

기술자료

국내 비산배출 저감대상 업종의 특정대기유해물질 배출 특성

Emission Characteristics of Hazardous Air Pollutants in Industries Subject to Domestic Fugitive Emissions Reduction

채정석, 이수민, 전준민, 홍지형*, 이창훈¹⁾, 함성원¹⁾, 박종호²⁾,
서경애²⁾, 강대일³⁾, 장기원³⁾

(주)그린환경종합센터, ¹⁾경일대학교 화학공학과, ²⁾이아이씨티(주),
³⁾국립환경과학원 기후대기연구부 대기공학연구과

Jeong-Seok Chae, Su-min Lee, Jun-Min Jeon, Ji-Hyung Hong*,
Chang Hoon Lee¹⁾, Sung-Won Ham¹⁾, Jongho Park²⁾, Kyoung-Ae Seo²⁾,
Dae-Il Kang³⁾, Kee-Won Jang³⁾

Green Environmental Complex Center, Suncheon, Republic of Korea

¹⁾Department of Chemical Engineering, Kyungil University, Gyeongsan, Republic of Korea

²⁾EICT, Ansan, Republic of Korea

³⁾Air Pollution Engineering Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

접수일 2024년 1월 31일
수정일 2024년 2월 29일
채택일 2024년 3월 12일

Received 31 January 2024
Revised 29 February 2024
Accepted 12 March 2024

*Corresponding author
Tel : +82-(0)61-903-1261
E-mail : j10hong@gmail.com

Abstract Plants were selected for industries subject to hazardous air pollutants (HAPs) fugitive emissions reduction, and the concentrations of 33 types of specific air pollutants were measured at stacks equipped with prevention facilities. The dominant HAPs emitted from the plant were identified, and air emissions were calculated based on the measurement information. In addition, carcinogenic and non-carcinogenic toxicity information was applied as weight to air emissions to identify important substances subject to management. These results were compared with air emissions information of pollutant release and transfer registers (PRTR). 30 types of specific air pollutants were detected in 77 stacks at a total of 35 plants. It was confirmed that only information on 25 types of specific air pollutants is provided for air emissions from PRTR in the same industry. In particular, in this study, information on the emissions of hydrogen cyanide and propylene oxide, which have the highest concentration and the largest amount of air emissions, are not included in the PRTR of the relevant industry, so there may be omissions regarding HAPs in terms of air emissions data. It was confirmed that there was a change in priority when the emission ranking calculated in this study reflected toxicity information. Potential carcinogenic substances are hydrazine, ethylene oxide, Be, Cd, acrylonitrile, and Ni, and non-carcinogenic substances are benzo[a]pyrene, Cd, hydrogen cyanide, and Be, Ni, hydrazine, and Pb were evaluated as important emissions in that order. It is believed that if more measurement data is supplemented in the future, it will be possible to more rationally select priority management target substances at plants emitting HAPs.

Key words: HAPs, Point sources, SEMS, PRTR, Air toxics

1. 서 론

유해대기오염물질(Hazardous Air Pollutants, HAPs)은 환경적 위해성이 높은 물질들이 다수로 저농도로 대기 중에 존재하지만 장기간 노출될 경우 건강상 피해를 유발할 수 있는 물질이다(US EPA, 2023; WHO,

2000; Bradstreet, 1996). 국내는 대기환경보전법에 특정대기유해물질의 개념으로 35종이 등록되어 있다. 특히 HAPs는 사업장에서 배출될 가능성이 커 특정대기유해물질 중 32종은 대기환경보전법 시행규칙에, 1종의 다이옥신은 잔류성오염물질 관리법 시행규칙에 배출허용기준이 설정되어 엄격하게 관리되고 있다.

나머지 2종인 폴리염화비페닐(PCBs)과 석면은 현재 사용금지물질에 해당한다.

2022년 기준 국내의 대기오염물질 배출사업장 현황은 총 65,733개 소가 있으며, 그중 1종이 1,864개 소, 2종 1,785개 소, 3종 2,169개 소, 4종 21,471개 소, 5종 38,444개 소가 등록되어 있다(MOE, 2023a). 이들 사업장의 배출시설 및 방지시설에서 신고물질에 대한 자가측정이 이루어지고 있으며, 특정대기유해물질 또한 각 사업장별로 신고대상물질에 한하여 측정이 이루어지고 있다. 방지시설 설치 면제시설의 경우에는 물리적, 안전상의 사유로 자가측정이 불가능할 경우 자가측정의 면제가 가능하다(MOE, 2021). 따라서 배출사업장으로부터 보다 다양하고 정밀한 HAPs 측정 자료를 확보하는 데에는 어려움이 존재한다.

현재 우리나라의 점오염원에 대한 대기오염물질 배출량을 산정하기 위해서는 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)과 대기배출원관리시스템(Stack Emission Management System, SEMS), 화학물질 배출·이동량 정보시스템(Pollutant Release and Transfer Registers, PRTR), 굴뚝 배출가스 연속측정 시스템(Clean-SYS) 등의 자료를 이용할 수 있다. 이 중 HAPs에 대한 세부적인 배출물질 정보는 SEMS와 PRTR에서 확인할 수 있다. PRTR 자료는 화학물질관리법에 따라 사업자 스스로 자가측정결과 및 물질수지나 배출계수 또는 공학적 계산, 시설설계자료 등을 이용하여 산정이 가능하여(NICS, 2022), SEMS보다 화학종의 다양성 부분에서 많은 정보가 제공된다. 그러나 직접측정 외의 방법으로 배출량이 산정될 수 있기 때문에 실제 대기로 배출되는 물질만을 고려하였을 시 자가측정 기반의 SEMS와는 다른 결과가 나타날 수 있다. SEMS는 1~3종 사업장의 대기배출원(고정오염원)을 체계적으로 관리하고 신뢰성 있는 자료의 구축을 위해 사업장 정보, 시설운영현황 등 기초자료를 수집·관리하는 시스템이며, 자가측정 결과를 기반으로 산정된 HAPs의 배출량 자료를 제공한다. 정리하면 PRTR은 다양한 HAPs의 배출물질 정보를 제공하나 실측 외의 방법으로 산정된 결과의 한계성

이 있으며, SEMS는 자가측정 기반의 실측자료이나 신고된 일부 HAPs만 측정되는 한계성이 존재한다.

우리나라의 오염원 배출량을 대기질 모델 입력자료로 사용하면서 많은 연구자들과 전문가들은 대기오염도와 배출량의 상관성이 크게 낮고 배출량과 대기질 농도와의 변화가 비선형적인 관계임을 확인하고 있다(Moon *et al.*, 2021; Cha *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2009). 대기질 측정자료와 배출량 자료 중 실측 측정자료의 신뢰성이 배출계수를 활용하여 산정된 배출량 자료의 신뢰성보다 높다 판단되기에 대기배출량의 부정확성이 더 큰 원인으로 판단된다. 이외에도 기상조건에 의한 대기오염물질의 이동, 확산 및 광화학반응에 의한 화학종 변화를 농도 변화의 원인으로 들 수 있다(Park *et al.*, 2018). 특히 VOCs는 비점오염원에서 비산배출(fugitive emission)되는 배출량이 많기 때문에 배출량 자료의 불확실성이 크다(MOE, 2023b; Baek *et al.*, 2020, 2003; Yang *et al.*, 2008). 이러한 배경에서 다양한 화학종의 변화와 배출이 일어나는 사업장의 경우 세부화학종의 정확한 배출량 정보의 부재는 정책 평가에 활용되는 대기질 모델 결과의 신뢰성을 떨어뜨리고, 위해성 평가의 활용자료로서 제한적일 수밖에 없다.

현재까지 국내 사업장 배출구의 특정대기유해물질에 대한 측정자료는 매우 적고 일부 HAPs에 대하여 제한적인 결과들이 존재한다. Park *et al.* (2008)은 6개 업종에서 업종별 배출량 상위 2~3개 사업장(총 17개 사업장)을 선정하여 중금속 7종(Cd, Pb, Cr, As, Hg, Ni, Be)의 측정농도를 토대로 배출량을 산정하였다. 중금속 배출량은 제철제강 및 합금철 제조업에서 가장 많았으며, 업종별 중금속 7종에 대한 배출 비율은 축진지 제조업 Pb 71%, Cr 24%, 냉간압연 및 압출제품 제조업 Cr 33%, Ni 31%, 기타 제1차 비철금속 제조업 Cr 80%, 제철제강 및 합금철 제조업 Cr 49%, Pb 35%, 일반도로 및 관련제품 제조업 Pb 65%, Cr 19%로 나타났다. 그리고 지정폐기물 소각업은 Ni 47.6%, Pb 17%, Cr 15% 등으로 타 업종에 비해 업종의 특성상 다양한 중금속이 배출되었다. Be은 모든 업종에서 불검출되

었고, Hg은 제철제강 및 합금철 제조업의 배출가스량이 타 업종에 비해 많아 양적으로 많이 배출되고 있는 것으로 고찰하였다.

Oh *et al.* (2023)은 PTR-ToF-MS (Proton transfer reaction time-of-flight mass spectrometer)를 활용하여 특정 산업단지 내에 있는 4개 업종에서 휘발성유기화합물 (Volatile organic compounds, VOCs) 33종을 측정하였다. 이 중 특정대기유해물질은 11종이 해당한다. PTR-ToF-MS는 동일한 질량을 가진 이성질체는 분리되지 않는 단점이 있으나, 원취시료에 대한 전처리 없이 주입 후 빠르게 분석되는 장점이 있다. 4개 업종에서 상대적으로 높은 HAPs는 금속 가공제품 제조업의 경우 dichloromethane, tetrachloroethylene이었고, 인쇄 및 기록매체 복제업 formaldehyde, 1,3-butadiene, 고무 및 플라스틱 제조업 styrene, 그리고 하수·폐수 및 분뇨 처리업에서 타 업종에 비해 acetaldehyde, acrylonitrile, benzene, carbontetrachloride, chloroform, ethylbenzene 등 다양한 HAPs에 대한 농도가 높은 업종으로 확인되었다.

