

수치모델을 이용한 인공증우에 따른 PM₁₀ 저감효과 분석

임윤규 · 김부요 · 장기호* · 차주완 · 이용희

국립기상과학원 기상응용연구부

(접수일: 2022년 9월 14일, 수정일: 2022년 10월 20일, 게재확정일: 2022년 11월 11일)

Analysis of PM₁₀ Reduction Effects with Artificial Rain Enhancement Using Numerical Models

Yun-Kyu Lim, Bu-Yo Kim, Ki-Ho Chang*, Joo Wan Cha, and Yong Hee Lee

Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA, Seogwipo, Korea

(Manuscript received 14 September 2022; revised 20 October 2022; accepted 11 November 2022)

Abstract Recently, interest in the possibility of a washout effect using artificial rain enhancement technology to reduce high-concentration fine dust is growing. Therefore, in this study, the reduction rate of PM₁₀ concentration according to the amount of artificial rain enhancement was calculated during Asian Dust event which occurred over the Korean Peninsula on March 29, 2021 using air quality model [i.e., Community Multiscale Air Quality (CMAQ)] combined with the mesoscale model for artificial rain enhancement (i.e., WRF-MMS). According to WRF-MMS, the washout effect lasted 5 hours, and the maximum precipitation rate was calculated to be 1.5 mm hr⁻¹. According the CMAQ results, the PM₁₀ reduction rate was up to 22%, and the affected area was calculated to be 6.4 times greater than that of the artificial rain enhancement area. Even if the maximum amount of precipitation per hour is lowered to 0.8 mm hr⁻¹ (about 50% level), the PM₁₀ reduction rate appears to be up to 16%. In other words, it is believed that this technique can be used as a direct method for reducing high-concentration fine dust even when the artificial rain enhancement effect is weak.

Keywords: Washout, Artificial rain enhancement, PM₁₀, Numerical model, Reduction rate

1. 서 론

우리나라는 지리적으로 편서풍대에 위치하여 기압 배치에 따라 몽골과 중국 사막에서 발생한 황사와 주변 도시와 국가들로부터 산업활동과 화석연료 사용 등으로 배출된 인위적인 대기오염물질들이 유입되어 고농도 미세먼지(PM₁₀)가 나타난다(Peterson et al., 2019; Hur et al., 2021). 더욱이 동북아시아 지역은 최근 급격한 경제 성장과 더불어 고농도의 대기오염 물질들을 빈번히 배

출시키고 있다(Ding and Liu, 2014; Wang and Chen, 2016). 한반도 PM₁₀ 농도에 대한 국외의 기여도(영향력)는 약 40%~50%로 추정되고(Lee et al., 2011; Oh et al., 2020), PM₁₀에 포함된 물질들은 아황산가스(SO₂), 일산화탄소(CO), 납(Pb) 등 유해한 유기·무기 화학물질들이 다량 포함되어 있다(Kim and Lee, 2018). 이러한 PM₁₀은 대기 중에 부유하며 단기적으로 교통사고와 사망률을 증가시킬 뿐만 아니라, 장기적으로 심폐 질환과 호흡기 질환 등을 유발시켜 공중보건을 위협한다(Yang et al., 2020; Minh et al., 2021). 따라서 많은 나라에서 대기질 개선을 위해 실시간 모니터링과 예측을 수행하며, 대기오염물질의 배출 규제와 저감을 위해 노력하고 있다(Czernecki et al., 2021). 환경부와 지자체 등은 직접적인 PM₁₀ 저감을 위해 산업·수송 배출 규제와 녹지

*Corresponding Author: Ki-Ho Chang, Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6664, Fax: +82-64-738-6515
E-mail: khchang@korea.kr

조성, 그리고 여과집진기 등의 설치를 통해 실내의 PM₁₀ 농도를 감축시키고 있다(MOE, 2021). 그러나 이러한 방법은 우리나라 주변 지역에서 수송되어 오는 광범위한 고농도 미세먼지를 감소시키기에는 실효성이 크지 않다. 따라서 중국과 인도 등을 포함하여 많은 나라에서 PM₁₀ 저감을 목적으로 기상조절 실험을 시도하고 있다(Press Trust of India, 2018; Support the Guardian, 2021). 즉, PM₁₀ 농도는 강수에 의한 세정효과를 보이고 있기 때문에 인위적으로 강수를 발생시켜 PM₁₀ 농도의 저감을 기대해 볼 수 있다(Ouyang et al., 2015; Kim and Kim, 2020).

기상조절 실험은 요오드화은(AgI) 또는 염화칼슘(CaCl₂)과 같은 연소탄을 구름에 인위적으로 살포하여 미세물리 과정을 부여함으로써 구름의 강수 효율을 증가시켜 증우시키는 기술을 일컫는다(Kim et al., 2020a). 또한 기상항공기를 이용한 인공증우 기술은 환경문제를 최소화하며, 비교적 적은 비용으로 강수를 유발시킬 수 있는 방안 중 하나이다(Korneev et al., 2017). 이미 많은 나라와 다양한 연구 결과를 통해 기상조절 실험에 따른 증우 효과와 증우에 따른 경제적인 효과를 제시하고 있다(Tessendorf et al., 2019; Kim et al., 2020b). 우리나라에서는 국립기상과학원에서 2019년부터 산불 및 가뭄 예방, 미세먼지 저감, 안개 저감을 목적으로 다목적 기상항공기(나라호)를 활용하여 기상조절 실험을 수행하여 인공강우 기반기술을 확보하고 있다(Jung et al., 2022). 최근 2021년도 국립기상과학원 인공강우 항공실험 연구 결과에 의하면 총 23회의 실험을 통해 최대 1.5 mm hr⁻¹의 평균 증우효과를 보이고 있다(NIMS, 2022).

본 연구에서는 PM₁₀ 저감을 목적으로 기상항공기를 이용한 인공증우 실험의 가능성을 분석하고자 하였다. 즉, CMAQ (Community Multiscale Air Quality Modeling System) 기반의 화학수송모델과 인공강우 수치모형을 이용하여 인공증우 실험을 수행하였을 때 발생할 수 있는 PM₁₀ 농도 저감효과를 수치모의하여 감축 정도와 효과 범위 등의 분석을 수행하였다. 이 연구에서 사용된 화학수송모델과 입력자료 그리고 수치모의 방법은 2장에 나타내었고, 수치모의 전과 후의 비교 결과는 3장에 나타내었다.

