



한국대기환경학회 미세먼지위원회 제2회 대학(원)생 미세먼지 연구논문 공모전 수상작

대기오염측정망 측정자료를 이용한 한반도 미세먼지 습식 세정 특성 연구 및 3차원 대기질 모델 적용

A Study on the Wet Scavenging Characteristics of Atmospheric Aerosol in the Korean Peninsula Using NAMIS (National Ambient Air Quality Monitoring Information System) Data and Its Application to Air Quality Modeling System

박다솜, 최용주¹⁾, 선우 영²⁾, 정창훈³⁾,*

건국대학교 환경공학과, ¹⁾한국외국어대학교 환경학과,
²⁾건국대학교 사회환경공학부, ³⁾경인여자대학교 보건의료행정학과

Da-Som Park, Yong-joo Choi¹⁾, Young Sunwoo²⁾, Chang-hoon Jung³⁾,*

Department of Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul, Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Republic of Korea

²⁾Department of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul, Republic of Korea

³⁾Department of Health Management, Kyung-in Women's University, Incheon, Republic of Korea

접수일 2023년 5월 15일
수정일 2023년 6월 28일
채택일 2023년 7월 13일

Received 15 May 2023
Revised 28 June 2023
Accepted 13 July 2023

*Corresponding author
Tel: +82-(0)32-540-0166
E-mail: jch@kiwu.ac.kr

Abstract Wet scavenging is one of the main mechanisms for the removal of particulate matter in the atmosphere. In this respect, precipitation is an important component and plays a key role in the removal of air pollutants. When precipitation occurs, raindrops fall, inducing below cloud scavenging, absorbing pollutants and removing them from the atmosphere. The wet scavenging process is affected by the strength, duration, concentration, and distribution of air pollutants. The aerosol wet scavenging coefficient (A_m) by precipitation is used to formulate a change in aerosol concentration (C) during the precipitation time (t). According to the equation, the wet scavenging coefficient was calculated using multi-year $PM_{2.5}$ hourly concentration data from the NAMIS (National Ambient air quality Monitoring Information System). The main purpose of this study is to gain a better understanding of scavenging coefficients including characteristics unique to Korea by using measurement data for five years for 12 cities. By applying a developed scavenging coefficient to the three-dimensional air quality model, these results provide wider support for improving the accuracy of simulating particle matters in East Asia. An implication of the new scavenging coefficient is a value that better reflects precipitation characteristics in Korea and one that can also help research scavenging characteristics in East Asia in the future and contribute to improving modeling accuracy.

Key words: Wet scavenging, Scavenging coefficient, Wet deposition, Aerosol particles, Rain wash-out

1. 서 론

습식 세정은 강수에 의해 발생하는 입자상 물질 제거의 주요 기작 중 하나이다. 이러한 측면에서 강수는 대기오염물질의 제거에 기여하는 중요한 요소라 할 수 있다. 강수가 발생하면 습식 세정에 의해 빗방울이

낙하하며 대기 중 물질들을 흡수하며 제거한다. 습식 세정과정은 강수의 분포, 강도, 지속시간 및 대기오염 물질의 농도, 분포 등에 따라 변화된다. 강수가 존재할 때, 빗방울은 떨어지면서 입자상 물질들을 수집하며 제거한다. 습식 세정과정은 크게 관성충돌(Inertial impaction), 차단(Interception), 브라운 확산에 의해

서로 나뉘지며, 이러한 세정 수집 계수는 물방울의 충돌 횟수에 의해 정의된다(Pandis and Seinfeld, 2016). 총 충돌 횟수(Total Number of collisions)는 빗방울의 유효 단면적과 동일한 면적에서 빗방울과 에어로졸이 부딪치는 횟수를 의미한다.

이러한 습식 세정과정을 모델에 적용하여 정확히 모사하기 위해서는 대기 기상학 전반에 대한 물리 화학적 이해가 필요하다. 하지만, 복잡한 과정을 가진 습식 세정을 대기질 모델에서 구현하는 것은 많은 어려움이 따른다. 현재 대부분의 대기질 모델들은 강수에 의한 습식 세정과정을 보통 상수 혹은 1차 방정식과 같은 단순한 식으로 계산하고 있다(Rasch *et al.*, 2000). 이는 강수 시 에어로졸 세정의 모든 과정을 수식화하기 어려울 뿐만 아니라 계산이 효율적이지 않기 때문이다(Bae *et al.*, 2006). 특히 대표적인 3차원 대기질 모델인 CMAQ(The Community Multiscale Air Quality Modeling System)에서는 빗방울과 구름 방울을 구분하지 않고 1차원의 구름 모델에서만 에어로졸 소거과정을 고려한다(Lu and Fung, 2018). 하지만 이는 물리적 세정 메커니즘의 측면에서 볼 때, 정확하지 않은 가정이며, 구름 하부 세정과정의 경우, 빗방울과 에어로졸의 크기분포를 고려하여야 한다. 따라서, 강수에 의한 에어로졸 제거 메커니즘을 단순화하기 위한 다양한 연구가 진행됐다. 그중 습식 세정계수를 활용한 Slinn(1974)의 세정식이 전통적으로 사용되고 있다. 이러한 방식은 강우강도와 계수가 함수에 사용되며, 라그랑지안 및 오일러리안 모델 등에서 활용되어 에어로졸의 강수에 의한 세정을 모사한다. 이에 세정식의 중요한 요소인 세정계수를 보완하여 습식 침적 메커니즘을 개선할 필요성이 대두되고 있다.

