지 총량에 필터의 제거효율을 곱한 값으로 다음과 같이 산출될 수 있다.

$$\dot{R}Q=\eta F_R C \quad (11)$$

식(11)에서 η는 필터효율($0\leqq\eta\leqq1$)이며, F_R은 단위시간당 필터를 통과한 공기량, 곧 처리풍량이다. MKS 단위계에서 처리풍량 F_R의 단위는 m^3/s이다. 이상의 조건 하에서 식(10)은 다음과 같다.

$$\frac{dC}{dt}+\left(\frac{F+\eta F_R}{Q}\right)C=\frac{F}{Q}C_B \quad (12)$$

식(12)에서 F(=Av)는 바람에 의해서 도시공간(Q)으로 유입되는 풍량, 곧 유입풍량이다. 초기농도가 배경농도와 같은 경우 식(12)를 만족하는 미세먼지 농도는 다음과 같다.

$$C(t)=\left[\frac{\eta F_R}{F+\eta F_R}e^{-\left(\frac{F+\eta F_R}{Q}\right)t}+\frac{F}{F+\eta F_R}\right]C_B \quad (13)$$

3. 분석모델에 대한 고찰

식(13)에서 농도는 시간이 경과하면서 지수함수적으로 감소하여 일정한 값으로 수렴한다. 충분한 시간이 흘러 도달하는 최종농도, 곧 $\frac{F}{F+\eta F_R}C_B$을 여기서는 수렴농도라고 명명한다. 장치의 처리풍량(F_R)에 장치의 미세먼지 제거효율, 곧 필터효율(η)을 곱

한 값은 미세먼지가 완전히 제거된 풍량으로 해석될 수 있다. 이를 장치의 정화풍량이라고 명명한다. 곧 ηF_R는 정화풍량이다. 외기의 유입풍량(F)에 비해서 장치의 정화풍량(ηF_R)이 클수록 수렴농도는 낮아진다. 흥미로운 점은 장치에 의해 완전히 정화되는 공기량, 곧 정화풍량이 바람에 의해 도시공간 내로 유입되는 풍량과 동일한 경우에도($\eta F_R = F$), 수렴농도는 초기농도의 절반에 그친다는 점이다.

수렴농도는 도시공간 규모(Q)에 무관하지만 농도의 감소속도는 도시공간 규모(Q)에 따라 달라진다. 유입풍량 혹은 정화풍량에 비해 도시공간 규모가 작을수록 농도는 빠르게 감소한다. 이하 논의를 위해 특별한 시간단위를 다음과 같이 도입하였다.

$$t_{R0} = \frac{Q}{\eta F_R}\ln 2 \tag{14}$$

t_{R0}는 풍속이 '영'일 때 농도가 초기농도의 절반이 되기까지 소요되는 시간임을 식(13)으로부터 확인할 수 있다. 곧 t_{R0}는 무풍 농도 반감기이다. 식(14)를 식(13)에 대입하면 다음 표현식을 얻는다.

$$C^*(t^*) = \frac{1}{1+F^*}e^{-\ln 2(1+F^*)t^*} + \frac{F^*}{1+F^*} \tag{15}$$

식(15)에서 C*, t*, F*는 각각 배경농도(C_B), 무풍 반감기(t_{R0}) 그리고 정화풍량(ηF_R)을 단위로 사용하여 표현한 무차원의 농도, 시간 그리고 유입풍량으로 다음과 같다.

$$C^* = C/C_B \tag{16}$$

$$t^* = t/t_{R0} \tag{17}$$

$$F^* = F/(\eta F_R) \tag{18}$$

무차원 시간에 따른 무차원 농도변화를 그림 1에 제시하였다. 그림 1에서 수평축(t^*)은 t_{R0} 단위의 시간이고, 수직축(C*)은 C_B단위의 농도이다. 각 축의 변수는 무차원화된 양이다. 여러 경우의 풍량(F*)에 대해서 농도변화를 표시하였다. 여기서 풍량 F*는 유입풍량(F)을 정화풍량(ηF_R)으로 나눈 것으로 무차원화된 값이다.

무차원 농도는 무차원 시간이 경과함에 따라 지수

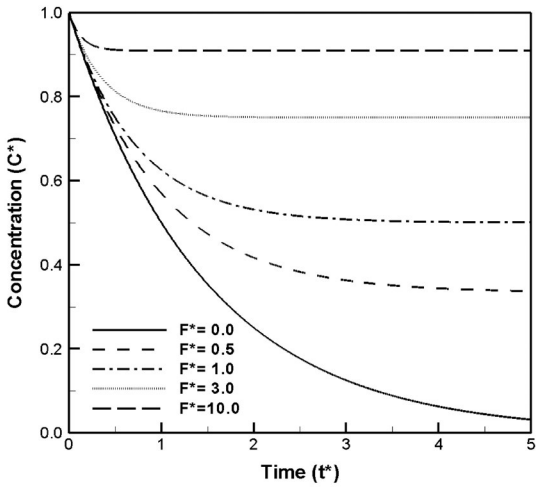

Fig. 1. Normalized concentrations versus normalized time for various inflow rate.