2. 사례일 및 수치모의 방법

2.1 사례일 선정

인공증우 수치모의 결과를 이용한 대기질 수치모의를 통해서 미세먼지 저감효과를 분석하기 위해서는 다음과 같은 사례일 조건이 필요하다. 우선 인공증우 실험 효과를 기대할 수 있는 목표지역의 강수조건이 필수적이며, 강수세정 효과를 보다 확실하게 보여줄 수 있는

고농도 미세먼지가 복합적으로 나타나는 조건이다. 따라서 목표지역 강수 현상 및 고농도 미세먼지 발생일을 고려하여 2021년 3월 28~29일 한반도 황사일을 사례일 것으로 선정하였다.

Figure 1a는 3월 27일 12 KST 황사일기도를 나타낸 것으로 중국 황사발원지인 몽골동부와 내몽골고원에서 기압골 발달로 인한 저기압 후면을 따라 대규모 황사가 발원한 것을 알 수 있다(붉은 테두리원 지점). 그리고 한반도에 황사가 본격적으로 나타난 29일 종관일기도(Fig. 1b)를 살펴보면 만주지역으로 저기압 중심이 이동하면서 한반도는 북서풍계의 영향으로 많은 구름과 황사현상이 나타나고 있다. Figure 1c는 사례일 중심으로 기상청 전국 관측소 지점별(28개소) PM₁₀ 농도 시계열을 나타낸 것이다. 우리나라는 지난 3월 26~27일 몽골과 내몽골 고원에서 발원한 황사의 영향으로 3월 29일 새벽부터 30일 낮까지 고농도 PM₁₀ (흑산도 최대 1,486 μg m⁻³) 현상이 나타나고 있다. 또한 황사를 동반한 저기압 세력의 이동으로 저기압 전면에 해당하는 3월 28일 19 KST부터 29일 05 KST까지 주로 경기도 일대와 강원도, 충청지역 일부 지역에 3시간 누적 최대 2.0 mm 수준의 강수가 관측되었다(Fig. 2).

2.2 수치모의 방법

인공증우 수치모의의 초기장과 경계장 생성을 위해 기상청 현업 모델인 UM (Unified Model) GDAPS (Global Data Assimilation Prediction System)의 매 6시간 간격의 예측자료중 00과 03 예측시간 자료만을 채택하여 최대한 재분석장이 반영될 수 있도록 입력자료를 구성하였다. 수치모의의 도메인은 내몽골 고원의 황사발원을 고려하기 3개의 등지격자체계를 이용하여 구성하였고, 최종 한반도 도메인은 3 km 수평해상도와 연직 39층으로 구성하였다(Fig. 3). 수치모의 기간은 몽골과 내몽골 고원 황사발원의 영향을 포함하기 위해 3월 26~30일까지이며, 수치모의 예측시간은 24시간, 워스타트 방식으로 수행하였다.

2.2.1 인공증우 수치모의

기상청에서는 인공증우 실험을 통한 시딩물질의 확산과 그 영향을 분석하기 위하여 WRF모델에 기반한 인공증우(설) 수치모형을 개발하여 운영하고 있다(Kim et al., 2015; Chae et al., 2018). 인공증우 수치모형은 WRF 모델의 Morrison 구름 미세물리방안에 시딩물질(CaCl₂, AgI)의 물리적 특성이 로그로말함수에 따라 수농도로 계산되어 강수입자 및 얼음입자를 증가시켜 강수에 영향을 줄 수 있도록 수정한 것이다.

