

ORIGINAL ARTICLE

IMO 2020 황산화물 규제에 따른 항만지역 대기질 변화 특성

박정호*

경상국립대학교 환경공학과

Changes in the Air Quality of Port Areas Following the Implementation of the IMO 2020 Sulfur Limit

Jeong-Ho Park*

Department of Environmental Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

Abstract

From January 1, 2020, the International Maritime Organization has implemented a global regulation, known as IMO 2020, to reduce the sulfur content in fuel oil of ships from 3.5% to 0.5%. In this study, we used data from air monitoring stations to evaluate the change in air quality at New Port and North Port in Korea areas after the regulation was implemented. The concentration of SO₂ and NO₂ was higher in the port areas than in the surrounding areas due to exhaust gas from ships and vehicles. However, the SO₂ concentration decreased by more than 50% in the port area, demonstrating the efficiency and positive effect of the IMO 2020 sulfur limit.

Key words : IMO 2020 sulfur limit, New Port, North Port, Air quality

1. 서론

과거부터 지속되어온 대기오염은 최근 국내 미세먼지 문제로 크게 확산됨에 따라 그 개선을 위한 다양한 법령과 저감대책이 마련되고 있다. 특히, 국내외적으로 항만에서 기인하는 대기오염의 심각성을 인지하고 선박을 포함한 항만시설에서 발생하는 대기오염물질에 대한 저감대책이 본격적으로 시행되고 있다(MOF, 2021). 선박의 배기가스는 항만 대기오염의 주요 배출원으로, 2010년 기준 전 세계 NO_x 및 SO_x 총 배출량 중 선박 기여율이 NO_x 15%, SO_x 4~9%를 차지하며, 이 중 약 70%가 해안 400 km 이내 그리고 60~90%가 선박 접안 중 보조 엔진 작동에서 발생하는 것으로 추정된다(Tzannatos,

2010; Lee et al., 2020).

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 선박의 통상적 운행 및 우발적 사고로 인한 해양오염 방지를 목적으로 1973년 해양오염방지협약(Prevention of Pollution from Ships, MARPOL)을 정하고 1978년에 채택되었다. 이후 MARPOL은 '05년 선박의 대기오염방지 부속서(annex) VI에서 선박 배출가스 중 SO_x, NO_x, PM (Particulate Matter)의 배출제한과 오존층 파괴물질의 고의적 배출을 금지토록 하였다. 특히, 선박의 SO_x 배출저감을 위해 '20년 1월 1일부터 국제 항해선박 연료유의 황 함유량 기준을 3.5%에서 0.5%로 강화하는 "IMO 2020"을 시행하고 있다(IMO, 2021). 이에, 정부에서는 항만대기질 개선 특별법 등을

Received 12 October, 2021; Revised 27 October, 2021;

Accepted 16 November, 2021

*Corresponding author: Jeong-Ho Park, Department of Environmental Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea
Phone : +82-55-772-3345
E-mail : pjh3345@gnu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

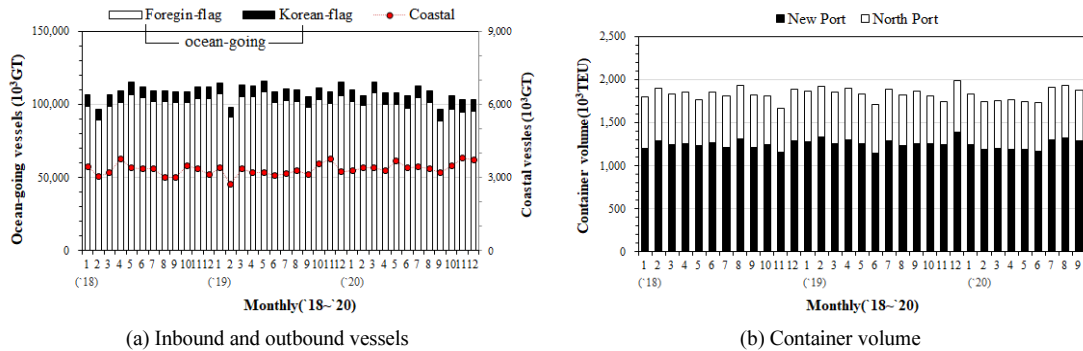


Fig. 1. Trend of monthly inbound/outbound vessels and container volume.

통해 선박 연료유의 황 함유량 기준강화(3.5%→0.5%)를 2020년부터 외항선박에, 2021년부터 내항선박으로 확대 의무 적용과 주요 항만인근에 선박의 배출규제해역(Emission Control Area, ECA)을 지정하여 황 함유량 0.1%까지 강화된 기준을 단계적으로 시행하고 있다(MOF, 2021).

항만관련 선행연구에 의하면, 1995년 기준 선박의 SOx 및 NOx 배출량은 내륙배출원의 약 12% 및 11%에 달하며, 선종별로 컨테이너 선박의 배출비중이 높고, 항행 중보다 정박 중일 때 배출 영향을 더 크다는 보고가 있다(Lee et al., 1999). 최근에는 국내 선박의 SOx 배출량은 2015년 기준 38,467 톤/년으로 비도로 부문 중 약 98%를 차지하는 등 선박의 배출가스가 주요 배출원으로 확인되고 있다. 특히, 기어울 특성은 어선별 화물선이 약 95%, 항만별 부산항이 약 26.5% 등으로 가장 높은 것으로 보고되고 있다(Seol et al., 2021). 또한, 부산 항만지역의 대기오염도 조사에서는 2020년 선박의 황 함유량 기준강화(3.5%→0.5%)로 선박 SOx 배출량이 전년 대비 5.9배 감소하고, 부산시 PM_{2.5} 농도의 약 2.3% 저감 효과가 있다고 한다. 특히, 여름철의 경우 항만의 배출물질은 강한 남서풍에 의해 도심내부 대기질에 영향을 크게 미치므로 지역 대기질 개선을 위해서는 선박 배출가스의 저감 대책이 중요하다고 한다(BIHE, 2021). 한편, 대기확산 CALPUFF (California Puff Model) 모델을 이용하여, 기상에 따른 항만 주변으로 선박 배기가스의 영향권을 분석하는 등 최근 항만의 대기오염과 관련된 다양한 연구가 진행되고 있다(Lee and Lee, 2018).

