

## 논문

# 화물선박의 오염 기여도 산정을 위한 BFM 적용 시 배출량 삭감량에 따른 불확도 분석

## A Study of Uncertainty on BFM Method with Variations in Reduction of Emissions to Estimate Source Contributions of Cargo Ships

이진숙\*, 이충대, 권문주

인천광역시보건환경연구원 대기환경연구부

Jin Sook Lee\*, Choong Dae Lee, Mun Ju Kwon

Atmospheric Environment Research Division, Incheon Metropolitan City Institutes  
of Health and Environment, Incheon, Republic of Korea

접수일 2020년 8월 4일  
수정일 2020년 9월 29일  
채택일 2020년 11월 2일

Received 4 August 2020  
Revised 29 September 2020  
Accepted 2 November 2020

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)32-440-5587  
E-mail : july8099@korea.kr

**Abstract** In this study, the characteristic of BFM was studied wherein nonlinearity was shown in the relation between ship emissions and  $PM_{2.5}$  concentrations. The study was varied the cargo ship emissions reduction from 100%, 70%, and 50%, to 30% to review uncertainties and estimate the range of contributions for the simulated results and sensitivity analysis was conducted for each component. As a result, nonlinear characteristics were found for change in the ship emissions and, accordingly, for change in the  $PM_{2.5}$  levels. However the coefficient of quadratic terms was small enough and there was not a significant curved pattern change for the ship sources. The components, excluding those that include EC and mineral particles, are chemical species that have a range of chemical reactions in the atmosphere to lead the secondary formation of  $PM_{2.5}$ . Therefore, although the pollutant emissions from ships decreased the same rate, the simulated levels showed a nonlinear tendency. For the episode period, the contribution of ships was analyzed for each of the conditions for ship emissions sensitivity experiments. As a result, for Sinheung, which is located closest to the port, the contributions ranged from 4.3 to 4.8  $\mu g/m^3$ ; following this, the range was from 2.8 to 3.1  $\mu g/m^3$  for Songnim, and from 0.9 to 1.2  $\mu g/m^3$  for Bupyeong.

**Key words:**  $PM_{2.5}$ , Cargo ship emissions, Chemical transport model, WRF, SMOKE, CMAQ, BFM, Sensitivity analysis

## 1. 서론

그동안 대기확산모델을 이용한 오염물질 확산 패턴 모사와 함께 대기 중 오존 및 미세먼지 관련 전구물질의 배출, 화학 반응, 이송 및 제거 과정을 모의할 수 있는 3차원 광화학 모델인 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality)을 활용하여, 오염 발생원별 기여도 산정, 지역별 오염 기여도 산정 및 전환율 평가, 대기오염물질 저감 대책의 대기개선 효과 분석, 대기질 예보를 위한 모델 개선 연구 및 개선효과 분

석 등 국·내외 다양한 연구가 많았다.

동북아시아의 대기오염물질 기여도와 관련하여 3차원 광화학 모델을 이용한 국외 선행연구로는 Lin *et al.* (2008)이 CMAQ 모델과 BFM (Brute-Force Method)을 이용하여 2001년 동아시아 내 지역별 황산화물의 침적에 대한 기여도를 산정하였다. 또한 Kajino *et al.* (2011)은 RAQM (Regional Air Quality Model)에 Zero-out (Zero-out Contribution) BFM을 이용하여 2002년 한국, 중국, 일본을 대상으로 황 침적에 대한 기여도를 분석하였다.

국내 선행연구로는 Bae *et al.* (2017a)이 다양한 배출량 목록을 바탕으로 수행한 대기질 예보결과 평가와 함께 PM<sub>10</sub> 구성 성분별 모사농도 분석을 통해 배출량 목록 선택에 따른 PM<sub>10</sub> 질량농도 및 성분농도의 모사 정합도를 분석하였다. 또한, BFM을 이용하여 배출량 목록 선택에 따라 달라질 수 있는 수도권 PM<sub>10</sub> 농도에 대한 국·내외 배출량의 기여도 범위를 산정하였다. Nam *et al.* (2019)는 2017년 1월 우리나라 수도권 지역에서 발생한 PM<sub>2.5</sub> 고농도 사례일을 대상으로 BFM 기법의 특성을 분석함과 동시에 BFM 적용 시 배출량 저감량에 따른 국·내외 기여도 결과의 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과, 배출량과 PM<sub>2.5</sub>의 비선형성으로 인해 배출량 민감도에 따른 국·내외 기여도는 정량적으로 상이한 값을 나타내, 고정된 비율의 배출량 변동에 의한 배출량 민감도 및 기여도 분석 결과는 해석의 불확도가 발생됨을 확인하였다. 특히, Zero-out 조건에 따른 배출량 민감도 분석 결과는 부분적인 배출량 변동조건에 따른 기여도 분석에 따른 결과와 상당한 차이가 나타날 수 있다는 것을 확인하였다.

이렇게 BFM 기여도 산정 기법을 이용하여 국·내외 오염 기여도 범위를 추정하고 배출량 민감도 분석 등을 수행하였지만, 국·내외 배출량보다 배출량 크기가 작은 지역 내 단일 오염원에 대해 3차원 광화학 모델을 적용하여 기여도를 추정하고, 기여도 산정 방법의 민감도를 분석한 연구는 미미하였다.

미세먼지는 굴뚝 등 발생원에서 직접 배출되는 경우(1차 생성)와 발생원에서는 가스 상태로 나와 대기 중 다른 물질과 화학반응을 일으켜 미세먼지가 되는 경우(2차 생성)로 나누어질 수 있다. 2차 생성이 중요한 이유는 수도권만 하더라도 화학반응에 의한 2차 생성 비중이 전체 PM<sub>2.5</sub> 발생량의 약 2/3를 차지할 만큼 매우 높기 때문이다. 대기오염물질인 휘발성 유기 화합물질(VOCs), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 황산화물(SO<sub>x</sub>) 등이 미세먼지로 전환되는데, VOCs는 반응성이 강한 물질(OH, O<sub>3</sub> 등)과 화학반응을 일으켜 2차 유기 입자(Secondary organic particles)가 된다. 또한 다양

한 연소과정에서 발생한 질소산화물(NO, NO<sub>2</sub>)은 대기 중 오존(O<sub>3</sub>) 등과 반응해 산성 물질인 질산(HNO<sub>3</sub>)을 생성하고, 이는 대기 중 알칼리성 물질인 암모니아(NH<sub>3</sub>)와 반응하여 질산암모늄(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>)의 2차 생성 미세먼지가 된다. 또한 아황산가스(SO<sub>2</sub>)는 수증기 등과 반응하여 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)이 되고, 다시 NH<sub>3</sub> 등과 반응하여 황산암모늄((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)의 2차 생성 미세먼지가 된다.

위와 같이 미세먼지의 경우 2차 생성 비중이 크고 이에 따라 배출량-농도 관계에서 비선형성이 나타남이 예상되지만, 대기질 모사를 이용한 각 지역별, 오염원별 기여도를 산정하는 데 있어 연구자마다 선호하는 삭감비율이 다르기 때문에 ZOC 산정을 위한 BFM 적용 시 배출량 삭감비율에 따라 최종 산출된 ZOC에서 차이가 나타날 수 있다. 따라서 배출원-수용지 관계를 분석하는 방법인 BFM에 대해, 배출량 삭감비율에 따른 PM<sub>2.5</sub> 성분별 기여도, 민감도 차이를 정량적으로 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 수도권 내에서 선박에 의한 오염물질 배출이 집중되고 있는 우리나라 대표적 항만 도시인 인천지역의 대기 중 인체 유해성이 높은 PM<sub>2.5</sub>에 대해, 선박의 대기오염물질이 인근지역에 미치는 오염 기여도를 산정하는 과정에 관한 내용이다. 즉 배출량-농도 관계에서 비선형성이 나타나는 BFM의 특성을 파악하고 이에 대한 불확도를 고찰하기 위해, 배출량 삭감량을 각각 100%, 70%, 50%, 30%로 변화를 주어 지점별 민감도 분석을 수행하고, 최종적으로 모사결과와 기여도 범위를 추정하여 오염도 영향을 파악하고자 하였다. 향후 선박뿐만 아니라 국내 지역 단일 오염원의 오염도를 연구하는 데 있어서 본 연구 결과는 중요한 기초자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 대상지역 및 기간

본 연구는 선박에서 배출되는 오염물질 중 PM<sub>2.5</sub>

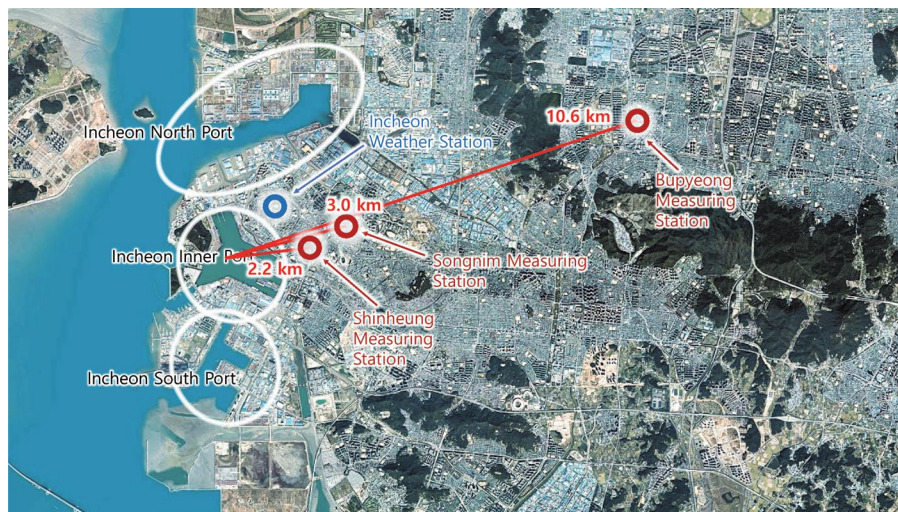


Fig. 1. Overview of Incheon port area in this study.