국립기상과학원에서는 인공증우 항공실험을 위해 기상항공기(나라호)를 활용하여 시딩물질인 연소탄(CaCl₂,

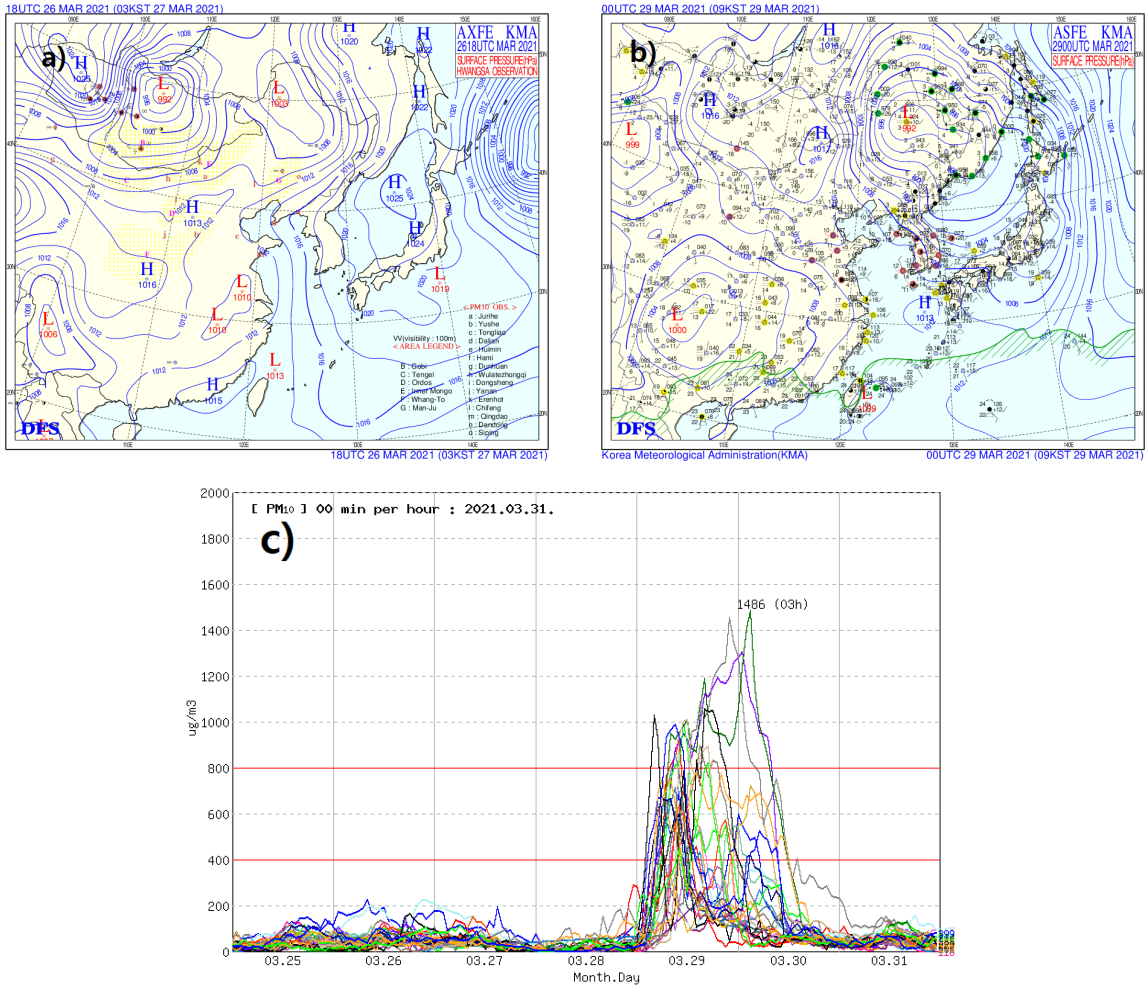


Fig. 1. Weather map for Asian Dust (a: 2021. 3. 27. 12 KST), synoptic weather chart (b: 2021. 3. 29. 09 KST) and time series of PM₁₀ concentration at each site of the Korea Meteorological Administration (c: 2021. 3. 25~21.).

AgI) 24발을 목표지점에 약 1시간 동안 살포하여 그 효과를 검증·분석하고 있다. 본 연구에서도 실제 항공실험과 유사한 방법으로 흡습성물질인 염화칼슘(CaCl₂) 연소탄 24발을 1시간 동안 수도권 서쪽 해상부근(Fig. 4의 서해상에 표기된 직선라인)에 가상으로 시딩하여 경기도와 충청권을 대상으로 인공중우가 나타날 수 있도록 실험을 설계하였다. 그리고 인공중우 실험에 의한 중우 최대 영향면적은 수치모의에서 0.1 mm (기상청 일강수일 기준값) 이상 나타난 격자수와 격자면적(9 km²)을 곱하여 산정하였다.

2.2.2 대기질 수치모델

미세먼지 저감효과를 산출하기 위한 대기질 모델은

미국환경보호국(United States Environmental Protection Agency, US EPA)에서 개발된 CMAQ 버전 5.2.1에 동아시아 황사발원 효과를 반영하기 위하여, 기상청 현업 황사예측모델인 ADAM3 (Asian Dust and Aerosol Model Version3)의 황사발원알고리즘(Park et al., 2012; Ryoo et al., 2020)을 미세먼지 산출과정에 추가하였다. ADAM의 수평 먼지플럭스는 11개의 입자크기(0.50~74.00 μm)에 대해 각 격자점의 먼지질량농도를 산출하며, 식(1)과 같이 계산한다.

$$H = \left\{ \sum_i (1 - f_i R_i) \right\} \times \alpha \times U^{*4}, \text{ if } U^* \geq U_i^* \quad (1)$$

여기서 H는 지표면에서 먼지수평플럭스, U*는 마찰속

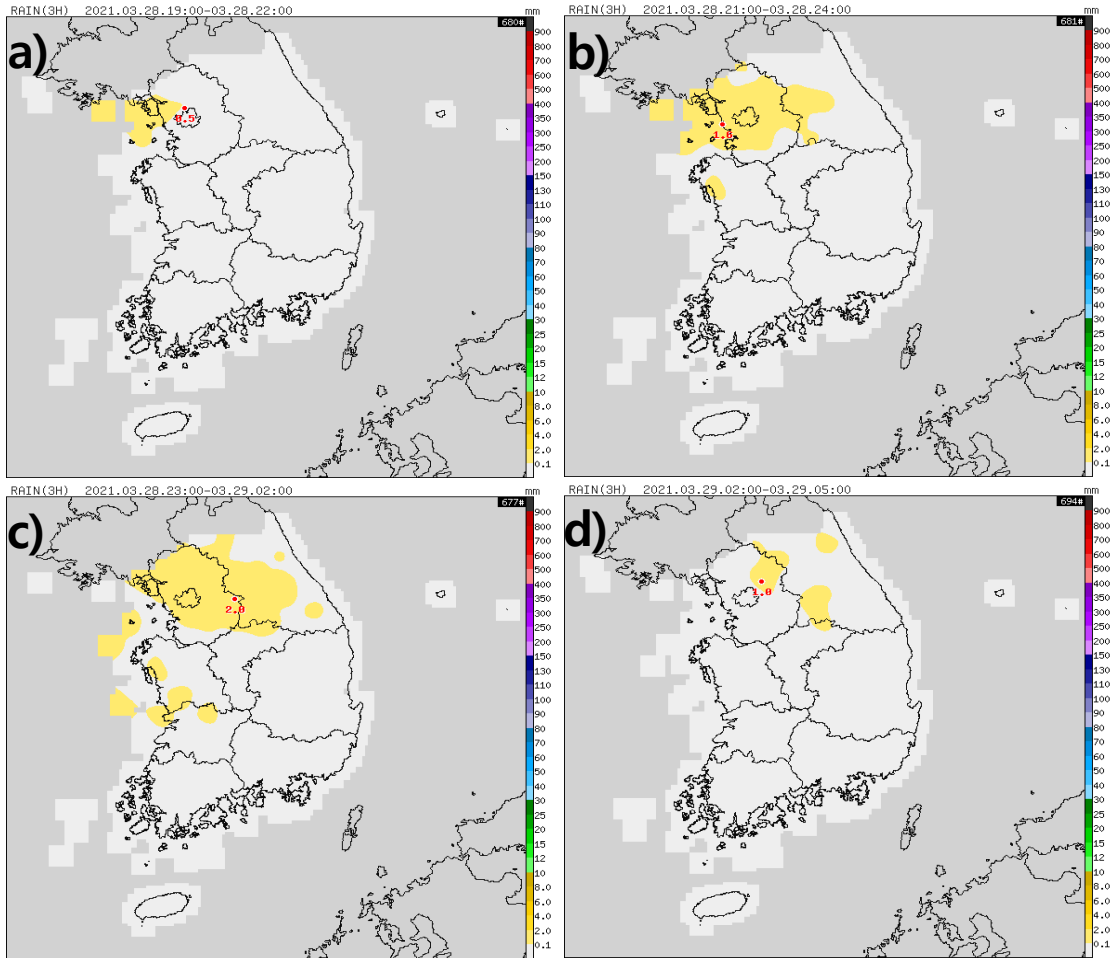


Fig. 2. Distribution of accumulated precipitation over the three hours on AWS (a: 28. 19:00, b: 28. 21:00, c: 29. 02:00, d: 29. 05 KST).

