

논문

울산시 휘발성유기화합물 배출 저감 시나리오에 따른 2차 생성 미세먼지 저감 효과

Reduction Efficiency of Secondary Organic Aerosols by Emission Reduction Scenarios of Volatile Organic Compounds in Ulsan

이상진, 이병규¹⁾, 김성준, 김대곤²⁾, 이그림²⁾, 강현정²⁾, 김호선²⁾,
박대용²⁾, 최성득*

울산과학기술원 도시환경공학과, ¹⁾울산대학교 건설환경공학부,
²⁾국립환경과학원 대기환경연구과

Sang-Jin Lee, Byeong-Kyu Lee¹⁾, Seong-Joon Kim, Dai-Gon Kim²⁾, Greem Lee²⁾,
Hyun-Jung Kang²⁾, Hyo-Seon Kim²⁾, Dae-Yong Park²⁾, Sung-Deuk Choi*

Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and
Technology (UNIST), Ulsan, Republic of Korea

¹⁾Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Republic of Korea

²⁾Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

접수일 2022년 10월 11일
수정일 2022년 11월 14일
채택일 2022년 11월 17일

Received 11 October 2022
Revised 14 November 2022
Accepted 17 November 2022

*Corresponding author
Tel : +82-(0)52-217-2811
E-mail : sdchoi@unist.ac.kr

Abstract Volatile Organic Compounds (VOCs) are a major precursor generating ozone (O₃) and Secondary Organic Aerosols (SOAs) by reacting with nitrogen oxides (NO_x) and OH radicals in the atmosphere. In this study, the scenarios of VOC emission reduction in Ulsan were suggested based on two emission inventories: the Clean Air Policy Support System (CAPSS) and the Pollutant Release and Transfer Register (PRTR). Considering the characteristics of VOC emissions, three scenarios of VOC emission reduction were derived: (1) Scenario 1-1 reducing TVOC emissions by the type of emission sources, (2) Scenario 2-1 reducing BTEX emissions by areas and compounds, and (3) Scenario 3-1 reducing BTEX emissions by the type of industrial facilities. The concentrations of VOCs before and after the emission reduction were simulated using an air dispersion model. Then, their corresponding Secondary Organic Aerosol Formation Potential (SOAFP) was calculated, and reduction efficiencies in VOCs and SOAFP were compared among the three scenarios. Scenario 2-1 showed the most significant decrease in VOC concentrations. Scenarios 1-1 and 2-1 presented higher reduction efficiencies of VOCs and SOAFP than control scenarios that reduce the same emission amounts without considering emission characteristics (i.e., industrial facilities, areas, and compounds). The methodology and major results of this study can be a basis for establishing VOC and SOA management policies.

Key words: VOCs, SOA, Emission reduction, Air dispersion model

1. 서 론

휘발성유기화합물 (Volatile Organic Compounds: VOCs)은 산업시설, 자동차, 주유소, 페인트와 같은 인위적인 오염원뿐만 아니라, 습지, 수목, 초지와 같은 자연적인 오염원에서도 배출된다(NIER, 2012). 그중

벤젠, 1,3-부타디엔, 염화비닐과 같은 발암물질은 눈, 피부, 호흡기 등에 악영향을 미치므로, 미국환경청 (United States Environmental Protection Agency: US EPA)은 이들 물질을 유해대기오염물질 (Hazardous Air Pollutants: HAPs)로 지정하였다(US EPA, 2022a). 또한, VOCs는 질소산화물(NO_x) 또는 OH 라디칼과

반응하여 오존(O₃)을 생성하거나, 2차 유기입자(Secondary Organic Aerosol: SOA)를 생성하는 주요 전구 물질이다. 우리나라는 급격한 산업화로 인해 O₃와 미세먼지(PM_{2.5})의 농도 기준을 초과하는 횟수가 증가하였으며(Kim *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2020), 환경부는 VOCs 배출 저감을 위해 다양한 정책을 수립하는 등 대기환경 개선을 위해 노력 중이다(NIER, 2016).