에 의한 영향을 분석하는 방법을 검토하기 위하여 수도권 내 위치하고 있는 인천항을 대상으로 선정하였다. 그림 1에 나타난 바와 같이 인천항의 풍하측 거리에 따라 선박에 의한 대기질 영향을 분석하기 위하여, 가장 인접한 신흥, 송림 지점과 인천내항으로부터 약 10.6 km 이격되어 있는 부평을 선정하였다. 선박에 의한  $PM_{2.5}$  기여도 산정을 위한 사례일은 2018년 3월 25일부터 31일까지로, 그림 2에 이 기간 동안의 종관기상 특성을 나타내었다. 늦겨울부터 초여름까지 우리나라에서 일반적으로 나타나는 기상 패턴인 이동성 고기압의 발달과 이동이 관찰된다. 즉 한반도가 동진하는 고기압의 영향권에 놓임에 따라 안정된 대기조건 하에서 오염물질이 정체되고, 재순환에 의해 국내에서 생성된 오염물질의 영향이 커지면서 대기 중 미세먼지 축적이 나타나기 좋은 기상조건이 형성되었다. 사례일 기간 모두 박무(mist)와 연무(haze)가 관측되었는데, 박무와 연무는 시정이 1~10 km 일 때로, 박무는 흡습성 인자가 대기 중에 떠 있는 현상이며, 연무는 미세한 먼지가 공기 중에 부유하여 뿌옇게 보이는 현상을 말한다. 즉 연무가 발생하였다는 것은 그 지역에 고농도 미세먼지가 존재한다는 의미이다. 인천지역  $PM_{2.5}$  일평균 농도는 25일부터 7일 간

각각 88, 52, 56, 36, 37, 34, 28  $\mu g/m^3$ 로 나타나, 고농도(일평균 35  $\mu g/m^3$ )로 발생하였고, 이 기간에 대해 선박에 의한 오염도 영향 분석을 수행하였다.

## 2.2 CMAQ을 이용한 대기 모델링

### 2.2.1 CASE 비교

배출량 민감도 분석 방법인 BFM을 이용한 오염원별  $PM_{2.5}$  기여도 산정 시 존재하는 불확도의 특성을 고찰하기 위해, 화물선박 배출량을 각각 100%, 70%, 50%, 30% 삭감하였을 때 모사된 인천지역의  $PM_{2.5}$  농도를 기본 모사결과와 비교하였으며, 표 1과 같이 CASE를 구분하여 대기 모델링을 수행하였다. 2018년도 해운항만물류정보 시스템(Port Management Information System, PORT-MIS) 입출항 자료를 활용하여 인천지역 화물선박 배출량과 시간해상도를 적용하였으며, PORT-MIS 선박 배출량 산정 방법은 동반논문 Lee *et al.* (2020)에 자세히 기술되어 있다. 이때 기존의 2015년 CAPSS (Clean Air Policy Support System)에서 화물선박 부분만 변경하여 모델링을 수행하였다. 또한 해발 35 m~70 m에 해당하는 Layer 2에서 배출되도록 모델링에 적용하였으며, 이는 배출

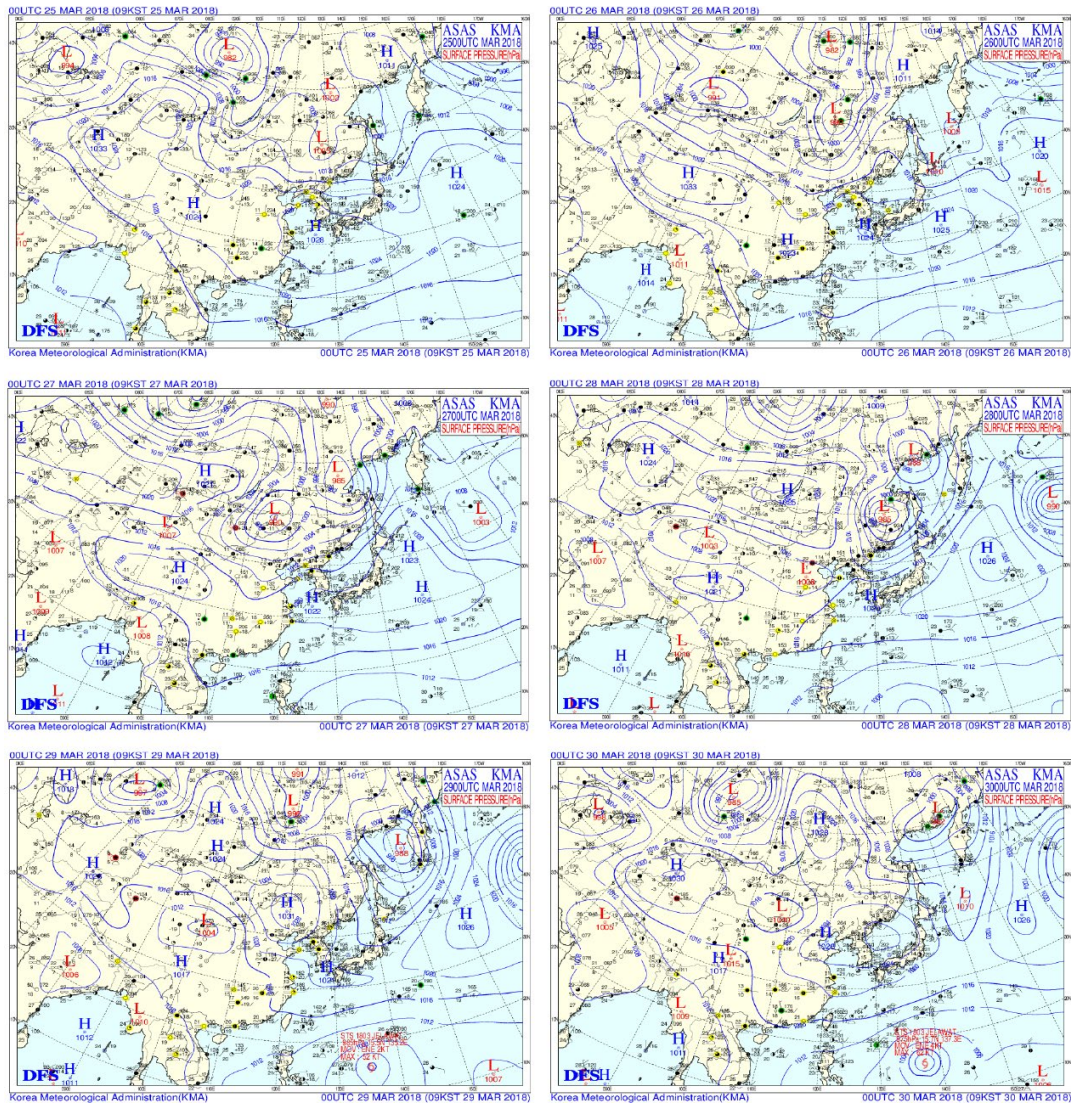


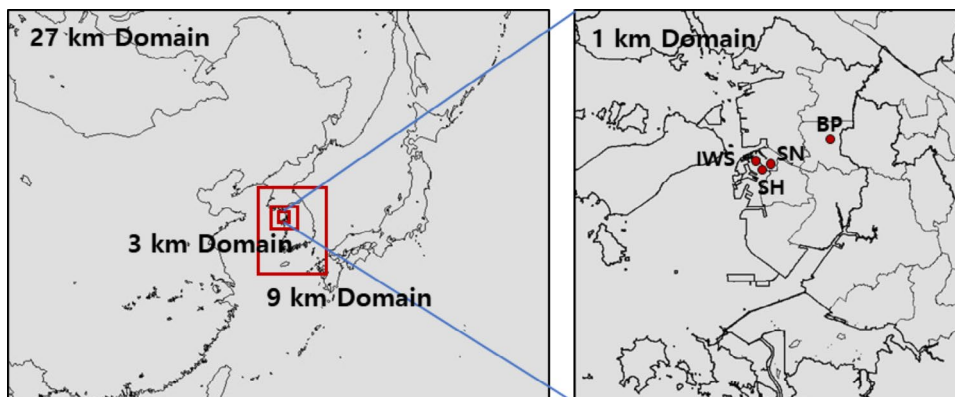
Fig. 2. Surface weather chart at 09:00 KST over a span of 6 days (25~30 March, 2018).

고도를 상승시켜 지표면에 집중적으로 모사되었던 오염물질을 좀 더 현실적으로 고도별로 분산시키기 위함이다.

### 2.2.2 모델링 조건

본 연구에서는 중규모 기상모델인 WRF (Weather Research and Forecast, Skamarock *et al.*, 2008) ver.

3.6.1과 중규모 대기확산 모델인 CMAQ (Community Multiscale Air Quality model, Byun and Ching, 1999) ver. 4.7.1을 활용하였다. 모델링 수행을 위해 사용된 기상 입력자료는 NCEP-FNL (National Centers for Environmental Prediction Final)  $1^\circ \times 1^\circ$  재분석 자료를 초기장으로 사용하였다. CMAQ 모델의 농도장에 대한 초기 및 경계조건에 대해 동아시아 영역(D1)은



**Fig. 3.** CMAQ modeling domains. Dots in the 1 km resolved domain represent air quality monitoring stations (AQMS) and automated synoptic observing system (ASOS) used to evaluate model performance (SH: Sinheung, SN: Songnim, BP: Bupyeong, IWS: Incheon weather station).