함수 형태로 감소하여 일정한 값으로 수렴한다. 시간 경과에 따른 농도의 감소 속도와 최종 수렴농도는 풍량(F*)에 따라 달라진다. 풍량(F*)이 클수록 무차원 시간 기준으로 최종 농도에 더 빨리 도달하고 최종 농도는 더 높다. 즉, 무차원 풍량(F*)이 적을 때 농도가 더 많이 감소한다. 무차원 풍량(F*)은 유입풍량을 정화풍량으로 나눈 값이므로 무차원 풍량(F*)이 적은 경우는 유입풍량이 적거나 정화풍량이 많을 때이다.

식(15)으로부터 수렴농도는 다음과 같이 주어진다.

$$C_f^* = \frac{F^*}{1+F^*} \tag{19}$$

수렴농도 C_f^*는 풍량 F*에 의해서만 결정되고, 다른 조건, 예컨대 공간의 크기(Q)에는 전혀 영향을 받지 않는다. 풍량 F* 변화에 따른 수렴농도(C_f^*)를 그림 2에 제시하였다. 풍량 F*이 클수록 수렴농도가 더 높다. 수렴농도가 높다는 것은 장치에 의한 정화효과가 낮다는 것을 의미한다. 풍속이 클수록 F*가 커진다. 따라서 나머지 조건이 동일할 경우, 바람이 강할수록 정화효과는 작다. 그림 2에서 F*의 변화에 대한 수렴농도의 변화를 살펴보면 F*가 1일 때 F* 증가에

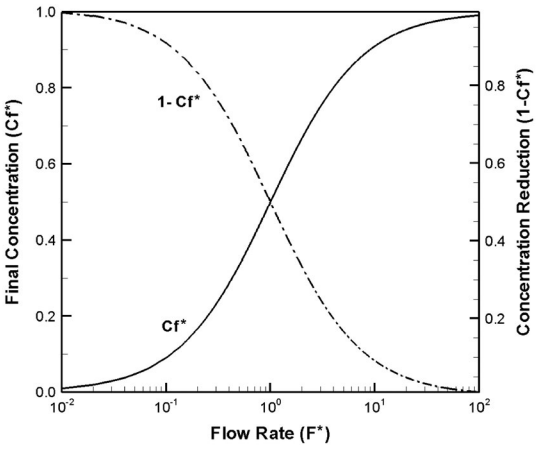

Fig. 2. Normalized final concentration and concentration reduction versus normalized inflow rate.

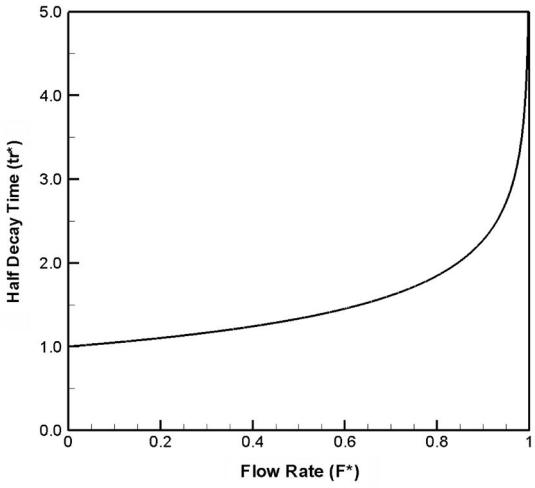

Fig. 3. Normalized half decay time of concentration versus normalized inflow rate.

따른 수렴농도의 증가폭이 가장 크다. 개략적으로 F*가 0.1보다 크고 10보다 적은 범위에서 F* 증가에 따라 수렴농도는 급격히 증가한다. 이 범위를 벗어나면 수렴농도는 F*에 크게 영향 받지 않는다. 수렴농도가 초기 값, 곧 배경농도의 1/10이 되는 F*의 값은 1/9이다. 대체적으로 정화풍량이 유입풍량보다 10배가 될 경우 수렴농도가 초기농도의 1/10이 된다.

농도가 절반으로 감소하기까지 소요되는 시간, 곧 농도 반감기는 식(15)로부터 계산된다.

$$t^*_R = \frac{1-\ln(1-F^*)/\ln 2}{1+F^*} \tag{20}$$

풍량 F* 변화에 따른 반감기(t_R^*)를 그림 3에 제시하였다. 그림 3을 살펴보면 F*가 증가하면 반감기도 증가한다. 반감기는 F*의 증가에 따라 처음에는 완만하게 증가하는데 증가속도가 증가하여 F*가 1 근처일 때 급격히 증가한다. F*가 0.9 이하일 때 반감기(t_R^*)는 대략 1과 2 사이의 값을 갖는다.