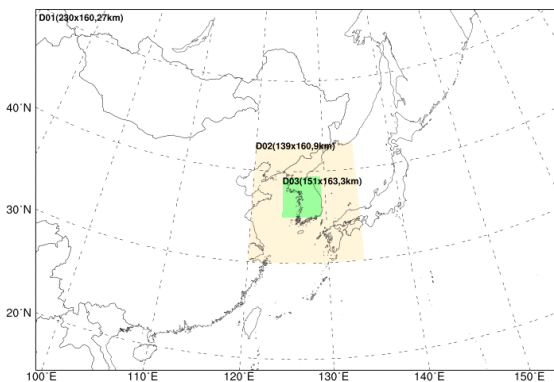


Fig. 3. Three nesting grid system centered on the Korean Peninsula for artificial rainfall experiments.

도, U_i^* 는 임계마찰속도, f_i 는 황사발원지 종류에 따른 프랙션값, 그리고 R_i 는 i 형태 식생에 따른 감쇄계수이다.

대기질 모델의 기상입력자료는 인공증우 수치모델의 결과값을 CMAQ 기상입력자료인 MCIP 형태로 변환하여 사용하였다. 국내 인위적 배출량은 국립환경과학원에서 생산한 CAPSS 2016 (Clean Air Policy Support System 2016) 1 km 격자자료, 국외 인위적 배출량은 EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research)팀에서 만든 HTAB (Hemispheric Transport of Air Pollution) 자료를 사용하였다. 또한 자연배출량 입력자료는 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) version 2.0.4 (Guenther et al., 2006)을 이용하여 구성하였다. 이상과 같은 기상 및 대기질모델의 흐름도를 Fig. 5에 나타내었다.

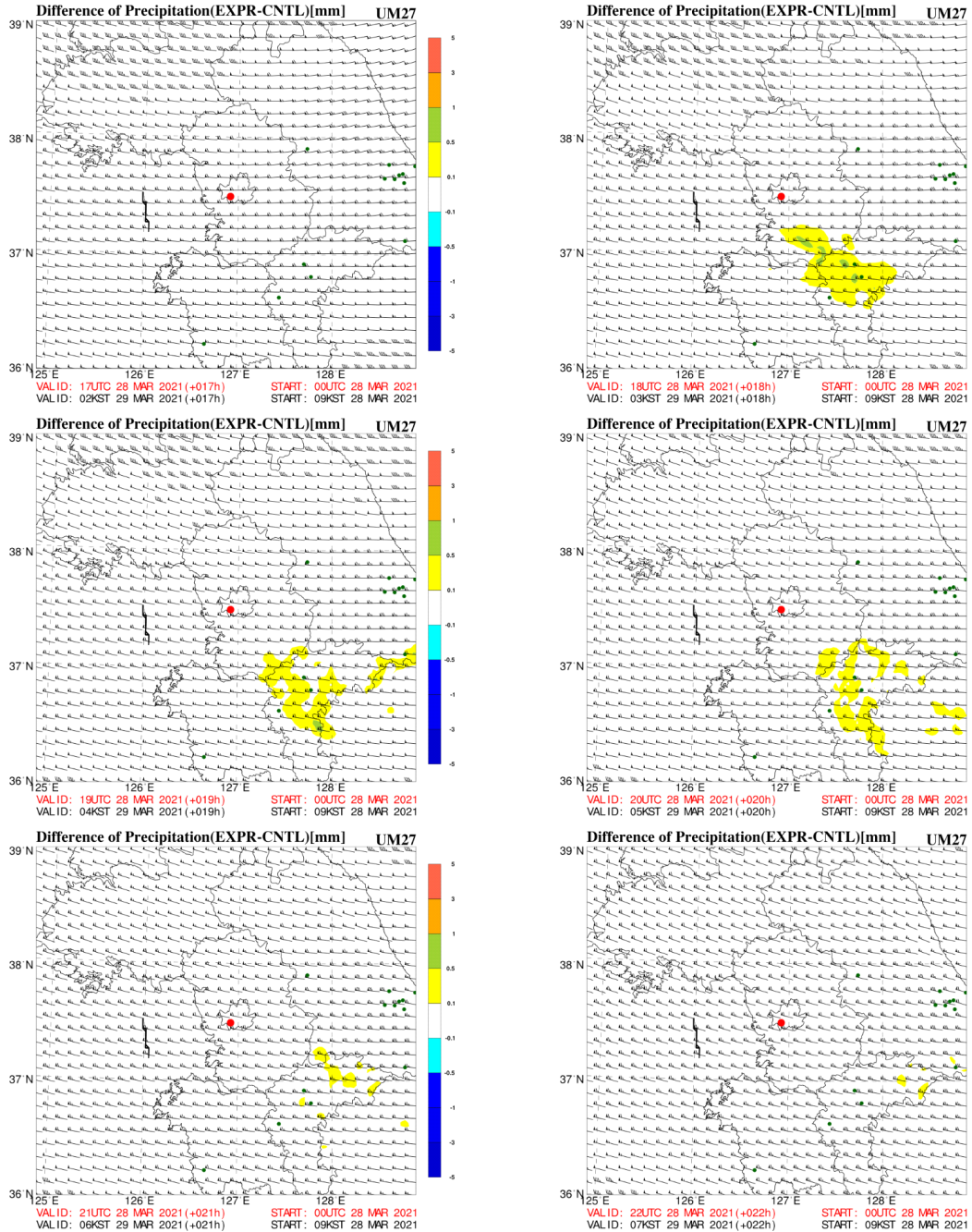


Fig. 4. Distribution of artificial rain enhancement using WRF-MMS (2021. 3. 29. 02-07 KST).

2.2.3 인공증우량 민감도 설정에 따른 PM₁₀ 저감효과 분석

기상청은 기상항공기를 이용하여 시딩물질을 목표지역 풍상측에서 시딩을 통해서 인공증우 항공실험 효과

분석 연구를 진행하고 있다(Cha et al., 2019). 인공증우량은 시딩시간, 범위, 시딩량에 따라 그 효과(범위 및 증우강도 등)가 달라질 수 있으므로 인공증우 실험설계에 따라서 인공증우량과 이에 따른 미세먼지 저감효과 등

