



논문

# 화물선박 오염원의 PM<sub>2.5</sub> 배출량에 대한 시간해상도 개선 및 CMAQ 모델에의 적용 연구

## 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<sub>2.5</sub>

이진숙<sup>1,2)</sup>, 최상인<sup>1)</sup>, 이충대<sup>1)</sup>, 방기인<sup>1)</sup>, 권문주<sup>1)</sup>, 동종인<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>인천광역시 보건환경연구원, <sup>2)</sup>서울시립대학교 환경공학과

Jin Sook Lee<sup>1,2)</sup>, Sang In Choi<sup>1)</sup>, Choong Dae Lee<sup>1)</sup>, Ki In Bang<sup>1)</sup>,  
Mun Ju Kwon<sup>1)</sup>, Jong In Dong<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>Atmospheric Environment Research Division, Incheon Metropolitan City Institutes of Health and Environment, Incheon, Republic of Korea

<sup>2)</sup>Department of Environmental Engineering, University of Seoul, Seoul, Republic of Korea

접수일 2020년 1월 10일  
수정일 2020년 1월 27일  
채택일 2020년 2월 3일

Received 10 January 2020  
Revised 27 January 2020  
Accepted 3 February 2020

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)2-6490-2862  
E-mail : jidong@uos.ac.kr

**Abstract** In this study, we utilized the PORT-MIS, CMAQ modeling and BFM tool to estimate the contributions of emission from ships on PM<sub>2.5</sub> concentration over Incheon area. At first, we conducted the modeling based on the CAPSS emissions inventory. Secondly we built new gridded emissions from cargo ships by making the best use of PORT-MIS and conducted the modeling based on them. Finally, we conducted the modeling with these new gridded emissions from ships reflecting funnel heights of ships. As a result of calculating new emissions from ships using PORT-MIS, PM<sub>2.5</sub> of emissions from cargo ships were increased by 949 ton/yr in comparison with those in CAPSS. And during the episode period, the contributions of emission from ships on PM<sub>2.5</sub> concentration were  $0.6 \pm 1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0.6 \pm 1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0.2 \pm 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  when modeling was conducted based on the CAPSS emissions inventory, at Sinheung, Songnim, Bupyeong, respectively. Secondly those were  $3.2 \pm 5.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $1.9 \pm 3.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0.7 \pm 1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , when modeling was conducted based on the new emissions from ships using PORT-MIS. Finally, those were  $2.6 \pm 4.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $1.8 \pm 3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0.8 \pm 1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , when modeling was conducted based on same emissions from ships using PORT-MIS and applications of funnel height. The model using PORT-MIS shows a bit better performance for the prediction of PM<sub>2.5</sub>, while there is a still large uncertainty to calculate emissions from ships. Continuous efforts to correct this problem will be required in the future.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>, Emissions from ships, Incheon port, PORT-MIS, Chemical transport model, WRF, SMOKE, CMAQ

### 1. 서론

인천을 포함해서 부산, 울산 등 우리나라 주요 항만 도시는 지역 내 미세먼지 농도가 육상 대도시 수준에 육박하고 있어 사회적 문제로 대두되고 있다. 선박에 의한 대기오염은 다량의 황이 함유된 벙커C유 등 저급연료를 사용하기 때문이며 PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 등의 대

기오염물질을 다량 발생시킨다. 이에 따라 대기오염이 심한 항만지역이나 항만지역의 대기오염에 크게 영향을 미치는 지역을 ‘항만 대기질 관리구역’으로 지정하고 구역 내에 별도로 황산화물 배출규제해역과 저속운항해역을 지정할 수 있는 「항만지역 등 대기질 개선에 관한 특별법」이 2020년 1월부터 시행되었다. 이 특별법에서 규정된 배출규제해역은 선박 연료유

항 함유량 기준이 일반해역의 0.5%보다 강화된 0.1%가 적용되고, 저속운항해역은 일정 속도 이하로 운항하도록 권고가 가능(20% 감속 시 시간당 미세먼지 49% 감축)하다(MOF, 2019). 또한, 항만 하역장비의 배출가스 허용기준을 신설하는 한편 주요 부두에 육상전원공급설비 설치를 의무화하였으며 노후경유차의 운행도 제한할 수 있게 되었다(MOF, 2019).

이렇게 항만지역 대기질 관리에서 선박 오염원에 대한 이해가 중요함에도 불구하고 대형 화력발전소 등 점오염원과 자동차 등 도로이동오염원, 경유 차량 등의 배출원에 대한 연구가 많았고 선박기인 대기오염에 대한 연구가 미미하며, 이는 선박 오염원에 대한 대기확산 및 영향 농도 연구에서 배출량 구축의 어려움 등으로 많은 불확도가 존재하기 때문이다.

오염원으로부터의 오염물질 배출의 시간적, 공간적 분포에 대한 정확한 파악은 매우 중요하다. 이는 대기질 모델링과 이를 통한 지역 대기 오염도 저감 정책 수립 등에 직접적으로 활용되기 때문이다. 현재 환경부는 대기오염물질 배출목록인 CAPSS (Clean Air Policy Support System, 대기정책지원시스템)에서 전국에 걸쳐 시군구 행정구역 단위의 배출량 정보를 기본적으로 제공하고 있다. 하지만 오염원과 배출량 자료(산업시설의 위치, 시가지 구역의 변동, 교통량 변화 등)의 시의성이 떨어지고(Kim *et al.*, 2019), 선박

오염원의 경우 일괄된 연료소비계수, 항내 운항거리, 정박 시간을 이용한 하향식 산정방법을 사용하고 있어 이를 토대로 지역별 대기정책을 수립하고 관리하는 데 많은 한계가 있다.

본 연구에서는 선박의 입출항 정보인 PORT-MIS 자료를 활용하여 선박 배출량을 재산정하고 시간해상도 자료를 도출하였으며, 이와 함께 CMAQ 모델을 이용하여 선박에서 배출된 오염물질이 인근지역의 PM<sub>2.5</sub> 농도에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 연구 대상의 선정

#### 2.1.1 대상지역 및 기간

본 연구는 선박에서 배출되는 오염물질 중 PM<sub>2.5</sub>에 의한 영향을 예측하는 방법을 검토하기 위하여 인천 연안지역을 대상으로 선정하였다. 그림 1에서 공간적으로 나타난 바와 같이 인천의 서측에 위치한 인천항은 북항, 내항, 남항으로 대부분의 화물선박이 접안하고 있으며, 인천항의 풍하측 거리에 따라 선박에 의한 대기질 영향을 분석하기 위하여 가장 인접한 신흥동, 송림동 지점과 인천내항으로부터 약 10.6 km 이격되어 있는 부평동을 선정하였다.

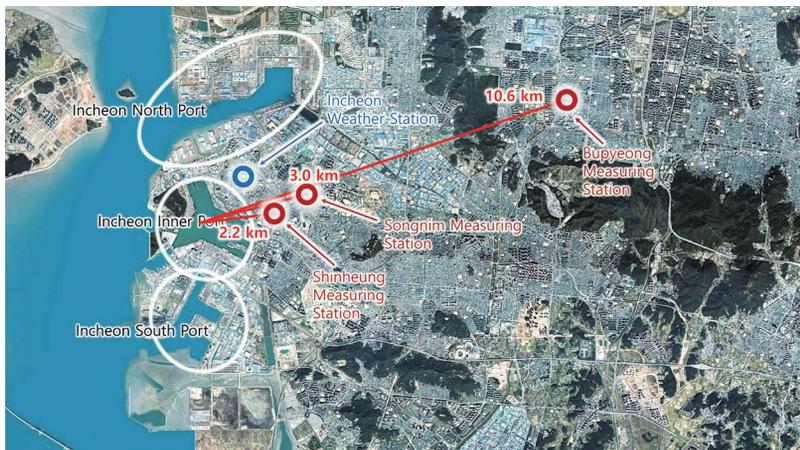


Fig. 1. Overview of Incheon port area in this study.