반감기는 수렴농도가 초기농도의 절반 이하인 경우에 한해서 정의될 수 있다. 풍량 F*가 1보다 큰 경우에는 수렴농도가 초기농도의 절반보다 크기 때문에 반감기 t_R^*가 존재할 수 없다. 따라서 반감기는 발생가능한 모든 상황에 대해 적용할 수 있는 시간척도가 될 수 없다. 한편, 수렴농도에 도달하기 위해서는 무한대의 시간이 요구되므로 수렴농도 도달시간 또한 적합한 척도가 될 수 없다.

이에 모든 상황에 적용 가능한 시간척도를 정의하였다. 최대 농도감소량을 기준으로 특정 수준까지 농도가 감소하는데 소요되는 시간을 식(15)로부터 계산할 수 있다.

$$t^*_a = -\frac{\ln(1-a)}{\ln 2}\frac{1}{(1+F^*)} \qquad (0 \leqq a \leqq 1) \tag{21}$$

여기서 a는 최대치를 기준으로 표시한 농도감소 비율이다. a는 농도감소량을 최대 농도감소량으로 나눈 값으로 다음과 같이 정의하였다.

$$a = \frac{1-C^*}{1-C_f^*} \tag{22}$$

풍량 F* 변화에 따른 t_a^*를 그림 4에 제시하였다.

감소비율(a)이 높을수록 감소시간(t^*_a)은 더 증가한다. 식(22)에서 확인할 수 있듯이 감소시간(t^*_a)은 $-\ln(1-a)$에 비례한다. 감소비율(a)이 최대치 1에 접근하면 t^*_a는 무한대로 증가한다. 그 결과, 그림 4에 제시된 바와 같이 감소비율이 높을수록 그래프 간 간격이 더 벌어지게 된다. 즉, 시간이 경과되어 농도

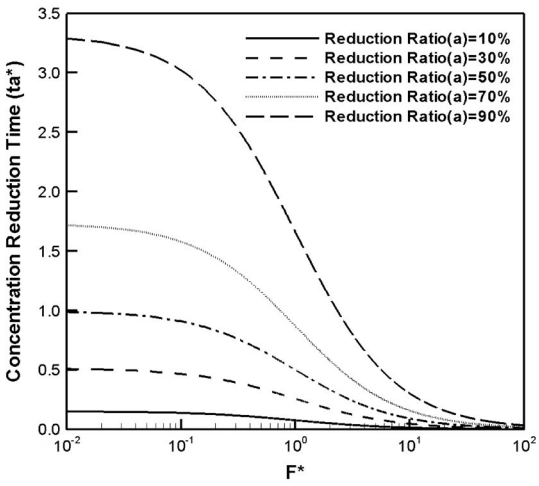

Fig. 4. Normalized reduction time of concentration versus normalized inflow rate.

가 낮아질수록 농도감소 속도가 느려지는데 최저 농도에 근접하면 농도감소 속도는 거의 '영'이 된다. F*가 0.1보다 크고 10보다 적은 범위에서 F* 증가에 따라 감소시간(t^*_a)은 급격히 감소한다. 이 범위를 벗어나면 감소시간(t^*_a)은 F*에 민감하게 영향받지 않는다.

4. 사례분석: 서울시

미세먼지에 대한 공기정화 장치의 효과를 분석하기 위해 서울특별시를 사례지역으로 선정하여 분석모형을 적용하였다. 공간규모를 산정하기 위해서는 도시 면적과 혼합층 높이가 필요하다. 서울시의 면적은 605.24 km^2 (SMC, 2018)이며, 길이는 동서방향으로 36.78 km이고 남북방향으로 30.3 km (https://opengov.seoul.go.kr/civilappeal/2894456)이다.

대기혼합고(H_{mix})는 하루 주기로 변화가 크다. 대기상태가 불안정하여 혼합이 왕성하게 진행되는 혼합층의 높이는 주간에 최고 1~2 km에 도달한다. 본 연구에서는 주간 대기혼합고를 1.5 km로 설정하였다. 서울과 같은 도시공간에서는 야간에 대기가 성층화되는 조건 하에서도 건물 등에 의한 혼합이 지면에서 가까운 고도까지는 항상 발생한다. 이러한 운동학적 혼합고도(mechanical mixing height)는 100 m 정도이다. 공간규모 Q는 단면적에 혼합층 높이를 곱하여 산출할 수 있다. 서울의 경우 주간에는 $Q = 9.0786 \times 10^{11}$ m^3, 야간에는 $Q = 6.0524 \times 10^{10}$ m^3 가량으로 추정된다.

유입풍량은 평균 풍속에 유입단면적을 곱하여 산출할 수 있다. 서울의 유입단면적은 주간 남풍 혹은 주간 북풍의 경우 $A = 5.517 \times 10^7$ m^2이고, 주간 동풍 혹은 주간 서풍의 경우 $A = 4.545 \times 10^7$ m^2가량이다. 대수평균하면 서울의 주간 유입단면적은 $A = 5.031 \times 10^7$ m^2로 추정할 수 있다. 동일한 방법으로 서울의 야간 유입단면적을 추정하면 $A = 3.354 \times 10^6$ m^2이다. 서울의 연간 평균 풍속은 2.2 m/s이다(KMA, 2017). 유입 평균 풍량을 기상관측 평균 풍속과 유입면적의 곱으로 추정하면 서울의 경우 주간에는 $F = 1.107 \times 10^8$ m^3/s이고, 야간에는 $F = 7.379 \times 10^6$ m^3/s이다.

