

# 광화학 수치모델을 활용한 부산지역 환경정책 - 대기질 개선 효과 분석

김민정\*· 김민경, 정유나, 윤하은, 김현실

대기진단평가팀

## A Study on the Effects of Environmental Policies on Air Quality in Busan using Photochemical Models

Kim Min jung\*, Kim Min Kyeong, Jeong Yu Na, Yun Ha Eun, Kim Hyun Sil

*Air Quality Monitoring and Assessment Team*

### Abstract

Busan is a region where ports, industrial complexes, commercial, and residential areas coexist, making it affected by both mobile and stationary emission sources. Therefore, region-specific countermeasures for PM-2.5 reduction are required.

In this study, the PM-2.5 concentration and composition characteristics in Busan were analyzed, and the Community Multiscale Air Quality(CMAQ) model was utilized to evaluate the reduction effects of key pollutants, CO and NO<sub>x</sub>, from stationary emission sources, specifically industrial combustion, which are relatively easier to control. Scenario analysis revealed that reducing CO and NO<sub>x</sub> emissions from industrial combustion by 50% and 100% resulted in little difference in PM-2.5 concentration reduction. However, there was an average reduction of 3.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  annually and 6.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  on high pollution days, suggesting that halving the emissions of CO and NO<sub>x</sub> can still achieve meaningful improvements in PM-2.5 concentrations.

Notably, significant improvements were observed not only in industrial areas heavily impacted by industrial combustion but also in areas with relatively lower contributions from industrial sources, due to emission reductions in nearby industrial complexes. However, due to the nonlinear nature of PM-2.5 formation, reductions in NO<sub>x</sub> emissions from industrial combustion were found to promote the formation of NO<sub>3</sub> in certain areas, adversely affecting PM-2.5 concentrations. This phenomenon is attributed to the NO<sub>x</sub>-rich conditions of Busan, where ports and industrial complexes are concentrated. In conclusion, effective PM-2.5 management in Busan requires additional NO<sub>x</sub> reduction measures combined with NH<sub>3</sub> emission controls. Furthermore, it is essential to establish a tailored management system that reflects regional emission characteristics. Specifically, emission reductions from mobile sources around ports and industrial complexes, as well as measures to control fugitive dust and mobile sources in residential and commercial areas, should be implemented

to achieve comprehensive PM-2.5 improvement.

**Key words** : PM2.5, CMAQ, CO, NOx, Industrial combustion, Emission reduction

## 1. 서론

미세먼지(Particulate Matter, PM)는 대기 중에 부유하는 직경 10  $\mu\text{m}$  이하의 고체상 또는 액체상 물질로 이 중 2.5  $\mu\text{m}$  이하의 입자를 초미세먼지(PM-2.5)로 분류한다. 미세먼지는 호흡을 통해 폐를 거쳐 혈관에 침투하여 폐, 호흡기, 심혈관계 등에 다양한 질환을 유발 시킴과 동시에 조기사망률에도 영향을 미치는 것으로 잘 알려져 있다.<sup>1)</sup>

미세먼지의 인체유해성이 심각한 사회 문제로 인식됨에 따라, 이러한 문제를 해결하기 위해 정부에서는 『미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법』을 시행하여 고농도 미세먼지 발생 시 자동차 운행의 제한, 대기오염물질 배출시설의 가동 시간 조정 등을 통해 고농도 미세먼지 발생 빈도와 농도 감소를 위한 법적 근거를 마련하였다.

이에 따라 지자체들은 해당 법에 근거하여 미세먼지 관리 종합계획 등을 수립하여 시행하고 있으며, 부산시에서도 중소기업 저녹스 버너 설치 지원, 친환경 자동차 지원 및 노후 경유차 저감 사업, 선박유 항 함량 기준 강화 등 대기질 개선을 위한 다양한 배출량 저감 대책을 통해 미세먼지 생성물질(SOx, NOx 등)의 배출을 집중적으로 관리하고 있다.

우리원에서 발표한 2023년 대기오염도 조사결과에 따르면, 이러한 정책적 노력으로 부산시의 초미세먼지 연평균 농도는 개선 추세를 보이고 있다. 그러나 초미세먼지 농도는 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (녹산동, 덕포동) ~ 11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (태종대) 권역별로 약간의 차이<sup>2)</sup>를 보이는 것으로 나타났다. 이는 각 권역의 주된 배출원과 발생하는 대기오염물질의 종류 및 배출량이 다양할 뿐만 아니라 발생원, 농도, 조건, 상호작용 등 비선형적인 초미세먼지의 생성 특성<sup>3)</sup>에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 정책에 따라 대기오염물질을 일괄적으로 삭감하더라도 각 권역별로 초미세먼지의 개선효과가 달라질 수 있음을 보여준다. 이에 따라 어떤 오염원의 어떤 물질을 어느정도 삭감하는 것이 각 권역의 초미세먼지 농도 개선에 가장 효과적인지를 분석할 필요가 있다.

특히 부산은 대표적인 항만도시로서 상업, 공업, 주거지역을 모두 포함하고 있는 특성상, 비도로이동오염

원(선박, 항공)과 도로이동오염원 뿐만 아니라 산업단지와 같은 고정배출원이 대기오염에 큰 영향을 미치고 있으며, 이들 배출원에서 초미세먼지 생성 원인물질인 CO와 NOx, VOC 등 대기오염물질이 상당량 배출<sup>4)</sup>되는 것으로 조사되었다. 환경부 국가미세먼지정보센터의 대기정책지원시스템((Clean Air Policy Support System: CAPSS)에 따르면 부산시의 주요 배출원은 비도로이동오염원과 도로이동오염원으로 조사되었으나, 해당 배출원은 이동하는 특성상 오염원의 제어와 관리의 어려운 점이 많다. 이에 반해 공업단지에서 발생하는 고정오염원은 상대적으로 제어가 용이하고, 효과적인 저감대책을 추진할 수 있으므로 고정오염원의 배출 저감이 부산시 초미세먼지 농도 개선에 보다 효율적일 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 우리원에서 운영 중인 대기오염 진단평가 시스템(CMAQ)을 활용하여 2023년도 부산시 지역별 미세먼지의 특성을 분석하고, 부산시의 주요 미세먼지 저감 대책 사업 중 하나인 ‘중소기업 저녹스버너 설치지원’과 관련된 공단지역에서 발생하는 주요 배출물질량을 삭감하는 시나리오를 설정하여 대기질 개선 효과를 분석, 평가하였다. 이를 통해 부산지역 특성에 맞는 미세먼지 관리를 위한 우선순위와 정책적 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 대기환경 측정자료

부산시의 권역별 대기환경 수준을 평가하고, 대기오염 진단평가 시스템 모델링 결과의 적합성을 평가하기 위해 우리원에서 운영 중인 도시대기측정소(28개소)의 2023년도 시간별 자료를 활용하였다(Fig. 1).



Fig. 1 Air Quality Monitoring stations in Busan(2023)

## 2.2 대기질 모델링(CMAQ)

본 연구에서는 우리원에서 운영 중인 대기오염 진단 평가 시스템의 CMAQ (Community Multiscale Air Quality modeling System) 모델을 활용하였다. CMAQ은 미국 환경보호청(EPA; Environmental Protection Agency)에서 개발된 3차원 광화학 대기 질 모델로 대기 중 오염물질의 농도 예측 뿐만 아니라 미세먼지와 같은 대기오염물질의 형성, 이동, 확산, 침적 그리고 화학반응을 상세히 모델링 할 수 있는 프로그램이다. 이러한 장점으로 국내·외에서 초미세먼지의 효과적인 관리를 위해 오염원의 기여도 분석과 농도 변화 평가 등 다양한 연구에 활발히 활용되고 있다.

대기오염 모델링에 입력되는 기상입력자료는 기상장 모델인 WRF (Weather Research Forecast)를 사용하여 생성하였으며, WRF 모델에 입력되는 초기 기상장은  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 의 해상도로 제공되는 6시간 간격의 NCEP FNL (National Center for Environmental Prediction-Final) 재분석 자료를 사용하였다. FNL 재분석 자료는 지표 기상관측 자료와 지형고도 등의 자료로 1차 계산된 자료를 다시 재분석하여 결과의 신뢰도를 높인 자료로써, 과거 사례의 수치모델을 수행하는 데에 높은 신뢰도를 기대할 수 있다.<sup>5)</sup>

모델에 입력되는 배출량 자료를 생성하기 위해서 미국 EPA에서 제공하는 SMOKE (Sparse Matrix

Operator Kernel Emissions) 모델을 사용하였다. SMOKE 모델에 입력되는 초기 배출량자료로 국외 배출량의 경우 중국의 MEIC (Multi-resolution Emission Inventory for China), 중국을 제외한 아시아 지역은 REAS (Regional Emission Inventory in Asia) 배출량 자료를 이용하였고, 국내 배출량 자료는 환경부 국가미세먼지정보센터의 대기정책지원시스템 (CAPSS)에서 공개된 2020년 배출원 자료를 사용하였다.

모사영역은 동지격자(nesting-down) 기법을 적용하여 동아시아 27 km 수평해상도 영역으로부터 한반도 9 km, 영남권 3 km, 부산지역 1 km 격자 영역으로 4단계 동지격자 체계로 구성하였고, 부산시 내 지역별 상세한 평균 농도를 계산하기 위해 도메인 4의 격자에 대하여 859개의 격자로 나누어 지역별로 평균 농도를 계산하였다(Table 1, Fig. 2).

## 2.3 배출량 자료

환경부에서 매년 발표하고 있는 CAPSS는 대기오염 물질 배출원 분류체계에 의하여 점·면·이동오염원에서 배출되는 9가지 대기오염물질(CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, TSP, PM-10, PM-2.5, VOC, NH<sub>3</sub>, BC) 배출량을 1 km × 1 km 공간해상도에 따라 나타낸 국가 대기오염물질자료이다.<sup>4)</sup> 2020년 CAPSS 자료에 의하면, 부산시의

Table 1. Domain Configuration of the CMAQ Model

|                  | Model domain | Grids information                                                                                              |
|------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Horizontal grids | Domain 1     | 174 × 128 × 27 km                                                                                              |
|                  | Domain 2     | 67 × 82 × 9 km                                                                                                 |
|                  | Domain 3     | 83 × 83 × 3 km                                                                                                 |
|                  | Domain 4     | 78 × 70 × 1 km                                                                                                 |
| Vertical levels  | Sigma levels | 1.000, 0.995, 0.990, 0.985, 0.970, 0.950, 0.930, 0.910, 0.880, 0.840, 0.800, 0.740, 0.700, 0.600, 0.450, 0.000 |

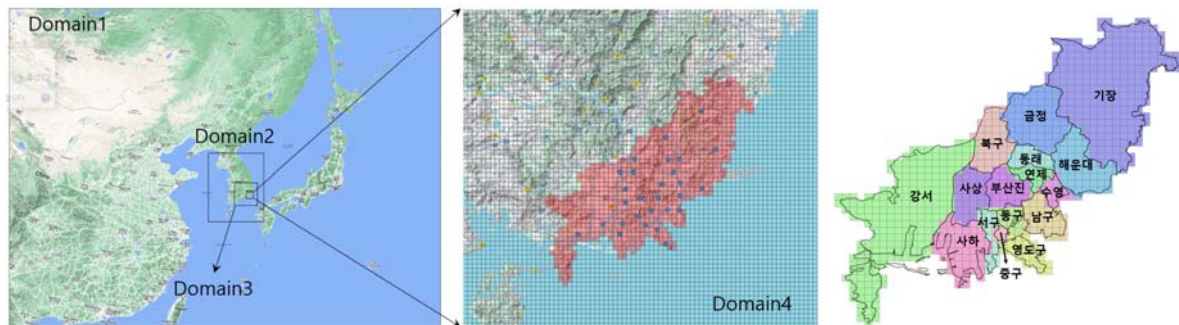


Fig. 2 Domain Configuration of the CMAQ Model

대기오염물질 배출원은 크게 13개의 대분류로 나누어져 있으며, 최대 배출오염물질로는 NO<sub>x</sub>(43,099 ton/yr), VOC(33,447 ton/yr), CO(22,210 ton/yr)

순으로 나타났다. 이는 주로 교통, 산업시설, 발전소와 같은 주요 배출원에서 발생한 것으로 나타났다(Table 2).

