

항만지역 대기오염물질 배출량에 따른 부산 대기질 변화 연구

송희진*, 장은화, 조갑제

대기진단평가팀

A Study on the Change of Air Quality in Busan according to the Emissions of Air Pollutants in Port Area

Heejin Song*, Eunhwa Jang, Gabje Cho

Air Quality Monitoring and Assessment Team

Abstract

This study attempted to determine the emission of air pollutants in the port area of Busan and to investigate changes in air quality in the urban area according to the implementation of the air quality management policy. Various policies have been implemented to improve air quality in port areas, and the concentration of fine dust and sulfur dioxide in the air in the port area has decreased according to the ship fuel oil content regulation policy. The emission of ultrafine dust in the port area was high in the order of ships, loading and unloading equipment, and trucks. The unloading equipment was 15.1% to 31.0% of the ship's emissions, and significant pollutants appeared to be emitted in the process of unloading containers, and cargo trucks were insignificant at 0.1% to 0.3% of the ship's emissions. As the concentration of nitrate ions is increasing for the ultrafine dust component of high concentrations, it seems that a regulatory policy for nitrogen oxides is necessary to reduce the ultrafine dust at high concentrations. Secondary organic carbon in urban areas is believed to be greatly affected by the inflow of port areas according to the wind direction in summer. Port area emission management policies can be classified into strengthening ship emission management, making port areas eco-friendly, and scattering dust management, and were implemented in earnest from 2019 to 2020. Actually, the air quality of the port area improved, and there was no significant change in the processing performance of the total cargo volume by year of Busan Port. Therefore, it is thought that the effectiveness of the fine dust reduction policy in the port area has been proven.

Key words : *PM2.5, Sulphur, Secondary organic/inorganic aerosol, Organic matter*

I. 서론

부산시 대기질 개선을 위해서는 항만지역의 대기오염 물질 배출 저감이 필요하다고 알려져 있다. 환경부 국가미세먼지정보센터에서 발표한 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)의 2020년 기준 대기오염물질 배출량 자료를 보면, 부산의 선박에서 발생하는 오염물질은 부산 전체 배출량 중 초미세먼지(PM-2.5)는 43%, 질소산화물(NO_x)은 42%, 황산화물(SO_x)은 57%로 큰 비중을 차지하였다. 그간 항만지역의 대기질 개선을 위한 여러 가지 저감정책이 있었으며 대표적으로 2017년부터 하역장비 친환경화 사업과 2020년 1월부터 선박 연료유 황함량 기준 강화를 단계적으로 시행하여 항만지역 내 높은 배출 비중을 차지하는 요소를 저감해왔다. 최근 부산시 대기질은 개선되어왔으며 선박 배출량도 2021년까지 저감된 것으로 조사되어 연도별 부산항 대기질 변화를 분석하고자 한다. 본 연구에서는 선박 외에도 배출량 통계자료에 제외된 항만지역의 하역장비, 화물차의 초미세먼지 배출량과 계절별·고농도일별 초미세먼지 성분 특성 분석, 2차생성 유기물질이 부산에 미치는 영향, 모델링을 활용한 배출원별 기여도 분석 등을 통해 배출량 관리정책에 따른 연도별 대기질 개선 여부를 파악하고자 한다.

II. 연구방법

2.1. 연구대상 지역

본 연구의 대상 지역은 Fig. 1.과 같다.

2.2 항만지역 미세먼지 배출량 추이 분석

본 연구는 배출량을 선박, 화물차, 하역장비 크게 3가지로 분류하여 계산하였다. 부산항은 2022년도 세계 주요항만 컨테이너화물 물동량 기준으로 세계 7위, 전

국 1위를 할 만큼 컨테이너화물 점유율이 높아¹⁾ 선박에서 발생하는 대기오염물질 배출량이 상당하다. 입항 내역은 해운항만물류정보시스템(PORT-MIS)을 활용하였고, 배출량 계산은 국립환경과학원에서 제시한 편람을 참고하였다(식 1~4)²⁾. 선박 배출량의 경우 컨테이너 부두를 대상으로 부산신항(제1부두~제6부두, 다목적부두), 부산북항(제1부두~제8부두, 감만부두, 신감만부두, 우암부두, 자성대부두, 신선대부두)의 운항정보를 활용하여 산출하였다. 선박 연료유 황함량 규제가 연도별로 강도가 다르기 때문에 입항을 기준으로 내항 및 외항선과 접안 및 정박으로 구분하여 미세먼지 배출량의 중요한 비중을 차지하는 연구 결과가 있다³⁾.

항만지역에서는 선박 외에도 컨테이너화물을 이송하는 대형 화물차의 통행량이 상당히 높을 것으로 예상되어 국립환경과학원에서 제시한 편람을 참고하여 산출하였다(식 5,6)^{2,4,5)}. 화물차량 대수는 항만지역 인근 교통량 자료를 부산시 교통정보서비스센터로부터 제공받아 작성하였다. 통행량을 제공받은 지점은 부산신항(강서구 10번신호등교차로와 9번신호등교차로), 부산북항(동구 자성대교차로와 부산진구 범곡사거리), 연산동(연제구 연산교차로와 부산진구 양정교차로)이다. 교통정보서비스센터에서 산출하는 화물차량 대수는 대형차(버스, 2.5ton 이상 트럭, 덤프, 트레일러) 대수에서 버스 통행대수를 제외하는 방식이다. 각 지점별로 부산신항(강서구 10번신호등교차로와 9번신호등교차로) 및 부산북항(강서구 자성대교차로)은 2021년 1월~2023년 7월, 부산북항(부산진구 범곡사거리)은 2021년 3월~2023년 7월, 연산동(연제구 연산교차로와 부산진구 양정교차로)은 2021년~2023년의 5월~9월의 기간을 제공 받았다. 그 외 기간과 제공받은 자료 중 누락된 기간은 화물선 물동량 비례식으로 추정하여 계산하였다.

하역장비 대수는 부산항만공사(BPA)에서 발간하는



Fig. 1. (a) Sampling sites, (b) freight truck traffic in Busan Shinhang(SH), (c) freight truck traffic in Busan Bukhang(BH), (d) freight truck traffic in Center of a city(YS)

통계자료를 참고하였고¹⁾, 연도별 부산항 컨테이너 전용부두 시설에서 운영되는 주요 하역장비 대수를 활용하였다. 하역장비 배출량은 국립환경과학원 자료집을 참고하여 산출하였다(식 7)⁶⁾. 친환경 하역장비 전환사업에 관련된 내용은 부산항만공사 보도자료^{7,8,9)} 등 공식적으로 언론에 보도된 자료를 참고하였다. 친환경 전환사업은 액화천연가스(LNG)로 전환과 배출저감장치(DPF) 부착 방식이 있으며 액화천연가스(LNG) 전환은 야드트랙터(Y/T)에 적용되었고, 배출저감장치(DPF) 부착은 트랜스퍼크레인(T/C)과 야드트랙터(Y/T)에 적용되었다. 저감효율은 해양수산부 보도자료⁴⁾를 참고하였는데 액화천연가스(LNG) 전환 시 PM 100% 저감과 완전연소로 인한 일산화탄소(CO) 100% 저감, 질소산화물(NOx) 99% 저감되어 가스상만 배출하는 것으로 계산하였고, 배출저감장치(DPF) 부착 시 대기환경보전법 시행규칙에 따라 배출가스 저감장치를 제1종이라 가정하고 입자상인 미세먼지와 초미세먼지를 80% 저감하는 것으로 적용하여 계산하였다.

$$Fh_{wj} = SFOC \times T \times 0.2 \dots\dots\dots(식1)$$

- Fh_{wj} : 정박시(hotelling) w톤급 선박(j)의 연료사용량 (tonne)
- SFOC : w톤급 선박의 최대출력 연료소비계수 (tonne/day), 0.001 × tonne + 16.263
- T : w톤급 선박(j)의 정박기간 (day)
- 0.2 : 최대출력 연료소비량 대비 정박 중 연료소비량 (assumption)

$$Fn_{wj} = Z_{wj} \times 2 \times 1/M \times (1 / D) \dots\dots\dots(식2)$$

- Fn_{wj} : 접안시(navigation) w톤급 선박(j)의 연료사용량 (tonne)
- Z_{wj} : 접안시설부터 정박지까지의 거리, 도선거리 (km)
- 2 : 입·출항수
- M : 에너지경제연구원의 w톤급 선박의 연료경제값 (km/kl)
- D : B-C유의 비중 (0.9593 tonne/kl)

$$E_{ij} = (Fh_{wj} + Fn_{wj}) \times EF_i / 1,000 \dots\dots\dots(식3)$$

- E_{ij} : 선박(j)의 오염물질(i) 배출량 (tonne)
- EF_i : B-C유의 오염물질(i)의 배출계수 (kg/tonne-fuel)
(5.6 for PM_{2.5}, 79.3 for NO_x, 20·황함량 (%) for SO₂, 2.7 for VOC)

$$E_{ij} = (Fh_{wj} + Fn_{wj}) E_{ij} (2nd) = 0.345 \times E_{SO2j} + 0.079 \times E_{NOxj} + 0.024 \times E_{VOC}EF_i / 1,000 \dots\dots\dots(식4)$$

- E_{ij} (2nd) : 선박(j)의 오염물질별(SO₂, NO_x, VOC) 배출량 (tonne)
- 0.345 : 배출된 아황산가스의 2차생성 초미세먼지 전환계수
- 0.079 : 배출된 질소산화물의 2차생성 초미세먼지 전환계수
- 0.024 : 배출된 휘발성유기화합물질의 2차생성 초미세먼지 전환계수

$$E_{i,j} = VKT \times (EF_i / 1000) \times DF \times (1 - (R / 100)) \dots\dots\dots(식5)$$

- E_{i,j} : 자동차 j의 도로주행시 발생한 오염물질 I의 배출량 (kg/yr)
- VKT : 주행거리 (km/yr)
- EF_i : 차종별, 연료별, 연식별, 차속별 배출계수 (g/km)
- DF : 열화계수
- R : 저감장치 부착 효율 (%)

$$E_{SOx,j} = (A_j \times (S_{Fuel} / 100) \times 2) \dots\dots\dots(식6)$$

- E_{SOx,j} : 차종 j의 황산화물 배출량 (kg/yr)
- A_j : 차종 j의 연료 소비량 (kg/km)
- S_{Fuel} : 연료별 황함량 (%)
- 2 : 황함량을 황산화물로 변환하기 위한 계수

$$E_{ij} = N_j \times P_j \times LF \times HRS_j \times EF_i \dots\dots\dots(식7)$$

- E_{ij} : 장비 j의 오염물질 i에 대한 배출량 (tonne)
- N_j : 장비 j의 가동대수 (N)
- P_j : 장비 j의 엔진출력 (kW)
- LF : 엔진의 부하율 (%)
- HRS_j : 장비 j의 연간가동시간 (hr/yr)
- EF_i : 엔진출력에 대한 오염물질 i의 배출계수 (kg/tonne)
- i : 오염물질 종류(CO, NO_x, PM₁₀, VOC, etc)
- j : 장비 종류(컨테이너크레인, 트랜스퍼크레인, 야드트랙터, etc)

2.3 항만지역 미세먼지, 가스상 물질 특성 분석

대기질은 항만지역인 부산신항과 부산북항과 도시대기지역(대기환경측정망 28개소)의 대기오염물질 평균 농도를 비교 분석하였다. 대기오염물질은 6개 항목

(PM-10, PM-2.5, O₃, SO₂, NO₂, CO)을 2018년~2023년 7월까지 연도별로 조사하였다.

2.4 부산 내륙 고농도일 초미세먼지 성분 분석

성분분석은 항만지역인 부산신항과 부산도심을 대표하는 연산동 측정소를 분석하였다. 기상청 황사관측일은 제외하였고, 계절별 풍향이 달라짐에 따라 주풍향이 남풍계열인 여름철(5월~9월)과 북서풍계열인 겨울철(10월~4월)로 나누어 계절에 따른 초미세먼지(PM-2.5) 성분분석을 하고자 한다. 고농도일의 기준은 부산 도심지역을 대표하는 연산동 측정소의 초미세먼지(PM-2.5) 시간자료가 36 µg/m³ 이상으로 나쁨이상 등급일 경우만 선정하여 분석하였다.

2.5 항만지역 2차생성 유기물질이 부산 내륙에 미치는 영향 분석

2차생성 유기물질은 항만지역인 부산신항과 도심지역인 연산동 측정소를 분석하였다. 2018년~2023년 7월 기간동안 부산 도심을 대표하는 연산동 측정소의 초미세먼지(PM-2.5) 농도가 고농도(시간자료가 36 µg/m³ 이상으로 나쁨이상 등급)일 때 여름철(5월~9월)과 겨울철(10월~4월)로 분류하였다. 열적휘발도에 따라 OC₁~OC₄로 분류되는 유기탄소(OC)와 직접배출의 지표인 원소탄소(EC)를 연도별 및 시간대별 평균 농도를 분석하였다. 또한 1차배출 유기탄소(Primary organic carbon, POC)의 최소 발생량을 추정하여 유기탄소(OC)와 원소탄소(EC) 평균 농도에서 2차생성 유기탄소(Secondary organic carbon, SOC)의 생성량을 계산하였다. 항만지역과 도심지역을 계절별, 선박 연료 황함량 규제 전후 시기로 나누어 분석하였다.