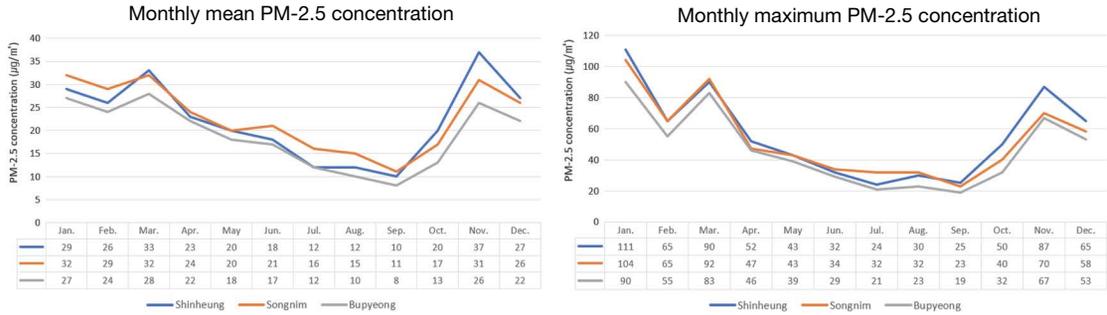


Fig. 2. Monthly mean and maximum PM<sub>2.5</sub> concentrations in three sites of Incheon, 2018.

2018년의 월 평균농도와 월 최대농도를 각각의 측정소별로 비교하여 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 나타난 바와 같이 부평동은 신흥동과 송림동에 비해 월평균농도와 월최대농도가 모두 낮게 나타나고 있으며, 신흥동과 송림동은 순서가 월마다 다르게 나타나지만 부평동보다 최대농도 및 평균농도가 높게 나타나고 있다. 각 지점 간의 농도 차이는 다양한 원인에서 기인하지만, 본 연구에서는 선박 배출원에서 그 원인을 찾아보고자 하였다.

본 연구의 대상기간을 선정하기 위하여 인천기상대의 2018년 월별 바람장미를 분석하여 그림 3에 나타내었다. 인천지역은 해안에 위치한 지형학적 특성으로 해륙풍의 특성을 가지고 있으나, 월별로 명확히 구분되는 바람 특성을 보이고 있었다. 1월과 2월, 10월부터 12월은 북풍 계열의 바람이 지배적으로 나타났으며, 3월부터 6월까지의 서풍 및 남서풍 계열의 바람이 지배적이고, 7월부터 9월까지의 남서풍과 북서풍 및 동풍 계열의 바람까지 다양하게 나타났다. 따라서 본 연구는 선박에서 기인한 오염물질이 내륙지역으로 영향을 주는 기간을 집중적으로 분석하기 위하여 주로 서풍 계열의 바람이 발생하는 2018년 3월부터 5월까지를 연구 대상기간으로 선정하였다.

2.1.2 배출원

본 연구에서는 CMAQ 모델의 입력자료를 위한 기본 배출량으로 2015년 CAPSS (NIER, 2018) 자료를 활

Table 1. CAPSS 2015 emissions in Incheon area.

	PM-2.5 emission (ton/year)	PM-2.5 ratio (%)
All ships	217.0	7.9
Cargo ships	191.8	7.0
Factories (in processing)	181.1	6.6
Total (Incheon area)	2,729.5	100

용하였다. 2015년 CAPSS의 인천지역 배출량은 표 1에 나타내었다. 연간 PM<sub>2.5</sub> 배출량이 약 2,729 ton/year이며, 이 중 선박에 의한 배출량은 약 217 ton/year로 인천지역 전체배출량의 약 7.9%를 차지하는 것으로 조사되었다. CAPSS의 경우, 선박에 의한 배출량은 어선, 여객, 레저, 화물의 소분류로 구분되고 있다. 이 중 화물선박에 의한 PM<sub>2.5</sub> 배출량은 약 192 ton/year로 전체 선박 배출량의 약 88.4%, 인천지역 전체 배출량의 약 7.0%를 차지하는 비중이다. 표 1에 나타난 바와 같이 인천지역 생산공정 배출원의 연간 PM<sub>2.5</sub> 배출량은 181 ton/year로 총 배출량의 약 6.6% 차지하고 있는 것과 비교되는 바, 단일배출원에 의해 약 7.0%를 차지하는 화물선박에 의한 배출량은 상당한 비율임을 의미하고, 특히 항만지역에서 집중적으로 배출됨으로 기상조건에 따라 항구 인접지역에서 고농도 대기오염 문제가 발생할 수 있는 개연성이 있음을 추정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 인천지역의 선박 중 화물선박을 대상으로 연구하였다.

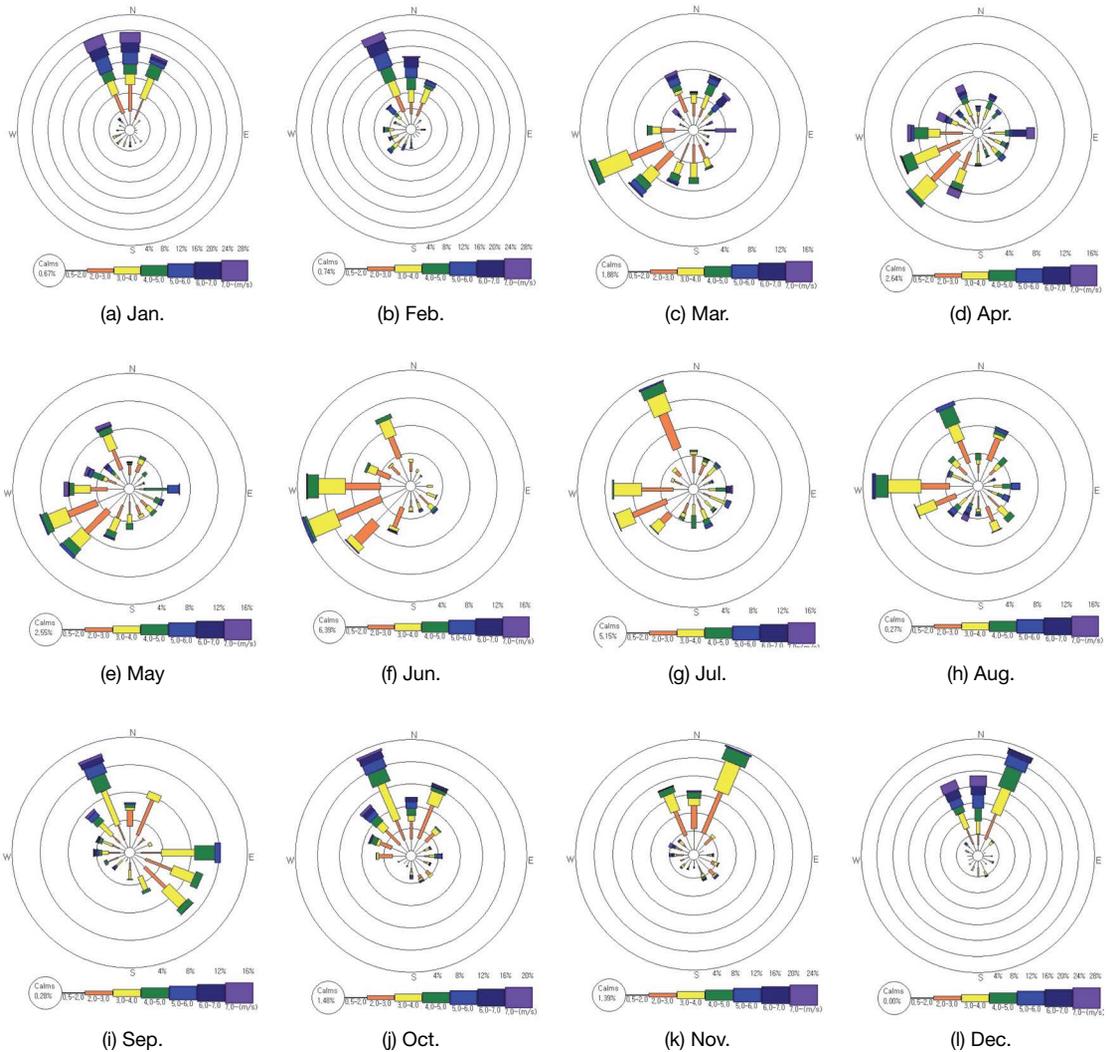


Fig. 3. Monthly windroses in Incheon weather station, 2018.