본 연구에서는 부산 및 경남 일원에 위치하고 2020년

기준 전국 컨테이너 물동량의 약 75%를 차지하는 신항 및 북항에 대하여, 2020년 1월 1일부터 선박 연료유의 황 함유량 기준 강화에 따른 전후의 대기질 변화 특성을 살펴보고자, 항만 및 배후 지역에 위치한 대기측정소의 측정자료를 수집하고 시·공간적 농도변화 특성을 분석하였다. 최종적으로 항만지역에 대한 대기오염 저감정책의 효과성 평가와 향후 중장기 대기질 저감대책 수립을 위한 기초자료로 활용할 목적으로 연구를 진행하였다.

2. 연구 방법

2.1. 선박 입출항 및 컨테이너 물동량

본 연구의 대상지역 중 신항(New Port)은 부산시 강서구 및 경남 창원시 진해구 일원에 입지한 컨테이너 전용 국제무역항으로 2006년 개장 이후 현재 신항 1~5부두 등 총 22선석이 운영 중이고 향후 2030년까지 총 44선석으로 확대할 계획이다. 또한, 북항(North Port)은 부산시 동구, 남구 및 중구 일원에 위치하고 있으며, 자성대, 신선대, 감만, 신감만 등 컨테이너 전용부두와 국제 및 연안 여객터미널 그리고 1, 2, 3, 4, 7, 8 일반부두 등이 함께 입지해 있다(BPA, 2021a).

한편, 두 항만에서 외국선과 국적선의 외항선박 및 연안선박 등의 입출항 정보 그리고 컨테이너 물동량의 추이로 선박의 배출량의 증감을 가늠할 수 있다. 이에, Fig. 1에는 해운항만물류정보시스템 PORT-MIS에서 수집 분석한 (a) 부산항 선박 입출항의 총 톤수(Gross Tonnage, GT) 그리고 (b) 신항 및 북항에서 컨테이너 물동량(Twenty-foot Equivalent Units, TEU) 등 최근 3년간

Table 1. Emissions and contribution rate by major source(NAPES, 2021)

Major source category		Air pollutant emission						
		CO	NOx	SOx	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOC
Total (ton/year)		5,351	13,766	3,419	3,064	1,495	759	15,357
New Port area* (304.4 km ²)	Non-road - ships transportation	12.4%	45.1%	60.8%	10.6%	21.8%	38.9%	1.6%
	- other than ships	35.3%	17.8%	3.2%	2.2%	4.5%	8.2%	1.5%
	Road transportation	34.5%	22.6%	0.1%	2.1%	4.3%	7.9%	2.2%
	Combustion in manufacturing industry	4.5%	8.2%	24.6%	22.8%	27.5%	25.2%	0.2%
	Non industrial combustion	4.2%	3.8%	2.4%	0.3%	0.5%	0.6%	0.1%
	Fugitive dust	-	-	-	59.4%	37.6%	12.6%	-
	Solvent utilization	-	-	-	-	-	-	91.2%
Total (ton/year)		2,561	6,282	1,443	1,865	804	294	3,403
North Port area** (39.5 km ²)	Non-road - ships transportation	9.3%	40.3%	60.2%	7.2%	16.7%	41.4%	2.6%
	- other than ships	13.0%	11.1%	0.1%	2.0%	4.7%	11.7%	2.7%
	Road transportation	58.8%	31.6%	0.1%	2.0%	4.6%	11.5%	8.9%
	Combustion in manufacturing industry	3.5%	4.8%	4.4%	0.1%	0.3%	0.6%	0.4%
	Non industrial combustion	13.4%	12.1%	35.3%	0.5%	1.0%	2.1%	0.7%
	Fugitive dust	-	-	-	87.7%	71.8%	30.3%	-
	Solvent utilization	-	-	-	-	-	-	73.4%

* New Port area : Gangseo-gu, Busan + Jinhae-gu, Gyeongnam

** North Port area : Dong-gu + Nam-gu + Jung-gu, Busan

(’18년~’20년) 월별 추이를 나타냈다(PORT-MIS, 2021).

부산항 입출항의 총 톤수는 2020년 기준 1,325 백만 GT으로 외항선박이 약 97%를 차지하는 등 최근 3년간 연도별 및 월별 큰 차이가 없었다. 또한, 신항과 북항의 컨테이너 물동량은 2020년 기준 21,824 천TEU으로 신항이 약 70%를 담당하는 등 최근 3년간 각각의 연도별 및 월별 큰 차이는 없었다(BPA, 2021b). 이에, 최근 3년간 선박의 입출항 및 컨테이너 물동량의 변동으로 인한 대기질 농도에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

2.2. CAPSS ’17년도 배출량

신항 및 북항 일원에 대한 대기오염물질의 배출량과 주요 발생원의 기여 특성을 파악하기 위해서, 대기정책 지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)의 2017년도 최신 배출량 자료를 수집 분석하고 Table 1에 나타내었다(NAPES, 2021). 여기서, 신항 일원은 신항의 입지 및 배후지역인 부산 강서구과 경남 창원시 진

해구로 총 면적은 304.4 km²이며, 북항 일원은 북항의 입지 및 배후지역에 해당하는 부산 동구, 남구 및 중구로 총 면적은 39.5 km²이다.

