

환경 및 응용기상 분과 / 환경 및 응용기상 3-1

# 대기질과 기상 자료동화가 한반도 지역의 대기질-기상 예측에 미치는 영향

조운재, 김현미

연세대학교 대기과학과 대기예측성 및 자료동화 연구실

대기 중 미세먼지 농도는 대기질과 기상의 복잡한 상호작용 과정을 통해 결정된다. 정확한 미세먼지 예측을 위해서는 예측 모델이 대기질과 기상 모두 정확히 예측해야 한다. 자료동화는 대기질과 기상 초기조건의 불확실성을 줄여 대기질 예측 성능을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 대기질 자료동화와 기상 자료동화가 따로 그리고 함께 수행될 때 대기질 및 기상 예측에 미치는 영향을 살펴보았다. 대기질과 기상 변수가 실시간 상호작용 하는 Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry (WRF-Chem) 모델과 WRF data assimilation (WRFDA)의 three-dimensional variational data assimilation (3DVAR) 방법을 사용하여, 한반도 고농도 미세먼지 사례에 대해 실험을 수행하였다. 관측 기준으로 예측 성능을 검증한 결과, 대기질-기상 동시 자료동화 실험에서 대기질 예측 성능이 가장 우수했다. 대기질 예측에는 대기질 자료동화만 수행한 실험이, 기상 예측에는 기상 자료동화만 수행한 실험이 예측 성능이 우수했다. 또한, 자료동화를 수행한 실험과 자료동화를 수행하지 않은 실험을 비교하고, 대기질 및 기상 자료동화가 대기질 및 기상 예측 변화에 미치는 영향을 살펴보았다. 대기질-기상 동시 자료동화 실험이 대기질 예측 변화에 가장 큰 영향을 미쳤다. 대기질 자료동화와 기상 자료동화가 대기질 예측 변화에 미치는 영향은 각각 대기질-기상 동시 자료동화의 79.3%, 66.9% 수준이었다. 대기질-기상 동시 자료동화가 대기질 예측 변화에 미치는 영향은 대기질 자료동화와 기상 자료동화의 효과가 상호 보완적으로 작용하여 나타났다. 기상 예측 변화는 기상 자료동화를 수행한 실험에서 그 영향이 가장 컸다. 대기질 자료동화의 경우 자료동화 사이클링 과정에서 자료동화 효과의 누적으로 기상 예측 변화에 영향을 미쳤고, 그 효과는 대기질-기상 동시 자료동화를 기준으로 검증 변수에 따라 약 24.5 ~ 44.2% 수준이었다. 결론적으로, 대기질-기상 동시 자료동화는 대기질과 기상 예측 변화에 가장 큰 영향을 미치며, 한반도 대기질 및 기상 예측 성능을 가장 크게 향상시켰다.

**Keywords:** 대기질-기상 동시 자료동화, 대기질 자료동화, 기상 자료동화, 대기질 예측, 기상 예측, 자료동화 효과, 미세먼지

※ 이 연구는 연세 시그니처 연구클러스터 사업 (2024-22-0162, 2025-22-0242)의 지원으로 수행되었습니다.

환경 및 응용기상 분과 / 환경 및 응용기상 3-2

# SAPRC-CFD 결합 모델을 이용한 상세 지역의 수목 BVOCs 배출 및 공기역학적 영향이 기여하는 오존 농도 변화 분석

김연욱<sup>1</sup>, 우주완<sup>2</sup>, 이상현<sup>2</sup>, 강건<sup>3</sup>, 김재진<sup>3</sup>, 곽경환<sup>4</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 환경연구소