앞서와 같은 배경에서 특정 분석항목에 대하여 제한적으로 수행된 고정오염원의 HAPs 측정자료를 폭넓게 확보하고자, 본 연구에서는 비산배출 저감대상 업종을 대상으로 사업장을 선정하여 방지시설이 설치된 (Controlled) 배출구 후단에서 특정대기유해물질을 측정하였다. HAPs 비산배출시설 관리제도는 '12년에 대기환경보전법에 신설되고, '13년에 시설관리기준이 도입되어 현재 중분류 13개 업종의 세세분류 39개 업종이 적용을 받고 있다(MOE, 2023b). 이는 HAPs가 비산배출되는 시설·공정 등을 관리하는 것으로, 대상 사업장은 해당 시설에 대한 시설관리기준을 준수하여 비산배출되는 HAPs를 최소화하여야 한다(MOE, 2023b). 본 연구를 통해 현재 HAPs 비산배출시설 관리가 이루어지고 있는 다양한 업종의 사업장에서 HAPs 농도수준 및 대기배출량, 그리고 위해성 측면에서 관리 우선순위가 높은 HAPs는 무엇인지 파악하고자 하였다. 본 연구의 결과는 HAPs의 인벤토리 구축 및 HAPs 배출계수 개발 등 관리정책에 필요한 기초자료

로서 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구 방법

2.1 HAPs 측정 사업장 선정

사업장 배출구(굴뚝)의 HAPs 배출현황을 파악하기 위해 환경부의 비산배출 저감제도대상 39개 업종 중 15개 업종을 대상으로 총 35개 사업장, 77개 배출구에서 시료를 채취하여 분석하였다. 각 사업장의 배출구 조사시기는 2019~2023년도 사이에 이루어졌다. 국내 특정대기유해물질로 등록된 35종 중 다이옥신과 폴리염화비페닐(PCBs), 석면을 제외한 HAPs를 대상으로 하여 배출농도를 측정하였다.

표 1은 한국표준산업분류(10차 개정)에 따라 측정대상 업종을 분류하고 사업장 수와 배출구 수, 그리고 SEMS (2021년) 자료를 토대로 조사대상 업종들 대비 측정사업장의 HAPs 배출량 비율을 정리한 것이다. 산업분류 중 제조업(대분류)의 6개 업종(중분류)으로 화학물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외(A업종), 고무 및 플라스틱 제품 제조업(B업종), 1차 금속 제조업(C업종), 전기장비 제조업(D업종), 전자부품·컴퓨터·영상·음향 및 통신장비 제조업(E업종), 자동차 및 트레일러 제조업(F업종)이다. 측정대상 사업장 선정을 위해 6개 업종의 하위 15개 세부업종에 속하는 사업장들의 HAPs 배출량을 SEMS 자료를 통해 확인하였다. SEMS 자료에는 각 사업장에서 신고한 일부 HAPs의 측정농도를 토대로 산정된 배출량 자료가 존재한다. 사업장별로 신고된 개별 HAPs의 배출량을 모두 더하여 총 HAPs 배출량으로 가정하여, 각 업종 내 사업장들의 HAPs 배출량 점유율을 확인하였다. 이를 통해 측정대상 사업장을 우선적으로 선별하였으며, 사업장과 협의 후 측정가능 여부에 따라 사업장 및 측정 배출구가 최종적으로 선정되었다.

표 1의 6개 업종들의 전체사업장 대비 측정대상 사업장의 HAPs 배출량 점유율은 24.6~69.6%에 해당한다. 가장 높은 점유율인 69.6%는 1차 금속 제조업(C

Table 1. Overview of industry type and sites for HAPs measurement.

Industry type (Business code)	Detailed classification for industry type measured (Business code)	Name	HAPs measurement plants and stacks	HAPs emission ratio ¹⁾ (%)	
				for detailed classification	for all plants measured
Manufacture of chemicals and chemical products; except pharmaceuticals and medicinal chemicals (20)	Manufacture of basic organic petrochemicals (20111)	A	4 plants, 8 stacks	15.0	25.6
	Manufacture of synthetic rubber (20201)		5 plants, 9 stacks	86.4	
	Manufacture of synthetic resin and other plastic materials (20202)		1 plants, 12 stacks	11.6	
Manufacture of rubber and plastics products (22)	Manufacture of other rubber products n.e.c. (22199)	B	1 plants, 1 stacks	8.0	35.3
	Manufacture of plastic films (22212)		2 plants, 5 stacks	54.8	
	Manufacture of self-adhesive plastic products (22291)		1 plants, 3 stacks	24.9	
	Manufacture of plastic laminating, coating and other surface processing products (22292)		1 plants, 1 stacks	100.0	
	Manufacture of other plastic products n.e.c. (22299)		5 plants, 6 stacks	6.3	
Manufacture of basic metals (24)	Manufacture of basic iron (24111)	C	2 plants, 11 stacks	70.0	69.6
	Manufacture of basic steel (24112)		3 plants, 3 stacks	64.0	
Manufacture of electronic components, computer; visual, sounding and communication equipment (26)	Manufacture of electronic tubes, interface cards and other electronic components n.e.c. (26299)	D	2 plants, 3 stacks	24.6	24.6
Manufacture of electrical equipment (28)	Manufacture of accumulators (28202)	E	2 plants, 4 stacks	28.0	29.5
	Manufacture of other insulated wires and cables (28302)		2 plants, 3 stacks	74.5	
Manufacture of motor vehicles, trailers and semitrailers (30)	Manufacture of steering and suspension devices for motor vehicles (new products) (30391)	F	2 plants, 4 stacks	78.5	40.6
	Manufacture of other new parts and accessories for motor vehicles n.e.c. (30399)		2 plants, 4 stacks	39.1	

¹⁾HAP emission ratio of measured plants among total industry HAPs emissions in SEMs data

업종)의 세부업종인 제철업(24111)과 제강업(24112)에 속한 전체 사업장 대비 측정대상 사업장의 HAPs 배출량 점유율이며, 이는 측정업종들 중 가장 대표성이 있는 측정사업장에 해당하였다. 가장 점유율이 낮은 24.6%의 전기장비 제조업(D업종)의 세부업종인 그 외 기타 전자부품 제조업(26299)은 측정대상인 2개 사업장(공장)만으로 HAPs 배출량의 24.6%를 차지하는 만큼 해당업종에 대한 배출 비중이 큰 대표 사업장으로 볼 수 있다. 이외에 세부업종 중 플라스틱 적층, 도포 및 기타 표면처리 제품 제조업(22292)은 1개 사업장이 해당업종의 HAPs 배출량 100%를 차지하는 경우도 존재하였다. 이는 해당업종에서 HAPs를 측정하고 있는 사업장 수가 1개이고, HAPs 외의 물질만을 측정하는 사업장들이 대다수임을 의미한다.

2.2 시료채취 및 분석방법

시료채취를 위한 측정위치, 측정공 및 측정점의 선정은 국내 대기오염공정시험기준의 'ES 01114 배출가스 중 굴뚝 배출 시료 채취방법'을 준용하여, 측정공 확인 후 측정점에서 시료채취가 이루어졌다. 가스상 물질인 VOCs와 무기물질의 시료채취는 VOCs의 경우 'ES 01113.c 배출가스 중 휘발성유기화합물(VOCs) 시료채취방법'을, 무기물질은 'ES 01111.b 배출가스 중 가스상 물질 시료채취방법'에 따라 수행되었다. 입자상 물질인 금속화합물(Metal compounds)과 다환방향족탄화수소(PAHs)는 'ES 01301.1d 배출가스 중 먼지' 채취법을 적용하여 채취된 먼지 시료를 분석하였다. 구체적인 시료채취와 분석방법은 대기오염공정시험기준의 각 물질별 시험규격에 설명되어 있다.

2.2.1 휘발성유기화합물(VOCs)

VOCs 중 benzene을 포함한 13종은 진공펌프로 Tenax-TA (Supelco, USA) 흡착튜브에 흡착시켜 시료를 채취하였다. 시료 흡입속도는 100~200 mL/min 정도의 범위에서 시료채취량이 1~5 L 정도가 되도록 하였으며, 농도산정에 필요한 시료가스미터의 유량, 온도 및 압력을 측정하였다. 시료가 채취된 고체흡착관은 열탈착기기(TD, Thermal Desorption, Unity-2-xr,

Makers International, Ltd. UK)에 장착하여 320°C에서 이동상 가스(Carrier gas) 헬륨(순도 99.99% 이상)을 사용하여 약 50 mL/min 유량으로 8분 동안 시료를 1차 열탈착, 저온 흡착관(Cold Trap)에서 -20°C로 1분간 시료를 저온농축 및 재흡착하였다. 이를 다시 320°C에서 15분간 2차 열탈착하여 GC 컬럼에서 분리된 시료를 GC/MS (Gas Chromatography/Mass Spectrometry, GC 5977B, Agilent Technologies, USA)에서 최종적으로 피크 및 데이터 정리를 하였다. 정량분석을 위해 기체상 표준혼합물질인 SUPELCO사의 TO-15/17용 VOCs 표준혼합시료를 사용하였다. Ethylene oxide, propylene oxide, dimethyl disulfide의 3종은 진공흡입상자를 통해 Tedlar bag에 시료를 채취하여 분석하였다. Ethylene oxide, propylene oxide의 분석은 TD (Thermal Desorption, Unity 2, Markes International, Ltd, UK)와 GC/FID (Gas chromatography/flame ionization detector, GC 2010Plus, Shimadzu, Japan)를 연결하여 분석하였다. Dimethyl disulfide은 TD/GC/FPD (Flame photometric detector, 2010/plus, Shimadzu Corp., Japan)로 분석하였다.

Phenol은 배출가스를 0.5~1 L/min 흡입속도 범위에서 약 10 L를 NaOH 용액에 흡수시켜 염화암모늄-암모니아 완충용액을 첨가하여 pH를 조절한 후 4-아미노안티피린 용액과 핵사사이아노철(III)산포타슘 용액을 첨가하고 페놀화합물과 반응하여 생성하는 안티피린계 색소의 흡광도 파장을 510 nm에서 UV/VIS Spectrometry (Ultraviolet Visible Spectrophotometer, UV-1900, Shimadzu, Japan)로 측정하여 페놀화합물을 정량하였다.