CAPSS 배출량은 신항 일원의 경우 특히, NOx 및 SOx의 배출량은 각각 13,766 톤/년 및 3,419 톤/년이며, 이 중 선박 기여율이 각각 45.1% 및 60.8%로 높았다. 또한, 북항 일원의 배출량은 NOx 6,282 톤/년 및 SOx 1,443 톤/년으로 선박 기여율이 각각 40.3% 및 60.2%로 높았다. 이에, 항만 대기질에는 선박의 배출가스인 NOx 뿐만 아니라, 화물 선박의 연료인 고유황 중유(B-C)의 사용으로 SOx가 높게 배출되는 특성을 고려할 수 있다.

2.3. 대기오염도 및 기상 자료

Fig. 2에는 신항 및 북항 일원의 대기측정소(Air Monitoring Station, AMS)와 자동기상측정소(Automatic Weather Station, AWS) 위치를 Table 2에는 연도별 평균 기상상태를 나타냈다.

AMS 지점은 신항의 경우 항만지역에 위치한 신항



Fig. 2. Location air monitoring stations around New Port and North Port area.

Table 2. Air monitoring stations and meteorological conditions

Air monitoring stations (AMS)			Meteorological conditions					
			year	Temp. (°C)	Rainfall (mm)	WS (m/s)	WD (-)	
New Port area	SP	New Port location	AWS (908)	'18	14.2	1,583	1.9	ENE
	NS	industrial complex AMS		'19	14.7	1,459	1.8	ENE
	GW	residential area AMS		'20	14.5	1,849	1.9	ENE
North Port area	NP	North Port location	AWS (159)	'18	15.1	1,779	3.2	NE
	GB	residential area AMS		'19	15.7	1,623	3.1	NE
	DY	residential area AMS		'20	15.2	2,282	3.2	NE

(SP), 신항의 인접 배후지역인 녹산산단에 위치한 녹산동(NS), 주거지역에 위치한 경화동(GW) 등 3개 지점이다. 북항의 경우 항만지역에 위치한 북항(NP), 북항의 인접 배후지역인 주거지역에 위치한 광복동(GB) 및 대연동(DY) 등 3개 지점이다. AWS 지점은 신항 및 북항에서 가장 가까운 경남 창원시 진해구의 AWS(908) 및 부산 중구의 AWS(159)의 2개 지점이다.

AMS의 대기질 자료는 에어코리아에서 SP 및 NP 지점의 공식 가동개시일 2018년 11월 1일부터 최종 확정 자료로 공개된 2020년 12월 31일까지의 시간별 및 일평

균 농도자료를 수집하였다(NIER, 2019b; Air Korea, 2021). 오염물질별 농도의 최종 유효자리수는 PM₁₀, PM_{2.5}의 경우 1 µg/m³, SO₂, NO₂, O₃의 경우 0.001 ppm, CO는 0.1 ppm으로 표시하였다(Kim and Park, 2020).

기상자료는 최근 3년간 AWS(908) 및 AWS(159) 관측지점 자료를 수집하였다(KMA, 2021). 기상 특성은 2020년 잦은 태풍으로 강수량이 전년도 대비 30~40% 증가한 것 이외에 기상요소의 큰 변화가 없었다. 따라서, 기상 특성의 변동으로 인한 대기질 농도에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 연평균 및 최근 3년간 11월~12월의 평균농도

신항(SP) 및 북항(NP) 측정소는 2018년 11월부터 본격 가동 개시되었고, 2020년 1월 1일부터 외항선박에 대한 황 함유량 기준강화(3.5%→0.5%)를 고려하여, 2020년 1월 1일 시점으로 전후 각각 1년간의 대기질 변화 특성을 살펴보고자 하였다.

Table 3에는 신항, 북항 및 배후지역 등 각 측정소에서 대기오염도에 대해 2019년 및 2020년 연평균 농도 그리고 최근 3년간('18년~'20년) 11월~12월 사이의 평균 농도로 나타냈다.

전반적으로 2020년도 연평균 농도는 신항, 북항 및 배후지역 등 모든 지점에서 CO를 제외한 대부분 오염물질이 '19년 대비 감소하였으며, 평균 감소율은 SO₂ 35%, PM_{2.5} 23%, NO₂ 18%, PM₁₀ 17%, O₃ 8%의 순으로 높았다. 더불어 농도 편차도 감소하는 경향을 보였다.

특히, 항만지역의 SP 및 NP 지점에서는 각 배후지역보다 SO₂ 및 NO₂의 농도가 매우 높거나 2020년도에 크게 감소하는 경향을 나타냈다. SO₂의 경우 2019년도 SP 지점 0.011 ppm 및 NP 지점 0.009 ppm으로 배후지역 대비 1.8배~2.8배로 매우 높았으나, 2020년도 SP 지점 0.005 ppm 및 NP 지점 0.004 ppm으로 약 55% 이상 크게 감소하여 배후지역 농도와 비슷하거나 최대 1.7배 정도 높았다. 또한, NO₂ 농도의 경우 2019년 SP 지점 0.032 ppm 및 NP 지점 0.031 ppm에서 2020년 SP 지점 0.029 ppm 및 NP 지점 0.027 ppm으로 약 10% 정도만 감소하여, 지속적으로 각 배후지역보다 1.5배~2.1배 정도 높았다.

PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 경우 신항 일원에서는 3년간 지속적 감소 경향을 보인 반면, 북항 일원에서는 2018년 대비 2019년도 감소 이후 2020년에는 감소 변화가 없거나 오히려 증가하기도 하였다. O₃의 경우 모든 지점에서 증감을 반복하는 등 지속적인 감소 경향은 나타나지 않았다. 특히, SP 및 NP 지점에서는 SO₂의 경우 2018년 및 2019년도 같은 농도를 유지하다가 2020년도 황 함유량 기준강화 이후 감소 경향 그리고 NO₂의 경우 SP 지점에서는 3년간 지속적으로 0.037 ppm의 같은 농도를 나타낸 반면, NP 지점을 포함한 그 외 모든 지점에서는 매년 감소 경향을 보였다.

한편, 보건환경연구원의 보고에 따르면, 신항에서 선박부문 SO_x 배출량은 2019년 11,211 톤/년에서 2020년 1,901 톤/년으로 약 5.9배 감소된 것으로 산정되고 있다(BIHE, 2021). 세계 컨테이너 화물처리실적 1위인 상하이 항만에서 대기질 중 선박 배출기여도는 SO₂의 경우 선박의 고유황 중유 연료연소로 36.4%로 높은 반면, 다양한 육지 기원의 발생량이 많은 NO₂의 경우 5.8%로 낮다는 보고가 있다(Wang et al., 2019). 이러한 보고들에서 본 연구의 결과와의 유사성을 찾을 수가 있다.

결국, 연평균 농도 특성에서 SO₂의 2020년도 급격한 농도 감소는 선박의 SO_x 기여도가 높고 2020년 황 함유량 기준강화로 인해서, 항만지역이 배후지역보다 그리고 컨테이너 외항선박의 입출항이 많은 신항이 외항선 및 내항선의 복합항만인 북항보다 더 큰 감소 경향을 보인다. 또한, NO₂ 농도는 항만지역이 배후지역보다 높았으나 SO₂와 같은 큰 감소 경향을 보이지 않았으며, 이에 선박 배출과 동시에 항만 통행차량 등 다양한 육지 기원의 발생 영향을 더 크게 받는 것으로 판단된다.

3.2. 월평균 및 일평균 농도 특성

항만 일원에서 대기오염물질의 연평균 농도 특성을 보다 상세히 설명하기 위해, 2018년 11월 ~ 2020년 12월 기간 중 월평균 및 일평균의 추이를 살펴보았다. 여기서, 2020년 황 함유량 기준강화 전후 특성을 비교하기 위해 (a) 2018년 11월~2019년 12월 그리고 (b) 2020년 1월~12월 기간으로 구분하고 고찰하였다.

Fig. 3에는 대기오염물질의 월평균 농도 특성을 나타냈다. 항만지역인 SP 및 NP 지점은 각 배후지역 대비 PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, CO의 경우 크게 높지 않고, 특히 항만 지역 및 배후지역간 농도 차이도 (a), (b) 기간 모두 월별 큰 변화가 없었다. 반면, NO₂의 경우 SP 및 NP 지점은 각 배후지역 보다 연평균 농도뿐만 아니라 (a), (b) 기간 모두 매월 지속적으로 높게 나타났는데, SP 지점의 경우 NS 및 GW 지점보다 1.3배~2.0배 그리고 NP 지점의 경우 GB 및 DY 지점보다 1.1배~2.0배로 매월 지속적으로 높았다.

한편, SO₂의 경우 항만지역이 배후지역 대비 (a) 기간에는 매월 매우 높았으나, (b) 기간에는 크게 감소하여 배후지역과 비슷해지거나 약간 높은 월평균 농도 특성을 보였다. SP 지점의 경우 배후지역 대비 (a) 기간 중 1.5배