강수에 의한 세정을 측정할 다양한 연구가 존재해 왔다(Xu, 2017; Andronache, 2003; Volken and Schumann, 1993; Levine and Schwartz, 1982; Slinn, 1977). 특히 동아시아에서는 장거리 이동으로 인한 황 화합물의 세정계수를 조사하기 위해 일본의 사도섬에서 SO₂ 및 SO₄²⁻의 대기 및 강수 농도를 측정한 연구가 있었다(Okita *et al.*, 1996). 산출된 결과, 세정계수를

강수 강도에 따라 $k = aPb$ 형태로 나타냈으며, a 는 약 10^{-4} 이고, b 는 0.67에서 0.76 사이의 값으로 산출되었다. 최근에는 중국 란저우에서 대기오염과 강수량을 측정하여 강설과 강우에 의한 대기 중 에어로졸 제거 특성을 연구했다(Zhao *et al.*, 2015). 10~1,000 nm의 에어로졸은 강우와 강수에 따라 구별되는 계수를 가지며, 강설의 강도와 기간이 큰 영향을 끼친다고 연구되었다. 세정계수는 특히 대기오염 모델링 분야에서도 중요한 변수 중 하나로 사용된다. 여름을 대상으로 수집한 높은 해상도의 대기 및 강수 중 용해성 무기염류 데이터를 사용하여 저운량 조건의 세정계수에 관한 연구가 진행된 바 있다(Xu, 2017). 결론적으로 화학 조성에 따라 세정계수가 다르다는 것을 고려하여, 이후 화학 수송 모델에 이온별로 상이한 계수를 사용하는 것을 권장하였다. 그러나, 복잡한 대기질 모델의 특성상 보다 단순화할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 동아시아의 중심에 위치한 한반도를 대상으로 측정자료를 활용하여 세정계수를 도출하였다. 한반도 세정 특성에 맞는 계수 개발로 계산식을 수정하여 모델에 적용해, 동아시아에서의 대기질 모델링 정확도를 높이는 목적을 가진다. 함수 도출을 위해 5년 동안의 측정자료를 수집하여 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5})의 대기환경 농도와 강우 강도에 대해 분석하였다. 따라서 본 연구에서는 2015~2019년까지의 한국의 12개의 도시를 대상으로 대기오염 측정자료를 활용하여 한반도 범위에서 강우 강도에 의한 세정계수 식을 개선하고자 하였다.

2. 세정계수 도출

2.1 세정계수 산출 이론

단일 강수 사례에 대한 세정계수는 빗방울에 의한 입자 제거 속도로 정의된다. 강수에 의한 에어로졸 습식 세정계수는 강수 시간(t) 동안의 에어로졸 농도(C) 변화로 수식화할 수 있다. 다음 식 1은 측정자료를 사용하여 습식 세정계수를 계산하는 데 널리 사용된다.

여기서 C_0 는 강수가 시작되기 전의 에어로졸 농도이고, C_t 는 강수 후의 에어로졸 농도이다. 따라서 강수 전후의 에어로졸 농도 변화를 통해 습식 세정계수를 계산할 수 있다. 또한 습식 세정계수는 식 2와 같이 강우강도(R)로도 단순화하여 표현할 수 있다. 강우강도는 강수량에 의한 제거를 나타내는 대표 변수로 활용되며, 대기오염측정망 측정자료를 활용하여 습식 세정계수(Λ)를 도출할 수 있다. 여기서 a 와 b 는 선행연구 등을 통해 결정된 상수값으로, 강우강도를 이용하여 습식 세정계수를 추정하는 데 활용된다. 특히 이 연구에서는 식 1과 2에서는 대기오염물질 농도인 C 에 대해 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 단위 농도 측정자료를 사용하였다. 강수 시간(t)는 강수량에 맞추어 시간 단위로 계산하였으며, 따라서 세정계수(Λ)는 h^{-1} 의 단위를 갖게 된다. 식 2에 사용된 강우강도는 mm/hr 의 단위이며, a 와 b 는 입력된 자료를 통해 결정되는 상수이다.

$$\Lambda = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{C_t}{C_0} \right) \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$\Lambda = a \times R^b \quad [\text{Eq. 2}]$$

식 2를 활용하여 진행된 선행연구들은 다음 표 1과 같다. 식 2와 같이 강우강도를 변수로 사용하여 계산된 습식 세정계수(Λ_m)는 대기오염물질이 강우로부터 제거되는 속도를 나타낸다. 선행연구들은 다양한 지역 및 기상 조건, 여러 이온 물질들에 대한 세정계수를 측정된 결과이며, a 값은 0.025에서 1.51까지, b 값은

0.52에서 0.92까지의 범위를 나타내고 있다.

2.2 입력자료 수집

본 연구는 다년간의 자료를 통해 경향의 안정성을 확보하기 위해 5년 동안(2015년부터 2019년까지)의 측정자료를 수집하였다. 한국의 12개의 도시를 선정하여 기상자료와 대기오염 측정자료를 활용하였다. 대상 도시는 서울, 부산, 대전, 광주, 인천, 대구, 여수, 백령도, 제주도 고산, 울릉도, 제천, 강릉이다. 지역은 자료 가용성이 높은 대도시를 위주로 선정하였고, 균등한 지역적 분포도 고려하였다. 강수현황 파악을 위한 기상자료는 기상청의 기상관측소인 ASOS (Automated Synoptic Observation System)에서 제공받았다. 측정된 총 강수량 자료는 수평면상의 지면 위에 액체 형태로 있다는 가정 아래, 일정 시간 동안 지면에 도달하며 축적되어 갖게 되는 높이로 정의한다. 비와 이슬비 등 액체성 강수와 눈, 싸락눈 및 우박과 같은 고체성 강수도 용해시킨 물의 깊이로 측정하여 강수량에 포함시킨다.

대기오염물질 측정치는 국립환경과학원의 도시대기측정망 자료를 활용하였다. NAMIS (National Ambient air quality Monitoring Information System) 시스템의 시간 평균 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 자료를 수집하였다. 한국의 기상관측소의 수는 대기오염측정소보다 수가 적다. 따라서 어떤 도시에 대하여, 하나의 기상관측소에 여러 개의 대기오염측정소를 할당할 필요성이 있다.