**Table 1.** The summary of emissions by cases.

| CASE   | Foreign emissions | Domestic emissions                                                  |            |
|--------|-------------------|---------------------------------------------------------------------|------------|
|        |                   | Cargo ships                                                         | The others |
| CASE 1 | MIX 2010          | Emissions for cargo ships using PORT-MIS                            | CAPSS 2015 |
| CASE 2 | MIX 2010          | Emissions for cargo ships using PORT-MIS reduced to 100% (ZOC 100%) | CAPSS 2015 |
| CASE 3 | MIX 2010          | Emissions for cargo ships using PORT-MIS reduced to 70% (ZOC 70%)   | CAPSS 2015 |
| CASE 4 | MIX 2010          | Emissions for cargo ships using PORT-MIS reduced to 50% (ZOC 50%)   | CAPSS 2015 |
| CASE 5 | MIX 2010          | Emissions for cargo ships using PORT-MIS reduced to 30% (ZOC 30%)   | CAPSS 2015 |

Profile 자료 (Stockwell *et al.*, 1990)를 사용하였고, D2~D4 영역은 상위 Domain의 모델 결과를 ICON/BCON 모듈에 입력하였다. 배출량 계산은 SMOKE (Sparse Matric Operator Kernel Emissions, Benjey *et al.*, 2001) ver. 2.1을 이용하여 배출량의 화학종별, 시간별, 공간별 할당을 수행하였다. 대기질 모델 수행을 위한 자연배출량은 MEGAN 2 (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2, Guenther *et al.*, 2006)를 사용하였고, 인위적 배출량의 경우 중국 등 동아시아 영역의 국외 배출량은 MIX 2010 (Li *et al.*, 2017) 배출목록, 국내 배출량은 CAPSS

2015 자료 (Lee *et al.*, 2019; NIER, 2018)를 이용하였다.

대기질 모델에 의한 모사영역은 그림 3과 같이 27 km 해상도의 동아시아 영역을 Domain 1로 구성하였고, 9 km 수평 해상도의 한반도 영역과 3 km 수평 해상도의 수도권영역으로 계산하여 최종적으로 1 km 수평해상도의 인천영역에 대해 47 km × 47 km의 수평영역으로 계산하였다. 수직해상도는 15개의 Layer로 구성하였다. 기상 및 대기질 모델에 사용된 주요 물리·화학 옵션은 동반논문 Lee *et al.* (2020)에 자세히 기술되어 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 PORT-MIS를 이용한 화물선박 배출량

##### 재산정 결과

동반논문 Lee *et al.* (2020)의 경우, PORT-MIS 화물선박 배출량을 산정하는 과정에서 입출항 목적 중 선박수리에 대한 정보가 수집되지 않아 정박 시 정상운영과 수리 기간의 구분을 7일 기준으로 가정하여 배출량 산정 결과의 불확도가 존재하였으나, 추후 선박수리에 대한 자료가 확보되어 본 연구에서는 이를 적용하고 배출량을 재산정하였다. 선박의 대부분을 차지하는 화물선박에 대해 2018년 PORT-MIS 배출량을 2015년 CAPSS 배출량과 비교한 결과를 표 2에 나타내었다. 또한 PORT-MIS 자료를 이용하여 내항선과 외항선으로 구분하여 PM<sub>2.5</sub> 배출량을 재산정한 결과, 내항선은 692 ton/yr, 외항선은 359 ton/yr, 총 1,052 ton/yr (CAPSS 대비 5.48배 증가)로 산정되었다.

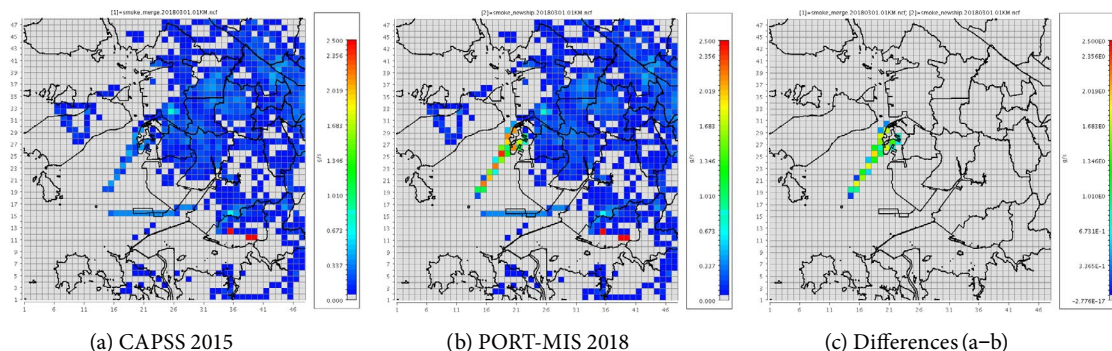
CAPSS 2015 배출량과 본 연구에서 재산정한 배출량, 그리고 그 차이에 대한 공간적 분포도를 각각 그

림 4(a), 4(b), 4(c)에 나타내었다. 그림 4(c)에서 나타낸 바와 같이 본 연구에서 재산정된 배출량은 선박의 입출항시 배출량과 정박시 배출량에 대해서 증가 적용된 것을 확인할 수 있다. 배출량의 차이가 나타나는 원인으로는 배출량의 기준년도가 2015년도를 기준으로 산정한 결과와 2018년을 기준으로 한 것으로 시간적 차이가 있을 수 있으며, 가장 큰 이유는 구체적인 배출량 산정방법이 다르기 때문으로 추정할 수 있다. 즉 산정방법의 첫 번째 차이는 선박의 정박기간에 대해 실제 입출항 정보를 적용한 것이다. “국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람 (III) (NIER, 2013)”에 따르면 CAPSS에서 선박배출량의 정박시간은 2001년 1월 및 12월에 울산항에 입항한 560대를 표본으로 조사된 0.79일/회를 적용하였다. 반면 본 연구에서는 실제 개별 선박마다 정박일수를 각각 산정하여 일별로 적용하였고, 평균 정박시간을 분석한 결과 외항선의 경우 평균 1.24일, 내항선의 경우 평균 1.64일로 나타나 CAPSS 산정방법에서 사용된 계수와의 차이를 보였으며 이로 인해 연료사용량에 따른

**Table 2.** Difference of emissions from cargo ship sources between 2015 CAPSS and 2018 PORT-MIS.

(unit: ton)

|                                      | Emissions using<br>2015 CAPSS (a) | Emissions using<br>2018 PORT-MIS (b) | Ratio (b/a) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------|
| NO <sub>x</sub>                      | 3,698.815                         | 14,847.098                           | 4.01        |
| SO <sub>x</sub>                      | 1,582.672                         | 13,652.504                           | 8.63        |
| VOC                                  | 128.078                           | 409.575                              | 3.20        |
| PM <sub>10</sub>                     | 211.497                           | 1,143.396                            | 5.41        |
| PM <sub>2.5</sub> (primary emission) | 191.789                           | 1,051.925                            | 5.48        |



**Fig. 4.** PM<sub>2.5</sub> emissions using (a) CAPSS, (b) PORT-MIS and (c) differences.

배출량의 차이가 나타날 수 있다. 또한 산정방법의 두 번째 차이로는 CAPSS의 경우 선박의 톤수를 구간별 평균값으로 선정하여 연료사용량 계산에 적용한 반면, 본 연구에서는 개별 선박의 실제 톤수에 대해 각각의 연료사용량을 계산한 것이다. 즉 CAPSS 산정 방법은 구간별 평균값을 적용함에 있어 이에 따른 오차가 포함되는 것으로 추정할 수 있다. 그러나 배출량 재산정 방법이 논리적으로 타당하게 접근하였음에도 불구하고 연료사용량을 계산하기 위하여 활용한 참고자료의 연료사용량 계산식에 여전히 가정된 계수들이 포함되어 있으므로, 인천지역 화물선박에 의해 사용된 실제 연료량과의 비교를 통해 현실적인 오차를 줄여야 할 필요성이 있다(Lee *et al.*, 2020).

### 3.2 기상모델 및 대기질 모델 수행평가

기상모델의 정확도를 평가하기 위하여 온도, 풍속, 상대습도의 모델링 결과를 인천기상대(ASOS)의 지상 측정자료와 비교한 결과를 표 3에 나타내었다. 또한 사례일인 2018년 3월 25일부터 31일까지의 기간에 대해, 화물선박 배출량 재산정에 따른 CASE 1의 대기 모델링 결과는 표 4에 나타내었다. 통계검증에는 모델값과 관측값의 1시간 자료를 이용하여 MBIAS (Mean Bias), NMB (Normalized Mean Bias), IOA (Index of Agreement), RMSE (Root Mean Square

Error)를 사용하였다. 기본모사(CASE 1)는 전반적으로 기상 모사( $IOA \geq 0.75$ ) 및 대기질 모사( $IOA \geq 0.60$ ) 정합도 평가에서 재현성이 확보되어 배출량 변화에 따른 농도 변화 및 민감도 분석에 있어 타당한 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 지점별 대기질 모델 분석 결과는 Lee *et al.* (2020)에 자세히 기술되어 있다.