PM_{2.5}는 황사, 해염, 산불, 식물의 꽃가루 등과 같이 자연적으로 생성되거나 화석연료 연소, 자동차 매연, 소각장 연소 등을 통해서 인위적으로도 배출된다. 이와 같은 1차 생성 외에도 대기 중 기체상 물질이(VOCs와 기준성 대기오염물질) 광화학·액상반응을 거쳐 PM_{2.5}로 2차 생성된다(MOE, 2016). 이러한 PM_{2.5}의 2차 생성은 오염원 분포와 기상조건에 의해 지역별로 큰 차이를 보인다. 그러므로 환경부는 지역별 PM_{2.5} 발생 특성에 관심을 갖고 권역별 연구를 추진하고 있다. 특히, 대표적인 산업도시인 울산에서는 PM_{2.5} 전구체의 농도 수준과 2차 생성 잠재력을 파악하여 PM_{2.5} 저감 정책을 수립해야 한다.

연구대상 지역인 울산은 국내 최대 규모의 산업도시로서, 국가산업단지 2개, 일반산업단지 18개, 농공단지 4개가 구성되어 있으며, 석유화학, 자동차, 비철금속, 조선중공업 산업단지에서 다양한 유해화학물질이 다량으로 배출된다. 이러한 산업단지의 영향으로 인해, 다른 지역에 비해 VOCs와 이산화황(SO₂) 농도가 높고 농축산 지역이 아니지만 암모니아(NH₃) 배출량이 다른 광역시보다 상대적으로 높다(NIER, 2020). 또한, 해안가에 위치한 산업단지에서 배출된 대기오염물질은 계절풍과 해륙풍에 의해 내륙에 위치한 도심, 주거, 배경지역으로 이동한다(Park *et al.*, 2019). 반면에 북한과 중국으로부터의 장거리 이동 영향은 수도권에 비해 적을 수 있다.

본 연구에서는 2019년 울산의 VOCs 대기배출 총량에 근거하여 배출원별, 지역별, 사업장별 우선순위 VOCs 배출 저감 방안을 제안하기 위해, 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System: CAPSS) 자료를 분석하여 지역 및 산업별 VOCs 배출 저감 시

나리오를 마련하고, 화학물질 배출·이동량 정보시스템(Pollutant Release and Transfer Register: PRTR) 자료 분석을 통해 지역 및 사업장별 VOCs 물질별 배출 저감 시나리오를 제시하였다. 대기확산모형을 이용하여 배출 저감 시나리오에 따른 VOCs 농도 저감 효율을 추정하여 배출 저감 효과를 평가하였다. 최종적으로 모델이 예측한 VOCs 농도로 2차 유기입자 생성 잠재력(Secondary Organic Aerosol Formation Potential: SOAFP)을 계산하여 SOA 농도 저감 효율을 산정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 배출량 자료

환경부 화학물질안전원에서는 PRTR 시스템을 통해 유해화학물질 배출량과 배출업체에 관한 정보를 제공한다(NICS, 2022). 2019년 유해화학물질 대기배출량은 경기도(13,622 tonne/y)에서 가장 많았으며, 울산(9,029 tonne/y), 경상남도(6,763 tonne/y), 충청남도(5,743 tonne/y), 충청북도(5,668 tonne/y), 전라남도(3,798 tonne/y)가 그 뒤를 따랐다. 지역별 면적을 고려하면, 울산의 단위 면적당 유해화학물질 배출량이 가장 많았다(8.5 tonne/km²/y). 울산의 유해화학물질 총 배출량은 조선중공업과 자동차 산업단지에서 많았으며, toluene과 m,p,o-xylenes의 비율이 가장 높았다. 석유화학과 비철금속 산업단지에서도 VOCs가 다량으로 배출되었다.

CAPSS의 VOCs 배출원 분류체계는 유럽 CORE INventory AIR emissions (CORINAIR) 배출원 분류체계(SNAP 97)를 기초로 한다. CAPSS의 분류체계에 의한 13개 대분류 배출원은 에너지산업 연소, 비산업 연소, 제조업 연소, 생산공정, 에너지수송 및 저장, 유기용제 사용, 도로이동오염원, 비도로이동오염원, 폐기물처리, 농업, 기타 면오염원, 비산먼지, 생물성 연소이다. CAPSS에서 VOCs 배출은 국내에서 개발한 점·면·이동오염원별 배출계수를 우선 적용하고, 국