## 2.2 화물선박 배출량 산정방법

### 2.2.1 해운항만물류정보 시스템

화물선박을 대상으로 2018년 배출량을 재산정하기 위하여 해운항만물류정보 시스템에서 제공하는 자료를 활용하였다. 해운항만물류정보 시스템 (이하 PORT-MIS, Port Management Information System)은 실시간 항만별 선박 입출항 정보를 제공하는 시스템으로, 무역항의 선박입항, 화물 반출입, 선박출항 등

다양한 항만 운영업무를 처리하기 위해 항만법 제89조에 의해 구축되어 Web page (<http://new.portmis.go.kr>)를 통해 공개되는 시스템이다. PORT-MIS 자료의 선박 입출항 기록은 입출항 개별 선박마다 작성되어 있으며, 선명, 총 톤수, 입항목적, 입항일시, 출항일시, 선박용도, 항로(외·내항) 등의 정보가 수집 가능하므로 본 연구에서는 해당자료를 수집하여 배출량을 산정하기 위한 활동도 자료로 활용하였다.

### 2.2.2 화물선박 배출량 산정방법

CAPSS의 경우, 화물선박에 의한 배출량 산정방법은 연료소비량 추정방법이며, 이를 접안 시와 정박 시로 구분하여 배출량을 산정하고 있다. 본 연구의 화물선박에 의한 배출량을 재산정하기 위한 방법론은 CAPSS와 동일한 계산식과 배출계수를 적용하였으나, PORT-MIS에서 수집한 개별 화물선박의 입출항 정보를 이용하였다는 점에서 차이가 있다. 즉, 2018년도 1월 1일부터 12월 31일까지 화물선박의 입항대수, 출항대수, 접안 중인 선박대수의 자료를 일별로 산정하였고 이를 배출량 산정 계산식에 적용하였다. 입항 및 출항하는 화물선박의 경우 톤급별 배출계수와 이동거리를 적용하여 연료사용량과 PM<sub>2.5</sub> 배출량을 산정하였고, 정박하고 있는 화물선박의 경우 톤급별 배출계수를 적용하여 PM<sub>2.5</sub> 배출량을 산정하였다.

또한 현재 CAPSS에서는 각 배출원별 배출량 총량만 제공되고 있기 때문에 대기질 모델에 적용하여 대기 중 영향 농도를 예측하는 기존 연구에서는 시간 해상도를 임의로 사용하거나 월별 입출항 비율 또는 전체기간에 대해서 동일하게 배출된다는 가정 하에 배출원 입력자료를 적용하고 있다. 본 연구에서 제안하는 방법에 의해 산정된 일별 배출량은 연간 PM<sub>2.5</sub> 배출량을 월별 및 요일별 비율로 계산할 수 있으며, 이를 대기질 모델에 적용함으로써 시간에 따른 모델결과의 정확도를 향상시킬 수 있다.

본 연구 대상지역인 인천지역에 대해 개별 화물선박마다 배출량을 산정하기 위하여 활동자료(각 선박별 입출항일시, 총 톤수, 계선장소, 선박종류)를 수집하였다. 화물선박에 의한 배출량은 “국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(III)”을 준용하되, PORT-MIS 자료에서 수집된 일별 입출항 정보를 활용하여 개별 화물선박별로 입출항 시와 정박 시에 대한 연료

사용량을 산정하여 배출계수를 적용하였고, 오염물질별 배출량을 각각 재산정하여 2018년도에 대해서 선박 배출량을 날짜별로 정리하였다. 선박 정박기간 동안 소비되는 연료량은 식(1)로 산정하였다.

$$\begin{aligned} & \text{정박 시 연료소비량(ton/day)} \\ & = 16.263 + 0.001 \times \text{GT (Gross Tonnage)} \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)은 “EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook-1999 (EEA, 1999)”에서 제시된 것이며, 동일문헌에 의해 정박 시 연료소비량은 20%로 가정하였다. 선박 입출항 시 소비되는 연료량은 식(2)로 산정하였다.

$$\begin{aligned} & \text{입출항 시 연료소비량(L)} \\ & = \text{이동거리(km)} \div \text{톤급별 연료경제(km/L)} \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)에서 이동거리(km)는 “국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(III)”에서 제시된 바와 같이 해풍의 영향거리인 35 km를 적용하였다. 톤급별 연료경제는 동일문헌의 “2008년 톤급별 연료경제 자료”에서 제시된 결과를 적용하였고 PORT-MIS의 입항일자과 출항일자에 대해 각각의 연료사용량을 할당하였다. 이와 같이 화물선박의 입항일자, 정박일자, 출항일자에 대한 일별 연료사용량을 재산정한 후 표 2에 제시된 선박부문 배출계수를 적용하여 각 오염물질별 배출량을 산정하였다.

## 2.3 CMAQ을 이용한 대기 모델링

### 2.3.1 CASE 비교

본 연구의 선박배출량 재산정 방법에 의한 모델결과 차이를 분석하기 위하여 표 3과 같이 CASE를 구분하여 대기 모델링을 수행하였다. 본 연구에 의해 재산

**Table 2.** Emission factors for ships (NIER, 2013).

(unit: kg/kL)

Operating mode (Fuel)		CO	NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>	SO <sub>x</sub>	TSP (PM <sub>10</sub> )	VOC
Engine propulsion	Forwarding operating mode	7.4	87	0.11	205	6.7	2.4

**Table 3.** The summary of emissions from ships by cases.

CASE	Foreign emissions	Domestic emissions		Consideration for height of funnels as modeling
		Ships	The others	
CASE 1	MIX 2010	CAPSS 2015		×
CASE 2	MIX 2010	Emissions for cargo ships using PORT-MIS	CAPSS 2015	×
CASE 3	MIX 2010	Emissions for cargo ships using PORT-MIS	CAPSS 2015	○

**Table 4.** WRF and CMAQ configurations used in this study.

WRF physical options		CMAQ module and scheme	
Micro physics	WSM 6-class	Aerosol and chemical module	AERO5_CB05
Long wave radiation	RRTM	Chemical solver	EBI
Short wave radiation	Goddard	Advection scheme	YAMO
Land-surface model	Noah LSM	Horizontal diffusion	Multiscale
PBL physics	YSU	Vertical diffusion	Eddy
Cumulus option	Kain-Fritsch	Cloud scheme	ACM

정된 선박 배출량을 이용한 대기질 예측의 대조군으로 활용하기 위해 ① CAPSS 2015년 배출량을 이용하여 대기질 모델링을 수행하였다(CASE 1). 또한, 2018년도 PORT-MIS 입출항 자료를 활용하여 ② 인천지역 화물선박 배출량과 시간해상도를 적용하고 기존의 2015년 CAPSS에서 화물선박 부분만 변경하여 모델링을 수행하였다(CASE 2). 마지막으로 실제 화물선박에서 배출되는 높이를 반영하기 위하여 ③ CASE 2와 동일한 배출량을 활용하되 해발 35 m~70 m에 해당하는 Layer 2에서 배출되도록 적용하여 대기질 모델링을 수행하였다(CASE 3).

