

총 설

3차원 대기질 모델을 이용한 사막먼지 발생량 산정 모델의 검증 및 평가: 현황 및 전망

Status and Perspectives of the Validation and Evaluation of Wind-Blown Dust Models Using Three-Dimensional Air Quality Models

이해주, 박성훈^{1)*}

수도권 미세먼지연구·관리센터, ¹⁾순천대학교 환경공학과

Haeju Lee, Sung Hoon Park^{1)*}

Particle Pollution Research and Management Center, Incheon, Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental Engineering, Suncheon National University, Suncheon,
Republic of Korea

접수일 2025년 3월 12일
수정일 2025년 4월 7일
채택일 2025년 4월 7일

Received 12 March 2025

Revised 7 April 2025

Accepted 7 April 2025

*Corresponding author

Tel : +82-(0)61-750-3816

E-mail : shpark@scnu.ac.kr

Abstract Wind-blown dust plays a significant role in global air quality and climate change, making its accurate prediction and evaluation essential for atmospheric environmental research. This study examines the characteristics of wind-blown dust models applied to three-dimensional air quality models, with a particular focus on sandblasting schemes, which have been identified as a major source of uncertainty in dust emission estimation. Additionally, various validation methods were reviewed, and model evaluations were conducted using the JADE project and dust storm episodes in Korea. Through this analysis, we assessed how accurately each model predicts dust emissions. This study contributes to the enhancement of wind-blown dust models in three-dimensional air quality modeling and provides a foundation for improving the accuracy of dust and Asian dust forecasts in the future.

Key words: Wind-blown dust emission model, Wind erosion, Threshold friction velocity, Saltation, Sandblasting

1. 서 론

사막먼지는 동아시아 지역을 포함한 여러 국가에서 심각한 환경적, 건강적 문제를 초래하고 있다 (Middleton, 2017; Goudie and Middleton, 2006). 매년 봄, 황사는 광범위한 지역에 걸쳐 이동하며, 대기질을 악화시키고 인간의 건강에 부정적인 영향을 미친다 (Shao *et al.*, 2011; Goudie and Middleton, 2006). 특히, 사막먼지로 인한 피해는 호흡기 질환, 알레르기, 심혈관 질환을 악화시키는 등 공중 보건에 심각한 위협이 된다 (Chen *et al.*, 2020; Griffin *et al.*, 2001). Aragnou *et al.* (2021)은 호주 State of New South Wales에서 발생한 대규모 먼지 폭풍이 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도를 급격

히 상승시켜 건강에 심각한 영향을 미쳤음을 보여주었다. Yu *et al.* (2024)은 중앙아시아 종착호수 유역에서의 토양 풍식과 인구 노출 위험을 평가한 연구로, 사막먼지가 환경과 공중 보건에 미치는 위험성을 강조하였다.

사막먼지는 기후에도 중요한 영향을 미친다. 대기 중에서 태양 복사를 반사하거나 흡수하여 지구의 에너지 균형에 영향을 미치고 (Zhao *et al.*, 2023; Usha *et al.*, 2022), 대기 중 에어로졸과의 상호작용을 통해 강수 패턴을 변화시키는 등 기후 시스템에서 중요한 변수로 작용한다 (Banks *et al.*, 2023; Liaskoni *et al.*, 2023). 따라서 사막먼지의 정확한 발생량 예측과 이동 경로 분석은 대기질 및 기후 모델링에서 필수적인

요소이며, 이를 위해 다양한 수치 모델이 개발 및 적용되고 있다.

먼지 발생 모델의 정확도는 풍속, 토지피복도, 토질, 토양수분량과 같은 입력자료뿐만 아니라 임계마찰속도, saltation flux, sandblasting flux를 계산하는 기법(scheme)의 구성과 적용 방식에 크게 영향을 받으며, 지역적 특성과 환경 조건에 따라 다르게 나타날 수 있다. 기존 연구에서는 이러한 scheme들을 분석하고 개선하기 위해 다양한 시도를 해왔다. Kang *et al.* (2011) 연구에서는 겨울철 고농도 황사사례를 대상으로 MB (Marticorena and Bergametti, 1995), LS (Lu and Shao, 1999), S04 (Shao, 2004) scheme의 성능을 비교하여, 고비사막에서의 먼지 발생량 예측 정확도를 검증하였다. 연구 결과, 사하라 사막의 관측 데이터를 기반으로 구축된 경험식인 MB scheme은 LS와 S04에 비해 먼지 발생량을 과대 모의하는 경향이 강하게 나타났으며, 동아시아 지역에 적용하기에는 적합하지 않은 것으로 판단되었다. LS와 S04 scheme의 모의 결과를 비교한 결과, aggregate disintegration 과정을 고려하지 않는 LS가 세 가지 scheme 중 가장 적은 먼지 발생량을 예측하였지만, 관측된 PM_{10} 농도와 비교했을 때 LS조차도 과대 모의하는 모습을 보였다. 연구진은 이러한 과대 모의 현상의 원인을 분석한 결과, 모델 입력값인 풍속의 과대 모의와 적설 분포 등 지표면 정보의 부정확성이 주요한 요인으로 작용한 것으로 판단하였다. 따라서, 연구에서는 겨울철 시뮬레이션에서 언 토양에 대한 고려가 이루어진다면 모델의 과대 모의가 현저히 줄어들 것이라는 결론을 도출하였다. 이처럼 3차원 대기질 모델을 활용한 먼지 발생 및 수송 과정의 검증에 대한 연구는 과거부터 지속적으로 이루어져 왔다.

대기질 모델은 단순한 배출량 산정뿐만 아니라, 기상 조건 및 에어로졸-복사 상호작용을 반영하여 먼지의 확산 및 농도 변화를 시뮬레이션할 수 있다는 강점을 가진다. 대표적인 3차원 대기질 모델로는 CMAQ (Community Multiscale Air Quality), WRF-Chem (Weather Research and Forecasting model cou-

pled with Chemistry), CHIMERE, CAMx (Comprehensive Air quality Model with extensions), GEOS-Chem (Goddard Earth Observing System with Chemistry) 등이 있으며, 이들은 사막먼지의 발생량을 예측하고 이동을 모의하는 데 널리 활용되고 있다. Uno *et al.* (2006)의 연구에서는 ADEC (Aeolian Dust Experiment on Climate Impact) 프로젝트를 통하여 동아시아 주요 발원지를 대상으로 COAMPS, ADAM, NARCM, DREAM, CEMSYS5, CFORS, NAAPS, MASINGAR 등 다양한 3차원 대기 모델의 먼지 발생량 산정 방식을 비교 분석하였다. 연구 결과, 모델 간 배출량 예측값이 2~4배 차이를 보이며, 예측 정확도가 25~75% 범위로 다양하게 나타남을 보고하였다. 또한 모델의 예측 정확도를 높이기 위해서는 먼지 발생원에서 관측한 기상, 토지 이용 현황, 토양 및 지표면 정보 등의 입력 데이터가 무엇보다 정확해야 한다고 제시하였다. 이는 먼지 모델의 성능이 모델에 적용된 풍속, 지표면 정보(적설량, 토양 습도 등), 먼지 발생량 산정 방법론의 선택에 따라 크게 달라질 수 있음을 시사한다.

황사의 영향권 및 발생권에 위치한 한국, 일본, 중국에서는 사막먼지 발생량 산정 모델의 개발과 개선을 통해 황사 예측 정확도를 높이기 위한 노력이 지속되고 있다. 한국 기상청에서는 ADAM (Asian Dust Aerosol Model) 모델(Park and In, 2003; In and Park, 2003)을 현업에 활용하고 있으며, 이 모델은 동아시아 주요 황사 발원지를 대상으로 한 토양 조사, 발생 조건 분석, 관측자료에 기반한 경험적 모수식을 통해 높은 예측 정확도를 보여준다(Park and Lee, 2004). 이후 ADAM은 지속적인 개선 과정을 거쳤다. ADAM2에서는 위성 기반 NDVI를 활용해 식생에 따른 황사 발생 억제 효과와 토지 피복별 임계풍속 변화를 반영함으로써 물리적 현실성을 높였고(Park *et al.*, 2010), ADAM3에서는 최신 관측자료와 RHWSO (Regridded Harmonized World Soil Database v1.2) 토양 정보를 기반으로 발원지역을 재정의하여 예측 정확도를 개선시켰다(Lee and Kang, 2023). ADAM3 모

델은 2022년 12월 황사 사례에서 고비사막과 내몽골 지역의 황사 발생과 유입 경로를 위성자료와 유사하게 재현함으로써 안정성과 신뢰성이 입증되었다 (Kang and Lee, 2023). 또한, 동북아-지역연계 초미세먼지 대응 기술 개발 사업을 통해 개발된 한국형 대기화학 모델링 시스템의 화학수송모델 GMAQ (GIST Multiscale Air Quality Modeling System)에 탑재된 세 가지 사막먼지 발생량 산정 모델 (CMAQ-DUST, SCNU, KOK)을 활용하여 관측자료를 활용한 단계별 정밀 분석 및 동아시아에 대한 다양한 황사 사례에 대한 예측 연구가 수행되었다 (Lee and Park, 2020; Lee *et al.*, 2019; Lee and Park, under review).

일본에서는 일본 기상청 (JMA)의 산하 연구기관인 기상연구소 (MRI)에서 개발한 MASINGAR (Model of Aerosol Species IN the Global Atmosphere) 모델 (Yukimoto *et al.*, 2011; Tanaka and Chiba, 2005)을 사막먼지 발생량 예측에 활용하고 있다. 이 모델은 사막먼지의 발생, 수송, 침적 과정을 전지구 규모에서 모의하며, CALIPSO 위성 라이다 및 Himawari-8 위성에서 관측된 에어로졸 정보를 동화하는 연구를 통해 예측 성능을 향상시켰다 (Sekiyama *et al.*, 2016, 2010). 최근에는 사막먼지 침적량에 대한 연도별 변동성을 분석하고, 이를 동아시아 지역의 기압계 변화와 연계하여 사막먼지의 이동 특성을 규명하는 연구가 수행되었다 (Kuramochi *et al.*, 2023). 특히 고기압과 저기압 순환에 따른 먼지 플렉스를 구분하여 분석함으로써, 대규모 기압계 구조에 따라 사막먼지의 이동 방향과 양의 변화를 정량적으로 제시하였다. 이외에도 JADE (Japan-Australia Dust Experiment) 프로젝트를 통해 사막먼지 발생 조건에 대한 현장 실험이 수행되었고 (Ishizuka *et al.*, 2014, 2008), 최근에는 자갈 지형이 사막먼지 발생을 저감시키는 효과를 반영한 모델 개선 연구도 진행되었다 (Sekiyama *et al.*, 2023).

중국은 동아시아 황사의 주요 발원지로서, 황사 발생의 주요 원인을 제공하는 동시에 그로 인한 환경 및 건강 피해를 직접적으로 겪는 국가이다. 이로 인

해 사막먼지 발생량 산정 모델의 개발과 관련 연구가 활발히 이루어지고 있다. 현재 중국에서 현업에 활용 중인 모델은 CUACE/Dust (Chinese Unified Atmospheric Chemistry Environment for Dust)로, 사막먼지의 발생, 수송, 침적 과정을 모사하고 위성 및 지상 관측자료를 이용한 3차원 변분 자료 동화 시스템 (3D-Var)을 통해 예측 정확도를 높였다 (Gong and Zhang, 2008; Niu *et al.*, 2008). 이 모델은 사막먼지 발생량 산정식에 대한 비교 연구 (Zhao *et al.*, 2006), 새로운 먼지 발생원 탐지 (Zhou *et al.*, 2019), 입자 크기 분포 반영 (Zhou *et al.*, 2021) 등을 통해 지속적으로 정교화되고 있다. 또한, 최근 연구로 Shao *et al.* (2025)은 SLDE (Source-Limited Dust Emission) 개념을 반영한 새로운 사막먼지 발생량 산정 모델식을 제안하여, 얇은 토양층의 빠른 고갈과 깊은 층의 지속적인 먼지 공급 등 실제 토양 조건을 고려한 물리 기반 접근의 필요성을 강조하였다. 이는 기존 모델의 과대 추정을 지적하며, 향후 PSD (Particle Size Distribution) 데이터베이스 구축과 관측 기반 모델 검증의 중요성을 제시하였다.