내 미개발 배출계수는 CORINAIR SNAP 97과 US EPA AP-42 등을 적용한다(NIER, 2022). PRTR에서는 연도별, 행정구역별, 사업장별 취급 물질별에 대해 배출계수법, 자가측정자료, 물질수지법, 공학적 계산법 등을 적용하여 개별 VOCs의 총 대기배출량을 산정한다. 2021년 본 연구를 수행할 당시에는 2019년 배출원별 배출량 자료가 공개되었으나 대기확산모델을 위한 상세 굴뚝 정보를 포함한 자료는 2017년 자료가 최신이었다(2022년 현재, 2019년 상세 굴뚝 정보도 제공)(Choi *et al.*, 2021b). 그러므로 배출량 자료의 전반적인 해석을 위해서는 2019년 CAPSS 자료를 사용하였으며, 대기확산모델링에는 2017년 자료를 사용하였다. 2012~2019년 연도별 CAPSS 배출량의 변동은 10% 미만으로 큰 차이가 없었다. PRTR은 배출 업체명 정보만 제공하며, CAPSS는 굴뚝 좌표, 굴뚝 높이, 굴뚝 직경, 배출속도, 배출온도 정보를 제공한다. 본 연구에서는 CAPSS 굴뚝 위치와 PRTR 사업장 주소를 비교하고, 해당 위치의 굴뚝 정보를 2019년 PRTR 물질별 자료에 할당하여 대기확산모델의 입력자료로 사용하였다. 한 사업장에 다수의 굴뚝이 존재하면 굴뚝 높이와 직경, 배출속도, 배출온도의 평균을 계산하여 입력자료로 활용하였다.

2.2 대기확산모델링

울산시 자체 배출에 의한 대기 중 VOCs 농도를 파악하기 위해 대기확산모델을 적용하였다. 본 연구에서 사용한 대기확산모델은 US EPA에서 개발한 California puff(CALPUFF) 모델로서 모델을 구동한 프로그램으로 CALPUFF View ver 9.0 (Lakes Environmental, Canada)을 사용하였다. CALPUFF는 기상모델인 CALMET, 확산모델인 CALPUFF, 후처리 모델인 CALPOST로 구성된다(US EPA, 1995). CALMET은 지리와 기상자료를 이용하여 실측자료에 기반한 보간법으로 3차원 기상장을 작성한다(Lee and Kim, 2009). CALPUFF는 가우시안 퍼프(Gaussian puff) 모델을 기반으로 3차원 기상장에서 퍼프의 움직임과 난류장에 의한 확산을 모사하고, 수용점에서의 농도를 계산

한다(Gilliam *et al.*, 2005; Scire and Strimaitis, 2000). US EPA는 정상상태 모델인 AERMOD를 권장하고 있으나(US EPA, 2022b), 울산과 같은 산지와 해안을 포함하는 복합지형에는 CALPUFF를 사용하는 사례가 많다(Choi *et al.*, 2021a; Gulia *et al.*, 2015; Dresser and Huizer, 2011). 실제로 국립환경과학원에서 수행한 2~3단계 국가산단 주민건강영향사업 등에서 대부분 CALPUFF를 사용하였다.

울산시 대기확산모델링 영역은 50 km × 50 km로, 해상도는 1 km × 1 km로 설정하였다. 지형 자료로 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)의 Digital Elevation Model (DEM) 자료를 사용하였으며, 토지피복 자료로 US Geological Survey (USGS)의 Eurasia-Asia 자료를 사용하였다. 지표 기상관측 자료로 기상청에서 제공하는 종관기상관측자료(ASOS)와 방재기상관측자료(AWS)를 이용하였으며, 울산에 위치한 10개의 관측소 자료를 사용하였다. 상층 기상관측 자료로 기상청의 포항 라디오존데 자료를 이용하였다. 배출량 자료로 2017년 CAPSS의 배출원별 점오염원 자료와 2019년 PRTR의 BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, m,p,o-xylenes) 자료를 사용하였다. 모델 결과 표출을 위해 지리정보시스템(Geographic Information System: GIS) 프로그램인 ArcGIS 10.8 (Esri, USA)을 사용하였다.

본 연구에서는 배출원, 지역, 사업장을 고려하여 VOCs 물질별 배출 특성에 따라 배출 저감 시나리오를 세 가지 제시하였고, 대기확산모델링을 통해 저감 효과를 평가하였다. CAPSS의 VOCs 배출원 분류 자료로 배출원별 저감 효과를 평가하였으며, PRTR의 VOCs 물질별 및 사업장별 배출 자료로 물질별 저감 효과와 사업장별 저감 효과를 평가하였다. 대조군으로 배출 저감 시나리오와 동일한 배출량을 배출원, 지역, 물질에 상관없이 저감한 시나리오를 설정하였으며, 대기확산모델을 이용하여 기본 저감 시나리오와 대조군 저감 시나리오에 의한 농도 차이로 저감 효율을 계산하였다.