대기오염측정소 할당을 위해 추후 사용될 대기질

Table 1. Scavenging coefficient (in units of hr^{-1}) expressed as aR^b (where the rainfall rate R is in units of mm hr^{-1}).

a	b	Reference	Note
0.36	0.67~0.76	Okita <i>et al.</i> (1996)	Experimental estimation for total wet scavenging by Okita <i>et al.</i> (1996)
0.24	0.7	Andronache (2003)	Urban, Calculations are based on the aerosol types by Jaenicke (1993)
0.073	0.543	Choi <i>et al.</i> (2020)	
1.26	0.78	Scott (1982)	Model calculated in-cloud scavenging coefficient with $d_p = 10 \mu\text{m}$ particle
1.51	0.79	ENVIRON. Inc. (2005)	Parameter in CTMs
0.9	0.61	Xu <i>et al.</i> (2019)	NO_3^- , Beijing, China, summer of 2014, field measurement
0.2736	0.8	Xu <i>et al.</i> (2019)	SO_4^{2-} , Beijing, China, summer of 2014, field measurement
0.396	0.52	Xu <i>et al.</i> (2019)	NH_4^+ , Beijing, China, summer of 2014, field measurement
0.025	0.92	Jylhä (1999)	Model calculated values for particles with diameters in the range [0.3~0.9] μm
0.3024	0.79	Baklanov and Sørensen (2001)	Theoretical calculation

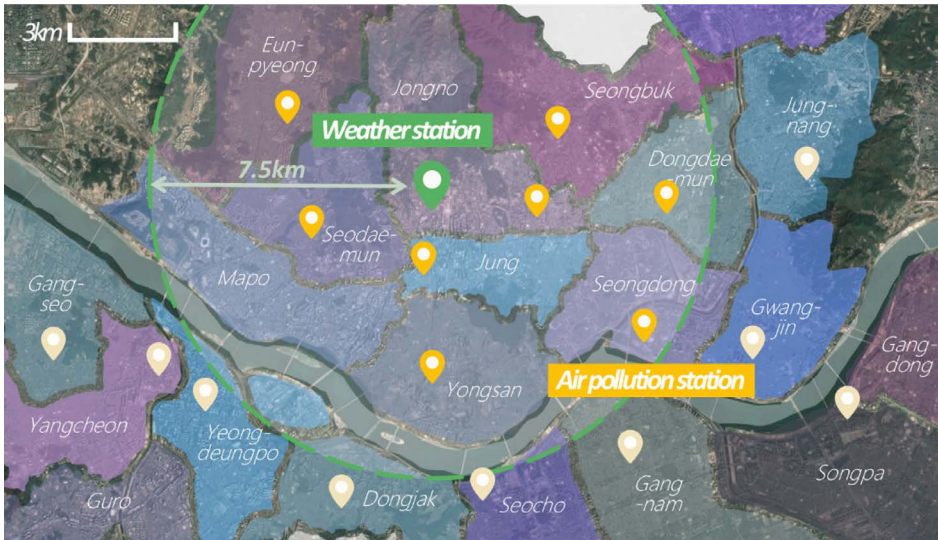


Fig. 1. Example of mapping stations (Seoul, Republic of Korea).

모델링 격자를 기준으로 하였다. 본 연구에서 사용된 모델의 기본 그리드는 15 km로 구동하였고, 세부 내용은 3.2절에 후술하였다. 따라서 모델의 격자인 15 km를 기준으로 기상관측소를 중심 반경 7.5 km 내의 대기오염측정소들을 대상으로 선정하였다. 측정소들 간의 할당의 예시는 그림 1과 같다. 대상 도시 중 하나인 서울은 중심부(종로구 송월동)에 기상측정소가 위치한다(그림의 초록색 핀). 노란색 핀은 반경 안에 있어 분석 대상으로 사용된 대기오염측정소의 위치이며, 회색 핀은 반경 밖에 있는 대상이 아닌 대기오염측정소이다. 즉, 하나의 기상측정소(초록색)에 대하여 주변 반경 내 대기오염측정소(노란색)를 대상 12개 도시에 대해 모두 할당하였다. 한 도시에 대한 $PM_{2.5}$ 농도 대푯값은 포함되는 대기오염측정소 측정값의 산술 평균값을 사용하였다. 본 연구에서 전체 사용된 12개의 도시에 대한 기상측정소별로 할당된 대기오염측정소는 표 2와 같다.

분석 대상 기간인 2015년부터 2019년까지 5년 동안의 측정된 자료 중 총 28,888시간의 강수 사례가 존재하였고, 모든 사례에 대해 앞서 언급한 식 2를 사용하여 계수를 산출하였다. 계산된 세정계수 자료의 전체

Table 2. Information of city location and station mapping.

City name	Location of weather station		Number of matched air pollution monitoring stations
Seoul	37.9740N	124.7124E	7
Busan	35.1047N	129.0320E	5
Daejeon	36.3720N	127.3721E	5
Gwangju	35.1729N	126.8916E	5
Incheon	37.4777N	126.6249E	4
Daegu	35.8780N	128.6530E	4
Yeosu	34.7393N	127.7406E	2
Baengnyeong	37.9740N	124.7124E	2
Gosan	33.2938N	126.1628E	1
Ulleung	37.4813N	130.8986E	1
Jecheon	37.1593N	128.1943E	1
Gangneung	37.7515N	128.8910E	1

결과에서는 양수와 음수가 동시에 나타난다. 습식 세정과정에서 빗방울의 크기가 일정 이하인 경우 에어로졸 제거 속도가 감소하는 경향이 있으며, 이는 주로 난류에 의한 결과로 연구되어 왔다(Laakso, 2003). 본 연구에서는 극단값으로 인해 편중될 수 있는 평균값이 아닌 극값의 영향을 줄인 중앙값(median)을 사용하여 대표 세정식을 추출하였다.