### 3.3 배출량 삭감량에 따른 $PM_{2.5}$ 모사 농도 특성

신흥, 송림, 부평의 선박 배출량 변동에 따른  $PM_{2.5}$  농도 변화는 표 5와 그림 5에 나타내었다. 일반적으로 1차 민감도 계수는 배출량 변동에 따라 얼마나 빠르게  $PM_{2.5}$  농도가 감소 또는 증가하는지를 선형적인 기울기로 보여준다. 1차 민감도 계수와 함께 2차 민감도 계수를 함께 고려하면 배출량 변동에 따른  $PM_{2.5}$ 의 곡선적인 변화패턴을 나타낼 수 있으며, 비선형성을 설명하는 2차 민감도 계수의 부호(+, -)와 크기에 따라 동일한 배출량 변동에 따른  $PM_{2.5}$ 의 변화폭이 1차 민감도만을 고려한 선형적인 변화에 비해 커지는지, 또는 작아지는지를 결정하게 된다. 1, 2차 민감도 계수를 산정할 때 BFM의 경우 기본 배출량을 중심으로 일정 비율(예: 10%)만큼 가감된 배출량과 모사농도를 이용하여 중앙 차분법을 활용하는 식으로 산정할 수 있으며, HDDM의 경우 별도의 배

**Table 3.** WRF performance statistics in CASE 1.

| Variables        | Obs. mean | Mod. mean | MBIAS <sup>1)</sup> | NMB <sup>2)</sup><br>[%] | IOA <sup>3)</sup> | RMSE <sup>4)</sup> |
|------------------|-----------|-----------|---------------------|--------------------------|-------------------|--------------------|
| Temperature [°C] | 10.6      | 9.0       | -1.59               | -14.95                   | 0.86              | 2.55               |
| Wind speed [m/s] | 2.4       | 2.4       | 0.08                | 3.43                     | 0.78              | 1.11               |
| Humidity [%]     | 78.1      | 67.9      | -4.37               | -11.43                   | 0.75              | 18.15              |

<sup>1)</sup>MBIAS: Mean Bias, <sup>2)</sup>NMB: Normalized Mean Bias, <sup>3)</sup>IOA: Index of Agreement, <sup>4)</sup>RMSE: Root Mean Square Error

**Table 4.** CMAQ performance statistics for  $PM_{2.5}$  in CASE 1.

| Spot     | Obs. mean<br>[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] | Mod. mean<br>[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] | MBIAS<br>[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] | NMB<br>[%] | IOA  | RMSE<br>[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] |
|----------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|------------|------|--------------------------------------|
| Sinheung | 51.5                                      | 45.7                                      | -4.89                                 | -10.01     | 0.69 | 24.49                                |
| Songnim  | 49.1                                      | 50.6                                      | -0.15                                 | -0.32      | 0.63 | 24.99                                |
| Bupyeong | 41.1                                      | 53.4                                      | 9.15                                  | 22.27      | 0.64 | 24.44                                |

**Table 5.** Simulated concentrations and standard deviation of PM<sub>2.5</sub> due to variations in reduction of cargo ship emissions.  
(unit: µg/m<sup>3</sup>)

| Spot     | Case                    | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 | Case 1 |
|----------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | ZOC                     | 100    | 70     | 50     | 30     | Base   |
| Sinheung | PM <sub>2.5</sub> Conc. | 40.9   | 42.7   | 43.6   | 44.5   | 45.7   |
|          | S.D.                    | 20.2   | 20.1   | 19.9   | 19.8   | 19.7   |
| Songnim  | PM <sub>2.5</sub> Conc. | 47.5   | 48.6   | 49.2   | 49.8   | 50.6   |
|          | S.D.                    | 21.9   | 21.6   | 21.4   | 21.3   | 21.1   |
| Bupyeong | PM <sub>2.5</sub> Conc. | 52.1   | 52.6   | 52.9   | 53.1   | 53.4   |
|          | S.D.                    | 21.6   | 21.6   | 21.6   | 21.5   | 21.6   |

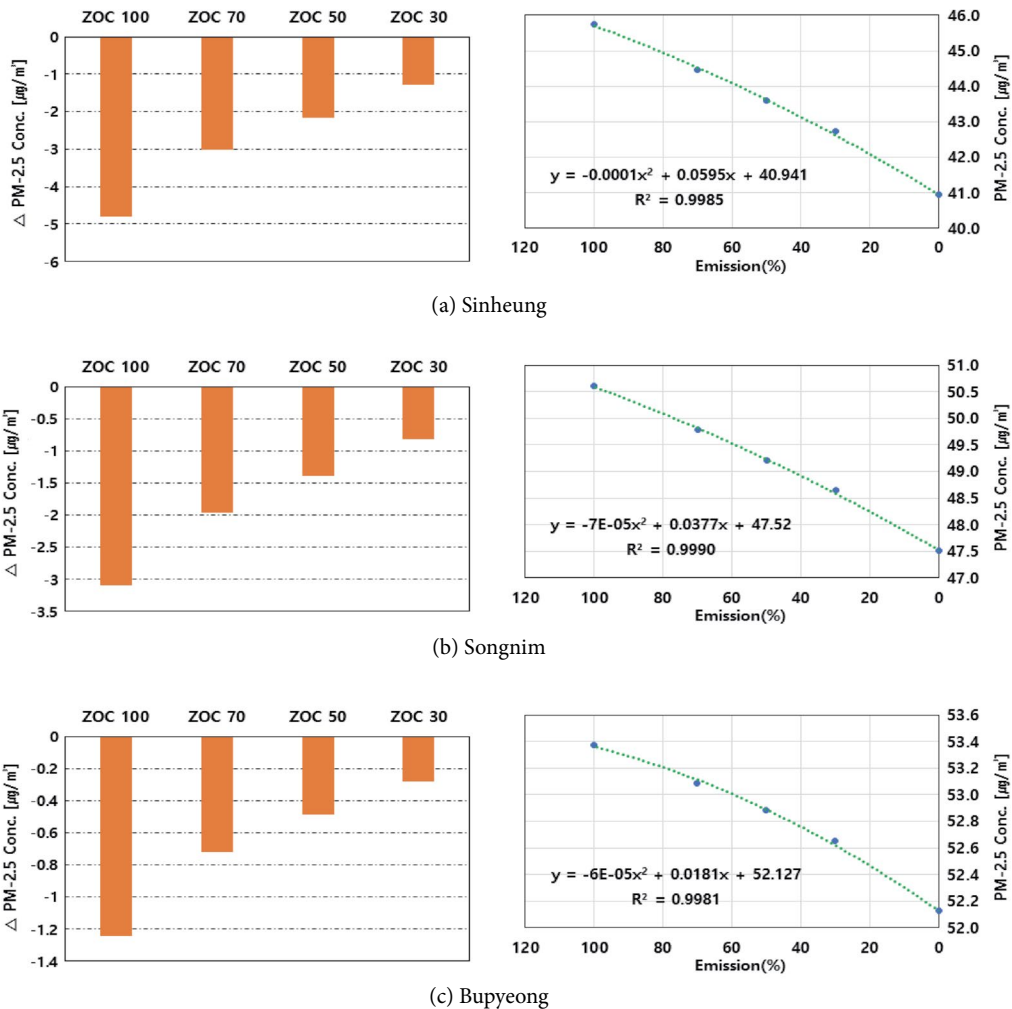
출량을 준비하지 않고 기본 배출조건에서 수치적으로 산정할 수 있다(Kim, 2011). 본 연구는 위와 같이 1, 2차 민감도 계수를 산정하는 방법과 차이가 있으며, 선박 배출량과 PM<sub>2.5</sub> 모사농도 간의 선형/비선형 관계를 지점별 선형회귀분석(Linear regression analysis)의 결정계수(Coefficient of determination, R<sup>2</sup>)로 비교하였다.

선박 오염원을 대상으로 한 본 연구에서 배출량과 모사농도 간 관계식의 2차 항의 계수가 충분히 작고 곡선적인 변화패턴이 크게 나타나지 않아, 2차 민감도에 의한 영향이 지배적으로 나타나지는 않았다. 이는 선박 배출량이 전체 배출량 대비 차지하는 비율이 작기 때문에 PM<sub>2.5</sub>의 생성에 기여하는 바가 작아서 전반적으로 비선형성이 두드러지게 나타나지 않은 것으로 판단된다. 하지만 배출량 변동과 이에 따른 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화의 비선형성 경향이 크지는 않지만 뚜렷하게 나타났으며, 이는 오염물질 배출량이 대기 중에서 화학반응하여 생성되는 2차 생성 PM<sub>2.5</sub>의 영향에 기인하는 것으로 보인다. 이는 지점별로 비교했을 때, 인천항에 가까운 신흥, 송림보다 일정거리 이상의 풍하 측에 위치한 부평에서 PM<sub>2.5</sub> 농도의 비선형성이 더 뚜렷하게 나타나는 것으로 확인할 수 있다. 즉 신흥, 송림은 1차 미세먼지와 같이 직접적인 배출의 영향이 크고, 부평은 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> 전환에 의한 2차 생성이 보다 더 중요하게 모사되어 2차 생성의 영향이 큼을 알 수 있다. 예를 들어 대기 중으로 배출된

SO<sub>x</sub>는 2차 생성 후 황산염으로 전환되는데, 이러한 과정에서 산화제, 촉매 농도 및 암모니아 배출량 등의 영향을 받아 전환율이 달라지므로 매우 복잡한 농도변화가 나타난다. 또한 대기 화학적 특성상 어떤 전구물질의 화학적 변환은 다른 물질의 전환율에도 영향을 미칠 수 있다. PM<sub>2.5</sub>의 주요 성분인 황산염과 질산염은 암모늄에 의해 중화됨은 일반적으로 잘 알려져 있어(Bae *et al.*, 2017b), 항목 간의 농도에 서로 영향을 미칠 수 있다.