2.6 종관기상분석

부산의 종관기상(풍향, 풍속)에 따른 8개 항목(SO₂, NO₂, PM-10, PM-2.5, NO₃⁻, SO₄²⁻, EC, OC)의 농도 분포를 분석하였다. 종관기상은 기상청 자료를 참고하였고, 대기오염물질 항목은 대기환경측정망과 성분분석측정망 시간자료를 사용하였다. 종관기상분석은 항만지역인 부산신항과 도심지역인 연산동 측정소를 선박배출 규제가 본격적으로 시작된 2020년 1월을 기점으로 2018년~2019년과 2020년~2023년 7월로 나누어 분석하였다.

2.7 대기모델링 PMF를 활용한 배출원별 기여도 분석

수용모델링(Positive Matrix Factorisation, PMF)은 수치모델 CMAQ(GFS_fnl)로 시나리오 분석을 하였다. 2019년~2023년 6월의 항만지역(부산신항)과 도심지역(연산동)을 대상으로 이온성분 8개 항목(Cl⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺), 탄소성분 6개 항목(OC₁~OC₄, EC₁~EC₂), 금속성분 20개 항목(Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Si, Sr, Ti, Tl, V, Zn)의 일평균 농도값을 입력자료로 사용하였다. 수용모델링에의 불확도(U)는 농도(C)가 방법검출한계(MDL) 이상일 때 U = 0.1C + (MDL/3), 미만일 때 U = 0.2C + (MDL/3)으로 계산하였다. 초미세먼지(PM-2.5)의 주요원인은 부산신항 5개, 연산동 6개로 분석하였다.

2.8 항만지역 배출량 관리정책 시행에 따른 연도별 대기오염물질 배출량 추이 분석

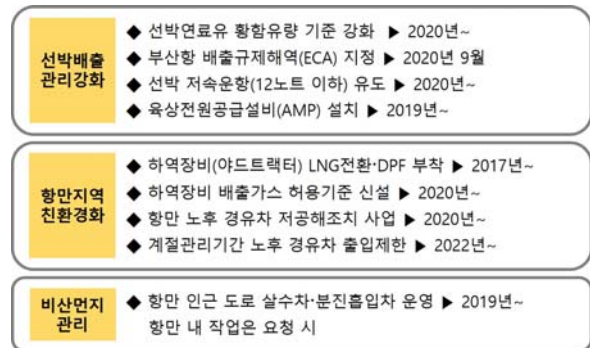


Fig. 2. Port Area Air Pollutant Emissions Management Policy

국가 미세먼지 배출량 통계에 따르면 2017년 전체 초미세먼지 배출량 중 선박 배출량이 8.4%이고, 부산은 도시 배출량 중 37.7%를 차지하였다. 이에 따라 정부는 항만-선박 미세먼지 종합대책('18.1.)과 항만-선박 분야의 미세먼지 저감 강화방안('19.6.), 항만지역 등 대기질 개선에 관한 특별법('20.1.) 등 항만지역 초미세먼지 저감을 위한 대책을 시행하여 대기오염물질 저감정책의 근거를 마련하였다¹⁰⁾. 부산의 최대 오염원으로 지목되었던 부산항의 대기질 개선 관리정책은 선박배출관리, 항만지역 친환경화, 비산먼지 관리 3가지로 분류할 수 있다. 연도별 시행된 정책에 따른 항만지역 배출량과 대기질 개선 여부를 분석하고자 한다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

3.1 선박 초미세먼지 배출량

3.1.1 선박 배출

부산신항과 부산북항의 선박 초미세먼지(PM-2.5) 배출량은 연료유 황함량 규제정책에 따라 2020년 1월부터 대폭 감소하여 2023년 현재까지 비슷한 수준을 유지하고 있다. 부산신항의 입항 선박수는 부산북항보다 적지만, 대형 화물선 운항으로 총톤수가 월등히 높아

부산북항에 비해 PM-2.5 배출량이 높게 산출되었다. 실제 항만지역 대기 중 아황산가스(SO₂)도 2020년 1월부터 연평균 0.005 ppm 이하로 관측될 만큼 규제정책 시행 이전보다 낮게 나타났다. 부산신항과 부산북항은 각각 다른 가스상 대기오염물질이 계절별로 다른 추세를 보였다. 부산신항은 이산화질소(NO₂)의 농도가 여름철에 낮고 겨울철에 높게 나타났으며, 부산북항은 아황산가스(SO₂)의 농도가 여름철에 높고 겨울철에 낮게 나타났다(Fig. 3a,b).

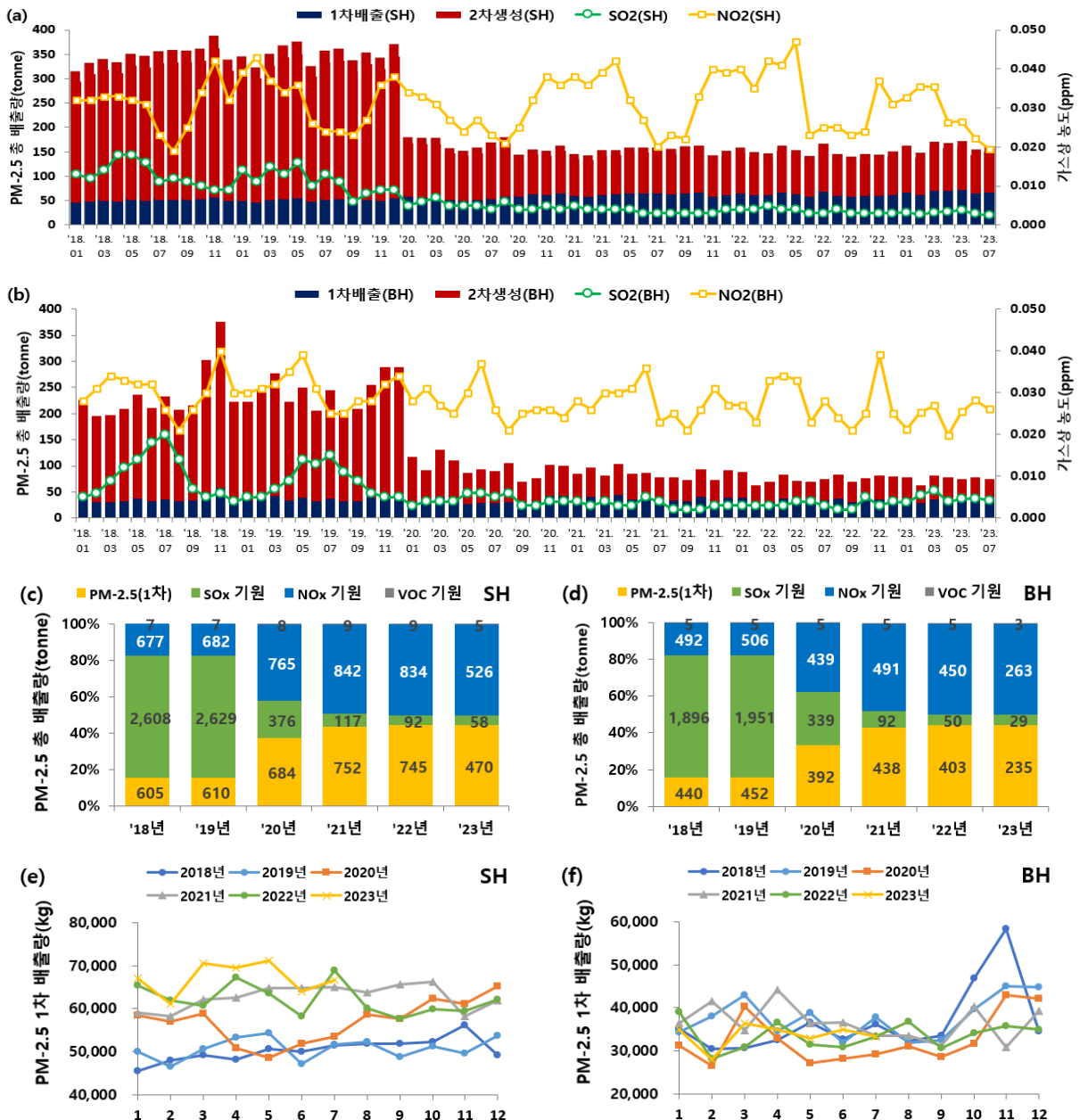


Fig. 3. PM-2.5 Shipping Emissions trend (a)~(b) Total monthly PM2.5 emissions(SH, BH), (c) Total PM2.5 emissions by year(SH, BH), (e)~(f) Primary PM2.5 emissions(SH, BH)

초미세먼지(PM-2.5)의 원인물질별 배출량 비중을 살펴보면, 2018년부터 2019년은 황산화물(SOx)기원 2차생성 초미세먼지 배출량이 월등히 높은 반면, 2020

년부터 점차 비중이 낮아지면서 2022년부터 2023년 7월까지 1차 직접배출과 질소산화물(NOx)기원 2차생성 초미세먼지 배출량이 대부분을 차지하였다(Fig. 3c,d).

Table 1. The ratio of truck emissions to shipping emissions

연도	화물차 PM-2.5 1차배출 (kg/yr)	화물차 PM-2.5 2차생성 (kg/yr)	화물차 총 PM-2.5 (kg/yr)	선박 총 PM-2.5 (kg/yr)	선박배출 대비(%)
2018년	3,617	4,851	8,468	6,729,046	0.1
2019년	3,703	4,914	8,617	6,841,064	0.1
2020년	3,611	4,681	8,292	3,006,389	0.3
2021년	3,828	4,808	8,636	2,745,352	0.3
2022년	3,359	4,323	7,682	2,586,404	0.3
2023년 7월	1,863	2,404	4,267	1,589,718	0.3

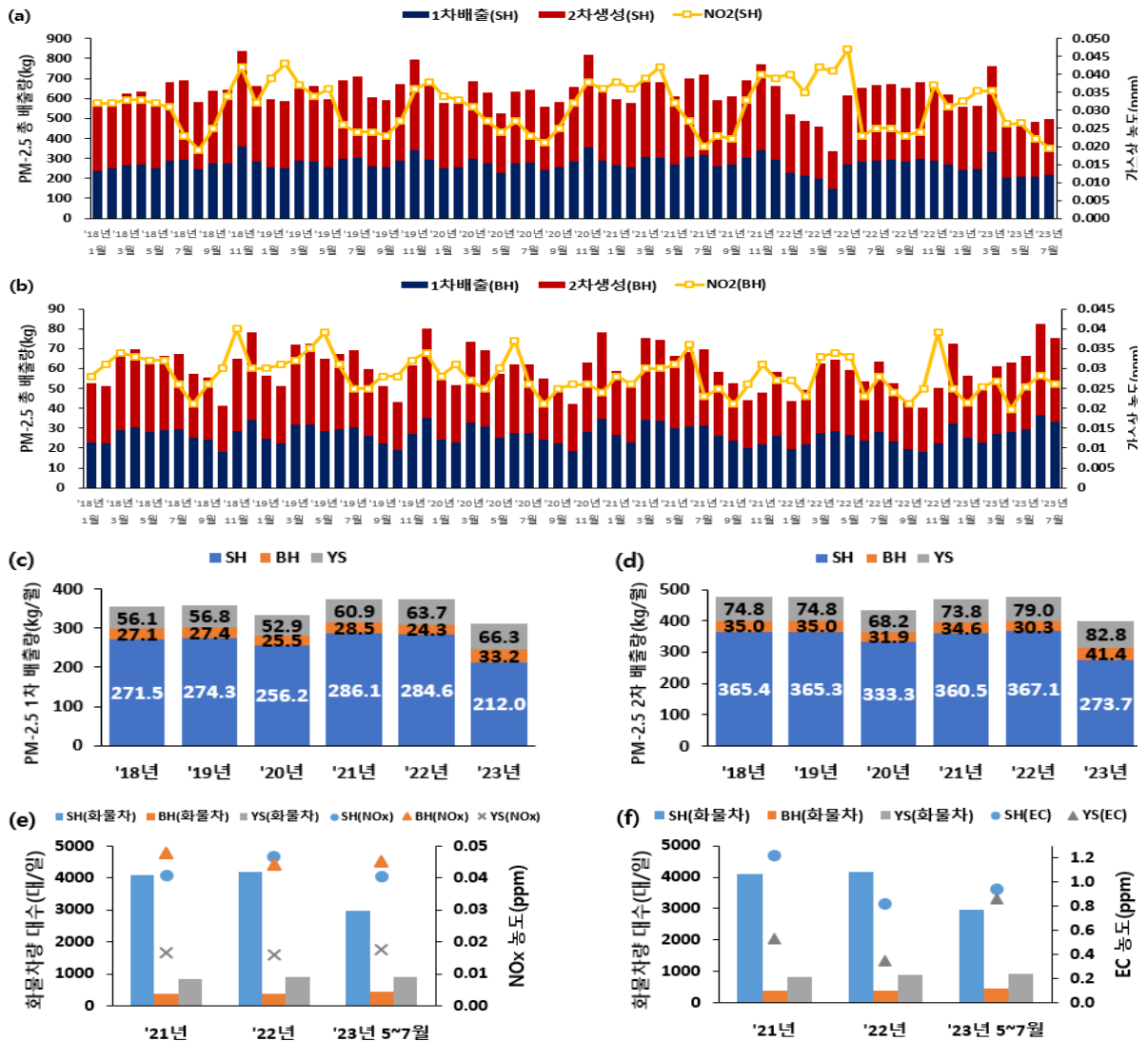


Fig. 4. Summer truck emissions (a)~(b) Total monthly PM2.5 emissions(SH, BH), (c) Primary PM2.5 emissions(SH, BH, YS), (d) Secondary PM2.5 emissions(SH, BH, YS), (e) The number of truck traffic at NOx, (f) The number of truck traffic and EC

이는 선박 연료유 황함량 규제정책으로 부산 항만지역에서 배출된 황산화물(SOx)이 대폭 감소함을 의미하고, 실제 대기 중 아황산가스(SO₂)의 농도가 감소하였다. 현시점에서 부산시 대기질 개선을 위해서는 선박의 질소산화물(NOx)과 1차 직접 배출되는 초미세먼지 생성량을 감소하기 위한 정책이 시행되어야 한다고 생각된다.