2.3 VOCs의 미세먼지 2차 생성 잠재력 계산

기존 연구에서는 광화학 궤적 모델이나 챔버실험으로부터 특정 화학물질의 2차 유기입자 잠재력(Secondary Organic Aerosol Potential: SOAP) (Derwent *et al.*, 2010) 또는 Fractional Aerosol Coefficient (FAC) (Grosjean and Seinfeld, 1989)를 산정하고, 화학물질의 농도를 이용하여 SOAFP를 계산하였다. 또한, NO_x 고농도와 저농도 조건, 특정 지역의 화학물질 배출률, 대기 체류 시간 등을 고려하여 SOAFP를 계산하는 2차 유기입자 수율(SOA Yield) 방법이 있다(Ng *et al.*, 2007). 본 연구에서는 기존 연구에서 사용한 여러 방법을 검토하여 식 (1)의 SOAFP 산정법을 선정하였다.

$$SOAFP_i = C_i \times SOA Yield_i \quad (1)$$

SOAFP_i는 개별 물질 i의 SOA 생성 잠재력, C_i는 물질 i의 측정값(μg/m³), SOA Yield_i는 물질 i의 SOA 생성에 대한 화학량적 상수이다(Pandis *et al.*, 1992). C_i는 CALPUFF 모델로 예측한 BTEX 농도이며, SOA Yield_i는 기존 연구에 제시된 수치를 이용하였다. SOAFP는 문헌값을 이용하여 계산되므로 해당 연구 지역의 환경 영향을 충분히 반영하기 어렵다. 그러므로 SOAFP는 실제 환경대기 중 SOA 농도를 정확히 반영할 수 없지만, 2차 생성 영향의 시공간 분포를 상대적으로 추정하는 데 효과적이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 울산시 VOCs 배출량 현황

울산은 총 5개 구·군(중구, 북구, 동구, 남구, 울주군)으로 구성되며, 2022년 통계청 자료에 의하면 인구는 남구(312,148명)에서 가장 많고 동구(153,164명)에서 가장 적으며, 면적을 고려한 인구밀도는 중구(5,708명/km²)가 가장 높고 울주군(292명/km²)이 가장 낮다. 온산국가산업단지는 울주군에 위치하며, 미포국가산업단지는 남구, 북구, 동구에 걸쳐 위치하고 있다. 또한, 그외 일반 산업단지들은 울주군과 북구에

위치한다. 이에 따라 2020년 PRTR 자료 기준으로 남구에서는 화학 물질 및 화학제품 제조업에 의한 유해 대기오염물질 배출량이 월등히 많으며(1,149 tonne/y), 동구에서는 기타 운송장비 제조업(4,848 tonne/y), 북구에서는 자동차 및 트레일러 제조업(343 tonne/y)에 의한 대기배출량이 가장 많다. 울주군에서는 기타 운송장비 제조업, 화학제품 제조업, 인쇄 및 기록매체 복제업, 석탄 및 석유정제품 제조업 등 다양한 업종에서 유해대기오염물질이 배출되고 있다.

CAPSS에 따르면, 2019년 울산시 VOCs 총 배출량은 89,002 tonne/y이며, 대분류 배출원별로는 생산공정(51,984 tonne/y, 58.4%)이 가장 높은 비중을 차지하였고, 유기용제사용(19,755 tonne/y, 22.2%)과 폐기물처리(10,707 tonne/y, 12.0%) 등이 주요 배출원이었다(그림 1). 세 배출원의 울산시 전체 배출량 기여도는 92.6%로서, VOCs 오염을 개선하기 위해서는 이들 배출원을 중점적으로 관리해야 한다. 생산공정 부문의 중분류 배출원은 크게 석유제품산업과 유기화학제품 제조업으로 구분된다. 소분류 배출원 중 석유제품 저장 및 취급(20.5%), 석유제품가공(14.7%), 고밀도 폴리에틸렌(High Density PolyEthylene: HDPE)(8.3%)이 주요 배출원으로 확인되었다. 유기용제사용 부문에서는 중분류 배출원 중 도장시설(70.3%), 세정시설(11.2%), 기타 유기용제사용(16.3%)이 주요 배출원으로 확인되었다. 도장시설의 소분류 배출원에서는 선박 제조(36.9%), 자동차 제조(23.0%), 코일 코팅(15.1%), 건축 및 건물(14.5%)이 주요 배출원으로 평가되었다. 그러므로 유기용제사용 부문의 VOCs 배출 저감을 위해서는 도장 시설 중 선박과 자동차 제조 부문의 배출 저감에 역점을 두어야 한다. 그러나 현실적으로는 점오염원과 면오염원이 혼재되어 있어서 효과적인 저감이 어려울 수도 있다. 또한, 울산에서는 자동차와 조선업의 경제적 파급효과가 크기 때문에 조심스러운 접근이 요구된다. 폐기물처리 부문의 중분류 배출원은 크게 폐기물소각과 기타 폐기물처리로 분류된다. 소분류 배출원 중에서는 사업장 폐기물소각(99.5%)이 주요 배출원으로 확인되었다. 에너지수송