또한 부평을 제외한 신흥, 송림에서 선박 배출량 100% 삭감 조건의 PM<sub>2.5</sub> 표준편차는 70%, 50%, 30% 삭감 조건보다 크게 나타나 ZOC 100%에서 PM<sub>2.5</sub> 모사 농도의 변동은 배출량의 일정량을 삭감한 조건보다 크게 나타남을 알 수 있으며, 이때 배출량 삭감량이 작을수록 표준편차는 감소하였다. 단, 선박 오염원의 영향이 작은 부평은 배출량 삭감량과 상관없이 동일한 편차를 보였다.

결론적으로 배출량 변동에 따라 비선형적인 농도변화를 보이는 2차 오염물질에 대한 BFM의 적용은 배출량 변동 크기에 따라 상이한 결과가 나타날 수 있다고 판단된다. 특히, 배출량을 100% 삭감하는 경우는 배출량의 일정 비율을 삭감하는 경우들과 비교했을 때 PM<sub>2.5</sub> 농도 차이가 크게 나타났다. 즉 BFM을 이용하여 오염원의 기여도를 산정하는 경우, 배출량 삭감량 변동에 따른 민감도 분석은 필수적으로 검토되어야 할 것으로 사료된다.



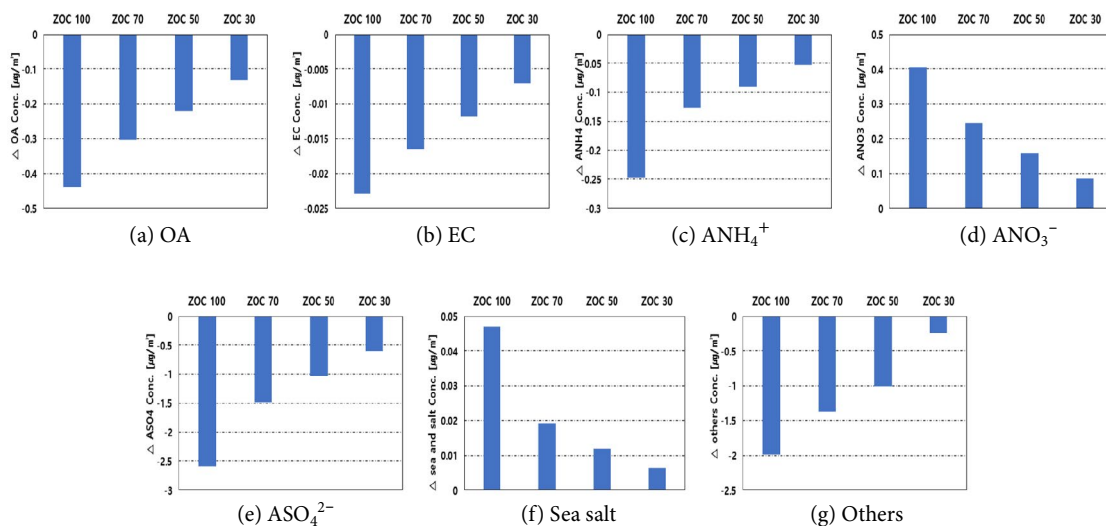
**Fig. 5.** (left) Difference in  $\text{PM}_{2.5}$  due to variations in reduction of cargo ship emissions and (right) nonlinear relationship between cargo ship emissions and  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations.

### 3.4 배출량 변동에 따른 $\text{PM}_{2.5}$ 주요 성분 변화

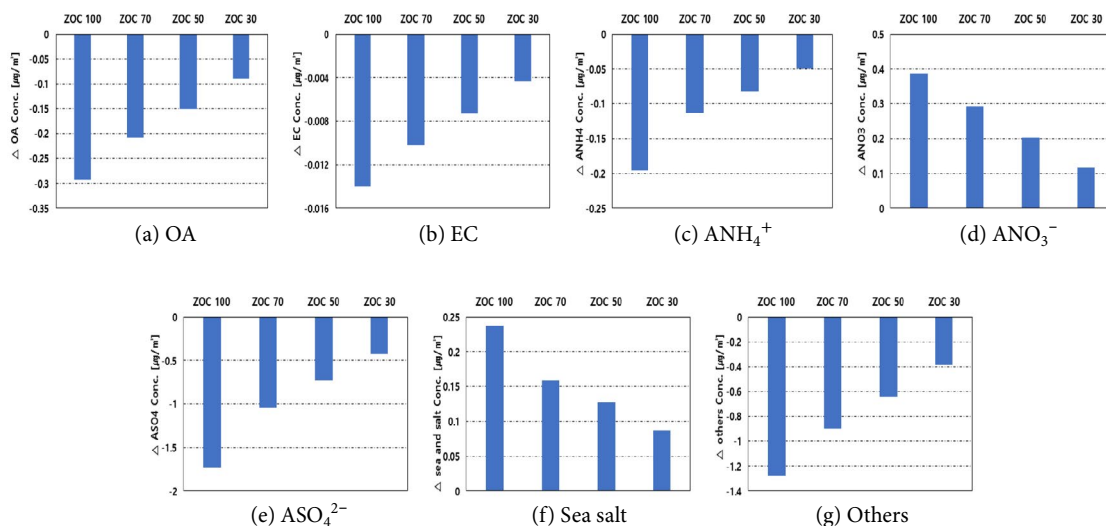
선박 배출량 변동에 따른  $\text{PM}_{2.5}$  모사농도의 비선형적인 농도 감소 특성을 성분별로 분석하기 위해 CASE별  $\text{PM}_{2.5}$ 의 주요 성분 농도 변화를 분석하였다.  $\text{PM}_{2.5}$ 의 주요 성분은 유기성 입자(Organic aerosol, OA), 원소탄소(Elemental carbon, EC), 암모늄(Ammonium,  $\text{ANH}_4^+$ ), 질산염(Nitrate,  $\text{ANO}_3^-$ ), 황산염(Sulfate,  $\text{ASO}_4^{2-}$ ), 해염입자(Sea salt), 광물성 입자 등을 포함하는 기타(Others), 총 7개의 화학종으로 분

류하여 분석하였다. 신흥, 송림, 부평에 대해 선박 배출량을 각각 100%, 70%, 50%, 30% 삭감하였을 때 모사된 성분별 농도 변화를 그림 6부터 그림 8까지 나타내었다.

신흥의 경우,  $\text{PM}_{2.5}$ 의 주요 성분 중 OA, EC, 기타 성분이 배출량과 농도 사이에서 뚜렷하게 양(+)의 선형성(Linearity)을 보였다. 성분별 선형회귀분석을 실시한 결과,  $R^2$  값은 각각 0.9998, 0.9993, 0.9997로 높게 나타났다.  $\text{ANH}_4^+$ ,  $\text{ASO}_4^{2-}$ 도 배출량 감소에 따



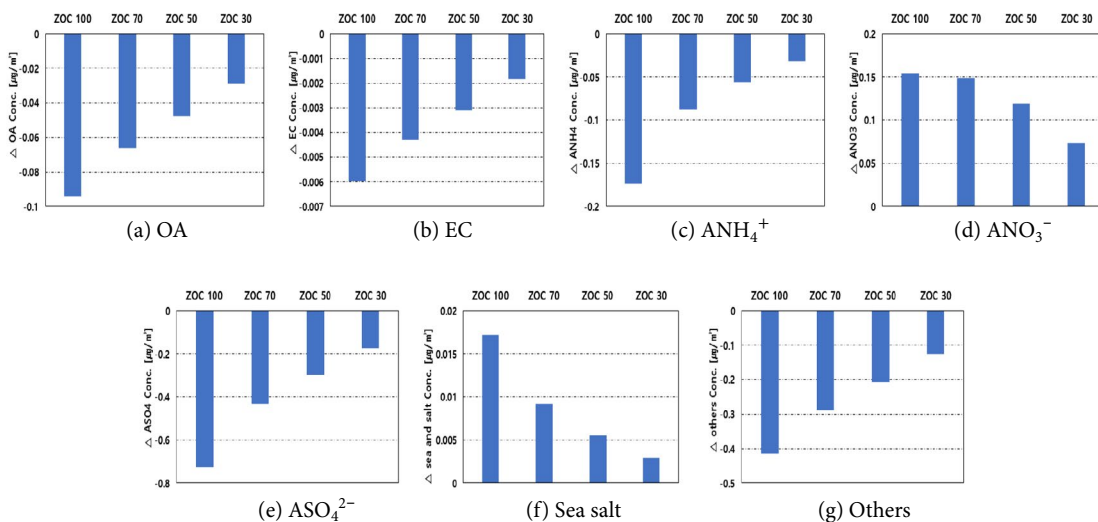
**Fig. 6.** Difference in concentration of (a) OA, (b) EC, (c) ANH<sub>4</sub><sup>+</sup>, (d) ANO<sub>3</sub><sup>-</sup>, (e) ASO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, (f) sea salt, (g) others due to variations in reduction of cargo ship emissions at Sinheung.



**Fig. 7.** Difference in concentration of (a) OA, (b) EC, (c) ANH<sub>4</sub><sup>+</sup>, (d) ANO<sub>3</sub><sup>-</sup>, (e) ASO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, (f) sea salt, (g) others due to variations in reduction of cargo ship emissions at Songnim.

