Journal of Environmental Science International
34(5); 275~287; May 2025

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2025.34.5.275

ORIGINAL ARTICLE

광양만권 대기오염물질의 배출량 및 오염도 추이와 특성

박정호*
경상국립대학교 환경공학과

Trends and Characteristics of Emission and Air Pollutants Levels in the Gwangyang Bay Area

Jeong-Ho Park*
Department of Environmental Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

Abstract

This study analyzed emission inventories and air quality monitoring data for the Gwangyang Bay Area, including Gwangyang-si, Yeosu-si, Hadong-gun, and Namhae-gun, using the Clean Air Policy Support System (CAPSS). Annual trends and correlations were examined over the period 2011-2021. 1) The annual average increase rate of change in total emissions (2011-2021) showed a decrease -8 to -9% for PM10, PM2.5, and SOx and -2% for NOx, but an increase +3% for VOCs and CO. The contribution rates of Yeosu and Gwangyang were very high, at 78-96%. 2) The concentrations of SO2, NO2, CO, PM10, and PM2.5 showed a decreasing trend. In Gwangyang and Yeosu, SO2 and NO2 concentrations began to decrease gradually from 2000 onward. O3 concentrations showed an increasing trend, and as of 2023, were highest in the following order: NH and GS sites (36 ppb) 〉 HD site (35 ppb) 〉 WN site (32 ppb) 〉 TI site (27 ppb). 3) Very high correlations were found between SOx and NOx emissions, and SO2 and NO2 concentrations. O3 concentrations were found to be highly correlated with increasing VOCs emissions and decreasing NOx emissions. The influence of overseas inflow may have contributed more to the decrease in PM10 and PM2.5 concentration than the reduction in emissions alone.

key words : Gwangyang Bay Area, CAPSS emission, Air quality monitoring station data

1. 서 론

광양만권은 전라남도와 경상남도에 걸쳐 있으며, 협의의 범위는 광양시, 여수시, 순천시 그리고 광의의 범위는 하동군 및 남해군 등이 포함된다. 정부는 광양권 지역에 1960년대 여천 석유화학공업단지로부터 1980년대 POSCO 광양제철소 등에 이르기까지 우리나라의 대표적인 임해공업지역으로 대규모 개발 사업을 추진해 왔다(Lee, 2020). 대단위 산업단지의 조성과 더불어 화력발전소와 광양항만 등 대기오염물질 배출이 많은 지역으로 1999년부터 광양만권을 대기환경규제지역의 지정 고시하여 관리하고 있으며, 전라남도는 2020년 시도별 대기 배출량은 경기도, 경상북도에 이어 전국에서 세 번째로 많은 양이 배출되고 있다(Park et al., 2021). 2022년 굴뚝자동측정기기(TMS)가 설치된 전국 887개 사업장 중 광양시 20개, 여수시 41개, 하동군 1개 등 총 62개의 사업장이 위치하고, 이중 포스코 광양제철소는 2016년 이후 전국에서 대기 배출량이 가장

Received 11 April, 2025; **Revised** 12 May, 2025;
Accepted 14 May, 2025
***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

많은 사업장 중 하나이다(CleanSYS, 2024). 광양만권은 많은 대기오염물질 배출뿐만 아니라, 폐쇄적인 연안지역의 해륙풍 순환으로 대기오염물질 축적되는 경우가 많으며, 광화학 반응 및 지형적인 영향에 의해 복잡한 시간적·공간적인 분포 특성을 형성하고 있다(Lee, 2003). 이에 광양만권은 오존의 고농도가 관측되거나 발생빈도가 높게 관측되는 등 산업단지 및 지리적 특성에 의해 국내에서는 광화학 오염이 심각한 지역으로 보고되고 있다(Kim and Lee, 2011; Park et al., 2022).

한편, 우리나라의 대기환경 정책은 1978년 사업장에서 주로 발생하는 SO_2의 대기환경기준 설정 그리고 세분화한 배출시설에 대한 배출허용기준의 설정을 시작으로, 1991년 대기환경보전법 시행으로 법률적 토대가 마련되었다. 또한, 2006년 5대 광역시와 광양만(여기선 여수, 순천, 광양) 지역을 대상으로 최초의 대기 분야 법정 종합계획인 "제1차 대기환경개선 종합계획(2006~2015년)"의 수립 그리고 사업장의 배출허용기준은 1996년 이후 수차례 강화되었고, 2020년부터 한층 강화된 사업장 배출허용기준이 적용되고 있다(Kim et al., 2023). 특히, 종합계획에서는 광양만의 대기오염으로 인한 사회적 비용은 29,152 억원/년으로 추정하고 있으며, 다양한 대기환경 정책을 통해 대기오염물질의 배출량 및 오염도는 감소 될 수 있다고 보고 있다. 이에, 배출사업장의 저감 대책으로는 총량제 도입, 배출허용기준 강화, NOx 배출부과금 신설 검토 등을 통해 2015년 목표 배출량을 2001년 배출량 대비 PM10 28%, NOx 34%, SOx 15%, VOCs 24% 감축 계획을 수립하였다. 또한, 광양만의 대기오염도는 PM10의 경우 2001년 47 $\mu g/m^3$에서 2015년 39 $\mu g/m^3$ 그리고 NO_2의 경우 2001년 18.7 ppb에서 2015년 13.2 ppb로 개선될 것으로 전망하였다(MoE, 2006).

국내 대기 중 SO_2, NO_2, CO 등 1차 오염물질의 농도는 1989년부터 최근까지 꾸준한 감소 경향이나, 2차 오염물질인 O_3 농도는 꾸준한 증가추세를 보인다. 1995년 및 2015년부터 측정되고 있는 PM10 및 PM2.5 농도는 점차 감소 추세를 보인다(NIER, 2024). 한편, 대기오염 부하량 높은 광양만권의 경우 과거부터 대기오염의 우려와 그 개선을 촉구하는 다양한 목소리가 지속되고 있으며, 이에 과거부터 현재까지 대기오염물질의 변화 추이를 살펴봄으로 종합적인 대기환경의 분석 평가가 필요하다. 본 연구에서는 광양만권 광양, 여수, 하동, 남해 등 4개 시·군 지역을 대상으로 대기정책지원시스템(CAPSS) 배출량 및 대기자동측정망의 자료를 수집하고 과거에서 현재에 이르는 배출량 및 오염도 추이와 상관성 등 특성을 분석하였으며, 이에 관련 정책의 효과성 평가 및 향후 보다 실질적인 관리 및 저감 정책 마련을 위한 기초자료로 활용되길 기대한다.

2. 연구방법

2.1. 광양만권

Fig. 1에는 광양만권의 대기자동측정소 및 기상관측소(AWS) 지점의 위치도 및 바람장미(2011~2020년)를 나타냈다. 광양만권에는 국가산업단지 2개소, 일반산업단지 10개소, 포스코 광양제철소 등 모두 13개의 산업단지에 740여 개의 업체, 4만여 명의 근로자가 근무하고 있다. 광양시는 면적 464.9 ㎢, 광양만의 중심에 위치하며, 연간 2,200 만톤 철강 제품을 생산하는 세계 최대 규모의 포스코 광양제철소와 연간 9,900 만톤 화물을 처리하는 광양항이 입지하고 있다. 여수시는 면적 512.3 ㎢, 여수 반도에 위치하며, 임해산업단지인 여수국가산업단지에 GS칼텍스, LG화학, 롯데케미칼, 여천NCC 등 정유·비료·석유화학 계열 297개 업체가 입주하여 국내 석유화학제품 생산량의 약 48%를 담당하는 우리나라 석유 화학 제품 생산의 중심지이다(GFEZ, 2023).

하동군은 면적 675.5 ㎢, 인구 45,255명, 지리산과 섬진강, 남해와 접한 농어촌 지역으로 대기 배출사업장은 하동석탄화력을 포함한 2020년 기준 1종 2개소, 2종 3개소, 3종 8개소, 4종 19개소, 5종 38개소 등 총 181개소가 있다. 남해군은 면적 357.5 ㎢, 인구 41,579명, 사면이 바다로 둘러싸인 농어촌 지역이고 대기 배출사업장은 2020년 기준 4종 14개소 및 5종 8개소 등 총 22개소가 있다.