월별 1차 배출량은 부산신항과 부산북항이 다른 추세로 산출되었다. 부산신항은 2018년에 비해 최근에 1차 배출량이 더 증가한 추세이고, 부산북항은 최근에 1차 배출량이 더 감소하거나 비슷한 추세이다(Fig. 3e,f). 부산신항의 1차직접 배출량이 증가하는 추세임에도 불구하고, 황함량 규제로 인해 2차생성 배출량이 낮아 총 배출량은 감소추세로 나타났다.

3.1.2 화물차 배출

화물차 교통량은 부산도심이 항만의 영향을 받는 주 풍향이 남풍계열인 여름철(5월~9월)을 분석하였고, 초

미세먼지(PM-2.5) 배출량은 여름철 월평균(kg)으로 산출하였다. 화물차 대수는 부산신항이 부산북항보다 월등히 높았고, 연산동이 부산북항보다 높게 나타났다. 이에 따라 화물차의 초미세먼지 배출량도 부산신항 > 연산동 > 부산북항 순으로 산출되었으나(Fig. 4a,b,c,d), 실제 항만지역에 통행하는 화물차량은 컨테이너를 싣고 다닐 수 있는 초대형 화물차이기 때문에 연산동의 화물차 배출량이 훨씬 낮을 것으로 판단된다. 2023년 기준 화물차의 총 PM-2.5 배출은 선박 배출에 비하면 0.3%로 미미한 수준으로 산출되었다(Table 1).

화물차량 통행대수와 질소산화물(NOx) 농도를 살펴보면 부산신항과 부산북항의 화물차 대수가 대폭 차이 남에도 질소산화물(NOx) 농도는 비슷한 것으로 보아(Fig. 4e), 화물차량 이외의 선박이나 항만 내 하역장비 등의 영향이 높은 것으로 판단된다. 직접배출의 지표인 원소탄소(EC) 농도를 살펴보면 최근 3년간 부산신항은 감소추세이며, 연산동은 2023년에 급증하여 부산신항과 유사한 수준이다(Fig. 4f). 원소탄소(EC)

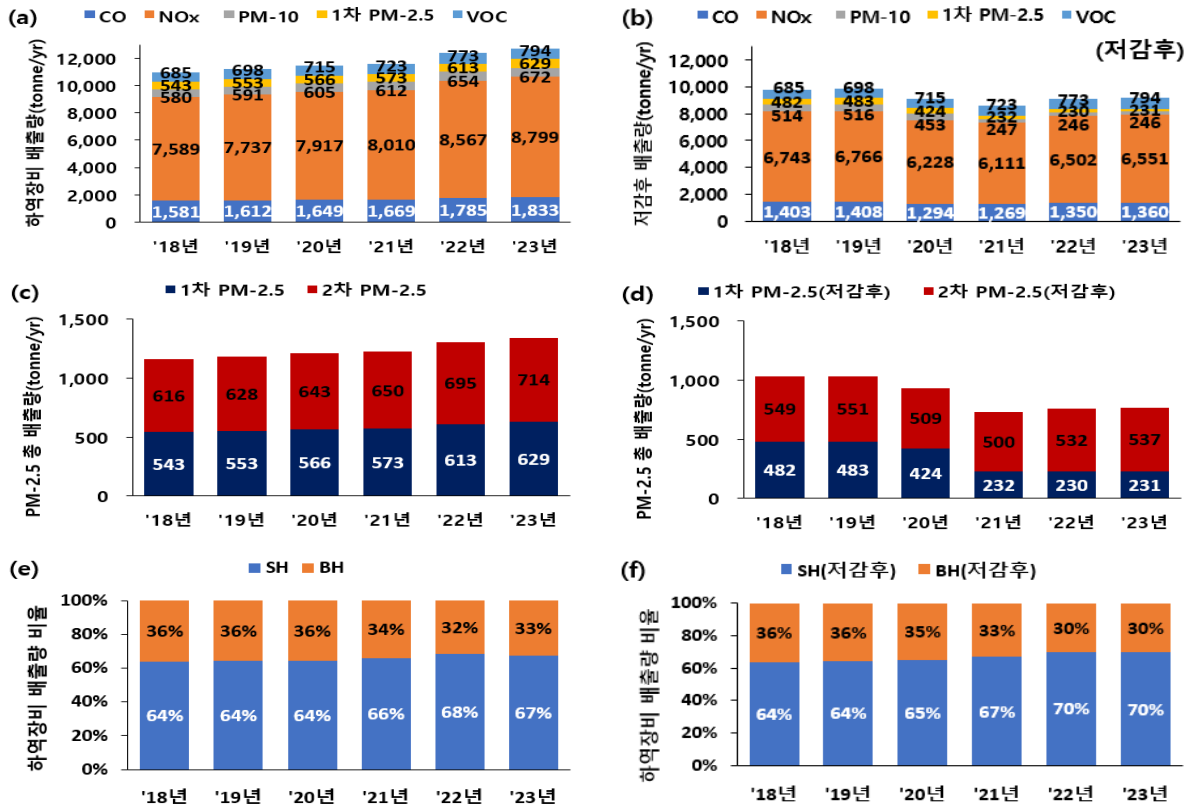


Fig. 5. (a) Total PM2.5 Harbor loading equipment emissions, (b) After reducing the eco-friendliness emissions, (c) Total PM2.5 emissions(Primary+Secondary), (d) Reduced emissions(Primary+Secondary), (e) The ratio of emissions(SH, BH) (f) The ratio of Reduced emissions(SH, BH)

또한 화물차 대수의 추세와 상이한 것으로 보아 다른 요인에 의한 영향이 높은 것으로 판단된다.

부산교통서비스센터에서 제공받은 화물차 대수 자료는 실제 항만에 출입하는 화물차 대수와는 차이가 있을 것으로 예상되나, 항만 출입구 인근 도로에서 통행하는 차량 수로 추세를 판단하기에 적합하다고 생각된다.

3.1.3 하역장비 배출

항만에 운영 중인 하역장비 대수는 부산신항이 부산북항 보다 많았다. 종류별로는 주요 하역장비인 8종을 분석하였으며 그 중 야드트랙터(Y/T) 대수가 가장 많았고 트랜스퍼크레인(T/C)이 두 번째로 많았다. 하역장비 배출량은 대기오염물질 중 질소산화물(NOx)이 월등히 높게 산출되었고, 불완전연소의 지표인 일산화탄소(CO)가 두 번째로 높게 나타났다. 연도별 하역장비 대수 증가에 따라 전체 배출량도 증가하는 추세로 산출되었으나, 액화천연가스(LNG)와 배출가스저감장치(DPF)의 친환경 저감 규제를 적용하여 계산해보면 2018년 기준으로 10% 저감 및 2023년 기준으로 28% 저감되는 것으로 산출되었다(Fig. 5a,b).

초미세먼지(PM-2.5)의 1차배출과 2차생성량은 친환경 저감을 고려하지 않았을 때 매년 장비대수가 늘어남에 따라 증가하였고, 친환경 저감을 고려했을 경우 2023년 기준으로 1차 배출량이 63% 감소, 2차 배출량이 25% 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 5c,d). 친환경

저감 전 배출량과 저감 후 배출량을 비교해보면 질소산화물(NOx)과 일산화탄소(CO)가 2018년 11%에서 2023년 26%까지 저감효과가 있었고, 미세먼지(PM-10)과 초미세먼지(PM-2.5)는 2018년 11%에서 2023년 63%까지 저감효과가 크게 있었다(Table 2). 조사기간의 초미세먼지(PM-2.5) 배출량 비는 부산신항 64%~67%와 부산북항 32%~36%로 부산신항이 더 높게 산출되었고, 친환경 저감 후 초미세먼지(PM-2.5) 배출량 비는 부산신항 64%~70%와 부산북항 30%~36%로 유사하게 나타났다(Fig. 5e,f). 이는 장비 대수에 따른 배출량만을 고려한 것으로 실제 부산신항에 친환경 저감이 된 신형의 장비들이 도입되었다면 부산신항과 부산북항의 배출량이 비슷하거나 더 낮을 수도 있다. 많은 비중을 차지하고 경유를 사용하여 미세먼지와 이산화탄소 등 유해 배기가스 배출의 원인으로 지적되는 야드트랙터(Y/T)와 트랜스퍼크레인(T/C)에 친환경 저감정책을 시행하여 대기오염물질 배출량 감소에 노력을 기울인 것으로 보인다.

선박 배출량 대비 친환경 저감 후 하역장비 초미세먼지 배출량 비율은 선박 배출량이 크게 감소하면서 2018년 15.3%에서 2023년 28.1%까지 증가하였다(Table 3). 그러나 하역장비 초미세먼지 배출량은 2018년부터 2021년까지 감소 추세에 있으며, 실제 최근 도입된 친환경 저감된 신형 장비 대수를 고려하면 2023년까지 연도별로 꾸준히 감소 추세일 것으로 생각된다. 화물차와는 달리 하역장비의 초미세먼지 배출

Table 2. Reduction rate of Harbor loading equipment emissions

연도	CO	NOx	PM-10	PM-2.5
2018년	11%	11%	11%	11%
2019년	13%	13%	13%	13%
2020년	22%	21%	25%	25%
2021년	24%	24%	60%	60%
2022년	24%	24%	62%	62%
2023년	26%	26%	63%	63%

Table 3. The ratio of reduced Harbor loading equipment emissions to shipping emissions

연도	하역장비 PM-2.5 1차배출 (tonne/yr)	하역장비 PM-2.5 2차생성 (tonne/yr)	하역장비 총 PM-2.5 (tonne/yr)	선박 총 PM-2.5 (kg/yr)	선박배출 대비(%)
2018년	482	549	1,031	6,729,046	15.3
2019년	483	551	1,035	6,841,064	15.1
2020년	424	509	933	3,006,389	31.0
2021년	232	500	732	2,745,352	26.7
2022년	230	532	762	2,586,404	29.5
2023년	231	537	767	1,589,718(7월)	28.1

량이 상당히 높게 산출되어 항만지역 내 선박 외에도 컨테이너를 적화·양화하는 과정에서 상당한 대기오염 물질이 배출되는 것으로 보인다.