<sup>2</sup>공주대학교 대기과학과

<sup>3</sup>국립부경대학교 지구환경시스템과학부

<sup>4</sup>강원대학교 환경학과

도시 지역의 수목은 주로 도시 미관 향상과 시민들의 생활 환경 개선을 목적으로 심어져 왔다. 도시 수목은 건식 침적과 기공 흡수를 통한 기체상 오염물질 제거, 신체적·정신적 건강 증진 등 긍정적인 역할을 한다. 그러나 수목이 항상 긍정적인 영향만을 미치는 것은 아니다. 수목의 공기역학적 효과는 캐노피에 의해 도로 협곡 내 공기 흐름을 감소시켜 보행자 수준에서 오염물질 농도를 높일 수 있다. 또한, 수목은 생물 기원 휘발성유기화합물(Biogenic Volatile Organic Compounds, BVOCs)을 배출하며, 이는 OH, NO<sub>x</sub> 등과 반응하여 2차 오염물질인 오존(O<sub>3</sub>)의 생성 및 제거 과정에 관여하므로 이러한 요인의 영향을 종합적으로 분석할 필요가 있다. 따라서 본 연구의 목적은 수목의 두 가지 영향(공기역학적 효과 및 BVOCs 배출)에 따른 오존 농도의 변화를 정량적으로 평가하는 데 있다. 이를 위해 화학 메커니즘 중 하나인 SAPRC(Statewide Air Pollution Research Center Atmospheric Chemical Mechanism)과 전산 유체 역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 모델을 결합한 수치모델(SAPRC-CFD)을 이용하여 서울특별시 1.6 km × 1.6 km 영역을 대상으로 모의하였다. 모델의 수평 해상도는 10 m이며, 오염물질 배출량은 SOME(Source Object-based Model for Emission)을, 수목의 BVOCs 배출량은 MEGAN(Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)을 통해 산정하여 입력하였다. 기상 및 배경 농도 경계 조건은 WRF-CMAQ 모델의 결과를 활용하였다. 모의 시나리오는 수목의 공기역학적 효과와 BVOCs 배출률(MEGAN 모델 내 배출 계수 및 잎 면적 지수)을 포함하여 다양한 요인을 반영하여 설계하였다. SAPRC-CFD 모의 결과, 수목의 공기역학적 효과는 풍속 변화에 따른 대기오염물질 분산과 공간 분포에 뚜렷한 영향을 미쳤다. 또한, 수목의 BVOCs 배출은 상세 지역의 오존 농도를 10% 이상 증가시켰으며, 이는 공기역학적 효과로 인한 오존 생성 기여도보다 크게 나타났다. 본 연구 결과에서 수목의 공기역학적 효과와 BVOCs 배출 및 화학 반응의 영향이 도시 대기질 모의의 필수 고려 사항을 확인하였다.

**Keywords:** SAPRC-CFD 모델, O<sub>3</sub>, BVOCs, 도시 수목, 상세 규모

※ 본 연구는 정부(환경부)의 재원으로 국립환경과학원의 지원과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-SP2017-366, RS-2024-00356913).

환경 및 응용기상 분과 / 환경 및 응용기상 3-3

## N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 흡수계수 및 ClNO<sub>2</sub> 수율의 관측 기반 보정이 질산염 에어로졸 예측 성능에 미치는 영향

마예진<sup>1</sup>, 김민중<sup>1</sup>, 이재범<sup>2</sup>, 홍성철<sup>2</sup>, 이태형<sup>3</sup>, 송정인<sup>3</sup>

<sup>1</sup>명지대학교 환경에너지공학과  
<sup>2</sup>국립환경과학원 대기질통합예보센터  
<sup>3</sup>한국외국어대학교 환경학과

본 연구는 겨울철 질산염(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 에어로졸의 예측 성능 향상을 위해, 야간 비균질 반응의 핵심 매개변수인 N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 흡수계수( $\gamma$ )와 ClNO<sub>2</sub> 수율( $\phi$ )을 관측 기반으로 보정하고 이를 3차원 대기화학 모델인 Community Multiscale Air Quality model(CMAQ)에 적용하여 이들 수율의 변화가 동아시아 질산염 에어로졸 농도 및 화학과정에 미치는 영향을 살펴보았다. 관측 기반  $\gamma$ 와  $\phi$  값은 안산 대기환경연구소에서 2023년 12월부터 2024년 3월까지 측정된 N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ClNO<sub>2</sub> 및 에어로졸 성분 자료를 활용하여, Korea Air quality observation-based Box model(KAB) 결과와 비교하여 회귀식을 산출한 뒤 CMAQ에 반영하였다. 실험은 기본(base), 관측 기반 보정(control), 배출량 조정(emis), 그리고 두 가지를 동시에 적용한 emis\_control의 네 가지 시나리오로 구성하였다. 배출량 조정은 CAPSS 2019와 CREATE 2019의 과소 모의를 반영하여 관측 지점을 기준으로 도출한 조정 계수(NH<sub>3</sub>=1.80, NO<sub>x</sub>=1.69, CO=2.52)를 적용하여 SMOKE 배출을 조절하였다. 분석 결과, base 시나리오에서  $\gamma$ 는 과대 모의(593.7%)하고  $\phi$ 는 과소 모의(-12.6%)하였으나, 관측 기반 회귀식을 적용한 control 시나리오에서는  $\gamma$ 와  $\phi$ 가 각각 168.7%, -2.5%로 보정되어 편차가 완화되었다. 이러한 결과는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 모의 특성에도 영향을 미쳐 base 시나리오에서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 과소 모의(-30.43%)를 나타냈으며, control 시나리오에서는  $\gamma$  감소 및  $\phi$  증가의 영향으로 N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 비균질 반응 경로가 억제되며 과소 모의(-34.63%)가 다소 심화되었다. 배출량을 조정한 emis 시나리오에서는 과대 모의(14.87%)로 전환되었고, emis\_control에서는 과대 모의(7.96%)가 완화되어 관측과 가장 근접한 결과를 나타냈다. IRR(Integrated Reaction Rate) 분석 결과, 배출량 보정과 관계없이 관측 기반의 보정을 적용할 경우 N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 비균질 반응 경로가 억제됨이 확인되었다. 이 결과는 관측 기반 보정이 N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 비균질 반응 경로와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>에 일관되게 영향을 미치며, CMAQ 내 야간 비균질 반응 모수화 개선이 질산염 예측 정확도 향상에 기여함을 보여준다.