광양만권의 대기측정소에는 광양시 태인동(TI), 여수시 월내동(WL), 하동군 하동읍(HD) 및 금성면(GS), 남해군 남해읍(NH) 등이 설치 운영되고 있다. 한편, 자동기상관측소(AWS)의 바람장미를 살펴보면, 광양(266)의 경우 서풍계열 48% 〉 북풍계열 42% 〉 동풍계열 31% 〉 남풍계열 22%로 나타나는 등 광양(266), 하동(932), 여수(168), 남해(295)지점에서는 서풍계열의 비율이 상대적으로 높았다. 한편, 여수산단(766)은 동풍계열 51%, 금남(933)은 북풍계열 36%로 상대적으로 높다.

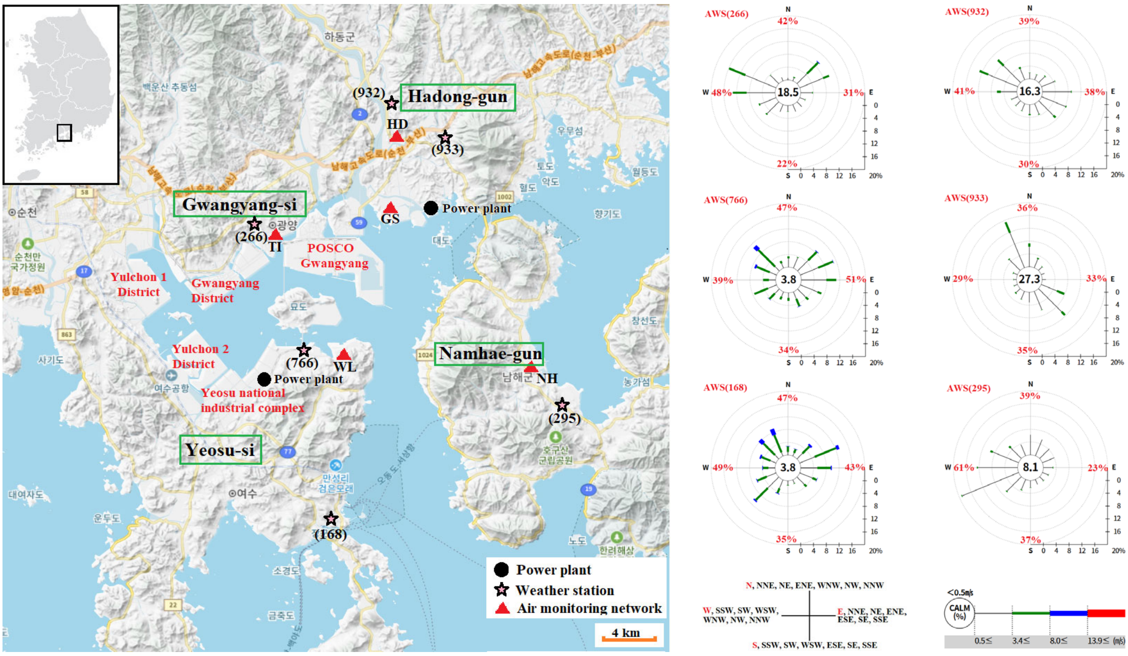


Fig. 1. Gwangyang bay area and wind rose (2011~2020).

2.2. CAPSS 배출량 자료

본 연구에서는 광양만권의 4개 시·군의 배출량의 특성을 살피기 위해, 최근 11년간(2011~2021년) CAPSS 자료를 수집하였다. Table 1에는 CAPSS의 01~13개 분류체계 그리고 연도별 배출계수의 수정내용 및 배출량 산정방법의 버전(Ver.)을 나타냈다(NAEIR, 2023a). CAPSS의 배출원 분류체계는 최초 1999년 9개 대분류를 시작으로, 2007년 자료부터 국내 현실에 맞추어 11개 대분류로 반영하였고 지속적인 개선을 통해, 2015년부터 비산먼지(12) 및 생물성 연소(13) 부문을 공식적으로 산정하고 에너지산업 연소(01)부터 생물성 연소(13)까지 현재의 총 13개 대분류 체계로 확립되었다. 또한 2011년부터 PM2.5 및 2014년부터 BC (Black carbon)를 추가하여 9개 항목의 대기오염물질별 배출량을 산정하고 있다.

한편, 배출량 산정 방법은 항목 추가 및 개선되면서 2011~2013년 사이는 Ver. 4.0, 2014~2019년 사이는 Ver. 5.0 그리고 Ver. 6.0으로 2000년 이후 및 2016~2019년을 재산정하고 있는 등 연도별 배출량 추이를 절대적으로 비교하기는 어렵다. 이에 본 연구에서는 산정 방법의 Ver. 변화에도 전반적인 추이를 살펴보기 위하여, 2011~2013년 Ver. 4.0, 2014~2015년 Ver. 5.0, 2016~2021년 Ver. 6.0으로 산정된 값으로 총 11년간의 연평균 증감율(이하 ‘Trend’라 함)로 변화 추이를 살펴보았다.

2.3. 대기자동측정망 자료

광양만권의 대기오염도 추이 특성을 파악하기 위하여, 대상 지역의 5개 대기자동측정소에 대해 가동개시부터 2023년까지 확정된 연평균 농도 자료를 수집하고 이용하였다(Air Korea, 2023). 여기서, 대기측정소 중 태인동(TI) 및 월내동(WL)은 1996년, 하동읍(HD)은 2007년, 남해읍(NH)은 2019년 그리고 금성면(GS)은 2021년 9월부터 가동 개시되고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대기 배출량의 변화 추이

3.1.1. 배출량 추이 및 주요 배출원의 특성

Table 2에는 광양만권 4개 시·군 최근 11년간 CAPSS의 6개 대기오염물질(PM10, PM2.5, SOx,

Table 1. Air emission source categories and major modifications of calculation method

Code	Source category	Year	Calculation method	Changes
01	Energy production	2020	Ver. 6.0	※ Recalculation of emissions from 2016 to 2019
02	Non-industry			(01,02,03) Improvement of solid fuel emission coefficient
03	Manufacturing industry			(05) Improvement of gas station emission coefficient
04	Industrial process			(07) Euro 5~6 emission factor applied
05	Energy transport and storage	2019	Ver. 5.0	(05) Apply sales volume by gas station
06	Solvent use	2018		(07) Applies to individual vehicle years from 10 to 15 years
07	Road transport	2017		-
08	Non-road transport	2016		(07) Motorcycle PM emission factor application
09	Waste disposal	2015		(12,13) Emission formula calculation
10	Agriculture	2014		• BC(Black carbon) emissions calculation
11	Other surface-pollutant source	2013	Ver. 5.0	• LPG sulfur content change (0.00082%→0.00042%)
12	Fugitive dust	2012		(01,02,03) Change in emission coefficient of low NOx boiler
13	Biomass burning	2011		• PM2.5 emissions calculation

* Source: NAEIR (2023b)

NOx, VOCs, CO)의 연도별 배출량 추이를, Fig. 2에는 13개 대분류 배출원별로 나타냈다. 여기서 주요 배출원에 대해서는 “대분류-중분류-소분류”의 순으로 기술하였다.

PM10의 경우 4개 시·군의 합계 총배출량은 Ver. 4.0으로 산정된 2011년 13,513 톤/년에서 2013년 15,554 톤/년으로 +15% 증가, Ver. 5.0으로 산정된 2014~2019년 사이에는 -36% 감소, Ver. 6.0으로 산정된 2016~2021년 사이에는 −1% 감소 등 산정방법 및 연도별에 따라 증감을 반복하였으나, 전반적으로 11년간 연평균 증감율(Trend)은 −8%로 감소 경향을 나타냈다. 배출원별 기여율은 Ver. 4.0 및 5.0으로 2015년까지 제조업연소(03)가 약 60~80%로 월등히 높았으나, Ver. 6.0 산정 이후 제조업연소(03)는 4%로 크게 낮아지고 생산공정(04)은 40% 전후로 가장 높게 되었다. 지역별 기여율은 2021년 기준 총배출량 5,590 톤/년 중 광양(GY) 2,849 톤/년(51%) 〉 여수(YS) 1,816 톤/년(32%) 〉 하동(HD) 602 톤/년(11%) 〉 남해(NH) 305 톤/년(5%) 순으로 나타났다. 특히, GY의 경우 Trend −11%로 감소 경향을 보였으며, 제조업연소(03)의 경우 Ver. 4.0 및 5.0으로 산정하기까지 80% 전후의 높은 기여율에서, 제조업연소(03)-기타-제1차금속산업 부문에서 제철용 무연탄 사용량의 중복에 따른 수정 개선된 Ver. 6.0으로 재산정 이후에는 배출량 1/10 및 기여율 7%로 감소 되었다(Park and Kim, 2023). 반면, 생산공정(04)의 경우 Ver. 6.0으로 산정 이후 기여율 70% 전후로 가장 높았으며, 산정방법 Ver.에 따라서도 큰 변화 없이 2011년 2,638 톤/년에서 2021년 2,065 톤/년 그리고 Trend −2%의 감소 경향을 보였다.