이상의 조건으로부터 정화풍량(ηF_R)의 변화에 따른 수렴농도($C^*_f = C_\infty / C_B$)와 농도감소 시간(t_a^*)을 식(20)과 식(22)를 적용하여 추정할 수 있다. 그림 5는 수렴농도와 정화풍량의 관계를 도시한 것이다. 수평축은 정화풍량으로 단위는 m^3/s이다. 수직축은 수렴농도를 초기농도로 나눈 값으로 무차원이다. 초기농도가 100 μg/m^3이고 정화장치를 가동하여 대기중의 미세먼지 농도를 10 μg/m^3으로 낮추고자 한다면, 그림 5의 수직축이 값 0.1에 해당하는 x 축의 값이 정화장치의 정화풍량이다. 1/10로 농도를 낮추기 위해서는(즉, 100 μg/m^3을 10 μg/m^3으로 낮추기 위해서는) 주간의 경우 정화풍량은 약 1×10^9 m^3/s이고, 야간의 경우 약 6×10^7 m^3/s이어야 한다.

본 연구에서 정화풍량은 처리풍량에 필터효율을 곱한 값으로 정의하였다. 필터효율이 모든 장치에서 일정하다고 가정할 경우 정화풍량은 처리풍량에 정비례한다. 따라서 풍속이 동일한 조건하에서 미세먼지 농도를 동일한 수준까지 저감하기 위해서는 주간의 경우 장치에 의해 처리해야 하는 풍량이 야간보다

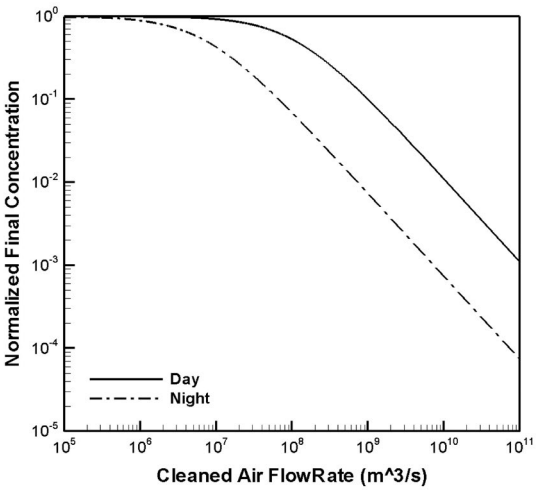

Fig. 5. Normalized concentrations (C_f^*/C_B) versus the device cleaned air flow rate (m^3/s).

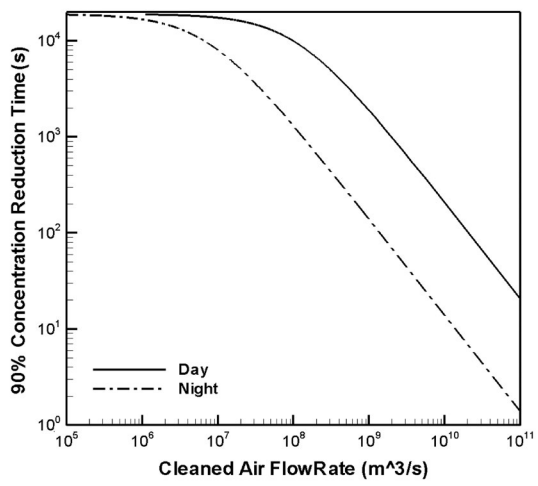

Fig. 6. The 90% concentration reduction time(s) versus the device cleaned air flow rate (m^3/s).

약 17배 더 많아야 한다.

90% 농도감소 시간, 곧 식(22)에서 a = 0.9에 해당하는 시간으로 최대 농도감소량의 90% 수준까지 감소하는데 소요된 시간을 그림 6에 제시하였다. 수평축은 정화풍량으로 단위는 m^3/s이다. 수직축은 90% 농도감소 시간으로 단위는 초이다. 주간의 경우 정화풍량이 $10^9\ m^3/s$일 때 90% 농도감소 시간은 약 200초이다. 야간의 경우 정화풍량이 $6\times10^7\ m^3/s$일 때 2,000초이다. 결과적으로 같은 수준의 미세먼지 농도저감을 위해서는 주간에 비해 야간에는 10배 더 긴 시간이 소요된다.

이상의 결과를 종합하면, 평균 풍속 2.2 m/s의 기류에 의해서 유입되는 미세먼지 농도를 1/10 수준으로 낮추는 데에 필요한 정화풍량은 서울로 유입되는 외기의 약 10배이다. 이런 크기의 정화풍량을 설비를 사용하여 현실적으로 달성할 수 있는지 가늠해 볼 필요가 있다.