Table 3. Average concentration of air quality in New Port and North Port area

		New Port area			North Port area		
		SP	NS	GW	NP	GB	DY
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	'19	36±21	41±21	35±19	35±21	39±22	35±19
	'20	29±17 (▽19%)	36±18 (▽12%)	28±15 (▽20%)	29±16 (▽17%)	30±17 (▽23%)	31±15 (▽11%)
	Nov. '18	48±32	50±35	43±30	37±27	47±28	38±25
	~ '19	36±20	41±20	30±18	31±18	32±18	32±17
	Dec. '20	33±17	39±17	27±14	31±14	34±15	33±14
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	'19	22±14	24±14	20±12	22±15	23±15	18±13
	'20	17±12 (▽23%)	21±13 (▽13%)	14±11 (▽30%)	17±11 (▽23%)	16±10 (▽30%)	14±11 (▽22%)
	Nov. '18	27±18	28±19	19±12	24±16	25±14	19±12
	~ '19	21±12	26±13	14±10	18±11	18±10	16±10
	Dec. '20	21±13	22±12	11± 8	20±10	18±10	16±10
NO ₂ (ppm)	'19	0.032±0.017	0.022±0.013	0.019±0.012	0.031±0.016	0.018±0.011	0.020±0.013
	'20	0.029±0.015 (▽9%)	0.017±0.011 (▽23%)	0.017±0.011 (▽11%)	0.027±0.015 (▽13%)	0.013±0.008 (▽28%)	0.015±0.010 (▽25%)
	Nov. '18	0.037±0.017	0.027±0.016	0.026±0.015	0.035±0.017	0.031±0.018	0.027±0.014
	~ '19	0.037±0.016	0.027±0.012	0.023±0.014	0.033±0.017	0.017±0.009	0.025±0.013
	Dec. '20	0.037±0.018	0.021±0.011	0.021±0.013	0.025±0.016	0.014±0.009	0.018±0.011
SO ₂ (ppm)	'19	0.011±0.011	0.006±0.004	0.004±0.002	0.009±0.009	0.005±0.004	0.005±0.003
	'20	0.005±0.002 (▽55%)	0.005±0.001 (▽17%)	0.003±0.001 (▽25%)	0.004±0.002 (▽56%)	0.003±0.001 (▽40%)	0.004±0.002 (▽20%)
	Nov. '18	0.009±0.010	0.004±0.003	0.004±0.001	0.005±0.004	0.005±0.005	0.004±0.002
	~ '19	0.009±0.008	0.005±0.003	0.003±0.001	0.005±0.003	0.004±0.002	0.004±0.002
	Dec. '20	0.005±0.002	0.005±0.001	0.003±0.001	0.004±0.001	0.003±0.001	0.004±0.001
O ₃ (ppm)	'19	0.038±0.023	0.029±0.017	0.032±0.018	0.029±0.018	0.030±0.015	0.033±0.017
	'20	0.030±0.019 (▽21%)	0.027±0.015 (▽7%)	0.031±0.015 (▽3%)	0.025±0.014 (▽14%)	0.030±0.014 (-)	0.032±0.015 (▽3%)
	Nov. '18	0.023±0.016	0.022±0.014	0.022±0.014	0.019±0.012	0.022±0.012	0.023±0.014
	~ '19	0.027±0.018	0.020±0.013	0.024±0.013	0.020±0.013	0.022±0.011	0.022±0.012
	Dec. '20	0.019±0.012	0.020±0.011	0.022±0.010	0.021±0.011	0.025±0.010	0.025±0.012
CO (ppm)	'19	0.4±0.1	0.3±0.1	0.5±0.2	0.4±0.1	0.5±0.1	0.5±0.1
	'20	0.4±0.1 (-)	0.3±0.1 (-)	0.4±0.1 (▽20%)	0.4±0.2 (-)	0.4±0.1 (▽20%)	0.5±0.1 (-)
	Nov. '18	0.4±0.1	0.4±0.1	0.6±0.2	0.4±0.1	0.4±0.1	0.5±0.1
	~ '19	0.4±0.1	0.4±0.1	0.5±0.2	0.4±0.1	0.4±0.1	0.5±0.1
	Dec. '20	0.4±0.1	0.3±0.1	0.4±0.2	0.4±0.1	0.4±0.1	0.5±0.1

※ (▽%) : decreasing rate of annual concentration in '20 year compared to '19 year

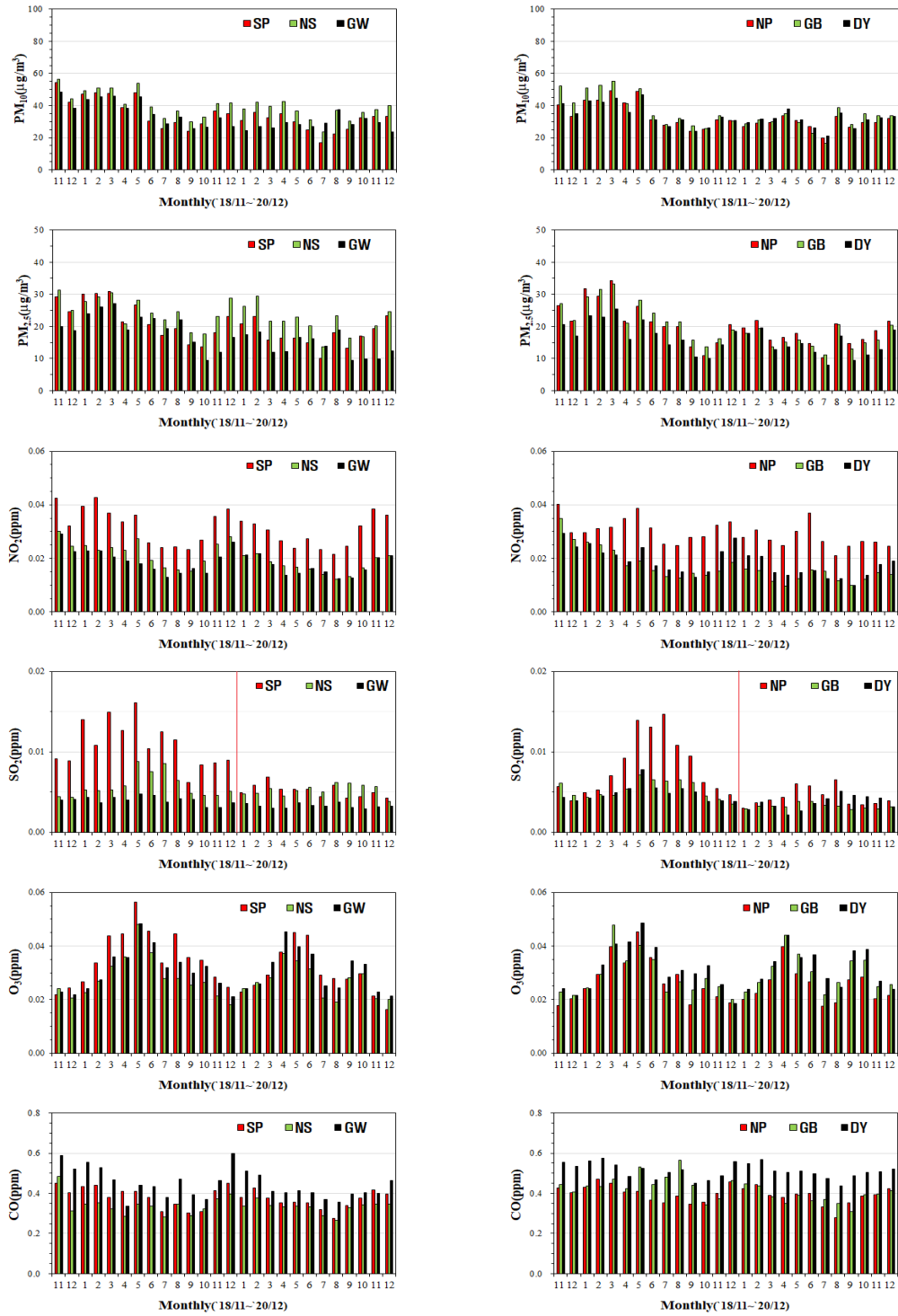


Fig. 3. Monthly average concentration of air quality.