한편, PM2.5 총배출량은 Trend −8%로 감소, 산정방법의 개선에 따라 제조업연소(03)의 기여율은 급감하고, Ver. 6.0 산정 이후 생산공정(04)의 기여율이 높아지는 등 PM10의 특성과 유사하였다.

SOx 총배출량은 2011년 79,575 톤/년에서 2021년 30,299 톤/년으로 큰 감소와 더불어 Trend −9%의 감소 그리고 2021년 기준 여수(YS) 14,708 톤/년(49%) 〉 광양(GY) 11,825 톤/년(39%) 〉 하동(HD) 3,764 톤/년(12%) 〉 남해(NH) 2 톤/년(0.01%)의 순으로 기여 특성이 나타났다. 배출원별로 생산공정(04)의 경우 연도별 큰 배출량의 변화는 없이 약 50% 전후로 기여율을 나타내다가, SOx 배출감소를 위해 2020년 1월 1일부터 국제항해선박 연료유의 황 함유량 기준을 3.5%에서 0.5%로 강화하는 “IMO 2020”의 시행에 따른 비도로이동오염원(08)-선박 부문의 배출량 큰 감소로 인해, 2020년 이후 배출량의 큰 증감 없이도 기여율 70% 이상으로 증가하였다(Park, 2021).

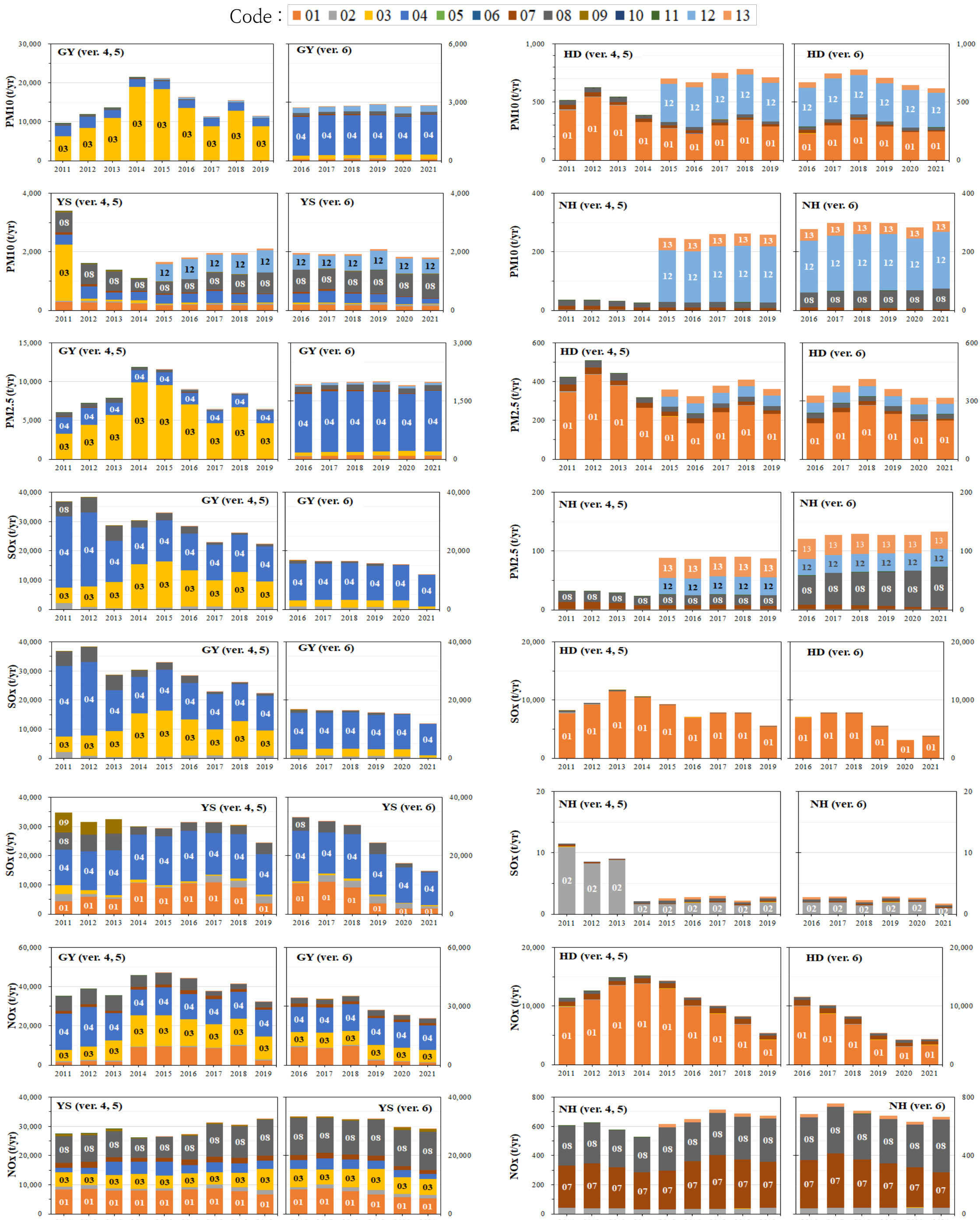
NOx 총배출량은 2011년 74,543 톤/년에서 2021년 57,990 톤/년으로 감소와 Trend −2%의 감소 그리고

Table 2. Regional emission trends by emission calculation method from 2011 to 2021 (ton/yr)