라 농도 감소가 나타났지만 R<sup>2</sup> 값은 0.9544, 0.9771로 다소 감소하였다. ANO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 해염입자는 배출량이 감소함에 따라 모사농도가 증가하는 반대 경향을 보였다. 송림도 신흥과 유사하게 나타났는데, OA, EC, 기타 성분이 배출량과 농도 사이에서 선형성을 보여 R<sup>2</sup>

값은 각각 0.9998, 0.9990, 1.0000로 높게 나타났다. ANH<sub>4</sub><sup>+</sup>, ASO<sub>4</sub><sup>2-</sup>도 배출량 감소에 따라 농도 감소가 나타났지만 R<sup>2</sup> 값은 0.9811, 0.9860로 다소 감소하였다. ANO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 해염입자는 배출량이 감소함에 따라 모사농도가 증가하는 반대 경향을 보였다. 부평도 신흥,



**Fig. 8.** Difference in concentration of (a) OA, (b) EC, (c)  $\text{ANH}_4^+$ , (d)  $\text{ANO}_3^-$ , (e)  $\text{ASO}_4^{2-}$ , (f) sea salt, (g) others due to variations in reduction of cargo ship emissions at Bupyeong.

송림과 유사하게 나타났는데, OA, EC, 기타 성분이 배출량과 농도 사이에서 선형성을 보여  $R^2$  값은 각각 0.9999, 0.9993, 1.0000로 높게 나타났다.  $\text{ANH}_4^+$ ,  $\text{ASO}_4^{2-}$ 도 배출량 감소에 따라 농도 감소가 나타났지만  $R^2$  값은 0.9403, 0.9832로 감소하였다. 그러나 부평도  $\text{ANO}_3^-$ 와 해염입자는 배출량이 감소함에 따라 모사농도가 증가하는 반대 경향을 보였다.

분석 결과, 모든 지점에서  $\text{PM}_{2.5}$  구성성분 중  $\text{ASO}_4^{2-}$ 의 농도 변화가 주요하였으며,  $\text{SO}_2^-$  Sulfate 전환율이 크게 나타났다. 이는 선박 오염원은 다량의 황이 함유된 연료를 사용하므로, PORT-MIS 배출량 재산정 시 증가된 배출량의 영향으로 모사결과에서  $\text{ASO}_4^{2-}$ 의 과대평가가 고려될 수 있다. 이외에 OA와  $\text{ANH}_4^+$ 의 농도 변화도 상대적으로 크게 나타났다. 또한  $\text{ANO}_3^-$ 은 배출량이 감소함에 따라 모사농도가 증가하는 음 (-)의 민감도를 보였는데, 이는 모사에 이용된  $\text{NH}_3$  배출량이 과대모의된  $\text{ASO}_4^{2-}$ 을 중화시키기에는 충분하나  $\text{ANO}_3^-$ 을 중화시키기에는 부족하여 대기 중  $\text{NH}_3$ 가 기체상 질산( $\text{HNO}_3$ )과 반응하여 입자상 물질인  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 으로 전환되는 과정이 충분히 모사되지 못한 것으로 판단된다.

기타 성분은 본 연구에서 사용된 AERO5 모듈에서 종분류되지 않는 1차  $\text{PM}_{2.5}$  (A25)로 구분된다. EC와 광물성 입자를 포함하는 기타 성분을 제외한 나머지 성분들은 대기 중에서 다양한 화학반응을 통해 2차 생성되는 화학종이므로, 선박 배출량의 오염물질을 동일한 비율로 감소하였더라도 성분별 모사농도는 비선형성의 경향이 나타날 수 있다. 인접한 지역이라 하더라도 지역마다 주요 오염원이 다르고 오염물질 배출량의 차이가 있으며, 대기 중  $\text{PM}_{2.5}$  전구물질의 화학반응에 중요한 영향을 미치는 기상모사 결과도 다르기 때문에 배출량 변동에 따른 모사농도의 변화에 대한 민감도가 성분별로 다르게 나타났다고 판단된다. 예를 들면, 질산염의 경우 자동차 등의 오염원으로부터 영향을 크게 받고, 황산염의 경우 선박뿐만 아니라 석탄을 이용하는 대형 발전소 등 점오염원으로부터의 배출 비중이 높기 때문에 주변 지역의 다양한 오염원에 의해  $\text{NO}_x$ -to-nitrate 및  $\text{SO}_2$ -to-sulfate의 전환율이 다르게 모사될 수 있다. 또한 동일한 지역에 대해서도 오염물질 농도 및 그 혼합비 등의 변화로 인해 모사기간에 따라 다른 민감도를 보일 수 있다. 결국 오염물질 간의 상호작용으로 2차 생성

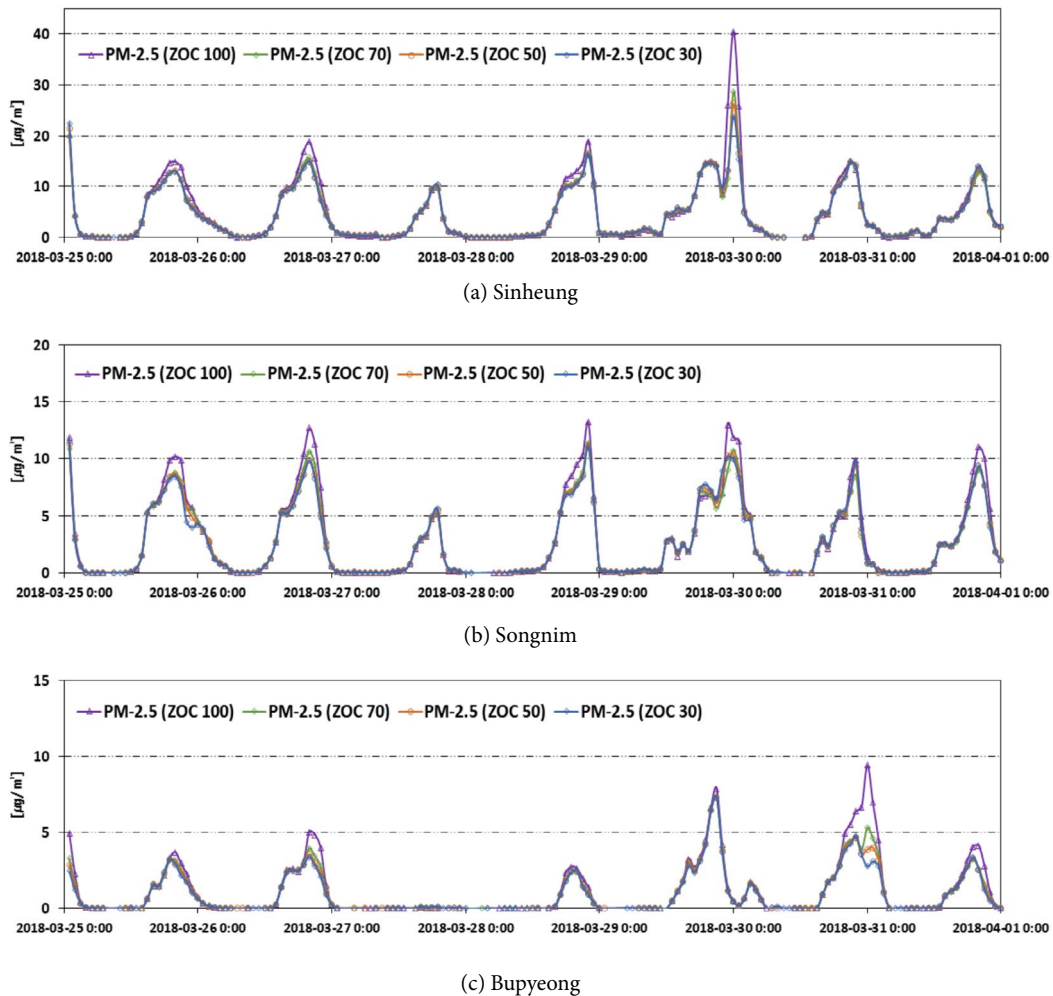


Fig. 9. Time series plots of contributions of cargo ships on  $PM_{2.5}$  depending on acceptance spot.

$PM_{2.5}$ 의 농도 변화가 지점마다 다르고, 성분별 선형/비선형 변화패턴도 다르게 나타났다고 판단된다.

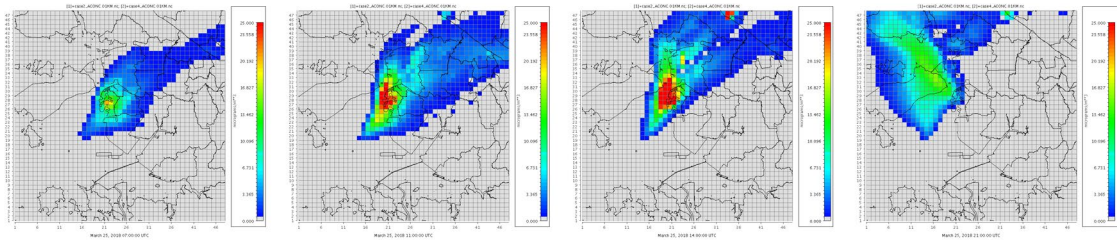
민감도 분석은 오염원의 기여도를 정확하게 추정하기 위해 필요할 뿐만 아니라, 오염물질의 배출량 변동에 따른 성분별 모사농도 변화를 관찰하여 분석 지역과 분석기간에 따라 다른 경향을 보이는  $PM_{2.5}$ 의 2차 생성 메커니즘을 파악하는 연구에서도 필요할 것으로 판단된다. 추후에 지역마다 주요 오염원의 특성이 고려된 성분별 민감도 분석도 필요할 것으로 사료된다.