**Keywords:** 질산염 에어로졸, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 비균질 반응, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 흡수계수, ClNO<sub>2</sub> 수율, CMAQ

※ 본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행되었습니다(NIER-2025-04-02-033).

## 대기-해양 결합모델을 활용한 구름 씨뿌리기의 안개 소산 효과 분석

문수환<sup>1</sup>, 송상근<sup>1,2</sup>, 이성빈<sup>1</sup>, 임윤규<sup>3</sup>, 장기호<sup>3</sup>

<sup>1</sup>제주대학교 지구해양융합학부 지구해양과학전공

<sup>2</sup>제주대학교 지구해양학과

<sup>3</sup>국립기상과학원 기상응용연구부

해무는 발생기작이 매우 다양하며, 때때로 짙은 농도의 안개가 발생할 경우 시정이 악화되어 항공기 지연 및 결항, 선박 충돌 등 연안 지역의 항만 및 항공 산업 전반에 막대한 영향을 미친다. 우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있어 해무가 자주 발생하며, 이에 따라 항만과 항공의 안전 확보를 위해 안개 발생 예측과 시정의 정밀한 산출이 필수적이다. 또한 안개로 인한 산업재해를 예방하기 위해 구름 씨뿌리기를 통한 안개 소산이 효과적인 대안이 될 수 있다. 특히 한반도 서해 연안지역에서 발생하는 해무의 형성 및 소멸은 대규모 순환, 대기-해양 상호작용, 미세물리과정, 복사, 난류 등 여러 요인이 복합적으로 작용하는 다중 규모 현상이다. 따라서 난류와 대기-해양 열·수분 플럭스 교환, 연안에서의 급격한 해수면온도 변화를 정밀하게 반영하기 위해 고해상도의 수치모의가 필요하다. 본 연구에서는 한반도 서해 경기만 지역을 대상으로 대기-해양 결합모델(Coupled-Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport, COAWST)을 활용하여, 국립기상과학원의 인공강우 지상실험 안개 사례와 인천국제공항에서 발생한 심각한 해무 사례에 대해 해무 예측 실험을 수행하였다. 결합모델의 예측 성능을 WRF 단일 모델과 비교·평가하였다. 아울러 구름 씨뿌리기를 구현할 수 있는 Modified Morrison Scheme 미세물리과정을 적용하여, 시딩물질에 의한 안개 소산 효과를 분석하였다. 미세물리과정이 격자 규모에서 수증기, 구름물, 얼음, 비 눈 등의 수분 변수들을 계산한다는 점을 고려하여 최종 도메인의 수평 해상도를 500m로 설정하였으며, 이를 통해 구름씨뿌리기가 안개 소산에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 그 결과, 단일모델에 비해 대기-해양 결합모델에서 해수면온도와 기온의 차이 및 상대습도를 보다 정확하게 모의하여, 안개 및 시정 예측 성능이 높게 나타났다. 또한 대기-해양 결합모델에서 구름 씨뿌리기에 의한 영향으로 인해 overseeding 또는 빗방울로의 전환이 반영되어 안개 소산이 나타난 것으로 사료된다.

**Keywords:** 대기-해양 결합자료동화, 해무, 구름 씨뿌리기, 안개 소산, Modified Morrison Scheme

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 기상조절 및 구름물리 연구(KMA2018-00224)의 지원을 받았음. 또한, 2025년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-02217872, 한국형 연안재해 정밀예측 기술개발)

## 한국의 이차 무기 에어로졸 모의를 위한 구름 아래 세정 스킴 평가

이예림<sup>1</sup>, 김민중<sup>2</sup>, 이재범<sup>3</sup>, 이용희<sup>3</sup>, 홍성철<sup>3</sup>, 박현영<sup>4</sup>