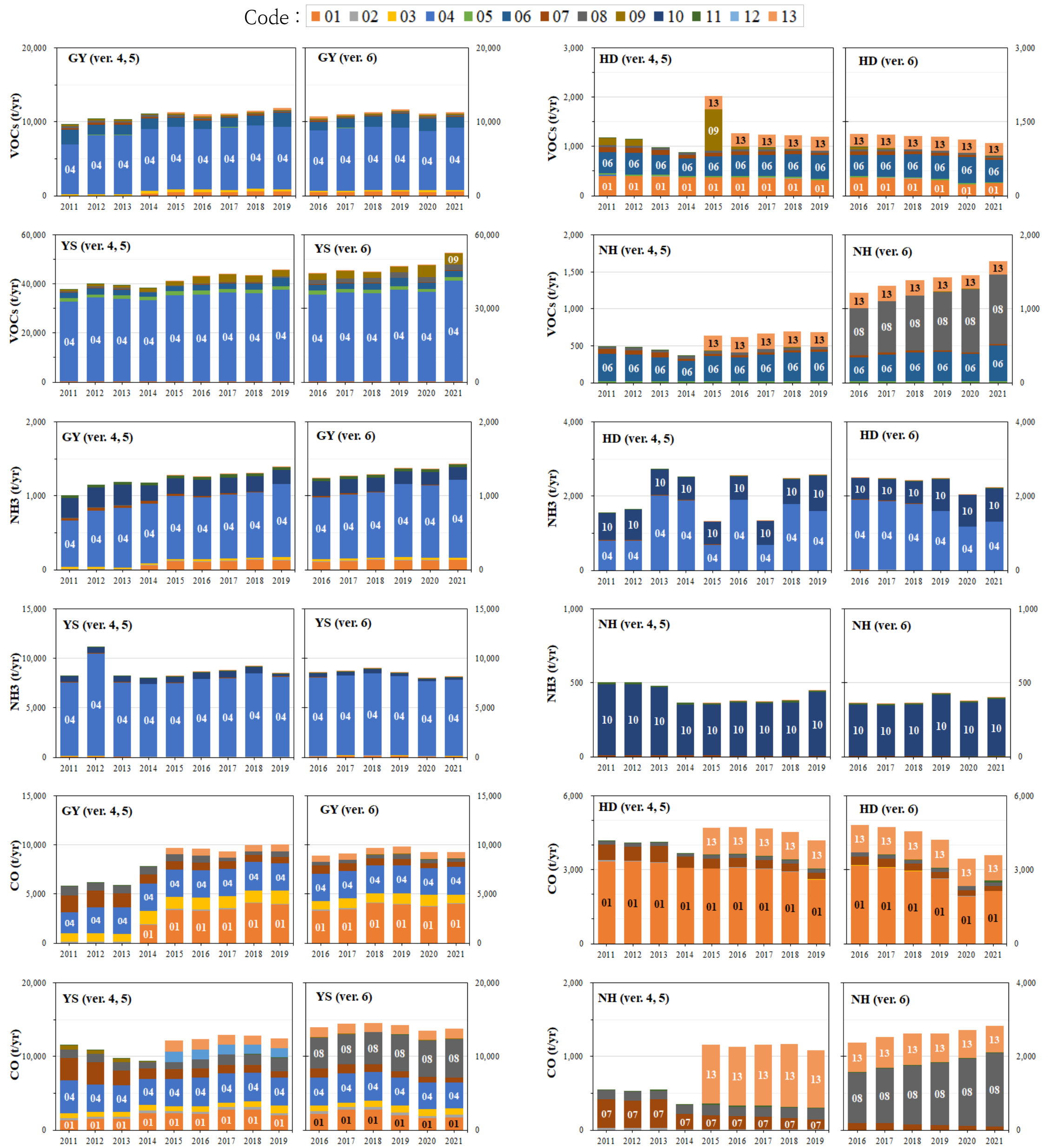
		Ver. 4.0			Ver. 5.0						Ver. 6.0						Ver. 6.0-5.0
	Area	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Σ (`16~`19)
PM10 (t/y)	GY	9,575	11,866	13,605	21,415	21,165	16,247	11,362	15,368	11,502	2,741	2,795	2,831	2,916	2,796	2,849	-43,194 (-79%)
	YS	3,387	1,608	1,377	1,077	1,646	1,814	1,962	1,957	2,117	1,962	1,920	1,928	2,090	1,829	1,816	+50 (+1%)
	HD	515	622	541	385	704	671	749	782	711	669	747	779	707	647	620	-11 (-0.4%)
	NH	35	35	32	26	247	243	260	263	258	278	298	303	299	283	305	+153 (+15%)
	Σ	13,513	14,131	15,554	22,902	23,761	18,975	14,333	18,370	14,588	5,652	5,760	5,841	6,012	5,555	5,590	-43,001 (-65%)
PM2.5 (t/y)	GY	5,987	7,203	7,826	11,830	11,601	9,028	6,427	8,501	6,455	1,940	1,988	1,993	2,007	1,911	1,992	-22,482 (-74%)
	YS	2,209	1,295	1,127	839	928	1,012	1,179	1,151	1,214	1,287	1,266	1,245	1,279	1,184	1,177	+521 (+11%)
	HD	423	509	443	316	360	325	378	411	363	327	380	412	361	317	317	+3 (+0.2%)
	NH	32	32	29	24	88	87	91	90	87	121	128	129	128	127	133	+150 (+42%)
	Σ	8,651	9,039	9,424	13,008	12,977	10,451	8,075	10,154	8,120	3,675	3,762	3,780	3,776	3,539	3,619	-21,807 (-59%)
SOx (t/y)	GY	36,643	38,164	28,477	30,329	32,832	28,348	22,880	26,037	22,188	16,666	16,349	16,440	15,622	15,250	11,825	-34,376 (-35%)
	YS	34,771	31,619	32,428	29,947	29,302	31,317	31,315	30,345	24,406	33,072	31,717	30,507	24,406	17,259	14,708	+2,321 (+2%)
	HD	8,150	9,517	11,708	10,521	9,258	7,076	7,794	7,777	5,508	7,080	7,795	7,780	5,508	3,093	3,764	+7 (+0.03%)
	NH	12	9	9	2	3	3	3	2	3	3	3	2	3	3	2	+0.0 (+0.02%)
	Σ	79,575	79,308	72,622	70,800	71,394	66,744	61,991	64,161	52,105	56,821	55,864	54,729	45,539	35,605	30,299	-32,048 (-13%)
NOx (t/y)	GY	35,217	38,707	35,426	45,637	46,957	44,331	37,675	41,281	32,395	34,159	33,553	35,132	28,061	25,463	23,739	-24,776 (-16%)
	YS	27,398	27,595	29,090	26,098	26,549	27,326	31,293	30,382	32,580	33,345	33,300	32,294	32,517	29,761	29,221	+9,874 (+8%)
	HD	11,323	12,556	14,796	15,126	14,321	11,495	10,047	8,218	5,406	11,556	10,092	8,246	5,375	4,207	4,364	+101 (+0.3%)
	NH	604	623	576	524	614	649	715	687	675	683	756	709	673	633	665	+93 (+3%)
	Σ	74,543	79,481	79,888	87,387	88,441	83,801	79,731	80,569	71,056	79,742	77,701	76,380	66,625	60,064	57,990	-14,708 (-5%)
VOCs (t/y)	GY	9,646	10,390	10,278	11,062	11,323	10,989	11,172	11,480	11,840	10,700	11,072	11,325	11,735	11,117	11,282	-649 (-1%)
	YS	37,676	39,799	39,419	38,126	41,330	43,456	44,204	43,529	45,873	44,632	45,544	44,970	47,381	47,850	52,742	+5,464 (+3%)
	HD	1,166	1,138	975	875	2,028	1,264	1,248	1,220	1,201	1,261	1,244	1,215	1,192	1,142	1,072	-20 (-0.4%)
	NH	488	475	443	362	640	615	662	690	685	1,215	1,312	1,391	1,430	1,457	1,642	+2,696 (+102%)
	Σ	48,976	51,802	51,114	50,425	55,322	56,324	57,286	56,919	59,600	57,808	59,173	58,901	61,738	61,566	66,737	+7,491 (+3%)
CO (t/y)	GY	5,791	6,152	5,890	7,789	9,712	9,597	9,345	9,964	10,049	8,941	9,158	9,668	9,819	9,237	9,303	-1,369 (-4%)
	YS	11,515	10,875	9,763	9,312	10,690	10,982	11,617	11,557	11,139	13,980	14,449	14,589	14,257	13,543	13,751	+11,979 (+26%)
	HD	4,188	4,105	4,113	3,675	4,710	4,728	4,667	4,532	4,198	4,811	4,724	4,555	4,218	3,464	3,604	+184 (+1%)
	NH	556	536	547	353	1,156	1,133	1,165	1,172	1,087	2,383	2,522	2,628	2,624	2,725	2,832	+5,600 (+123%)
	Σ	22,051	21,667	20,313	21,129	26,268	26,440	26,793	27,225	26,474	30,115	30,852	31,441	30,918	28,970	29,491	+16,394 (+15%)

* Source data : CAPSS (https://www.air.go.kr/capss/emission/)

2021년 기준 여수(YS) 29,221 톤/년(50%) > 광양(GY) 23,739 톤/년(41%) > 하동(HD) 4,364 톤/년(8%) > 남해(NH) 665 톤/년(1%)의 순으로 기여 특성이 나타났다. 배출원별로는 2018년까지 기여율 30% 전후로 상대적으로 높았던 에너지산업연소(01)의 경우 공공발전시설-보일러(유연탄)의 저감 정책으로 Trend −7%의 감소가 나타났으며, 비도로이동오염원(08)의 경우 선박-화물(중유등)에서 일부 증가함에 Trend −1%의 비교적 낮은 감소와 더불어 2021년 기준 28%로 상대적으로 가장 높은 기여율로 나타났다. 특히, GY의 경우 에너지산업연소(01) 부문에서 2016년 9,239 톤/년까지 지속적 증가하다가 이후 2021년 1,155 톤/년으로 약 −90%나 급감하였는데, 이는 민간발전시설-가스터빈(LNG)에서 큰 배출량 감소의 결과로 나타났다.



* Ver.4.0 : 2011~2013, Ver.5.0 : 2014~2019, Ver. 6.0 : 2016~2021
** GY : Gwangyang-si, YS : Yeosu-si, HD : Hadong-gun, NH : Namhae-gun



* Ver.4.0 : 2011~2013, Ver.5.0 : 2014~2019, Ver. 6.0 : 2016~2021

** GY : Gwangyang-si, YS : Yeosu-si, HD : Hadong-gun, NH : Namhae-gun

Fig. 2. Emissions by 13 source category from 2011 to 2021 (CAPSS).