Table 2. Air pollutant emissions by Source in Busan, 2020

| Category                             | CO     | NO <sub>x</sub> | SO <sub>x</sub> | TSP    | PM-10 | PM-2.5 | VOC    | NH <sub>3</sub> | BC  |
|--------------------------------------|--------|-----------------|-----------------|--------|-------|--------|--------|-----------------|-----|
| Other surface emission sources       | 372    | 9               | 0               | 24     | 15    | 14     | 31     | 848             | 1   |
| Agricultural activities              | 0      | 0               | 0               | 0      | 0     | 0      | 0      | 164             | 0   |
| Road transport pollution sources     | 7,549  | 11,754          | 10              | 150    | 150   | 138    | 1,799  | 92              | 71  |
| Non-Road Transport pollution sources | 9,381  | 23,006          | 2,028           | 1384   | 1,383 | 1,270  | 3,688  | 4               | 309 |
| Fugitive duse                        | 0      | 0               | 0               | 14,701 | 4,753 | 779    | 0      | 0               | 3   |
| Non-industrial combustion            | 1,645  | 4,715           | 225             | 51     | 49    | 40     | 172    | 71              | 11  |
| Biomass combustion                   | 826    | 22              | 1               | 137    | 96    | 82     | 258    | 0               | 8   |
| production process                   | 0      | 383             | 669             | 16     | 12    | 8      | 223    | 17              | 0   |
| Energy industry combustion           | 1,874  | 1,417           | 189             | 54     | 54    | 51     | 252    | 240             | 16  |
| Energy transport and storage         | 0      | 0               | 0               | 0      | 0     | 0      | 588    | 0               | 0   |
| Use of organic solvents              | 0      | 0               | 0               | 0      | 0     | 0      | 25,275 | 0               | 0   |
| Indeustrial combustion               | 518    | 1,612           | 328             | 202    | 120   | 49     | 67     | 24              | 4   |
| Waste treatment                      | 45     | 180             | 28              | 6      | 4     | 4      | 1,095  | 1               | 0   |
| Total                                | 22,210 | 43,099          | 3,481           | 16,726 | 6,636 | 2,436  | 33,447 | 1,462           | 424 |

## 2.4 부산시 대기오염 저감정책

대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법 제9조에 근거하여 동남권 지역의 대기오염원을 체계적으로 관리하기 위하여 2020년부터 2024년까지 동남권 대기환경관리 기본계획이 수립되어 시·도지사는 매년 시행계획 추진실적을 확인하고 있다.

부산시는 대한민국의 대표적인 항만도시로서 상업, 공업, 주거지역을 모두 포함하고 있는 특징을 가지고 있다. 이러한 지역적 특성을 고려하여 부산시는 동남권 대기환경 기본계획을 바탕으로 지역 내 배출원을 효과적으로 관리하기 위하여 Table 3의 대기오염저감정책을 시행하고 있다.

## 2.5 수치모의 실험설계

부산시 지역 내 배출량 감소가 초미세먼지 농도에 미치는 영향을 분석하기 위해 2023년 1월 ~ 12월을 대상으로 부산시 지역 내 초미세먼지 농도 변화를 수치모의 실험하였다.

본 연구에서는 초미세먼지 농도에 영향을 미치는 특정 배출원의 감축이 대기질 개선에 미치는 효과를 정량적으로 확인하고자 하였다.

수치모의 실험은 CAPSS 2020 배출량을 기반으로 한 Base case와 초미세먼지 농도에 영향을 미치는 주요 물질의 배출량을 인위적으로 감소시킨 Reduce case로 나누어 실행하였다.

CAPSS(2020) 자료에 따르면, 부산시는 비도로이동오염원과 도로이동오염원이 가장 큰 비중을 차지하였다. 그러나 본 연구에서는 부산시의 주요 대기환경 정책 중 고정오염원 관련 정책인 중소기업 사업장의 '저녹스버너 설치 지원'을 선택하여, CAPSS의 대기오염 배출원 대분류 중 '제조업연소'에서 주로 발생하는 CO

와 NOx의 배출량을 각각 100%, 50% 감소시키는 조건으로 모델을 수행하였다.

CO와 NOx는 제조업연소 부문에서 가장 많이 배출되는 주요 대기오염물질로 임소영 외(2017)의 연구에 따르면 이들 물질은 2차 초미세먼지 형성에 중요한 영향을 미치는 전구물질인 것으로 나타났다.<sup>6)</sup> 따라서 해당 물질의 감소는 초미세먼지 농도 변화에 직접적인 영향을 미칠 것으로 기대된다. 또한 이동오염원에 대한 대기오염물질 배출량의 기여도가 크지만, 제조업연소는 특정 지역(산업단지 등)에 배출이 집중되는 경향이 있으므로 배출량 감소에 따른 초미세먼지 농도 개선 효과를 지역적으로 정밀하게 분석할 수 있을 것이라 판단된다.

Table 4. Total amount of emissions in Busan from CAPSS 2020 inventory and reduced amount of emissions applied for the sensitivity simulation

| 항목    |                            | CO          | NOx       |
|-------|----------------------------|-------------|-----------|
| Base  |                            | 2020, CAPSS |           |
| Case1 | Energy industry combustion | 518 ton     | 1,612 ton |
|       |                            | (100%)      | (100%)    |
| Case2 |                            | 259 ton     | 806 ton   |
|       |                            | (50%)       | (50%)     |

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 대기오염물질 배출 현황

환경부 국가미세먼지정보센터에서 공개되는 2020년 대기오염물질 배출량 통계(시·군·구별)를 바탕으로 부산시 내 각 지역별 대기오염물질 배출량 현황을 살펴해보았다.

CO(일산화탄소) 배출량은 해운대구에서 4,900 ton

Table 3. Major Air quality policies in Busan

| Category |                                      | Items                                                            |
|----------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 1        | Emission facility                    | Low-NOx Burner installation support                              |
| 2        | Road transport pollution sources     | Early retirement of old deesel vehicles                          |
| 3        |                                      | Restriction on operation of Old diesel vehicle(DPF installation) |
| 4        |                                      | Expansion of green vehicle distribution                          |
| 5        |                                      | Expansion of hydrogen, Electric Buses & Trucks distribution      |
| 6        | Non-Road transport pollution sources | Strengthening of sulfur content standards for marine fuel        |
| 7        | Residential emission sources         | fugitive dust suppression vehicle                                |
| 8        |                                      | Low-NOx boiler                                                   |

(22.1%)으로 가장 높았으며, 사하구 3,238 ton(14.6%), 수영구 2,429 ton(10.9%), 강서구 2,342 ton(10.5%) 순으로 나타났다. CO의 주요 배출원은 선박 및 건설장비에 의한 것으로 나타났으며, 해운대구와 수영구는 요트경기장 내 레저용 선박, 사하구와 강서구는 화물선이 주요 배출원으로 나타났다.

NOx(질소산화물)의 배출량은 강서구에서 8,909 ton(20.7%)으로 가장 많았고, 사하구 7,858 ton(18.2%), 남구 4,064 ton(9.4%) 순으로 나타났다. 이들 지역은 항만 인근에 위치하였으며, 중유를 사용한 화물선에서 배출되는 NOx의 영향을 받은 것으로 나타났다. 특히 강서구는 인근에 위치한 공항 내 항공기에서 배출되는 NOx의 영향도 있는 것으로 나타났다.

SOx(황산화물)의 배출량은 강서구에서 1,344 ton(38.6%), 사하구 1,004 ton(28.8%)로 가장 많이 배출되었으며, 그 외 다른 지역은 상대적으로 낮은 배출량을 보였다. SOx의 주요 배출원은 항만에서의 화물선과 인근 공항

내 항공기에서 배출되는 것으로 나타났다.

PM-2.5(초미세먼지) 배출량은 강서구에서 438 ton(18.0%)로 가장 많았으며, 사하구 395 ton(16.2%), 해운대구 224 ton(9.2%) 순으로 나타났다. 이는 주로 항만 내 화물선 및 건설장비에 의한 것으로 나타났다.

VOCs(휘발성유기화합물)는 강서구에서 4,991 ton(14.9%)으로 가장 높은 배출량을 나타내었고, 그 뒤로 해운대구 4,253 ton(12.7%), 사하구 4,091 ton(12.2%) 순으로 나타났으며, NH<sub>3</sub>(암모니아)는 강서구에서 324 ton(22.2%)으로 가장 많이 배출되고, 사하구 176 ton(12.0%), 해운대구 124 ton(8.5%) 순으로 나타났다. VOCs와 NH<sub>3</sub>의 주요 배출원 또한 선박에 의한 영향인 것으로 나타났다(Fig. 3).

CAPSS 2020 자료를 바탕으로 분석한 결과, 대체로 공업지역 및 항만이 인접한 지역에서 대기오염물질 배출량이 높게 나타났다. 이는 대기오염물질의 분포는 주로 공업지역이 포진되어 있는 서부산권 또는 선박