3.2 항만지역 미세먼지, 가스상 물질 현황

연평균 부산신항과 부산북항 그리고 도시대기의 대기오염물질 농도 변화를 살펴보았다(Fig. 6a~f). (초)미

세먼지는 2018년부터 2022년까지 대체로 감소 추세였다가 2023년 1월~7월 평균으로는 증가 추세이며, 특히 미세먼지(PM-10)가 급격히 증가한 이유로는 전년 대비 항사일수 증가가 원인으로 판단된다. 오존(O₃)은 부산신항이 가장 높은 농도를 보였던 2019년에서 2023년 감소하였으나, 항만지역과 도시대기 모두 최근 3년 동안 증가 추세를 보이고 있다. 아황산가스

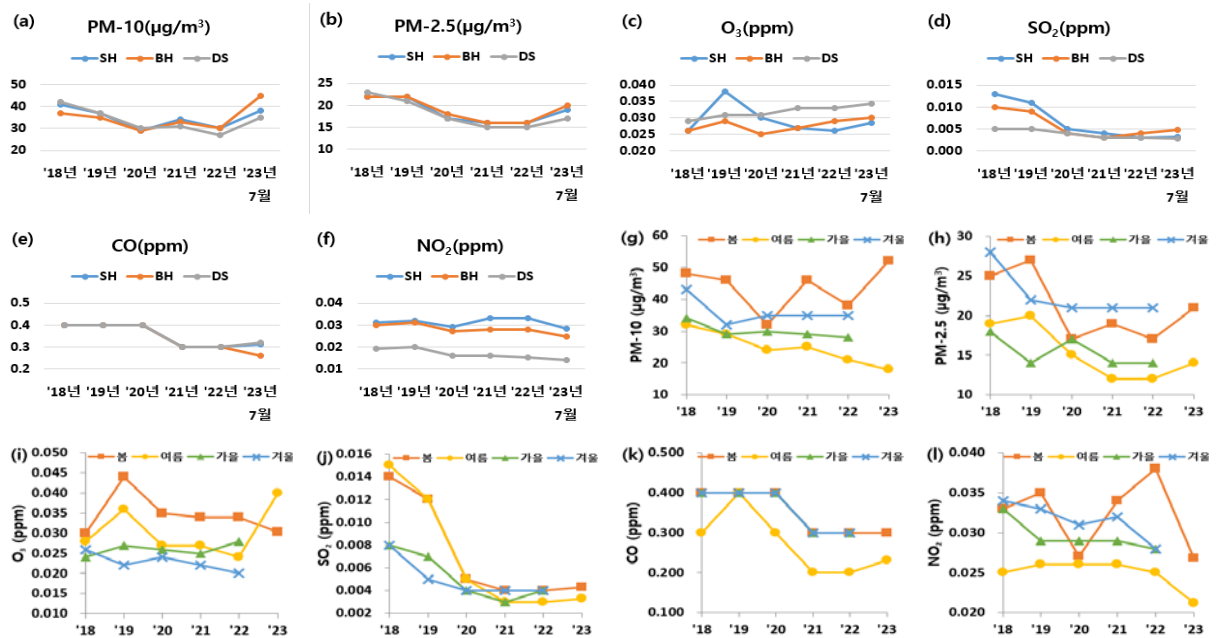


Fig. 6. (a)~(f) Annual average air pollutant concentration trend in port area and urban atmosphere (PM-10, PM-2.5, O₃, SO₂, CO, NO₂), (g)~(l) Average Seasonal Air Pollutant Concentration Trend in Port Area (PM-10, PM-2.5, O₃, SO₂, CO, NO₂)

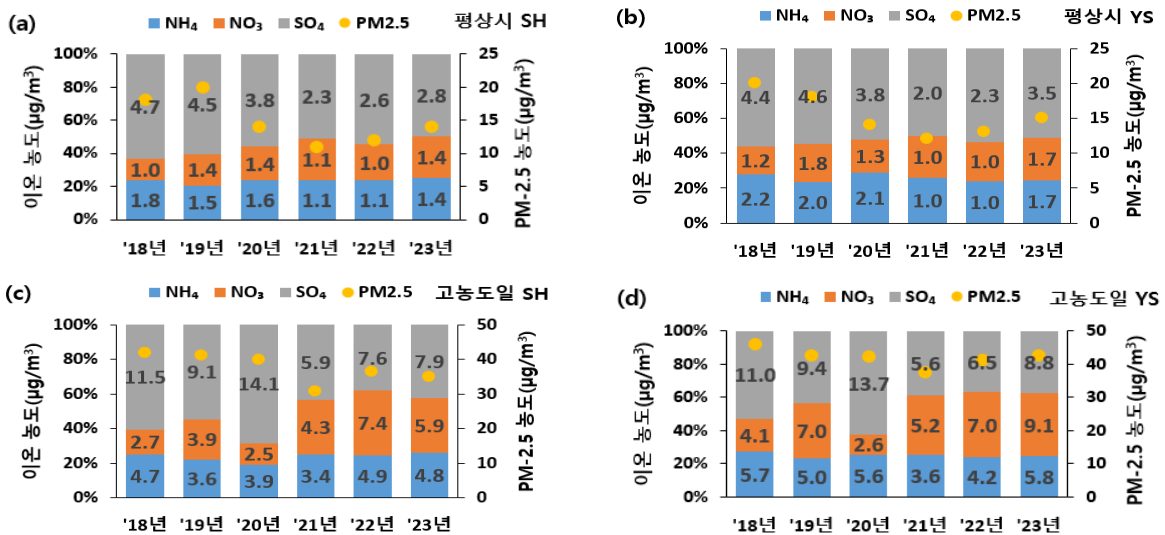


Fig. 7. Concentration of Ion components in summer (a) Ordinary day(SH), (b) Ordinary day(YS), (c) High-concentration day(SH), (d) High-concentration day(YS)

(SO₂)는 2018년 대형 화물선이 많은 부산신항이 가장 높았으며 연료 황함량 규제를 본격적으로 시작한 2020년부터 급격히 감소하여 2023년 현재 항만지역과 도시대기가 유사한 농도를 보이고 있다. 일산화탄소(CO)는 매년 항만지역과 도시대기가 유사한 농도를 나타냈으며 감소추세를 보인다. 이산화질소(NO₂)는 항만지역이 도시대기보다 꾸준히 높은 농도를 나타내는데 이는 항만지역의 화물차나 하역장비 등 오염원에 의한 것으로 추정되며, 도심의 자동차에 비해 월등히 높은 배출을 보이는 것으로 생각된다.

계절별 부산신항과 부산북항의 평균 대기오염물질 농도 변화를 연도별로 살펴보았다(Fig. 6g~l). (초)미세먼지와 이산화질소(NO₂)는 최근 6년간 봄>겨울>가을>여름순으로 계절별 평균 농도가 뚜렷하게 높게 나타났다. 일사량과 온도 등에 영향을 받는 오존(O₃)의 경우 봄>여름>가을>겨울순으로 농도가 높게 나타났다. 또한 봄철에 대부분의 항목에서 가장 높은 농도 추이를 나타냈으며, 연도별 농도 편차도 심하게 나타났다. 이는 항만지역 자체의 계절 특성이라기 보다는 황사의 영향을 많이 받는 계절의 특성으로 생각된다.

3.3 항만지역 및 내륙지역 초미세먼지 구성성분 특성

3.3.1 여름철(5월~9월)

평상시 여름철 부산신항과 연산동의 연평균 초미세먼지(PM-2.5) 농도는 선박규제가 본격적으로 시작된 2020년부터 낮게 관측되었고, 2021년에 최저농도를 보였다가 2023년 5월~7월에 다시 상승하는 추세를 보였다(Fig. 7a,b). 질산염 이온(NO₃⁻)과 암모늄 이온(NH₄⁺) 농도는 초미세먼지 농도와는 무관하게 최근 6년간 유사한 농도를 나타냈으며, 황산염 이온(SO₄²⁻)은 확실히 과거에 비해 최근 3년간 낮게 나타나 선박의 황산화물 규제정책에 의한 초미세먼지 저감효과가 있었음을 확인할 수 있었다. 비중의 측면에서 질산염 이온(NO₃⁻)이 최근 높아졌지만 황산염 이온(SO₄²⁻)의 저

감을 위해 선박규제 외에도 사업장 등 황산화물 저감이 필요하다고 생각된다. 연산동은 황산염 등 오염원이 적은 지역임에도 평상시 여름철 부산신항과 비슷한 성분 농도를 나타내는 것으로 보아 항만지역의 초미세먼지 배출이 남풍을 타고 부산 도심지역에도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

연산동 고농도일 여름철 부산신항과 연산동의 연평균 초미세먼지 농도는 연산동이 더 높게 관측되었고, 부산신항과 연산동의 성분 비중이 평상시 대비 확연히 다르게 나타났다(Fig. 7c,d). 부산신항과 연산동은 평상시보다 3개 항목 모두 2~5배 가량 높게 나타났고 그 중 황산염 이온의 비중이 가장 높게 구성하고 있었다. 최근 3년간은 2018년에 비해 황산염 이온 농도가 낮아지는 추세이고, 2020년도만 황산염 이온 농도가 높은 이유는 일본 남쪽 해상의 화산이 분화 후 화산재가 이동하며 8월 4일에 남해안 지역만 나뭇 수준을 보였기 때문이다. 고농도일의 연산동은 2020년~2022년을 제외한 연도에서 질산염 이온이 부산신항 보다 2배 가량 높게 나타났다. 이는 고농도일의 초미세먼지가 항만지역에 비해 부산 도심지역에서 질산염(NH₄NO₃)의 형태로 존재한다는 것을 의미한다.

직접배출 원소탄소(EC) 대비 질산염(NH₄NO₃), 황산염((NH₄)₂SO₄, (NH₄)₃H(SO₄)₂, NH₄HSO₄) 유기물(OM) 비율을 살펴보았다. 무기성물질(Secondary inorganic aerosol, SIA)의 이차생성 비율(황산염/원소탄소, 질산염/원소탄소)과 유기성물질(Secondary organic aerosol, SOA)의 이차생성 비율(유기물/원소탄소)를 분석하였다¹¹⁾(Fig. 8a,b). 평상시 부산신항은 황산염과 유기물의 비중이 높았고, 2018년 대비 2023년에 3개 항목 모두 원소탄소 대비 증가하는 추세이다. 연산동은 황산염의 비중이 가장 높았고 이차생성 황산염과 유기물이 2018년 대비 2023년에 감소 추세이다. 3개 항목 모두 부산신항보다 연산동에서 높게 나타났다. 이는 평상시 연산동에서 배출되는 오염원에 비해 외부

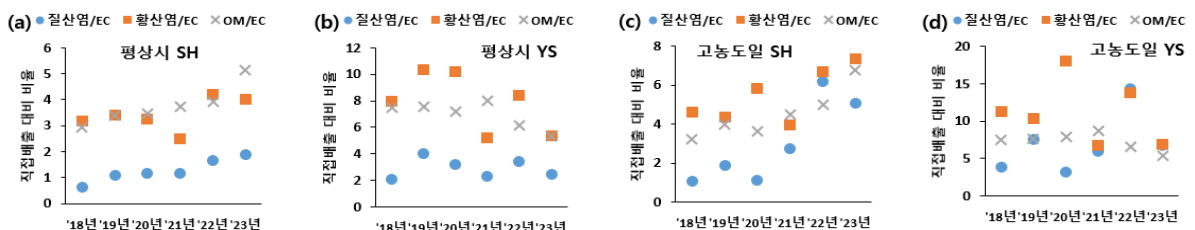


Fig. 8. The ratio to Elemental carbon(EC) in the summer (a) Ordinary day(SH), (b) Ordinary day(YS), (c) High-concentration day(SH), (d) High-concentration day(YS)

에서 유입되어 들어오는 대기오염물질이 있다고 판단된다. 2023년에는 전체적으로 감소하여 부산신항과 유사한 수준으로 나타났다.

고농도일 부산신항은 최근에 3개 항목 모두 이차생성 비율이 증가하는 추세이다(Fig. 8c,d). 이는 해마다 부산신항의 원소탄소의 농도가 감소하는 추세였고, 이에 비해 황산염과 유기물의 농도의 감소량이 크지 않았으며 질산염은 해마다 증가 추세였기 때문이다. 또한 부산신항은 평상시와 고농도일 모두 원소탄소 대비 황산염과 유기물의 비율이 비슷한 추세로 움직인다. 연산동은 2020년도 화산폭발 영향으로 추정되는 황산염을 제외하고 평상시와 유사하게 나타났다. 2022년 사례일에 황산염과 질산염의 비율이 높게 나타난 이유는 연산동의 원소탄소 농도가 낮게 나타났기 때문이다. 주요 사례일의 기류는 국외유입 후 국내 대기정체로 외부 및 자체 요인에 의한 염의 생성으로 판단된다.

3.3.2 겨울철(10월~4월)

평상시 겨울철 부산신항과 연산동의 연평균 초미세먼지 농도는 여름철과 유사하게 선박규제가 본격적으로 시작된 2020년부터 낮게 관측되었다. 그에 따라 황산염 이온(SO₄²⁻) 농도도 낮게 나타났으며 겨울철에도 황산화물 규제정책에 의한 초미세먼지 저감효과가 있었음을 확인할 수 있었다. 질산염 이온(NO₃⁻)과 암모늄 이온(NH₄⁺) 농도는 최근 6년간 큰 변동은 없었다. 연산동은 황산염 이온과 질산염 이온이 감소했다가 다시 증가하는 추세임에도 초미세먼지 농도는 감소 추세로 나타났다. 이는 과거 연산동 초미세먼지 구성 중 무기물이 아닌 유기물의 비중이 높았을 것으로 생각되며, 실제 2023년 유기탄소의 농도가 2018년 대비 28% 감소한 것으로 분석되었다(Table 4). 부산신항 대비 연산동은 황산염 이온 농도가 전반적으로 소폭 낮게 나타났고, 2023년을 포함하여 질산염 이온이 더 높게 나타난 시기도 있다. 겨울철 초미세먼지 구성성분 중 부산신항과 연산동 모두 최근 3년간 질산염 비중이 높아져가는 추세이다(Fig. 9a,b).