VOCs 총배출량은 2011년 48,976 톤/년에서 2021년 66,737 톤/년으로 증가와 더불어 Trend +3%의 증가 그리고 2021년 기준 여수(YS) 52,742 톤/년(79%) 〉 광양(GY) 11,282 톤/년(17%) 〉 남해(NH) 1,642 톤/년(2%) 〉 하동(HD) 1,072 톤/년(2%)의 순으로 기여 특성이 나타났다. 특히, YS의 연도별 배출량은 2011년 37,676 톤/년에서 2021년 52,742 톤/년으로 증가와 Trend +3%의 지속적 증가가 나타났으며, 생산공정(04)의 경우 기여율 80% 전후로 특히, 유기화학제품 제조업-폴리에틸렌(HDPE) 그리고 석유제품산업-석유제품저장및취급 그리고 석유제품가공 등 부문에서 높은 기여 특성을 나타내고 있었다.

CO 총배출량은 2011년 22,051 톤/년에서 2021년 29,491 톤/년으로 증가와 더불어 Trend +3%의 증가 그리고 2021년 기준 여수(YS) 13,751 톤/년(47%) 〉 광양(GY) 9,303 톤/년(32%) 〉 하동(HD) 3,604 톤/년(12%) 〉 남해(NH) 2,832 톤/년(10%)의 순으로 기여 특성이 나타났다. 특히, YS의 경우 2011년 11,515 톤/년에서 2021년 13,751 톤/년으로 증가와 Trend +2%의 증가가 나타났으며, 비도로이동오염원(08)-선박-레저(휘발유) 등 부문에서 10~40% 사이, 생산공정(04)-석유제품산업-석유제품가공 등 부문에서 20~30% 사이의 기여 특성을 나타내고 있다.

3.1.2. 배출량 재산정(2016~2019년)

2020년부터 CAPSS는 정확한 배출량 산정을 위해 누락된 배출원 발굴, 노후화된 배출개수 개선, 제철용 무연탄 사용량 중복 개선 등 17개 배출량 산정방법을 개선한 Ver. 6.0 기준을 설정하고 특히, 과거 연도(2016~2019년)에 대해서도 재산정하였다. 배출량 재산정 결과, 2016년 대비 2020년 국가 대기오염물질의 총배출량은 미세먼지 관리 종합계획의 대기 개선 정책의 추진 등으로 PM2.5 1만 1천톤(16.1%), SOx 13만 3천톤(42.5%), NOx 33만 9천톤(26.8%) 감소한 것으로 보고되고 있다(NAEIR, 2023b).

이에, 광양만권에 대해서도 2016~2019년 배출량 재산정에 따른 비교 특성을 살펴보기 위하여, Table 2에는 2016~2019년 사이의 배출량을 Ver. 5.0 및 재산정한 Ver. 6.0의 방법으로 각각 산정된 연도별 결과 및 4년간 총배출량의 증감 차이(=Ver. 6.0−Ver. 5.0)를 나타내었다.

전반적으로 Ver. 5.0에서 Ver. 6.0으로 재산정한 결과, 4개 시·군의 총배출량은 PM10 −65%, PM2.5 −59%, SOx −13%, NOx −5% 감소로 나타났으나, VOCs는 +3%, CO는 +15% 증가로 재산정되었다.

지역별로는 광양(GY)의 경우 PM10 −79%, PM2.5 −74%, SOx −35%, NOx −16% 등 큰 감소가 나타났는데, 이는 제조업연소(03)-기타-제1차금속산업 부문에서 비민수용 무연탄 미사용에 따른 PM10 및 PM2.5 −98%, PM2.5 −74%, SOx −78%, NOx −42% 등 큰 감소 결과로 판단된다. 반면, 여수(YS)의 경우 CO +26%, PM2.5 +11%, NOx +8%로 증가하였는데, 이는 비도로이동오염원(08)선박-레저(휘발유) 부문이 새롭게 산정되어 CO +203%, PM2.5 +27%, NOx +14%나 증가한 결과로 판단된다. 하동(HD)의 경우 NH_3 +10%나 증가하였는데, 이는 생산공정(04)-암모니아소비-SCR 부문에서 Ver. 5.0로 산정된 2017년의 경우만 약 1/3로 급감된 사용량의 차이로 인한 결과로 판단된다. 남해(NH)의 경우 CO +123%, VOCs +102%, PM2.5 +42%로 크게 증가되었는데, 이는 여수시와 유사하게 비도로이동오염원(08)-선박-레저(휘발유) 부문이 새롭게 추가 산정되어서 증가된 결과로 판단된다.

한편, 군산의 선행 연구에서는 재산정 후 CO -39.8%, PM10 -10.0%, VOCs -5.5%, NH_3 -9.2% 감소 그리고 NOx +2.9%, SOx +2.0% 증가가 나타났으며, 특히 CO, PM10, VOCs의 경우 비도로이동오염원(08)-선박-레저(휘발유) 부문이 과거 포함에서 재산정시 미포함됨에 감소된 결과로 나타났다. 반면, 부산 수영구, 속초, 여수, 통영, 사천, 남해 등에서는 과거 미포함에서 재산정시 포함되어 정반대 현상을 보인다고 한다(Park and Kim, 2023). 광양만권 같은 대형 배출시설이 다수 존재하는 충남에서는 Ver. 5.0 대비 Ver. 6.0 배출량의 더 큰 감소와 가스상보다 입자상 오염물질의 감소 폭이 더 큰 것으로 2016년부터 2020년까지 지속적인 감소 추세를 나타낸다고 한다(Hwang et. al., 2023).

3.2. 대기질의 변화 추이

3.2.1. 광양만권 지점별

광양만권의 대기질 변화 추이를 살펴보기 위하여, Table 3에는 광양만권 4개 시·군의 5개소별 대기자동측정소의 가동개시 연도(1991~2021년 사이)부터 2023년까지 연평균 농도 변화를 나타냈다.

한편, 전반적인 연도별, 지역별 오염물질의 농도 추이를 쉽게 살펴보기 위해, Table 3에는 일정 간격의 농도를 단계별 색상으로 나타냈었는데, 5개 대기측정소의 각 오염물질 전체 자료의 평균농도(TAve)를 기준으로 (a)TAve×150% 초과는 “빨강( )”, (a)이하에서 (b)TAve×120% 이상은 “노랑( )”, (b)미만에서 (c)TAve×75% 초과는 “초록( )”, (c)이하에서 (d)TAve×50% 이상은 “연한파랑( )” 그리고 (d) 미만의 농도는 “빈칸( )”으로 표시하였다. 그 결과, 전체 자료의 평균농도(TAve)보다 150%를 초과하는 “빨강” 횟수는 광양 TI 지점은 2001년까지 PM10 1회, SO_2 4회, CO 5회로 나타났으며, 여수 WL 지점은 2017년까지 PM10 3회, SO_2 10회, NO_2 7회, CO 1회 나타났으며, 그 외 하동 HD 지점에서 2015년 PM2.5 1회 나타났다. 특히, 여수 WL 지점의 경우 1996년 대기자동측정소의 가동개시 이후부터 SO_2 및 NO_2 농도는 TAve×125% 이상 높은 농도로 유지되다가 2000년 이후 점차 개선되는 경향을 보였다. O_3 농도는 모든 지점에서 TAve×75% 이상 그리고 풍하측 GS, HD, NH 지점이 풍상측 TI, WL 지점보다 상대적으로 높은 경향을 보이고 있었다.

한편, 광양만권 풍상측 TI 지점의 경우 1996년 대비 2023년 O_3 농도의 경우 3.6%(1 ppb) 감소로 큰 변화가 없는 반면, SO_2, CO, NO_2 농도는 각각 61.5%(8 ppb), 69.2%(0.9 ppm), 21.4%(3 ppb)의 큰 감소가 나타났다. PM10는 1999년 대비 2023년에는 37.3%(19 $\mu g/m^3$) 감소 그리고 PM2.5는 2016년 대비 2023년에는 45.8%(11 $\mu g/m^3$) 감소하였다. 또한, WN 지점의 경우 특히 1996년 대비 2023년 O_3 농도의 경우 60.0%(12 ppb)나 증가하였으나, SO_2, NO_2 농도는 각각 60.0%(9 ppb), 20.0%(4 ppb) 감소 그리고 PM10는 2000년 대비 2023년에는 50.0%(35 $\mu g/m^3$), PM2.5는 2017년 대비 2023년에는 19.0%(4 $\mu g/m^3$) 감소하였다.