3. 3차원 대기질 모델링으로의 적용

3.1 세정계수 적용을 위한 시뮬레이션 모듈 수정

연구 결과의 검증을 위해 3차원 대기질 화학수송모형을 활용하여 새로 도출한 세정계수 식을 적용하고자 하였다. 복잡한 과정을 가진 습식 세정 메커니즘을 대기질 모델에서 모사하기 위해서는 대기 기상학 전반에 대한 물리 화학적 이해가 필요하다. 대기 중의 모든 과정을 수식화하여 계산하는 것은 모델 내에 구현하기도 어려움이 많을 뿐 아니라 계산의 효율성이 떨어진다. 따라서 현재 널리 사용되고 있는 3차원 대기질 화학수송모형은 보통 상수 혹은 1차 방정식과 같은 단순식으로 세정 메커니즘을 계산하고 있다.

특히, 대표적인 3차원 대기질 화학수송모형인 CMAQ에서의 세정 메커니즘은 직경이 0.1~1 μm 사이인 축적(Accumulation) 영역과 10 μm 이상의 조대(Coarse)

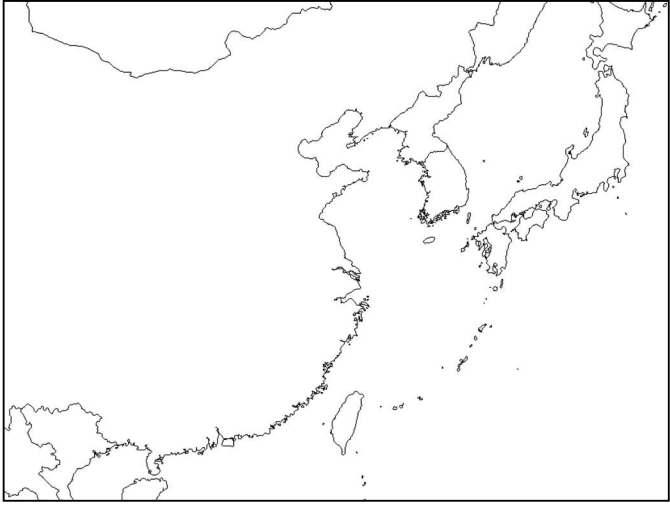
영역에 포함되는 에어로졸을 대상으로 하며, 이 구간의 입자는 구름과 비에서 완전히 흡수된다고 가정한다. 에이킨(Aitken) 영역의 경우는 축적 영역로 흡산되므로, 축적 영역과 조대 영역만 고려된다고 볼 수 있다(Mebust *et al.*, 2003).

식 3은 두 영역의 습식 세정계수와 그 함수를 나타내며, 식은 단순히 세정 시간(τ_{wash})의 함수로 표현될 수 있다. 이를 물리적인 표현식으로 떨어지는 빗방울의 말단의 크기분포(D_d)와 농도 및 속도 분포(N_d, U)의 식으로도 나타낼 수 있다. CMAQ 모델 내에서는 습식 세정으로 인한 침적량은 한 시간 단위로 누적되며, 강수량과 구름 내 수분량에 따라 결정된다.

$$\Lambda = \frac{1}{\tau_{wash}} = \frac{\pi N_d D_d^2}{4} U_t \quad [\text{Eq. 3}]$$

식 4는 본 연구에서 사용하기 위해 수정된 에어로졸의 개념을 포함한 세정계수 식이다. 간략한 형태로

Table 3. Modeling options and details.

Horizontal grid	273 (COLS) × 204 (ROWS)
Resolution	15 km
Domain	
Modeling period	Pre-running: March 26~April 1, 2016 (During 7 days) Main-running: April 1~April 30, 2016 (During 30 days)
CMAQ chemical option	SARPC-07tc AERO6 (6th generation CMAQ aerosol module)

단순화하기 위해, CMAQ 내 below cloud scavenging 모듈에서 추가로 입자가 빗방울 등에 의해 제거되는 효율을 나타내는 Collection efficiency (E)의 개념을 도입한 식을 참고하였다(Jung *et al.*, 2022). 이 식에서 d_p 는 에어로졸의 입자 직경 크기를 말한다. 따라서 본 연구에서는 기존의 CMAQ에서 단순히 강수 시간에 의해 결정되었던 습식 세정량을 강우와 입자를 고려하도록 수정한 세정식을 사용하여 비교하였다.

$$\Lambda = \frac{1}{\tau_{wash}} = \frac{\pi N_d D_d^2}{4} U_r E(D_d, d_p) \quad [\text{Eq. 4}]$$

3.2 모델링 조건

사용할 CMAQ은 5.1 버전을 기준으로 한다. 시뮬레이션 기간은 실제 측정자료를 수집한 기간 중 강수가 많았던 2018년 4월을 대상으로 하였고, 3월 21일부터 3월 31일까지 pre-run 기간을 설정하여 시뮬레이션 정확도를 높이고자 하였다. 기상입력자료를 위해 WRF (Weather Research and Forecasting Model)를 구동하였고, 배출량 자료는 KORUS-AQ (International Cooperative Air Quality Field Study in Korea) v5를 사용하였다. 이러한 모델링 구성 방식은 대기질 모델링 분야에서 널리 사용되는 방법론 중 하나로, 현실적

인 대기환경 조건을 반영하여 대기 중 오염물질의 농도를 예측하는 데 사용된다.

본 연구에 사용된 모델링의 주요 조건에 대한 세부 사항은 표 3과 같으며, 기상 및 대기질 모델에 대한 수행에 있어 안정성이 검증되어 있다고 알려진 물리 옵션으로 수행되었다.

식 4를 사용해 CMAQ 모듈을 수정하고 앞서 도출한 세정계수를 적용하여 한반도 내 농도 모사를 진행하였다. 이를 통해 수정된 모듈을 적용한 대기질 시뮬레이션으로 기존의 모델과 개선된 내용을 비교하고 분석할 수 있다.