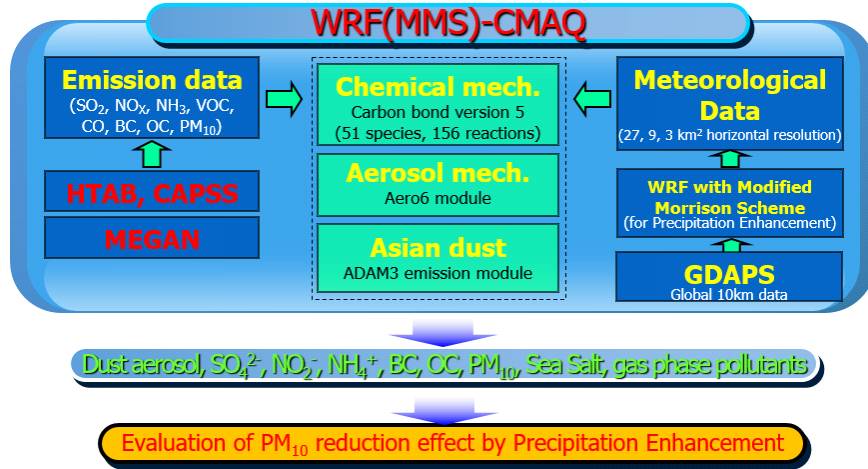


Fig. 5. The flowchart of WRF (MMS)-CMAQ model with the Asian Dust emission algorithm.

도 달라질 수 있다. 최적의 인공증우 효과를 기대하기 위해서는 앞서 언급한 시딩시간, 범위, 위치를 사전에 설계하고, 이에 따라 실험을 진행하면 되지만, 현실에서는 기상항공기 운영가능시간(주간에만 운영 중), 시딩지역 항공기 비행 공역확보문제(국방부 군사훈련, 민항기 이동경로 등), 항공기 시딩물질 적재중량의 한계 등 여러 가지 문제점이 있다. 이와 같이 현실적인 실험환경의 제한점 때문에 수치모형을 통한 다양한 실험설계에 따른 실험효과에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 인공증우에 의한 강수량 증가가 수치모의에 나타난 미세먼지 저감에 어느 정도 효과가 있는지에 대한 민감도 분석을 위해 시딩환경의 변화(시간, 범위, 시딩량)에 의한 인공증우량 편차로 분석하기보다는 보다 직관적으로 해석할 수 있도록 대기질모델의 기상입력자료인 증우지역의 강수량을 기존대비 50% 감소와 200% 증가수준으로 변경했을 때 나타나는 PM₁₀ 농도의 저감률을 분석하였다. CMAQ 모델의 습성침적 알고리즘은 RADM (Chang et al., 1987)에 기반된 것으로 다음 식(2)와 같이 각 물질별로 구름액체물량과 강수률에 따라 결정되기 때문에 본 실험에서 습성침적에 따른 강수세정효과는 강수량 증가에 따른 강수를 변화에 기인된 결과이다.

$$W_{def} = \int_0^{\tau_{cld}} \bar{m}_i^{cld} P_r dt \quad (2)$$

여기서 τ_{cld} 는 1이며 m_i 는 오염물질에 따른 구름액체물량, P_r 은 강수률을 나타낸다.

3. 결 과

3.1 인공증우 수치모의

Figure 5는 인공증우 수치모형을 이용하여 나타난 강수편차(EXPR-CNTR)장을 나타낸 것이다. CNTR은 인공증우 효과가 고려되지 않은 국지기상모델(WRF)의 수치모의 그리고 EXPR은 인공증우 효과가 고려된 수치모의 결과를 의미한다. Figure 5에 나타난 양의 편차 인공증우량(최대 1.5 mm hr⁻¹)은 3월 29일 03 KST에 충북지역에 넓게 나타난 강수를 대상으로 29일 00 KST에 경기도 서쪽 해상에서 CaCl₂ 24발 연소탄을 1시간 동안 시딩하여 그 효과가 나타난 것이다. 이러한 결과는 2021년 국립기상과학원에서 실시한 인공증우 항공실험에서 나타난 최대 인공증우량 평균값인 1.5 mm hr⁻¹ 수준과 부합되는 결과이다. 인공증우에 의한 효과는 주로 3월 29일 03 KST부터 07 KST까지 약 5시간에 걸쳐 주로 경기남부와 충청도 전역으로 나타나고 있고, 최대 영향면적은 05 KST에 약 11,763 km²로 산출되었다(Table 1).

3.2 인공증우에 따른 PM₁₀ 농도 수치모의

CNTR과 EXPR 기상입력자료를 이용한 대기질 수치모델의 인공증우지역 PM₁₀ 농도 저감률을 Table 1에, 강수편차(EXPR-CNTR)에 따른 PM₁₀ 농도 편차(CNTR-EXTR)를 Fig. 6에 나타내었다. 실제 관측값에 나타난 사례일의 고농도 PM₁₀ (충청도 3월 29일 01~08시 평균 415 μg m⁻³)에 비해 대기질 수치모의 결과에서 나타난 농도값이 약 5배 낮은 수준(동시간 평균 81 μg m⁻³)으로 모의하고 있다. 이러한 모델의 주요 오차는 고농도 황사

Table 1. Reduction rate of PM₁₀ concentration according to amount of artificial rain enhancement by WRF-MMS.

Time (KST)	Artificial rain enhancement			CNTR Avg. PM ₁₀ (μg m ⁻³)	EXPR Avg. PM ₁₀ (μg m ⁻³)	PM ₁₀ reduction effect area (grid number)	Difference (CNTR-EXPR)	PM ₁₀ reduction rate (%)
	Amount (mm) (EXPR-CNTR)	Area (grid number)	Rate (mm hr ⁻¹)					
2021.03.29. 00	-	-	-	65.6	65.2	830.0	0.4	0.7
2021.03.29. 01	-	-	-	65.3	64.6	1,963.0	0.7	1.1
2021.03.29. 02	31.8	87.0	0.4	77.3	69.9	3,608.0	7.4	9.6
2021.03.29. 03	1,316.6	858.0	1.5	97.5	81.8	5,243.0	15.7	16.1
2021.03.29. 04	1,148.6	1,281.0	0.9	97.6	76.2	5,388.0	21.4	22.0
2021.03.29. 05	1,032.8	1,307.0	0.8	88.3	72.2	5,575.0	16.1	18.2
2021.03.29. 06	454.8	863.0	0.5	79.6	70.7	5,648.0	8.9	11.2
2021.03.29. 07	188.4	411.0	0.5	76.0	71.8	5,851.0	4.2	5.5
2021.03.29. 08	38.6	98.0	0.4	68.4	66.8	6,350.0	1.6	2.3

사례와 관련하여 대기질 수치모의에서 황사발원량에 대한 과소 평가, 중국 북동쪽 산업단지에서 발생한 오염물질의 월경성 이동과 관련된 정량적 보정(PM₁₀ 자료동화) 등이 이루어지지 않았기 때문으로 해석된다. 하지만, 황사발원에 따른 대규모 미세먼지 유입현상 등은 적절하게 반영되어 고농도 PM₁₀ 효과가 모사되었기에 본 연구목적을 위한 미세먼지 저감률 분석에는 타당할 것으로 사료된다.