광양만권 풍하측 HD 지점의 경우 2007년 대비 2023년 O_3 농도의 경우 52.2%(12 ppb) 큰 증가와 CO 농도의 경우 증감의 변화가 없는 반면, SO_2 40.0%(2 ppb), NO_2 10.0%(1 ppb), PM10 25.0%(9 $\mu g/m^3$) 감소와 PM2.5는 2015년 대비 2023년에는 53.3%(16 $\mu g/m^3$)나 감소하였다. 또한, NH 지점의 경우 2019년 대비 2023년 CO 농도의 경우 25.0%(0.1 ppb) 증가로 나타났으나, SO_2 25.0%(1 ppb), NO_2 20.0%(2 ppb), O_3 7.7%(3 ppb), PM10 25.0%(9 $\mu g/m^3$), PM2.5 15.8%(3 $\mu g/m^3$)로 감소하였다. 비교적 측정개시 연도가 짧은 GS 지점의 경우 2021년 대비 2023년 농도는 O_3 33.3%(3 ppb), PM10 23.8%(5 $\mu g/m^3$), PM2.5 15.4%(2 $\mu g/m^3$) 증가하였으나, SO_2, CO, O_3의 경우 큰 변화가 없었다.

결국 모든 지점에서 1차 오염물질인 SO_2, NO_2, CO 및 입자상 물질 PM10, PM2.5는 연도별 감소 경향을 보이고 있었다. 반면, 2차 오염물질인 O_3 농도는 대부분 지점에서 연도별 증가 경향을 보였는데, 특히 광양 TI 지점만 O_3 농도에 큰 변화가 나타나지 않았다. 광화학 반응을 통해 생성되는 O_3 농도는 일사량 등 기상요소와 밀접한 연관을 가지며, 전구물질인 NOx와 VOCs의 배출량 및 상대적 비율과 밀접한 관계가 있다. O_3 생성은 NOx 농도 증가에 비례하거나(NOx-limited), 반비례하고 VOCs 농도에 비례하기(VOCs-limited) 때문에 동일 지역에서도 어떠한 조건이 O_3 생성을 주도하는지 판별하기 어렵다. 또한, VOCs/NOx 비율이 8:1 미만일 때 VOCs-limited 지역으로 VOCs 배출량 감소는 O_3 농도 감소로 이어지지만, NOx 배출량 감소는 오히려 O_3 농도를 증가시킬 수도 있다고 한다(Park et al., 2022; Choe et al., 2023). 앞에서 지역별 배출량에서 VOCs/NOx 배출량 비율은 2021년 기준 광양(GY) 1:0.5 및 여수(YS) 2:1이고, VOCs 배출량은 YS 52,742 톤/년으로 GY 11,282 톤/년보다 5배 높으나, NOx 배출량은 YS 29,221 톤/년 및 GY 23,739 톤/년 두 지역 간 큰 차이는 없다. 이에 NOx 배출량이 VOCs 배출량보다 약 2배 많은 광양 TI 지점의 경우 O_3 농도가 잘 생성되기도 하지만, 반대로 NO가 O_3와 반응하여 NO_2로 변환되는 반응으로 상대적으로 균형을 이루어 O_3 농도의 급격한 증감 변화가 억제될 수도 있는 것으로 해석하고자 한다. 또한, O_3 농도는 2023년 기준 남해 NH 지점 및 하동 GS 지점 36 ppb 〉 하동 HD 지점 35 ppb 〉 여수 WN 지점 32 ppb 〉 광양 TI 지점 27 ppb으로 광양만권 지역 중 풍상측은 낮고 풍하측은 높은 지점별 농도 특성이 나타났는데, 이는 여수산단의 석유산업에서 다량 배출되는 VOCs 그리고 확산 및 광화학 반응으로 인해 풍하측 지역의 O_3 농도를 증가시킨다고 보고와도 유사한 것으로 판단된다(Park et al., 2022).

Table 3. Annual trends of PM10, PM2.5, SO_2, NO_2, O_3 and CO from 1996 to 2023

(unit ; PM10/PM2.5 $\mu g/m^3$, $SO_2/NO_2/O_3$ ppb, CO ppm)

Year	TI site						WL site					
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	NO_2	O_3	CO	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	NO_2	O_3	CO
1996			13	14	28	1.3			15	20	20	0.5
1997			14	15	23	0.9			16	23	27	0.6
1998			15	17	28	0.9			12	19	23	0.7
1999	51		12	17	28	1.1			10	21	23	0.6
2000	55		15	22	26	0.9	70		12	12	29	0.5
2001	64		6	20	29	0.5	63		13	25	28	0.5
2002	49		6	16	26	0.6	79		11	21	25	0.4
2003	42		7	14	31	0.7	46		11	17	31	0.7
2004	44		8	17	34	0.6	55		10	22	31	0.9
2005	41		9	15	24	0.7	52		11	18	31	0.7
2006	40		8	20	23	0.8	52		13	19	22	0.7
2007	47		7	15	31	0.4	47		15	24	31	0.6
2008	46		8	17	19	0.5	45		14	23	26	0.7
2009	47		8	17	27	0.6	44		12	22	31	0.5
2010	30		10	18	25	0.4	45		14	32	31	0.6
2011	47		11	17	27	0.5	41		13	32	28	0.6
2012	40		10	17	25	0.4	38		12	27	32	0.7
2013	47		9	16	30	0.5	37		14	21	28	0.6
2014	44		8	17	30	0.5	42		12	23	34	0.6
2015	43		9	15	26	0.4	41		10	24	27	0.5
2016	41	24	9	15	26	0.4	39		11	25	29	0.6
2017	41	22	9	16	27	0.5	39	21	13	23	25	0.6
2018	38	20	7	14	25	0.4	35	19	10	17	27	0.6
2019	33	17	6	15	31	0.5	37	20	11	16	29	0.6
2020	27	15	4	13	28	0.4	29	16	7	18	26	0.6
2021	32	17	5	13	26	0.4	33	16	7	15	29	0.5
2022	26	13	5	13	27	0.4	28	16	5	15	30	0.6
2023	32	13	5	11	27	0.4	35	17	6	16	32	0.5
Ave.	42	18	9	16	27	0.6	45	18	11	21	28	0.6
Slope	-0.9	-1.6	-0.2	-0.2	0.01	-0.02	-1.5	-0.8	-0.2	-0.1	0.2	-0.00
Rate (%)	-1.9	-8.4	-3.5	-0.9	-0.1	-4.3	--3.0	--3.5	-3.3	-0.8	1.8	0.0

Year	GS site						HD site						NH site					
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	NO_2	O_3	CO	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	NO_2	O_3	CO	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	NO_2	O_3	CO
2007							36		5	10	23	0.4						
2008							42		4	9	30	0.3						
2009							50		4	9	29	0.4						
2010							51		4	9	27	0.4						
2011							41		4	9	29	0.4						
2012							40		4	9	31	0.3						
2013							46		4	10	35	0.4						
2014							52		4	10	34	0.4						
2015							50	30	4	9	33	0.4						
2016							45	24	4	10	32	0.4						
2017							45	23	4	10	35	0.4						
2018							33	16	4	10	32	0.4						
2019							36	16	3	8	39	0.4	36	19	4	10	39	4
2020							28	13	3	9	37	0.4	27	15	3	9	36	0.5
2021	21	13	3	9	35	0.4	31	15	3	8	37	0.4	30	15	3	8	36	4
2022	23	15	3	10	38	0.4	27	16	3	8	35	0.4	22	13	3	9	36	0.5
2023	26	15	3	11	36	0.4	27	14	3	9	35	0.4	27	16	3	8	36	0.5
Ave.	23	14	3	10	36	0.4	40	19	4	9	33	0.4	28	16	3	9	37	0.5
Slope	2.5	1.0	0.0	1.5	0.5	0.0	-1.1	-1.8	-0.1	-0.1	0.7	0.0	-2.3	-0.8	-0.2	-0.4	-0.6	0.0
Rate (%)	11.3	7.4	0.0	15.5	1.4	0.0	-1.8	-9.1	-3.1	-0.7	2.7	0.0	-6.9	-4.2	-6.9	-5.4	-2.0	5.7