이 총설에서는 3차원 모델에서 사용하고 있는 먼지 발생량 산정 모델과 검증방법, 그리고 적용 사례에 대하여 중점적으로 돌아보았다. 2장에서는 3차원 대기질 모델인 CMAQ, WRF-Chem, CHIMERE, GMAQ 모델에서 사용하고 있는 사막먼지 발생량 산정 모델에 대하여 파악하고, 먼지 발생 과정 중 가장 중요한 요소인 sandblasting scheme의 특징을 집중 분석하였다. 3장에서는 다양한 검증 방법과 연구 동향을 검토하고, 실제 황사 사례를 기반으로 모델의 성능을 평가하였다. 마지막 4장에서는 모델 간 차이와 한계를 도출하여 향후 모델 개선 방향을 제시하였다.

2. 3차원 대기질 모델에 적용된 사막먼지 발생량 산정 모델

대기질 모델은 대기 중으로의 배출과 기상 상황,

오염물질의 제거 및 수송 과정과 관련된 현상들을 고려하여 대기오염물질들의 시·공간적인 농도 분포를 계산하는 도구이다. 사막먼지 발생량을 정확하게 산정하는 것은 먼지의 장거리 수송을 예측하고, 기후 모델과 대기질 모델의 정확도를 향상시키는 데 필수적이다. 이를 위해 다양한 먼지 발생 모델이 개발되어 왔으며, 이러한 모델들은 점차 더 정교한 물리적 과정에 대한 해석과 데이터 기반 접근법을 반영하면서 발전해 왔다.

먼지 발생량 산정 모델은 크게 네 단계로 이루어져 있다. 토지이용, 토양 특성, 식생 분포 등의 정보를 바탕으로 먼지가 배출될 가능성이 있는 지역을 식별하는 먼지 발생원 결정, 먼지가 배출되기 위해 필요한 최소한의 바람세기를 결정하는 임계마찰속도 계산, 바람에 의해 지표면에서 토양입자가 수평으로 이동하는 양을 산출하는 saltation flux 계산, saltation 입자가 지표면을 충격하거나 큰 입자에 부딪혀 부서지면서 더 작은 먼지 입자가 대기로 배출되는 양을 산출하는 sandblasting flux 계산 단계이다. 먼지 발생량 산정 모델은 각 단계에서의 요소들을 저마다 다양한 방식으로 계산하여 반영하며, 사용된 방법론에 따라 그 결과는 크게 달라진다. 표 1은 각 모델에서 주요 네 가지 단계를 계산하는 방식을 요약한 표이다. 먼지 발원지 결정 방식부터 임계마찰속도 계산, saltation flux 및 sandblasting flux 산정 방식까지의 흐름을 비교함으로써, 각 모델이 먼지 발생량을 어떻게 모의하는지를 구조적으로 이해할 수 있도록 하였다. 각 모델에 대한 자세한 설명은 2.1절부터 2.4절까지 다루었다.

Lee *et al.* (2019)에서는 사막먼지 발생량 산정을 위한 초기 모델부터 최신 모델까지 다양한 모델들의 특징과 메커니즘을 비교 분석한 바 있다. 본 총설에서는 대기질 연구에 널리 사용되는 3차원 모델에 적용된 먼지 발생량 산정 모델의 주요 특징 및 차이를 설명하고 먼지 발생량 산정 모델에서 가장 중요한 scheme인 sandblasting scheme을 중심으로 각 모델을 비교해 보고자 한다.

2. 1 CMAQ

CMAQ (The Community Multiscale Air Quality Modeling System) 모델은 1998년에 US EPA에서 개발한 3차원 대기질 모델 (Byun and Ching, 1999)로, 많은 나라에서 연구를 위해 활용되며 지속적으로 개선되고 있다. 이 모델은 Eulerian 방식으로, 가스상 및 입자상 대기오염물질을 모두 모사할 수 있다 (Byun and Schere, 2006). 모듈화 된 구조로 설계되어 서버 루틴 간의 호환성이 뛰어나며, 전 처리 단계 간의 연계가 용이하다. 모델링 영역은 국지 규모에서 지역 규모까지 다양한 공간 해상도로 모의할 수 있다.

CMAQ 모델은 버전 5.0 (2014 release)부터 DEAD 모델 (Zender *et al.*, 2003)이 도입되어 먼지 발생량을 계산하기 시작했다. DEAD 모델은 13개의 토질과 3개의 토지피복도 (shrubland, shrubgrass, barren land)에 대한 실험 데이터 (Gillette and Passi, 1988; Gillette *et al.*, 1980)를 기반으로 사전에 정의된 lookup table을 사용하여 임계마찰속도를 정의하였다. 먼지 발생량은 Draxler *et al.* (2001) scheme을 사용하였으며 마찰속도가 임계마찰속도보다 클 경우 발생하는 saltation flux에 적절한 비례 상수를 곱하여 계산하는 단순한 방식을 사용하였다 (식 (1)).

$$F_d = K \frac{\rho}{g} u_* (u_*^2 - u_{*t}^2) F_h \quad (1)$$

여기서, F_d 는 먼지 발생량을 뜻하는 sandblasting flux ($\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$), K 는 saltation flux를 먼지 발생량 (sandblasting flux)으로 바꿔 주는 비례상수 (m^{-1}), ρ 는 공기 밀도 (kg m^{-3}), g 는 중력가속도 (m s^{-2}), u_* 는 마찰속도 (m s^{-1}), u_{*t} 는 임계마찰속도 (m s^{-1}), F_h 는 saltation flux ($\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1}$)이다.

이후 CMAQ version 5.2 (2017 release)에서는 기존의 경험적 모델을 대신할 물리 기반의 모델 (Foroutan *et al.*, 2017)을 새롭게 도입하였다. 임계마찰속도의 경우 lookup table 방식 대신, 토양수분량뿐만 아니라 지표면 거칠기, 식생 분포 등 다양한 물리적 변수를 반영하는 동적 계산 방식을 채택하였다. 먼지 발생량

Table 1. Summary of Stepwise Methodology Used in Different Dust Emission Schemes.

CMAQ version 5.5 (Foroutan <i>et al.</i> , 2017; Zender <i>et al.</i> , 2003)		WRF-Chem version 4.6.0 (LeGrand <i>et al.</i> , 2019; Grell <i>et al.</i> , 2005)	CHIMERE version 2023r3 (Menut <i>et al.</i> , 2024, 2007 Mailler <i>et al.</i> , 2017)	GMAQ (Foroutan <i>et al.</i> , 2017; Kok <i>et al.</i> , 2014a, 2014b; Park and Park, 2013, 2010)
Dust emission source	–	Topographic Ginoux <i>et al.</i> (2001)	– KOK: Accounted by u_{st}^*	– KOK: Accounted by u_{st}^*
Threshold friction velocity	Gravity & cohesion Shao and Lu (2000)	Gravity & cohesion Marticorena and Bergametti (1995)	Gravity & cohesion Iversen and White (1982)	CMAQ-DUST, SCNU: gravity & cohesion Shao and Lu (2000)
			Gravity & cohesion Shao and Lu (2000)	KOK: gravity & cohesion Marticorena and Bergametti (1995)
Saltation flux	$\propto u^{*3}(1-R^2)(1+R)$ White (1979)	$\propto u^{*3}(1-R^2)(1+R)$ White (1979)	$\propto u^{*3}(1-R^2)(1+R)$ White (1986)	KOK: $\propto u_t^* u^{*2}(1-R^2)$ Kok <i>et al.</i> (2014a)
			$\propto u_{st}^* u^{*2}(1-R^2)$ Kok <i>et al.</i> (2014b)	CMAQ-DUST: Volume removal based Lu and Shao (1999)
Sandblasting flux	Volume removal based Lu and Shao (1999)	Empirical scaling-based GOCART: Ginoux <i>et al.</i> (2001)	Volume removal based Marticorena and Bergametti (1995)	CMAQ-DUST: Volume removal based Lu and Shao (1999)
		Volume removal based AFWA: Revised Marticorena and Bergametti (1995)	Energy balance based Alfaro and Gomes (2001)	SCNU: Volume removal based Shao (2004)
		UOC: Energy balance based Shao (2001) Volume removal based	u_{st}^* -dependent Kok <i>et al.</i> (2014a)	KOK: u_{st}^* -dependent Kok <i>et al.</i> (2014a)

계산 방식도 보다 정교해졌다. CMAQ v5.2에서는 saltation에 의해 토양 입자가 지표면에 충돌하여 파이는 토양의 부피에 따라 먼지 발생량을 결정하는 LS scheme을 적용하였다(식 (2)).

$$F_d = \frac{C_a g f \rho_b}{2p} \left(0.24 + C_\beta u^* \sqrt{\frac{\rho_p}{p}} \right) F_h \quad (2)$$

여기서, F_h 는 파여진 토양 부피 중 먼지가 차지하는 분율, ρ_b 와 ρ_p 는 각각 토양 입자의 겉보기밀도(bulk density)와 진밀도(true density), p 는 soil plastic pressure, C_a 와 C_β 는 모수이다. 이를 통해 먼지 발생량을 단순한 경험식이 아닌 물리적 과정을 반영하여 계산

할 수 있게 되었다. 이는 최신 버전인 CMAQ v5.5에서도 동일하게 적용되고 있다.

2.2 WRF-Chem

WRF-Chem (Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry) 모델은 2002년 미국 국립대기연구센터(NCAR, National Center for Atmospheric Research)에서 개발하여 출시된 3차원 대기질 모델로, 기상 모델(WRF)과 대기 화학 모듈을 통합하여 지역 및 국지 규모에서 기상과 대기오염물질의 상호작용을 모의한다(Grell *et al.*, 2005). 실시간 대기질 예측과 기후 연구에서 널리 활용되고 있으며, 동적 에어로졸-화학 피드백이 가능한 것이 특징이다

(Fast *et al.*, 2006; Grell *et al.*, 2005).