인공증우에 따른 PM₁₀ 농도 감소지역이 인공증우 지역에 비해 6.4배 넓게 나타나고 있어, 수치모델 결과로 공간적으로 강수세정 효과의 영향이 매우 크게 나타남을 알 수 있다(Figs. 6c, d 비교). 이러한 결과는 매우 고무적인 것으로 인공증우 실험결과에 따른 비교적 약한 증우효과(평균 0.7 mm hr⁻¹)로 경기도 넓이 면적에 해당하는 지역의 미세먼지 농도 수준을 인공증우 효과가 나타나는 기간(6시간) 동안 평균 11% 감소시키는 것으로 알 수 있다. 특히, 최대 인공증우량이 나타난 3월 29일 03 KST (1.5 mm hr⁻¹) 이후 04 KST에 최대 PM₁₀ 농도 저감률은 22% 수준을 보였다.

3.3 인공증우량 민감도에 따른 PM₁₀ 저감효과

기존 인공증우량에 대한 PM₁₀ 농도 저감률의 유의미한 결과를 앞에서 살펴보았다. 따라서 수치모델상으로 인공증우량에 따른 PM₁₀ 농도 저감률이 어떻게 달라질 수 있는지에 대한 분석을 실시하였다. 기존 인공증우량에 따른 실험결과를 EXPR, 대기질모델의 기상입력자료

인 증우지역의 강수량을 기존대비 50% 감소로 설정한 것을 EXPR1, 200%로 증가로 설정한 것을 EXPR2로 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 각 실험의 최대 증우를 조건 0.8 (EXPR1), 1.5 (EXPR), 3.0 (EXPR2) mm hr⁻¹에서, 최대 PM₁₀ 농도 저감률은 각각 16.2%, 22.0%, 27.5%로 나타났다. 즉, 증우강도가 셀수록 PM₁₀ 농도 감소률은 크게 나타났다. 하지만 감소 효율은 증우강도 50%, 100%, 200%일 때 각각 73%, 100%, 125%로 나타나, 그 효율성이 증우강도에 따라 낮아지는 경향이 있다. 그럼에도 불구하고 EXPR1의 약한 증우강도(평균 0.4 mm hr⁻¹) 조건에서도 평균 9% 수준의 PM₁₀ 감소효과가 있어 약한 인공증우에서도 PM₁₀ 농도 저감효과가 나타날 수 있음을 시사한다.

4. 토 의

인공강우 수치모델을 이용한 인공증우량과 대기질 모델을 이용한 PM₁₀ 농도값 산정과정에서 사례일에 대한 실제현상 재현 정확도 향상에 필요한 자료동화 과정이 필요하며, 이에 따른 신뢰성 향상도 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 본 연구에서는 인공증우량에 따른 강수세정 효과가 대기질 모델을 통해서 정량적으로 얼마나 작용하는지에 대한 분석을 수행한 것으로 수치모델의 오차에 따른 한계가 있다. 특히, 대기질모델의 습성침적 과정의 정확도가 큰 영향을 미치는데, Appel et al. (2011)에 의하면 5년간 관측자료(황산염, 질산염,