4. 결 과

4.1 세정계수 분석

그림 2는 측정자료를 통해 산출된 전체 세정계수의 분포를 나타낸 그림이다. 세정계수를 식의 형태로 나타내기 위해 bin을 10개 구간으로 나눠서 각 중간값을 대푯값으로서 추세선을 구했다. 추세선은 거듭제곱식의 형태로 나타내었으며, 그래프의 x, y축은 강우 강도와 세정계수이며 모두 로그 스케일이다.

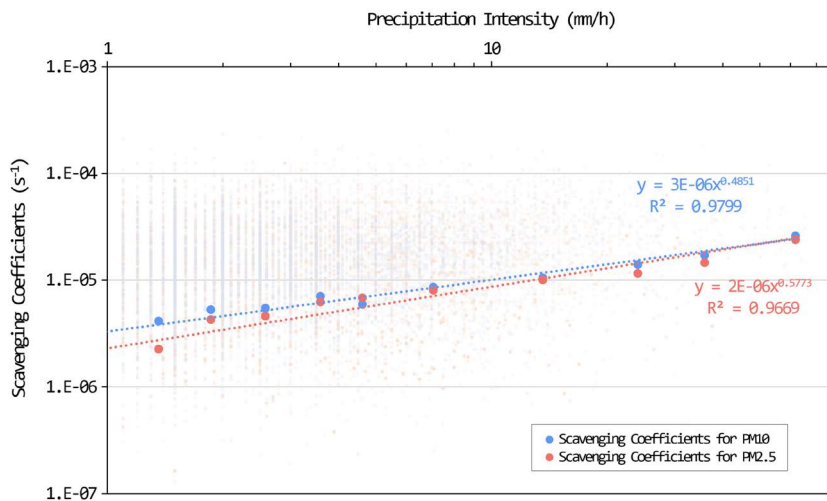


Fig. 2. Scavenging coefficients as a function of rain intensity.

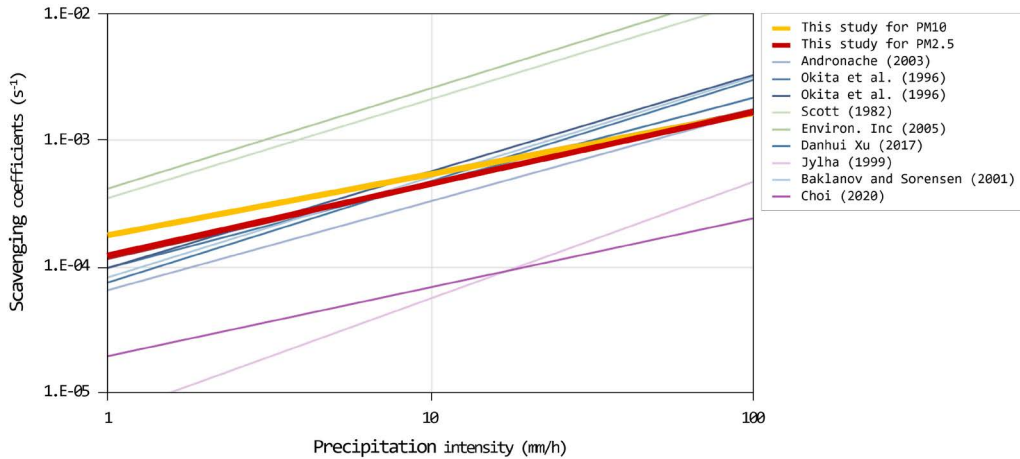


Fig. 3. Comparison of scavenging coefficients results with references.

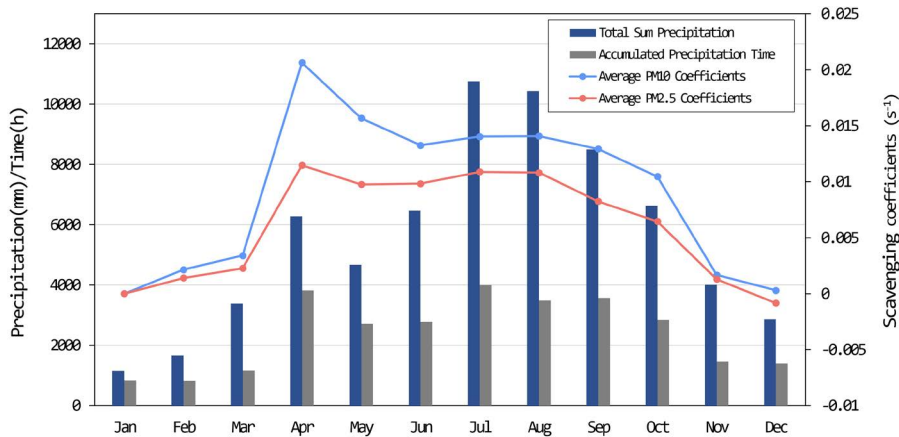


Fig. 4. Monthly average scavenging coefficients and precipitation.

$$PM_{10}: y = 3E-06x^{0.4851} (R^2 = 0.9799) \quad [Eq. 5]$$

$$PM_{2.5}: y = 2E-06x^{0.5773} (R^2 = 0.9669) \quad [Eq. 6]$$

본 연구에서 도출한 식 5와 6은 각 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 에 대한 강우강도에 따른 세정계수의 변화를 나타낸다. 마찬가지로, x 와 y 는 각각 강우강도와 세정계수를 대표한다. 연구의 결과는 상관계수가 0.9 이상 수준으로 강한 상관관계를 나타내고 있다. PM_{10} 의 추세선 그래프의 기울기가 $PM_{2.5}$ 의 추세선보다 작게 계산되었다. 실제 측정된 자료로부터 계산된 PM_{10} 의 세정은

$PM_{2.5}$ 에 비해 강우강도에 영향을 비교적 적게 받는다고 할 수 있다.