Benzidine은 유리섬유여지(직경 13 mm)에 0.2 L/min의 유속으로 약 20~100 L를 채취하여 채취한 시료를 0.17% 트라이에틸아민/메탄올로 추출한 후 검출기 파장을 254 nm에 고정시켜 HPLC (High Performance Liquid Chromatography, HPLC/LC-40A Series, Shimadzu, Japan)로 분석하였다.

Formaldehyde와 acetaldehyde는 배출가스를 1~10 L/min 흡입속도 범위에서 시료채취량 2~10 L를 DNPH

(dinitrophenylhydrazine)-cartridge (S10, Supelco, USA)에 채취하였다. 배출가스에 포함된 알데하이드류는 하이드라존 유도체 (hydrazone derivative)를 생성하게 되며, 유도체가 생성된 cartridge에 아세토나이트릴을 3~5 mL 범위에서 일정량을 주입, 추출하여 검출기 파장 360 nm에서 HPLC로 분석하였다. 정량에는 Carbonyl-2,4-DNPH 혼합표준물질 (Custom Mix 50 µg/mL in acetonitrile, LC10224)을 사용하였다.

2.2.2 금속화합물

배출가스 중 입자상 금속은 원통형 여과지 (Thimble Filters 88R, Advantec, Japan)에 배출가스 1 Sm³를 등속 흡입하여 채취된 먼지시료를 분석하였다. 가스상 금속이 존재하는 arsenic (As)와 mercury (Hg)는 As의 경우 NaOH 흡수액에 약 1 L/min으로 채취하고, Hg는 산성 과망간산포타슘 흡수액에 채취하며, 입자상 금속의 시료채취와 같은 시간 동안 동시에 시료를 채취하였다. 입자상 금속이 채취된 여과지는 기기분석을 위한 전처리 과정으로 마이크로파 산 분해법을 적용하였다. 시료가 채취된 여과지를 마이크로파 용기에 질산과 염산의 혼합산과 같이 넣고, 마이크로파를 10분간 상승시켜 180°C에서 10분간 유지하였다. 마이크로파 조사가 끝나면 압력을 낮추고 용기를 상온으로 냉각시켰다. 전처리가 끝난 추출액은 전량 필터링한 후 분석용 시료용액으로 하였다. 분석용 시료 중 4종 (Lead (Pb), Cadmium (Cd), Chromium (Cr), Nickel (Ni))은 ICP/AES (Inductively-coupled plasma atomic emission spectrometry, ICPE-9820 AES, Shimadzu, Japan)로 분석하였다. 가스상 As는 채취한 흡수병 내의 용액을 가열 산처리를 통해 유기물을 분해하는 과정을 거친 후 필터링하여 분석용 시료용액으로 하였다. 2종 (As, Beryllium (Be))은 AAS (Atomic Absorption Spectrophotometry, AA-7000, Shimadzu, Japan)로 분석하였다. 시료 중의 Hg는 가열 산분해 처리의 전처리 과정을 거친 후 자동화된 연속 흐름 방식에 의해 시료와 환원용액인 염화주석(II) 용액이 반응하여 수은 증기를 발생시켜 분석하는 냉증기 원자흡

수분광광도법 장비인 FIMS-400 (Perkin Elmer, UK)으로 분석하였다. 정량을 위해 1,000 mg/L의 표준용액 (AccuStandard Inc., USA)을 사용하였다.

2.2.3 다환방향족탄화수소 (PAHs)

배출가스 중 PAHs는 입자상과 가스상 물질로 존재함에 따라, 입자상은 먼지시료 채취방법과 동일하게 원통형 여과지에 채취하고, 가스상은 XAD-2 (1-0357, Supelco, USA) 흡착수지와 흡수액에 채취하였다. 원통형 여과지는 사용 전에 아세톤 및 톨루엔으로 각각 30분간 초음파 세정을 거친 후 진공 건조 후 사용하였다. XAD-2 수지는 사용 전에 아세톤 + 증류수 (1+1), 아세톤 (2회), 헥세인 (2회)을 이용하여 순서대로 각각 30분씩 초음파 세정 후 30°C 이하의 진공건조기에서 충분히 건조시켜 데시케이터 안에서 보관하면서 사용하였다. 흡수액으로 아세톤 및 헥세인, 다이클로로메테인을 사용하였으며, 시료채취를 마친 시료채취장치는 흡수액으로 세정하여 동일하게 분석하였다. 시료가 채취된 원통형 여과지는 가속용매추출장치 (ASE[®] 200, Dionex, USA)에 넣고, 10 µg/mL 정제용 내부표준물질 (Surrogate Standard, AccuStandard Inc., USA) 0.1 mL 주입하여, 용매 (Hexane:DCM = 50:50)로 추출하였다. 가스상 물질이 흡착된 XAD-2 수지도 입자상 여과지와 동일한 방식으로 추출하는데, 이때 추출 시간은 24분가량 소요되며, 추출을 마친 입자상과 가스상 시료용액은 농축을 진행하였다. 농축은 45분가량 소요되며, 회전증발농축기 (SyncorePlus/V-300/F-380, BUCHI, Switzerland)를 사용하여 2 mL까지 농축한 후 정제용 컬럼으로 정제하고, 다시 회전증발농축기로 1 mL까지 재농축하였다. 최종 농축된 시료에 10 µg/mL 내부표준물질 (Internal Standard, Cambridge Isotope Laboratories, Inc., U.S.A) 0.1 mL 주입하여 GC/MSD (6890, Agilent/5973N, Agilent, USA)를 사용하여 분석하였다. 시료에 주입된 내부표준물질은 회수율 평가 및 기기감도 보정에 사용되었다. 기기분석 결과의 정량을 위한 표준물질은 PAHs 13 Mix Standard (AccuStandard Inc., USA)를 사용하였다.

2.2.4 무기물질

Hydrogen cyanide의 시료채취는 0.5 M NaOH 흡수액에 배출가스 시료를 0.1 L/min의 유량으로 흡인하여 10분 이내에 시료채취가 이루어지도록 하였다. 분석용 시료용액 10 mL를 마개가 있는 시험관에 취하여 각각에 인산염 완충액 5 mL와 클로라민-T 용액 0.25 mL를 가하고 마개를 닫고 혼합하고 2~3분간 방치한 후 피리딘피라졸론 용액 5 mL를 가하여 혼합하고 약 25°C로 50분간 방치하여 발색시켜 UV/VIS Spectrometry로 파장 620 nm 부근에서 흡광도를 측정하여 정량하였다.

Chlorine의 시료채취는 p-톨루엔설펜아마이드 흡수액에 배출가스 시료를 흡입속도 약 1 L/min으로 하여 약 20 L를 채취하였다. 시료가 채취된 흡수액에 사이안화포타슘 용액 0.5 mL를 넣은 후 마개를 하여 흔들어서 섞고 실온에서 약 5분간 방치하였다. 여기에 인산염 완충용액 (pH 7.2) 5 mL 및 4-피리딘카복실산-피라졸론 용액 5 mL를 넣고, 약 25°C의 물중탕에서 약 30분간 방치한 후 이 용액의 일부를 UV/VIS Spectrometry로 638 nm 부근의 파장에서 흡광도를 측정하여 정량하였다.

Fluorine compounds의 시료채취는 NaOH 흡수액에 배출가스 시료를 1 L/min 정도로 유지하며 80 L를 채취하였다. 완충용액을 첨가하여 pH를 조절한 후 란타넘-알리자린콤플렉스 용액을 첨가하고 플루오린화 이온과 반응하여 생성하는 복합 착화합물의 흡광도를 파장 620 nm에서 UV/VIS Spectrometry로 흡광도를 측정하여 정량하였다.

염화수소 (Hydrogen chloride)는 흡수액 (증류수)에 배출가스 시료를 1 L/min 정도를 유지하며 20 L를 채취하였다. 시료가 채취된 흡수액은 IC (Ion Chromatography, Eco IC, Metrohm Ltd., USA)로 분석하였다.

Hydrazine은 시료채취를 위해 0.1 M 염산이 채워진 흡수병에 펌프를 이용하여 0.2~1.0 L/min의 유량으로 7~100 L의 시료를 채취하였다. 시료채취를 완료하면 흡수액을 유리바이알로 옮기고 시료를 채취한 흡수병의 유리관 및 몸체를 0.1 M 염산 1 mL로 씻어낸 용액

을 합한 후 시료 용액을 분석시료로 하였다. 2 mL 바이알에 시료를 채취한 흡수액 0.5 mL를 주입하고, 여기에 0.1 M의 NaOH 0.5 mL를 가하여 산도를 조정하였다. 이어서 즉시 0.5 mL의 벤즈알데하이드 용액을 가하여, 이 혼합물을 휘저어 흔들어 준 후 30분간 방치하여 유도체화하였다. 유도체화된 시료를 1 mL 취하여 이를 아세트나이트릴 혹은 메탄올로 10배 희석한 후 HPLC (High Performance Liquid Chromatography, HPLC/LC-40A Series, Shimadzu, Japan)로 분석하였다.

2.2.5 정도관리

대기오염공정시험기준의 정도관리 기준은 공통적으로 검정곡선의 결정계수 (R^2)를 0.98 이상, 정밀도 (재현성)는 상대표준편차 (Relative Standard Deviation, RSD)로서 10% 이내, 정확도 범위 75~125%가 제시되어 있고, PAHs의 경우는 회수율 50~150%의 기준이 추가 제시되어 있다. 본 연구에서는 정도관리 기준을 만족함을 확인 후 채취시료에 대한 시험 분석을 수행하였다.

2.3 HAPs 배출량 자료

사업장 배출구의 HAPs 실측농도를 바탕으로 물질별 연간배출량을 산정하기 위해 아래 식 (1)과 식 (2)를 이용하였다.

$$E_y = Q_y \times C \quad (1)$$

$$Q_y = Q \times T_d \times D_y \times 60 \quad (2)$$

식 (1)에서 E_y 는 연간배출량 (kg/year), Q_y 는 연간배가스량 (Sm^3/year), C 는 실측농도 (kg/Sm^3)를 의미하며, 식 (2)에서 Q 는 배출구유량 (Sm^3/min), T_d 는 일일가동시간 (hr/day), D_y 는 연간가동일수 (day/year)를 의미한다. 여기서 배출구유량은 실측값을, 가동시간은 대기배출원관리시스템 (SEMS)상에 등록되어 있는 실측조사가 이루어진 해당 연도 값을 적용하였다.