* Color ; ■ : 〉 (a)TAve×150%, ■ : ≦ (a) ~ ≧ (b)TAve×125%, ■ : 〈 (b) ~ 〉 (c)TAve×75%, ■ : ≦ (c) ~ ≧ (d)TAve×50%, □ : 〈 (d)

** TAve. = Average concentration of all data for each pollutant at 4 sites.

3.2.2. 전국 평균과 연간농도 변화율 비교

대기환경연보 자료에 따르면, 1998~2023년 사이 전국 평균 대기오염도의 농도 변화 추세에서 O_3의 경우 1998년 20.0 ppb 대비 2023년 33.0 ppb로 63.5%(13.0 ppb) 증가하고 있으나, SO_2, NO_2, CO, PM10의 경우 1998년 9 ppb, 20 ppb, 1.0 ppm, 55 μg/m^3 그리고 PM2.5의 경우 2015년 26 μg/m^3에서 2023년 3 ppb, 14 ppb, 0.4 ppm, 37 μg/m^3, 19 μg/m^3로 각각 72.2%(6.5 ppb), 32.5%(6.5 ppb), 61.0%(0.6 ppm), 32.7%(18.0 μg/m^3), 26.9%(7.0 μg/m^3) 감소하였다(NIER, 2024). 또한, 대기오염물질의 연평균 농도 변화를 선형 회귀하여 연간농도 변화율을 계산하면, 매년 SO_2 −0.3 ppb, NO_2 −0.3 ppb, CO −0.02 ppm, PM10, -0.7 μg/m^3, PM2.5 -0.9 μg/m^3 각각 감소하였고 반면, O_3 +0.5 ppb 증가하고 있다.

한편, 광양 TI 지점의 경우 27년간 매년 SO_2 −0.3 ppb, NO_2 −0.1 ppb, CO −0.03 ppm, 24년간 PM10, -0.8 μg/m^3, 7년간 PM2.5 -1.6 μg/m^3 각각 감소하였고 O_3 변화율은 거의 없었다. 여수 WN 지점의 경우 SO_2 −0.3 ppb, NO_2 −0.1 ppb, PM10, -1.5 μg/m^3, PM2.5 -0.7 μg/m^3로 각각 감소하였으나, O_3 +12.0 ppb 증가 및 CO 변화율은 거의 없었다. 하동 HD 지점의 경우 17년간 매년 SO_2 및 NO_2 −0.1 ppb, PM10, -0.6 μg/m^3, 9년간 PM2.5 -2.0 μg/m^3 각각 감소하였고 O_3 +0.8 ppb 증가 및 CO 변화율은 없었다. 남해 NH 지점의 경우 5년간 매년 SO_2 −0.3 ppb, NO_2 −0.5 ppb, O_3 −0.8 ppb, PM10, -2.3 μg/m^3, PM2.5 -0.8 μg/m^3 각각 감소하였고 CO 변화율은 거의 없었다.

한편, 최근 2016~2022년 사이 전국 대기오염도의 농도 변화 추세에서, NO_2 농도 감소율(23%) 가운데 국외 영향에 의한 감소를 2% 이내 그리고 국내 배출영향 및 기상 조건 변화로 보고 있다. 또한, SO_2와 CO 농도 감소는 국내자체 배출영향뿐만 아니라, 중국의 배출량 변화에 의해 14%와 21% 감소한 것으로 보고되고 있다(Kim et. al., 2024; Park et. al., 2024).

3.3. 대기 배출량과 오염도 상관성

우리나라의 대기환경정책은 배출허용기준의 지속적으로 상향 조정과 더불어 기업들에서는 환경보호 지출액 증가에 따라 대기오염물질별 배출량이 감소하는 음의 상관성을 보고하고 있다(KEI, 2009). 또한, 오염물질의 경우 선박 연료유 황함량 규제정책에 따라 항만 지역의 SO_2 농도가 감소했다는 보고와 먼지 배출량이 높은 지역이 PM10 농도 역시 높다는 보고 등 지역 오염도 특성은 대기 배출량과의 상관성으로도 살펴볼 필요가 있다(Hwang et al., 2021; Song et al., 2024).

이에, Fig. 3에는 Ver. 6.0으로 배출량이 계산된 2016~2021년 사이의 광양만권 4개 시군의 총배출량 (YS(t)+GY(t)+HD(t)+NH(t)) 그리고 4개소 대기측정소(WL, TI, HD, NH 지점)의 농도 및 모든 지점의 총평균(Ave.) 농도의 추이를 나타냈다.

총배출량 및 총평균 농도 사이의 상관계수는 SOx(t)-SO_2 0.94, NOx(t)-NO_2 0.91, VOCs(t)-O_3 0.63, PM2.5(t)-PM2.5 0.49, CO(t)-CO 0.40, PM10(t)-PM10 0.34의 순으로 나타났으며, 또한 O_3 농도의 전구물질인 NOx(t) 배출량과는 NOx(t)-O_3 −0.74로 나타났다.

1차 오염물질인 SOx 및 NOx의 경우 매년 배출량 감소 추세는 대기 중 SO_2 및 NO_2 농도 감소와 매우 높은 상관성으로 나타났으나, CO의 경우 연도별 배출량 및 농도 모두 큰 변화는 없었다.

2차 오염물질인 O_3 농도 증가 추세는 전구물질인 VOCs(t) 배출량 증가 추세와 높은 양의 상관성(0.63)으로 나타났으나, 감소 경향의 NOx(t) 배출량과는 높은 음의 상관성(-0.74)을 나타냈다. 앞서 기술한 바와 같이, 대기 중 O_3 농도는 전구물질인 NOx와 VOCs의 배출량 및 상대적 비율과 밀접한 관계가 있으며, VOCs-limited 지역의 경우 O_3 농도 증가는 VOCs 배출량과 비례관계 그리고 NOx 배출량과 반비례인 것으로 설명된다(Park et al., 2022; Choe et al., 2023).

또한, 입자상 물질인 PM10 및 PM2.5의 경우 배출량은 큰 증감의 변화가 없음에도 불구하고 대기 중 농도는 매년 감소 추세를 나타내고 있었다. 이는 CAPSS 배출량 자료가 주로 1차 오염물질의 배출 특성을 나타내기에 SOx 및 NOx 등에 의한 2차 입자 생성 과정을 반영하지 못하거나, 특히 국내외 외부 유입의 영향이 상대적으로 매우 크기 때문이라 판단된다.

4. 결 론

광양만 4개 시·군에 대한 CAPSS 배출량 자료 및 대기자동측정망의 확증 자료를 수집 분석하여, 과거에서 현재에 이르는 대기오염물질의 추이와 상관성 등 그 특성을 살펴본 결과 다음과 같다.