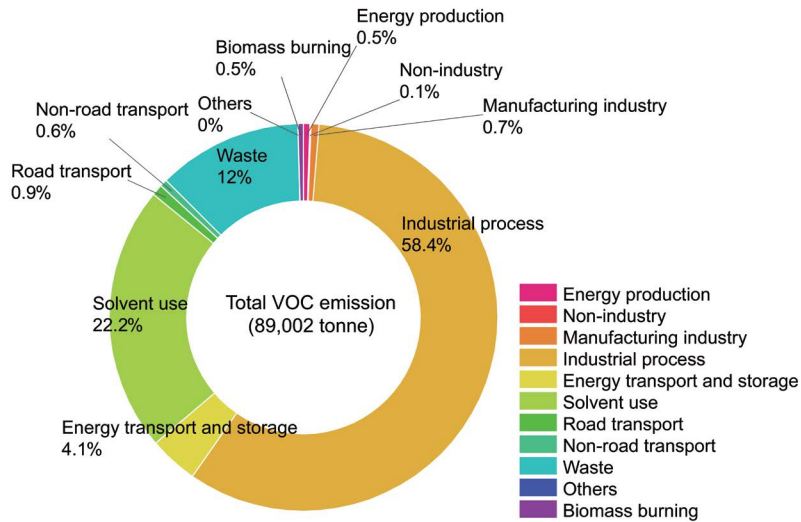


Fig. 1. Annual contribution of emission source categories for total VOCs in Ulsan in 2019. Data were obtained from the National Air Emission Inventory and Research Center (<https://www.air.go.kr>).

및 저장 부문의 중분류 배출원은 모두 휘발유 공급과 관련 있다. 소분류 배출원 중에서는 정유사 출하기지에서 배출이 91.6%를 차지하였으며, 주유소 배출(7.8%)이 일부를 차지하였다.

대기오염물질 배출 저감 정책 관점에서는 인구가 높은 행정구역의 VOCs와 SOA 저감을 우선적으로 고려할 필요가 있다. 인구밀도는 산업단지를 제외한 남구와 동구지역, 중구지역, 산업단지 근처 일부 북구 지역에서 높았다(그림 2a). 울산시 점·선·면오염원의 지역별 VOCs 배출량은 산업단지에서 가장 많았으며, 주거지역에서는 인구밀도가 높은 지역에서 배출량이 많았다(그림 2b). 또한, 점오염원 배출량은 면오염원 배출량보다 2.0배 많았고, 선오염원 배출량보다 42.9배 많았다. 점오염원 배출량(56,707 tonne/y) 중 남구와 울주군에서의 배출량이 각각 65.5%와 34.0%를 차지하였고, 대부분 석유화학단지과 비철금속단지에서 배출되었다(그림 2c). 면오염원 배출량(38,525 tonne/y)은 남구, 동구, 북구가 각각 36.7%, 28.3%, 21.2%를 차지하여 점오염원과 면오염원의 주요 배출지역이 상이하였다. 점·면오염원 배출량의 경우, 남구가 54%로 높았고 다음으로 울주군 24%, 동구 12%, 북구 9% 순

이었다. 이러한 배출량의 지리적 차이는 지역별 산업 구조에 기인하므로 배출 저감 방안 수립에 반영할 수 있다. 예를 들어, VOCs 배출량을 지역별로 줄인다면, 해당 지역의 주요 중분류 배출원을 파악하여 배출량 저감 방안을 수립해야 한다.