추가적으로 화학물질안전원에서 취합 관리하고 있는 화학물질 배출·이동량 정보시스템 (PRTR) 홈페이지

지에서 업종별 대기배출량을 조사하였다 (NICS, 2021). 본 연구에서 조사된 6개 업종을 대상으로 특정 대기유해물질에 해당하는 물질들의 2021년도 대기배출량 자료를 정리하였다. 현재 2021년도 자료가 가장 최근 자료이다.

2.4 독성정보를 활용한 배출량 산정방법

본 연구에서는 실측농도를 바탕으로 산정된 배출량에 각 물질별 위해성(독성)을 가중치로 고려한 배출

량을 산정하였다. Baek and Kim (2019)은 독성정보에 따라 PRTR의 HAPs 배출량을 발암성과 비발암성의 그룹으로 구분하여 각 그룹에서 상대적인 중요 우선순위물질을 평가하였다. 발암성 물질 그룹의 배출량은 위해가중배출량(risk-weighted emission), 비발암성물질 그룹의 배출량은 독성가중배출량(hazard-weighted emission)으로 표현하였다(Baek and Kim, 2019). 이 방법은 기존의 위해성평가에서 중요한 노출변수가 적용되지 않은 방법이다. 따라서 값의 크기에 대한 의미 부

Table 2. Toxicity data used in study.

Compounds	CAS number	WOE of IARC ¹⁾	Carcinogenic risk		Non-carcinogenic risk	
			Unit risk ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ⁻¹	Reference ²⁾	RfC (mg/m^3)	Reference
Aniline	62-53-3	3	1.60E-6	CalEPA	1.00E-3	IRIS
Vinyl chloride	75-01-4	1	8.80E-6	IRIS	1.00E-1	IRIS
Dichloromethane	75-09-2	2A	1.00E-8	IRIS	6.00E-1	IRIS
1,3-Butadiene	106-99-0	1	3.00E-5	IRIS	2.00E-3	IRIS
Acrylonitrile	107-13-1	2B	6.80E-5	IRIS	2.00E-3	IRIS
Chloroform	67-66-3	2B	2.30E-5	IRIS	9.77E-2	ATSDR
1,2-Dichloroethane	107-06-2	2B	2.60E-5	IRIS	2.40E+0	ATSDR
Benzene	71-43-2	1	7.80E-6	IRIS	3.00E-2	IRIS
Carbon tetrachloride	56-23-5	2B	6.00E-6	IRIS	1.00E-1	IRIS
Trichloroethylene	79-01-6	1	4.10E-6	IRIS	2.00E-3	IRIS
Tetrachloroethylene	127-18-4	2A	2.60E-7	IRIS	4.00E-2	IRIS
Ethylbenzene	100-41-4	2B	2.50E-6	CalEPA	1.00E+0	IRIS
Styrene	100-42-5	2B	-	-	1.00E+0	IRIS
Phenol	108-95-2	3	-	-	2.00E-1	CalEPA
Benzidine	92-87-5	1	6.70E-2	IRIS	-	-
Ethylene oxide	75-21-8	1	3.00E-3	IRIS	3.00E-2	CAL
Propylene oxide	75-56-9	2B	3.70E-6	IRIS	3.00E-2	IRIS
Dimethyl disulfide	624-92-0	-	-	-	-	-
Formaldehyde	50-00-0	1	1.30E-5	IRIS	9.83E-3	ATSDR
Acetaldehyde	75-07-0	2B	2.20E-6	IRIS	9.00E-3	IRIS
Hydrogen cyanide	74-90-8	-	-	-	8.00E-4	IRIS
hydrogen fluoride	7664-39-3	-	-	-	1.40E-2	CalEPA
Hydrogen chloride	7647-01-0	3	-	-	2.00E-2	IRIS
Chlorine	7782-50-5	-	-	-	1.50E-4	ATSDR
Hydrazine	302-01-2	2A	4.90E-3	IRIS	2.00E-4	CalEPA
Benzo[a]pyrene	50-32-8	1	6.00E-4	IRIS	2.00E-6	IRIS
As	7440-38-2	1	4.30E-3	IRIS	1.50E-5	CalEPA
Be	7440-41-7	1	2.40E-3	IRIS	2.00E-5	IRIS
Cd	7440-43-9	1	1.80E-3	IRIS	1.00E-5	ATSDR
Pb	7439-92-1	2B	1.20E-5	CalEPA	1.50E-4	IRIS
Cr	16065-83-1	3	-	-	-	-
Ni	7440-02-0	2B	2.40E-4	IRIS	9.00E-5	ATSDR
Hg	7439-97-6	3	-	-	3.00E-4	IRIS

¹⁾Weight of evidence (WOE) for carcinogenicity in humans

(1 = carcinogenic; 2A = probably carcinogenic; 2B = possibly carcinogenic; 3 = not classifiable; 4 = probably not carcinogenic).

²⁾IRIS: Integrated Risk Information System; ATSDR: US Agency for Toxic Substances and Disease Registry; CalEPA: California Environmental Protection Agency

여보다는 각 물질에 대한 상대적인 비교에 의미를 두어야 한다. 선행연구는 PRTR에서 제공되는 대기배출량을 활용한 데 반해 본 연구에서는 실제 측정 결과를 토대로 산정된 배출량에 이를 적용하였다.

산정방식은 각 물질별 배출량에 표 2의 발암가능성 그룹은 각 물질별 단위위해도 (unit risk, 이하 UR)를 곱하고, 비발암가능성 그룹은 인체노출참고농도 (reference concentration, 이하 RfC)를 나누는 방식이다. 여기서 UR 값이 커지면 위해가중배출량 값이 커져 해당 물질에 대한 발암 위해성은 증가하게 되며, RfC 값은 작을수록 독성가중배출량 값은 커져 노출로 인한 유해성이 증가함을 의미한다(Baek and Kim, 2019).

표 3은 본 연구에서 측정한 특정대기유해물질 32종(염소와 염화수소 구분 시 33종)의 독성정보자료를 정리한 것이다. 독성정보는 Baek and Kim (2019)의 선행연구에서 정리하여 제시된 값과 IRIS (US EPA, 2024a), Dose Response Assessment Tables (US EPA, 2024b), California EPA (CalEPA, 2024), US Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR, 2023) 등의 자료를 이용하였다. 측정된 32종 중 fluorine compound는 hydrogen fluoride의 독성정보를 적용하였으며(PRTR에서 hydrogen fluoride의 배출량이 제공되고 있음), dimethyl disulfide과 chromium (Cr)은 독성정보가 없어 평가에서 제외하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 HAPs 측정 결과

사업장 배출구(굴뚝)에서 측정된 33종의 HAPs 측정 결과를 6개 업종(중분류)으로 구분하여 표 3에 나타내었다. 전체 업종에 대한 평균농도가 높은 물질 순으로 보면, hydrogen cyanide 529 ppb, propylene oxide 370 ppb, hydrogen chloride 303 ppb, acrylonitrile 301 ppb, dichloromethane 234 ppb, styrene 166 ppb 등이다. 검출물질 중 hydrogen chloride는 6개 업종 중 C업종(1차 금속 제조업(24))을 제외한 업종들에서 평균농

도 288~831 ppb 수준이었고, C업종은 2 ppb로 상대적으로 낮게 나타났다. 중금속류는 평균농도가 불검출(N.D.)~22.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위에서 검출되었다.

가스상 물질 중 상대적으로 검출빈도가 가장 높은 물질은 hydrogen chloride와 formaldehyde, acetaldehyde로 90% 이상의 검출빈도를 보였다. 이에 비해 vinyl chloride과 carbon tetrachloride, tetrachloroethylene은 본 연구에서는 검출되지 않았다. 중금속류 중에서는 Cr과 Ni이 70% 이상의 비교적 높은 검출빈도를 보였고, 그 외 중금속은 6.5~31.2%의 범위에서 검출되었다.

업종별로 보면, A업종에 속하는 합성고무 제조업(20201)과 합성수지 및 기타 플라스틱물질 제조업(20202)에서 1,3-butadiene과 acrylonitrile, styrene, ethylene oxide의 농도가 높았다. 석유화학계 기초화학물질 제조업(20111)은 타 업종에 비하여 Cr, Ni, Cd, Pb, Be의 중금속 평균농도가 11.6~18.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 보일러 연소시설 배출구에서 높았는데, 연료로 사용되는 중유에 의한 영향으로 사료된다. 중유 연소 시 형성되는 0.1 μm 이하의 초미세입자에 전이금속인 Ni과 V이 주로 분포하고 있음을 확인하였다(Linak *et al.*, 2004, 2003, 2000). 따라서 입경이 작은 초미세먼지의 경우 방지시설에서 제거되지 않고 배출되어 대기 중 중금속 오염영향을 끼칠 수 있다. Jang *et al.* (2006)은 인위적 배출원 연소실험을 통해 입경에 따른 중유 연소 시 형성되는 초미세입자의 입경별 Ni과 V의 질량분포(%)를 확인하였고 PM_{0.1} 내에 약 50%가 존재하였다. 또한, 중유 연소 시 온도변화에 따라 중금속화합물의 지배종(domination species)이 변화될 수 있음을 고찰하였다.

B업종의 플라스틱 필름 제조업(22212)과 플라스틱 접착 처리제품 제조업(22291)에서는 propylene oxide와 hydrogen cyanide, hydrazine의 농도가 높았다. 가장 농도가 높은 propylene oxide의 주요 산업적 용도는 폴리우레탄 폼 및 플라스틱 수지, 프로필렌글리콜, 기능성 유체(유압 유체, 열전달 유체 및 윤활제 등) 및 프로필렌 옥사이드계 계면활성제의 생산에 사용되며,

Table 3. Concentrations of HAPs by industry types.