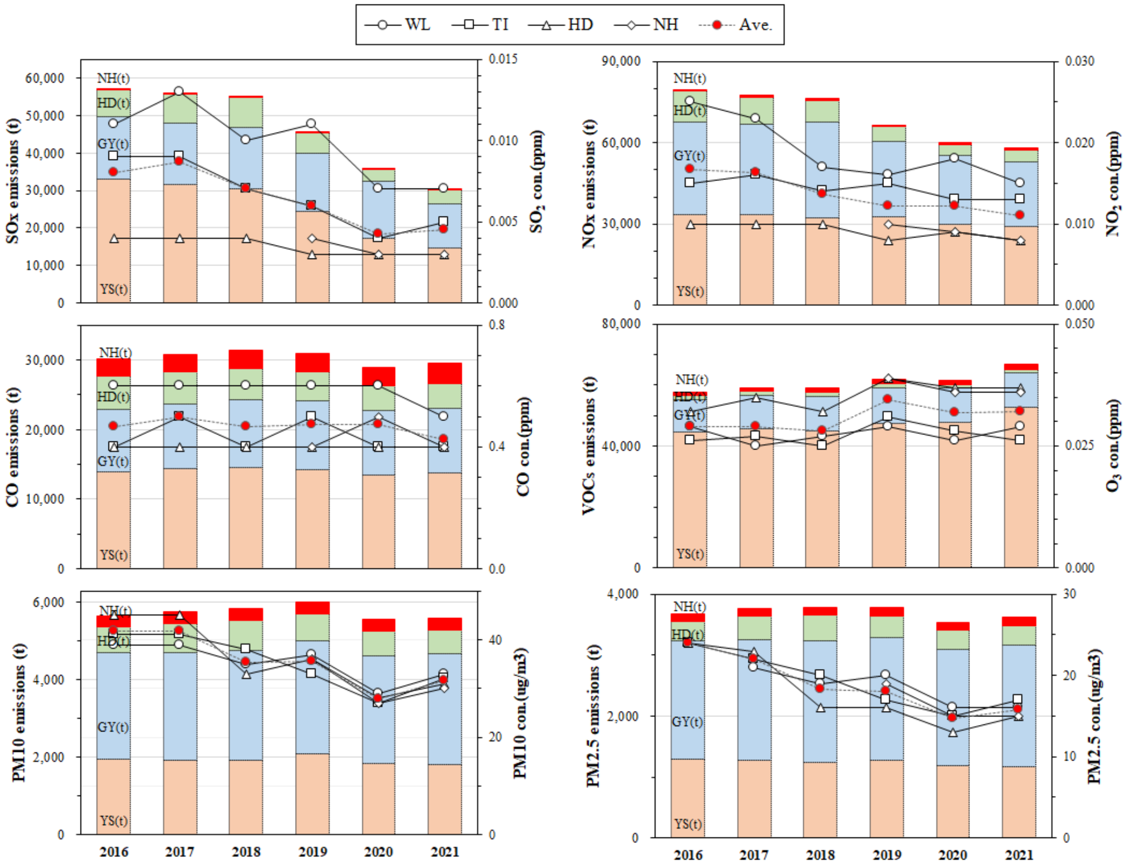


Fig. 3. Trends between air pollutant emissions and concentrations from 2016 to 2021.

1) 총배출량의 연평균 증감율(Trend)은 PM10, PM2.5, SOx의 경우 −8~−9%, NOx −2%로 감소하였으나, 오히려 VOCs 및 CO는 각각 +3% 증가하였다. 기여율은 VOCs의 경우 여수(YS) 80% 그리고 PM10 및 PM2.5는 광양(GY)과 SOx, NOx, CO는 여수(YS)가 각각 약 50% 수준이었으며, 여수(YS) 및 광양(GY)의 합계 기여율은 78~96%로 높은 기여 특성을 나타내고 있다. 한편, 2016~2019년 총배출량을 Ver. 5.0에서 Ver. 6.0으로 재산정 결과, PM10 −65%, PM2.5 −59%, SOx −13%, NOx −5%의 감소가 나타났으나, VOCs +3%, CO +15%나 증가하였다.

2) 광양만권 대기오염도는 전국 평균의 추이와 유사하게 1차 오염물질인 SO_2, NO_2, CO 및 입자상 PM10, PM2.5의 경우 모든 지점에서 연도별 감소 경향을 보였다. 특히, 풍상측 광양 및 여수에서의 SO_2 및 NO_2 농도는 2000년 이후부터 점차 개선되고 있었다. 반면, O_3 농도는 광양 지점을 제외하고 대부분 연도별 증가 경향을 보였으며, 특히 2023년 기준 남해 NH 지점 및 하동 GS 지점 36 ppb 〉 하동 HD 지점 35 ppb 〉 여수 WN 지점 32 ppb 〉 광양 TI 지점 27 ppb으로 광양만권 풍상측이 낮고 풍하측이 높은 지점별 특성이 나타났다.

3) 배출량과 오염도 사이에는, 1차 오염물질인 SOx, NOx의 경우 배출량 감소는 SO_2, NO_2 농도 감소와 상관성이 매우 높았고, 2차 오염물질인 O_3 농도 증가는 전구물질인 VOCs 배출량 증가 그리고 NOx 배출량 감소 경향과 상관성이 높은 것으로 나타났다. 또한, PM10 및 PM2.5의 경우 배출량의 큰 증감이 없음에도 오염도는 큰 감소 추세를 나타내어, 이는 CAPSS 배출량이 2차 입자 생성 과정을 반영하지 못하고, 특히 국내외 등 외부 유입의 영향이 매우 크기 때문이라 판단되었다.

REFERENCES

Choe, H., Jeon, W., Kim, D., Yang, C. Y., Mun, J., Park, J., 2023, Analyzing the changes in O_3 concentration due to reduction in emissions in a metropolitan area : A Case study of Busan during the summer of 2019, J. Environ. Sci. Int., 32(7), 503-520.

CleanSYS, 2024, https://cleansys.or.kr/index.do/.

Gwangyang Bay Area Free Economic Zone Authority (GFEZ), 2023, https://gfez.go.kr/.

Hwang, I., Lee, T. J., Kim, T., Bae, G. N., 2021, Characteristics of air pollutant emissions and distribution for particulate matter concentration of air pollution networks in Gyeongsangbuk-do, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 37(3), 536-551.

Hwang, K. C., Park, S., Lee, G., Noh, S., Kim, J., Lee, J. Y., Park, J. S., Kim., J. B., 2023, Policy recommendation for region air quality management and change of air pollutants emission in Chung Nam base on modified CAPSS, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 39(4), 2383-5346.

Kim, S., Lee, C. B., 2011, Estimating influence of local and neighborhood emissions on ozone concentrations over the Kwang-Yang bay based on air quality simulations for a 2010 June episode, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 27(5), 504-522.

Kim, K. C., Lee, C. S., Choi, D. Y., Joo, H. S., Hong, Y. D., Kim, S. T., Lee, G. W., Park, J. S., Park, J. M., Han, J. S., 2023, Historical changes of air quality standards and air pollution of Korea, and challenges for their improvements, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 39(5), 807-829.

Kim, E., Kim, H.C., Kim, B. U., Woo, J. H., Liu, Y., Kim, S., 2024, Development of surface observation-based two-step emissions adjustment and its application on CO, NOx, and SO_2 emissions in China and South Korea, Science of The Total Environment, 907, 1-12.

Korea environment institute (KEI), 2009, Relationship between environmental protection expenditures and air pollution emissions in the business sector, Sejong-si, Korea.

Lee, S. D., 2003, Numerical modeling of pollutants using local wind model in Gwangyang bay, Korea, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 19(1), 13-23.

Lee, J. R., 2020, Spatial structure change of triangle-cities in Gwangyang bay region: From central place structure to network city, J. Econ. Geogr. Soc. of Korea, 23(1), 93-109.

Ministry of Environmental (MoE), 2006, Comprehensive plan to improve air quality (2006~2015), Sejong-si, Korea.

National Air Emission Inventory and Research Center (NAEIR), 2023a, https://air.go.kr/main.do.

National Air Emission Inventory and Research Center (NAEIR), 2023b, National air pollutant emissions in 2020 and recalculations of national air pollutant emissions for the past years 2016 to 2019, Cheongju, Korea.

National Institute of Environmental Research (NIER), 2024, Annual report of air quality in Korea 2023, https://air.go.kr/main.do.

Park, J. H., 2021, Changes in the air quality of port areas following the implementation of the IMO 2020 sulfur limit, J. Environ. Sci. Int., 30(11), 967-977.

Park, H. Y., Oh, G. Y., Park, H. S., Kim, H. R., Lee, B. R., Park, C. O., Lim, H. S., Park, G. H., Park, J. S., Bae, M. S., 2021, Assessment of regional source contribution of PM2.5 in the Gwangyang bay area, J. Environ. Anal. Health Toxicol., 24(2), 62-74.

Park, H. S., Kim, H. R., Park, H. Y., Lee, B. R., Choi, H. j., Im, H. J., Park, C. O., Park, G. H., Park, J. S., Kim, D. S., 2022, Characteristics of high ozone concentration in Gwangyang bay area-based on cluster analysis, J. Korean Soc. Atmis. Environ., 38(2), 188-202.

Park, S. H., Kim, S. C., 2023, A Study on the comparison of areas near Gunsan according to the revision of the national air pollutant emissions (CAPSS) in 2020, J. Environ. Health Sci., 49(4), 190-200.

Park, J. H., Kim, E. H., Kang, Y. H., Kim, S. T., 2024, Assessment of provincial air quality based on air quality index during 2016~2022, J. Korean Soc. Atmis. Environ., 40(2), 225-241.

Song, H., Jang, E., Cho, G., 2024, A Study on the change of air quality in Busan according to the emissions of air pollutants in port area, Report of B.I.H.E., 33, 1-21, http://www.busan.go.kr/ihe/hedataroom03.

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