연산동 고농도일 겨울철 부산신항과 연산동의 연평균

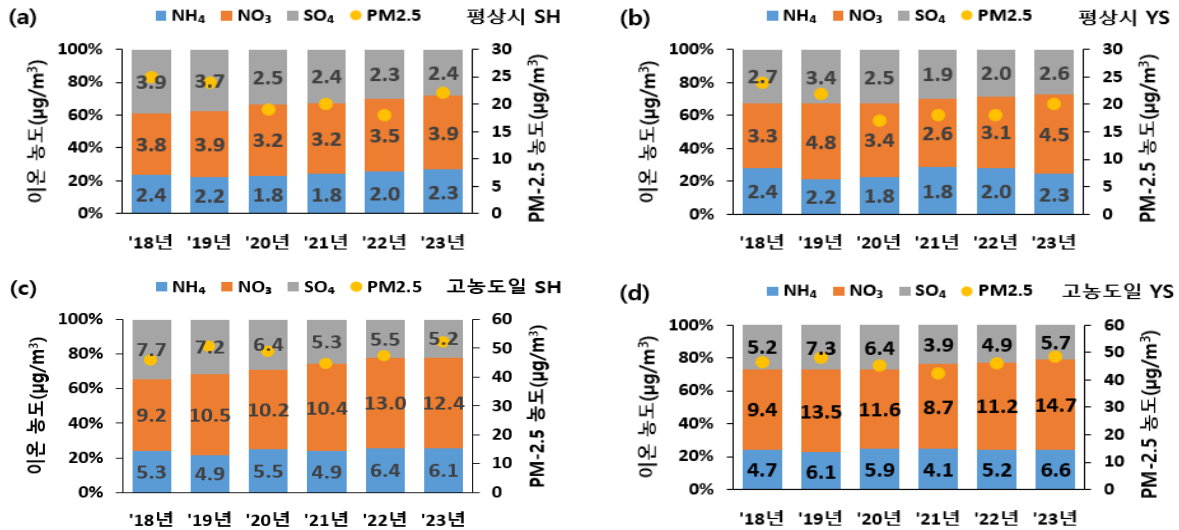


Fig. 9. Concentration of Ion components in winter (a) Ordinary day(SH), (b) Ordinary day(YS), (c) High-concentration day(SH), (d) High-concentration day(YS)

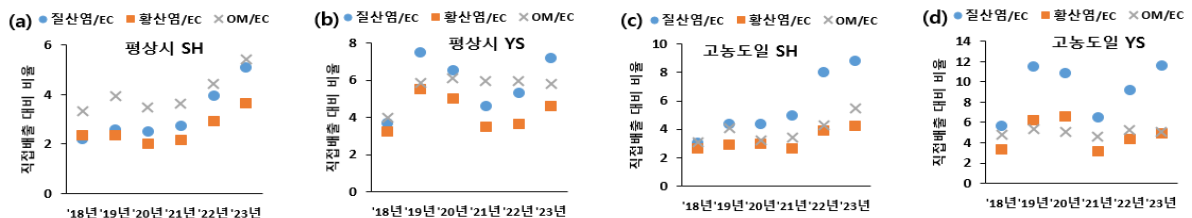


Fig. 10. The ratio to Elemental carbon(EC) in the winter (a) Ordinary day(SH), (b) Ordinary day(YS), (c) High-concentration day(SH), (d) High-concentration day(YS)

초미세먼지 농도는 전반적으로 부산신항이 더 높게 관측되었고, 질산염 이온은 연산동이 더 높게 나타났다(Fig. 9c,d). 부산신항과 연산동은 평상시보다 3개 항목 모두 2~3배 가량 높게 나타났고, 그 중 특히 질산염 이온이 가장 높은 비중을 차지해 여름철과는 다른 비중을 보이며, 최근 3년간 농도 증가 추세로 황산염 이온의 감소 추세와는 다르게 나타났다. 산업활동 등 고정오염원의 연료인 중유에 다량 포함된 황과 이동오염원 자동차 배출이 주 오염원인 질소의 연도별 추세를 보면, 부산신항은 황산염 이온이 꾸준히 감소하는 반면 연산동은 황산염 이온의 유의미한 농도 변화는 없었고 질산염 이온은 두 지점에서 꾸준히 증가하는 추세를 보였다.

직접배출 원소탄소(EC) 대비 질산염(NH₄NO₃), 황산염((NH₄)₂SO₄, (NH₄)₃H(SO₄)₂, NH₄HSO₄) 유기물(OM) 비율을 살펴보면, 평상시 부산신항은 매년 유기물의 비중이 가장 높았고, 최근 3년간 원소탄소 대비 유기물과 질산염의 비율이 급격히 증가하는 추세이다. 이

는 최근 3년간 원소탄소의 농도가 감소했기 때문이다. 연산동은 여름철과 비슷하게 3개 항목 모두 직접배출 대비 부산신항보다 높게 나타났다. 2019년에서 2020년에 비율이 높게 나타난 이유는 원소탄소의 농도가 감소했으나 3개 항목이 유사하거나 소폭 높은 농도로 나타났기 때문이다. 최근 3년간 부산신항과 유사하게 질산염의 비율이 증가하였고, 유기물 비율은 큰 변동 없이 유지되는 상태로 분석되었다(Fig. 10a,b). 겨울철 연산동도 자체 배출되는 오염원이 아닌 외부에서 유입되는 대기오염물질이 있다고 생각된다.

고농도일 부산신항은 최근 3년간 질산염 비율이 월등히 증가 추세로 나타났다(Fig. 10c,d). 이는 부산신항의 원소탄소의 농도가 감소하는 추세였으나 질산염이 증가하는 추세였기 때문이다. 부산신항과 연산동의 연도별 질산염/원소탄소 비는 평상시와 비슷한 흐름이지만 실제 질산염의 농도가 평상시보다 2배가량 높게 나타났다. 유기물과 황산염 비는 평상시와 유사하게 매년 큰 변화가 없다.

Table 4. Concentration of PM-2.5 in ordinary day

지점	계절	연도	PM2.5 (µg/m ³)	NH ₄ ⁺ (µg/m ³)	NO ₃ ⁻ (µg/m ³)	SO ₄ ²⁻ (µg/m ³)	OC (µg/m ³)	EC (µg/m ³)
부산신항	여름철 (5~9월)	2018년	18	1.804	0.962	4.733	1.964	4.117
		2019년	20	1.533	1.377	4.477	1.647	3.989
		2020년	14	1.606	1.383	3.756	1.522	3.772
		2021년	11	1.071	1.112	2.286	1.221	3.247
		2022년	12	1.125	1.041	2.619	0.817	2.278
		2023년	14	1.443	1.408	2.849	0.965	3.546
	겨울철 (10~4월)	2018년	25	2.353	3.785	3.928	2.199	5.212
		2019년	24	2.157	3.938	3.651	1.965	5.517
		2020년	19	1.762	3.249	2.543	1.681	4.172
		2021년	20	1.798	3.203	2.422	1.514	3.916
		2022년	18	1.995	3.457	2.334	1.133	3.595
		2023년	22	2.322	3.906	2.448	0.992	3.849
연산동	여름철 (5~9월)	2018년	20	2.175	1.236	4.382	0.775	4.157
		2019년	18	1.995	1.823	4.626	0.590	3.180
		2020년	14	2.085	1.349	3.783	0.539	2.752
		2021년	12	1.038	0.960	2.030	0.536	3.078
		2022년	13	1.014	0.960	2.290	0.360	1.579
		2023년	15	1.674	1.674	3.486	0.872	3.325
	겨울철 (10~4월)	2018년	24	2.023	3.325	2.727	1.164	4.623
		2019년	22	2.509	4.778	3.401	0.821	3.426
		2020년	17	1.861	3.430	2.537	0.675	2.944
		2021년	18	1.455	2.618	1.891	0.734	3.130
		2022년	18	1.608	3.073	2.019	0.747	3.175
		2023년	20	2.461	4.518	2.572	0.810	3.345

3.3.3 비교분석

평상시와 고농도일에 부산신항과 연산동 모두 겨울철에 비해서 여름철 황산염 이온이 높게 나타났으며 특히 선박 연료유 황함량 규제정책 이전에 더욱 뚜렷하게 차이가 난다. 이는 여름철 강한 일사량으로 대기 중 광화학적 산화반응이 활발하며¹²⁾ 높은 습도로 아황산가스의 산화반응이 잘 일어나 비중이 높아지는 반면, 겨울철 질소산화물에 비해 OH 라디칼 반응이 느려 황산염의 농도가 낮아진다. 한편 겨울철에 질산염 이온이 높게 나타났는데, 이는 겨울철 이산화질소가 질산(HNO₃)으로 반응하는 산화속도가 아황산가스보다 빨라 황산(H₂SO₄)에 비해 암모니아와 반응을 더 많이하여 질산염 생성이 활발하기 때문이다. 또한 여름철 높은 기온에서 휘발되어 질산염의 결합이 분해되어 암모니아와 질산으로 존재하며, 질산과 암모니아는 수용성으로 강우에 씻겨 제거된다¹³⁾. 질산염 입자는 온도와 습도에 영향을 많이 받아 여름철에는 가스상으로 존재하면서 알칼리금속과 반응하여 조대입자 영역에 나타

나고, 겨울철에는 암모니아와 결합하여 염형태로 미세입자 영역에 나타난다¹²⁾.

고농도일에 부산신항과 연산동 공통적으로 과거대비 황산염 이온이 감소하는 추세이며, 질산염 이온은 증가하는 추세이다. 따라서 고농도 초미세먼지 저감을 위해서는 질소산화물에 대한 규제정책이 필요한 것으로 보인다.

평상시 무기성물질 이차생성 비율(SIA)은 여름철에 황산염의 기여도가 높고 겨울철에 질산염의 기여도가 높게 나타났으며, 최근 겨울철에 무기성 이차생성 기여도가 높아진다는 점이 특징이다. 유기성물질 이차생성 비율(SOA)은 부산신항이 계절과 무관하게 기여도가 증가 추세이며 연산동은 여름철에 기여도가 높았으나 2023년에 겨울철과 유사한 수준으로 낮게 나타났다.

고농도일 무기성물질 이차생성 비율(SIA)은 부산신항의 경우 계절 상관없이 증가 추세이고, 연산동은 겨울철에 질산염 기여도가 증가 추세이다. 유기성물질 이

Table 5. Concentration of PM-2.5 in High-concentration day

지점	계절	연도	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NH ₄ ⁺ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₃ ⁻ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₄ ²⁻ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
부산신항	여름철 (5~9월)	2018년	42	4.707	2.748	11.460	3.324	7.642
		2019년	41	3.638	3.887	9.054	2.647	7.506
		2020년	40	3.869	2.527	14.065	2.962	7.623
		2021년	31	3.357	4.290	5.870	2.021	6.469
		2022년	36	4.911	7.405	7.595	1.549	5.543
		2023년	35	4.836	5.890	7.892	1.500	7.241
	겨울철 (10~4월)	2018년	46	5.349	9.242	7.650	3.890	8.523
		2019년	51	4.875	10.485	7.177	3.070	8.919
		2020년	49	5.533	10.180	6.387	3.011	6.948
		2021년	44	4.906	10.369	5.286	2.687	6.510
		2022년	47	6.363	13.006	5.528	2.088	6.392
		2023년	52	6.076	12.424	5.198	1.819	7.109
연산동	여름철 (5~9월)	2018년	46	5.661	4.094	10.983	1.599	7.417
		2019년	43	5.044	7.005	9.406	1.202	6.584
		2020년	42	5.572	2.567	13.673	1.022	5.776
		2021년	38	3.597	5.218	5.632	1.133	7.001
		2022년	41	4.179	6.976	6.517	0.631	2.988
		2023년	43	5.783	9.109	8.836	1.738	6.606
	겨울철 (10~4월)	2018년	46	4.723	9.418	5.160	2.142	7.396
		2019년	48	6.065	13.497	7.343	1.518	5.778
		2020년	45	5.934	11.591	6.444	1.372	4.966
		2021년	42	4.124	8.714	3.937	1.736	5.713
		2022년	46	5.190	11.199	4.853	1.569	5.874
		2023년	49	6.625	14.730	5.738	1.642	5.933

차생성 비율(SOA)은 부산신항이 계절과 무관하게 기여도가 증가 추세이며, 연산동은 겨울철에는 매년 유사하고 여름철에 감소하는 추세이다.

3.4 항만지역 2차생성 유기물질이 부산 내륙에 미치는 영향

3.4.1 열적휘발도에 따른 유기탄소

연산동 초미세먼지 고농도일 부산신항과 연산동의 계절별 탄소농도를 분석하였다(Fig. 11). 유기탄소(OC)는 열적휘발도에 따라 OC₁~OC₄로 분류할 수 있다. 낮은 온도에서 휘발되는 OC₁는 휘발성유기화합물(VOC)에 의해 생성되고, 높은 온도에서 휘발되는 OC₄는 고분자 유기화합물에 의해 생성된다. 2018년부터 2023년까지 초미세먼지 농도 감소에 따라 탄소성분 농도가 꾸준히 감소 추세이며, 2023년 현재 계절에 상관없이 항만지역과 도심지역이 비슷한 탄소성분 농도를 나타냈다. 직접배출의 지표인 원소탄소는 여름철보다는 겨울철에 농도가 높은 편이며, 항만지역이 해마다 큰 폭으로 감소하였고 도심지역은 낮은 폭으로 감소하였다. 특히 여름철 도심지역은 직접배출 대비 열적휘발도가 높은 OC₁의 농도가 높게 나타났고 항만지역보다도 높은 편인데, 이는 여름철 높은 기온으로 휘발성유기물질이 공기 중에 다량 떠다니고 남풍계열의 바람에 의해 항만지역에서 도심지역으로 유기물질이 이동해 오면서 저분자 유기물질이 응축되어 생성되는 것으로 생각된다. 반면에 겨울철 도심지역의 OC₁의 농도가 여름철과 달리 원소탄소와 비슷한 수준이며 항만지역 보다

낮게 나타났는데, 이는 북풍 또는 서풍계열의 바람으로 변동되면서 항만지역으로부터의 영향이 덜 한 것으로 생각된다.