Compounds	Unit	Average concentration						Total			
		A (n = 29)	B (n = 16)	C (n = 14)	D (n = 3)	E (n = 7)	F (n = 8)	Mean	S.D. ¹⁾	Max	D.F. ²⁾ (%)
Aniline		N.D ³⁾	0.3	- ⁴⁾	N.D	11.1	N.D	2.3	13.0	77.8	5.6
Dichloromethane		3.1	3.9	2.9	5,763.0	61.6	7.7	233.5	1,944.8	17,073.7	42.9
Vinyl chloride		N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0
1,3-Butadiene		283.2	4.9	0.1	N.D	1.3	N.D	107.8	896.7	7,870.3	19.5
Acrylonitrile		799.2	0.9	N.D	N.D	N.D	2.0	301.4	1,948.9	16,588.9	16.9
Chloroform		1.9	N.D	0.9	46.7	N.D	N.D	2.7	16.1	140.0	19.5
1,2-Dichloroethane		0.1	N.D	N.D	3.1	N.D	N.D	0.2	1.1	9.4	3.9
Benzene		103.9	25.2	10.1	N.D	3.2	0.6	46.6	238.3	2,006.9	62.3
Carbontetrachloride		N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0
Trichloroethylene		N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	782.6	81.3	708.9	6,221.3	3.9
Tetrachloroethylene		N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0
Ethylbenzene		17.6	4.4	1.2	N.D	N.D	2.7	8.0	28.9	231.0	48.1
Styrene	ppb	418.2	37.5	3.8	N.D	0.6	1.5	166.2	811.3	6,829.0	51.9
Phenol		18.6	37.0	2.4	52.8	75.1	26.9	26.8	55.5	243.1	45.5
Benidine		N.D	< 0.01	-	N.D	N.D	N.D	< 0.01	< 0.01	0.1	5.6
Ethylene oxide		306.2	103.3	-	N.D	3.6	1.7	64.0	209.6	1,107.7	38.9
Propylene oxide		N.D	821.9	-	10.6	10.3	6.9	369.7	1,562.6	8,608.5	61.1
Dimethyl disulfide		0.1	0.2	-	N.D	N.D	0.2	0.1	0.5	2.4	11.1
Formaldehyde		32.8	143.1	3.8	1.5	78.7	20.7	52.2	142.3	970.3	92.2
Acetaldehyde		32.3	58.3	-	1.2	74.6	4.1	38.5	67.0	327.1	96.8
Hydrogen cyanide		664.0	1,262.0	116.9	N.D	48.6	47.5	528.9	2,611.2	19,689.8	42.0
Fluorine compounds		N.D	1.6	35.4	N.D	74.9	61.4	30.8	74.0	307.8	22.0
Chlorine		37.8	16.1	-	N.D	N.D	N.D	19.1	42.8	162.5	20.0
Hydrogen chloride		388.0	426.1	2.0	831.3	385.8	288.4	302.5	338.5	1,594.5	98.0
Hydrazine		N.D	98.6	-	N.D	N.D	N.D	43.8	201.1	1,186.3	8.3
Benzo[a]pyrene	µg/m ³	0.8	< 0.001	3.0	N.D	N.D	N.D	0.9	1.4	4.3	51.9
As	ppb	N.D	0.3	N.D	5.4	2.0	1.9	0.8	2.3	11.8	18.2
Cr		18.0	8.0	5.3	12.4	22.0	3.7	12.3	37.7	280.4	84.4
Ni		12.9	1.0	3.5	1.0	5.7	0.5	6.3	32.7	280.5	71.4
Cd		12.3	N.D	1.9	N.D	N.D	N.D	5.0	32.6	279.8	6.5
Pb	µg/m ³	11.9	0.2	4.0	N.D	5.5	N.D	5.7	32.8	281.0	31.2
Be		11.6	N.D	-	N.D	1.3	15.7	7.5	37.5	279.8	15.9
Hg		< 0.01	0.06	-	N.D	N.D	N.D	0.02	0.1	0.9	6.8

¹⁾Standard deviation; ²⁾Detection frequency; ³⁾Not detected (or below detection limit); ⁴⁾Not measured.

식품 훈증제, 토양 살균제, 산 청소제로도 사용된다 (NRC, 2010). 조사된 사업장의 주요 생산품은 탄소섬유, 바니쉬 (varnish), 필름류 (폴리이미드 필름, 동박 필름, 코팅필름, 점착필름, 코트필름)로 제품생산공정에서 배출되는 것으로 판단되나, propylene oxide이 직접적인 원료로서 사용되지는 않는 것으로 확인되어 추가적인 조사가 필요할 것으로 사료된다. Oh *et al.*

(2023)은 B업종의 하위 5개 업종(고무의류 및 기타 위생용 비경화 고무제품, 그 외 기타 고무제품 제조업, 벽 및 바닥 피복용 플라스틱제품 제조업, 플라스틱 접착처리 제품 제조업, 플라스틱 물질 제조업)에서 특정 대기유해물질 중 VOC 11종을 분석하였다. Acetaldehyde 128.7 ppb, dichloromethane 12.1 ppb, styrene 11.2 ppb, ethylbenzene 9.5 ppb, formaldehyde 5.31 ppb,

chloroform 4.9 ppb, benzene 1.26 ppb 순으로 본 연구의 측정농도와 비교 시 각 물질별로 높고 낮음의 차이가 존재하였다. 조사된 세부업종이 다르고 사업장의 공정특성 등 다양한 요인에 의한 결과로 사료된다.

C업종의 제철업(24111)과 제강업(24112)에서는 다환방향족탄화수소류 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)의 대표적인 발암물질인 benzo[a]pyrene의 농도가 가장 높았다. PAHs는 주로 유기물질의 불완전연소에 의해 생성되는 것으로 알려져 있는데, 제철 및 제강업에서 사용되는 화석원료(유연탄, 무연탄)의 연소과정에서 배출되었을 가능성이 클 것으로 사료된다. 제철 및 제강업에서 농도가 높을 것으로 판단되는 중금속은 타 업종에 비해 높지 않았다. Park *et al.* (2008)은 제철 및 제강업 배출구 2개소에서 측정한 결과, As는 본 연구와 동일하게 불검출(N.D)되었고, Pb 10.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Cd 6.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Ni 7.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 는 본 연구와 유사한 수준, Cr은 본 연구에 비해 8배 이상 높은 45.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 보고하였다. Park *et al.* (2008)의 연구에서 측정된 6개 업종 중 제철 및 제강업의 농도는 다른 5개 업종에 비해 높지 않고 오히려 낮은 수준으로 나타나, 본 연구 결과를 고려하면 실제 배출되는 농도 수준은 타 업종에 비해 높지 않은 업종으로 판단된다.

D업종은 그 외 기타 전자부품 제조업(26299)의 탈지공정(전자부품 등 표면의 기름기를 제거하는 공정) 배출구에서 dichloromethane의 농도가 가장 높았다. E업종은 축전지제조업(28202)에서 aniline, dichloromethane, phenol, fluorine compounds이 타 업종에 다소 농도가 높았다. F업종은 그 외 자동차용 신상품 제조업(30399)의 탈지시설 및 건조시설 공정 배출구에서 trichloroethylene의 농도가 높았다. 여기서 dichloromethane과 trichloroethylene는 산업공정에서 금속표면의 세정에 사용되는 대표적인 유기용제이다 (Andersson and Slunge, 2021).

3. 2 HAPs 배출량

사업장 배출구에서 측정된 HAPs 중량농도에 연간 배가스량과 가동일수를 적용하여 HAPs의 연간배출

량을 산정하였으며, 업종별로 평균 연간배출량을 정리하여 표 4에 나타내었다. 측정농도가 불검출(N.D)로 나타난 물질들의 배출량은 0으로 표기하였다.

배출량은 측정사업장 수가 늘어나게 되면 총배출량이 증가하기 때문에 본 연구에서는 업종간 비교를 위해 평균 연간배출량으로 자료를 정리하였다. 평균 연간배출량은 C업종(1차 금속 제조업(24))이 2.3 ton/yr로 가장 많았고, B업종(고무 및 플라스틱 제품 제조업(22))과 A업종(화학물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외(20))이 1.5 ton/yr, D업종(전기장비 제조업(28)) 0.8 ton/yr, F업종(자동차 및 트레일러 제조업(30)), 0.5 ton/yr, E업종(전자부품·컴퓨터·영상·음향 및 통신장비 제조업(26)) 0.4 ton/yr 순이다.

업종별로 배출량이 많은 주요 HAPs를 살펴보면, A업종은 acrylonitrile, hydrogen cyanide, 1,3-butadiene, ethylene oxide, styrene, hydrogen chloride 등의 배출량이 전체 배출량의 10~27% 수준으로 타 업종에 비해 고른 배출 비율을 나타냈다. B업종은 dimethyl disulfide, hydrogen cyanide, hydrogen chloride가 82%의 배출량을 차지하고 있고, 가장 배출량이 많은 C업종은 hydrogen cyanide, benzene, fluorine compound의 배출량이 전체의 70%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. D업종은 dichloromethane이 배출량의 89%로 대부분을 차지하고 있고, E업종은 hydrogen chloride, phenol, dichloromethane, acetaldehyde가 80%, F업종은 trichloroethylene과 hydrogen chloride이 82%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 전체 업종으로 보면 hydrogen cyanide 22.3%, propylene oxide 20.2%, acrylonitrile 9.6% 순으로 나타났다.

앞서 실측에 의한 배출량 산정 결과인 표 4와 PRTR 배출량을 정리한 표 5를 비교해 보면 배출량이 많은 업종과 세부화학종이 다르게 나타났다. 그림 1에서 보듯이 본 연구의 조사대상인 6개 업종별 배출 비율은 C업종이 32%로 가장 많은 비율을 차지하였으나, PRTR에서는 1.1%에 불과하였다. 실측농도에서는 C업종의 전반적인 HAPs의 농도가 타 업종에 비해 낮았으나, 배출량 산정 시 적용되는 배출가스 유량이 타

Table 4. Emission amount of HAPs by industry types.