### 2.3.2 모델링 조건

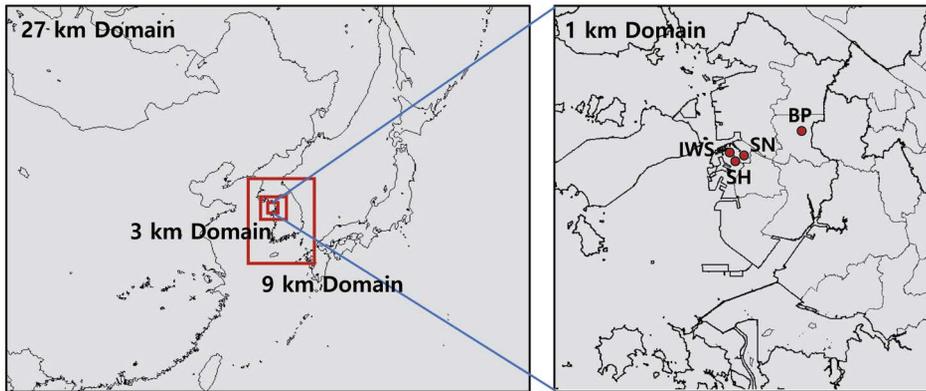
선박 오염원의 PM<sub>2.5</sub> 영향을 산정하기 위해 본 연구에서는 중규모 기상모델인 WRF (Weather Research and Forecast, Skamarock *et al.*, 2008) ver. 3.6.1과 중규모 대기확산 모델인 CMAQ (Community Multiscale Air Quality model, Byun and Ching, 1999) ver. 4.7.1을 활용하였다.

중규모 기상모델에 사용된 입력자료는 미국해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administra-

tion)에서 제공하는 재분석 자료인 NCEP-FNL (National Centers for Environmental Prediction Final)을 초기장으로 이용하였으며, 대기질 모델에 사용된 배출량 계산은 SMOKE (Sparse Matric Operator Kernel Emissions, Benjay *et al.*, 2001) ver. 2.1을 이용하여 배출량의 화학종별, 시간별, 공간별 할당을 수행하였다. 기상 및 대기질 모델에 사용된 주요 물리·화학 옵션은 각각 표 4에 나타내었다.

대기질 모델에 의한 모사영역은 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.

대기질 모델 수행을 위한 자연배출량은 MEGAN 2 (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2, Guenther *et al.*, 1995)를 이용하였고, 인위적 배출량의 경우 중국 등 동아시아 영역의 국외 배출량은 MIX 2010 (Li *et al.*, 2015) 배출목록, 국내 배출량은 CAPSS 2015 자료를 이용하였다.



**Fig. 4.** 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).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 PORT-MIS를 이용한 선박 배출량 산정

인천지역 화물선박에 대해 PORT-MIS를 이용하여 2018년의 오염물질 배출량을 재산정한 결과는 표 5와 같으며, 내항선과 외항선으로 구분하여 산정한 결과 화물선박의 PM<sub>2.5</sub>는 약 949 ton/yr로 산정되었다. CAPSS 2015 배출량과 본 연구에서 재산정한 배출량, 그리고 그 차이에 대한 공간적 분포도를 각각 그림 5(a), 5(b), 5(c)에 나타내었다. 그림 5(c)에서 나타낸 바와 같이 본 연구에서 재산정된 배출량은 선박의 입출항 시 배출량과 정박 시 배출량에 대해서 증가 적용된 것을 확인할 수 있고 2015년 CAPSS에 비해 4.94배 증가하는 것으로 나타났다. 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)”에 따르면 CAPSS에서 선박배출량의 정박 시간은 2001년 1월 및 12월에 울산항에 입항한 560대를 표본으로 조사된 0.79일/

**Table 5.** The difference of PM<sub>2.5</sub> emissions from cargo ship sources.

	Emissions using 2015 CAPSS (a)	Emissions using 2018 PORT-MIS (b)	Ratio (b/a)
Ocean-going ships	-	546.974	
Coasters	-	402.233	
Total (cargo ships)	191.789	949.207	4.94

회를 적용하였다. 반면 본 연구에서는 실제 개별 선박마다 정박일수를 각각 산정하여 일별로 적용하였고, 평균 정박 시간을 분석한 결과 외항선의 경우 평균 1.24일, 내항선의 경우 평균 1.64일로 나타나 CAPSS 산정방법에서 사용된 계수와의 차이를 보였으며 이로 인해 연료사용량에 따른 배출량의 차이가 나타날 수 있다. 또한 산정방법의 두 번째 차이로는 CAPSS의 경우 선박의 톤수를 구간별 평균값으로 선정하여 연료 사용량 계산에 적용한 반면, 본 연구에서는 개별 선박의 실제 톤수에 대해 각각의 연료사용량을 계산한 것이다. 즉 CAPSS 산정방법은 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

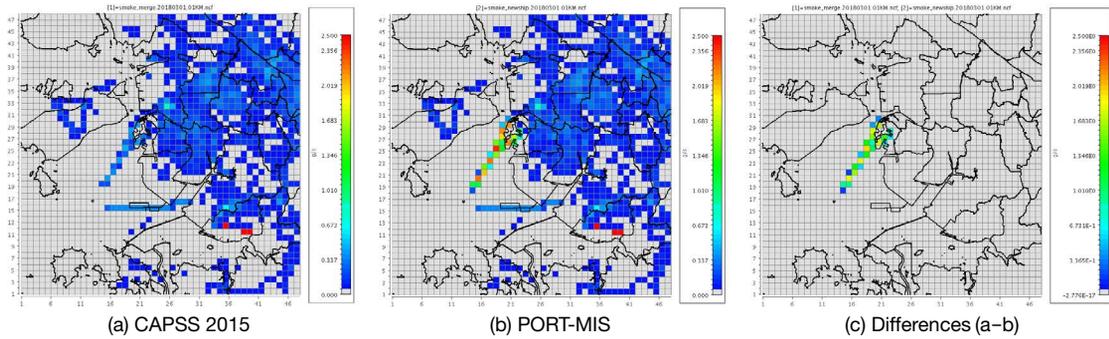


Fig. 5. PM<sub>2.5</sub> emissions using (a) CAPSS, (b) PORT-MIS and (c) differences.

Table 6. Monthly allocations calculated by PORT-MIS over the Incheon port.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ocean-going ships	0.0815	0.0858	0.0887	0.0803	0.0725	0.0827	0.0834	0.0824	0.0839	0.0873	0.0832	0.0881
Coasters	0.0796	0.0718	0.0879	0.0863	0.0975	0.0934	0.0848	0.0839	0.0786	0.0769	0.0800	0.0792

Table 7. Weekly allocations calculated by PORT-MIS over the Incheon port.

	Mon.	Tue.	Wed.	Thu.	Fri.	Sat.	Sun.
Ocean-going ships	0.1296	0.1448	0.1402	0.1378	0.1391	0.1525	0.1560
Coasters	0.1381	0.1495	0.1426	0.1484	0.1380	0.1471	0.1363

여전히 가정된 계수들이 포함되어 있으므로, 인천지역 화물선박에 의해 사용된 실제 연료량과의 비교를 통해 현실적인 오차를 줄여야 할 필요성이 있다.