미세먼지 농도를 낮추기 위해 개방된 공간에서 외기를 직접적으로 정화하는 공기정화 탑이 운용된 사례는 아직까지 별로 알려진 바가 없다. 다만 중국 산시성 시안에 약 60미터 높이의 스모그제거 탑이 건립되었고, 그 운용효과가 2018년 초 언론(SBS)을 통해서 보도된 바 있다. 보도 자료에 따르면 시안 스모그제거 탑은 일일 $5\times10^6\ m^3$의 공기를 처리하고, 필터 효율은 80%이다. 이로부터 시안 스모그제거 탑의 정화풍량을 계산하면 $46\ m^3/s$이다. 시안 스모그제거 탑과 유사한 성능의 설비를 서울에 설치한다고 가정할 경우, 대기혼합고가 높은 주간에 유입공기의 오염농도를 1/10 수준으로 낮추기 위해서는 약 2,000만 ($=1\times10^9/46=2.1\times10^7$) 대가 필요하다. 대기혼합고가 낮은 야간의 경우에는 약 100만($=6\times10^7/46=1.3\times10^6$)대가 필요한 것으로 추정된다. 만약 유입 오염농도를 10%만 줄이고자 한다면 주간의 경우 270,000대, 야간의 경우 16,000대가 필요하다.

이는 비현실적인 대수이므로 보다 적은 수의 현실적인 대책으로 시안 정화탑과 동일한 성능의 설비를 10,000대 서울에 설치한다고 가정하고 그 효과를 보다 자세히 추정해 보았다. 정화효과는 대기혼합고 외에 풍속에 의해서도 영향을 받는다. 풍속이 약할수록 정화효과가 상대적으로 크기 때문에 약풍조건(관측풍속이 0.5 m/s)에 대해서도 살펴보았다. 분석 결과는 표 1과 같다.

정화효과가 가장 큰 경우는 대기혼합고가 낮은 야간에 약풍이 형성되는 때로 유입농도의 78.4%까지

Table 1. Results summary for 10,000 units of the air cleaning towers.

Meteorological conditions	Mean wind (2.2 m/s)		Calm wind (0.5 m/s)	
	High Mix. (Day) H_{mix} = 1.5 km	Low Mix. (Night) H_{mix} = 0.1 km	High Mix. (Day) H_{mix} = 1.5 km	Low Mix. (Night) H_{mix} = 0.1 km
Device cleaned flow rate (F_R, m^3/s)	$0.463 \times 10^{+06}$			
Inflow rate (F, m^3/s)	$0.111 \times 10^{+09}$	$0.738 \times 10^{+07}$	$0.252 \times 10^{+08}$	$0.168 \times 10^{+07}$
Initial concentration (C/C_B, %)	100.0	100.0	100.0	100.0
Concentration, 6 hours elapsed (C/C_B, %)	99.6	94.5	99.2	88.4
Concentration, 12 hours elapsed (C/C_B, %)	99.6	94.1	98.7	83.1
Concentration, 18 hours elapsed (C/C_B, %)	99.6	94.1	98.5	80.6
Concentration, 24 hours elapsed (C/C_B, %)	99.6	94.1	98.4	79.4
Final concentration, infinite hours elapsed (C/C_B, %)	99.6	94.1	98.2	78.4

농도가 낮아지는 것으로 나타났다. 즉, 정화효과가 가장 큰 환경 조건에서는 약 22%까지 농도가 감소하는 것으로 추정된다. 다만 이 수준까지 농도가 감소하기 위해서는 24시간 이상이 소요된다.

대기혼합고가 낮게 유지되는 환경은 야간이며, 풍속이 약할 때이다. 풍속이 강해지거나 주간이 되어 대기가 불안정해지면 대기혼합고는 높아진다. 풍속과 혼합고도 모두 낮은 상태로 12시간 이상 지속되는 상황은 현실에서는 거의 발생되지 않는다. 따라서 정화효과가 가장 클 경우에서도 유입농도의 83% 정도까지 농도가 낮아지는 것이 실질적인 최대치일 것이다. 나머지 조건이 동일하고 풍속만 평균 풍속으로 증가된 경우에는 12시간 후 미세먼지 농도는 유입농도의 94% 수준이 된다.

대기정화 효과가 가장 미미한 조건은 대기혼합고가 높으면서 풍속이 강한 경우이다. 표 1의 결과를 보면 평균 풍속이면서 대기혼합고도가 높은 주간에는 유입농도의 99.6%보다 더 감소하지 않는다. 즉, 농도감소가 유입농도 기준 0.4% 정도에 불과하다. 주간의 경우에는 풍속이 낮을 때에도 농도감소 효과가 크지 않다. 약풍조건 하에서도 주간에는 유입농도 대비 개략 2% 이상 농도가 감소하지 않는다. 이상의 결과를 종합하면, 고농도 미세먼지가 함유된 외기 유입 시에 시안 스모그제거 탑과 유사한 성능의 외기 정화설비를 설치하는 방안은 그다지 효과적이지 않다.