<sup>1</sup>명지대학교 환경에너지공학과

<sup>2</sup>명지대학교 환경시스템공학과

<sup>3</sup>국립환경과학원 대기질통합예보센터

<sup>4</sup>인천연구원 경제환경연구부

습식 침적은 물리적 제거 기작 중 하나로, 건식 침적에 비해 PM<sub>2.5</sub> 및 에어로졸 농도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 습식 침적은 구름 내 세정과 구름 아래 세정으로 구분되며, 일반적으로 구름 내 세정이 구름 아래 세정에 비하여 중요하다고 알려져 있다. 그러나 최근 동아시아를 중심으로 한 관측 기반 연구에서는 기존 이론에서 제시된 것보다 구름 아래 세정의 영향이 훨씬 클 수 있음을 보고하고 있다. 한편, 많은 대기질 모델은 입자-빗방울 간 이론적 충돌 메커니즘만을 고려하고, 용해도나 난류 혼합과 같이 세정 효율에 영향을 주는 주요 요인들을 충분히 고려하지 않아 구름 아래 세정을 과소모의하는 경향이 있다. 한편, CMAQ에서는 습식 침적이 에어로졸이 구름과 빗물에 완전히 흡수된다고 가정하여 계산하여 구름 아래에서도 과대 세정되는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 CMAQ의 구름 아래 세정 과정 개선을 위해 한반도의 강수 자료와 배경 에어로졸 농도를 이용하여 관측 기반 구름 아래 세정 계수를 도출하고 이를 많이 사용되는 충돌 이론 기반 스킴이나 CMAQ의 단순화된 스킴과 비교하였다. 충돌 이론 기반은 건조 조건에서 SIA 농도를 과소모의하고, 구름 아래 세정을 심각하게 과소평가함으로써, 고습 조건에서는 실제 강수 시 나타나는 급격한 농도 감소를 재현하지 못해 편향이 반전되는 경향을 보였다. 반면, CMAQ 기본 스킴은 모든 상대습도 구간에서 SIA 농도를 일관되게 과소모의하면서, 특히 질산염의 경우 습식 침적을 과도하게 모의하여 과도한 세정(washout) 반응을 나타냈다. 관측 기반은 농도 및 침적량 모두에서 관측값과의 일치도를 향상시켰다. 이를 통해 구름 아래 세정 스킴에 대한 모델 민감도를 평가하고, 대기 화학 수송 모델에서의 습식 침적 개선을 위한 방향성을 제시하였다.

**Keywords:** 습식침적, 구름 아래 세정, Washout, 이차 무기 에어로졸, the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model

※ 이 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행되었습니다(NIER-2025-04-02-033).

## Atmospheric Nitrate Chemistry and Response to Emissions Reductions in the Northeastern US

Heejeong Kim<sup>1,2</sup>, Wendell W. Walters<sup>3</sup>, and Meredith G. Hastings<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth, Environment, and Planetary Sciences, Brown University

<sup>2</sup>Institute at Brown for Environment and Society, Brown University

<sup>3</sup>Department of Chemistry and Biochemistry, University of South Carolina

The successful implementation of the US Clean Air Act has reduced nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) emissions, with significant improvements in air quality and acid deposition. However, predicting the impact of primary emission reductions on secondary pollutants such as ozone, particulate matter, and deposition remains challenging, as NO<sub>x</sub> influences oxidant concentrations and aerosol formation. In particular, particulate nitrate (pNO<sub>3</sub>) concentrations have not declined significantly during winter, despite overall reductions in NO<sub>x</sub> emissions. Stable nitrogen and oxygen isotopes of nitrate ( $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\Delta^{17}\text{O}$ , and  $\delta^{18}\text{O}$ ) serve as powerful observational constraints for the understanding of atmospheric nitrate sources and/or chemical processing. Here, we quantified nitrogen and oxygen isotopes in nitrate from a unique 2005-2015 aerosol record in the northeastern US to constrain precursor NO<sub>x</sub> sources and chemistry changes in response to emission regulations. We observed a significant decreasing trend in  $\delta^{15}\text{N}(\text{pNO}_3)$  from 2005 to 2015 ( $-0.5 \text{‰ yr}^{-1}$ ), which reflects a shift in NO<sub>x</sub> emission sources driven by emission regulations. Specifically, there is an imprint in the  $\delta^{15}\text{N}(\text{pNO}_3)$  record of the gradual phase-out of coal for electricity generation and a rise in the use of natural gas. As total NO<sub>x</sub> emissions decreased (by 53 % in the northeastern US over the decade), the shift in oxidation chemistry led to a shorter NO<sub>x</sub> lifetime (from 54h to 44h (-19%)) and enhanced aerosol formation rate in urban areas since 2005. This explains the continued elevated wintertime nitrate that plagues air quality in the eastern US despite significant NO<sub>x</sub> decreases. These isotopic constraints using nitrogen and oxygen isotopes greatly enhance our ability to test and predict the effectiveness of emissions reductions on the shift of NO<sub>x</sub> emission sources and oxidation chemistry.

**Keywords:** Atmospheric nitrate, Nitrogen oxides, Nitrogen Isotope, Oxygen Isotope, Emission Regulations