### 3.2 화물선박의 배출시간 할당계수 산정

오염원별 배출량을 이용하여 대기질 모델에 적용하기 위해서는 오염물질이 배출되는 시간 할당계수가 필요하다. 본 연구의 목적 중 하나로써 선박 입출항일 시 자료를 이용하여 산정된 월별 배출량을 배출량모델인 SMOKE에 적용할 수 있도록 월별 할당계수와 요일별 할당계수를 산출하였고, 이를 외항선과 내항선에 대해 각각 표 6과 7에 나타내었다. 표 6의 월별 비율에 대해서는 외항선의 경우 전반적으로 월별로 차이가 작으며, 이 중 3월이 0.0887로 가장 높고 5월이 0.0725로 가장 낮았다. 반면 내항선의 경우 외항선보

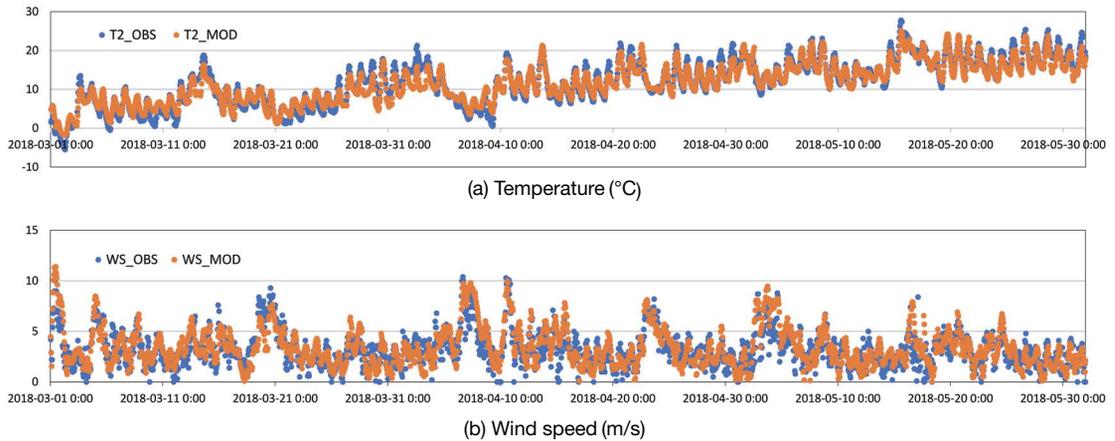
다 상대적으로 월별 변동추이를 크게 보이고 있으며, 5월이 0.0975로 가장 높고 2월이 0.0718로 가장 낮았다. 또한 표 7의 요일별 비율에 대해서는 외항선의 경우 토요일이 0.1560으로 가장 높고 월요일이 0.1296으로 가장 낮은 배출비율을 보이고 있다. 내항선의 경우에는 화요일이 0.1495로 가장 높고 일요일이 0.1363으로 가장 낮은 배출비율을 보였다. 모델링에 필요한 월별, 요일별 할당계수 이외에 시간별 할당계수는 본 연구에서 도출할 수 없는 한계로 24시간 동안 동일한 계수를 적용하였다.

### 3.3 기상모델 수행평가

기상모델의 정확도를 평가하기 위하여 온도와 풍속의 모델링 결과를 인천기상대(ASOS)의 지상 측정자료와 비교하였다. 2018년 3월 1일부터 5월 31일까지

**Table 8.** WRF performance statistics in case 1.

Variables	Obs. mean	Mod. mean	MBIAS	NMB	IOA	RMSE	R
Temperature (°C)	11.92	11.69	-0.18	-1.52	0.96	2.13	0.94
Wind speed (m/s)	3.19	3.29	0.20	6.13	0.86	1.32	0.76



**Fig. 6.** Time series plots of (a) temperature, (b) wind speed at Incheon weather station.

의 대상기간에 대해 평가하였으며, spin-up 기간인 2018년 2월 17일부터 28일까지는 평가에서 제외하였다. 본 연구의 기본이 되는 CASE 1에 대해 기상 모델링 수행평가 결과는 표 8에 나타내었고 모델값과 측정값의 비교를 위한 시간별 시계열 그래프를 그림 6에 나타내었다.

2 m 기온의 경우 모델값과 관측값과의 일치도가 0.96으로 매우 높게 나타났다. 10 m 풍속의 일치도는 0.86으로 기온보다는 낮지만 다수의 선행연구(Borge *et al.*, 2008; Kryza *et al.*, 2012; Miglietta *et al.*, 2012)에서 제시한 권고수준(RMSE ≤ 2.0 m/s, IOA ≥ 0.6)을 충분히 만족하여 CMAQ 모델의 기상 입력자료로 적합한 신뢰성을 보였다.

**3. 4 대기 모델링 결과**

본 연구에서는 PORT-MIS의 실제 입출항 자료를 이용하여 월별, 요일별 시간 할당계수를 적용하였다는 점에서 기존의 CAPSS를 이용한 대기 모델링 방법

과 차이가 있다. 연구 대상기간 동안 CASE별 PM<sub>2.5</sub> 모델링 결과는 표 9에 나타내었으며 통계검증에는 MBIAS (Mean Bias), NMB (Normalized Mean Bias), IOA (Index of Agreement), RMSE (Root Mean Square Error)를 사용하였다(NIER, 2016). 또한 PM<sub>2.5</sub>의 일별 시계열 그래프를 CASE 별로 비교하여 그림 7에 나타내었다.

항만과 가장 인접한 신흥동의 경우, CASE 1과 CASE 2, 3을 비교하면 IOA는 0.89에서 0.90, 0.89로 큰 변화는 보이지 않았으나 NMB는 CASE 1의 과소모의를 의미하는 -6.12에서 CASE 2의 3.88로 변화하여 실측값과의 오차가 감소하였다. 배출고도를 보완한 CASE 3을 CASE 2와 비교하면 NMB가 1.03, MBIAS가 0.28로 나타나 CASE 2에 비해 과대모의되는 부분이 개선되는 것으로 나타났다.

신흥동과 인접한 송림동의 경우, CASE 1, 2, 3에서 일치도를 나타내는 IOA는 각각 0.88, 0.89, 0.88로 나타나 큰 차이는 없었다. NMB는 CASE 1에서 -1.44로

**Table 9.** CMAQ performance statistics for PM<sub>2.5</sub> by cases.

Variables		Obs. mean	Mod. mean	MBIAS <sup>1)</sup>	NMB <sup>2)</sup>	IOA <sup>3)</sup>	RMSE <sup>4)</sup>
Shinheung	CASE 1	25.36	23.81	-1.55	-6.12	0.89	9.78
	CASE 2		26.35	0.98	3.88	0.90	9.28
	CASE 3		25.76	0.28	1.03	0.89	9.60
Songnim	CASE 1	25.97	25.57	-0.4	-1.44	0.88	9.73
	CASE 2		26.94	-1.04	3.78	0.89	9.66
	CASE 3		26.85	1.01	3.44	0.88	9.99
Bupyong	CASE 1	23.98	29.65	5.72	23.54	0.85	11.76
	CASE 2		30.33	6.22	25.82	0.84	12.02
	CASE 3		30.18	6.25	25.74	0.84	12.04

<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

과소모의되었고 CASE 2에서 3.78로 과대모의되었으나 CASE 3에서는 3.44로 나타나 CASE 2에 비해 다소 개선되었다고 볼 수 있다. 그림 7(b)의 일평균 시계열 그래프에서 보이는 바와 같이 CASE 1, 2, 3 모두 일부 기간에 대해 실측값보다 과대모의되는 현상이 나타났다.

항만과 약 10.6 km 이격된 부평동의 경우, 그림 7(c)의 일평균 시계열 그래프에서 보이는 바와 같이 CASE별 차이는 크게 나타나지 않았다. 다만, CASE 1, 2, 3 모두 모델값은 실측값보다 전반적으로 과대모의되었는데 과대모의되는 정도가 신흥동과 송림동보다 상대적으로 크게 나타났다. 이는 항만에 의한 영향이 신흥동과 송림동 지역에 비해 지배적이지 않으며, 상대적으로 다른 배출원에 의한 영향이 크기 때문으로 추론할 수 있다.