WRF-Chem 모델은 버전 3.2 (2010년 release)부터 Gillette and Passi (1988)의 경험적 수식을 기반으로 먼지 발생량을 계산하는 GOCART 모델(Ginoux *et al.*, 2001)을 도입하였다. 또한, 임계마찰속도 산정식 및 일부 수식과 파라미터를 수정하여 계산에 적용하였다(LeGrand *et al.*, 2019). 이 모델은 건조한 폐쇄성 분지와 같은 지형적 저지대가 먼지가 발생할 수 있는 최적의 지형이라고 가정하였으며 이 이론을 바탕으로 위성 데이터 분석 결과를 활용하여 먼지 발생원 지도를 도출하고 그 발생원 내에서 풍속, 토양수분량, 공기밀도를 이용하여 식 (3)과 같이 먼지 발생량을 계산하였다.

$$F_d = \begin{cases} CS_s p U^2 (U - U_t(D_p, \theta_s)), & U > U_t(D_p, \theta_s) \\ 0, & U \leq U_t(D_p, \theta_s) \end{cases} \quad (3)$$

여기서, C 는 차원 비례 상수($\mu\text{g s}^{-2} \text{m}^{-5}$), $S = \left(\frac{h_{\max} - h}{h_{\max} - h_{\min}}\right)^5$ 는 source erodibility factor (Ginoux *et al.*, 2001), h 는 어떤 지점의 지표면 고도, $h_{\max}$ 와 $h_{\min}$ 은 각각 주변 $10^\circ \times 10^\circ$ 에서 최대 및 최소 지표면 고도, s_p 는 토양 표면에서 크기 그룹 p 에 해당하는 각 토양 입자 크기별 방출 가능한 먼지의 질량 분율, U 는 10 m 높이에서 측정된 수평 풍속, $U_t(D_p, \theta_s) = \begin{cases} U_t(D_p) \times (1.2 + 0.2 \log_{10} \theta_s), & \theta_s < 0.5 \\ \infty, & \theta_s \geq 0.5 \end{cases}$ 는 토양 입자의 크기(D_p)와 토양의 수분 포화도(θ_s)의 함수로 나타낸 임계 풍속, $U_t(D_p) = A \sqrt{\frac{\rho_p - \rho}{\rho}} g D_p$ 는 건조 토양에서의 토양입자 크기에 따른 임계 풍속, A 는 무차원 tuning 파라미터이다. 이러한 방식은 먼지가 고정된 hotspot에서만 발생된다고 가정하는 것이기 때문에 기후 및 계절적 변화, 단기적인 기상변화에 따른 먼지 발생량 변동을 반영하기 어렵다는 특징이 있다.

이후 미국 공군 기상청(Air Force Weather Agency, AFWA)에서 GOCART 코드를 수정 보완하여 개발한 AFWA (Air Force Weather Agency) 모델이 WRF-

Chem v3.4 (2012 release)에서 도입되었으며, 기상 및 군사 작전을 위한 실시간 먼지 예측을 위해 설계되었다(LeGrand *et al.*, 2019). GOCART 모델과의 주요 차이점으로는 먼지 발생량 계산 부분에서 saltation 및 sandblasting process를 White (1979) scheme과 수정된 Marticorena and Bergametti (1995) scheme을 채택하여 사용하였다는 점이다. 새롭게 채택한 saltation scheme은 saltation flux가 풍속의 세제곱에 비례한다는 이론을 반영한 White (1979) scheme을 사용하였으며, sandblasting scheme은 거칠기 길이를 조건부로 적용하여 저지대를 통한 먼지 발생원을 erodibility에 대한 변수와 saltation flux 및 실험에 기반한 sandblasting efficiency를 통해 먼지 배출량을 계산하는 방식을 사용하였다(식 (4)).

$$F_d = \begin{cases} GS\beta, & z_0 \leq 20 \text{ cm} \\ 0, & z_0 > 20 \text{ cm} \end{cases} \quad (4)$$

여기서, z_0 는 거칠기 길이, $G = \sum_{s,p} [H(D_p) dS_{rel}(D_p)]$ 로 모든 입자크기를 합한 total saltation flux를 뜻하며, $H(D_p)$ 는 토양 입자 크기(D_p)에 따른 saltation flux ($\text{g cm}^{-1} \text{s}^{-1}$), $dS_{rel}(D_p)$ 는 토양 입자 크기에 따른 가중 인자(weight factor)를 의미한다. S 는 source erodibility factor를 의미한다. $\beta = 10^{0.134(c_s) - 6}$ 로 sandblasting efficiency (cm^{-1})이며, C_s 는 점토(clay) 분율을 나타낸다.

이후 WRF-Chem v3.6.1 (2014 release)에서는 난류와 바람에 의해 먼지 입자가 직접 공기 중으로 부유하는 과정인 Aerodynamic Entrainment, 바람에 의해 saltation 입자가 지표면에 충돌하면서 더 작은 먼지 입자들을 공기 중으로 튀어오르게 하는 과정인 saltation bombardment, 토양 입자들이 뭉쳐 있는 응집체(aggregates)가 saltation 입자와의 충돌로 인해 부서지면서 더 작은 먼지 입자들이 분리되어 공기중으로 배출되는 과정인 aggregate disintegration를 고려하는 UoC (University of Cologne) 모델을 도입하였는데, 먼지 배출량 산정식을 세 개로 나누어 옵션화하였다. 먼지 배출량 산정식으로는 S01 (Shao, 2001), S04

(Shao, 2004), S11 (Shao *et al.*, 2011) scheme을 사용하였다.

S01 scheme은 Shao가 독자적으로 개발하여 제시한 scheme으로 북미, 호주, Mali, 스페인, Niger 지역에서 수행된 관측 결과와의 비교를 통해 경험적 모수들이 결정되었다. 그리고 먼지 배출이 일어나는 saltating bombardment 과정에서 토양 속에 존재하는 먼지입자가 단순히 균일한 크기가 아니라, 두 계급(큰 입자와 작은 입자)으로 존재하며 먼지 발생에 기여한다는 개념을 도입하였다. 이에 따라 토양 내 미세입자가 많을수록 먼지 배출이 증가하는 경향을 수식에 반영하였다. 다만, 식 (5)와 같이 실제로 적용하기에 가장 복잡한 형태의 방정식을 사용한다 (Shao, 2004).

$$F_d(d_i, D_p) = c_y \eta_{c,i} [(1 - \gamma) + \gamma \sigma_p(d_i)] \left(1 + \frac{\rho_b \eta_{f,i} \Omega}{m \eta_{c,i}} \right) \frac{g F_h(D_p)}{u^{*2}} \quad (5)$$

여기서, d_i 는 발생하는 먼지 입자의 크기, $c_y = 0.00001$ 은 무차원 상수, $\eta_{c,i} = \eta_{f,i} - \eta_{m,i}$, $\eta_{f,i}$ 와 $\eta_{m,i}$ 는 각각 fully disturbed 토양입자 크기 분포와 minimally disturbed 토양입자 크기 분포, $\gamma = \exp\{-k(u^* - u^*_n)\}$, k 와 n 은 경험적으로 구해지는 상수, $\sigma_p(d_i) = \eta_{f,i}/\eta_{m,i}$, m 은 입자의 질량, $\Omega = D_p \left[\frac{u_p^2}{\beta_v^2} (\sin 2\alpha_i - 4\sin^2 \alpha_i) + \frac{7.5\pi}{d} \left(\frac{U_p \sin \alpha_i}{\beta_v} \right)^3 \right]$ 는 bombardments 또는 collisions에 대한 먼지 배출 효율을 의미하며, U_p 는 충돌 속도, $\beta_v = \sqrt{\frac{2pd}{m}}$ 는 충돌이나 운동에 의해 지표면 및 다른 토양 입자에 전달되는 속도, α_i 는 충돌 입사각 (incidence angle of the collisions)이다.

S04 scheme에서는 α_i 나 β_v 를 통해 계산하는 Ω 를 반영하기 위해 먼지 배출 과정에서 필요한 다양한 실험적 데이터와 경험적 계수들을 고려해야 했던 S01 scheme의 복잡성을 해결하기 위하여 수식을 단순화시켰다. 이 scheme은 현장 측정을 통해 검증되었으나 관측된 먼지입자크기분포와 일치된 결과를 얻기 위

해서는 모수들에 대한 조율(tuning)이 필요하다는 단점이 있으며 수식이 여전히 복잡하고 많은 계산량으로 인해 실용성이 다소 부족하다는 평가가 있었다 (식 (6)).

$$F_d(d_i, D_p) = c_y \eta_{fi} \{ (1 - \gamma) + \gamma \sigma_p(d_i) \} \{ 1 + \sigma_m(D_p) \} \frac{g F_h(D_p)}{u^{*2}} \quad (6)$$

여기서, $\sigma_m(D_p) = 12u^{*2} \frac{\rho_b}{p} \left(1 + 14u^* \sqrt{\frac{\rho_b}{p}} \right)$ 로 saltation 과정에서 수송되는 토양 입자의 단위 질량과 충격으로 인하여 방출되는 토양 질량의 비율을 의미하는 bombardment efficiency이다.

S11에서는 수식의 최적화를 위하여 먼지 배출의 기여도가 낮다고 판단되는 aggregates disintegration을 생략하고 aerodynamic entrainment와 saltation bombardment에 집중하여 먼지 발생량 산정식을 단순화함으로써 free dust의 발생과 saltation bombardment에 의해 발생하는 먼지 발생을 보다 간단히 계산할 수 있도록 개선하였다. 또한 실험데이터를 통한 모수 민감도 분석을 통해 scheme의 모의 정확도를 향상시켰다(식 (7)).

$$F(d_i, D_p) = c_y \eta_{mi} \{ 1 + \sigma_m(D_p) \} \frac{g F_h(D_p)}{u^{*2}} \quad (7)$$

사막먼지 발생량 계산의 관점에서 WRF-Chem 모델의 가장 큰 장점은 버전이 업그레이드되더라도 다양한 먼지 발생량 산정 scheme들을 유지하였으며 각 scheme에서 사용되는 모수들을 지속적으로 업데이트해왔다는 것이다. 이에 따라 2024년 5월에 출시된 최신 버전인 4.6.0에서는 GOCART, AFWA, UoC 모델 모두를 옵션으로 선택할 수 있도록 제공하고 있으며 이를 통해 다양한 모델링 영역에서 모의 환경에 적합한 scheme을 사용자가 선택하여 사용할 수 있다는 특징을 가진다.

2.3 CHIMERE

CHIMERE 모델은 1999년부터 지속적인 개발과 개

선을 거쳐왔으며 (Menut *et al.*, 2024) 2024년 7월 CHIMERE v2023r2가 출시되었다. 이 모델은 지역 및 도시 규모의 대기질 연구를 위한 3차원 오일러리안 화학수송모델 (chemical transport model)로, 유럽 지역에서 특히 널리 사용된다 (Hodzic *et al.*, 2006; Vautard *et al.*, 2005). 대기 중 화학 반응, 기상 모델과의 연계, 건강 영향 평가 등에 주로 활용되며, 입자상 오염물질의 장거리 이동을 예측하는 데 강점을 가진다 (Mailler *et al.*, 2017; Schmechtig *et al.*, 2011).

CHIMERE 모델에서 사용하는 먼지 발생량 산정 모델은 2000년대 중반부터 CHIMERE-DUST라는 명칭으로 CHIMERE 모델에 도입되어 (Menut *et al.*, 2007) 먼지 발생량을 계산하였으며 버전이 업그레이드될수록 새로운 scheme을 추가하는 등 모델을 지속적으로 개선시켜 왔다. 이 모델의 특징은 saltation과 sandblasting process뿐만 아니라 토양수분 효과 고려 여부, 임계마찰속도 산정 방식을 모두 사용자가 선택할 수 있게 옵션으로 제공하였다는 점이다. 먼지 발생량 scheme으로는 Marticorena and Bergametti (1995), Alfaro and Gomes (2001), Kok *et al.* (2014a) scheme을 채택하여 사용한다.