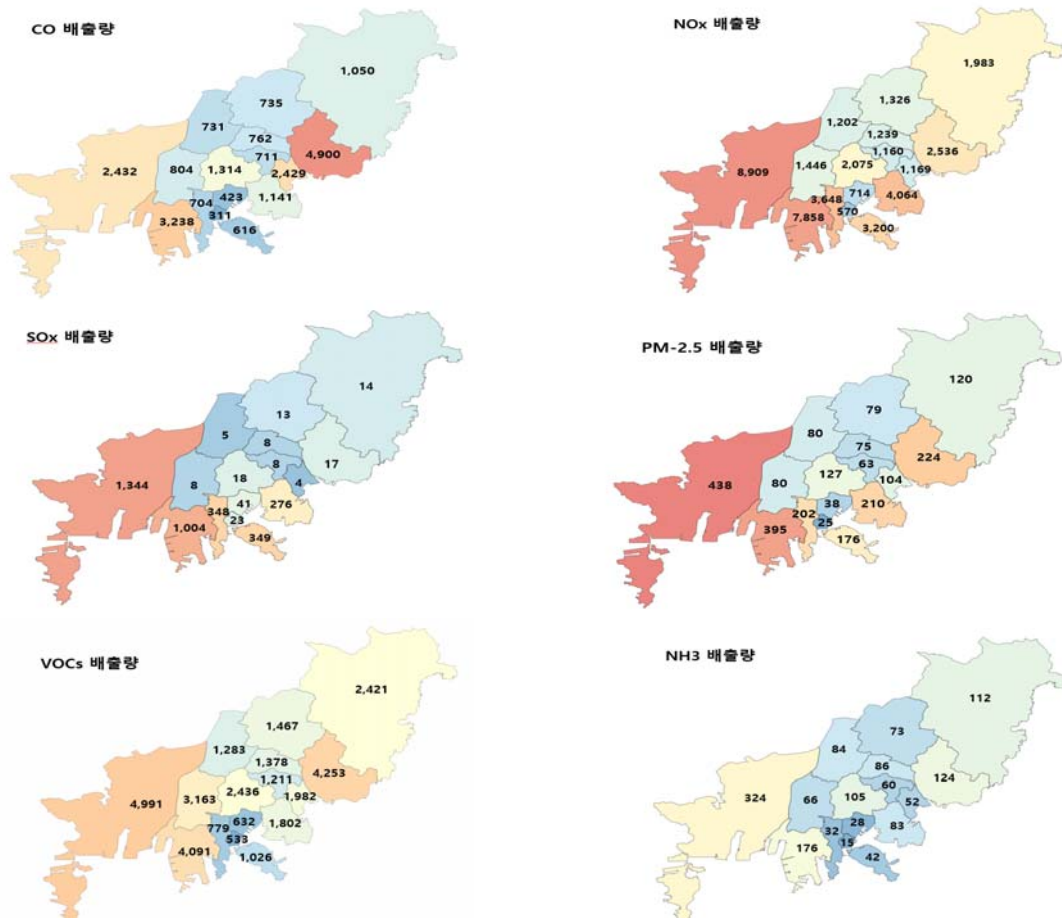


Fig. 3 Annual emissions by district

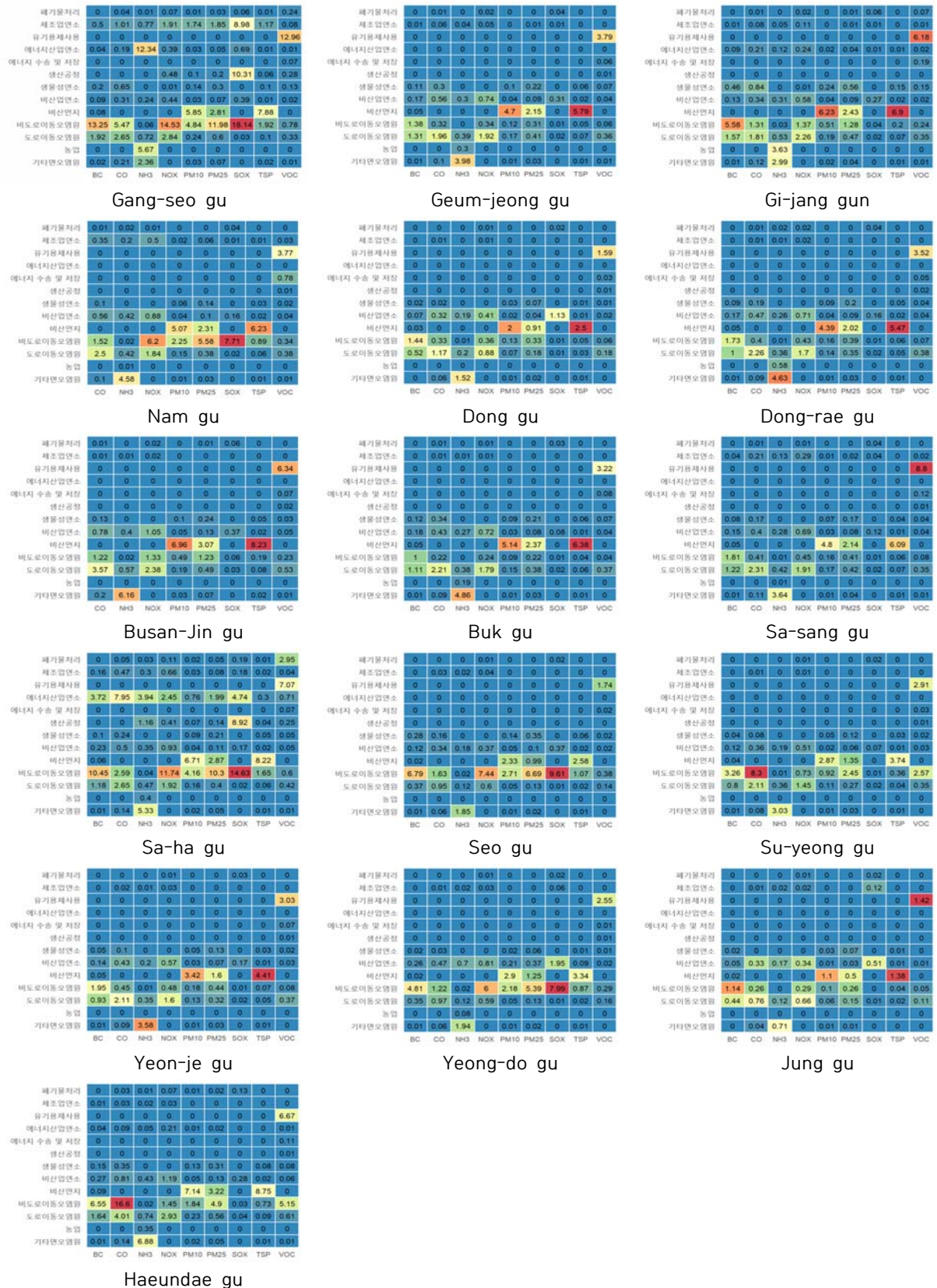


Fig. 4 Proportional contribution(%) of Air pollutant emissions by source and type

입출항 및 화물차 이동량이 많은 항만 지역에 분포한다<sup>7)</sup>는 선행연구와 일치하는 것으로 나타났다.

부산시 지역별 대기오염물질의 주요 배출원은 크게 비도리이동오염원, 도로이동오염원, 비산먼지로 나타났다. 각 지역은 산업, 상업, 주거 특성에 따라 주요 배출원이 상이하게 나타났다.

(준)공업단지가 산재해 있고, 항만이 인접한 강서구, 남구, 사상구, 사하구, 해운대구의 경우, 비도리이동오염원의 비율이 높게 나타났다. 주요 배출원으로는 선박, 항공, 건설장비 등이 있었으며, 이들 지역에서 배출된 SOx, NOx, TSP(총부유물질)는 주로 인접해 있는 항만 내 화물선에서 발생하는 것으로 나타났다. 특히 강서구는 공항과 인접하여 항공기에서 배출된 SOx와 NOx의 비율이 다른 지역에 비해 높게 나타났다.

연제구, 부산진구, 중구와 같은 상업지역에서는 비산먼지의 비율이 상대적으로 높게 나타났다. 이는 차량 운행에 의한 도로 재비산먼지와 건설공사, 학교 운동장에서 발생하는 1차 PM-2.5와 TSP 배출량에 의한 것으로 나타났다.

주거지역이 주로 분포하는 금정구, 기장군, 동구, 동래구, 북구, 서구, 수영구, 영도구에서는 비산먼지, 도로이동오염원, 비도리이동오염원이 주요 배출원으로 나타났다. 주요 배출 물질로는 NOx와 SOx, TSP가 있으며, 이는 도로이동오염원(자동차), 건설장비 및 선박 등에 의한 것으로 나타났다.

본 연구에서 배출량 저감 시나리오에 적용된 ‘제조업연소’는 강서구, 사하구, 남구, 사상구에서 높은 비율을 차지하였으며, 이들 지역은 모두 (준)공업단지가 산재해 있는 산업 중심지의 특성을 보였다. 특히 강서구는 다른 지역에 비해 제조업 연소에서 배출되는 SOx의 비율이 8.98%로 다른 지역보다 월등히 높았는데, 이는 제조 공정에서 사용되는 유연탄이 주요 원인으로 나타났다. 그 외 NOx(1.91%), PM-2.5(1.85%), CO(1.01%)의 배출 비율도 높은 것으로 나타나 대규모 산업단지의 영향을 받은 것으로 판단된다. 사하구, 남구, 사상구의 경우 주로 제조업 공정로와 연소시설에서 발생하는 NOx와 CO가 주요 배출물질로 나타났다.

강서구, 사하구, 남구, 사상구를 제외한 다른 구에서는 제조업 연소의 배출 기여도가 상대적으로 매우 낮게 나타났으나, 금정구, 기장군, 동구 등에서는 소규모 제조업체에서 발생하는 CO와 NOx의 배출이 확인되었다.

CPASS 2020 자료에 따르면 제조업 연소 중 CO와

NOx의 배출은 주로 LNG 연료를 사용한 공정로 및 연소시설에서 발생하는 것으로 나타났다. LNG 연료는 석탄이나 중유에 비해 대기오염물질 배출량은 상대적으로 적지만, 기동 시 가스터빈의 불완전 연소에 의해 고농도의 CO(~ 2,000 ppm), NO<sub>2</sub>(~ 70 ppm), NO(~ 80ppm)가 발생<sup>8)</sup>하는 것으로 알려져 있다.

환경개선을 목적으로 석탄, 석유에서 천연가스 시설로 전환함에 따라 천연가스 연소에 따른 대기오염물질 배출량이 급증하는 추세<sup>9)</sup>로 제조업연소에서 발생하는 CO와 NOx의 배출량 저감은 초미세먼지 농도 저감에 효과적일 것으로 판단된다.

### 3.2 모델적합성 검증

본 연구에서 모델의 타당성을 확인하기 위해 부산시 도시대기측정소 28개소의 초미세먼지 일평균값과 모델링 격자 중 같은 지점의 초미세먼지 일평균 값(Base case)을 비교하여 분석하였다.

분석결과, 고농도 시기에 모델 결과가 과대모의 하는 경향이 보였으나, 전반적으로 실측치의 변화를 잘 모사하는 것으로 나타났다. 특히 초미세먼지 농도의 변동 패턴에서 높은 유사성을 보였고, 계절적 변화와 단기적 변동을 잘 모사하는 것으로 나타났다.

관측자료와 모델자료의 적합성을 평가하기 위해, 관측값에 대한 편향성(NMB), 오차율(NME), 그리고 관측값과 모델값의 상관관계수(r)을 계산하였다. 이를 위해 Emery et al.(2017)<sup>10)</sup>의 연구에서 제시한 방법을 활용하였다.

$$\text{NMB(Normalized mean bias)} = \frac{\sum (P_i - O_i)}{\sum O_i} \times 100$$

$$\text{NME(Normalized mean error)} = \frac{\sum |P_i - O_i|}{\sum O_i} \times 100$$

$$\text{r(Correlation Coefficient)} = \frac{\sum [(P_i - \bar{P}) \times (O_i - \bar{O})]}{\sqrt{\sum (P_i - \bar{P})^2 \times \sum (O_i - \bar{O})^2}}$$

편향성과 오차율은 모델링 결과가 관측값에 비해 과대 또는 과소 추정되었는지를 정량적으로 평가할 수 있는 지표로 각각 모델의 편향정도와 예측 정확성을 나타낸다. 상관관계수(r)는 모델 결과와 관측값 간의 동시 변화 경향을 평가하는데 사용되며, 모델링 결과의 시뮬레이션 성능을 판단하는 중요한 지표이다.

Emery et al. (2017)의 연구에서는 NMB, NME, r 값에 따라 모델결과의 등급을 “보통”과 “좋음”의 그룹으로 구분하였다. 본 연구에서 NMB는 0.58로 “좋음”

등급에 속하였으며, 이는 모델이 관측값과 비교적으로 높은 수준의 일치성을 보인 것으로 나타났다. NME는 37.68%로 “보통” 등급에 속하며, 이는 모델링 결과의 예측 오차가 허용가능 범위에 있음을 보여준다. 상관 계수는 0.70으로 “보통” 등급에 속하여 모델링 결과와 관측값 간의 동시 변화 경향이 일정 수준 이상 일치함을 보였다(Table 5).

분석결과, 관측값과 일 변화 패턴을 모델링 결과가 비교적 유사하게 묘사하였으며, NMB, NME, r 값 또한 선행연구에서 제시된 활용 가능 기준 범위에 만족하였다. 이를 통해 본 연구에서 활용된 모델링 결과로 부산지역의 초미세먼지 농도를 정량적으로 평가·예측할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 배출량 저감에 따른 초미세먼지 변화 분석

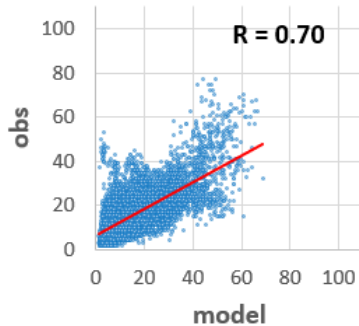
#### 3.3.1 초미세먼지 평균 농도 변화(연평균)

CMAQ 모델을 활용한 Case별 부산시 지역 전체 격자의 초미세먼지 연평균 농도를 Fig. 7에 나타내었다.