Compounds	Average emissions (unit: kg/yr)						Total (unit: kg/yr)				
	A (n=29)	B (n=16)	C (n=14)	D (n=3)	E (n=7)	F (n=8)	SUM	Max	Mean	(Mean) Rank	(Mean) Ratio (%)
Aniline	0.0	0.3	- ¹⁾	0.0	6.6	0.0	50.2	45.9	1.4	25	0.09
Dichloromethane	8.0	6.0	93.3	699.7	65.2	8.9	4,261.7	2,053.7	55.3	9	3.44
Vinyl chloride	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31	0
1,3-Butadiene	199.3	2.2	0.3	0.0	1.6	0.0	5,830.8	5,559.7	75.7	8	4.71
Acrylonitrile	406.9	0.9	0.0	0.0	0.0	0.3	11,815.3	7,920.2	153.4	3	9.55
Chloroform	3.0	0.0	44.6	7.9	0.0	0.0	734.3	448.2	9.5	21	0.59
1,2-Dichloroethane	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	1.9	1.3	0.02	29	0.002
Benzene	35.9	35.8	360.5	0.0	1.9	1.2	6,681.2	2,873.5	86.8	6	5.40
Carbontetrachloride	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31	0
Trichloroethylene	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	317.2	2,537.9	2,515.6	33.0	12	2.05
Tetrachloroethylene	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31	0
Ethylbenzene	21.6	6.8	44.9	0.0	0.0	3.5	1,392.1	356.7	18.1	16	1.12
Styrene	164.6	8.8	177.0	0.0	0.5	0.8	7,402.5	1,646.1	96.1	5	5.98
Phenol	11.1	27.3	71.9	8.2	106.0	6.3	2,582.7	436.2	33.5	11	2.09
Benidine	0.0	0.1	-	0.0	0.0	0.0	0.9	0.9	0.03	28	0.002
Ethylene oxide	191.4	50.8	-	0.0	2.9	0.2	1,217.6	541.5	33.8	10	2.10
Propylene oxide	0.0	725.6	-	1.5	9.1	4.5	11,713.8	6,626.3	325.4	2	20.24
Dimethyl disulfide	0.0	0.2	-	0.0	0.0	0.2	5.1	2.7	0.1	27	0.01
Formaldehyde	20.8	29.2	43.2	0.1	35.0	10.7	2,004.4	370.9	26.0	14	1.62
Acetaldehyde	21.0	37.4	-	0.1	48.6	3.0	1,570.2	408.1	24.9	15	1.55
Hydrogen cyanide	204.1	412.6	998.0	0.0	8.8	13.7	25,030.7	8,198.8	362.8	1	22.57
Fluorine compounds	0.0	0.3	247.7	0.0	15.1	28.0	3,803.3	1,583.8	76.1	7	4.73
Chlorine	5.1	5.4	-	0.0	0.0	0.0	193.5	39.6	3.5	24	0.22
Hydrogen chloride	155.1	139.9	28.7	63.8	132.9	101.3	4,881.2	727.3	97.6	4	6.07
Hydrazine	0.0	63.0	-	0.0	0.0	0.0	1,007.5	842.8	28.0	13	1.74
Benzo[a]pyrene	0.4	0.0	23.4	0.0	0.0	0.0	338.5	56.1	4.4	23	0.27
As	0.0	0.2	0.0	0.8	2.0	1.4	30.9	10.4	0.4	26	0.02
Cr	18.8	1.5	45.1	0.5	3.9	0.9	1,236.5	443.3	16.1	17	1.00
Ni	17.2	0.4	32.9	0.0	1.0	0.1	973.2	443.4	12.6	19	0.79
Cd	16.6	0.0	21.4	0.0	0.0	0.0	780.7	442.4	10.1	20	0.63
Pb	16.7	0.0	40.8	0.0	1.0	0.0	1,062.6	444.2	13.8	18	0.86
Be	16.5	0.0	-	0.0	0.6	8.5	551.7	442.3	8.8	22	0.54
Hg	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	30	0.0004
ΣHAPs	1,534.0	1,554.4	2,273.8	783.1	442.5	510.8	99,693.2	45,482.4	1,607.4		100.00

¹⁾Not measured. *Measured concentration N.D indicates emissions as "0".

업종에 비해 매우 크기 때문에 낮은 농도임에도 불구하고 배출량이 많은 것으로 산정되었다. 이 결과는 Park *et al.* (2008)의 제철 및 제강업의 측정 결과에서 낮은 측정농도 그러나 많은 배출량이라는 측면에서 동일하였다.

표 5와 같이 PRTR에는 특정대기유해물질 중 25종에 대한 배출량 정보가 있었는데, 세부화학종의 배출량 비율에서도 본 연구와 차이를 보였다. 그림 2의 산

정 결과에서 가장 많은 배출량 비율을 차지하고 있는 hydrogen cyanide와 propylene oxide가 PRTR에서는 배출량 정보가 없고 dichloromethane이 74.5%로 대부분을 차지하고 있었다. 이는 PRTR은 전체 사업장에 대한 배출량이 반영된 결과이고, 본 연구는 업종별 일부 사업장에서 측정된 결과에 대한 배출량이기 때문에 직접적인 비교에는 제한적인 측면이 있다. 또한 다양한 공정에서 생성될 수 있는 다양한 화학종이 배출

Table 5. Emission amount of HAPs in PRTR by industry types.

Compounds	PRTR emission amount (unit: kg/yr)						Total (unit: kg/yr)		
	A	B	C	D	E	F	SUM	Rank	Ratio (%)
Aniline	17	0	0	0	0	0	17	21	<0.001
Dichloromethane	69,194	1,042,951	0	56,221	627,463	229,304	2,025,133	1	74.55
Vinyl chloride	45,024	2,558	0	0	0	0	47,582	7	1.75
1,3-Butadiene	51,050	2,474	0	0	0	0	53,524	5	1.97
Acrylonitrile	12,133	30,395	0	0	0	0	42,528	8	1.57
Chloroform	22	0	0	0	0	0	22	20	<0.001
1,2-Dichloroethane	11,012	0	0	0	0	0	11,012	15	0.41
Benzene	83,700	1,015	1,028	0	0	0	85,743	3	3.16
Carbontetrachloride	6	0	0	0	0	0	6	22	<0.001
Trichloroethylene	89	0	250	3,029	16,146	3,213	22,727	10	0.84
Tetrachloroethylene	687	0	0	0	0	0	687	19	0.03
Ethylbenzene	15,639	14,283	0	3,517	0	14,456	47,895	6	1.76
Styrene	146,393	42,237	0	5,294	0	11,513	205,437	2	7.56
Phenol	14,097	360	0	0	4,291	0	18,748	11	0.69
Benzidine	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ethylene oxide	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Propylene oxide	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dimethyl disulfide	3,120	0	0	0	0	0	3,120	17	0.11
Formaldehyde	5,281	777	0	9,999	0	0	16,057	13	0.59
Acetaldehyde	5	0	0	0	0	0	5	23	<0.001
Hydrogen cyanide	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hydrogen fluoride	6,454	9,677	5,229	8,766	0	0	30,126	9	1.11
Chlorine	16,617	0	0	0	0	0	16,617	12	0.61
Hydrogen chloride	26,006	741	9,323	21,022	641	7,850	65,583	4	2.41
Hydrazine	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[a]pyrene	-	-	-	-	-	-	-	-	-
As	0	0	0	0	0	0	0	24 (1)	0
Cr	3	46	7,850	0	0	249	8,148	16	0.30
Ni	7	156	6,337	3,072	4,523	247	14,342	14	0.53
Cd	0	0	0	0	0	0	0	24 (2)	0
Pb	2	16	0	1	1,470	3	1,492	18	0.05
Be	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hg	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ΣHAPs	506,558	1,147,686	30,017	110,921	654,534	266,835	2,716,551		100.00

*"-": no data

량으로 집계될 수 있는냐의 차이도 있다. 예를 들어, hydrogen cyanide는 Prompt NOx 생성 경로의 중간생성물로 라디칼과 분자가 반응하여 생성되며 저온의 연료가 농후한 화염에서 증가하는 것으로 알려져 있는데, 이러한 hydrogen cyanide는 직접적으로 원료로 사용하는 acrylonitrile 제조과정 외에도, 제련 및 도금 공정의 시안화나트륨과 시안화칼륨의 반응과정에서 생성되거나, 폐가스 소각과정에서 중간생성물로도 생

성될 수 있기 때문이다(Cho *et al.*, 2020; NRC 2003). 따라서 PRTR 자료는 사업장에서 측정되지 않은 HAPs에 대한 누락이 있을 수 있다.

3. 3 독성정보가 반영된 HAPs 배출량 순위

본 연구의 조사대상 전체 업종의 HAPs 대기배출량에 발암성과 비발암성의 독성정보를 가중치로 적용하여 위해가중배출량과 독성가중배출량을 산정하였다.

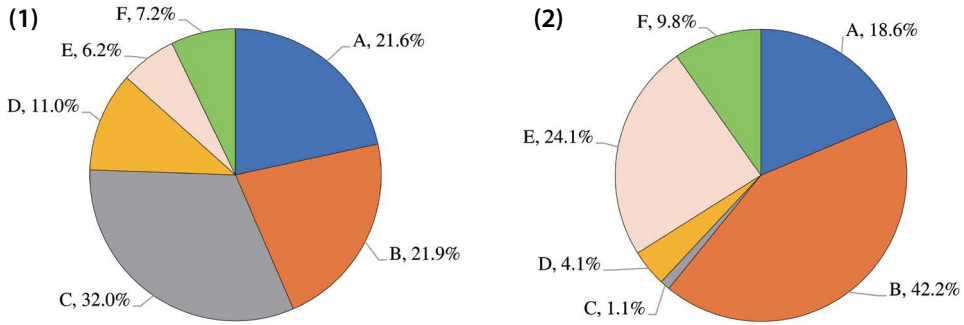


Fig. 1. HAPs emissions ratio by 6 industry types. (1) calculated in this study, (2) PRTR (2021) air emissions. A: Manufacture of chemicals and chemical products; except pharmaceuticals and medicinal chemicals(20), B: Manufacture of rubber and plastics products(22), C: Manufacture of basic metals(24), D: Manufacture of electronic components, computer; visual, sounding and communication equipment(26), E: Manufacture of electrical equipment(28), F: Manufacture of motor vehicles, trailers and semitrailers(30).