부산신항의 시간대별 탄소농도는 계절에 따른 특성은 없어보이며 오전 9시와 저녁 8시에 높은 농도를 나타냈다. 연산동은 여름철에 OC₁의 농도가 높은 베이스를 유지하며 부산신항과 유사한 수준이다. 반면에 원소탄소와 OC₄는 낮은 농도 추세를 유지하고있으며, 시간대에 따른 특성은 없어보인다. 연산동은 겨울철에 여름철 대비 원소탄소 농도가 높은 경향을 보이고 OC₁은 낮은 경향을 보여 원소탄소와 유사한 농도를 나타냈다.

3.4.2 2차생성 유기탄소(SOC)

2차생성 유기탄소(Secondary organic carbon, SOC)는 유기탄소(OC)와 원소탄소(EC) 비를 이용하여 추정할 수 있다¹⁴⁾. 2차생성 유기탄소(SOC)를 제외한 유기탄소(OC), 원소탄소(EC), 1차배출 유기탄소(Primary organic carbon, POC) 모두 겨울철이 여름철에 비해 높은 농도를 나타냈다(Table 6, Fig. 12). 특히 도심지역은 겨울철에 2차생성 유기탄소의 생성량이 낮게 나타났는데, 북서풍 계열의 풍향으로 변화하는 계절로 항만지역의 유기물 유입 영향을 여름철에 비해 덜 받아 농도가 낮아지는 것으로 판단된다. 본격적으로 규제가 시작된 2020년 이후에는 2018년~2019년에 비해 모든 항목의 농도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. POC/OC 비와 SOC/OC 비를 살펴보면,

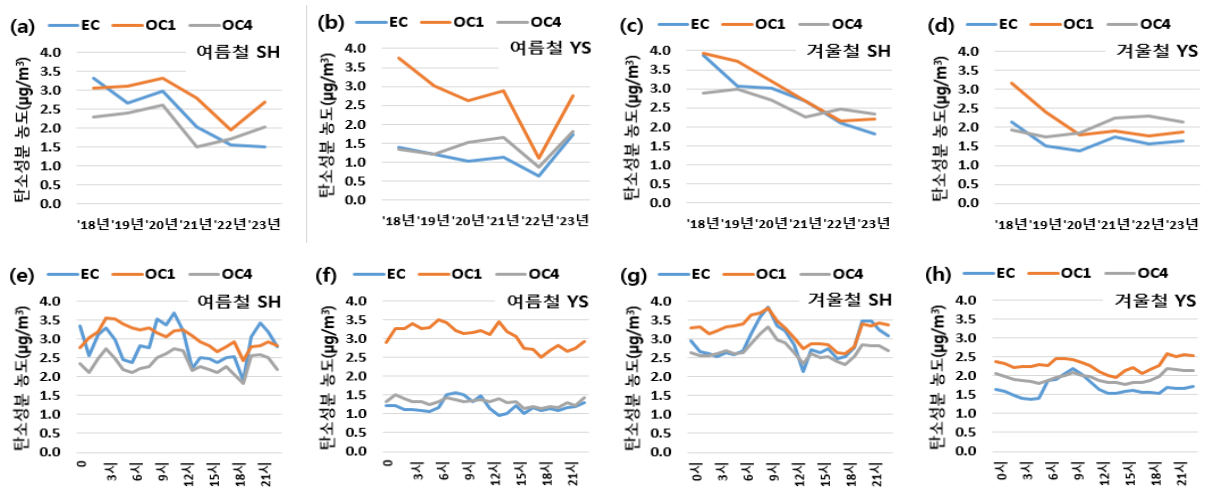


Fig. 11. High concentration of carbon emissions (a)~(b) Summer(SH, YS), (c)~(d) Winter(SH, YS), (e)~(f) Hourly in the summer(SH, YS), (g)~(h) Hourly in the winter(SH, YS)

여름철은 항만지역과 도심지역의 비가 비슷한데 2차 생성 유기탄소의 비율이 높아 항만 유기물 배출이 도심지역에 영향을 미쳐 대기 중 유기물의 농도를 높이는 것으로 해석할 수 있다. 겨울철은 항만지역 대비 도심지역의 SOC/OC가 낮게 나타나 주풍향의 변화로 인

해 여름철에 비해 항만지역으로부터 유기물이 유입이 줄어든다고 판단된다. 또한 계절과 상관없이 항만지역이 도심지역보다 2차생성 유기탄소의 농도가 높게 나타나 유기탄소의 2차생성 반응은 항만지역에서 상당 부분 이루어진 상태에서 도심지역으로 유입되는 것으

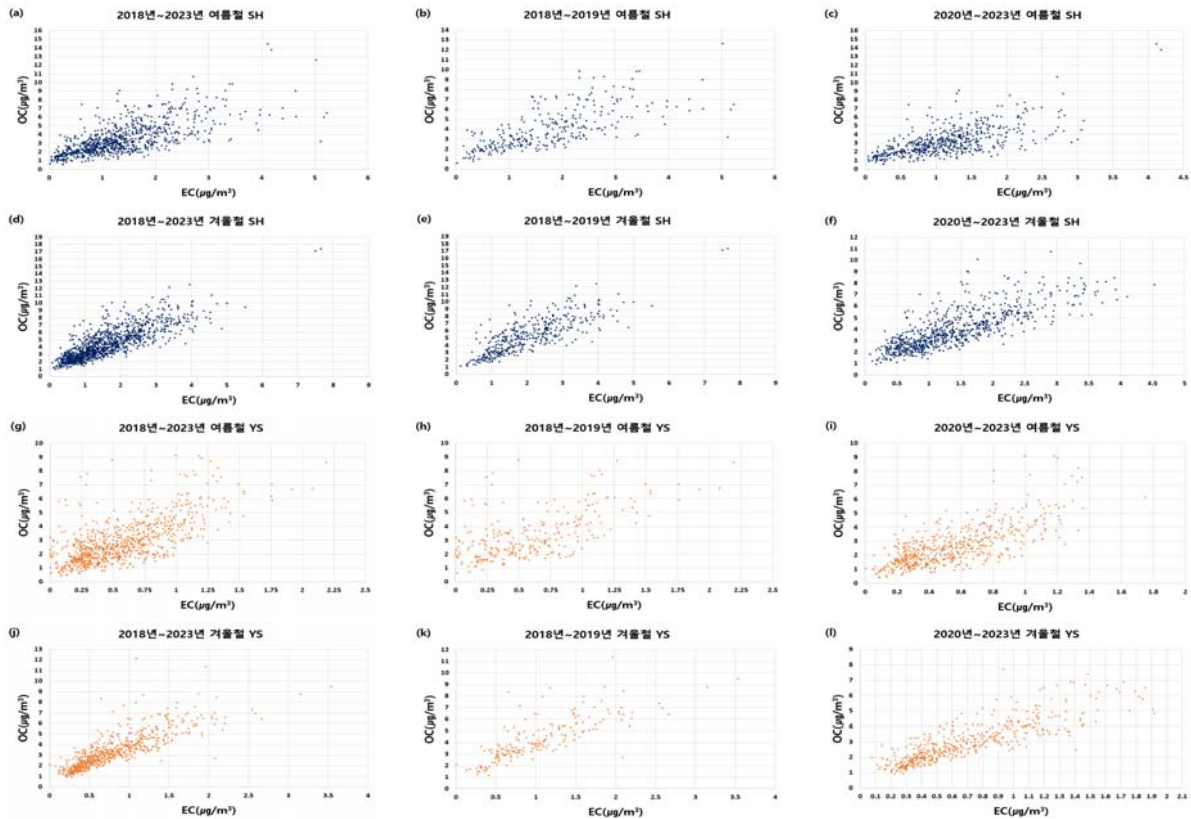


Fig. 12. Organic carbon(OC) and Elemental carbon(EC) before and after ship sulfur content regulation (a)~(c) Summer(SH), (d)~(f) Winter(SH), (g)~(i) Summer(YS), (j)~(l) Winter(YS)

Table 6. Primary organic carbon(POC) and Secondary organic carbon(SOC) production rate

지점	계절	연도	OC (µg/m ³)	EC (µg/m ³)	POC (µg/m ³)	SOC (µg/m ³)	POC/OC (%)	SOC/OC (%)	OC/EC
부산 신항	여름철	18~23년	3.462	1.360	1.246	2.215	36%	64%	2.5
		18~19년	4.018	1.766	1.589	2.428	40%	60%	2.3
		20~23년	3.168	1.145	0.981	2.186	31%	69%	2.8
	겨울철	18~23년	4.403	1.619	1.754	2.649	40%	60%	2.7
		18~19년	5.320	2.059	2.317	3.004	44%	56%	2.6
		20~23년	3.908	1.381	1.995	1.913	51%	49%	2.8
연산동	여름철	18~23년	2.857	0.565	1.042	1.815	36%	64%	5.1
		18~19년	3.362	0.618	1.390	1.973	41%	59%	5.4
		20~23년	2.612	0.539	0.898	1.714	34%	66%	4.8
	겨울철	18~23년	3.313	0.786	1.886	1.427	57%	43%	4.2
		18~19년	3.790	0.924	2.217	1.573	58%	42%	4.1
		20~23년	3.099	0.724	1.724	1.375	56%	44%	4.3

로 생각된다.

탄소성분의 OC/EC 비가 2.5 이상일 때 2차생성 유기탄소의 기여가 큰 것으로 알려져 있다¹⁵⁾. 부산신항은 OC/EC 비가 계절과 관계없이 2.5 내외로 나타났고, 연산동은 부산신항에 비해 2배 가량 높아 항만지역에서 도심지역으로 갈수록 2차생성 유기탄소가 추가적으로 생성된다고 판단된다. 특히 여름철이 가장 높게 나타나 항만지역의 영향을 받기 좋은 기상조건과 높은 온도에서 2차생성 유기탄소의 기여도가 높은 것으로 생각된다.

3.5 종관기상분석

3.5.1 항만지역(부산신항)

부산신항의 선박배출 규제 전 2018년~2019년의 아황산가스는 서풍계열의 바람이 10 m/s 내외로 강할 때, 이산화질소는 남서풍과 북서풍계열의 바람이 2 m/s 내외로 약할 때, 미세먼지는 서풍계열의 바람이 10 m/s 내로 강할 때와 남서풍과 북서풍의 바람이 5 m/s 내로 약할 때, 초미세먼지는 남서풍계열의 5 m/s 내외일 때와 북풍과 남풍계열의 바람이 2 m/s로

약할 때, 질산염 이온은 북풍계열의 바람이 3 m/s 내로 약할 때, 황산염 이온은 남서풍의 바람일 때, 원소탄소는 남서풍계열의 바람이 5 m/s 내로 약할 때, 유기탄소는 서풍계열의 바람이 10 m/s 내로 강할 때나 풍향과 관계없이 2 m/s 내로 약할 때 농도가 높게 나타났다(Fig. 13a~h).