차량부착 외기정화 장치에 대해서도 같은 방법으로 효과를 산출할 수 있다. 차량부착 외기정화 장치는 차량 이동에 의해서 필터가 오염된 공기를 훑고 지남으로써 대기 중의 미세먼지를 포집하여 제거하는 장치이다. 실제로 영국의 샤우샘프턴지역에서는 버스 상부(실외)에 필터를 장착한 공기청정버스가 시범운행 중으로 버스 주행 시 실외에 설치된 정화장치로 외기가 통과하며 미세먼지가 정화된 공기를 배출하게 된다. 우리나라의 경우 운행 중인 일부 버스에서 버스 안에 공기정화 장치를 설치하여 주행 중으로 공기정화 장치가 없는 버스에 비해 버스 안 미세먼지 농도가 1/3로 감소되었다는 보고(35.2 μg/m^3 → 12.4 μg/m^3)도 있다(KBS, 2019. 03. 27).

오염된 공기를 필터에 통과시켜 미세먼지를 제거한다는 점에서 차량부착 외기정화 장치는 정화탑과 동작원리가 동일하다. 차량부착 외기정화 장치의 미세먼지 제거효과는 필터를 통과하는 공기량과 필터의 제거효율에 의해 결정된다. 그 결과 차량부착 외기정화 장치에 대해서도 전술한 방법으로 정화효과를 산출할 수 있다. 구체적인 장치사양이 알려져 있지 않으므로 여기서는 필터 단면적에 차량의 운행속도를 곱하여 처리풍량을 계산하였다. 아울러 본 연구에서는 장치부착 이후 저항증가로 인해 자동차 운행 시 연료소모가 증가하는 문제는 논외로 하였다. 이는 구체적인 장치사양이 없이 검토가 불가능하기 때문이다. 다만 처리풍량이 증가할수록 그만큼 차량운행 시 저항이 증가하게 되므로 적절한 해결방안이 제시되어야 할 것이다. 자동차에 부착하는 장치이므로 장치의 폭은 자동차의 폭을 초과할 수 없다. 장치를 구

Fig. 7. Example of devices installed on the bus in England (KBS, 2019).

Table 2. Results summary for devices installed on the commercial cars only.

Meteorological conditions	Mean wind (2.2 m/s)		Calm wind (0.5 m/s)	
	High Mix. (Day) H_{mix} = 1.5 km	Low Mix. (Night) H_{mix} = 0.1 km	High Mix. (Day) H_{mix} = 1.5 km	Low Mix. (Night) H_{mix} = 0.1 km
Device cleaned flow rate (F_R, m^3/s)	$0.107 \times 10^{+07}$			
Inflow rate (F, m^3/s)	$0.111 \times 10^{+09}$	$0.738 \times 10^{+07}$	$0.252 \times 10^{+08}$	$0.168 \times 10^{+07}$
Initial concentration (C/C_B, %)	100.0	100.0	100.0	100.0
Concentration, 6 hours elapsed (C/C_B, %)	99.1	87.9	98.1	75.6
Concentration, 12 hours elapsed (C/C_B, %)	99.0	87.3	97.1	66.5
Concentration, 18 hours elapsed (C/C_B, %)	99.0	87.3	96.5	63.0
Concentration, 24 hours elapsed (C/C_B, %)	99.0	87.3	96.2	61.8
Final concentration, infinite hours elapsed (C/C_B, %)	99.0	87.3	95.9	61.0

하는 다양한 설계방안들이 있을 수 있으나, 어떤 방식이든 장치의 높이는 50 cm를 초과하기 어려울 것으로 추정된다. 따라서 필터 단면적은 보수적으로 추정할 경우 1 m^2 정도이다. 필터 효율은 정화탑과 마찬가지로 80% 적용하였다.

서울시 전체 차량등록대수는 3,116,256 (SMC, 2018) 대이고, 영업용 차량이 차지하는 비율은 6.4%로 차량등록 대수가 서울시내의 평균 운행차량 숫자라고 가정하였다. 차량의 평균 운행속도는 시속 24.2 km이다 (SMC, 2017). 극단적으로 보수적인 추정이나, 이러한 가정을 토대로 영업용 차량을 대상으로 정화장치를 설치한 경우에 대해 미세먼지 저감효과를 계산하였고 그 결과를 표 2에 제시하였다.

정화효과가 가장 극대화되는 조건, 곧 야간 약풍조건 하에서 미세먼지 농도는 유입농도의 61%까지 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 농도감소량이 유입농도 기준 39%에 해당한다. 이 조건이 12시간 지속된다고 가정하면 유입농도 기준 33%의 농도가 감소한다. 나머지 조건이 동일하고 풍속만 평균 풍속으로 증가된 경우에는 12시간 후 미세먼지 농도가 유입농도 기준 13%로 감소한다.