### 3.5 선박에 의한 PM<sub>2.5</sub> 기여도 산정

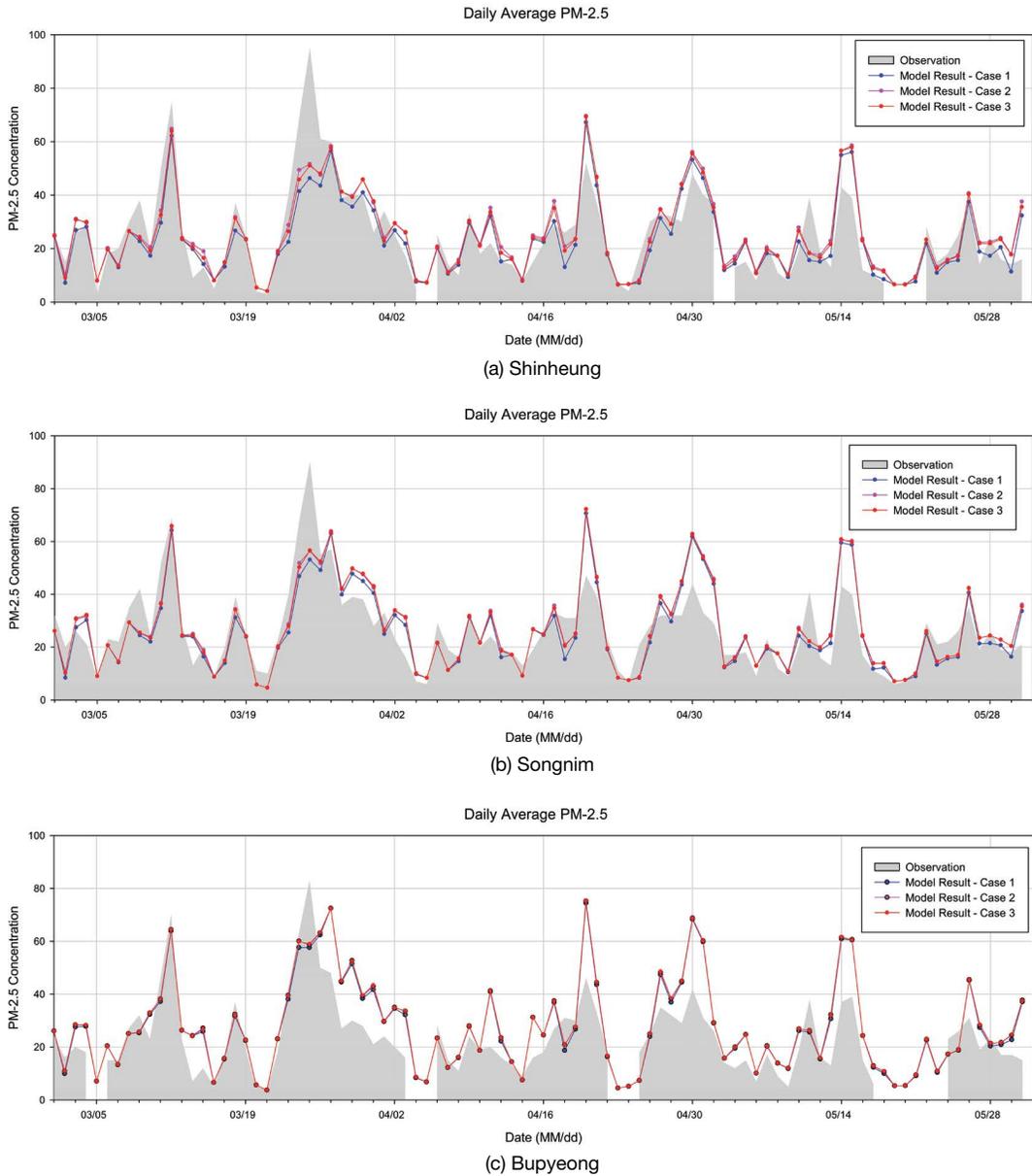
선박 배출량 및 배출높이에 따른 PM<sub>2.5</sub> 모델값의 시간별 변동특성을 상세히 분석하기 위하여 선박에 의한 영향이 가장 뚜렷할 것으로 예상되는 기상조건이 나타난 2018년 3월 25일부터 31일까지를 에피소드 기간으로 선정하여 분석하였다. 대상기간은 남서풍이 발생하여 항만에서 풍하측으로 신흥동과 송림동을 거쳐 부평동까지 이동하는 기간으로, 선박에 의한 기여도를 분석하기 위하여 선박 배출량을 제외한

**Table 10.** Contributing concentrations of ships on PM<sub>2.5</sub> by cases. (unit: µg/m<sup>3</sup>)

Spots	Case 1 (mean±SD)	Case 2 (mean±SD)	Case 3 (mean±SD)
Shinheung	0.6±1.3	3.2±5.3	2.6±4.5
Songnim	0.4±0.7	1.9±3.3	1.8±3.1
Bupyong	0.2±0.5	0.7±1.6	0.8±1.7

배출량을 적용한 모델결과를 이용하여 ZOC (Zero-Out Contribution) BFM으로 각 CASE별 선박 오염원의 기여도를 도출하였다.

그림 8의 지점에 따른 PM<sub>2.5</sub> 시간대별 변동을 살펴보면 24:00 KST부터 12:00 KST까지는 선박 기여농도가 작거나 거의 없으며 12:00 KST부터 증가하기 시작하여 20:00~22:00 KST에 가장 높은 경향을 보였다. 대상기간 동안 선박에 의한 PM<sub>2.5</sub> 평균 기여농도 (mean±S.D.)를 표 10에 정리하였다. CASE 1, 2, 3 순서대로 신흥은 각각 0.6±1.3 µg/m<sup>3</sup>, 3.2±5.3 µg/m<sup>3</sup>, 2.6±4.5 µg/m<sup>3</sup>, 송림은 각각 0.4±0.7 µg/m<sup>3</sup>, 1.9±3.3 µg/m<sup>3</sup>, 1.8±3.1 µg/m<sup>3</sup>, 부평은 각각 0.2±0.5 µg/m<sup>3</sup>, 0.7±1.6 µg/m<sup>3</sup>, 0.8±1.7 µg/m<sup>3</sup>로 산정되어 인천 동부에 위치한 부평지점까지도 선박 오염원에 의한 영향이 나타남을 확인할 수 있다. 또한 PORT-MIS 자료에 의해 재산정한 배출량으로 PM<sub>2.5</sub> 농도를 모델링한 결과에 대해 CAPSS 자료를 이용한 경우와 비교(CASE 1과 CASE 2)하면, 신흥은 5.3배 (0.6 → 3.2 µg/m<sup>3</sup>), 송



**Fig. 7.** Time series plots of PM<sub>2.5</sub> by cases at (a) Sinheung, (b) Songnim, (c) Bupyong.

림은 4.8배 (0.4 → 1.9 µg/m<sup>3</sup>), 부평은 3.5배 (0.2 → 0.7 µg/m<sup>3</sup>) 증가하여 CAPSS를 이용한 모델링 결과가 과소모사됨을 확인할 수 있으나 이는 PORT-MIS 화물선박 배출량을 재산정하는 과정에서 정박 시 정상운영 기간과 수리 기간의 구분을 7일 기준으로 가정하

였기 때문에 결과의 불확도가 존재하며 이에 대한 정확한 자료 확보와 추후 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 배출높이를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교(CASE 2와 CASE 3)하면, 고려 시 미고려 대비 인천항과 가까운 신흥은 약 19% 감소(3.2 → 2.6