Marticorena and Bergametti (1995) scheme의 경우 WRF-Chem에서는 수정된 버전을 사용하였다면, CHIMERE 모델에서는 수정하지 않은 오리지널 버전을 사용하였다 (식 (8)). 이 scheme은 sandblasting flux와 saltation flux 간의 관계를 토양의 점토 분율의 함수로 나타낸 경험식으로, 이때 사용된 관측자료가 사하라 사막의 데이터를 이용한 것이라 동아시아에서는 과대모의가 되어 적합하지 않다는 연구 결과가 있다 (Kang *et al.*, 2011).

$$F_d = 100 \times F_h \times 10^{(0.134 \times c_s - 6.0)} \quad (8)$$

Alfaro and Gomes (2001) scheme은 saltation에 의해 이동하는 토양 입자가 가진 운동에너지와 먼지 입자 간 결합에너지를 비교하여 먼지 발생을 예측하는 energy balance-based scheme이다. 먼지는 saltation 과정에서 토양 입자가 지표면에 충돌할 때 발생하는

데, 이때 운동에너지가 결합에너지를 초과하면 먼지 입자가 방출된다고 가정한다. 이 scheme은 먼지 입자의 크기 분포를 세 개의 대수 정규분포(mode)로 구분하여, 실험 데이터를 기반으로 각 모드의 결합에너지를 결정하였다. 실험 결과, 입자가 작을수록 결합에너지가 더 크며, saltation 입자의 운동에너지가 클수록 작은 입자가 더 많이 방출된다는 특징이 반영되었다. 그러나, 후속 연구 (Gomes *et al.*, 2003; Alfaro *et al.*, 1998)에서 자연 토양을 이용한 실험과 초기 실험 간 결합에너지 값의 차이가 크며, 특정 풍속 조건에서 먼지 발생 분포가 관측된 PM_{2.5} 비율(25% 이하)과 맞지 않는 문제가 발생했다. 결과적으로, 이 scheme은 먼지 발생 과정의 물리적 메커니즘을 정교하게 반영하지만, 결합에너지 값의 결정이 실험 조건에 따라 달라진다는 문제점을 안고 있고 (Shao, 2001), 실제 대기 중 먼지 입자 크기 분포와 일치하지 않는다는 한계로 인해 활용에 제한이 있다.

Kok scheme (Kok *et al.*, 2014a, 2014b)은 최소한의 물리적 매개변수만을 사용하여 먼지 발생량과 입자 크기분포를 예측하는 방식으로, 물리적으로 정교하면서도 기존 모델들보다 단순한 구조를 갖는다. 기존 모델들에서는 마찰속도와 임계마찰속도의 차이를 이용하여 먼지 발생량을 계산했으나, KOK 모델은 표준 임계마찰속도 (u_{st}^*)를 활용하여 먼지 발생량과 토양 특성을 더욱 밀접하게 연결하였다. 먼저, 표준임계마찰속도 (u_{st}^*)의 도입을 통해 고도 차이에 따른 공기 밀도 변화가 자동으로 보정되도록 설계되었다. 기존 모델에서는 고도가 높은 지역에서 공기 밀도가 낮아지면서 먼지 발생량이 실제와는 다르게 계산되는 문제가 발생할 수 있었다. 이를 해결하기 위해, 기존 모델에서는 erodibility factor를 추가적으로 도입해야 했지만, KOK 모델에서는 u_{st}^* 를 산정식에 포함하여, 고도에 따라 공기밀도가 감소할 경우 먼지 발생량도 자연스럽게 감소하도록 설계하였다. 이를 통해 고도가 다른 지역에서도 동일한 기준으로 먼지 발생량을 비교할 수 있도록 하였다. 또한, 토양의 침식가능성이 먼지 발생량에 직접적인 영향을 미치도록 하기 위해

C_d 와 α 를 표준 임계마찰속도의 함수로 정의하였다. 이 파라미터들의 도입으로 토양이 더 잘 침식되는 지역에서는 먼지 발생량이 증가하고, 침식이 어려운 지역에서는 풍속에 더 민감하게 반응하도록 개선되었다(식 (9)).

$$F_d = C_d f_{bare} f_{clay} \frac{\rho_a u^{*2} (1 - R^2)}{u_{st}^*} \left(\frac{u}{u_{st}^*} \right)^\alpha F_h \quad (9)$$

여기서, $C_d = C_{d0} \exp \left\{ -C_e \left(\frac{u_{st}^*}{u_{sto}^*} - 1 \right) \right\}$, $u_{st}^* (\equiv u_t^* \sqrt{\rho_a / \rho_{a0}})$ 는 해수면고도 ($\rho_{a0} = 1.225 \text{ kg m}^{-3}$)에서 u_t^* 의 값을 의미하는 표준임계마찰속도로서 토양의 erodibility를 의미하고, u_{sto}^* 는 wind erosion이 일어나기 가장 알맞은 상태에 있는 토양의 u_{st}^* 값으로 약 0.16 m s^{-1} 로 정의된다. f_{bare} 는 거칠기요소가 없는 맨땅의 분율, f_{clay} 는 토양의 점토 분율, $R = \frac{u}{u_t^*}$, $\alpha = C_\alpha \left(\frac{u_{st}^*}{u_{sto}^*} - 1 \right)$ 이다. 임계마찰속도는 $u_t^* = 0.0123 \sqrt{(g D_p \rho_p / \rho_a) + (\gamma / D_p \rho_a)}$ 로 계산된다. 실험결과들과의 비교를 통해 무차원계수 C_{d0} , C_e , C_α 의 값은 각각 $(4.4 \pm 0.5) \times 10^{-5}$, 2.0 ± 0.3 , 2.7 ± 1.0 으로 결정되었다.

2.4 GMAQ

최근 동북아-지역연계 초미세먼지 대응 기술 개발 사업을 통해 한국형 대기화학 모델링 시스템의 화학수송모델 GMAQ (Yu *et al.*, 2023)이 개발되었다. GMAQ에서는 CMAQ version 5.2에서 사용하는 먼지 발생량 산정 모델 CMAQ-DUST (Foroutan *et al.*, 2017) 외에도 두 가지 먼지 발생량 산정 모델을 추가로 사용할 수 있으며, 사용자가 어떤 모델을 사용할지 옵션으로 선택할 수 있도록 되어 있다. 추가된 두 모델은 sandblasting flux scheme을 S04 및 S11 scheme으로 채택하고 먼지입자의 크기분포를 정밀하게 계산하여 반영한 SCNU 모델 (Park and Park, 2010; 2013)과 토양의 erodibility를 정교하게 반영한 KOK 모델이다.

표 2는 GMAQ 모델에 탑재된 세 모델의 방법론을 상세히 비교한 표이다. 세 모델은 임계마찰속도 산정

식, 입자 크기 분포, 식생 효과, Owen 효과 반영 여부, saltation 및 sandblasting scheme에서 차이를 보인다. CMAQ-DUST는 4개의 입자 크기 (bin)를 사용하고 식 (1)에 제시된 Lu and Shao (1999) scheme을 기반으로 먼지 발생량을 계산한다. SCNU 모델은 총 88개의 입자 크기 분포를 고려하고 식 (6)의 Shao (2004)와 식 (7)의 Shao *et al.* (2011) scheme을 통해 먼지 발생량을 산정한다. KOK 모델은 단일 크기를 가정하고, 식생 효과는 직접 고려하지 않지만, 마찰속도 계산 과정에서 이를 반영함으로써 간접적으로 고려하며, 식 (9)의 Kok *et al.* (2014a) scheme을 이용하여 먼지 발생량을 계산한다. GMAQ 모델을 활용한 먼지 발생량 산정 결과 및 예측 성능 비교는 3.2절에서 설명한다.

3. 사막먼지 발생량 산정 모델 검증 방법 및 연구 동향

사막먼지 발생량 산정 모델의 검증은 모델의 신뢰성을 확보하고, 다양한 환경 조건에서의 예측 정확도를 평가하는 중요한 과정이다. 기존 검증 방법은 직접 검증과 간접 검증으로 나뉘며, 과거에는 현장 실측을 기반으로 한 직접 검증이 주로 이루어졌지만, 최근에는 위성 자료 및 인공지능(AI) 기반 기법을 활용한 간접 검증이 활발하게 이루어지고 있다. 3.1절에서는 직접 검증 방법, 위성 AOD (Aerosol Optical Depth) 자료 및 지상 PM₁₀ 관측망과의 비교를 포함한 간접검증 방법, 머신러닝 기반 보정 기법을 통한 최신 검증 기법이 연구에 어떻게 활용되고 있는지에 대해 집중적으로 분석하였다. 3.2절에서는 JADE 프로젝트 및 한국에서의 황사 에피소드 사례를 중심으로, 실제 모델 적용 및 검증 결과를 사례로 제시하여 실무적인 활용 가능성을 검토하고자 하였다.

3.1 모델 검증 연구 동향

사막먼지 발생량 산정 모델의 신뢰성을 평가하기

Table 2. Comparison of wind-blown dust models incorporated in GMAQ.

Model	CMAQ-DUST (Fouroutan <i>et al.</i> , 2017)	SCNU (Park and Park, 2013, 2010)	KOK (Kok <i>et al.</i> , 2014a, 2014b)
Roughness length (z_0)		$z_0/h = \begin{cases} 0.96\lambda^{1.07}, \lambda < 0.2 \\ 0.083\lambda^{-0.46}, \lambda \geq 0.2 \end{cases}$	
Friction velocity (u^*)		$u^* = k \times WS / \log(10/z_0)$	
Number of particle size bins	4	88	1
Particle sizes (μm)	Coarse sand (690.0) Fine-medium sand (210.0) Silt (125.0) Clay (2.0)	1.072E-2–1.854E+3	75.0
Soil moisture effect		$f_w(w) = \begin{cases} 1 & \text{for } w < w' \\ \sqrt{1 + 1.21(w-w')^{0.68}} & \text{for } w < w' \end{cases}$	
Drag partitioning	Accounted (Darmenova <i>et al.</i> , 2009)	Accounted (Darmenova <i>et al.</i> , 2009)	Not accounted
Owen effect	Not accounted	Accounted (Owen, 1964)	Accounted (Owen, 1964)
Threshold friction velocity (u_{*c}^*)	Gravity & cohesion $Y = 1.65E-4$ (Shao and Lu, 2000)	Gravity & cohesion $Y = 3.E-4$ (Shao and Lu, 2000)	Gravity & cohesion (Marticorena and Bergametti, 1995)
Saltation flux	$\propto u^{*3}(1-R^2)(1+R)$ (White, 1979)	$\propto u^{*3}(1-R^2)(1+R)$ (White, 1979)	$\propto u_{*c}^* u^{*2}(1-R^2)$ (Kok <i>et al.</i> , 2014a)
Sandblasting flux	Volume removal-based (Lu and Shao, 1999)	Volume removal-based (Shao, 2004)	Volume removal-based (Shao <i>et al.</i> , 2011)
			u_{*c}^* -dependent (Kok <i>et al.</i> , 2014a)

위한 연구는 최근 들어 더욱 정교한 검증 방법과 함께 다양한 데이터 소스를 융합하여 이루어지고 있다 (Kok *et al.*, 2021). 특히 직접적 검증과 간접적 검증의 방법론적 진보와 함께 인공지능(AI)을 활용한 최신 기법이 두드러지고 있다.