주간의 경우 약풍 조건하에서 미세먼지 농도는 12시간 후 유입농도 기준 3%로 감소한다. 나머지 조건이 동일하고 풍속만 평균 풍속으로 증가된 경우에는 미세먼지 농도는 유입농도와 비교해 1% 정도만 감소한다. 시안 스모그제거 탑 10,000 기를 설치한 경우와 비교하면 영업용 차량에 정화장치를 설치하는 것이 유리한 것으로 나타났다.

Table 3. Results summary for devices installed on the all cars.

Meteorological conditions	Mean wind (2.2 m/s)		Calm wind (0.5 m/s)	
	High Mix. (Day) H_{mix} = 1.5 km	Low Mix. (Night) H_{mix} = 0.1 km	High Mix. (Day) H_{mix} = 1.5 km	Low Mix. (Night) H_{mix} = 0.1 km
Device cleaned flow rate (F_R, m^3/s)	$0.168 \times 10^{+08}$			
Inflow rate (F, m^3/s)	$0.111 \times 10^{+09}$	$0.738 \times 10^{+07}$	$0.252 \times 10^{+08}$	$0.168 \times 10^{+07}$
Initial concentration (C/C_B, %)	100.0	100.0	100.0	100.0
Concentration, 6 hours elapsed (C/C_B, %)	87.5	30.6	74.8	9.2
Concentration, 12 hours elapsed (C/C_B, %)	86.9	30.6	65.5	9.1
Concentration, 18 hours elapsed (C/C_B, %)	86.9	30.6	62.0	9.1
Concentration, 24 hours elapsed (C/C_B, %)	86.9	30.6	60.8	9.1
Final concentration, infinite hours elapsed (C/C_B, %)	86.9	30.6	60.0	9.1

영업용 차량을 포함한 서울시의 모든 등록차량에 정화장치를 설치한 극단적인 경우를 가정하고 미세먼지 저감효과를 계산하여 표 3에 제시하였다.

야간 약풍조건 하에서 미세먼지 감소효과가 매우 높게 나타났는데 12시간 후 미세먼지 농도는 유입농도의 9% 수준까지 감소한다. 나머지 조건이 동일하고 풍속만 평균 풍속으로 증가된 조건에서도 12시간 후 미세먼지 농도는 유입농도의 31% 수준까지 감소한다. 주간 약풍조건과 평균 풍속조건 하에서 미세먼지 농도는 각각 유입농도의 66% 그리고 87%이다.

실제로 등록된 차량이 동시에 운행되는 일이 없고 개인 소유의 승용차에 공기정화 장치를 모두 설치하는 것도 현실적으로 어렵다. 심야시간대 차량운행은 현저히 감소하므로 차량부착 장치로 인한 정화풍량은 표 3의 추정치보다 훨씬 적은 값일 것이다. 그럼에도 불구하고 일몰 후 대기가 급격히 안정되어 대기혼합고가 100 m 수준으로 낮아지고 차량 운행이 현저히 줄어드는 심야시간 이전일 때에는 차량 부착형 정화장치가 상대적으로 효과적일 수 있다.

5. 결 론

중국 등지로부터 미세먼지가 한반도로 유입되며 고농도의 미세먼지가 빈번하게 발생되는 상황에서 도시공간의 미세먼지를 저감하기 위한 방안으로 최근에 검토되고 있는 공기정화 탑과 차량탑재형 공기정화 장치의 효과를 추정하였다. 이를 위해 본 연구에서는 박스모델에 기반한 분석모델을 만들어 서울시를 대상으로 외기에 대한 공기정화 장치의 효과를 산출하였고, 개략적인 결과는 다음과 같다.

시안 스모그제거 탑과 유사한 성능의 설비를 서울에 설치한다고 가정할 경우, 대기혼합고가 높은 주간 유입공기의 오염농도를 1/10 수준으로 낮추기 위해서는 약 2,000만대가 필요하고 대기혼합고가 낮은 야간의 경우에는 약 100만대가 필요한 것으로 추정되었다. 이와는 별도로 시안 정화탑과 동일한 성능의 설비를 10,000대 서울에 설치한다고 가정하고 그 효과를 추정하였다. 그 결과 정화효과가 가장 큰 경우는 대기혼합고가 낮은 야간에 약풍이 형성되는 때로 유입농도의 78.4%까지 농도가 낮아지는 것으로 나타났다.

대기정화 효과가 가장 미미한 조건은 대기혼합고가 높으면서 풍속이 강한 경우로 평균 풍속이면서 대기혼합고가 높은 주간에는 정화탑의 농도감소 효과가 유입농도 기준 0.4% 정도에 불과하고, 약풍 조건에서도 주간에는 유입농도 대비 개략 2% 이상 농도가 감소하지 않는 것으로 나타났다. 이상의 결과를 종합하면, 고농도 외기 유입 시에 시안 스모그제거 탑과 유사한 성능의 외기 정화설비를 설치하는 방안은 그다지 효과적이지 않은 것으로 나타났다.