기존 배출량(이하 Base case)을 적용한 결과, 부산시의 초미세먼지 연평균농도는  $15.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  로 계산되었으며, Case1(CO, NOx 100% 삭감)과 Case2(CO, NOx 50% 삭감)에서는 평균 초미세먼지 농도가 모두  $11.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. Case1과 Case2 간의 농도 차이는 거의 없었으나, Base case 대비 연평균 초미세먼지 농도가  $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  감소한 것으로 나타났다. 이는 제조업 연소에서 발생하는 CO와 NOx의 배출량 삭감이 초미세먼지 농도 저감에 유의미한 영향을 미치는 것으로 판단된다.



Fig. 5 Daily mean PM-2.5 variations : Observations and CMAQ model results



|                                                 |          | NMB(%)           | NME(%)       | r             |
|-------------------------------------------------|----------|------------------|--------------|---------------|
| Comparison of observed and Model Daily averages |          | 0.58             | 37.68        | 0.7           |
| Reference                                       | good     | $\langle \pm 10$ | $\langle 35$ | $\rangle 0.7$ |
|                                                 | moderate | $\langle \pm 30$ | $\langle 50$ | $\rangle 0.4$ |

Fig. 6 CMAQ model suitability assessment

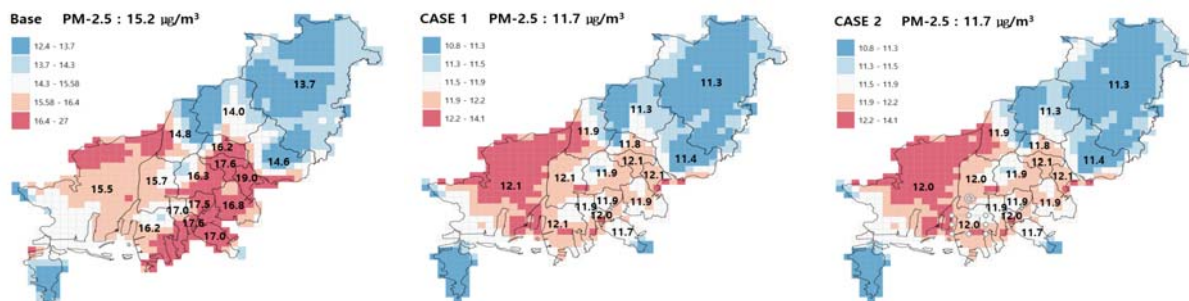


Fig. 7 Annual average PM-2.5 concentration by case

지역별 초미세먼지 농도의 평균 분포를 살펴보면, Base case에서 최고 농도는 수영구  $19.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 계산되었고, 최저 농도는 기장군  $13.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 계산되었다. 금정구, 기장군, 북구, 해운대구를 제외한 나머지 지역에서 초미세먼지 연평균 농도가 연평균 대기환경기준( $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )을 초과하였고, 남부 해안가 지역과 부산의 중심지에서 상대적으로 높은 농도를 보였다.

초미세먼지 농도가 제일 높게 나타난 수영구의 경우, 3.1 대기오염물질 배출 현황 결과 대기오염물질 배출은 다른 지역(공업단지 인근 지역)에 비해 상대적으로 낮게 나타났다. 이는 수영구 자체 배출량보다는 주변 지역(남구, 해운대구 등)에서 유입된 배출물질, 교통 밀집으로 인한 국지적 영향, 그리고 대기오염물질 간의 비선형적 화학반응 및 대기 정체 현상 등이 모델에서 복합적으로 작용한 결과로 판단된다. 가장 낮은 농도가 나타난 기장군의 경우, 지역 면적 대비 발생하는 대기오염물질 배출량이 적고, 주요 공업단지와 거리가 멀어 외부 배출원의 영향을 상대적으로 덜 받는 위치에 있어 초미세먼지 농도가 다른 지역 대비 낮은 것으로 판단된다.

또한 지역별 배출 특성을 고려해 보았을 때, 대기환경기준을 초과한 지역은 인근에 항만과 크고 작은 공업단지가 인접해 있거나, 도심지역으로 교통량 밀집과 같은 지역적 특성이 있는 것으로 나타났다.

Case1과 Case2의 모델 결과를 살펴보면, 두 시나리오 간 초미세먼지 농도 차이는 거의 없었으며, 모든 지역에서 초미세먼지 농도가 연평균 대기환경기준 이내로 감소한 것을 확인할 수 있었다. 두 시나리오에서 평균 최고 농도는 강서구, 사상구, 사하구, 수영구, 연제구에서  $12.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 계산되었고, 최저 농도는 금정구와 기장군에서  $11.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 계산되었다. 제조업 연소에서 CO와 NOx의 배출량이 상대적으로 많았던 강서구, 남구, 사하구, 사상구에서는 다른 지역에 비해 다소 높은 농도를 보였으나, 최대 차이가  $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 불과해 모든 지역의 초미세먼지 농도가 비슷한 수준인 것으로 나타났다.

Base와 두 case의 초미세먼지 농도 차이를 살펴보면, 제조업 연소에서 발생하는 CO와 NOx의 삭감으로 모든 지역에서 초미세먼지 농도가 평균  $4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  감소되어 초미세먼지 농도가 개선된 것을 볼 수 있었다. Base case에서 높은 농도를 보인 중부 및 남부 지역의 초미세먼지 농도가 상대적으로 많이 감소 되었으며,

특히 수영구에서  $6.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 제일 많이 감소되었다. 수영구는 제조업 연소에서 발생하는 CO와 NOx의 배출량이 매우 적었음에도 초미세먼지의 감소가 가장 높았다. 이를 통해 수영구가 인근 지역의 사업장에서 발생하는 CO와 NOx의 영향을 상대적으로 많이 받는 것으로 판단된다. 반면 기장군의 경우 Base case 대비  $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 적게 감소하였다. 이는 초기 초미세먼지 농도가 가장 낮게 나타남에 따라 초미세먼지 농도의 감소 폭이 상대적으로 적은 것으로 판단되며, 지역 내 주요 배출원(비도로오염이동원, 비산먼지 등)의 배출량이 상대적으로 낮아 2차 생성 과정의 영향이 적은 것으로 판단된다.

제조업 연소에서 발생하는 CO와 NOx의 배출량이 상대적으로 많았던 강서구, 남구, 사하구, 사상구에서는 Base case 대비  $3.4(\text{강서구}) \sim 4.9 \mu\text{g}/\text{m}^3(\text{남구})$ 로 감소한 것을 보였다. 제조업 연소가 직접 배출원이 아닌 수영구 대비 감소량이 다소 적었으나, 해당지역의 Base case 농도( $15.5 \sim 16.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 고려했을 때 22 ~ 29%의 감소폭을 보여 제조업 연소 외에 비도로이동오염원의 영향을 크게 받는 해당 지역 특성을 고려했을 때 상당한 개선 효과가 있는 것으로 판단된다.

### 3.3.2 초미세먼지 성분 분포 변화(연평균)

CMAQ 모델을 활용한 Case별 전체 격자의 초미세먼지 성분 분포를 Fig. 8에 나타내었다.

Base와 두 개의 Case의 초미세먼지 성분을 분석한 결과, NO<sub>3</sub>와 SO<sub>4</sub>의 비율이 가장 높은 것으로 나타났으며 이는 산업단지와 항만, 도로이동오염원에서 배출되는 NOx와 SOx의 영향에 의한 것으로 판단된다.

각 case별 성분을 살펴보면, Base case의 초미세먼지 성분은 NO<sub>3</sub> 26.2%( $3.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), SO<sub>4</sub> 23.2%( $3.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Primary(1차 배출 초미세먼지) 17.4%( $2.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 순으로 나타났다. 2차로 생성된 성분(NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>) 비율은 초미세먼지의 전체 농도의 65.8%로 높은 비중을 보여 부산시 지역의 초미세먼지가 주로 2차 생성과정에 의해 형성된 것으로 판단된다.

Case1에서는 NO<sub>3</sub> 38.6%( $4.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), SO<sub>4</sub> 20.3%( $2.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), NH<sub>4</sub> 19.1%( $2.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )로 나타났으며, Case2에서는 NO<sub>3</sub> 38.7%( $4.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), SO<sub>4</sub> 20.3%( $2.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), NH<sub>4</sub> 19.1%( $2.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )로 분석되어 두 시나리오 간 농도 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 Base case와 마찬가지로 2차로 생성된 성분은 초미세먼지 전체농도의 78%로 높은 비중을 보였다.

Base case 대비 case1과 case2에서 SO<sub>4</sub> 32.3%, NH<sub>4</sub> 10.0%, OC(유기탄소), EC(무기탄소)가 각각 39.7%, 64.5% 감소하였으며, Primary는 56.2%로 감소하였다. 제조업 연소에서 발생하는 CO의 배출량 감소는 불완전 연소의 감소를 의미하며, 이에따라 불완전 연소로 함께 발생하는 탄소계 물질의 배출량이 감소하여 OC, EC, primary의 직접 배출량이 줄어든 것으로 판단된다. 또한 초미세먼지의 2차 생성과정에서 대기오염물질의 비선형적인 반응 특성으로 제조업 연소에서 발생하는 NO<sub>x</sub>의 감소가 SO<sub>4</sub>와 NH<sub>4</sub>의 감소에 영향을 준 것으로 판단된다.

반면에 NO<sub>3</sub> 농도가 13.9% 증가하였는데, 이는 NO<sub>x</sub> 배출량 저감에 따라 NO<sub>3</sub> 농도가 증가 할 수 있다<sup>11)</sup>는 Pun and Seigneur(2001) 연구와 수도권 도심지역이 'NO<sub>x</sub>-rich' 조건에서 NO<sub>x</sub>의 농도가 낮아지면 오존과 오존 생성 등 광화학 반응이 촉진되어 NO<sub>3</sub>로의 전환이 증가한다<sup>12)</sup>는 Lee et al. (2006)의 연구결과와 부합하는 것으로 보인다. 특히 부산은 항만과 산업단지가 밀집된 지역 특성상 NO<sub>x</sub>-rich 조건을 유지하고 있어 NO<sub>x</sub>의 감소가 NO<sub>3</sub> 농도 증가로 이어진 것으로 판단된다.

각 지역별로 살펴보면, 초미세먼지 평균 농도가 가장 많이 감소된 수영구(▼PM-2.5 : 6.9 µg/m<sup>3</sup>)에서 EC(▼1.21 µg/m<sup>3</sup>), OC(▼1.54 µg/m<sup>3</sup>), Primary(▼2.88 µg/m<sup>3</sup>)의 농도가 타 지역 대비 눈에 띄게 감소하였다. 이는 수영구가 인근 지역의 제조업 연소에서 발

생되는 배출원, 특히 불완전 연소로 인한 1차 배출원의 영향을 상대적으로 많이 받는 것으로 판단된다. NO<sub>3</sub>(▲0.24 µg/m<sup>3</sup>)의 경우 다른 지역 대비 증가폭(평균 NO<sub>3</sub> 증가폭 : 0.47 µg/m<sup>3</sup>)이 다소 적게 나타났다. 이는 수영구에서 발생하는 전체 NO<sub>x</sub> 배출량(1,169 ton/yr)이 다른 지역 대비 상대적으로 적음에 따라 NO<sub>x</sub>-rich 조건이 덜 형성된 것으로 판단되며, 제조업 연소 시 발생하는 NO<sub>x</sub>의 배출량(3 ton/yr) 또한 적은 양으로 NO<sub>3</sub> 생성에 미치는 영향이 제한적이었을 것으로 판단된다.