그림 3은 앞서 도출한 세정식을 다양한 선행연구와 비교한 그래프이다. 각 선행연구에 대해 유사한 범위에 있는 결과를 푸른 계열, 본 연구 결과보다 높은 값을 가지는 선행연구는 녹색계열, 보다 낮은 값을 가지는 연구 결과에 대해서는 보라색 계열로 표시하여 구분하였다. 기존에 대기질 시뮬레이션에서 사용되었던 값(ENVIRON. Inc., 2005)과 비교해 보았을 때, 본 연구에서 도출된 세정계수는 기존 결과보다 낮은 값을

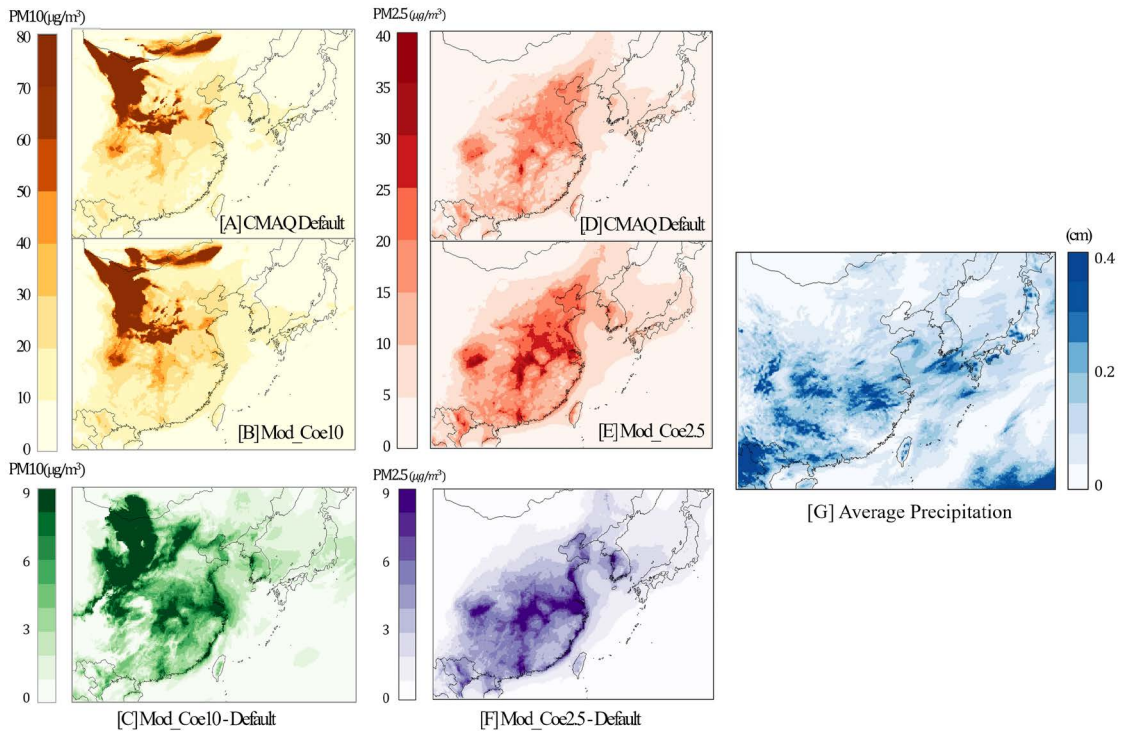


Fig. 5. Default and modified CMAQ results of particulate matter concentration (PM_{10} and $PM_{2.5}$) and precipitant (April, 2018). [A] Average PM_{10} concentration of default CMAQ, [B] Average PM_{10} concentration of modified CMAQ with new coefficient about PM_{10} , [C] Differences PM_{10} concentration between default CMAQ and modified CMAQ with new coefficient about PM_{10} , [D] Average $PM_{2.5}$ concentration of default CMAQ, [E] Average $PM_{2.5}$ concentration of modified CMAQ with new coefficient about $PM_{2.5}$, [F] Differences $PM_{2.5}$ concentration between default CMAQ and modified CMAQ with new coefficient about $PM_{2.5}$, and [G] Average Precipitation in CMAQ.

보였다. 이로부터 일반적으로 대기질 모델에서 사용되는 값이 한국의 강수 특성과는 차이가 있음을 확인할 수 있다. 또한 본 연구의 결과가 다른 연구에 비해 기울기가 비교적 작은 특징을 가지고 있었으나, 이는 가장 최근의 연구 결과(Choi *et al.*, 2020)와 유사함을 확인할 수 있다.

월별 계수를 강수 특성과 비교한 결과는 그림 4와 같다. PM_{10} 의 세정계수는 $PM_{2.5}$ 에 비해 낮으며, 이는 절대적인 값으로 PM_{10} 이 강수에 의한 세정이 많이 이루어지기 때문이다. 그림에서 알 수 있듯이, 세정계수의 분포는 강수와 유사한 분포특성을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 특히 전체 강수량보다는 강수 시간에 더 큰 상관성을 가지고 있다고 판단된다. 또한 강수량

이 적은 겨울보다 강수량이 많은 여름에 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 계수 차이가 더 많이 나는 것을 확인할 수 있다. 이는 세정계수가 강우강도의 차이로 도출되는 계수이기 때문에 강수가 많을수록 더 큰 입자에서 영향이 큰 것으로 분석된다.