영국 샤우샘프턴지역에서 버스 상부(실외)에 필터를 장착한 공기청정버스가 시범운행 중인 사례가 있어 차량부착 외기정화 장치의 효과를 산출하였다. 서울시 차량등록 대수(2017년 기준 3,116,256대)가 서

울시내의 운행차량 숫자라고 가정하고 영업용 차량뿐만 아니라 개인 승용차 전부에 공기정화 장치를 부착한 것으로 가정하였다. 차량의 평균 운행속도는 시속 24.2 km를 적용하였다.

영업용 차량만을 대상으로 미세먼지 저감효과를 계산한 결과, 정화효과가 가장 극대화되는 조건 즉, 야간 약풍 조건에서 미세먼지 농도는 유입농도의 61%까지 감소하는 것으로 나타났다. 이는 농도감소량이 유입농도 기준 39%에 해당하는 것으로 이 조건이 12시간 지속된다고 가정하면 유입농도 기준 33%의 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 나머지 조건은 동일하고, 풍속만 평균 풍속으로 증가된 경우에는 12시간 후 미세먼지 농도가 유입농도 기준 13%로 감소하는 것으로 나타났다. 시안 스모그제거 탑 10,000기를 설치한 경우와 비교하면 영업용 차량에 정화장치를 설치하는 것이 결론적으로 유리한 것으로 나타났다.

서울시의 모든 등록차량을 대상으로 미세먼지 저감효과를 계산한 결과, 야간 약풍조건 하에서 미세먼지 감소효과가 매우 높게 나타났는데 12시간 후 미세먼지 농도가 유입농도의 9% 수준까지 감소(농도저감량이 유입농도의 약 91%)하였다. 나머지 조건이 동일하고, 풍속만 평균 풍속으로 증가된 조건에서도 12시간 후 미세먼지 농도는 유입농도의 31% 수준까지 감소하는 것으로 나타났다.

등록된 차량이 실제로 동시에 운행되는 일이 없고, 개인 소유의 승용차에 공기정화 장치를 모두 설치하는 것이 현실적으로 불가능하며, 심야시간대 차량운행이 현저히 감소한다는 점을 고려하면 차량부착 장치로 인한 미세먼지 감소효과는 추정치보다 훨씬 적을 것이다. 그러나 특정한 기상조건 즉, 일몰 후 대기가 급격히 안정되어 대기혼합고가 100 m 수준으로 낮아지고, 차량 운행이 현저히 줄어드는 심야시간 이전일 때에는 차량 부착형 정화장치가 상대적으로 효과적일 수 있다.

본 연구결과의 한계점으로는 적용한 박스모델에서 시뮬레이션 대상공간 내 미세먼지 배출, 생성 및 소멸 등이 고려되지 않았고, 적용된 가정 또한 실제 상황을 크게 단순화시켰다는 점을 들 수 있다. 그러나 최근 들어 미세먼지 저감대책으로 제기되고 있는 공기정화 탑과 차량부착 정화장치의 효용성을 개략적으로나마 정량화한 시도이므로 본 연구결과는 추가적인 연구를 거쳐 정책결정 등에 활용 가능할 것으로 판단된다.

References

Dirks, K.N., Johns, M.D., Hay, J.E., Sturman, A.P. (2003) A semi-empirical model for predicting the effect of changes in traffic flow patterns on carbon monoxide concentrations, Atmospheric Environment, 37, 2719-2724, DOI : 10.1016/S1352-2310 (03)00156-0.

Jorquera, H. (2002a) Air quality at Santiago, Chile: a box modeling approach-I. Carbon monoxides, nitrogen oxides and sulfur dioxide, Atmospheric Environment, 36, 315-330, DOI : 10.1016/S1352-2310 (01)00417-4.

Jorquera, H. (2002b) Air quality at Santiago, Chile: a box modeling approach-II. $PM_{2.5}$, coarse and PM_{10} particulate matter fractions, Atmospheric Environment, 36, 331-344, DOI : 10.1016/S1352-2310 (01)00418-6.

KBS (2019) The Secret of Life and Death (The 688th Issue) (2019. 03. 27).

Kim, S., Joh, S. (2005) Derivation of New Box Model to Analyze the Air Pollution Trends in a Metropolitan Area, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 21(3), 377-397, (in Korean with English abstract).

Korea Meteorological Administration (KMA) (2017) Annual Climatological Report.

Seinfeld, J.H., Pandi, S.N. (1998) Atmospheric Chemistry and Physics, 2nd Ed., Wiley, New York, Chapter 23.

Seoul Metropolitan City (SMC) (2017) Seoul Traffic Speed Report.

Seoul Metropolitan City (SMC) (2018) The 58th Seoul Statistical Yearbook

Sportisse, B. (2001) Box models versus Eulerian models in air pollution modeling, Atmospheric Environment, 35, 173-178, DOI : 10.1016/S1352-2310 (00)00265-X.

https://opengov.seoul.go.kr/civilappeal/2894456

Authors Information

김석철((주)볼트시뮬레이션 대표이사)
윤정임((주)볼트시뮬레이션 이사)