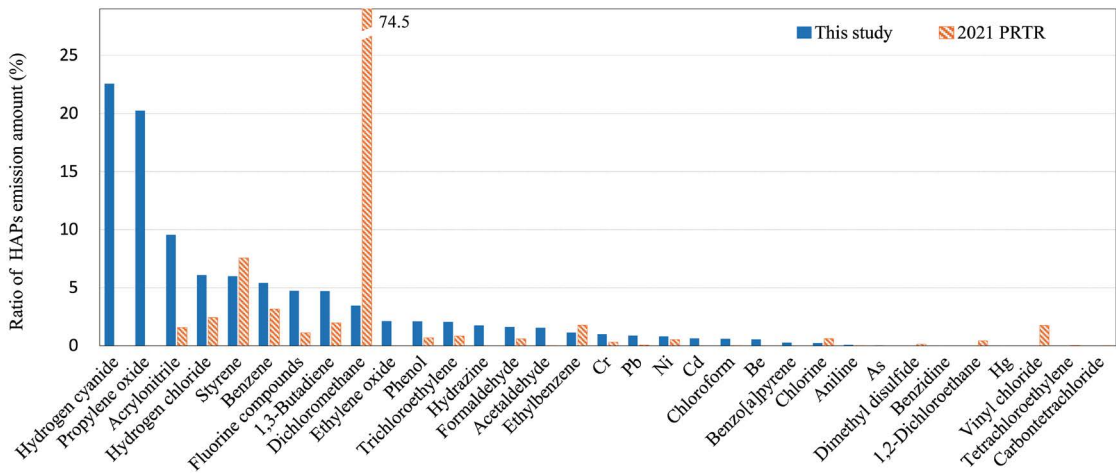


Fig. 2. Chemical species ratio of HAPs emissions for surveyed 6 industry types.

동일한 방법으로 PRTR 배출량에도 적용하였다. 발암 가능성물질의 경우 단위위해도 (UR)를 고려했을 시 위해가중배출량으로 평가가 가능한 물질은 24종이었고, 비발암성물질은 인체노출참고농도 (RfC)를 고려했을 시 평가가 가능한 물질은 30종이었다.

본 연구에서 산정된 발암가능성물질의 위해가중배출량 순위를 표 6에 나타내었다. 6개 전체 조사대상 업종을 기준으로 위해가중배출량 (A) 순위는 hydrazine, ethylene oxide, beryllium (Be), cadmium (Cd), acrylonitrile, nickel (Ni) 등의 순으로 나타났다. Hydra-

zine은 대기배출량 순위 13위였으나 위해가중배출량 (A)의 순위 1위로 나타났고, 에틸렌옥사이드는 대기 배출량 순위 10위였으나 위해가중배출량 (A) 2위, 베릴륨은 대기배출량 순위 22위였으나 위해가중배출량 (A) 3위로 나타났다. 이와는 반대로 대표적인 발암성 물질인 benzene은 대기배출량은 순위 6위였으나 위해가중배출량 (A) 순위 12위로 낮아졌다. 따라서 독성정보 반영 시 다양한 물질들의 순위가 변동했음을 알 수 있다. PRTR의 위해가중배출량 (B) 순위는 nickel (Ni), acrylonitrile, 1,3-butadiene 순으로 이들 물질은 본 연

Table 6. Ranking of risk-weighted emission of carcinogenic chemicals.

Compounds	Potential carcinogenic chemicals					
	Calculated emissions			PRTR		
	Risk-weighted emission		Mass emission	Risk-weight edemission		Mass emission
	m ³ /yr	Rank	Rank	m ³ /yr	Rank	Rank
Hydrazine	1.37E+8	1	13	-	-	-
Ethylene oxide	1.01E+8	2	10	-	-	-
Be	2.10E+7	3	22	-	-	-
Cd	1.82E+7	4	20	0	17(2)	24(2)
Acrylonitrile	1.04E+7	5	3	2.89E+9	2	8
Ni	3.03E+6	6	19	3.44E+9	1	14
Benzo[a]pyrene	2.64E+6	7	23	-	-	-
1,3-Butadiene	2.27E+6	8	8	1.61E+9	3	5
As	1.73E+6	9	26	0	17(1)	24(1)
Benzidine	1.70E+6	10	28	-	-	-
Propylene oxide	1.20E+6	11	2	-	-	-
Benzene	6.77E+5	12	6	6.69E+8	4	3
Formaldehyde	3.38E+5	13	14	2.09E+8	7	13
Chloroform	2.19E+5	14	21	5.06E+5	12	20
Pb	1.66E+5	15	18	1.79E+7	11	18
Trichloroethylene	1.35E+5	16	12	9.32E+7	9	10
Acetaldehyde	5.48E+4	17	15	1.10E+4	16	23
Ethylbenzene	4.52E+4	18	16	1.20E+8	8	6
Aniline	2.23E+3	19	25	2.72E+4	15	21
1,2-Dichloroethane	6.34E+2	20	29	2.86E+8	6	15
Dichloromethane	5.53E+2	21	9	2.03E+7	10	1
Vinyl chloride	0	22(1)	31	4.19E+8	5	7
Tetrachloroethylene	0	22(2)	31	1.79E+5	13	19
Carbontetrachloride	0	22(3)	31	3.60E+4	14	22
Styrene	-	-	5	-	-	2
Phenol	-	-	11	-	-	11
Dimethyl disulfide	-	-	27	-	-	17
Hydrogen cyanide	-	-	1	-	-	-
Hydrogen fluoride	-	-	7	-	-	9
Chlorine	-	-	24	-	-	12
Hydrogen chloride	-	-	4	-	-	4
Cr	-	-	17	-	-	16
Hg	-	-	30	-	-	-

*"-": not calculated

구의 위해가중배출량(A) 순위 10위 안에 들어가는 물질들에 해당하여 공통된 중요 HAPs로 확인되었다.

표 7의 비발암성물질의 독성가중배출량의 순위는 benzo[a]pyrene, cadmium (Cd), hydrogen cyanide, beryllium (Be), nickel (Ni), hydrazine, lead (Pb) 등의 순으로 나타났다. 단위위해도 (UR)의 독성정보가 없어

위해가중배출량이 산정되지 않은 benzo[a]pyrene과 hydrogen cyanide의 순위를 독성가중배출량에서 확인할 수 있다. 특히, benzo[a]pyrene은 대기배출량 순위가 23위로 매우 낮음에도 독성가중배출량(A) 순위 1위로 평가되었고, hydrogen cyanide는 대기배출량 순위 1위, 독성가중배출량(A) 순위 3위로 배출량과 위해

Table 7. Ranking of hazard-weighted emission of non-carcinogenic chemicals.

Compounds	Non-carcinogenic chemicals					
	Calculated emissions			PRTR		
	Hazard-weighted emission		Mass emission	Hazard-weighted emission		Mass emission
	m ³ /yr	Rank	Rank	m ³ /yr	Rank	Rank
Benzo[a]pyrene	2.20E+12	1	23	-	-	-
Cd	1.01E+12	2	20	0	-	24(2)
Hydrogen cyanide	4.53E+11	3	1	-	-	-
Be	4.38E+11	4	22	-	-	-
Ni	1.40E+11	5	19	1.59E+14	1	14
Hydrazine	1.40E+11	6	13	-	-	-
Pb	9.20E+10	7	18	9.95E+12	6	18
Acrylonitrile	7.67E+10	8	3	2.13E+13	4	8
1,3-Butadiene	3.79E+10	9	8	2.68E+13	3	5
As	2.68E+10	10	26	0	22	24(1)
Chlorine	2.35E+10	11	24	1.11E+14	2	12
Trichloroethylene	1.65E+10	12	12	1.14E+13	5	10
Propylene oxide	1.08E+10	13	2	-	-	-
Hydrogen fluoride	5.43E+09	14	7	2.15E+12	10	9
Hydrogen chloride	4.88E+09	15	4	3.28E+12	8	4
Benzene	2.89E+09	16	6	2.86E+12	9	3
Acetaldehyde	2.77E+09	17	15	5.56E+08	19	23
Formaldehyde	2.65E+09	18	14	1.63E+12	11	13
Aniline	1.39E+09	19	25	1.70E+10	17	21
Ethylene oxide	1.13E+09	20	10	-	-	-
Phenol	1.68E+08	21	11	9.37E+10	14	11
Chloroform	9.76E+07	22	21	2.25E+08	20	20
Styrene	9.61E+07	23	5	2.05E+11	13	2
Dichloromethane	9.22E+07	24	9	3.38E+12	7	1
Hg	2.04E+07	25	30	-	-	-
Ethylbenzene	1.81E+07	26	16	4.79E+10	15	6
1,2-Dichloroethane	1.02E+04	27	29	4.59E+09	18	15
Vinyl chloride	0	28(1)	31	4.76E+11	12	7
Tetrachloroethylene	0	28(2)	31	1.72E+10	16	19
Carbontetrachloride	0	28(3)	31	6.00E+07	21	22
Benzidine	-	-	28	-	-	-
Dimethyl disulfide	-	-	27	-	-	17
Cr	-	-	17	-	-	16

**"-": not calculated

성 측면에서 모두 중요한 물질임이 확인되었다. PRTR의 독성가중배출량(B) 순위 중 nickel (Ni), 1,3-butadiene, acrylonitrile, lead (Pb)은 본 연구의 독성가중배출량(A) 순위 10위 안에 들어가는 물질들에 해당하여 공통된 중요 HAPs로 확인되었다. 이러한 결과는 HAPs 배출사업장의 관리대상물질 선정에 있어서 총량 개념의 배출량에만 근거하지 않고, 추가로 위해성 측면을

고려한 우선 관리대상물질을 선정한 결과이다.

4. 결 론

본 연구에서는 HAPs 비산배출 저감대상 업종을 대상으로 사업장을 선정하여 방지시설이 설치된 배출구 후단에서 특정대기유해물질 33종의 농도를 측정하

였다. 사업장의 주요 배출 HAPs를 파악하였고, 측정 정보를 토대로 대기배출량을 산정하였다. 또한 대기 배출량에 발암성과 비발암성의 독성정보를 가중치로 적용하여 중요 관리대상물질이 무엇인지 파악하였다. 이러한 결과를 PRTR의 대기배출량 정보와 비교하였다.