4.2 3차원 대기질 모델링 적용 및 비교

앞서 도출한 새로운 세정계수 식을 수정된 CMAQ 습식 세정 모듈에 적용하여 동아시아 전체에 대한 3차원 대기질 모사 모델을 구동하였다. 수정된 모듈은 식 7을 사용하여 변경되었으며, PM_{10} 에 대한 세정계수를 사용하여 PM_{10} 농도를 모사한 모델(Mod_Coe10)과 $PM_{2.5}$ 에 대한 세정계수를 사용하여 $PM_{2.5}$ 농도를 모

사한 모델(Mod_Coe2.5)로 구분하여 결과를 도출하였다. 그림 5는 CMAQ 모델을 사용하여 PM₁₀와 PM_{2.5} 농도를 모사한 그림이다. 그림 5-A, D와 5-B, E는 각각 CMAQ의 기존 세정 메커니즘, 수정된 메커니즘을 사용하여 모사한 PM의 4월 한 달간의 전체 평균 농도의 지역적 분포이다. 그림 5-C, F에서는 수정된 메커니즘을 사용하여 모사된 결과에서 기존 메커니즘을 사용하여 모사된 농도를 빼서(A-B 및 D-E) 그 차이를 나타내었다. 수정된 모듈과 기존 모델에 모사된 농도는 월평균 최대 80.4 µg/m³ (PM₁₀), 26.7 µg/m³ (PM_{2.5}) 차이를 보였고, 특히 농도가 높은 중앙 내륙 지역일수록 그 차이가 더 크게 나타났다. 기존 모델의 경우 에어로졸 크기에 상관없이 획일적인 세정계수를 사용하였다면, 새로운 세정식은 입자 크기에 따라 달라지는 세정계수 식이 적용되었다. 본 연구에서 적용한 메커니즘은 기존 모델에서 세정에 의해 제거되는 침적량에 세정효율(E) 값이 곱해진 값으로 침적량이 기존보다 줄어들었기 때문에 전체 농도는 증가한 것으로 판단된다. 세정계수는 강우강도에 의해 도출된 식으로, 강우 당시의 강우강도에 큰 영향을 받는다. 따라서 입자상 물질의 월평균 값은 강우의 전체 누적량(그림 5-G)과는 상이한 양상을 보일 수 있다. 또한, 모델 내에서는 강우뿐 아니라, 시간적 차이 및 공간적 이동 등의 고려하지 못한 변수에 의해서도 차이가 나타나는 한계점이 존재할 수 있다. 이는 본 연구에서 세정 메커니즘을 강우강도의 식으로 표현된 세정식을 사용하였기 때문에, 강우강도가 클수록 세정계수의 변화가 더 크게 반영된 결과라고 볼 수 있다.

새로운 습식 세정계수를 활용한 본 연구 결과의 정확도 개선을 확인하기 위하여 모사된 농도값과 대기 환경 측정농도값을 비교하였다. 그림 6은 측정값과 모델 모사값을 나타낸 그림이다. 2018년 4월 월평균 서울의 측정농도를 Observation으로 PM₁₀(황사 제외) 및 PM_{2.5}를 산출하였고, 기존의 모델 모사값(CMAQ_Default)과 세정계수를 수정한 모사값(CMAQ_Mod_Coe2.5, CMAQ_Mod_Coe10)을 나타내었다. 전반적으로 측정값보다 모든 모델이 과소모

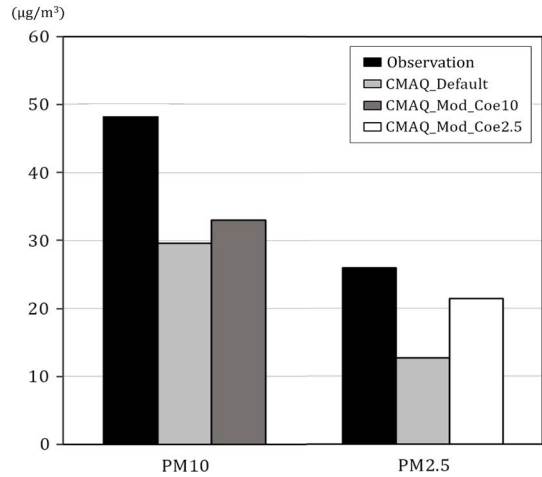


Fig. 6. Comparison of measured and simulated average PM (particulate matter) concentration in Seoul (April, 2018). CMAQ_Default: No modification, CMAQ_Mod_Coe10: modified CMAQ with new coefficient about PM₁₀, CMAQ_Mod_Coe2.5: modified CMAQ with new coefficient about PM_{2.5}.

사하는 경향이 있었으나, 수정된 모델은 다소 보정되어 측정값과 유사함을 확인할 수 있었다. 특히 PM_{2.5}에서 정합도가 유의미하게 개선되었다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 동아시아의 특성을 나타내는 습식 세정계수 식을 측정자료를 활용하여 새롭게 도출하였다. PM_{2.5}의 경우 강우강도에 따라 $y = 2E - 06 x^{0.5773}$ 의 세정식을 얻어냈으며 높은 통계치를 바탕으로 한반도의 세정 특성을 잘 구현한 식이라고 볼 수 있다고 판단된다. 동아시아의 미세먼지 세정에 관한 기존 선행 연구에서는 중금속 이온성분 위주였기 때문에 적용이 다소 제한적이었으나, 본 연구에서 보다 다량의 최신 자료를 사용하여 범용적으로 사용할 수 있는 세정계수를 도출함에 의의가 있다. 뿐만 아니라 특히 한반도의 경우 측정자료를 활용하여 세정계수를 처음으로 도출한 연구라고 볼 수 있다.

또한 실측자료를 활용하여 모델에 적용할 수 있도

록 CMAQ의 수정된 모듈을 사용하여, 측정자료의 수집이 많아지는 만큼 한반도 세정 특징을 더욱 반영할 수 있을 것으로 판단된다. 수정된 모듈은 기존 모델보다 PM_{2.5} 농도를 월평균 최대 26.7 µg/m³ 적게 모사하였다. 향후 축적될 자료를 활용하면 세정계수의 지역적, 시간적 분포 특징에 대한 기반을 마련할 수 있다. 요약하면, 이 연구의 결과는 다년간의 측정자료를 사용하여 동아시아의 특성을 대표하는 합리적인 세정계수를 도출하였으며, 이를 CMAQ와 같은 3차원 대기질 모델에 적용하여 보다 정확한 한반도 미세먼지 모사를 도모할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2022-03-00-008)과 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 동북아-지역 연계 초미세먼지 대응 기술개발 사업의 지원을 받아 수행하였습니다(2020M3G1A1114617).