Table 6. Contributions of cargo ships on  $PM_{2.5}$  due to variations in reduction of ship emissions (unit:  $\mu g/m^3$ )

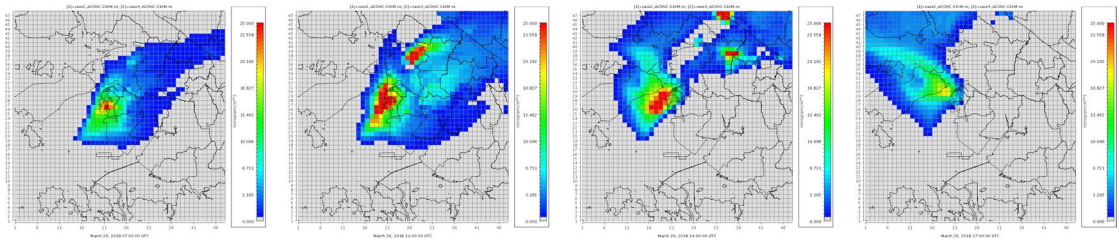
|         | Sinheung<br>(mean $\pm$ SD) | Songnim<br>(mean $\pm$ SD) | Bupyeong<br>(mean $\pm$ SD) |
|---------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| ZOC 100 | $4.8 \pm 6.3$               | $3.1 \pm 3.9$              | $1.2 \pm 2.1$               |
| ZOC 70  | $4.3 \pm 5.3$               | $2.8 \pm 3.4$              | $1.0 \pm 1.6$               |
| ZOC 50  | $4.3 \pm 5.2$               | $2.8 \pm 3.4$              | $1.0 \pm 1.5$               |
| ZOC 30  | $4.3 \pm 5.1$               | $2.8 \pm 3.4$              | $0.9 \pm 1.5$               |

### 3.5 배출량 변동에 따른 선박 기여도 변화

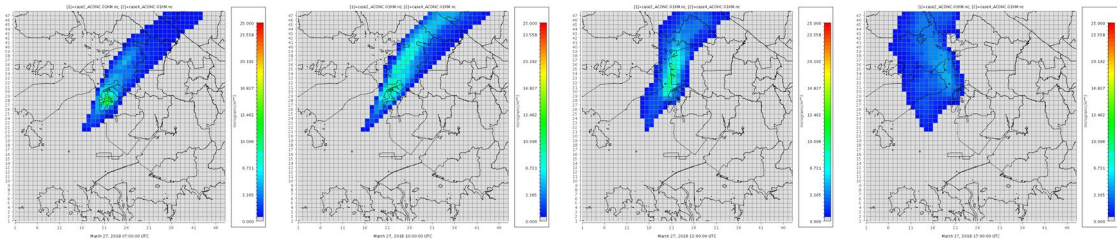
선박 배출량을 각각 100%, 70%, 50%, 30% 삭감하



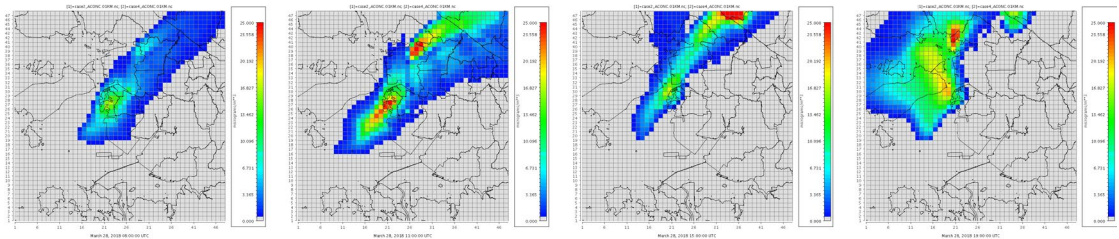
(a) 3. 25. 16:00, 21:00, 23:00 KST and 3. 26. 06:00 KST from left to right, in order.



(b) 3. 26. 16:00, 21:00, 23:00 KST and 3. 27. 02:00 KST from left to right, in order.



(c) 3. 27. 16:00, 19:00, 22:00 KST and 3. 28. 02:00 KST from left to right, in order.



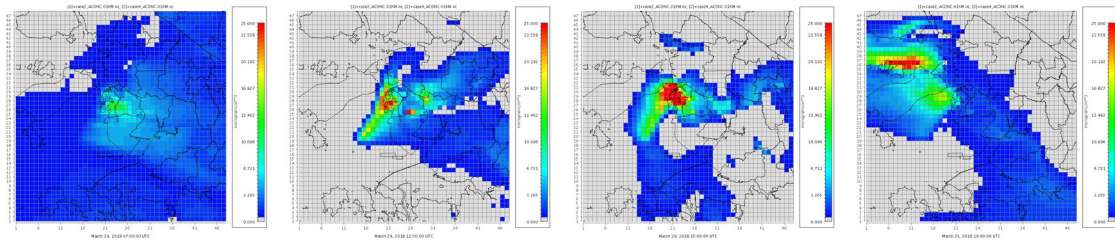
(d) 3. 28. 17:00, 20:00, 24:00 KST and 3. 29. 05:00 KST from left to right, in order.

**Fig. 10.** Spatial distributions of contributions of cargo ships on  $PM_{2.5}$  for a episode period

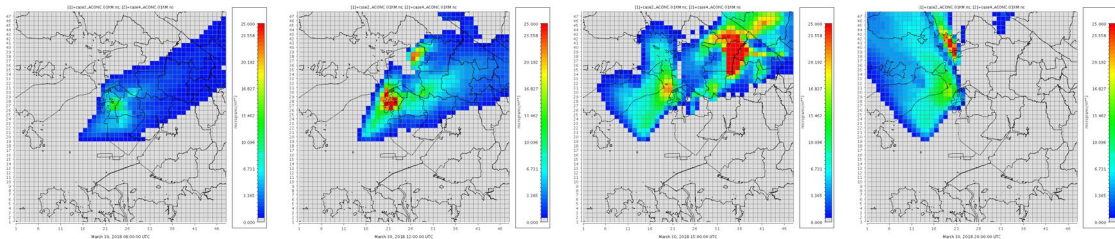
였을 때 모사된 인천지역의  $PM_{2.5}$  농도를 기본 모사 결과와 비교하여, 사례일 기간 동안의 선박 오염원의 시간별 기여도 범위를 산정하였다. 표 6은 모사된  $PM_{2.5}$  선박 기여도의 평균농도와 표준편차를 나타낸 것이며, ZOC 100%, 70%, 50%, 30% 배출량 삭감조건에서의  $PM_{2.5}$ 의 선박 기여도에 대한 시계열 그래프

는 그림 9에 나타내었다.

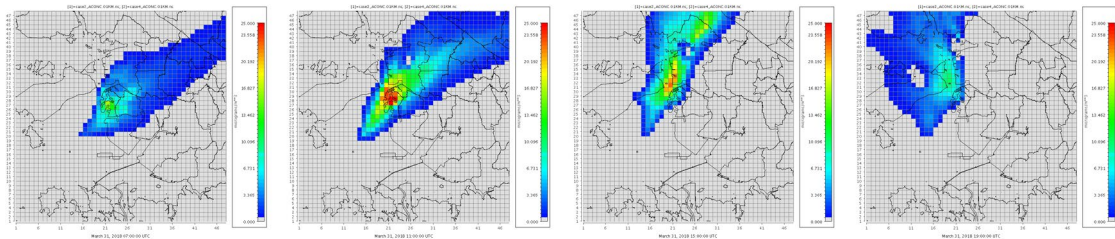
사례일 기간 동안 배출량 민감도 실험조건에 따른 인천지역  $PM_{2.5}$  농도의 선박 기여도 평균값 분석 결과, 항만으로부터 가장 가까운 신흥은  $4.3\sim 4.8\mu g/m^3$ , 송림은  $2.8\sim 3.1\mu g/m^3$ , 부평은  $0.9\sim 1.2\mu g/m^3$ 의 기여도 범위로 나타났다.



(e) 3. 29. 16:00, 21:00, 24:00 KST and 3. 30. 04:00 KST from left to right, in order.



(f) 3. 30. 16:00, 21:00, 24:00 KST and 3. 31. 05:00 KST from left to right, in order.



(g) 3. 31. 16:00, 19:00, 24:00 KST and 4. 1. 04:00 KST from left to right, in order.

Fig. 10. Continued.

그림 10은 사례일 기간 동안 하루 중 해륙풍 풍향 변화에 따라 화물선박 오염원에 의한 기여도가 인천 지역 내 미치는 영향이 어떻게 변화하는지를 분석하기 위해 일별 시간 변화에 따른  $PM_{2.5}$  기여 농도 공간 분포를 나타낸 것이다. 이는 화물선박 배출량 ZOC 100%의 BFM을 이용한 기여도를 대표적으로 나타내었다. 하루 중 화물선박의 기여 농도는 ① 인천지역 내 확산 ② 인천항 주변 고농도 축적 ③ 해풍에서 육풍으로의 풍향 변경 ④ 인천항 주변 고농도 해소로 나타났으며, 사례일 기간 동안 전반적으로 유사한 경향을 보였다. 이에 대해 그림 10에서 일별로 각각의 공간분포를 나타내고 오염도 영향을 시간대별로 분석하면, 하루 중 16:00~17:00 KST 시간대에 남서풍의

영향을 받아 인천항의 화물선박에 의한 오염물질이 인천 지역으로 넓게 확산되면서, 19:00~22:00 KST 시간대에 기상상태에 따라 오염물질의 정체 및 축적으로 인한 고농도가 나타났다. 또한 22:00~24:00 KST 시간대에 풍향이 점차 바뀌면서 오염물질이 인천 북부지역으로 이동되고, 다음날 새벽 02:00~06:00 KST 시간대에 해륙풍이 해풍에서 육풍으로 완전히 바뀌면서 인천항 인접지역의 고농도 오염물질 축적이 해소되고, 선박에 의한 오염물질이 해상으로 빠져 나갔다.