직접적 검증은 먼지 발생량에 대한 현장 실측 데이터를 이용하여 모델의 예측 값과 실제 발생량을 비교하는 전통적인 방법으로, 풍동 실험이나 현장 관측을 통해 수행된다(Kok *et al.*, 2014a, 2014b; Ishizuka *et al.*, 2008; Alfaro and Gomes, 2001; Alfaro *et al.*, 1998; Marticorena and Bergametti, 1995; Shao *et al.*, 1993; White, 1979). 현장 기반의 직접적 검증은 먼지 발생량을 정밀하게 평가할 수 있는 방법으로 오랫동안 신뢰받아 왔다. 대표적으로 White (1979)의 saltation scheme은 본래 화성과 같은 저밀도 대기 환경에서도 적용 가능한 saltation의 물리적 메커니즘을 설명하기

위해 제안되었다. 이를 위해 저밀도 풍동 실험을 수행하여 다양한 압력 조건에서 입자 이동 특성을 조사하였으며, 그 결과 지구와 화성의 서로 다른 환경에서도 적용할 수 있는 일반적인 saltation flux scheme을 제시했다. 이후 Shao *et al.* (1993)의 연구는 White (1979)의 scheme을 보완하고 발전시키며, saltation bombardment가 먼지 발생에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다. 이 연구는 White의 saltation scheme이 먼지 발생 예측에 유효함을 실험적으로 입증하는 동시에, saltation bombardment라는 추가적인 메커니즘을 도입하여 모델을 더욱 정교하게 개선하는 데 기여하였으며 현재까지도 먼지 발생량 산정 모델에서 핵심 scheme으로 활용되고 있다. 또한, Shao *et al.* (2011)과 Kok *et al.* (2014a, 2014b) 등 다양한 연구에서는 기존에 수행된 다양한 실험 자료와 이론적 분석을 종합하여 먼지 발생 메커니즘을 새롭게 제안

하고 증명하였다. Shao *et al.* (2011)은 먼지 발생 과정에서 saltation bombardment와 토양의 입자 크기 분포를 보다 정교하게 고려하는 물리 기반 모델을 구축하였으며, Kok *et al.* (2014b)은 입자 크기 분포 및 난류가 먼지 발생에 미치는 영향을 체계적으로 분석하여 독자적으로 개발한 scheme을 제안하고 먼지 발생량 예측의 정확도를 개선하였다. 이렇듯 직접적인 실험을 통한 검증은 먼지 발생 모델의 신뢰성을 높이는 데 중요한 역할을 하며, 다양한 환경 조건에서 모델의 적용 가능성을 확장하는 데 기여하고 있다. 특히, 풍동 실험과 현장 관측 데이터는 saltation과 먼지 발생량 간의 정량적 관계를 직접 평가할 수 있는 강력한 도구이며, 이러한 실험적 접근은 먼지 발생량을 보다 정확하게 예측할 수 있도록 한다. 그러나 직접 검증의 경우 측정 지점의 제한성이나 장기 데이터 확보의 어려움에 따른 한계가 존재한다.

이러한 한계를 극복하기 위해 주로 위성 데이터를 활용하는 간접적 검증 방법이 적극적으로 연구되고 있다. 간접적 검증이란 먼지 발생량 자체를 검증하는 대신 먼지 발생량에 따라 달라지는 관측 결과를 이용하여 모델의 먼지 발생량 계산을 간접적으로 검증한다는 뜻이다.

위성 기반의 간접적 검증은 주로 에어로졸 광학 두께 (Aerosol Optical Depth, AOD), 먼지 지수 (Dust Index), 미세먼지 농도 (PM_{2.5} 및 PM₁₀) 등의 데이터를 활용하여 모델을 평가하는 방식으로 수행된다. 대표적인 위성 자료로는 MODIS, CALIPSO, Sentinel-5P, Himawari-8, GOES 시리즈 등이 있다. Kok *et al.* (2021)은 전 세계 주요 먼지 발생 지역이 지구 먼지 순환에 미치는 기여도를 정량화하기 위해 위성 기반의 에어로졸 데이터와 모델 시뮬레이션 결과를 통합하는 분석적 프레임워크를 제안하였다. 이 연구에서는 다양한 전 지구 먼지 발생량 산정 모델을 활용하여 먼지 발생량과 장거리 이동을 모의하였다. 여러 위성 관측자료 (MODIS, MISR, CALIPSO 등)와 역모델링 기법을 활용하여 모델이 특정 지역에서 먼지 발생량을 과대 혹은 과소 평가하는 경향을 분석하였으

며, 모델의 먼지 배출량을 보정하는 방법을 제시하였다. 연구 결과, 기존 먼지 모델은 북아프리카 지역(사하라 사막)의 기여도를 높게, 아시아 지역(고비 사막, 타클라마칸 사막 등)의 기여도를 상대적으로 낮게 예측하는 경향이 있었음을 확인하였다. 이 연구는 기존 먼지 발생 모델들의 한계를 지적하고, 위성 데이터를 활용한 평가 방법이 모델의 정확도를 향상시키는 데 중요한 역할을 할 수 있음을 강조하였다. Cheng *et al.* (2024)의 연구에서는 2021년 3월 동아시아에서 발생한 기록적인 황사 이벤트의 먼지 발생량을 보다 정확하게 추정하기 위해, 지연된 에어로졸 Ångström 지수 (Ångström exponent, AE) 관측 값을 활용하여 모델을 개선하는 방법을 제안하였다. 연구진은 위성 및 지상 관측자료를 활용한 간접적인 검증 방법을 적용하여 모델의 성능을 평가하고 보정하였으며, 이를 통해 기존 먼지 발생 모델의 한계를 극복하고 예측 정확도를 향상시키는 방안을 제시하였다. 이 연구에서는 AERONET (Aerosol Robotic Network)의 시간별 AE 관측값을 수집하고, 이를 WRF-Chem 모델과 EnKS (Ensemble Kalman Smoother)를 결합하여 동아시아 황사의 먼지 발생량을 최적화하는 데 활용하였다. 이를 통해 기존 모델이 특정 지역에서 먼지 발생량을 과대 혹은 과소평가하는 경향을 분석하고, 먼지 배출량을 조정하여 모델의 예측 성능을 개선하는 방법을 제시하였다. 연구 결과, AE 데이터를 추가로 동화한 모델이 먼지 입자의 크기 분포 및 총 발생량 추정에서 기존 모델보다 더 높은 정확도를 보였다. 또한, 독립적인 SONET (SkyNet Observation NETwork) 관측값과 비교한 결과, AE 데이터를 포함한 모델이 에어로졸 광학 두께 (AOD) 및 AE의 평균 제곱근 오차 (RMSE)를 각각 17% 및 61% 감소시키는 등 예측 성능이 크게 향상되었음을 확인하였으며, AOD 및 AE 데이터를 모델에 통합함으로써, CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) 관측값과 더 잘 일치하는 먼지 에어로졸의 수직 분포를 얻을 수 있었다. 이 연구는 간접적 검증 방법이 먼지 발생량 산정 모델의 성능 평가 및 개선에 중요한 역할

을 할 수 있음을 실증적으로 보여주었다. 그러나 먼지 발생량 산정에 대한 간접적 검증 역시 여러 가지 한계를 갖고 있다(Li *et al.*, 2009; Todd *et al.*, 2008). 관측자료의 불확실성과 모델 해상도의 제한으로 정확한 비교가 어렵고, 기상 요인의 영향을 분리하기도 쉽지 않다. 또한, 장거리 수송된 먼지가 포함될 수 있으며, 모델이 토양 특성이나 인간 활동을 완전히 반영하지 못할 수도 있다. 따라서 간접 검증 시 다양한 자료를 종합적으로 분석하고 개별 요인의 영향을 면밀히 평가하는 것이 중요하다.

AI 기반 기술의 활용은 사막먼지 모델 검증에 있어 최근 가장 혁신적인 방법으로 주목받고 있다. AI 기법은 주로 모델의 파라미터 최적화, 예측 성능 향상, 불확실성 정량화 등 다양한 측면에서 활용된다. Aryal *et al.* (2022) 연구에서는 기온 및 강수량을 주요 예측 변수로 활용하여 머신러닝 기반의 먼지 폭풍 예측 모델을 개발하였으며, 이를 통해 월별 및 계절별 미세먼지($PM_{2.5}$, PM_{10}) 농도를 정량적으로 예측하였다. 연구에서는 ANFIS (ANFIS, Adaptive-Neural-based Fuzzy Inference System)과 MLP-NN (Multi-Layered Perceptron artificial Neural Network)을 활용하여 예측 모델을 구축하였다. ANFIS는 퍼지 논리와 신경망을 결합하여 사람이 직관적으로 이해할 수 있는 규칙을 학습하고 조정하는 방식으로 먼지 폭풍 발생을 예측하는 반면, MLP-NN은 다층 신경망을 통해 과거 데이터에서 패턴을 학습하여 예측 성능을 향상시키는 기법이다. 연구 결과, ANFIS 모델이 MLP-NN 모델보다 월별 및 계절별 먼지 농도 예측에서 더 우수한 성능을 보였으며, 특히, 월별 예측보다 계절별 예측에서 더 높은 정확도를 나타냈다. 또한 $PM_{2.5}$ 예측이 PM_{10} 예측보다 더 정확한 결과를 보였으며, 먼지 농도 예측에 있어 기온이 강수량보다 더 중요한 변수로 작용하는 것으로 나타났으며 월별 예측에서 기온의 중요성이 더욱 두드러졌다. 이 연구는 제한된 기후 데이터만으로도 AI 모델이 먼지 발생 가능성을 높은 정확도로 예측할 수 있음을 보여주었으며, 특히 데이터가 부족한 지역에서도 효과적인 예측 시스템

을 구축하는 데 기여할 수 있음을 시사한다.

Lemmouchi *et al.* (2023)의 연구에서는 CHIMERE 화학 수송 모델의 에어로졸 광학 두께(AOD) 예측에 MODIS 위성 관측 데이터와 랜덤 포레스트(RF)를 결합한 머신러닝 접근법을 적용하여, 공간적 왜곡을 줄이고 AOD의 편향과 절대 오차를 크게 감소시켰다. 특히, 지상 관측 데이터가 부족한 지역에서도 신뢰도를 강화했다는 점에서 주목받았다. 그러나 이러한 접근법은 극단적인 AOD 값의 과대 보정, 학습 데이터 의존성, 물리적 메커니즘에 대한 명시적 이해 부족이라는 한계를 가지고 있으며, 물리 모델과의 통합에도 어려움을 겪는다. 이는 물리 기반 모델과 머신러닝 기술이 상호 보완적인 역할을 수행해야 함을 시사하며, 먼지 발생 과정의 주요 메커니즘에 대한 구체적인 검증 연구의 필요성을 강조한다.

3.2 JADE 프로젝트 및 한국의 황사 에피소드를 통한 모델 검증 연구

최근 한 연구 (Lee *et al.*, under review)에서는 JADE 프로젝트와 동아시아에 대한 먼지 발생량 모델의 검증을 수행하기 위하여 몇 가지 먼지 발생량 산정 모델을 CMAQ의 서브루틴 형태로 변환하여 여러 에피소드에 대한 직·간접적인 검증을 수행하였다. 대상 모델은 세 가지로, CMAQ-DUST 모델, SCNU 모델, KOK 모델이다.

3.2.1 JADE

JADE 프로젝트는 일본과 호주의 연구진이 협력하여 진행한 대규모 먼지 배출 연구이다. 2006년 호주의 건조 지역에서의 먼지 배출과 이동 메커니즘을 상세히 조사하는 것을 목표로 하였으며, 최종적인 먼지 발생량만을 측정한 것이 아니라 지표면 조건, 임계마찰속도, saltation 및 sandblasting flux 과정에 대한 정량적 분석을 수행하였기 때문에 먼지 발생량 산정 모델들을 단계마다 검증하는 데 유용한 자료를 제공한다. 이 프로젝트의 실험 자료는 2018년 공개되었다.