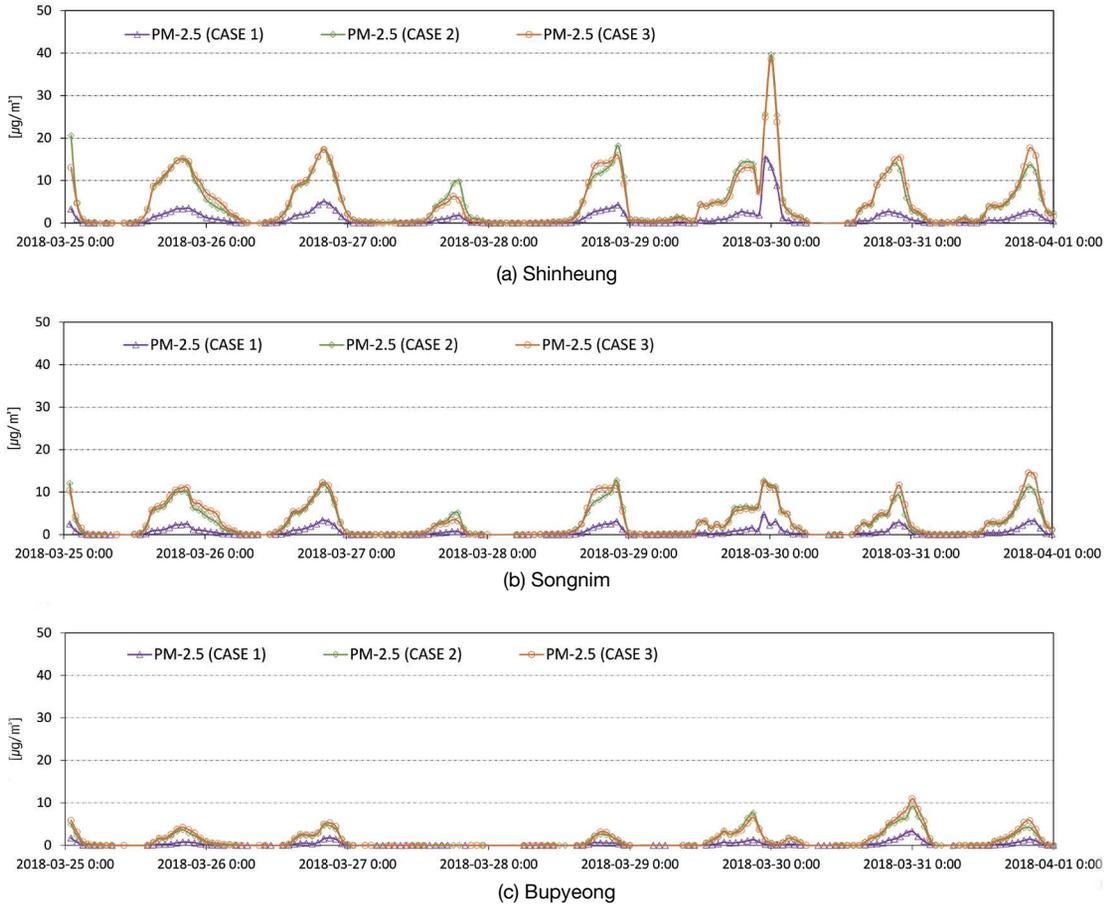


Fig. 8. Time series plots of contributing concentrations of ships on  $PM_{2.5}$  depending on acceptance spots.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 송림은 5% 감소 ( $1.9 \rightarrow 1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 부평은 14% 증가 ( $0.7 \rightarrow 0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )하는 것으로 나타나 대기 질 모델링 시 선박 연돌 높이에 대한 정확한 반영이 인천 전지역의 선박 오염 영향을 파악하는 데 중요한 변수임을 알 수 있다.

대상기간 중 선박 기여 농도가 상대적으로 높았던 3월 26일 (21:00:00 KST), 28일 (22:00:00 KST), 30일 (21:00:00 KST) 시간대에 대해  $PM_{2.5}$  농도 공간분포를 그림 9에 나타내었다. 그림 9(a)의 경우, CASE 2의 모델링 결과를 CASE 1과 비교하면 항만지역에서 농도가 높게 나타났으며, CASE 3은 CASE 1보다는 높고 CASE 2보다는 낮은 농도 수준을 보였다. 이는 CASE 3

의 경우 선박배출원의 배출고도를 상승시킴으로써 인접지역의 지표면에 집중적으로 모사되었던 오염물질이 고도별로 분산된 결과이다. 또한 그림 9(b)와 같이 CASE 3은 CASE 2에 비해 항만지역에서는 농도가 감소되었으나, 풍하측의 이격거리가 멀어지는 지역에서는 유사한 농도분포 수준을 보였고 이 경향은 그림 9(c)에서도 유사하게 나타났다. 즉 CASE 2와 같이 오염물질이 지표면에서 배출되는 것으로 가정하는 경우 배출원 인접지역에서 실제 영향농도보다 과대모의될 수 있으며, CASE 3과 같이 선박의 배출고도를 실제 높이에 맞게 적용하면 풍하측은 CASE 3과 CASE 2의 차이가 거의 나타나지 않을 정도로 선박에 의한 영향

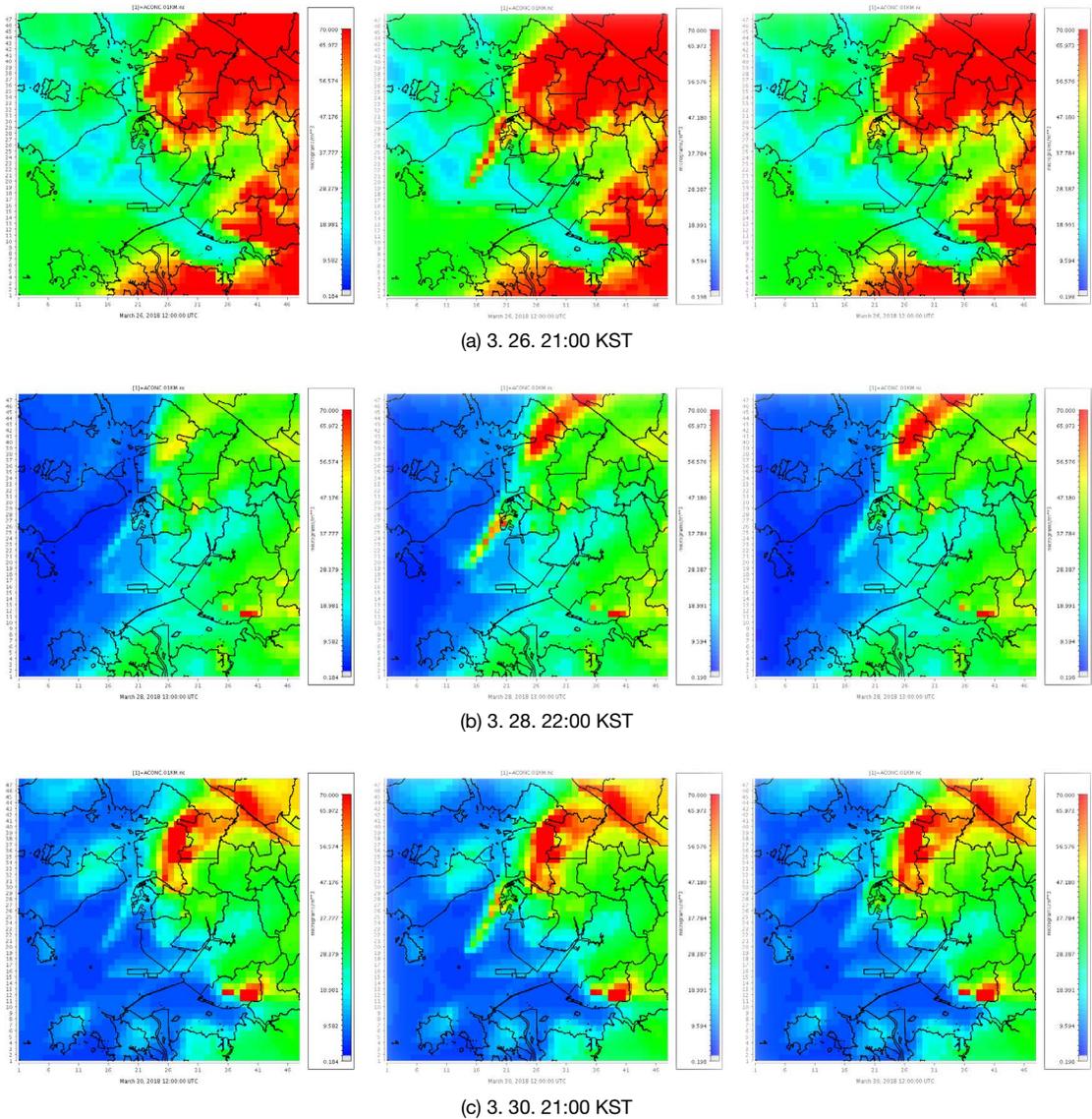


Fig. 9. Spatial distributions of PM<sub>2.5</sub> depending on cases for a episode period (left: CASE 1, middle: CASE 2, right: CASE 3).