References

- Andronache, C. (2003) Estimated variability of below-cloud aerosol removal by rainfall for observed aerosol size distributions, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3(1), 131-143.
- Bae, S.Y., Jung, C.H., Kim, Y.P. (2006) Development and evaluation of an expression for polydisperse particle scavenging coefficient for the below-cloud scavenging as a function of rain intensity using the moment method, *Journal of Aerosol Science*, 37(11), 1507-1519. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2006.02.003>
- Baklanov, A., Sørensen, J.H. (2001) Parameterisation of radionuclide deposition in atmospheric long-range transport modelling, *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(10), 787-799.
- Barth, M.C., Rasch, P.J., Kiehl, J.T., Benkovitz, C.M., Schwartz, S.E. (2000) Sulfur chemistry in the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model: Description, evaluation, features, and sensitivity to aqueous chemistry, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D1), 1387-1415. <https://doi.org/10.1029/1999jd900773>
- Choi, Y., Kanaya, Y., Takigawa, M., Zhu, C., Park, S.M., Matsuki, A., Sadanaga, Y., Kim, S.W., Pan, X., Pisso, I. (2020) Investigation of the wet removal rate of black carbon in East Asia: Validation of a below- and in-cloud wet removal scheme in FLEXible PARTicle (FLEXPART) model v10. 4, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(21), 13655-13670.
- ENVIRON. Inc. (2005) User's Guide to the Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx) Version 4.20. ENVIRON International Corporation, 101 Rowland Way, Suite 220, Novato, California 94945-5010.
- Jung, C.H., Lee, H.M., Park, D., Yoon, Y.J., Choi, Y., Um, J., Lee, S.S., Lee, J.Y., Kim, Y.P. (2022) Parameterization of below-cloud scavenging for polydisperse fine mode aerosols as a function of rain intensity, *Journal of Environmental Sciences*, 132, 43-52.
- Jylhä, K. (1999) Relationship between the scavenging coefficient for pollutants in precipitation and the radar reflectivity factor. Part I: Derivation, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 38(10), 1421-1434.
- Laakso, L., Grönholm, T., Rannik, Ü., Kosmale, M., Fiedler, V., Vehkamäki, H., Kulmala, M. (2003) Ultrafine particle scavenging coefficients calculated from 6 years field measurements, *Atmospheric Environment*, 37(25), 3605-3613.
- Levine, S.Z., Schwartz, S.E. (1982) In-cloud and below-cloud scavenging of nitric acid vapor, *Atmospheric Environment* (1967), 16(7), 1725-1734.
- Lu, X., Fung, J.C. (2018) Sensitivity assessment of PM_{2.5} simulation to the below-cloud washout schemes in an atmospheric chemical transport model, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 70(1), 1476435. <https://doi.org/10.1080/16000889.2018.1476435>
- Mebust, M.R., Eder, B.K., Binkowski, F.S., Roselle, S.J. (2003) Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model aerosol component 1. Model description, *Journal of Geophysical Research*, 108(D6). <https://doi.org/10.1029/2001jd001409>
- Okita, T., Hara, H., Fukuzaki, N. (1996) Measurements of atmospheric SO₂ and SO₄²⁻, and determination of the wet scavenging coefficient of sulfate aerosols for the winter monsoon season over the Sea of Japan, *Atmospheric Environment*, 30(22), 3733-3739.
- Pandis, S.N., Seinfeld, J.H. (2016, April 4) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*

- (3rd ed.). Wiley.
- Rasch, P.J., Barth, M.C., Kiehl, J.T., Schwartz, S.E., Benkovitz, C.M. (2000) A description of the global sulfur cycle and its controlling processes in the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model, version 3, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D1), 1367-1385. <https://doi.org/10.1029/1999jd900777>
- Scott, B.C. (1982) Predictions of in-cloud conversion rates of SO₂ to SO₄ based upon a simple chemical and kinematic storm model, *Atmospheric Environment* (1967), 16(7), 1735-1752.
- Slinn, W.G. (1974) Precipitation scavenging: some problems, approximate solutions and suggestions for future research (No. BNWL-SA-5062 (Rev.). Battelle Pacific Northwest Labs., Richland, Wash (USA).
- Slinn, W.G.N. (1977) Some approximations for the wet and dry removal of particles and gases from the atmosphere, *Water, Air, and Soil Pollution*, 7(4), 513-543.
- Volken, M., Schumann, T. (1993). A critical review of below-cloud aerosol scavenging results on Mt. Rigi. *Water, Air, and Soil Pollution*, 68 (1), 15-28.
- Xu, D., Ge, B., Chen, X., Sun, Y., Cheng, N., Li, M., Pan, X., Ma, Z., Pan, Y., Wang, Z. (2019) Multi-method determination of the below-cloud wet scavenging coefficients of aerosols in Beijing, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(24), 15569-15581. <https://doi.org/10.5194/acp-19-15569-2019>
- Xu, D., Ge, B., Wang, Z., Sun, Y., Chen, Y., Ji, D., Yang, T., Ma, Z., Cheng, N., Jianqi Hao, J., Yao, X. (2017) Below-cloud wet scavenging of soluble inorganic ions by rain in Beijing during the summer of 2014, *Environmental Pollution*, 230, 963-973.
- Zhao, S., Yu, Y., He, J., Yin, D., Wang, B. (2015) Below-cloud scavenging of aerosol particles by precipitation in a typical valley city, northwestern China, *Atmospheric Environment*, 102, 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.051>

Authors Information

- 박다솜 (건국대학교 환경공학과 석박사통합과정)
(shn02022@gmail.com)
- 최용주 (한국외국어대학교 환경학과 교수)
(choingjoo@hufs.ac.kr)
- 선우 영 (건국대학교 사회환경공학부 교수)
(ysunwoo@konkuk.ac.kr)
- 정창훈 (경인여자대학교 보건의료행정학과 교수)
(jch@kiwu.ac.kr)