2019년 PRTR 자료를 바탕으로 울산시 사업장에서 배출되는 주요 VOCs의 대기배출량을 정리하였다. 주요 VOCs 중 m,p,o-xylenes의 배출량이 가장 많았으며(5,245 tonne/y, 72.9%), ethylbenzene(1,255 tonne/y, 17.5%), toluene(292 tonne/y, 4.1%), propylene(214 tonne/y, 3.0%) 순으로 배출량이 많았다. 그러나 PRTR의 울산시 사업장 주요 VOCs 대기배출량(7,190 tonne/y)은 CAPSS 자료의 TVOCs 대기배출량(89,002 tonne/y)의 8.1%였으며, 점·면오염원 VOCs 대기배출량(87,636 tonne/y)의 8.2%였다. 이러한 차이는 PRTR과 CAPSS의 대기배출량 산정방법과 대상이 완전히 다르기 때문이다. 그러므로 두 자료를 직접적으로 비교하기는 어렵다. 다만, 사업장별 TVOCs 배출량만을 보고하는 CAPSS와는 달리, PRTR 자료를 활용하면 VOCs 물질별 배출정보에 기초한 저감정책 수립이 가능할 것이다. 구·군별 주요 VOCs의 대기배출량의 경

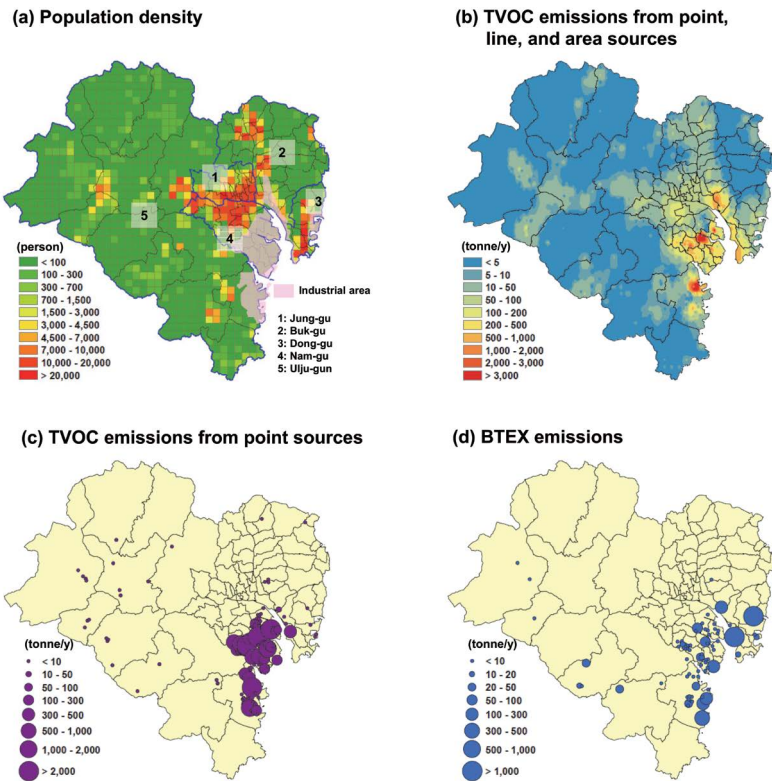


Fig. 2. Spatial distributions of (a) population density and industrial areas, (b) TVOC emissions from point, line, and area sources, (c) TVOC emissions from point sources, and (d) BTEX emissions from industrial facilities in Ulsan.

우, 동구의 배출량이 가장 많았다(전체 배출량의 75.6%) (그림 2d). 이는 선박 제조 등에 사용되는 m,p,o-xylenes과 ethylbenzene의 배출량이 많기 때문이다. 다음으로 울주군과 남구가 각각 총 배출량의 10.9%와 10.1%를 차지하였다. 동구, 울주군, 북구에서는 m,p,o-xylenes의 배출이 다른 물질에 비하여 월등히 많았고(각각 76.9%, 77.6%, 73.9%), ethylbenzene(각각 20.8%, 5.9%, 11.0%)과 toluene(각각 1.9%, 13.1%, 15.4%)의 배출이 그 뒤를 따랐다. 남구에서는 석유화학산업과 관련하여 m,p,o-xylenes과 propylene의 배출 비중(각각 38.0% 및 28.0%)이 다른 물질에 비하여 상대적으로 높았고, n-hexane을 비롯한 다양한 물질의 배출이 그 뒤를 따랐다. m,p,o-xylenes과 ethylbenzene이 울산시 전체 VOCs 배출량의 72.5%와 17.9%로 매우 큰 비중을 차지하였고, 주로 동구에서 배출되었다.