이 풍하측 넓은 지역 범위로 분산되어 분포됨을 추정할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기존 CAPSS 자료가 아닌 PORT-MIS

자료를 이용하여 선박 배출량을 재산정하고 선박 배출량의 산정방법과 대기질 모델에의 적용방법에 대해서 고찰하기 위해, 우리나라 대표적 항만도시인 인천 지역을 대상으로 선박에서 배출되는 대기오염물질이 인근지역에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) PORT-MIS 자료를 이용하여 선박 배출량을 구축

한 결과, 선박의 대부분을 차지하는 화물선박에 대해 CAPSS 배출량과 비교하면 PM<sub>2.5</sub> 949 ton/yr (CAPSS 대비 4.94배 증가)로 산정되었다. 따라서 CAPSS 선박 배출량이 과소 평가되는 것으로 판단할 수 있으나, 본 연구에서 산정한 화물선박에 의한 배출량은 선박의 정상운영 기간과 수리 기간의 구분이 명확해지는 자료가 확보되어야 하며, 향후 최종 산정된 연료사용량과 실제 인천 항만에서 화물선박이 사용한 연료사용량의 비교를 통해 더 정확한 배출량 산정이 가능할 것으로 판단된다.

(2) 대기 모델링 적용을 위해 PORT-MIS 자료를 활용하여 인천항 내 외항선과 내항선의 월별 및 요일별 시간할당계수를 산출하였다. 시간 해상도를 적용하여 화물선박의 상세한 시간 배출량을 산정하였고, 이를 대기 모델링에 적용하는 방법에 대해서는 인천항 뿐만 아니라 부산항, 울산항, 여수항, 광양만 등 국내 주요 항만에 대해서도 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다.

(3) 에피소드 기간 동안 선박에 의한 PM<sub>2.5</sub> 평균 기여농도 (mean ± S.D.)에 대해, CAPSS 선박 배출량을 적용한 결과와 PORT-MIS 선박 배출량을 적용한 결과, PORT-MIS 선박 배출량 적용 및 배출 높이를 고려한 결과의 경우, 순서대로 신흥은 각각  $0.6 \pm 1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $3.2 \pm 5.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $2.6 \pm 4.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 송림은 각각  $0.4 \pm 0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $1.9 \pm 3.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $1.8 \pm 3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 부평은 각각  $0.2 \pm 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0.7 \pm 1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0.8 \pm 1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 산정되어 특정 기간에는 인천 동부에 위치한 부평지점까지도 선박 오염원에 의한 영향이 나타나 선박 오염원이 인천 전지역에 영향을 끼치고 있음을 확인할 수 있다. 단, 본 연구결과는 Zero-out 조건하에서 선박 오염원의 기여농도를 산정한 것으로 배출량 변동에 따라 비선형적인 농도 변화가 나타나는 배출량 민감도 분석 방법인 BFM 기법의 불확도에 대한 고려가 수반되어야 한다.

(4) 배기가스가 배출되는 연돌 (funnel)의 높이 및 직경 등은 선박 설계 시 중요하지 않은 설계 요인으로 치부되어 정확한 제원정보를 얻는 데 어려움이 많다.

또한 선박마다 다양한 규격으로 제작되어 연돌 높이에 대한 추정은 불확도가 존재하게 된다. 하지만 실질적으로 선박에서 배출되는 높이는 해수면에서부터 최소 30 m 이상의 높이에서 배출되는 것으로 조사된 바 오염물질 확산 영향을 보다 정확히 분석하기 위해서는 중요한 변수이므로 실시간 운항자료와 함께 선박 연돌 높이 등 제원정보 관리가 환경관리 정책적으로도 필요할 것으로 사료된다.

PORT-MIS, 선박 위치정보 시스템 (AIS) 등 다양한 연계를 통해 공간적, 시간적으로 시의성 있는 선박 배출량이 구축되고 연돌 높이 등 다양한 선박 제원 정보가 확보되면 선박 오염원에 의한 대기질 영향 예측의 정확도를 높일 수 있을 것으로 기대되며, 이는 인천항 뿐만 아니라 다른 항만지역의 대기질 개선에도 도움이 될 것으로 사료된다. 또한 선박뿐만 아니라 하역장비, 물류이동을 위한 화물차 등도 항만지역의 대표적인 3대 미세먼지 배출원이므로 이에 대한 추가적인 연구도 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2019년도 환경부 “환경 분야 시험·검사의 국제적 적합성 기반 구축” 사업에 따른 국고보조금이 일부 지원되어 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

## References

- 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.
- Borge, R., Alexandrov, V., José del Vas, J., Lumberras, J., Rodriguez, E. (2008) A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula, *Atmospheric Environment*, 42, 8560-8574, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.032>.
- 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.
- Guenther, A., Karl, T., Harley, P., Wiedinmyer, C., Palmer, P.I., Geron, C. (2007) 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-7-4327-2007>.
- Kim, D.Y., Choi, M.A., Yoon, B.M. (2019) Analysis of PM hot-spot emission zone in Seoul metropolitan area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(4), 476-501, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.4.476>.
- Kryza, M., Werner, M., Dore, A.J., Vieno, M., Blas, M., Drzeniecka-Osiadacz, A., Netzel, P. (2012) Modelling meteorological conditions for the episode (December 2009) of measured high PM<sub>10</sub> air concentrations in SW Poland - application of the WRF model, *International Journal of Environment and Pollution*, 50, 41-52, <https://doi.org/10.1504/IJEP.2012.051179>.
- 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>.
- 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.F., Hong, C.P., Huo, H., Jiang, X.J., Kang, S.C., Liu, F., Su, H., Zheng, B. (2015) 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>.
- Miglietta, M.M., Thunix, P., Georgieva, E., Pederzoli, A., Bessagnet, B., Terrenoire, E., Colette, A. (2012) Evaluation of WRF model performance in different European regions with the DELTA-FAIRMODE evaluation tool, *International Journal of Environment and Pollution*, 50, 83-97, <https://doi.org/10.1504/IJEP.2012.051183>.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2019) <http://www.mof.go.kr/article> (accessed on Nov. 10, 2019).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) National air pollutant emission calculation Manual III (in Korean).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016) A study of accuracy improvement of numerical air quality forecasting model (III).
- 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.

### Authors Information

- 이진숙 (인천광역시보건환경연구원 대기환경연구부 환경연구사, 서울시립대학교 환경공학과 박사과정)
- 최상인 (인천광역시보건환경연구원 대기환경연구부 환경조사과장)
- 이충대 (인천광역시보건환경연구원 대기환경연구부 대기보전과장)
- 방기인 (인천광역시보건환경연구원 대기환경연구부장)
- 권문주 (인천광역시보건환경연구원장)
- 동종인 (서울시립대학교 환경공학과 교수)