기장군(▼PM-2.5 : 2.4 µg/m<sup>3</sup>)의 경우, NH<sub>4</sub>(▼0.1862 µg/m<sup>3</sup>), EC(▼0.42 µg/m<sup>3</sup>), OC(▼0.39 µg/m<sup>3</sup>), Primary(▼1.03 µg/m<sup>3</sup>)이 다른 지역 대비 가장 적게 감소한 반면, NO<sub>3</sub>의 증가폭은 0.63 µg/m<sup>3</sup>으로 상대적으로 높은 수준이었다. 이는 기장군에서의 NO<sub>x</sub> 총배출량(1,983 ton/yr)에 비해 제조업 연소에서의 NO<sub>x</sub>의 배출량은 0.11%로 매우 적은 비중을 차지하였으며, NH<sub>4</sub>의 감소폭이 상대적으로 작은 것으로 보아, 대기 중 NH<sub>3</sub>가 충분히 잔존하면서 NO<sub>x</sub>와의 반응을 통해 NO<sub>3</sub>가 증가한 것으로 판단된다.

제조업 연소에서 발생하는 CO와 NO<sub>x</sub>의 배출량이 상대적으로 많았던 강서구, 남구, 사하구, 사상구에서도 NO<sub>3</sub>는 증가한 반면, SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub> 및 Primary 등의 성분은 감소한 것으로 나타났다. 특히 제조업 연소에서 발생하는 CO와 NO<sub>x</sub>가 상대적으로 가장 많았던 강서구의 경우, SO<sub>4</sub>(▼1.17 µg/m<sup>3</sup>), NH<sub>4</sub>(▼0.25 µg/m<sup>3</sup>)의

Table 5. Annual Average PM-2.5 Component Concentrations by case

|       | SO <sub>4</sub> | NH <sub>4</sub> | NO <sub>3</sub> | EC     | OC     | Primary | Sea    | PM-2.5 |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|--------|---------|--------|--------|
| Base  | 3.5237          | 2.4910          | 3.9766          | 0.8636 | 1.3806 | 2.6422  | 0.2860 | 15.16  |
| Case1 | 2.3867          | 2.2416          | 4.5301          | 0.3063 | 0.8330 | 1.1569  | 0.2745 | 11.73  |
| Case2 | 2.3809          | 2.2388          | 4.5280          | 0.3060 | 0.8307 | 1.1554  | 0.2737 | 11.71  |

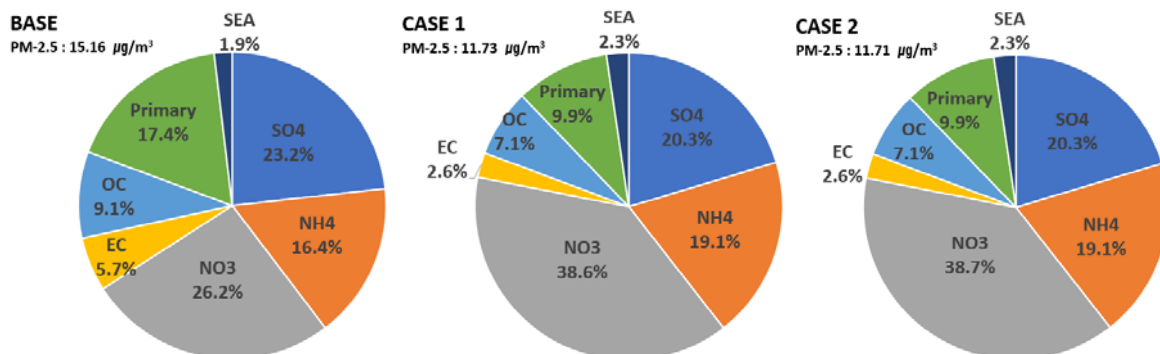


Fig. 8 Annual Average PM-2.5 Component Concentrations by case(%)

감소로 개선 효과를 보였으나, 초미세먼지의 전체 감소량은  $3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다른 지역에 비해 상대적으로 작았다. 이는 강서구가 제조업 연소 뿐만 아니라 비도로 이동오염원과 도로이동오염원에서 발생하는 많은 양의  $\text{NO}_x$  배출로 인해  $\text{NO}_x$ -rich 지역의 특성을 가지며, 이로 인해  $\text{NO}_x$ -rich 지역에서  $\text{NO}_x$  배출량 저감에 따라 오존 및 초미세먼지 농도가 오히려 증가하는  $\text{NO}_x$  disbenefit 영향<sup>3)</sup>으로 초미세먼지 농도 개선이 미미한 것으로 판단된다.

한편, 남구의 초미세먼지 감소량은  $4.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 강서구( $\nabla 3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 사하구( $\nabla 4.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 사상구( $\nabla 3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 비해 비교적 높았다. 이는 남구에서도 지역 면적 대비 높은  $\text{NO}_x$  배출량의 영향으로

$\text{NO}_x$ -rich 지역특성을 가짐에 따라  $\text{NO}_x$ -disbenefit 영향이 발생하였지만, 제조업 연소에서 발생하는 CO 배출량 감소로 인해 Primary의 감소폭(남구  $\nabla 2.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )이 강서구( $\nabla 1.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 사상구( $\nabla 1.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 사하구( $\nabla 1.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 비해 상대적으로 더 크게 나타난 것으로 판단된다. 또한 primary의 감소와 함께 EC( $\nabla 0.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )와 OC( $\nabla 0.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 감소도 다른 지역에 비해 높은 것으로 나타나, 남구의 초미세먼지 기여에 1차 배출원의 영향이 클 것으로 판단된다.

초미세먼지를 구성하는 성분의 변화를 살펴보면, 초미세먼지의 2차 생성과 밀접하게 연관된  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ 의 변화폭이 가장 컸던 지역은 영도구(PM-2.5 :

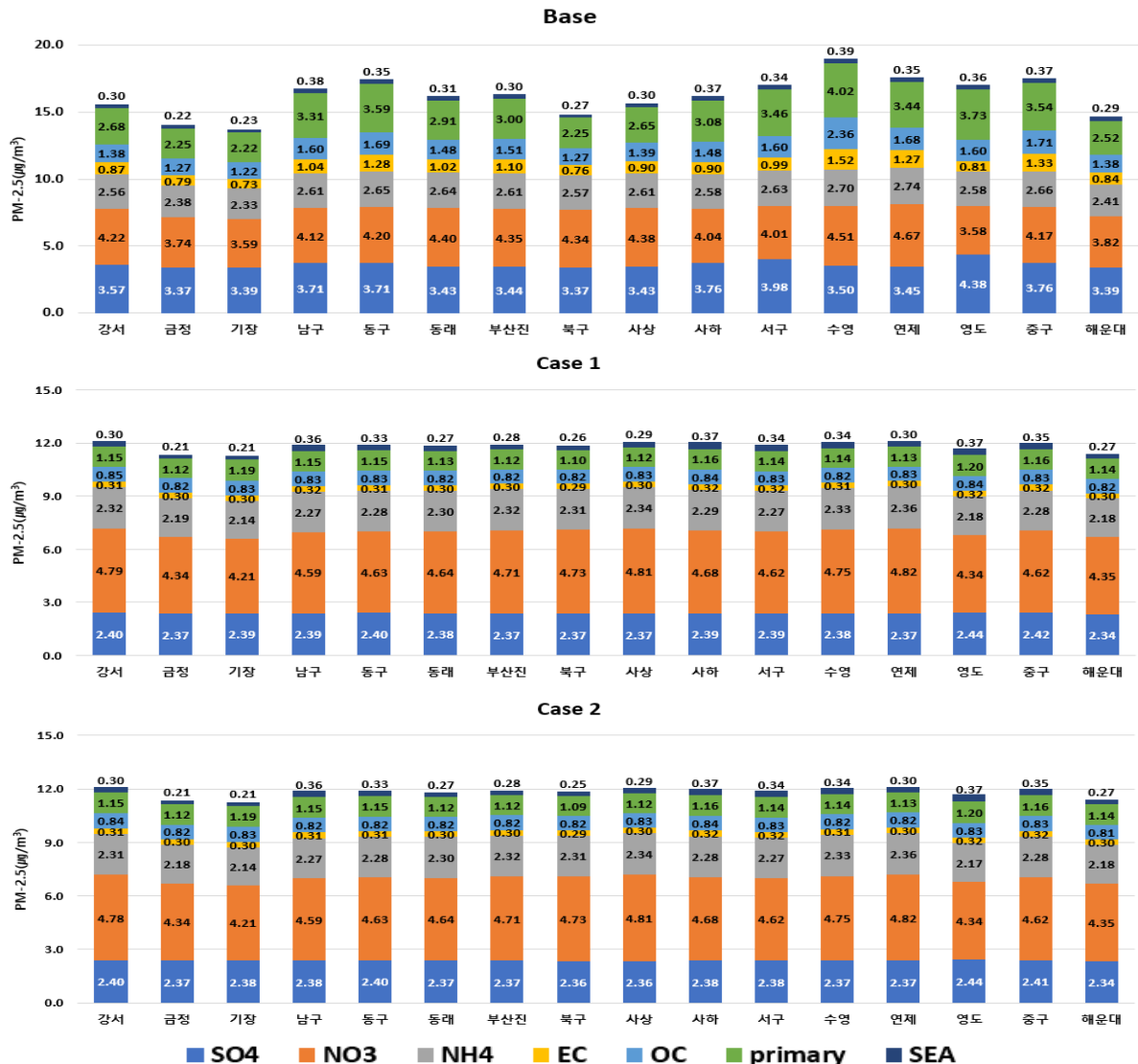


Fig. 9 Comparison of PM-2.5 component concentrations by case

▼5.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )로 나타났다. 영도구의 경우  $\text{SO}_4$ (▼1.94  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )와  $\text{NH}_4$ (▼0.40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 감소와  $\text{NO}_3$ (▲0.77  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 증가가 다른 지역 대비 현저하게 나타났다. 이는 영도구가 항만 인근에 위치하여 선박 및 도로이동오염원에서 배출된  $\text{NO}_x$ 의 영향으로  $\text{NO}_x$ -rich 조건이 형성된 결과로, 앞서 언급한  $\text{NO}_x$ -disbenefit 영향에 따른 것으로 판단된다. 또한 제조업 연소에서 발생하는  $\text{NO}_x$ 와 CO의 삭감으로 초미세먼지의 2차 생성 과정에서 비선형적인 반응이 발생한 것으로 보이며, 그로 인해  $\text{SO}_4$ 와  $\text{NH}_4$ 의 감소에 큰 영향을 준 것으로 보인다.

$\text{NO}_3$ 의 증가폭이 적게 나타난 지역은 연제구, 수영구, 동래구, 부산진구, 북구 순으로 나타났다. 해당 지역들은  $\text{NO}_x$ 의 총 배출량이 다른 지역 대비 적어  $\text{NO}_x$ -rich 조건이 형성되지 않은 것으로 판단된다. 이러한 특성과 더불어 해당지역은 비산먼지의 영향을 많이 받는 지역으로 비도로이동오염원 등에서 발생하는 2차 오염물질 형성 물질의 영향이 상대적으로 적어  $\text{NO}_3$ 의 증가폭을 억제하는 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

EC, OC, Primary의 감소폭이 큰 지역으로 수영구, 중구, 동구, 연제구 순으로 나타났다. 중구, 동구, 연제구의 경우, 제조업 연소에서 발생하는 CO의 배출량이 적음에도 불구하고 큰 감소폭을 보였다. 해당 지역들은 초기 농도가 다른 지역에 비해 높았는데 이는 비산먼지가 주요 배출원으로 작용한 것으로 판단된다. 이러한 초기 농도의 특성과 더불어 제조업 연소에서 발생하는 CO를 감소시킴에 따라 부산 지역 내 불완전 연소와 함께 발생하는 탄소계 물질의 농도가 줄어들면서 해당 지역으로 유입되거나 체류하는 EC, OC, Primary 농도가 크게 감소한 것으로 판단된다.

### 3.4. 고농도 발생 시 배출량 저감에 따른 초미세먼지 변화 분석

#### 3.4.1 초미세먼지 평균 농도 변화(고농도)

2023년 부산시 내 초미세먼지 주의보가 발령되었던 기간 중 황사 영향을 제외하고, 대기정체로 인해 실제 초미세먼지 주의보가 발령되었던 3월 30일(1일)을 선정하여 배출량 저감에 따른 농도 감소 효과를 살펴본다.