Toluene 배출량은 동구와 울주군에서 각각 36.0%와 35.4%를 차지하였고, m,p,o-xylenes과 ethylbenzene 배출량에 비하여 북구와 남구의 배출도 상대적으로 높은 비중을 차지하였다. Benzene 배출량은 석유화학산업과 관련이 높은 남구에서 81.8%를 차지하였다. 이와 같이, BTEX 배출량은 PRTR 전체 VOCs 배출량의 대부분(95.4%)을 차지하였다. 이러한 지역별·물질별 배출량 자료를 분석한 결과, 울산시에서 VOCs 배출과 SOA 생성을 저감하기 위해서는 BTEX 또는 방향족 VOCs의 배출 저감에 집중해야 한다. 업종별로는 1종 사업장이 전체 배출량의 93.4%를 차지하였고, 2종 사업장은 4.6%를 차지하였다. 1종과 2종 사업장 PRTR 배출량을 합치면 울산시 전체 VOCs 배출량의 98.0%를 포함하므로, VOCs 배출 저감을 위해서는 대형사업장 위주인 1종 사업장을 주로 고려할 필요가 있다. 반

Table 1. Information on Scenario 1-1 reducing emissions of CAPSS TVOCs by the type of emission sources.

Category	District	Emission (tonne/y)	Contribution (%)	Reduction rate (%)	Scenario applied emission (tonne/y)*
Combustion in the manufacturing industry	Jung-gu	5	0	15	5**
	Nam-gu	35,753	68.8	15	30,381
	Dong-gu	2	0	15	2**
	Buk-gu	1	0	15	1**
	Ulju-gun	16,223	31.2	15	13,799
	Total	51,984	100	15	44,188
Solvent use	Jung-gu	1,077	5.5	20	862
	Nam-gu	2,510	12.7	20	2,008
	Dong-gu	6,229	31.5	20	4,983
	Buk-gu	6,730	34.1	20	5,384
	Ulju-gun	3,209	16.2	20	2,567
	Total	19,755	100	20	15,804
Waste disposal	Jung-gu	0	0	10	0
	Nam-gu	7,151	66.8	10	6,436
	Dong-gu	351	3.3	10	351**
	Buk-gu	0	0	10	0
	Ulju-gun	3,206	29.9	10	2,885
	Total	10,707	100	10	9,672
Energy transport and storage	Jung-gu	36	1.0	10	36**
	Nam-gu	2,065	56.9	10	1,858
	Dong-gu	16	0.4	10	16**
	Buk-gu	34	0.9	10	34**
	Ulju-gun	1,477	40.7	10	1,329
	Total	3,628	100	10	3,273
Total		86,074		15.3	72,937

*Data were rounded up to zero decimal places.

**This scenario was not applied for emission categories in each district with a contribution of less than 5%.

면에 4~5종 사업장의 배출량 정보는 정확성이 상대적으로 낮을 수 있으므로, 추후 4~5종 사업장의 배출에 관한 재평가가 필요하다.

3.2 배출량 자료를 활용한 울산 VOCs 배출 저감 방향 제시

CAPSS 배출량 자료를 바탕으로 울산시 구별 주요 대분류 배출원에 따른 VOCs 배출량 저감 방안(시나리오 1-1)을 제시하였다(표 1). 시나리오에서 제안하는 배출 저감 수치(%)는 현실적인 배출 저감 실행을 고려하여 10~20% 수준으로 설정하였다. 전체 VOCs

배출량의 58.4% (51,984 tonne/y)를 차지하는 생산공정을 고려하면, 남구(68.8%, 35,753 tonne/y)와 울주군(31.2%, 16,223 tonne/y)의 배출을 먼저 줄여야 하며, 배출량이 많은 석유제품산업과 유기화학제품 제조업의 VOCs 배출을 우선적으로 저감해야 한다. 전체 VOCs 배출량의 22.2% (19,755 tonne/y)를 차지하는 유기용제 사용의 경우에는 북구(34.1%, 6,730 tonne/y)와 동구(31.5%, 6,229 tonne/y) 위주로 배출을 줄여야 한다. 북구의 자동차 제조와 동구의 선박 제조가 울산의 주요 VOCs 배출원이었다. 또한, 전체 VOCs 배출량의 12.0% (10,707 tonne/y)를 차지하는 폐기물