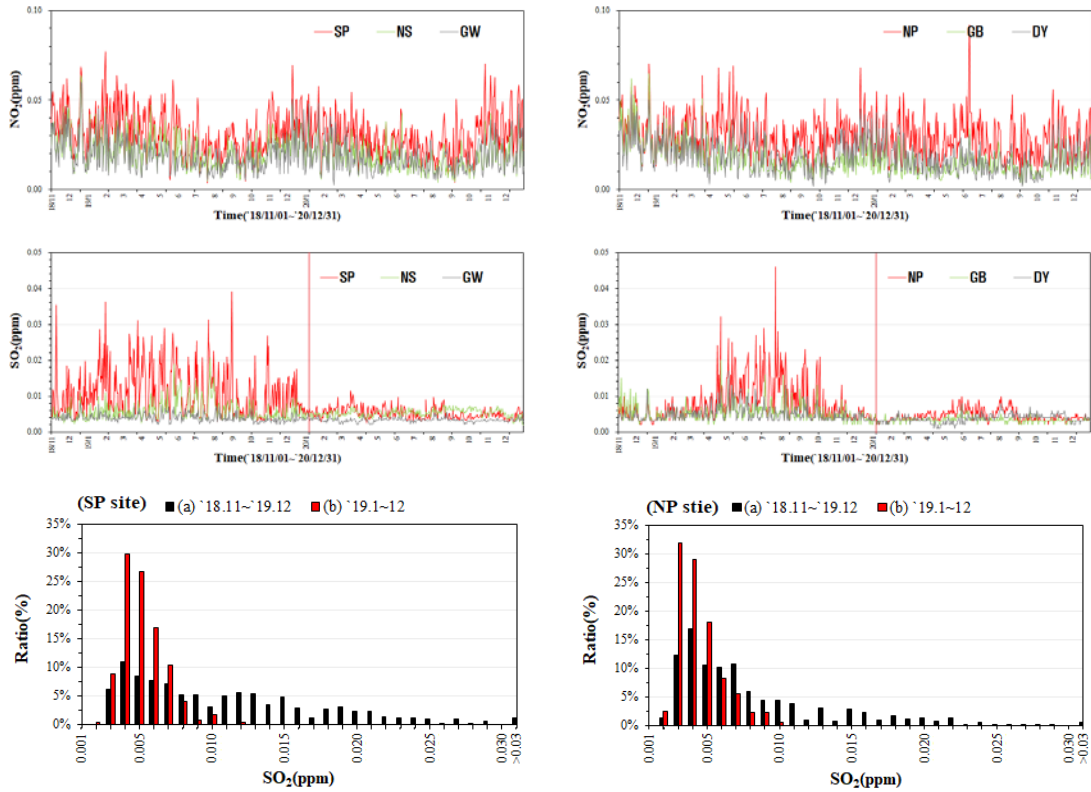


Fig. 4. Daily average concentration of NO₂ and SO₂.

~3.5배에서 (b) 기간 중 0.8배~2.3배로 낮아졌다. NP 지점의 경우 배후지역 대비 (a) 기간 중 0.9배~3.0배에서 (b) 기간 중 0.8배~2.2배로 낮아졌다. 특히, 황 함유량 기준강화 직전·후인 2019년 12월과 2020년 1월의 SO₂ 농도는 신항 일원의 경우 SP 지점은 0.009→0.005 ppm로 크게 낮아진 반면, NS 및 GW 지점은 농도 변화가 없었다. 북항 일원의 경우 NP 지점은 0.005→0.003 ppm로 낮아진 반면, GB 및 DY 지점은 0.004→0.003 ppm으로 감소 경향이 낮았다.

Fig. 4에는 항만지역에서 상대적으로 높았던 SO₂ 및 NO₂에 대한 일평균 농도 추이 그리고 SP 및 NP 지점에서 (a), (b) 기간별 SO₂의 농도별 빈도분포를 나타냈다.

SP 및 NP 지점에서 NO₂ 농도의 경우 (a), (b) 기간 중 지속적으로 배정지역보다 높았으나, SO₂ 농도의 경우 2019년 12월 하순부터 일평균이 낮아지기 시작하여 2020년 1월의 월평균은 전월 대비 약 40% 전후의 급속

한 감소 경향을 나타냈다. SO₂의 일평균 농도별 빈도분포에서 (a) 및 (b) 기간별로 비교해 보면, SP 지점의 경우 평균(mean)은 0.011±0.007→0.005±0.002 ppm 그리고 중앙농도(median)는 0.009→0.005 ppm 등으로 평균과 편차가 크게 줄어들었으며, 최빈농도(mode)는 0.004 ppm으로 동일하였다. NP 지점의 경우 평균(mean)은 0.008±0.006 → 0.004±0.002 ppm 그리고 중앙농도(median)는 0.006→0.004 ppm으로 평균과 편차가 크게 줄어들었으며, 최빈농도(mode)는 0.004→0.003 ppm으로 유사하였다.