Lee and Park (2020)의 연구에서는 먼지 발생량 산정 모델에서 사용하는 saltation flux scheme을 검증하

기 위하여 JADE 프로젝트의 관측자료를 활용하여 모델의 입력자료부터 saltation scheme까지의 일련의 과정을 정밀하게 검증하였다. 이 연구에서 CMAQ-DUST와 SCNU 모델에서 사용하는 saltation scheme은 $F_h \propto u^3$ 의 형태로 동일하며 KOK 모델은 $F_h \propto u^2$ 을 사용한다. 따라서 이 두 scheme을 JADE 관측자료와 비교하여 검증하였다. 분석 결과, saltation flux의 모의 정확도를 향상시키는 데 가장 중요한 요소는 임계마찰속도의 정확한 예측임이 확인되었다. 이를 위해서는 토지 이용(land use), 식생 비율(vegetation fraction), 토양 조건(soil conditions)을 현실적으로 반영하는 것이 필수적이다. 두 가지의 saltation scheme의 모의 정확도를 평가한 결과 관측된 자료를 입력자료로 사용할 경우 두 scheme의 성능은 유사하였으며 saltation flux를 모두 잘 모의하는 것으로 확인되었다.

최근 수행된 연구(Lee *et al.* under review)에서는 saltation 이후 마지막 단계인 sandblasting scheme에 대해 검증하였다. 검증에 이용된 sandblasting scheme은 4가지로 CMAQ-DUST 모델의 LS scheme, SCNU 모델 중 saltation bombardment와 aggregate disintegration을 통해 먼지가 배출되며 먼지 배출량이 saltation flux에 비례하여 계산되는 S04 scheme(Shao, 2004)과 먼지 배출의 기여도가 낮다고 판단되는 aggregates disintegration을 생략함으로써 식을 단순화하고 free dust의 발생과 saltation bombardment에 의해 발생하는 먼지 발생을 보다 간단히 계산할 수 있도록 개선한 S11 scheme(Shao *et al.*, 2011), KOK 모델의 Kok scheme이다. 이 연구에서는 먼지 발생량 산정 모델의 가장 주요한 메커니즘인 sandblasting flux에 대한 민감도 분석을 통해 각 모델이 sandblasting flux 계산 과정에서 어떤 파라미터들의 영향을 받는지, 어떤 모델의 성능이 더 나은지를 평가하였다. 그 결과 풍속, 토지피복도, 토질유형, 임계마찰속도의 관측 값을 모델의 입력자료로 넣었을 경우 CMAQ-DUST 모델과 KOK 모델은 전반적으로 먼지 발생량을 과소모의 경향이 두드러졌으나, SCNU 모델은 관

측 값과의 높은 상관성을 보이며 신뢰할 수 있는 결과를 제공하였다. 특히 S11 scheme은 계산 효율성과 복잡성 측면에서 S04 scheme 보다 3차원 대기질 모델에 더 적합하다고 판단하였다.

다만, JADE 프로젝트는 특정한 토질에서만 수행된 실험이므로, 모델의 메커니즘에 대한 정밀 검증을 위해서는 더 다양한 관측자료를 활용한 추가 연구가 필요하다.

3.2.2 동아시아

Lee (2023)의 연구에서는 동아시아를 대상으로 5개의 황사 에피소드를 선정하여 CMAQ-DUST, SCNU(S04), KOK 모델을 활용한 먼지 발생량 산정 모델의 검증을 수행하였다. 동아시아 지역에서는 JADE 프로젝트와 같은 단계별 먼지 발생 관측자료가 확보되지 않아, 모델 검증은 위성 AOD(Aerosol Optical Depth) 자료를 활용한 간접 검증 방식으로 이루어졌다. 연구 결과, 먼지 발생 위치는 에피소드마다 다르게 나타났으며, 그 주요 요인은 토양수분량과 토질로 밝혀졌다. 고비사막은 sand, sandy loam, loam, sandy clay loam, clay loam, clay 등 7가지 서로 다른 토질로 구성된 복합 사막으로, 토질에 따라 sand, silt, clay 비율이 다르다. Fécan *et al.* (1999)에 따르면, 토양 수분 함량이 증가하면 흡착된 물 분자들이 입자 간 결합력을 증가시켜 임계마찰속도가 상승한다. 특히, clay 함량이 높은 토양에서는 수분 함량 증가에 따른 임계마찰속도의 상승 폭이 더 크게 나타나 먼지 발생이 더욱 억제되는 경향이 있다. 이에 반해, sand 함량이 높은 토양은 공극이 크고 배수가 빠르기 때문에, 일정 수준 이상의 수분이 유지되지 않는 한 수분 증가로 인한 임계마찰속도의 상승 효과가 상대적으로 제한적일 수 있다. 그러나 sand에서는 먼지 발생이 잘 일어나지 않는 경향이 있다. 이는 sand 입자가 크고 무거워 직접적인 부유 먼지가 발생하기 어렵고, saltation 과정에서 비산 먼지의 생성률이 낮기 때문이다. 반면, silt 함량이 높은 토양에서는 먼지 발생이 가장 활발하게 일어난다. Silt 입자는 sand보다 작고 가벼워 쉽게 풍식되지만, clay처럼 강한 응집력을 가지지 않기 때문

에 바람에 의해 쉽게 부유 먼지로 전환될 수 있다. 이러한 이유로, 풍식 과정에서 silt가 주요한 먼지 공급원으로 작용하며, 주요 먼지 발생 지역에서도 높은 비율로 분포하는 경향을 보인다(Zhang *et al.*, 2023).

또한, 에피소드 및 모델에 따라 먼지 발생량도 다르게 나타났는데, 그 이유로는 지표면의 특성을 반영한 마찰속도와 임계마찰속도의 차이, 그리고 모델별 메커니즘의 차이로 분석되었다. 동아시아 에피소드에 대한 모델별 먼지 발생량 모의 결과를 살펴보면, S04 모델이 모든 에피소드에서 가장 많은 먼지를 예측하였으며, KOK, CMAQ 순으로 나타났다. 이러한 모델 간 차이는 Owen effect 반영 여부 및 saltation flux scheme 차이에서 기인한다. Owen effect란, saltation 과정에서 수송되는 토양 입자들이 바람 운동량 일부를 지표로 전달하여 마찰속도를 증가시키는 효과를 의미한다(Owen, 1964). 먼지 발생량을 모의할 때 Owen effect를 고려하는 SCNU와 KOK 모델은 CMAQ 모델보다 마찰속도가 항상 더 크게 나타나는 경향을 보였다. Saltation scheme에 대한 차이도 먼지 발생량 차이에 영향을 미쳤다. S04 모델은 CMAQ와 동일한 saltation flux scheme을 적용하지만, 파라미터 값이 CMAQ-DUST의 1에 비해 2.61배 크게 설정되어 있다. 여기에 Owen effect까지 반영되면서, CMAQ 대비 먼지 발생량이 더욱 증가한 것으로 분석되었다.

모델 검증은 일차적으로 천리안 위성의 AOD (Aerosol Optical Depth) 자료를 활용하여 수행하였는데, 관측·모의 간 비교 결과 에피소드마다 먼지 발생 위치는 관측과 유사하게 모의하였다고 판단되었으나 위성자료의 결측 값이 많아 모델의 과대모의 또는 과소모의 여부를 판단하기 어려운 한계가 있었다. 위성 데이터의 한계를 보완하기 위해 KORUS-AQ 기간동안 수행한 PM₁₀ 모의 결과를 중국 관측소 자료와 비교하였다. 또한, JADE 프로젝트에서 가장 높은 모의 정확도를 보였던 SCNU_S11 모델을 추가하여 모의 결과를 살펴보았다. 그 결과, S11 모델이 중국 중부와 남부 지역에서 높은 일치도를 보였으며, 다른 모델에 비해 넓은 범위에서 상대적으로 높은 예측 정

확도를 나타냈다. PM₁₀ 관측 값과의 평균 IOA (Index of Agreement)를 비교한 결과, S11 (0.27)이 다른 모델에 비해 더 높은 정확도를 보였으며, S04 (0.22), KOK (0.19), CMAQ-DUST (0.18) 순으로 나타났다. JADE 프로젝트 모의 결과에서 관측과의 일치도가 가장 높았던 S11이 동아시아 실제 황사 모의에서도 가장 우수한 성능을 보였으며, 이는 이 모델이 황사 발원지의 위치에 관계없이 보편적으로 적용될 가능성이 있음을 시사한다. 다만, 다른 모델들에 비해 훨씬 적은 수의 모수를 사용하여 먼지 발생량을 산정하는 KOK 모델의 경우 관측 결과와의 비교를 통한 모델의 튜닝 작업을 거쳐 모델 성능을 향상시킬 수 있는 여지가 있기 때문에 이 부분에 대한 추가 연구가 필요하다.

4. 먼지 발생량 산정 모델의 한계와 개선 방향

3차원 대기질 모델을 활용한 사막먼지 발생량 산정은 기상장과 지표 조건을 반영하여 먼지 발생 및 수송을 예측하는 데 유용하지만, 기상장의 불확실성과 위성·지상 관측자료의 결측 문제로 인해 정확도가 제한된다. 기상 모델의 초기 및 경계 조건에 따른 변동성과 관측 데이터의 부족은 먼지 발생량 예측의 주요 오차 요인으로 작용한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 인공지능(AI) 기반 기법 활용의 필요성이 제기되었다. 기계 학습 및 딥러닝 기술을 활용하면 과거 기상 및 황사 발생 데이터를 학습하여 보다 정교한 예측 모델을 구축할 수 있다. 특히, AI 기반 기상장 보정 기법은 기존 수치 예보 모델의 편향을 줄이고, 기상 변수 간의 복잡한 비선형 관계를 효과적으로 반영할 수 있다. 또한, AI를 활용한 결측 데이터 보정 기법을 적용하면 위성 자료의 결측 문제를 완화하고 모델 검증의 신뢰도를 높일 수 있다.

그러나 Lemmouchi *et al.* (2023)의 연구에서처럼 AI를 활용한 극단적인 AOD 값의 과대 보정, 학습 데이터 의존성, 물리적 메커니즘에 대한 명확한 이해 부족은 물리 모델과의 통합에 어려움을 초래할 수 있

다. 따라서 AI 기반 접근법을 도입할 때는 물리 기반 모델과의 통합적인 활용이 필요하다. 머신러닝 기법은 대규모 기상 및 위성 데이터를 학습하여 패턴을 찾아내는 데 강점을 가지지만, 먼지 발생 및 수송 과정을 물리적 메커니즘에 따라 해석하는 물리 기반 모델처럼 먼지 발생의 원인을 직접적으로 설명하지 못하는 한계가 있다. 반면, 물리 모델은 물리 법칙을 기반으로 먼지 발생과 이동을 모의할 수 있지만, 입력 자료(기상장, 지표 조건) 자체의 불확실성이 커 예측 오차가 발생할 수 있다. 따라서 두 접근법을 상호 보완적으로 통합하는 것이 중요하다. 예컨대, AI는 물리 모델의 입력자료를 보정하여 예측의 신뢰도를 높일 수 있으며, 동시에 물리 모델의 결과를 학습 데이터로 활용하여 AI의 예측 성능을 향상시킬 수 있다. 이를 위해서는 AI와 수치 모델을 융합한 하이브리드 접근법이 필요하며, AI 모델을 활용해 기상장의 불확실성을 줄이고, 이를 물리 모델의 입력자료로 활용함으로써 먼지 발생 및 이동 예측의 정확도를 개선할 수 있을 것이다. 이러한 상호 보완적 접근을 통해 AI와 물리 모델이 단독으로 운용될 때보다 더 정확하고 신뢰성 높은 먼지 발생 예측이 가능할 것이다.