부산신항의 선박배출 규제 후 2020년~2023년의 아황산가스는 남서풍계열의 바람이 10 m/s 내로 강할 때, 이산화질소는 남서풍과 북서풍계열의 바람이 2 m/s 내외로 약할 때, 미세먼지는 풍향과 관계없이 바람이 10 m/s 내로 강할 때, 초미세먼지는 남서풍계열의 10 m/s 내외로 강할 때와 바람이 2 m/s로 약할 때, 질산염 이온은 북풍계열의 바람이 5 m/s 내외일 때, 황산염 이온은 남풍계열의 바람이 10 m/s 내로 강할 때, 원소탄소는 남서풍계열의 바람이 8 m/s 내이거나 2 m/s로 약할 때, 유기탄소는 풍향과 관계없이 2 m/s 내외로 약할 때 농도가 높게 나타났다(Fig. 13i~p). 부산신항 측정소 위치상 부두의 우측에 위치하여 북서풍과 남서풍계열의 바람이 불 때 대부분의 대기오염물질 농도가 증가하는 것으로 보인다. 특히

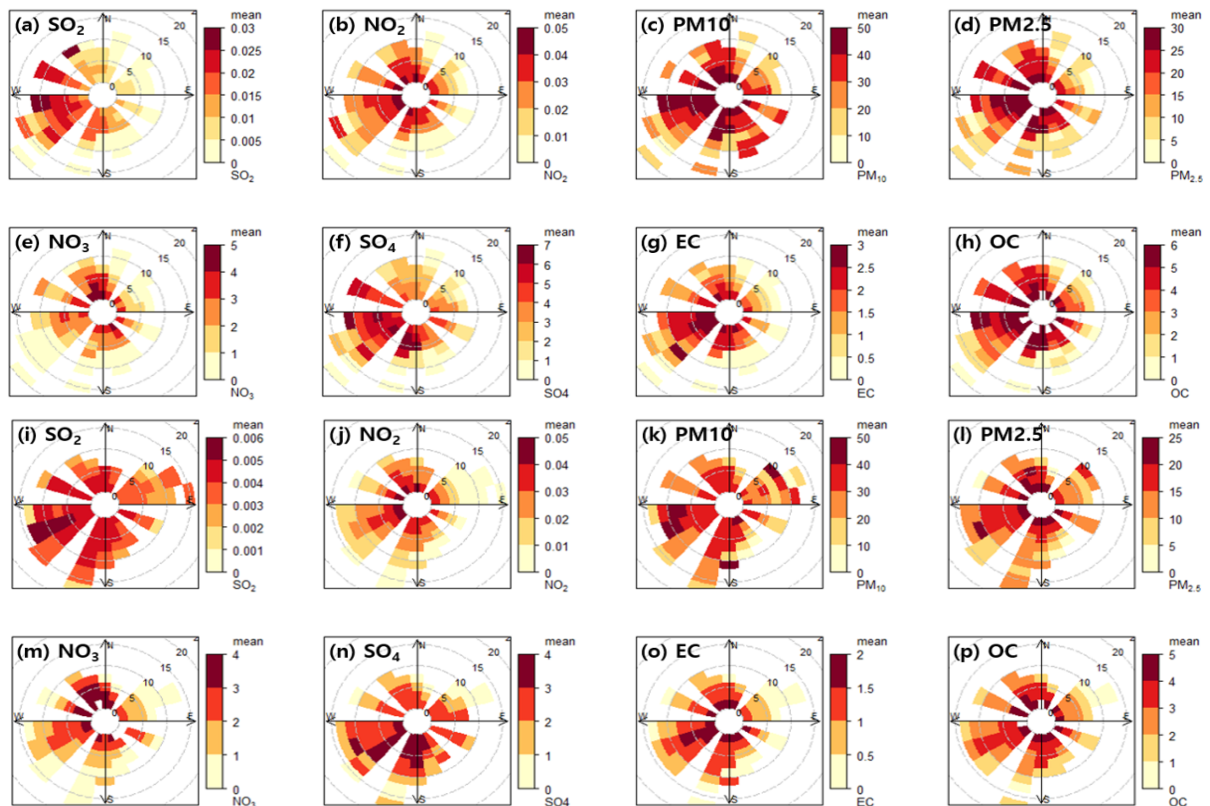


Fig. 13. Analysis according to weather conditions before and after ship sulfur content regulation(SH) (a)~(h) Before regulation, (i)~(p) After regulation

질소 항목의 경우 북서풍계열의 바람이 약할 때 농도가 높아지는 것으로 보아 컨테이너부두 내 하역하는 과정에서 많이 배출되는 것으로 추측된다. 또한 선박 배출 규제 전 후 부산신항의 전 항목의 농도가 전체적으로 낮아진 것을 확인할 수 있었다.

3.5.2 도심지역(연산동)

연산동의 선박배출 규제 전 2018년~2019년의 아황산가스는 남풍계열의 바람이 5 m/s 내외일 때, 이산화질소는 남서풍과 북서풍계열의 바람이 2 m/s 내로 약할 때, 미세먼지는 남서풍계열의 바람이 10 m/s 이상으로 강할 때와 5 m/s 내외일 때, 초미세먼지는 북풍과 남서풍계열의 2 m/s 내외일 때나 남풍계열의 바람이 5m/s 이내일 때, 질산염 이온은 서풍과 북풍계열의 바람이 5 m/s 내외일 때, 황산염 이온은 남풍계열의 바람이 5 m/s 내외일 때, 원소탄소는 2 m/s 내외일 때, 유기탄소는 2 m/s 내외로 바람이 약할 때 농도가 높게 나타났다(Fig. 14a~h).

연산동의 선박배출 규제 후 2020년~2023년의 아황

산가스는 남풍계열의 바람이 8 m/s 내로 강할 때, 이산화질소는 남서풍과 북서풍계열의 바람이 2 m/s 내로 약할 때, 미세먼지는 풍향과 관계없이 바람이 10 m/s 내외로 강할 때, 초미세먼지는 바람이 2 m/s로 약할 때, 질산염 이온은 북서풍과 서풍계열의 바람이 5 m/s 내외일 때, 황산염 이온은 남풍계열의 바람이 5 m/s 내외일 때, 원소탄소는 바람이 2 m/s로 약할 때와 남서풍계열의 바람이 15 m/s로 강할 때와 바람이 2 m/s로 약할 때, 유기탄소는 북서풍과 남풍계열의 바람이 5 m/s 내외일 때와 풍향과 관계없이 2 m/s 내외로 약할 때 농도가 높게 나타났다(Fig. 14i~p). 선박배출 규제 후 아황산가스의 농도가 많이 낮아져 풍향과 관계없는 농도분포를 보였다. 질소 항목의 경우 북서풍계열의 바람이 약하게 불 때 농도가 높게 나타났는데 부산신항보다는 농도분포가 낮은 편이고 도심지역의 자동차 배출에 의한 영향으로 생각된다. 선박배출 규제 전 후 부산신항보다 감소폭은 작으나 연산동의 전 항목의 농도가 전체적으로 낮아진 것을 확인할 수 있었다.

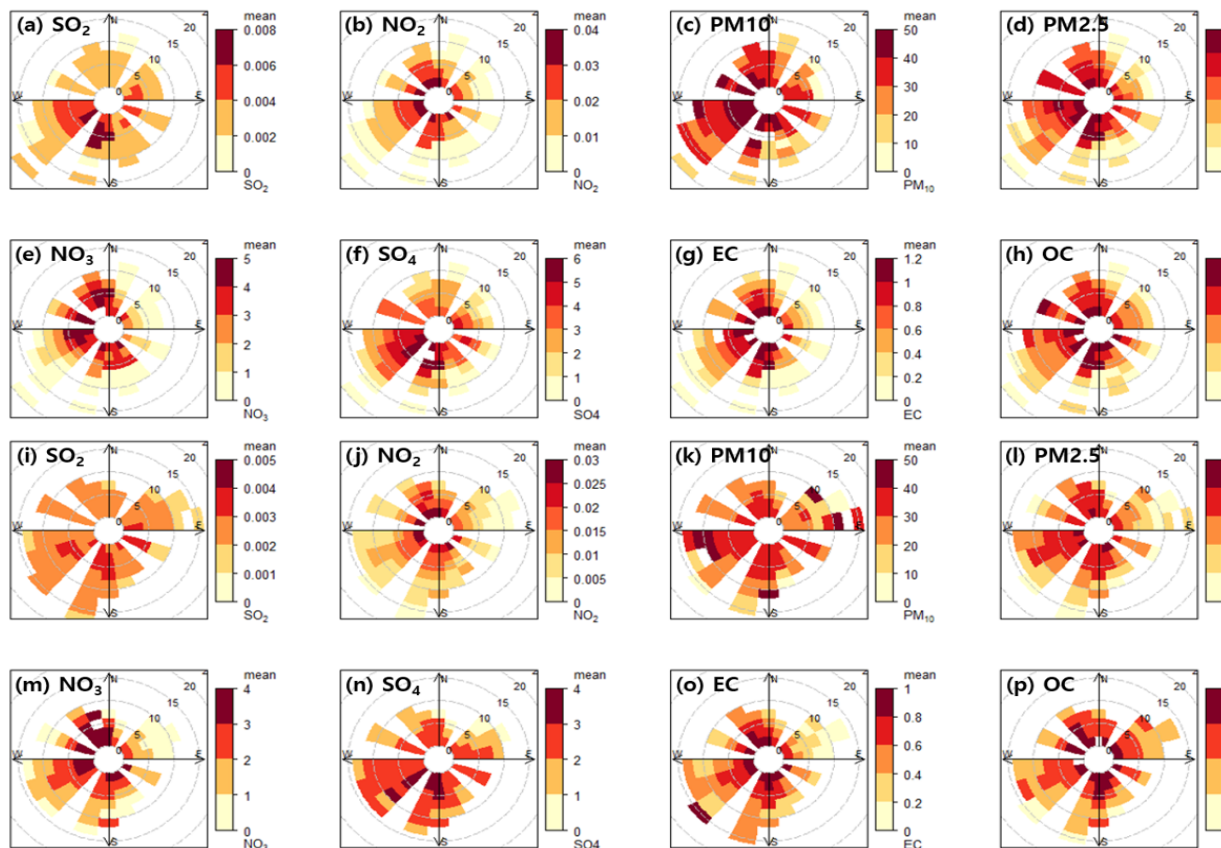


Fig. 14. Analysis according to weather conditions before and after ship sulfur content regulation(SH) (a)~(h) Before regulation, (i)~(p) After regulation

3.6 수용모델링을 활용한 배출원별 기여도

항만지역의 수용모델링(PMF)을 분석하여 초미세먼지(PM-2.5)의 주요 오염원별 기여도를 산정하였다(Fig. 15). 항만지역의 5가지 주요원인 중 (a) 도로재비산은 자동차 타이어 마모와 사업장에서 일정한 배출구 없이 배출되는 먼지, 건설공사, 나대지, 농축산활동 등에서 발생하는 먼지로 크롬(Cr) 90.6%, 구리(Cu) 83.2%, 철(Fe) 74.0%, 망간(Mn) 74.9%, (Mo) 89.0%, 아연(Zn) 73.4%의 금속성분들이 주 오염원으로 나타났다. (b) 중유연소는 선박이 주 배출원으로 대표적인 지시자인 바나듐(V) 91.6%, 니켈(Ni) 46.3%, 황산이온(SO₄²⁻) 31.9%로 나타났다. (c) 토양은 대표적인 지시자인 규소(Si) 85.1%, 알루미늄(Al) 81.4%, 칼슘이온(Ca²⁺) 32.2%로 나타났다. (d) 해염은 대표적인 지시자인 나트륨이온(Na⁺) 75.9%, 염소이온(Cl⁻) 41.7%, 마그네슘이온(Mg²⁺) 77.8%로 나타났다. (e) 자동차배출은 대표적인 지시자인 질산이온(NO₃⁻) 80.9%, 암모늄이온(NH₄⁺) 71.9%, 무기탄소(EC) 37.0%, 유기탄소(OC) 42.2%로 나타났다.

도심지역의 수용모델링(PMF)을 분석하여 초미세먼지(PM-2.5)의 주요 오염원별 기여도를 산정하였다(Fig. 16). 도심지역의 6가지 주요원인 중 (a) 도로재비

산은 코발트(Co) 61.4%, 크롬(Cr) 55.9%, 구리(Cu) 67.4%, 리튬(Li) 79.2%, 망간(Mn) 85.9%, 몰리브덴(Mo) 64.4%의 금속성분들이 주 오염원으로 나타났다. (b) 중유연소는 선박이 주 배출원으로 대표적인 지시자인 바나듐(V) 71.3%, 황산이온(SO₄²⁻) 62.4%로 나타났다. (c) 토양은 대표적인 지시자인 규소(Si) 48.0%, 알루미늄(Al) 90.7%, 셀레늄(Se) 91.2%, 칼슘이온(Ca²⁺) 36.6%, 구리(Cu) 30.8%로 나타났다. (d) 장거리이동은 대표적인 지시자인 비소(As) 93.7%, 카드뮴(Cd) 87.1%, 니켈(Ni) 71.2%, 납(Pb) 78.3%, 아연(Zn) 55.6%로 나타났다. (e) 해염은 대표적인 지시자인 나트륨이온(Na⁺) 74.4%, 염소이온(Cl⁻) 54.4%, 마그네슘이온(Mg²⁺) 64.2%로 나타났다. (f) 자동차배출은 대표적인 지시자인 질산이온(NO₃⁻) 78.2%, 암모늄이온(NH₄⁺) 54.4%, 무기탄소(EC) 42.5%, 유기탄소(OC) 28.5%로 나타났다.