월평균 및 일평균 특성에서 특히, SO₂ 농도는 항만지역을 중심으로 2020년 1월 1일 황 함유량 기준강화 시점의 직전부터 즉각적으로 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 외항선박 전용항만인 신항이 복합항만인 북항보다 더 큰 감소 경향이 나타났다.

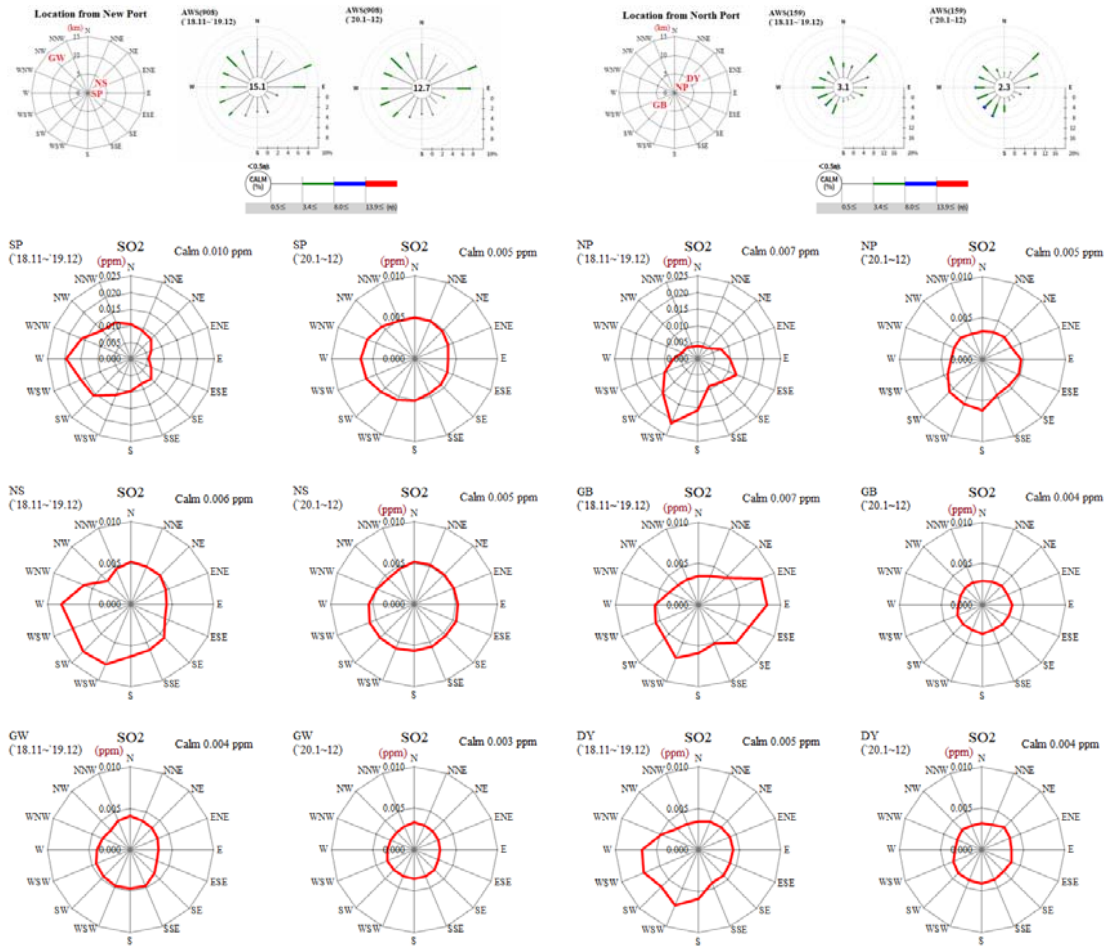


Fig. 5. SO₂ concentration by wind direction before and after Jan. 1, '20.

3.3. SO₂의 풍향별 특성

풍향별 SO₂ 농도 특성은 선박 배출가스 등 항만의 배출 영향과 황 함유량 기준강화의 효과를 직접적으로 확인할 수 있는 방법이라 생각된다. Fig. 4에는 모든 지점에서 SO₂ 농도를 풍향별 그리고 (a), (b) 기간별로 구분하여 나타냈다. 여기서, 예를 들어 SP 지점의 경우 신항 동쪽에 인접하여, 서풍(W) 계열에서 SO₂ 농도가 높을 경우 선박 배출로 인한 영향으로 판단할 수 있다.

우선 신항과 북항 주변의 AWS 저점에서는 (a), (b) 기간별 풍향의 큰 변화는 없었으며, 참고적으로 대기오염물질 중 SO₂를 제외하고는 항만 쪽의 풍향 영향 특성은 뚜렷하게 나타나지 않았다.

전반적으로 풍향별 SO₂ 농도는 SP 및 NP 지점 등 항만지역과 가까울수록 항만 방향의 풍향일 때 상대적으로 높은 특성 그리고 (b) 기간에는 16방위별 모두 큰 감소 경향이 나타났다.

SP 지점의 경우 (a) 기간 중 신항 쪽 풍향인 서풍(W)일 때 0.019 ppm의 최고 농도와 신항 반대쪽 동풍(E)일 때 최저 농도(0.005 ppm)를 나타내 약 3.8배의 큰 농도 차이를 보였다. (b) 기간에는 서풍 최고 농도(0.006 ppm)는 동풍 0.004 ppm의 최저 농도보다 약 1.5배 높아 (a) 기간보다 농도차이가 크게 감소하였을 뿐만 아니라 모든 풍향별에서도 감소 경향을 보였다. NP 지점의 경우에도 (a) 기간 중 북항 쪽 풍향인 서남서풍(WSW)일 때

0.021 ppm의 최고 농도와 반대쪽 북북동풍(NNE)일 때 0.004 ppm의 최저 농도를 나타내 약 5.3배의 큰 농도차이를 보였다. (b) 기간에는 서남서풍의 최고 농도(0.006 ppm)는 북북동풍 0.003 ppm의 최저 농도보다 약 2.0배로 높아 (a) 기간보다 농도차가 크게 감소하였고 19방위별 모든 풍향에서도 감소경향을 보였다.