향후 연구에서는 AI 기반 데이터 분석, 수치 모델과의 융합, 결측 보정 기법 개선 등을 통해 더욱 신뢰성 높은 황사 예측 체계를 구축하는 방향으로 발전해야 한다. 이를 위해 다양한 관측 데이터와의 직접적인 비교 검증 등의 연구, 다중 모델 간 상호 검증, 다양한 기상 및 위성 데이터를 활용한 AI 물리 융합 모델 개발과 같은 연구가 지속적으로 수행될 필요가 있다. 이렇게 된다면, 향후 황사 예측의 정확도가 개선될 뿐만 아니라, 기후 변화에 따른 먼지 발생 패턴 변화를 효과적으로 분석하고 대응하는 데에도 도움을 줄 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 총설에서는 3차원 대기질 모델에 적용된 다양한 사막먼지 발생량 산정 모델들의 검증 방법과 연구

동향을 분석하였다. 먼저, CMAQ, WRF-Chem, CHIMERE, GMAQ 등 대표적인 3차원 대기질 모델에서 사용되는 사막먼지 발생량 산정 기법들의 특징을 정리하였다. CMAQ 모델은 기존의 DEAD 모델에서 발전된 LS scheme을 새롭게 채택하여 먼지 발생량 예측의 정확도를 개선하였으며, WRF-Chem, CHIMERE, GMAQ 모델은 다양한 산정 기법들을 제공함으로써 사용자의 선택 폭을 넓히고 다양한 환경 조건에서의 적용 가능성을 확대하였다. 다양한 검증 방법을 활용하여 먼지 발생량 산정 모델의 성능을 평가하고 개선한 연구들을 검토하였으며, 3차원 대기질 모델을 적용하여 실제 황사 에피소드를 정밀 검증한 연구 결과를 해석함으로써 모델의 실질적인 적용 가능성을 분석하였다. 나아가, 현재 널리 사용되고 있는 먼지 발생량 산정 모델들의 한계를 정리하고, 이를 개선하기 위한 방향을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 동북아-지역 연계 차세대연구사업의 지원(2020M3G1A1114617), 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2024-03-03-002), 교육부가 지원하는 한국연구재단(NRF)의 기초과학연구사업(RS-2024-00463576)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- Alfaro, S.C., Gaudichet, A., Gomes, L., Maillé, M. (1998) Mineral aerosol production by wind erosion: Aerosol particle sizes and binding energies, *Geophysical Research Letters*, 25(7), 991-994. <https://doi.org/10.1029/98GL00502>
- Alfaro, S.C., Gomes, L. (2001) Modeling mineral aerosol production by wind erosion: Emission intensities and aerosol size distributions in source areas, *Journal of Geo-*

- physical Research: Atmospheres, 106(D16), 18075-18084. <https://doi.org/10.1029/2000JD900339>
- Aragnou, E., Betts, J., Williams, M., Gollan, C. (2021) Dust transport from inland Australia and its impact on air quality and health on the eastern coast of Australia during the February 2019 dust storm, *Atmosphere*, 12(2), 141. <https://doi.org/10.3390/atmos12020141>
- Aryal, B., Raut, B.K., Bhattarai, S., Bhandari, S., Tandan, P., Gyawali, K., Sharma, K., Ranabhat, D., Thapa, R., Aryal, D., Ojha, A., Devkota, H.P., Parajuli, N. (2022) Potential Therapeutic Applications of Plant-Derived Alkaloids against Inflammatory and Neurodegenerative Diseases, *Evid Based Complement Alternat Med*, 2022, 7299778. <https://doi.org/10.1155/2022/7299778>
- Banks, J.R., Heinold, B., Schepanski, K. (2023) Radiative cooling and atmospheric perturbation effects of dust aerosol from the Aralkum Desert in Central Asia, *EGU sphere*, 2023, 1-28. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2772>
- Byun, D.W., Ching, J.K.S. (1999) Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system, EPA/600/R-99/030, Office of Research and Development, United States Environmental Protection Agency, Washington, D. C.
- Byun, D.W., Schere, K.L. (2006) Review of the Governing Equations, Computational Algorithms, and Other Components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, *Applied Mechanics Reviews*, 59(2), 51-77.
- Chen, F.H., Huang, X.Z., Yang, M.L., Feng, S. (2020). Asian dust-storm activity dominated by Chinese dynasty changes since 2000 BP, *Nature Communications*, 11(1), 992.
- Cheng, Y., Dai, T., Cao, J., Goto, D., Jin, J., Nakajima, T., Shi, G. (2024) Improving estimation of a record-breaking east Asian dust storm emission with lagged aerosol Ångström exponent observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(22), 12643-12659. <https://doi.org/10.5194/acp-24-12643-2024>
- Darmenova, K., Sokolik, I.N., Shao, Y., Marticorena, B., Bergametti, G. (2009) Development of a physically based dust emission module within the Weather Research and Forecasting (WRF) model: Assessment of dust emission parameterizations and input parameters for source regions in Central and East Asia, *Journal of Geophysical Research*, 114, 14201. <https://doi.org/10.1029/2008JD011236>
- Draxler, R.R., Gillette, D.A., Kirkpatrick, J.S., Heller, J. (2001) Estimating PM₁₀ air concentrations from dust storms in Iraq, Kuwait and Saudi Arabia, *Atmospheric Environment*, 35(25), 4315-4330. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00159-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00159-5)
- Fast, J.D., Gustafson Jr., W.I., Easter, R.C., Zaveri, R.A., Barnard, J.C., Chapman, E.G., Grell, G.A., Peckham, S.E. (2006) Evolution of ozone, particulates, and aerosol direct radiative forcing in the vicinity of Houston using a fully coupled meteorology-chemistry-aerosol model, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D21). <https://doi.org/10.1029/2005JD006721>
- Fécan, F., Marticorena, B., Bergametti, G. (1999) Parameterization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas, *Annales Geophysicae*, 17(1), 149-157. <https://doi.org/10.1007/s00585-999-0149-7>
- Foroutan, H., Young, J., Napelenok, S., Ran, L., Appel, K.W., Gilliam, R.C., Pleim, J.E. (2017) Development and evaluation of a physics-based windblown dust emission scheme implemented in the CMAQ modeling system, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9(1), 585-608. <https://doi.org/10.1002/2016MS000823>
- Gillette, D.A., Adams, J., Endo, A., Smith, D., Kihl, R. (1980) Threshold velocities for input of soil particles into the air by desert soils, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 85(C10), 5621-5630. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/JC085iC10p05621>
- Gillette, D.A., Passi, R. (1988) Modeling dust emission caused by wind erosion, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 93(D11), 14233-14242. <https://doi.org/10.1029/JD093iD11p14233>
- Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J.M., Holben, B., Dubovik, O., Lin, S.-J. (2001) Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D17), 20255-20273. <https://doi.org/10.1029/2000JD000053>
- Gomes, L., Rajot, J.L., Alfaro, S.C., Gaudichet, A. (2003) Validation of a dust production model from measurements performed in semi-arid agricultural areas of Spain and Niger, *CATENA*, 52(3), 257-271. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00017-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00017-1)
- Gong, S.L., Zhang, X Y. (2008) CUACE/Dust-an integrated system of observation and modeling systems for operational dust forecasting in Asia, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(9), 2333-2340. <https://doi.org/10.5194/acp-8-2333-2008>
- Goudie, A.S., Middleton, N.J. (2006) Desert dust in the global system. Springer, Berlin, Germany.

- Griffin, D.W., Garrison, V.H., Herman, J.R., Shinn, E.A. (2001) Dust in the wind: Long-range transport of dust in the atmosphere and its implications for global public and ecosystem health, *Environmental Health Perspectives*, 109(9), 941–951. <https://doi.org/10.1023/A:1011910224374>
- Grell, G.A., Peckham, S.E., Schmitz, R., McKeen, S.A., Frost, G., Skamarock, W.C., Eder, B. (2005) Fully coupled “online” chemistry within the WRF model, *Atmospheric Environment*, 39(37), 6957–6975. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.027>
- Hodzic, A., Bessagnet, B., Vautard, R. (2006) A model evaluation of coarse-mode nitrate heterogeneous formation on dust particles. *Atmospheric Environment*, 40(22), 4158–4171. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.02.015>
- In, H.-J., Park, S.-U. (2003) The soil particle size dependent emission parameterization for an Asian dust (Yellow Sand) observed in Korea in April 2002, *Atmospheric Environment*, 37, 4625–4636. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.07.009>
- Ishizuka, M., Mikami, M., Leys, J., Yamada, Y., Heidenreich, S., Shao, Y., McTainsh, G.H. (2008) Effects of soil moisture and dried raindrop crust on saltation and dust emission, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113, D24212. <https://doi.org/10.1029/2008JD009955>
- Ishizuka, M., Mikami, M., Leys, J.F., Shao, Y., Yamada, Y., Heidenreich, S. (2014). Power law relation between size-resolved vertical dust flux and friction velocity measured in a fallow wheat field, *Aeolian Research*, 12, 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.11.002>
- Iversen, J.D., White, B.R. (1982) Saltation threshold on Earth, Mars and Venus, *Sedimentology*, 29, 111–119.
- Kang, J.-Y., Yoon, S.-C., Shao, Y., Kim, S.-W. (2011) Comparison of vertical dust flux by implementing three dust emission schemes in WRF/Chem, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D9). <https://doi.org/10.1029/2010JD014649>
- Kang, M., Lee, W. (2023) Assessment of Asian Dust Aerosol Model 3 Based on an Asian Dust Case of December 2022, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(3), 381–399. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.3.381>
- Kok, J.F., Mahowald, N.M., Fratini, G., Gillies, J.A., Ishizuka, M., Leys, J.F., Mikami, M., Park, M.S., Park, S.U., Van Pelt, R.S. (2014a) An improved dust emission model—Part 1: Model description and comparison against measurements, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(23), 13023–13041. <https://doi.org/10.5194/acp-14-13023-2014>
- Kok, J.F., Albani, S., Mahowald, N.M., Ward, D.S. (2014b) An improved dust emission model—Part 2: Evaluation in the Community Earth System Model, with implications for the use of dust source functions, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(23), 13043–13061. <https://doi.org/10.5194/acp-14-13043-2014>
- Kok, J.F., Adebisi, A.A., Albani, S., Balkanski, Y., Checa-Garcia, R., Chin, M., Colarco, P.R., Hamilton, D.S., Huang, Y., Ito, A., Klose, M., Li, L., Mahowald, N.M., Miller, R.L., Obiso, V., Pérez García-Pando, C., Rocha-Lima, A., Wan, J.S. (2021) Contribution of the world’s main dust source regions to the global cycle of desert dust, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(10), 8169–8193. <https://doi.org/10.5194/acp-21-8169-2021>
- Kuramochi, M., Kajino, M., Ueda, H. (2023) Interannual Variability of Dust Deposition in Japan during Spring Season and Related Atmospheric Circulation Fields, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 101(4), 255–270. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2023-016>
- Lee, H., Kim, M.Y., Park, S.H. (2019) A Comparative Review of Wind-Blown Dust Emission Models, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 149–171. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.149>
- Lee, H., Park, S.H. (2020) Stepwise Assessment of Different Saltation Theories in Comparison with Field Observation Data, *Atmosphere*, 11(1), 10. <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/1/10>
- Lee, H. (2023) Direction to Improve the Accuracy of Wind-Blown Dust Model (Doctoral dissertation). Sunchon National University.
- Lee, H., Park, S.H. (under review) Comparative Assessment of Different Sandblasting Theories, *Atmospheric Environment*.
- Lee, W., Kang, M. (2023) A Study on the Updating of Asian Dust Source Regions in Asian Dust Aerosol Model Version 3 (ADAM3) in KMA, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(3), 294–307. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.3.294>
- LeGrand, S.L., Polashenski, C., Letcher, T.W., Creighton, G.A., Peckham, S.E., Cetola, J.D. (2019) The AFWA dust emission scheme for the GOCART aerosol model in WRF-Chem v3.8.1, *Geoscientific Model Development*, 12(1), 131–166. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-131-2019>
- Lemmouchi, F., Cuesta, J., Lachatre, M., Brajard, J., Coman, A., Beekmann, M., Derognat, C. (2023) Machine Learning-Based Improvement of Aerosol Optical Depth from CHIMERE Simulations Using MODIS Satellite