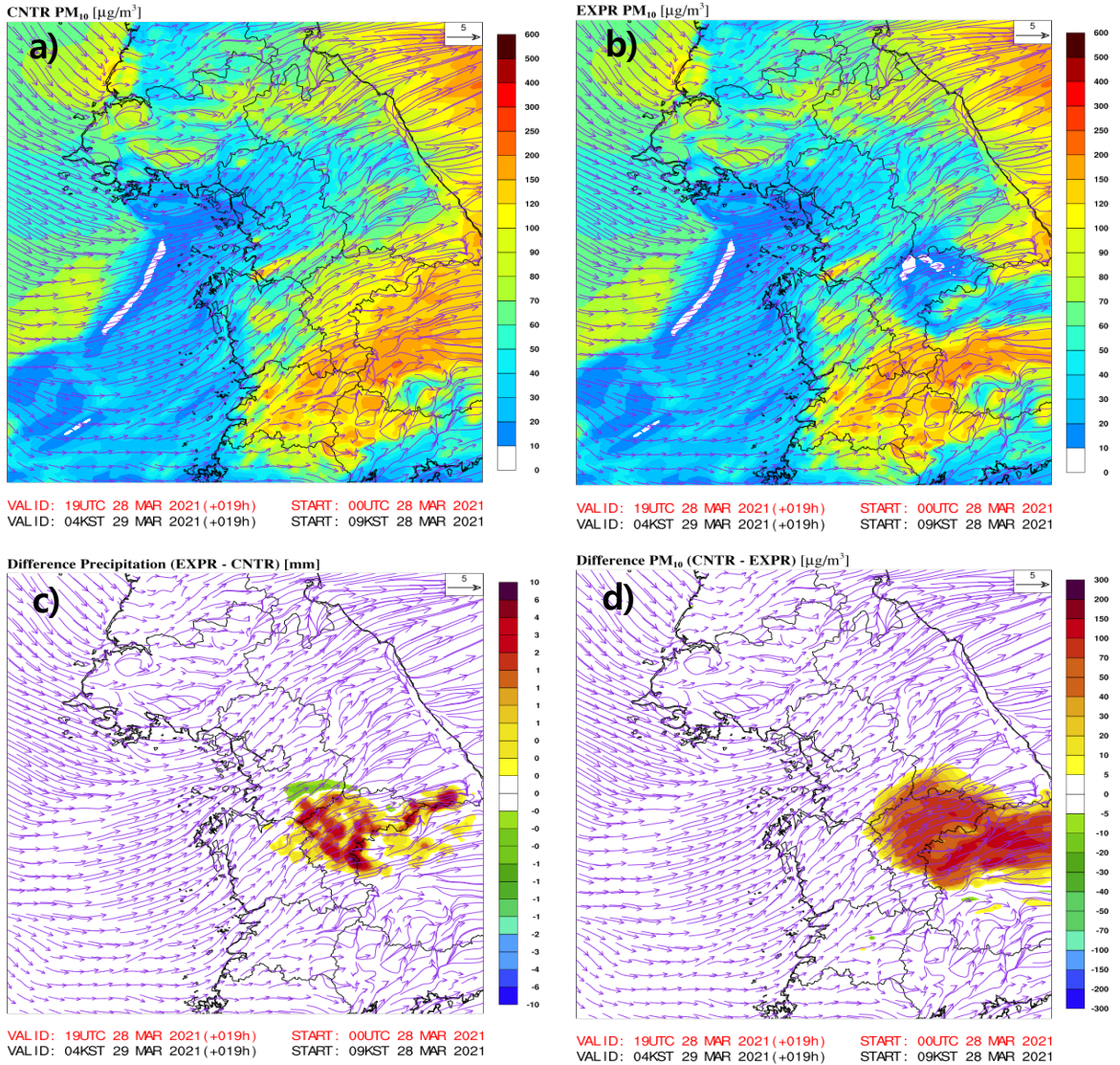


Fig. 6. Distribution of (c) precipitation deviation by WRF-MMS, (a) CNTR PM₁₀ concentration, (b) EXPR PM₁₀ concentration, (d) PM₁₀ deviation by CMAQ (2021. 3. 29. 04 KST).

암모늄)와 CMAQ (version 4.7) 수치모델의 결과와 비교했을 때 연간 편이가 ±15% 이내로 나타난다고 하였다.

그리고 본 연구의 민감도 실험(3.3절)은 증우면적을 동일하게 적용하고, 강우강도만 증가시킨 것이다. 앞서 2.2.3절에서 언급하였듯이 실제 항공기를 이용한 인공증우 실험은 최적의 실험조건에서 이행되기에 많은 제약이 있을 수 있다. 따라서 최적의 실험조건 하에 인공증우 실험을 실시하고, 이에 따른 PM₁₀ 저감효과 등을 분석하기 위해서는 수치모델을 이용한 이론적 연구가 필

요한 실정이다.

PM₁₀의 세정효과는 강수 강도가 높고 PM₁₀이 고농도일 때 크게 나타난다(Ouyang et al., 2015). 또한 강수 유무와 대기 중 습한 정도에 따라 PM₁₀의 습성 침적에도 중요하게 기여한다(Gao et al., 2019; Kim et al., 2022). 따라서 향후에 대형항공기를 이용한 인공강우 실험환경(시딩물질 연소량, 실험시간 등)의 변경으로 강우강도와 강우면적의 증가가 나타날 경우, PM₁₀ 농도의 저감효과는 더욱 크게 나타날 수 있을 것으로 기대한다.

Table 2. PM₁₀ reduction rate due to increase of rainfall intensity within artificial rain enhancement areas. EXPR1 and EXPR2 are experiments which artificial precipitation is set to 50% and 200% of EXPR, respectively.

Time (KST)	Artificial rain enhan. rate (mm hr ⁻¹)			EXPR Avg. PM ₁₀ (µg m ⁻³)			PM ₁₀ reduction rate		
	EXPR	EXPR1	EXPR2	EXPR	EXPR1	EXPR2	EXPR	EXPR1	EXPR2
2021.03.29. 00		-		65.2	55.4	65.2	0.7	0.7	0.7
2021.03.29. 01		-		64.6	65.2	63.4	1.1	0.8	1.5
2021.03.29. 02	0.4	0.2	0.6	69.9	73.3	66.7	9.6	6.3	13.3
2021.03.29. 03	1.5	0.8	3.0	81.8	86.1	76.8	16.1	11.7	21.1
2021.03.29. 04	0.9	0.4	1.8	76.2	82.4	70.4	22.0	16.2	27.5
2021.03.29. 05	0.8	0.4	1.6	72.2	77.2	67.9	18.2	13.2	22.7
2021.03.29. 06	0.5	0.3	1.0	70.7	73.3	68.2	11.2	8.1	14.0
2021.03.29. 07	0.5	0.2	0.9	71.8	73.8	70.1	5.5	4.1	6.9
2021.03.29. 08	0.4	0.2	0.7	66.8	68.1	65.7	2.3	1.8	2.9

5. 결 론

본 연구는 인공증우 수치모델과 대기질모델을 이용하여 인공증우량으로 인한 미세먼저 저감효과에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 인공증우 수치모델에 의한 증우효과가 약 5시간에 걸쳐 최대 1.5 mm hr⁻¹ 수준일 때, 대기질 모델에 의한 PM₁₀ 저감률은 최대 22%까지 나타났고, 그 영향 면적은 인공증우 면적의 6.4배에 달한다. 인공증우량이 50% 수준으로 낮아져도 PM₁₀ 저감률이 최대 16%까지 나타나, 인공증우효과가 미미한 수준이라도 강수세정에 의한 PM₁₀ 저감효과는 넓은 범위에서 유효한 수준으로 발현될 수 있음을 시사한다.

따라서 본 연구결과를 통해서 월경성 고농도 미세먼저와 강수구름 유입조건시, 효과적인 미세먼저 저감을 위하여 인공증우 기술의 실용성을 수치모의를 통해서 알 수 있었다. 향후 인공증우 기술의 실용화와 발전을 통하여 적극적으로 국민생활과 환경개선에 대처할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 기상조절 및 구름 물리 연구(KMA2018-00224)의 지원을 받았습니다.

REFERENCES

Appel, K. W., K. M. Foley, J. O. Bash, R. W. Pinder, R.

L. Dennis, D. J. Allen, and K. Pickering, 2011: A multi-resolution assessment of the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model v4.7 wet deposition estimates for 2002–2006. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 357–371, doi:10.5194/gmd-4-357-2011.

Cha, J. W., and Coauthors, 2019: Analysis of results and techniques about precipitation enhancement by aircraft seeding in Korea. *Atmosphere*, **29**, 481–499, doi:10.14191/Atmos.2019.29.4.481 (in Korean with English abstract).

Chae, S., K.-H. Chang, S. Seo, J. Y. Jeong, B. J. Kim, C. K. Kim, S. S. Yum, and J. Kim, 2018: Numerical simulations of airborne glaciogenic cloud seeding using the WRF model with the modified Morrison scheme over the Pyeongchang region in the winter of 2016. *Adv. Meteorol.*, **2018**, 8453460, doi:10.1155/2018/8453460.

Chang, J. S., R. A. Brost, I. S. A. Isaksen, S. Madronich, P. Middleton, W. R. Stockwell, and C. J. Walcek, 1987: A three-dimensional Eulerian acid deposition model: Physical concepts and formulation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **92**, 14681–14700.