해당 기간은 전일(3월 29일) 국외에서 유입된 미세먼지의 영향으로 농도가 상승하였으며, 대기정체 조건이 더해지면서 미세먼지가 잔류하여 서부권역(최고

PM-2.5, 76  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 초미세먼지 주의보가 발령되었고, 부산시 도시대기측정소 평균 농도는 54  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 ‘나쁨’(36 ~ 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 수준을 보였다.

CMAQ 모델을 활용한 부산시 전체 격자의 고농도일의 평균 초미세먼지 농도는 Base case(기존 배출량 적용)에서 43.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 계산되었으며, Case1(CO,  $\text{NO}_x$  100% 삭감)과 Case2(CO,  $\text{NO}_x$  50% 삭감)에서는 모두 37.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. Case1과 Case2는 부산 연평균 농도와 마찬가지로 두 시나리오 간 농도 차이는 거의 없었고, 초미세먼지 ‘나쁨’ 수준에 해당하였으나, Base case 대비 평균 6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  감소한 것으로 나타났다.

지역별 초미세먼지 농도의 평균 분포를 살펴보면, Base case에서 최고 농도는 수영구 57.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 계산되었고, 최저 농도는 기장군 36.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 계산되어 최고와 최저 농도 지역은 연평균 분석 결과와 동일하게 나타났다. 모든 지역에서 초미세먼지 일평균 농도가 24시간 대기환경기준(35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )을 초과하였고, 남부 해안가 지역과 서부권 공업단지 지역 그리고 부산의 중심지에서 상대적으로 높은 농도를 보였다.

Case1과 Case2의 모델 결과를 살펴보면, 연평균 결과와 마찬가지로 두 시나리오 간 초미세먼지 농도 차이는 거의 없었다. 두 시나리오에서 평균 최고 농도는 영도구 43.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 계산되었고, 최저 농도는 기장군 33.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 계산되었다. 금정구(34.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )와 기장군을 제외한 나머지 지역은 24시간 대기환경기준을 초과하는 것으로 나타났다. 제조업 연소에서 CO와  $\text{NO}_x$ 의 배출량이 상대적으로 많았던 강서구, 남구, 사하구, 사상구에서는 평균 40.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 부산 평균(37.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 높게 나타났으며, 서부 공업지역 및 해안가 지역과 부산의 중심지에서 상대적으로 높은 농도를 보였다.

Case1과 Case2의 연평균 결과에서는 모든 지역의 초미세먼지 농도가 큰 차이를 보이지 않은 반면, 고농도 시기에는 지역별 농도 차이가 다소 뚜렷하게 나타났다. 이는 고농도 시기에 지역별 대기 흐름과 배출원 특성, 외부 유입의 영향 등이 복합적으로 작용한 것으로 판단된다. 특히 대기정체로 인해 특정지역에서는 체류 현상이 발생하였고, 그로 인해 지역별 농도 차이가 발생한 것으로 판단된다.

Base와 두 case의 초미세먼지 농도 차이를 살펴보면, 제조업 연소에서 발생하는 CO와  $\text{NO}_x$ 의 삭감으로 모든 지역에서 초미세먼지 농도가 평균 8.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  감

소되어 초미세먼지 농도가 개선된 것으로 나타났다. Base case에서 높은 농도를 보인 일부 서부지역과 중부 및 남부 지역의 초미세먼지 농도가 상대적으로 많이 감소 되었으며, 특히 수영구와 연제구에서  $14.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 많이 감소되었다. 수영구는 연평균 결과에서도 가장 많은 감소 폭을 보였던 지역으로 고농도 시기에도 비슷한 경향을 보였다. 연제구의 경우, 부산의 중심부에 위치하며 주위의 산과 도시구조물에 의해 대기 흐름이 제한되기 쉬운 지리적 특징을 가지고 있어 고농도 시기에 외부에서 유입된 미세먼지가 대기정체로 잔류하여 누적됨에 따라 초미세먼지 농도( $42.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )가 상대적으로 높게 나타난 것으로 판단된다. 따라서 부산 지역 내 제조업연소의 CO와 NOx를 감소시켰을 때, 외부에서 유입된 대기오염원의 양이 감소하여 연제구 내 잔류 미세먼지의 양이 감소 된 것으로 판단된다.

가장 적게 감소한 지역은 기장군으로 Base case 대비  $2.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 적게 감소하였다. 기장군은 연평균 결과에서도 초미세먼지 농도가 가장 낮게 나타난 지역으로 고농도 시기에도 유사한 경향을 보였다.

제조업 연소에서 발생하는 CO와 NOx의 배출량이 상대적으로 많았던 강서구, 남구, 사상구에서는 Base case 대비  $7.0$ (강서구) ~  $9.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (남구)로 감소하여 제조업 연소에서 발생하는 CO와 NOx의 배출량 저감이 영향을 준 것으로 판단된다. 반면 사하구( $\nabla 4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )는 강서구, 사상구와 같은 서부권에 위치하고 있음에도 불구하고 감소량이 적었는데, 이는 고농도 일의 대기 흐름 조건이나 지역적 특성, 외부 유입 영향 등 복합적인 결과에 의한 것으로 판단된다.

### 3.4.2 초미세먼지 성분 분포 변화

CMAQ 모델을 활용한 Case별 전체 격자의 고농도 일의 초미세먼지 성분 분포를 Fig. 11에 나타내었다.

Base case의 고농도일 초미세먼지 성분은  $\text{SO}_4$  29.5%( $12.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{NO}_3$  21.4%( $7.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{NH}_4$  17.6%( $7.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 순으로 나타났다. 연평균 결과에서는  $\text{NO}_3$ 의 비중이 상대적으로 높았던 것과 달리, 고농도일에는  $\text{SO}_4$ 와  $\text{NH}_4$ 의 비중이 높아져 해당 일자의 초미세먼지 농도는  $\text{SO}_4$ 와  $\text{NH}_4$ 의 영향이 상대적으로 큰 것으로 보인다. 이는 외부에서 유입된 오염원과 대기정체로 인해 부산 지역이  $\text{SO}_x$ -rich 상태가 되었을 가능성이 있으며, 이러한 조건에서 대기 중의  $\text{SO}_x$ 가  $\text{NO}_x$ 보다 우선적으로  $\text{NH}_3$ 와 반응하여 황산암모늄( $\text{NH}_4\text{SO}_4$ )을 생성<sup>13)</sup>한 결과로 보여진다.

Case1과 Case2의 고농도일 초미세먼지 성분을 살펴보면, Case1에서  $\text{NO}_3$  35.6%( $13.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{SO}_4$  23.3%( $8.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{NH}_4$  19.5%( $7.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )로 나타났으며, Case2에서는  $\text{NO}_3$  35.7%( $13.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{SO}_4$  23.3%( $8.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{NH}_4$  19.5%( $7.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )로 분석되어 연평균 결과와 마찬가지로 두 시나리오 간 농도 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

Base case에서는  $\text{SO}_4$ 의 비중이 높았던 반면, 두 case에서는  $\text{NO}_3$ 의 비율이 증가하였는데, 이는  $\text{NO}_x$ 의 저감이  $\text{NO}_3$  생성에 유리한 조건을 제공하는 동시에  $\text{SO}_4$ 의 생성 반응을 억제한 것으로 판단된다.

Base case 와 두 case 간의 성분 차이를 살펴보면,  $\text{SO}_4$ 이 32.0%,  $\text{NH}_4$ 은 4.3%, OC 34.6%, EC 60.3%, Primary 43.9%로 감소하였다. 반면  $\text{NO}_3$  농도는 43.6% 증가하여 연평균 결과와 유사한 경향을 보였다.

각 지역별로 살펴보면, 초미세먼지 평균 농도가 가장 많이 감소된 수영구와 연제구( $\nabla \text{PM}_{2.5} : 14.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 경우, 수영구는 EC( $\nabla 2.539 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), OC( $\nabla 3.193 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Primary( $\nabla 5.986 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 농도가 타 지역 대비 눈에 띄게 감소하여 연평균 결과와 유사한 경향을 보였다.

연제구는  $\text{SO}_4$ ( $\nabla 4.036 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), EC( $\nabla 2.061 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )

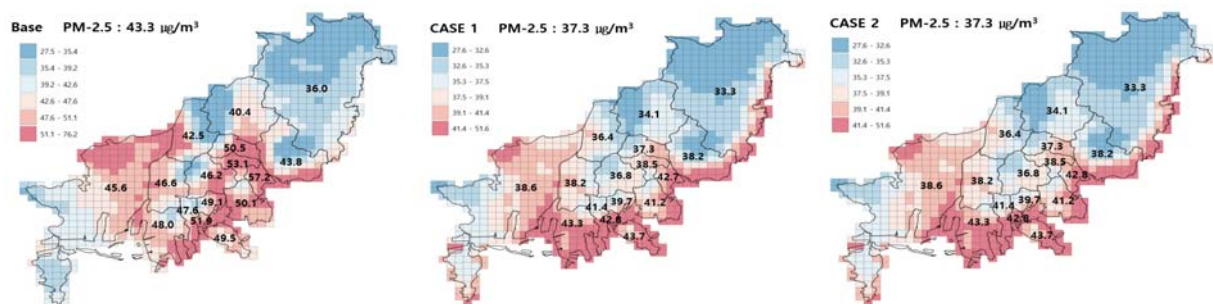


Fig. 10 Average PM<sub>2.5</sub> concentration by case on High pollution day

Table 6. Average PM-2.5 Component Concentrations by case on high pollution day

|       | SO <sub>4</sub> | NH <sub>4</sub> | NO <sub>3</sub> | EC     | OC     | Primary | Sea    | PM-2.5 |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|--------|---------|--------|--------|
| Base  | 12.7901         | 7.6101          | 9.2542          | 2.1230 | 3.8139 | 7.1479  | 0.5796 | 43.32  |
| Case1 | 8.6974          | 7.2859          | 13.2864         | 0.8359 | 2.4951 | 4.0124  | 0.6662 | 37.28  |
| Case2 | 8.6938          | 7.2859          | 13.2926         | 0.8357 | 2.4952 | 4.0117  | 0.6653 | 37.28  |

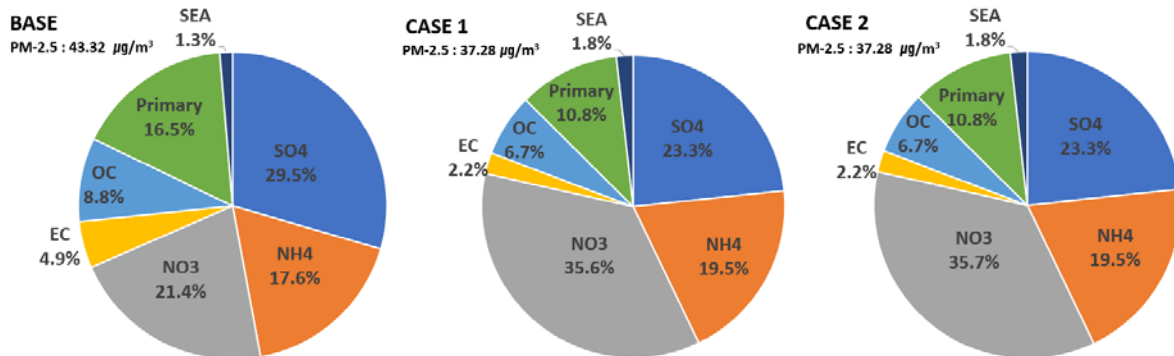


Fig. 11 Average PM-2.5 Component Concentrations by case(%) on high pollution day

/m<sup>3</sup>), OC(▼1.857  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Primary(▼4.720  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 감소폭이 상대적으로 많은 편에 속했으며, 특히 NH<sub>4</sub>(▼1.660  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 감소는 다른 지역대비 가장 크게 나타났다. 또한 NO<sub>3</sub>(▲0.085  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 증가는 다른 지역(평균 ▲3.736  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 비해 가장 적게 나타났다. 이러한 결과로 NH<sub>4</sub>의 높은 감소폭과 NO<sub>3</sub>의 낮은 증가폭은 연제구의 초미세먼지 농도 개선에 중요한 영향을 준 것으로 판단된다. 이는 연제구가 대기흐름이 제한되기 쉬운 지리적 특성상 배출량 저감으로 외부 오염물질의 유입이 감소하여 체류하는 오염물질이 감소하는 등 복합적인 영향으로 초미세먼지 2차 생성이 억제된 것으로 판단된다.