선박의 의한  $PM_{2.5}$ 의 영향을 파악하고 이에 대한 저감 대책을 마련할 때, 계절별 풍향 변화 또는 하루 중 풍향 변화에 따라 시간별 오염도 패턴이 어떻게

변화하는지에 대한 이해가 우선적으로 필요할 것으로 판단된다. 또한 해안도시는 해륙풍의 영향으로 바람의 방향이 바뀌면서 대기정체가 빈번하게 발생되므로, 기상조건에 대한 정확한 이해가 수반되어야 할 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

배출량-농도 관계에서 비선형성이 나타나는 경우 ZOC (Zero-out contribution) 산정을 위한 BFM 적용 시, 배출량 삭감비율에 따라 최종 산출된 ZOC가 차이를 보일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수도권에서 선박에 의한 오염물질 배출이 집중되고 있는 우리나라 대표적 항만 도시인 인천지역을 대상으로, BFM의 특성을 파악하고 이에 대한 불확도를 고찰하기 위해 선박 배출량 삭감량을 각각 100%, 70%, 50%, 30%로 변화를 주어 모델에 적용하고, 성분별 민감도 분석을 수행하여 기여도 범위를 추정하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 사례일 기간에 대해 선박 배출량을 각각 100%, 70%, 50%, 30% 삭감하였을 때 모사된 인천지역의  $PM_{2.5}$  농도를 기본 모사결과와 비교한 결과, 배출량 변동과 이에 따른  $PM_{2.5}$  농도 변화는 비선형적인 특성을 보였다. 단, 본 연구에서 선박 오염원의 경우, 배출량과 모사농도 간 관계식의 2차 항의 계수가 충분히 작고 곡선적인 변화패턴이 크게 나타나지 않아, 2차 민감도에 의한 영향이 지배적으로 나타나지는 않았다. 하지만 BFM의 적용은 배출량 변동 크기에 따라 상이한 결과를 나타낼 수 있는 제한점이 있으므로, 오염원의 기여도 산정 시 배출량 삭감량 변동에 따른 민감도 분석은 필수적으로 검토되어야 할 것으로 판단된다.

(2) 선박 배출량 변동에 따른  $PM_{2.5}$  모사농도의 비선형적인 농도 감소 특성을 성분별로 분석하기 위해  $PM_{2.5}$ 의 주요 성분 농도 변화를 분석한 결과, EC와 광물성 입자를 포함하는 기타 성분을 제외한 나머지

성분들은 대기 중에서 다양한 화학반응을 통해 2차 생성되는 화학종이므로, 선박 배출량의 오염물질을 동일한 비율로 감소하였더라도 모사농도는 비선형성의 경향이 나타났다. 지역마다 주요 오염원이 다르고 오염물질 배출량의 차이가 있으며 대기 중 화학반응에 중요한 영향을 미치는 기상모사 결과도 다르기 때문에, 배출량 변동에 따른 모사농도의 변화에 대한 민감도가 지점에 따라 성분별로 다르게 나타날 수 있다고 판단된다.

(3) 배출량 민감도 실험조건에 따른 선박 기여도 분석 결과, 인천항과의 이격거리와는 상관없이 3개 지점 모두 ZOC 70%, 50%, 30% 배출량 변동조건의  $PM_{2.5}$  기여농도와 표준편차는 거의 동일하게 나타났다. 다만, 배출량을 100% 삭감하는 경우는 배출량의 일정 비율을 삭감하는 경우들과 비교했을 때  $PM_{2.5}$  선박 기여도 차이가 크게 나타났다. 즉 배출량과  $PM_{2.5}$ 의 비선형성으로 인해 배출량 민감도에 따른 선박 기여도는 정량적으로 상이한 값으로 나타나기 때문에, 고정된 비율의 오염원 배출량 변동에 의해 배출량 민감도 및 기여도를 산정하는 경우 불확도가 존재하는 것으로 판단된다. 그러므로 BFM을 이용한 기여도 산정 시 이에 대한 고려가 수반되어야 하며, 그 차이는 배출량이 적은 국내 단일오염원보다 국내/외 배출량과 같이 크기가 큰 배출량 변동조건에서 더 크게 나타날 것으로 판단된다.

(4) 사례일 기간 동안 배출량 민감도 실험조건에 따른 인천지역  $PM_{2.5}$  농도의 선박 기여도 평균값 분석 결과, 항만으로부터 가장 가까운 신흥은  $4.3 \sim 4.8 \mu g/m^3$ , 송림은  $2.8 \sim 3.1 \mu g/m^3$ , 부평은  $0.9 \sim 1.2 \mu g/m^3$ 의 기여도 범위로 나타났다.

본 연구결과를 통해 지역 내 단일 오염원인 선박에 대해 배출량 변동에 따라 비선형적인 농도 변화를 보이는  $PM_{2.5}$ 에 대한 민감도 분석 시, BFM이 내포하고 있는 모사 특성과 불확도 범위를 제시하였다. 추후에  $PM_{2.5}$ 의 비선형성이 고려된 오염원의 기여도 산정 시, 배출 및 기상특성을 고려한 각 권역별, 날짜별 민감도 변화특성에 대한 분석을 포함하는 적절한 방법

론 수립이 필요할 것으로 판단된다. 또한 보다 상세한 분석을 위해서 과정 분석(Process Analysis)과 같은 추가적인 모사가 필요할 것으로 사료된다.

## References

- Bae, C.H., Kim, E.H., Kim, B.U., Kim, H.C., Woo, J.H., Moon, K.J., Shin, H.J., Song, I.H., Kim, S.T. (2017a) Impact of emission inventory choices on  $PM_{10}$  forecast accuracy and contributions in the Seoul metropolitan area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(5), 497-514, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.5.497>
- Bae, C.H., Yoo, C., Kim, B.U., Kim, H.C., Kim, S.T. (2017b)  $PM_{2.5}$  simulation for the seoul metropolitan area: (III) application of the modeled and observed  $PM_{2.5}$  ratio on the contribution estimation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(5), 445-457, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.5.445>
- Benjey, W., Houyoux, M., Susick, J. (2001) Implementation of the SMOKE emission data processor and SMOKE tool input data processor in models-3, US EPA. [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=63806](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=63806)
- Byun, D.W., Ching, J.K.S. (1999) Science algorithms of the EPA Model-3 community multiscale air quality (CMAQ) modeling system, US EPA, Office of Research and Development. [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?dirEntryId=63400&Lab=NERL](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=63400&Lab=NERL)
- Guenther, A., Karl, T., Harley, P., Wiedinmyer, C., Palmer, P.I., Geron, C. (2006) Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 3181-3210. <https://doi.org/10.5194/acp-6-3181-2006>
- Kajino, M., Ueda, H., Sato, K., Sakurai, T. (2011) Spatial distribution of the source-receptor relationship of sulfur in Northeast Asia, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(13), 6475-6491. <https://doi.org/10.5194/acp-11-6475-2011>
- Kim, S.T. (2011) Estimating ozone sensitivity coefficients to  $NO_x$  and VOC emissions using BFM and HDDM for a 2007 June episode, *Journal of the Environmental Sciences*, 20(11), 1465-1481, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JES.2011.20.11.1465>
- Lee, H.K., Yeo, S.Y., Choi, S.W., Seol, S.H., Jin, H.A., Yoo, C., Lim, J.Y., Kim, J.S. (2019) Analysis of the national air pollutant emission inventory (CAPSS 2015) and the major cause of change in Republic of Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 13(3), 212-231. <https://doi.org/10.5572/ajae.2019.13.3.212>
- Lee, J.S., Choi, S.I., Lee, C.D., Bang, K.I., Kwon, M.J., Dong, J.I. (2020) A study on the improvement of temporal resolution and application of CMAQ simulations for quantitative assessment on source contribution of emissions from cargo ships focused on  $PM_{2.5}$ , *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(1), 93-107, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.1.093>
- Li, M., Zhang, Q., Kurokawa, J., Woo, J.H., He, K., Lu, Z., Ohara, T., Song, Y., Streets, D.G., Carmichael, G.R., Cheng, Y., Hong, C., Huo, H., Jiang, X., Kang, S., Liu, F., Su, H., Zheng, B. (2017) MIX: a mosaic asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 935-963. <https://doi.org/10.5194/acp-17-935-2017>
- Lin, M., Oki, T., Bengtsson, M., Kanae, S., Holloway, T., Streets, D.G. (2008) Long-range transport of acidifying substances in East Asia-part II: Source-receptor relationships, *Atmospheric Environment*, 42(24), 5956-5967. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.03.039>
- Nam, K.P., Lee, H.S., Lee, J.J., Park, H.J., Choi, J.Y., Lee, D.G. (2019) A study on the method of calculation of domestic and foreign contribution on  $PM_{2.5}$  using brute-force method, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(1), 86-96, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.1.086>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) National air pollutant emission calculation manual III, (in Korean). [https://airemiss.nier.go.kr/user/boardList.do?command=view&page=1&boardId=85&boardSeq=146&id=airemiss\\_040200000000](https://airemiss.nier.go.kr/user/boardList.do?command=view&page=1&boardId=85&boardSeq=146&id=airemiss_040200000000)
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) National air pollutant emission 2015 (in Korean).
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X., Wang, W., Powers, J.G. (2008) A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475 + STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 125.

<https://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes%3A500/datastream/PDF/view>

Stockwell, W.R., Middleton, P., Chang, J.S. (1990) The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 95(D10), 16343-16367. <https://doi.org/10.1029/JD095iD10p16343>

### Authors Information

이진숙 (인천광역시보건환경연구원 대기환경연구부 환경연구사, 공학박사)

이충대 (인천광역시보건환경연구원 대기환경연구부장, 공학박사)

권문주 (인천광역시보건환경연구원장, 공학박사)