전체 35개 사업장의 77개 배출구에서 특정대기유해물질 30종이 검출되었다. 동일업종의 PRTR의 대기배출량은 특정대기유해물질 25종의 정보만 제공되고 있는 것으로 확인되었다. 특히 본 연구에서 가장 농도가 높고 대기배출량이 많은 시안화수소와 프로필렌옥사이드의 배출량 정보가 해당 업종의 PRTR에 없기 때문에 대기배출량 자료 측면에서 HAPs에 대한 누락이 있을 수 있다. 본 연구 결과와 PRTR의 HAPs 대기배출량 비율을 6개 업종으로 분류하여 비교했을 시 차이를 보였다. 본 연구는 업종별 일부 사업장에서 측정된 결과에 대한 배출량이기 때문에 직접적인 비교의 한계가 있다. 업종 중 1차 금속 제조업의 제철 및 제강업의 경우 특히 HAPs 배출량이 PRTR과 차이가 컸는데, 이는 측정된 농도는 낮았으나 사업장 공정의 배출가스량이 많은 업종에 해당하기 때문으로 판단된다.

본 연구에서 산정된 배출량 순위는 독성정보를 반영 시 우선순위에 변동이 있음을 확인하였다.

발암가능성물질은 hydrazine, ethylene oxide, beryllium (Be), cadmium (Cd), acrylonitrile, nickel (Ni) 등의 순으로, 비발암성물질은 benzo[a]pyrene, cadmium (Cd), hydrogen cyanide, beryllium (Be), nickel (Ni), hydrazine, lead (Pb) 등의 순으로 중요 배출물질로 평가되었다. 물질마다 발암성과 비발암성의 독성정보의 존재 여부에 차이가 있으므로 발암성과 비발암성을 모두 고려하여 도출된 순위물질을 중요 관리대상물질로 우선 고려하고, 추가로 PRTR를 통해 상호 보완 가능할 것으로 판단된다. 향후 더 많은 실측자료의 추가 보완이 이루어지면 보다 합리적으로 HAPs 배출사업장의 우선 관리대상물질을 선정할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원 과제(NIER-2023-04-02-171)의 지원으로 수행하였습니다.

References

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) (2023) Toxicological Profiles. <https://www.atsdr.cdc.gov/substances/indexAZ.asp> (accessed on Jan. 15, 2024).
- Andersson, I., Slunge, D. (2021) Substitution of trichloroethylene in metal parts cleaning in the European Union : A survey-based study on the effects of the authorisation requirements in REACH. https://echa.europa.eu/documents/10162/17228/substitution_tce_metal_parts_cleaning_en.pdf/a2a92dc2-f9d2-5260-dd51-6aa29b261225?t=1625664557307 (accessed on Jan. 29, 2024).
- Baek, S.-O., Kim, J.-Y. (2019) Emission Characteristics of Airborne Toxic Chemicals in Yeongnam Region - Focusing on Health Risks, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(4), 461-475, (in Korean with English abstract).
- Baek, S.-O., Kim, M.-H., Seo, Y.-K. (2003) Evaluation of fugitive emission characteristics of airborne volatile organic compounds from different source categories, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 19(4), 363-376, (in Korean with English abstract).
- Baek, S.-O., Seo, Y.-K., Kim, J.-H. (2020) Occurrence and distributions of volatile organic compounds in the ambient air of large petro-chemical industrial complexes: Focusing on Daesan area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(1), 32-47, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.1.032>
- Bradstreet, J.W. (1996) Hazardous air pollutants: assessment, Liabilities and Regulatory Compliance. Noyes publications. <https://www.sciencedirect.com/book/9780815513865/hazardous-air-pollutants>
- California Environmental Protection Agency (CalEPA) (2024) OEHHA Air Chemical Database. <https://oehha.ca.gov/air/chemicals> (accessed on Jan. 15, 2024).
- Cha, S.-H., Han, Y.-J., Bae, G.-N. (2020) Spatio-temporal distribution of PM₁₀ and PM_{2.5} in Gangwon Province of South

- Korea using air pollution monitoring network data, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 492-506, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.492>
- Cho, S.-H., Kim, G.-M., Lee, K.-M. (2020) Numerical investigation of low-pollution combustion with applying flue gas recirculation in counterflow flames: Part II. Analysis of NOx formation mechanism, *Journal of the Korean Institute of Gas*, 23(6), 8-16, (in Korean with English abstract).
- Jang, H.-N., Kim, S.-H., Lee, J.-H., Hwang, K.-W., Yoo, J.-I., Sok, C.-H., Seo, Y.-C. (2006) Emission Characteristics of Fine Particles, Vanadium and Nickel from Heavy Oil Combustion, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(3), 353-360, (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.-M., Lee, H.-J., Yoo, C., Song, J.-H., Kim, J.-Y., Hong, J.-H. (2009) Verification of mobile emission for CMAQ using an observation-based approach in Seoul Metropolitan Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(5), 369-381, (in Korean with English abstract).
- Linak, W.P., Miller, C.A., Wendt, J.O.L. (2000) Fine particle emissions from residual fuel oil combustion: Characterization and mechanisms of formation, *Symposium (international) on Combustion*, 28(2), 2651-2658.
- Linak, W.P., Miller, C.A., Santoianni, D.A., King, C.J., Shinagawa, T., Wendt, J.O.L., Yoo, J.I., Seo, Y.C. (2003) Formation of Fine Particles from Residual Oil Combustion : Reducing Nuclei Through the Addition of Inorganic Sorbent, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 20, 664-669.
- Linak, W.P., Miller, C.A., Wood, J.P., Shinagawa, T., Yoo, J.I., Santoianni, D.A., King, C.J., Seo, Y.C. (2004) High temperature interactions between residual residual oil ash and dispersed kaolinite powders, *Aerosol Science and Technology*, 38(9), 900-913.
- Ministry of Environment (MOE) (2021) Guidelines on self-measurement standards for businesses exempted from installing air pollution prevention facilities, 5p. https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuld=10262&seq=7731 (accessed on Jan. 9, 2023).
- Ministry of Environment (MOE) (2023a) Environmental Statistics Yearbook 2022. <https://stat.me.go.kr/portal/compose/surveyBulletinPage.do>
- Ministry of Environment (MOE) (2023b) Facility management standards for reducing fugitive emissions: detailed implementation guidelines. http://27.101.216.209/home/web/policy_data/read.do;jsessionid=-WG+M202sPSzJlDagFypEpZ9.mehome1?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuld=10259&orgCd=&condition.toInpYmd=null&condition.fromInpYmd=null&condition.orderSeqId=7949&condition.rnSeq=95&condition.deleteYn=N&condition.deptNm=null&seq=8061 (accessed on Jan. 9, 2024).
- Moon, N.G., Seo, J.Y., Kim, S.T. (2021) Estimation of contribution and emission-to-PM_{2.5} conversion rate by each local government for policy support, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(1), 891-906, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.6.891>
- National Institute of Chemical Safety (NICS) (2021) Pollutant Release and Transfer Registers System. <http://icis.me.go.kr> (accessed on Jan. 9, 2023).
- National Institute of Chemical Safety (NICS) (2022) Chemical emission survey guidelines, 25p. <https://icis.me.go.kr/prtr/pblicitn/calcManualList.do#> (accessed on Jan. 9, 2023).
- National Research Council (NRC) (2003) Acute exposure guideline levels for selected airborne chemicals: Volume 2, 211. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK207601/> (accessed on Jan. 18, 2024).
- National Research Council (NRC) (2010) Acute exposure guideline levels for selected airborne chemicals: Volume 9, 211. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK208161/> (accessed on Jan. 29, 2024).
- Oh, B.-H., Kim, H.-S., Lee, H.-M., Lee, C.-S., Kim, K.-C., Choi, D.-Y., Joo, H.-S., Han, J.-S. (2023) Source characterization of volatile organic compounds of industrial complex measured by proton-transfer-reaction time-of-flight mass spectrometers in Korea, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 22(2), 139-152, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15250/joie.2023.22.2.139>
- Park, J.-H., Kang, S.-Y., Song, I.-H., Lee, D.-W., Cho, S.-Y. (2018) Characteristics of long-term behavior of VOC species in Korea - PAMS data analysis, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 56-75, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.1.056>
- Park, J.-M., Lee, S.-B., Cha, J.-S., Kwon, O.-S., Lee, S.-H. (2008) Characteristics of heavy metal emissions from stationary sources, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(5), 574-583, (in Korean with English abstract).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2023) Hazard-

ous air pollutants. <https://www.epa.gov/haps/what-are-hazardous-air-pollutants> (accessed on Jan. 22, 2024).

U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2024a) Integrated risk information system. <https://www.epa.gov/iris> (accessed on Jan. 15, 2024).

U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2024b) IDose response assessment tables. <https://www.epa.gov/fera/dose-response-assessment-tables> (accessed on Jan. 15, 2024).

World Health Organization (WHO) (2000) Guidelines for air quality for europe, WHO Pub., European Ser. No. 91, 273p.

Yang, S.-B., Yu, M.-S., Lee, Y.-J., Yoo, E.-J., Choi, S.-H. (2008) Estimation of fugitive emission of organic hazardous air pollutants from oil refinery industry, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(2), 229-237, (in Korean with English abstract).

Authors Information

채정석 ((주)그린환경종합센터 이사) (chaejs21@gecc.co.kr)

이수민 ((주)그린환경종합센터 대리) (tnals282@gecc.co.kr)

전준민 ((주)그린환경종합센터 대표) (jmjeon4959@gecc.co.kr)

홍지형 ((주)그린환경종합센터 책임연구원)
(j10hong@gmail.com)

이창훈 (경일대학교 화학공학과 교수) (chlee96@kiu.kr)

함성원 (경일대학교 화학공학과 교수) (swham@kiu.kr)

박종호 (이아이씨티(주) 대표) (jhpark@eict.re.kr)

서경애 (이아이씨티(주) 이사) (kaseo@eict.re.kr)

강대일 (국립환경과학원 대기공학연구과 과장)
(nierkang@korea.kr)

장기원 (국립환경과학원 대기공학연구과 연구사)
(jangkeewon@korea.kr)