초미세먼지 평균농도가 가장 적게 감소된 기장군(▼PM-2.5 : 2.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )은 SO<sub>4</sub>(▼3.409  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), EC(▼1.09  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) OC(▼1.06  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Primary(▼2.19  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )이 가장 적게 감소한 반면, NO<sub>3</sub>의 증가폭은 4.78  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 상대적으로 높은 수준을 보여 연평균 결과와 유사한 경향을 보였다. 또한 대부분의 지역에서 NH<sub>4</sub>가 감소한 경향을 보였으나 0.16  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 소폭 증가하였는데, 이는 배출량 저감으로 SO<sub>4</sub>의 생성이 감소되면서 대기 중 남아있는 NH<sub>3</sub>가 NO<sub>x</sub>와 결합하여 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>를 형성하는 반응이 우세했기 때문이라 판단된다.

제조업 연소에서 발생하는 CO와 NO<sub>x</sub>의 배출량이 상대적으로 많았던 강서구, 남구, 사하구, 사상구에서도 NO<sub>3</sub>는 증가한 반면, SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub> 및 Primary 등의 성

분은 감소한 것으로 나타났다.

강서구(▼7.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 남구(▼9.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 사상구(▼8.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 초미세먼지 감소는 평균 감소폭(▼8.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )과 유사하였지만, 사하구는 4.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 상대적으로 적은 감소폭을 보였다. 이는 사하구 지역에서 고농도일에 제조업 연소에서 발생하는 NO<sub>x</sub> 배출량 저감이 다른 세 지역 대비 SO<sub>x</sub>-rich 상태를 NO<sub>x</sub>-rich 상태로의 전환이 컸을 가능성을 보여준다. 이러한 전환은 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>의 비선형적인 반응을 촉진하여 SO<sub>4</sub>의 생성을 억제한 반면, NO<sub>x</sub>와 NH<sub>3</sub>의 반응이 우세하도록 영향을 미쳤을 것이라 판단된다. 특히, NO<sub>3</sub>(▲5.43  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 높은 증가폭과 NH<sub>4</sub>(▼0.01  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 미미한 감소폭을 고려하였을 때, 해당지역의 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 생성이 우세하게 진행되었음을 확인 할 수 있다. 이는 배출량 저감에 따른 지역별 대기 특성, 외부 오염물질 유입, 기상요인(계절, 대기정체 등) 등이 복합적으로 작용한 결과로 보여진다. 또한 사하구는 부산 지역 내에서 NH<sub>3</sub> 발생량이 두 번째로 높은 지역으로 NH<sub>3</sub>가 NO<sub>3</sub>과 결합하여 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>를 형성하는데 기여했을 가능성이 높다. 따라서 고농도 기간에 제조업 연소의 NO<sub>x</sub>와 CO의 배출 저감 뿐만 아니라, NH<sub>3</sub>의 추가적인 저감 대책을 병행할 경우 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>의 생성에 필요한 NH<sub>3</sub>의 양이 감소하여 초미세먼지 농도 개선 효과를 더욱 극대화 할 수 있을 것으로 판단된다.

남구의 경우, 연평균 결과와 마찬가지로 CO 배출량 감소로 인해 Primary(▼4.87  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), EC(▼1.60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

/m<sup>3</sup>)의 감소가 상대적으로 컸으며 이러한 1차 초미세 먼지 성분 감소가 초미세먼지 농도 저감에 기여하였다.

사상구의 경우 NO<sub>3</sub>(▲1.72 µg/m<sup>3</sup>)의 증가폭이 적었고, NH<sub>4</sub>(▼0.97 µg/m<sup>3</sup>)의 감소가 다른 세 지역보다 크게 나타났다. 이는 사상구 내 고농도일에 제조업 연소에서 발생하는 NO<sub>x</sub> 배출 저감 효과가 상대적으로 크게 나타난 것으로 보인다. 그 결과 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>의 생성이 제한되었으며, SO<sub>4</sub>와 NH<sub>4</sub>의 농도 감소를 통해 초미세먼지의 2차 생성 반응이 줄어든 것으로 보여진다.

영도구의 경우, 초미세먼지의 2차 생성과 밀접하게 연관된 SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>의 변화폭이 가장 큰 지역으로 나타났다. 영도구는 SO<sub>4</sub>(▼6.26 µg/m<sup>3</sup>) 감소와 NO<sub>3</sub>(▲8.88 µg/m<sup>3</sup>), NH<sub>4</sub>(▲0.46 µg/m<sup>3</sup>)의 증가가 다른

지역 대비 현저하게 나타났다. 연평균 결과에서는 NH<sub>4</sub>의 감소가 다른 지역에 비해 가장 컸던 반면, 고농도 시기에는 상대적으로 큰 폭 증가하였다. 이는 고농도일에 발생한 대기 정체와 제조업연소에서 발생하는 NO<sub>x</sub>의 저감이 SO<sub>x</sub>-rich 상태에서 NO<sub>x</sub>-rich 상태로의 전환이 이루어진 것으로 판단된다. 이러한 변화로 SO<sub>4</sub>의 생성이 억제되고, 대기 중의 NH<sub>3</sub>와 NO<sub>x</sub>가 반응하여 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>의 생성이 증가한 것으로 판단된다.

영도구는 항만 지역에 위치하여 NO<sub>x</sub>의 배출이 많은 지역이며, 섬 지역의 특성상 습도가 높은 조건이 형성되기 쉬워 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>를 형성하는 반응이 우세해졌을 가능성이 높다. 김(2021)의 연구에 따르면 상대습도가 증가할수록 황산염과 질산염의 2차 생성 비율이 선형

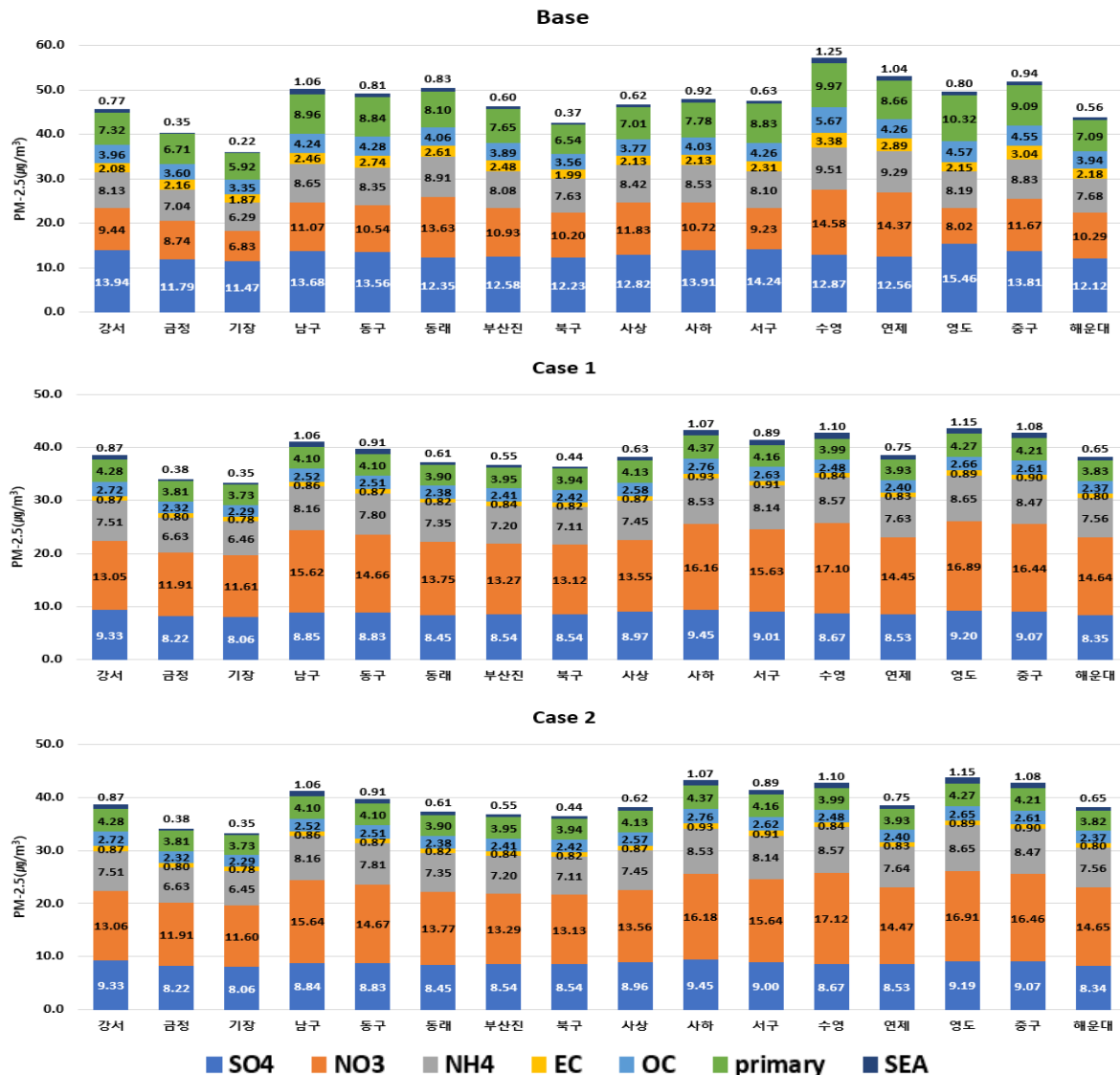


Fig. 12 Comparison of PM-2.5 component concentrations by case on high pollution day

적으로 증가하여, 2차 생성을 가속화 할 수 있다.<sup>14)</sup> 따라서 영도구는 항만 배출원 영향과 대기 조건의 영향을 받는 것으로 판단된다. 추가적으로 영도구에서 Primary의( $\nabla 6.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 감소폭이 다른지역에 비해 매우 큰 것으로 나타났다. 영도구는 제조업 연소에서 발생하는 CO의 배출량이 상대적으로 적었음에도 불구하고 큰 감소폭을 보였는데, 이는 고농도일에 초기 농도가 다른지역에 비해 매우 높은 수준을 보인 것과 연관이 있는 것으로 판단된다. 고농도 시기에 외부에서 유입된 다양한 오염물질이 대기 정체로 인해 체류하면서 Primary의 농도( $10.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )가 상승하였고, 이러한 초기 농도 증가가 Primary 성분의 큰 감소폭에 영향을 미친 것으로 보여진다. 따라서 영도구는 사하구와 마찬가지로 고농도일에 제조업 연소에서 발생하는 CO와 NOx의 저감과 더불어 항만 및 도로이동오염원에서 발생하는 NOx와 추가적으로 NH<sub>3</sub>의 저감 대책이 병행되면 해당 지역의 초미세먼지 농도 개선 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

대부분의 지역에서 NO<sub>3</sub>의 증가폭이  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이상 나타난 반면, 연제구( $\blacktriangle 0.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )와 동래구( $\blacktriangle 0.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )에서는 증가폭이 매우 낮게 나타났다. 이 두 지역은 연평균 결과와 마찬가지로 다른 지역 대비 2차 초미세먼지의 생성 영향이 상대적으로 낮았으며, 동시에 1차 미세먼지 성분인 Primary, EC의 감소폭이 상대적으로 높게 나타났다. 특히 두 지역은 SOx와 NOx의 배출량이 다른지역에 비해 상대적으로 적었으며, 비산먼지의 영향을 많이 받는 지역으로 배출량 저감 시 1차 성분의 감소 효과가 상대적으로 크게 나타난 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 우리원에서 운영 중인 대기오염 진단평가 시스템(CMAQ 모델)을 활용하여 부산시 내 지역별 미세먼지 특성을 분석하고, 부산시의 주요 미세먼지 저감 대책 사업 중 하나인 '저녹스버너 설치 지원' 사업을 기반으로 '제조업연소'의 주요 배출물질인 CO와 NOx의 배출량을 인위적으로 각각 100%(Case1), 50%(Case2) 감소시키는 조건으로 모델링을 수행하였다.