- Observations, Remote Sensing, 15(6), 1510. <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/6/1510>
- Li, Z., Zhao, X., Kahn, R., Mishchenko, M., Remer, L., Lee, K.H., Wang, M., Laszlo, I., Nakajima, T., Maring, H. (2009) Uncertainties in satellite remote sensing of aerosols and impact on monitoring its long-term trend: a review and perspective, *Annales Geophysicae*, 27(7), 2755-2770. <https://doi.org/10.5194/angeo-27-2755-2009>
- Liaskoni, M., Huszar, P., Bartík, L., Prieto Perez, A.P., Karlický, J., Vlček, O. (2023) Modelling the European wind-blown dust emissions and their impact on particulate matter (PM) concentrations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(6), 3629-3654. <https://doi.org/10.5194/acp-23-3629-2023>
- Lu, H., Shao, Y. (1999) A new model for dust emission by saltation bombardment, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D14), 16827-16842. <https://doi.org/10.1029/1999JD900169>
- Mailler, S., Menut, L., Khvorostyanov, D., Valari, M., Couvidat, F., Siour, G., Turquety, S., Briant, R., Tuccella, P., Bessagnet, B., Colette, A., Létinois, L., Markakis, K., Meleux, F. (2017) CHIMERE-2017: from urban to hemispheric chemistry-transport modeling, *Geoscientific Model Development*, 10(6), 2397-2423. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2397-2017>
- Marticorena, B., Bergametti, G. (1995) Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D8), 16415-16430. <https://doi.org/10.1029/95JD00690>
- Menut, L., Cholakian, A., Pennel, R., Siour, G., Mailler, S., Valari, M., Lugon, L., Meurdesoif, Y. (2024) The CHIMERE chemistry-transport model v2023r1, *Geoscientific Model Development*, 17(14), 5431-5457. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-5431-2024>
- Menut, L., Forêt, G., Bergametti, G. (2007) Sensitivity of mineral dust concentrations to the model size distribution accuracy, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D10). <https://doi.org/10.1029/2006JD007766>
- Middleton, N.J. (2017) Desert dust hazards: A global review, *Aeolian Research*, 24, 53-63. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.12.001>
- Niu, T., Gong, S.L., Zhu, G.F., Liu, H.L., Hu, X. Q., Zhou, C.H., Wang, Y.Q. (2008) Data assimilation of dust aerosol observations for the CUACE/dust forecasting system, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(13), 3473-3482. <https://doi.org/10.5194/acp-8-3473-2008>
- Owen, P.R. (1964) Saltation of uniform grains in air, *Journal of Fluid Mechanics*, 20(2), 225-242. <https://doi.org/10.1017/S0022112064001173>
- Park, S.-U., In, H.-J. (2003) Parameterization of dust emission for the simulation of the yellow sand (Asian dust) event observed in March 2002 in Korea, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D19). <https://doi.org/10.1029/2003JD003484>
- Park, S.-U., Lee, E.-H. (2004) Parameterization of Asian dust (Hwangsae) particle-size distributions for use in dust emission models, *Atmospheric Environment*, 38(14), 2155-2162. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.024>
- Park, S.-U., Choe, A., Lee, E.-H., Park, M.-S., Song, X. (2010) The Asian Dust Aerosol Model 2 (ADAM2) with the use of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) obtained from the Spot4/vegetation data, *Theoretical and Applied Climatology*, 101(1), 191-208. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0244-4>
- Park, Y.K., Park, S.H. (2010) Development of a New Wind-Blown-Dust Emission Module Using Comparative Assessment of Existing Dust Models, *Particulate Science and Technology*, 28(3), 267-286. <https://doi.org/10.1080/02726351.2010.491761>
- Park, Y.K., Park, S.H. (2013) Estimation of threshold friction velocity using a physical parameterization over the Asian dust source region, *Particulate Science and Technology*, 31(2), 119-127.
- Schmechtig, C., Marticorena, B., Chatenet, B., Bergametti, G., Rajot, J.L., Coman, A. (2011) Simulation of the mineral dust content over Western Africa from the event to the annual scale with the CHIMERE-DUST model, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(14), 7185-7207. <https://doi.org/10.5194/acp-11-7185-2011>
- Sekiyama, T.T., Tanaka, T.Y., Shimizu, A., Miyoshi, T. (2010) Data assimilation of CALIPSO aerosol observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 39-49. <https://doi.org/10.5194/acp-10-39-2010>
- Sekiyama, T.T., Yumimoto, K., Tanaka, T., Nagao, T., Kikuchi, M., Murakami, H. (2016) Data Assimilation of Himawari-8 Aerosol Observations: Asian Dust Forecast in June 2015, *SOLA*, 12, 86-90. <https://doi.org/10.2151/sola.2016-020>
- Sekiyama, T.T., Kurosaki, Y., Kajino, M., Ishizuka, M., Buyantogtokh, B., Wu, J., Maki, T. (2023) Improvement in Dust Storm Simulation by Considering Stone Coverage Effects for Stony Deserts in East Asia, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(2), e2022JD037295. <https://doi.org/10.1029/2022JD037295>

- Shao, Y., Raupach, M.R., Findlater, P.A. (1993) Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98 (D7), 12719-12726. <https://doi.org/10.1029/93JD00396>
- Shao, Y., Lu, H. (2000) A simple expression for wind erosion threshold friction velocity, *Journal of Geophysical Research*, 105, 22,437-22,443. <https://doi.org/10.1029/2000JD900304>
- Shao, Y. (2001) A model of mineral dust emission, *Journal of Geophysical Research*, 106, 20239-20254. <https://doi.org/10.1029/2001JD900171>
- Shao, Y. (2004) Simplification of a dust emission scheme and comparison with data, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D10). <https://doi.org/10.1029/2003JD004372>
- Shao, Y., Ishizuka, M., Mikami, M., Leys, J.F. (2011) Parameterization of size-resolved dust emission and validation with measurements, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D8). <https://doi.org/10.1029/2010JD014527>
- Shao, Y., Chen, S., Huang, N., Gui, H., Mao, R., Masahide, I., Wu, C., Yin, X., Zhang, J. (2025) Source Limitation Could Have Major Implications to Dust Emission Estimates, *Geophysical Research Letters*, 52(5), e2024GL112562. <https://doi.org/10.1029/2024GL112562>
- Tanaka, T.Y., Chiba, M. (2005) Global Simulation of Dust Aerosol with a Chemical Transport Model, MASINGAR, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 83A, 255-278. <https://doi.org/10.2151/jmsj.83A.255>
- Todd, M., Francis, D., Cavazos Guerra, C., Bouet, C., Heinold, B., Baldasano, J., Cautenet, G., Koren, I., Pérez García-Pando, C., Solomon, F., Tegen, I., Tulet, P., Washington, R., Zakey, S. (2008) Quantifying uncertainty in estimates of mineral dust flux: an intercomparison of model performance over the Bodélé Depression, Northern Chad, *Journal of Geophysical Research*, 113. <https://doi.org/10.1029/2008JD010476>
- Uno, I., Wang, Z., Chiba, M., Chun, Y.S., Gong, S.L., Hara, Y., Jung, E., Lee, S.-S., Liu, M., Mikami, M., Music, S., Nickovic, S., Satake, S., Shao, Y., Song, Z., Sugimoto, N., Tanaka, T., Westphal, D.L. (2006) Dust model intercomparison (DMIP) study over Asia: Overview, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D12). <https://doi.org/10.1029/2005JD006575>
- Usha, R., Sharma, M., Singh, S. (2022) Deciphering the role of aerosol-induced snow albedo feedback on dust emission over the Tibetan Plateau, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(12), <https://doi.org/10.1029/2021JD036384>
- Vautard, R., Bessagnet, B., Chin, M., Menut, L. (2005) On the contribution of natural Aeolian sources to particulate matter concentrations in Europe: Testing hypotheses with a modelling approach, *Atmospheric Environment*, 39(18), 3291-3303. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.01.051>
- White, B.R. (1979) soil transport by winds on Mars, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B9), 4643-4651. <https://doi.org/10.1029/JB084iB09p04643>
- White, B.R. (1986) *Encyclopedia of fluid mechanics*. Gulf Publishing, Houston, TX, USA, p. 239-282.
- Yu, J., Song, C.H., Kim, M.C. (2023) Development of the Korean Air Chemistry Modeling System version 2.0 (K_AChMS v2.0) and its performance of operational mode, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, EGU23-10089, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-10089>
- Yu, W., Ma, X., Yan, W., Wang, Y. (2024) Assessment of Soil Wind Erosion and Population Exposure Risk in Central Asia's Terminal Lake Basins, *Water*, 16(13), 1911. <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/13/1911>
- Yukimoto, S., Yoshimura, H., Hosaka, M., Sakami, T., Tsujino, H., Hirabara, M., Tanaka, T., Deushi, M., Obata, A., Nakano, H., Adachi, Y., Shindo, E., Yabu, S., Ose, T., Kitoh, A. (2011) Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) — Model Description —. Technical Reports of the Meteorological Research Institute, 64, 1-96.
- Zender, C., Bian, H., Newman, D. (2003) Mineral Dust Entrainment And Deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology, *Journal of Geophysical Research*, 108. <https://doi.org/10.1029/2002JD002775>
- Zhang, X., Zhang, C., Li, W., Zuo, X., Zhao, J. (2023) Dust emission efficiency of compacted soils as a function of amount of abrader and soil texture, *Geoderma*, 435, 116503. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116503>
- Zhao, T.L., Gong, S.L., Zhang, X.Y., Abdel-Mawgoud, A., Shao, Y.P. (2006) An assessment of dust emission schemes in modeling east Asian dust storms, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5). <https://doi.org/10.1029/2004JD005746>
- Zhou, C., Gui, H., Hu, J., Ke, H., Wang, Y., Zhang, X. (2019) Detection of New Dust Sources in Central/East Asia and Their Impact on Simulations of a Severe Sand and Dust Storm, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(17-18), 10232-10247. <https://doi.org/10.1029/2019JD030753>

- Zhou, C., Zhang, X., Zhang, J., Zhang, X. (2021) Representations of dynamics size distributions of mineral dust over East Asia by a regional sand and dust storm model, *Atmospheric Research*, 250, 105403. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105403>
- Zhao, C., Wang, Y., Zhang, R. (2023) Multi-model ensemble projection of the global dust cycle by the end of 21st century using the Coupled Model Intercomparison Project version 6 data, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 7823-7838. <https://doi.org/10.5194/acp-23-7823-2023>

Authors Information

이해주 (수도권 미세먼지연구·관리센터 선임연구원)
(lhaeju14@inha.ac.kr)

박성훈 (순천대학교 환경공학과 교수)
(shpark@scnu.ac.kr)