Czernecki, B., M. Marosz, and J. Jędruszkiewicz, 2021: Assessment of machine learning algorithms in short-term forecasting of PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in selected Polish agglomerations. *Aerosol Air Qual. Res.*, **21**, 200586, doi:10.4209/aaqr.200586.

Ding, Y. H., and Y. J. Liu, 2014: Analysis of long-term var-

- iations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity. *Sci. China Earth Sci.*, **57**, 36-46, doi:10.1007/s11430-013-4792-1
- Gao, B., W. Ouyang, H. Cheng, Y. Xu, C. Lin, and J. Chen, 2019: Interactions between rainfall and fine particulate matter investigated by simultaneous chemical composition measurements in downtown Beijing. *Atmos. Environ.*, **218**, 117000, doi:10.1016/j.atmosenv.2019.117000.
- Guenther, A., T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P. I. Palmer, and C. Geron, 2006: Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (model of emissions of gases and aerosols from nature). *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 3181-3210.
- Hur, S. K., C. H. Ho, J. Kim, H. R. Oh, and Y. S. Koo, 2021: Systematic bias of WRF-CMAQ PM₁₀ simulations for Seoul, Korea. *Atmos. Environ.*, **244**, 117904, doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117904.
- Jung, W., K.-H. Chang, J. W. Cha, J. M. Ku, and C. Lee, 2022: Estimation of available days for a cloud seeding experiment in Korea. *J. Environ. Sci. Int.*, **31**, 117-129, doi:10.5322/JESI.2022.31.2.117 (in Korean with English abstract).
- Kim, B.-Y., J. W. Cha, A.-R. Ko, W. Jung, and J.-C. Ha, 2020a: Analysis of the occurrence frequency of seedable clouds on the Korean Peninsula for precipitation enhancement experiments. *Remote Sens.*, **12**, 1487, doi:10.3390/rs12091487.
- _____, J. W. Cha, W. Jung, and A.-R. Ko, 2020b: Precipitation enhancement experiments in catchment areas of dams: Evaluation of water resource augmentation and economic benefits. *Remote Sens.*, **12**, 3730, doi:10.3390/rs12223730.
- _____, Y. K. Lim, and J. W. Cha, 2022: Short-term prediction of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Seoul, South Korea using tree-based machine learning algorithms. *Atmos. Pollut. Res.*, **13**, 101547, doi:10.1016/j.apr.2022.101547.
- Kim, C. K., S. S. Yum, and Y.-S. Park, 2015: A numerical study of winter orographic seeding experiments in Korea using the weather research and forecasting model. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **128**, 23-38, doi:10.1007/s00703-015-0402-4.
- Kim, S. U., and K. Y. Kim, 2020: Physical and chemical mechanisms of the daily-to-seasonal variation of PM₁₀ in Korea. *Sci. Total Environ.*, **712**, 136429, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.136429.
- Kim, Y. P., and G. Lee, 2018: Trend of air quality in Seoul: policy and science. *Aerosol Air Qual. Res.*, **18**, 2141-2156, doi:10.4209/aaqr.2018.03.0081.
- Korneev, V. P., E. I. Potapov, and G. G. Shchukin, 2017: Environmental aspects of cloud seeding. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, **42**, 477-483, doi:10.3103/S106837391707007X.
- Lee, S., C. H. Ho, and Y. S. Choi, 2011: High-PM₁₀ concentration episodes in Seoul, Korea: background sources and related meteorological conditions. *Atmos. Environ.*, **45**, 7240-7247, doi:10.1016/j.atmosenv.2011.08.071.
- Minh, V. T. T., T. T. Tin, and T. T. Hien, 2021: PM_{2.5} forecast system by using machine learning and WRF model, a case study: Ho Chi Minh city, Vietnam. *Aerosol Air Qual. Res.*, **21**, 210108, doi:10.4209/aaqr.210108
- MOE, 2021: *2021 White Paper of Environment*. Ministration of Environment, 914 pp (in Korean).
- NIMS, 2022: *Operational Performance Report of Atmospheric Aircraft in 2021*. National Institute of Meteorological Sciences, 81 pp (in Korean).
- Oh, H. R., C. H. Ho, Y. S. Koo, K. G. Baek, H. Y. Yun, S. K. Hur, D. R. Choi, J. G. Jhun, and J. S. Shim, 2020: Impact of Chinese air pollutants on a record-breaking PMs episode in the Republic of Korea for 11–15 January 2019. *Atmos. Environ.*, **223**, 117262, doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117262.
- Ouyang, W., B. Guo, G. Cai, Q. Li, S. Han, B. Liu, and X. Liu, 2015: The washing effect of precipitation on particulate matter and the pollution dynamics of rainwater in downtown Beijing. *Sci. Total Environ.*, **505**, 306-314, doi:10.1016/j.scitotenv.2014.09.062.
- Park, S. U., J. H. Cho, and M. S. Park, 2012: A simulation of aerosols in Asia with the use of ADAM2 and CMAQ. *Adv. Fluid Mech. Heat Mass Transfer*, **258**.
- Peterson, D. A., and Coauthors, 2019: Meteorology influencing springtime air quality, pollution transport, and visibility in Korea. *Elementa Sci. Anthropocene*, **7**, 57, doi:10.1525/elementa.395.
- Press Trust of India, 2018: Air pollution: Delhi's overall air quality 'very poor', artificial rain may be induced. [Available online at <https://swachhindia.ndtv.com/delhi-air-quality-worsens-artificial-rain-to-be-induced-28132/>].
- Ryoo, S. B., J. Kim, and J. H. Cho, 2020: Performance of KMA-ADAM3 in identifying Asian dust days over Northern China. *Atmosphere*, **11**, 593, doi:10.3390/atmos11060593.
- Support the Guardian, 2021: China 'modified' the weather to create clear skies for political celebration – study. [Available online at <https://www.theguardian.com/wor>

- ld/2021/dec/06/china-modified-the-weather-to-create-clear-skies-for-political-celebration-study].
- Tessendorf, S. A., and Coauthors, 2019: A transformational approach to winter orographic weather modification research: The SNOWIE project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **100**, 71-92, doi:10.1175/BAMS-D-17-0152.1.
- Wang, H. J., and H. P. Chen, 2016: Understanding the recent trend of haze pollution in eastern China: Roles of climate change. *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 4205-4211, doi:10.5194/acp-16-4205-2016.
- Yang, G., H. Lee, and G. Lee, 2020: A hybrid deep learning model to forecast particulate matter concentration levels in Seoul, South Korea. *Atmosphere*, **11**, 348, doi:10.3390/atmos11040348.