1. CAPSS 2020을 바탕으로 부산시 지역별 대기오염 물질 배출량 분석 결과, 각 지역별로 산업, 상업, 주

거 특성에 따라 주요 배출원이 다르게 나타났다. 항만과 (준)공업단지가 위치한 강서구, 사하구, 남구, 사상구, 해운대구의 경우 비도로이동오염원(선박, 항공, 건설장비 등)이 높은 비율을 차지했으며, 특히 강서구는 항만, 공항, 산업단지의 영향을 받아 SOx와 NOx의 배출량이 두드러지게 나타났다. 반면, 연제구, 부산진구, 중구 등 상업지역에서는 비산먼지(도로재비산먼지 등)의 비율이 높아 PM-2.5, TSP 배출량이 높게 나타났다. 금정구, 기장군, 동구 등 주거지역은 도로이동오염원 및 비산먼지, 비도로이동오염이 주요 배출원으로 나타나 NOx, SOx, TSP가 주요 배출물질로 나타났다. 본 연구에서 배출량 저감 시나리오에 적용된 '제조업연소'는 강서구, 사하구, 남구, 사상구에서 높은 기여도를 보였으며, 이는 대규모 산업단지가 위치한 지역적 특성에 기인하는 것으로 보여진다. 제조업 연소에서 주요 배출물질은 CO와 NOx로 나타났으며 이는 LNG 연료를 사용하는 공정로 및 연소시설에서 발생하는 것으로 나타났다.

2. CMAQ 모델을 활용한 부산시 초미세먼지 농도 및 성분 분석 결과, 연평균 및 고농도일 모두에서 NO<sub>3</sub>와 SO<sub>4</sub>가 높은 비중을 차지했으며, 2차 생성 성분(NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>)이 초미세먼지의 65% 이상 차지하는 것으로 나타났다. 이를 통해 부산 지역의 초미세먼지는 주로 2차 생성과정을 통해 형성된 것으로 판단된다. CO와 NOx의 배출량 감소 결과, Case1과 Case2에서 Base case 대비 연평균( $\nabla 3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )과 고농도일( $\nabla 6.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 초미세먼지 농도가 모두 개선된 것으로 나타났다. 반면, 초미세먼지 성분에서는 연평균 및 고농도일 모두에서 다른 항목이 감소하였지만, NO<sub>3</sub>의 농도가 증가한 것을 보였다. NOx의 감소는 SO<sub>4</sub>와 NH<sub>4</sub>의 감소에 기여하였으나 동시에 NO<sub>3</sub>의 증가로 이어진 것으로 보여지며, 이는 항만과 산업단지가 밀집된 부산의 지역적 특성상 NOx-rich 조건이 형성되기 쉬운 환경에서 NOx의 감소가 오히려 NO<sub>3</sub>로의 전환을 활성화시킨 것으로 판단된다. 이러한 현상은 여러 선행 연구<sup>3), 11), 12)</sup>에서 보고된 바와 일치하며, 초미세먼지의 2차 생성과정에서 대기오염물질간의 비선형적인 반응의 결과인 것으로 판단된다.

3. 지역별 초미세먼지 연평균 및 고농도일 분석 결과, 지역별 특성에 따라 초미세먼지 농도와 성분에 차이를 보였으며, 특히 고농도일에 지역별 농도 차이

가 뚜렷하게 나타났다. 이는 동일한 배출물질을 같은 양으로 삭감하더라도 대상 오염원, 대상 지역 및 계절 등에 따라 농도 변화가 달라진다는 점을 보여준다. 이러한 결과는 초미세먼지 저감을 위한 정책 및 관리체계가 지역별 특성을 반영하여 차별화되어야 함을 시사하며, 각 지역의 주요 배출원과 대기오염 특성을 기반으로 한 세부적인 저감 대책이 필요할 것으로 판단된다.

4. 강서구, 사하구, 서구, 영도구의 경우, 비도로이동오염원(선박, 항공 등) 및 도로이동오염원 등에 의해 NOx의 배출량이 상대적으로 많음에 따라 NOx-rich 조건이 형성된 것으로 보여진다. 그 결과 제조업연소에서 발생하는 NOx의 저감이 오히려 NO<sub>3</sub>로의 전환을 촉진시킨 것으로 판단된다. 따라서 해당지역의 주요배출원의 NOx의 저감 정책이 추가적으로 진행되어야 하며, NH<sub>3</sub> 저감 대책을 병행하면 초미세먼지 농도 개선 효과를 극대화 할 수 있을 것으로 판단된다.
5. 연제구, 동래구 등 중부권역은 부산의 중심부에 위치하여 대기 흐름이 제한되기 쉬운 지리적 특성을 가지고 있어 외부에서 유입된 미세먼지가 대기 정체로 잔류함에 따라 고농도일에 높은 초기 농도를 보였다. 이들 지역은 다른 지역에 비해 NO<sub>3</sub>의 증가 폭이 매우 낮게 나타났으며, 1차 미세먼지 성분인 Primary, EC의 감소폭이 상대적으로 크게 나타났다. 해당 지역은 비산먼지의 영향을 많이 받는 지역으로, 제조업 연소의 비중이 상대적으로 매우 적음에도 불구하고 초미세먼지 농도가 상당한 개선을 보였다. 이는 다른 지역의 제조업 연소에서 발생하는 CO와 NOx의 배출량 저감효과가 이들 지역에도 긍정적인 영향을 미쳤음을 보여준다. 따라서 이들 지역은 비산먼지에서 발생하는 1차 초미세먼지의 배출을 추가적으로 줄이면 고농도 시기에 초미세먼지의 농도를 효율적으로 저감할 수 있을 것으로 판단된다.
6. 연평균과 고농도일의 초기 미세먼지 농도가 가장 높았던 수영구는 자체 배출량의 영향보다 인근 지역(남구, 해운대구 등)에서 유입된 배출물질과 교통밀집 등으로 인한 국지적 영향, 대기정체로 인해 체류하는 오염물질 등이 복합적으로 작용한 결과로 보여지며, 배출량 저감 시 초미세먼지의 감소폭이 타 지역 대비 높은 수준을 보임에 따라 주변 지역 배출원의 영향을 많이 받는 특성을 보였다. 따라서

수영구의 초미세먼지 농도를 개선하기 위해서 인근 지역의 배출원을 통합적으로 관리해야하며, 도로이동오염원과 비도로이동오염원에서 발생하는 배출원의 저감이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

7. 또한 기장군은 연평균과 고농도일의 초기미세먼지 농도가 가장 낮게 나타났는데, 이는 주요 공업단지와의 거리가 멀고 단위면적 당 대기오염배출원이 상대적으로 적은 특성에 의한 것으로 판단된다. 따라서 기장군은 기존의 정책을 유지하면서, 배출량 모니터링과 같은 지속적인 관리 체계를 구축하여 저농도 상태를 유지하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

부산의 초미세먼지 성분은 2차 생성성분이 대부분을 차지하는 것으로 나타나 초미세먼지 농도 관리 및 개선을 위해 전구물질의 배출저감이 중요할 것으로 판단된다. 특히 부산은 비도로이동오염원(선박, 항공), 도로이동오염원, 공업단지 등에서 발생하는 높은 NOx의 배출량으로 NOx-rich 지역 특성을 보였으며, 이러한 환경에서 NOx의 저감이 오히려 NO<sub>3</sub>의 증가로 이어지는 현상이 확인되었다. 따라서 추가적인 NOx의 저감 대책과 함께 NH<sub>3</sub>의 배출 관리의 병행이 필요할 것으로 생각된다. 또한 제조업 연소에서 발생하는 CO와 NOx의 저감 분석 결과, 100%와 50% 저감 간의 초미세먼지의 농도와 성분의 차이가 크지 않아 CO와 NOx의 배출량을 절반만 줄이더라도 유의미한 저감 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이는 비용과 자원 측면에서 보다 현실적이고 효율적인 접근이 가능할 것으로 판단된다. 다만, 단기간 내 배출량을 50% 감소하는 것은 현실적으로 어려운 과제이므로, 단계적이고 체계적인 감축 목표 설정이 필요하며 동시에 다른 주요 배출원(비도로이동오염원, 비산먼지 등)에 대한 지역별 맞춤형 관리가 병행되면 초미세먼지 농도 개선의 효과가 극대화 될 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. World Health Organization(WHO), Health effects of particulate matter : Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia, p 6-7., (2013)
2. 부산광역시 보건환경연구원, 2023년 대기오염도 조사결과, (2024)

3. Kim ST, Bae CH, Yoo C, Kim BU, Kim HC, Moon NK, PM2.5 Simulations for the Seoul Metropolitan Area:(II) Estimation of Self-Contributions and Emission-to-PM2.5 Conversion Rates for Each Source Category, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33(4), pp 377-392., (2017)
4. National Air Emission Inventory and Research Center(NAIR) Home page, 2020 National Air Pollutant Emissions Inventory, <https://air.go.kr/article/view.do?boardId=10&articleId=360&boardId=10&menuId=32&currentPageNo=1>, (2023)
5. 부산광역시 보건환경연구원, 부울경 배출량 삭감효과를 고려한 정책효과 검증, (2023)
6. 임소영, 조재한, 미세먼지 추이의 국별 지역별 비교와 정책 시사점. (2017)
7. Min JH, Kim BG, Ju HJ, Kim NY, Hwang YS, Lee SH, Hong YS, Analysis of the Association between Air Pollutant Distribution and Mobile Sources in Busan Using spatial analysis, Journal of the Environ Healty Sci, 80(3), pp 191-200., (2024)
8. 한국에너지기술연구원, LNG발전 다종 대기오염물질 저감을 위한 CO-NO<sub>2</sub> 동시전환 ‘Smart Ambient Catalyst’ 개발(II), (2022)
9. Jang YK, Choi SJ, Kim K, Song KP, Kim HJ, Jung BJ, A Study on estimation of NO<sub>x</sub> and CO Emission factor from industrial and commercial LNG boilers, Journal of Korean society for atmospheric environment, 20(5), pp 615~623., (2004)
10. Emery, C., Liu, Z., Russel A. G., Odam, M. T., yarrowood, G., Kumar, N., Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance, Journal of the air and waste management association, 67(5), pp 582-598., (2017)
11. Pun, B. and C. Seigneu, Sensitivity of Particulate Matter Nitrate Formation to Precursor Emissions in the California San Joaquin Valley, Environmental Science and Technology, 35(14), pp 2979-2987, (2021)
12. Lee, S., Y. Ghim, Y. Kim, and J. Kim, Estimation of the seasonal variation of particulate nitrate and sensitivity to the emission changes in the greater Seoul area, Atmospheric Environment, 40(20), pp 3724-3736, (2006)
13. Liu, S., Hu, M., Slanina, S., He, Y.W., Bruegemann, E., Gnauk, T., Herrmann, H. Size distribution and source analysis of ionic compositions of aerosols in polluted periods at Xinken in Pearl River Delta(PRD) of Chian, Atmospheric Environment, 42(25), pp 6284-6295, (2008)
14. Kim, K.Y, Moisture signal on high concentrations of PM-2.5 in Seoul, Republic Korea, Seoul National Univ, (2021)