3.7 항만지역 배출량 관리정책에 따른 연도별 배출량 변화

부산항의 선박 배출관리는 2020년에 일반해역 선박 연료유 황함유량을 3.5%에서 0.5%로 강화하여 2020년 1월에 외항선박, 2021년 1월에 내항선박에 적용하

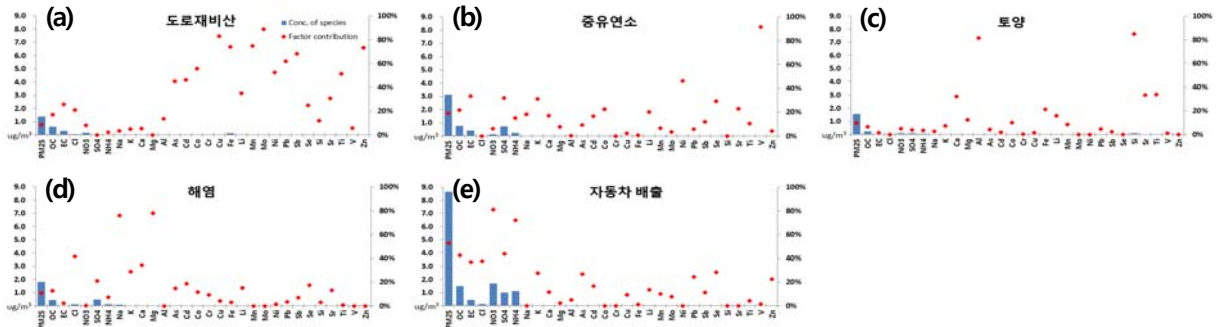


Fig. 15. PMF source profiles(SH)

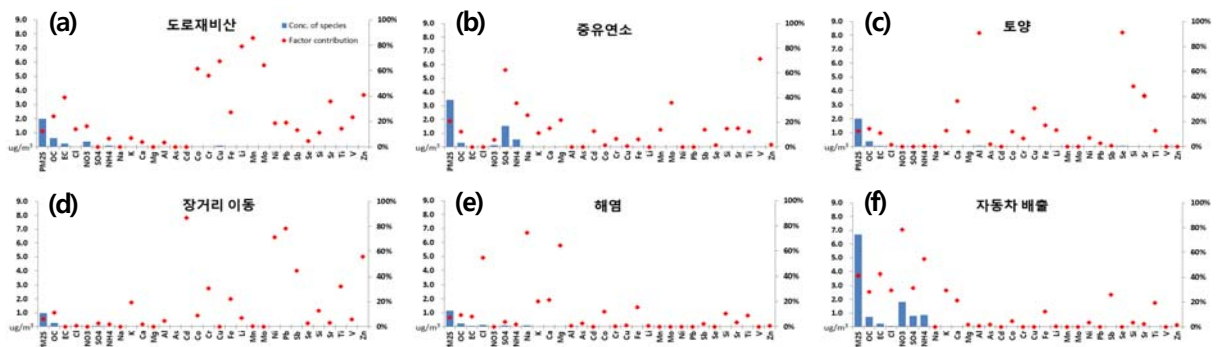


Fig. 16. PMF source profiles(YS)

였고, 5대 대형항만 인근 배출규제해역(Emission Control Area, ECA) 지정으로 2020년 9월에 모든 정박선 0.1%, 2022년 1월에 모든 선박 0.1%를 적용하였다. 2019년 12월에 선박 저속운항해역으로 지정되어 3,000톤 이상의 컨테이너선, 세미컨테이너선, 자동차 운반선을 대상으로 선박 저속운항 프로그램(Vessel Speed Reduction, VSR) 자발적 참여를 유도하였다. 속도 저감은 컨테이너선 12노트, 일반선 10노트로 연료 소모량 감소로 인한 배출량 저감을 목표로 하였으며 입출항료 감면율은 15%~30% 수준이며 계절관리기간(12월~3월)에 인센티브 강화로 평상시의 10% 정도 상향된다. 부산항의 컨테이너선 참여율은 2021년 기준으로 42%로 낮은 수준이다. 선박 정박 중에 대기오염물질 배출이 상당한 것으로 알려져 이를 저감하기 위한 육상전원공급시설(AMP)의 필요성이 증대되고 있다. 2019년 육상전원공급시설(AMP)를 부산신항 4선석을 설치하는 것을 시작으로 2022년 기준 고압 8선석, 저압 78선석이 설치되어있다.

항만지역 친환경화는 하역장비 중 대표적으로 야드트랙터의 배출량 저감을 위해 2017년부터 LNG 연료 전환과 매연저감장치(DPF) 부착을 매년 해오고 있다. 또한 2020년 1월에 항만대기질법이 시행되면서 항만 하역장비가 배출관리 대상으로 지정되어 배출허용기준이 신설되었다. 관리대상은 일산화탄소, 탄화수소, 질소산화물, 입자상물질이 있다. 항만 출입 노후 경유차 저공해조치 사업은 2020년부터 배출가스 5등급 경유 차량을 대상으로 폐차 또는 매연저감장치(DPF) 부착을 통해 꾸준히 관리되고 있다. 2019년부터 계절관리기간(12월~3월)에 비상저감조치 발령 시에만 배출가스 5등급 차량 운행제한을 시행해왔으나, 2022년부터는 계절관리기간 동안 운행제한을 실시하였다.

항만은 분진성 화물 하역, 상차, 야적, 이송하는 과정에서 미세먼지가 다량 발생한다. 비산먼지 관리는 2019년부터 인근 도로 청소차 운영을 시작하여 2023년 기준으로 분진흡입차 12대, 살수차 4대로 12개소 노선을 매일 작업하며 계절관리기간은 1일 2회, 물청소는 5일 1회 작업한다. 또한 항만 내 청소는 요청 시 실시하며 2022년에는 연 4회 운영하였다.

항만지역 내 가장 큰 배출량을 차지하는 선박부문은 2020년 1월부터 초미세먼지의 총배출량이 대폭 감소하여 부산신항과 부산북항 합계 기준 2019년 6,841 tonne에서 2020년 3,006 tonne, 2021년 2,746 tonne, 2022년 2,586 tonne으로 꾸준히 감소추세이

다. 실제 항만지역 대기질에서도 미세먼지(PM-10) 농도 2018년 39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2019년 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2020년 29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2021년 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2022년 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 줄어들었으며, 초미세먼지(PM-2.5) 농도도 2018년 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2019년 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2020년 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2021년 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2022년 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 낮아졌다. 공교롭게도 항만 미세먼지 관리정책이 본격적으로 시행된 2019년 말에서 2020년도와 코로나19 시기가 겹치게 되어 미세먼지 저감의 원인이 모호했으나, 실제 부산항 컨테이너화물 연도별 총물동량 처리실적은 2018년 21,663 천TEU, 2019년 21,992 천TEU, 2020년 21,824 천TEU, 2021년 22,706 천TEU, 2022년 22,078 천TEU로 코로나19 기간에도 유의미한 물동량 감소는 없었다. 따라서 선박의 입출항이나 컨테이너 물동량 변화로 인한 대기질 농도 변화 영향은 거의 없을 것으로 생각된다. 2022년 기준 초미세먼지 농도가 낮은 수준으로 유지되어 여러 가지 미세먼지 저감정책의 효과가 입증되었다고 생각된다.

IV. 결론

선박 초미세먼지 배출량은 연료유 황함량 규제정책에 따라 2020년 1월부터 대폭 감소한 것으로 추정되며 항만지역의 실제 대기 중 아황산가스 농도도 감소하였다. 초미세먼지 선박 배출량은 2018년 6,729 tonne에서 2022년 2,586 tonne으로 감소하였고, 화물차 배출량은 2018년 8,468 kg에서 2022년 7,682 kg으로 유사하였고, 하역장비 배출량은 2018년 1,031 tonne에서 2022년 762 tonne으로 감소하였다. 항만지역 인근 대형화물차 배출량은 선박 배출량의 0.1%~0.3% 수준으로 미미하였고, 항만지역 내 하역장비 배출량은 선박 배출량의 15.1%~31.0% 수준으로 컨테이너를 양적화하는 과정에서 상당한 대기오염물질이 배출되는 것으로 보인다. 초미세먼지 농도는 항만지역 2018년 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2022년 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 도시대기 2018년 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2022년 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소하였고, 그 외 미세먼지와 아황산가스 및 일산화탄소 농도도 항만지역과 도시대기 모두 2018년부터 2022년까지 감소추세로 나타났다. 이산화질소는 항만지역이 도시대기보다 꾸준히 높은 농도를 나타내 도심의 자동차보다 항만지역의 오염이 월등히 높은 것으로 보인다. 초미세먼지 구성성분은 평상시에는 계절에 상관없이 항만지역과 도심지역이 비슷하고, 고농도일의 경우 여름철은

도심지역에서 초미세먼지 농도와 질산염의 비중이 높았으며, 겨울철은 항만지역의 초미세먼지 농도가 높았고 도심지역의 질산염 이온 농도가 높았다. 항만지역과 도심지역 모두 여름철 황산염 이온의 비중이 높게 나타났고, 겨울철 질산염 이온의 비중이 높게 나타났다. 고농도일의 경우 질산염 이온의 농도가 증가하는 추세로 고농도 초미세먼지 저감을 위해서는 질소산화물에 대한 규제정책이 필요한 것으로 보인다. 유기탄소 농도는 여름철 도심지역에서 열적휘발도가 높은 OC₁의 농도가 항만지역보다 높게 나타났고 겨울철 항만지역보다 낮게 나타났는데, 이는 여름철 남풍계열의 바람으로 유기물질이 도심으로 이동해 오면서 저분자 유기물질이 응축되어 생성되는 것으로 생각된다. 유기탄소 대비 2차생성 유기탄소는 여름철 항만지역과 도심지역이 비슷하고, 겨울철 도심지역이 낮게 나타나 풍향에 따라 여름철 항만지역의 유입영향을 많이 받는 것으로 판단된다. 또한 계절과 상관없이 항만지역의 2차생성 유기탄소의 농도가 높게 나타나 2차생성 반응은 항만지역에서 상당부분 이루어진 상태에서 유입되는 것으로 생각된다. 유기탄소/원소탄소의 비가 도심지역에서 높게 나타나 항만지역에서 도심지역으로 갈수록 2차생성 유기탄소가 추가적으로 생성되는 것으로 판단된다. 탄소 농도는 선박 연료 규제 시점을 전후로 항만지역과 도심지역 모두 감소하였다. 종관기상분석은 부산신항의 경우 질소 항목을 제외한 모든 항목이 북서풍과 남서풍계열의 바람일 때 높게 나타나 선박의 영향을 많이 받는 것으로 생각되고, 질소 항목은 북서풍계열의 바람이 약하게 불 때 증가하는 것으로 보아 컨테이너부두 내 하역하는 과정에서 배출되는 것으로 추측된다. 수용모델링은 항만지역 5가지(도로재비산, 중유연소, 토양, 해염, 자동차배출)와 도심지역 6가지(도로재비산, 중유연소, 토양, 장거리이동, 해염, 자동차배출)의 주요원인으로 분석되었다. 항만지역 배출량 관리정책은 선박배출 관리강화, 항만지역 친환경화, 비산먼지 관리로 분류할 수 있으며 2019년~2020년에 본격적으로 시행되었다. 실제 항만지역의 대기질이 개선되었으나 공교롭게도 코로나19 시기와 겹치게 되어 미세먼지 저감의 원인이 모호했다. 그러나 실제 부산항 컨테이너화물 연도별 총물동량 처리실적은 코로나19 기간에 유의미한 물동량 감소는 없어 이로 인한 대기질 농도 변화 영향은 거의 없을 것으로 보이며, 따라서 항만지역의 미세먼지 저감정책의 효과가 입증되었다고 생각된다.

참고문헌

1. 부산항만공사(BPA), 부산항 컨테이너화물 처리 및 수송 통계, (2018~2022).
2. 국립환경과학원, 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람 (V), (2022).
3. Jang, E. H., Choi, S. W., Yoo, E. C., Hyun, S. M., An, J. G., Impact of shipping emissions regulation on urban aerosol composition changes revealed by receptor and numerical modelling, *npj Climate and Atmospheric Science*, 52, (2023).
4. 국가통계포털(KOSIS), 화물차 차령별 자동차검사 대수 통계
5. 국가통계포털(KOSIS), 자동차주행거리 통계
6. 국립환경과학원, 국내 항만의 오염물질 배출량 산정 자료집, (2016).
7. 해양수산부 보도자료, 친환경 하역장비로 항만 미세먼지 잡는다(야드트랙터 배출가스저감장치 장착 지원 등 친환경 사업 확대), (2020).
8. 해양수산부 보도자료, 이제는 항만에서 맑은 하늘 보세요(해수부, 제1차 항만지역 등 대기질 개선 종합계획(2021~2025) 발표), (2021).
9. 부산항만공사 보도자료, 2020년 부산항 초미세먼지 (PM_{2.5}) 전년대비 48% 줄었다(주요 배출원(선박·하역장비·출입차량) 초미세먼지 배출량 744톤 감축), (2021).
10. 해양수산부, 항만지역 등 대기질 개선 종합계획, (2021).
11. Jang, E., Song, D., Kang, N., Impact of Shipping Emissions on Ambient PM_{2.5} in Busan and Evaluation of the Sulphur Abatement Strategy in Shipping Fuels, (2021).
12. Park, S. H., Shin, P. S., Jo, S.R., Jo, Y.H., Jang, E.K., Song, Y.S., Seok, T.G., Physicochemical Characteristics and Particle Size of Particulate Matters in Ambient Air in Cheongju, *충청북도보건환경연구원보*, 24, 61~98, (2015).
13. 서울특별시보건환경연구원, 2019년 서울시 초미세먼지 성분 분석 보고서, (2020).
14. Kim, H. S., Jung, J. S., Lee, J. H., Lee, S. I.,

- Seasonal Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM_{2.5} in Daejeon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(1), 28~40, (2015).
15. Park, H. Y., Park, H. S., Lee, B. R., Choi, H. J., Kim, H. R., Lim, H. J., Park, C. O., Kim, I. S., Park, G. H., Jeon, D. Y., Bae, M. S., Source Assessment of PM-2.5 in the Residential Areas of Gwangyang Bay using Source Apportionment Model(II), *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, 25(1), 18~32, (2022).