한편, 나폴리 항구의 경우 대기질 조사에서 풍향의 기상요소는 선박 배출가스에 의한 항구 대기질에 미치는 영향을 확인하는 정보이며, 특히 선박 배출가스의 주요 원인물질인 SO₂는 다른 오염물질보다 항만 방향의 풍향에 따른 더 높은 영향을 보고하고 있다(Prati et al., 2015).

4. 결론

전국 컨테이너 물동량의 약 75%를 차지하는 신항 및 북항 일원에서 최근 약 2년간 대기측정소의 측정 자료를 이용하여, 항만의 대기질 특성과 특히, '20년 선박의 황 함유량 기준강화에 따른 대기질 변화를 분석하고, 그 결론을 다음과 같다.

1) 항만 대기질 변화에 영향을 줄 수 있는 선박의 입출항 및 컨테이너 물동량 그리고 기온, 풍향, 풍속의 기상 특성은 최근 3년간 큰 변화가 없어, 이러한 요인으로 대기질 농도에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단되었다. 항만 일원에서 NO_x 및 SO_x 배출량 중 선박의 기여율은 약 40% 및 약 60%로 매우 높았으며, 2020년 외항선박의 황 함유량 기준 강화에 따라 특히, 컨테이너 전용 항만에서 SO₂ 중심으로 대기질 개선효과가 나타났다.

2) 항만지역에서는 화물선박의 배출가스 및 항만 통행차량 등의 주요 발생 영향으로 배후지역보다 특히, SO₂ 및 NO₂ 농도가 매우 높았다. 그러나, SO₂의 경우 항만지역에서는 2020년 1월 1일 직전부터 급격히 감소하여 연평균 약 50% 이상 감소하였으며, 황 함유량의 기준 강화에 따른 대기질 개선효과를 확인할 수 있었다.

3) 다만, 선박의 황 함유량 기준강화에 따른 PM 및 NO₂ 등 기타 오염물질의 개선효과도 있다고 판단되나, 대기질 관측 자료만으로는 명확히 판단할 수 없어, 이후 대기모델링 등 복합적인 해석이 필요할 것으로 생각된다.

4) "IMO 2020" 시행으로 많은 항만지역에서 대기질 개선효과를 예상할 수 있으나, 대기질 관측자료로 평가

분석한 연구결과는 시행초기라 거의 찾을 수 없었다. 황 함유량 기준강화는 '20년 외항선박에서 2021년 내항선박으로 확대되고, 배출규제해역에서는 0.1%까지 강화함에 따라 지속적인 항만 및 배후지역의 대기질 개선이 있을 것으로 예측된다.

REFERENCES

- Air Korea, 2021, <http://www.airkorea.or.kr/>.
- Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment (BIHE), 2021, 2020 Report on air pollution level survey results in port areas, Busan, 1-26.
- Busan Port Authority (BPA), 2021a, <https://www.busanpa.com/>.
- Busan Port Authority (BPA), 2021b, 2020 Busan port container cargo handling and transportation statistics, Busan, 13-14.
- International Maritime Organization (IMO), 2021, <https://www.imo.org/en/>.
- Kim, D. S., Park, J. H., 2020, Problems and improvements for the quality control of air monitoring network, J. Env. Sci. Intern., 29(7), 715-727.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2021, <https://data.kma.go.kr/>.
- Lee, H., Park, D., Choo, S., Pham, H. T., 2020, Estimation of the non-greenhouse gas emissions inventory from ships in the port of Incheon, Sustainability, 1-18.
- Lee, H. W., Kim, Y. K., Won, G. M., Cho, I. S., 1999, An Emission estimation of pollutants including ship sources in the Pusan metropolitan area, J. Kor. Soci. for Atmos. Envi., 15(5), 587-598.
- Lee, M. W., Lee, H. S., 2018, A Study on atmospheric dispersion pattern of ship emissions focusing on port of Busan, J. Kor. Port Econ. Asso., 34(1), 35-50.
- Ministry of Oceans and Fisheries, 2021, Air quality improvement in port area comprehensive plan, Sejong-si, 1-48.
- National Air Pollutants Emission Service (NAPES), 2021, <http://airemiss.nier.go.kr/>.
- Port Management Information System, 2021, <https://new.portmis.go.kr/>.
- Prati, M. V., Costagliola, M. A., Quaranta, F., Murena, F., 2015, Assessment of ambient air quality in the port of Naples, Air & Waste Manage. Asso., 65(8), 970-979.

Seol, S., Jung, S., Seong, M., Lim, J., Yeo, S., Jin, H., 2021, Estimation of air pollutant emissions from ships and their contributions in Korea, *J. Kor. Soci. for Atmos. Envi.*, 37(2), 324-337.

Tzannatos, E., 2010, Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus - Greece, *Atmos. Environ.*, 44(3), 400-407.

Wang, X., Shen, Y., Lin, Y., Pan, J., Zhang, Y., Louie, P. K.

K., Li, M., Fu, Q., 2019, Atmospheric pollution from ships and its impact on local air quality at a port site in Shanghai, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 6315-6330.

• Professor. Jeong-Ho Park
Department of Environmental Engineering, Gyeongsang
National University
pjh3345@gnu.ac.kr