처리 중 사업장 폐기물처리와 관련하여 남구(66.8%, 7,151 tonne/y)와 울주군(29.9%, 3,206 tonne/y)의 배출을 우선적으로 줄여야 한다. 마지막으로, 전체 VOCs 배출량의 4.1% (3,628 tonne/y)를 차지하는 정유사 출하기지에서의 에너지 저장 및 수송 배출은 남구(56.9%, 2,065 tonne/y)와 울주군(40.7%, 1,477 tonne/y)에서 줄여야 한다. CAPSS 자료에 근거하여 주요 대분류 배출원별 배출량의 저감 목표를 설정하되, 특정 대분류 배출원에서 중분류 및 소분류 배출원의 기여도와 업종별 배출 특성을 반영하면 행정적인 측면에서 저감 목표 설정이 용이할 수 있다. 이러한 특성을 반영하면, 동일한 양의 VOCs 배출을 저감하더라도 인구밀도가 높은 주거지역에서 VOCs와 SOA 농도를 효과적으로 줄일 수 있다. 시나리오 1-1에서는 생산공정, 유기용제사용, 폐기물처리, 에너지 수송 및 저장에서의 VOCs 배출량을 각각 15, 20, 10, 10% 저감하

여, 총 배출량이 86,074 tonne/y에서 72,937 tonne/y로 15.3% 저감되도록 하였다. 향후, 대분류 배출원별 저감 목표 설정의 합리성을 추가적으로 검토하여 저감 목표를 현실적으로 설정해야 한다. 그러나 CAPSS 자료는 VOCs 개별 물질별 특성이나 성분비에 관한 정보를 제공하지 않으므로, 개별 VOCs의 2차 생성 기여도를 반영할 수 없다. 그러므로 주요 VOCs인 BTEX의 저감 목표는 PRTR 자료를 이용한 시나리오 2-1과 3-1에서 고려하였다. 또한, 시나리오 1-1의 대기 중 농도 저감 효율을 파악하고자, 배출원 종류에 상관없이 일괄적으로 15% 저감한 대조군 시나리오 1-2를 설정하였다.

PRTR 자료의 BTEX (6,856 tonne/y) 배출원과 지역을 고려한 배출량 저감 방안(시나리오 2-1)을 제시하였다(표 2). 면오염원에서 m,p,o-xylenes과 ethylbenzene의 배출이 많았으며, 특히 선박 제조업 배출의 비

Table 2. Information on Scenario 2-1 reducing emissions of PRTR BTEX by areas and compounds.

District	Compound	Emission (kg/y)	Reduction rate (%)	Scenario applied emission (kg/y)*
Nam-gu	Benzene	52	20	42
	Toluene	46	20	37
	Ethylbenzene	53	20	42
	m,p,o-Xylenes	275	20	220
	BTEX	426	20	341
Dong-gu	Benzene	0	20	0
	Toluene	105	20	84
	Ethylbenzene	1,129	10	1,016
	m,p,o-Xylenes	4,181	10	3,763
	BTEX	5,415	10	4,863
Buk-gu	Benzene	0	21	0
	Toluene	38	21	30
	Ethylbenzene	27	20	22
	m,p,o-Xylenes	182	20	146
	BTEX	247	20	198
Ulju-gun	Benzene	12	20	10
	Toluene	103	20	82
	Ethylbenzene	46	20	37
	m,p,o-Xylenes	607	20	486
	BTEX	768	20	615
Total		6,856	12.2	6,017

*Data were rounded up to zero decimal places.

율이 높았다. 그러나 대형 선박 외부 도장작업 또는 도장표면에서의 배출을 줄이는 것은 현실적으로 쉽지 않다. 이를 고려하여 동구에서 m,p,o-xylenes과 ethylbenzene의 배출량을 10% 감소시키고, 그 외 지역에서 BTEX 배출량을 20% 줄이는 시나리오 2-1을 설정하였다. 저감 목표 달성 시 배출량은 6,017 tonne/y로서 12.2% 감소하였다. 이 결과는 동구에서만 배출을 저감하는 것과 큰 차이가 없다. 이는 m,p,o-xylenes과 ethylbenzene 배출량 기여도가 다른 물질에 비하여 높기 때문이다. 이와 같이 산업별 배출특성 등을 고려하여 개별 VOCs의 배출 저감 목표를 달리 설정할 수 있지만, 이 목표가 합리적인지 충분히 검토해야 한다. 시나

리오 1-1과 마찬가지로 지역 및 물질별 배출 저감 효과를 파악하기 위해서 지역 및 물질별로 동일 배출 저감(12.2%)을 가정한 시나리오 2-2를 대조군으로 설정하였다.

PRTR 자료를 이용하여 사업장 규모를 고려한 BTEX 배출량 저감 방안(시나리오 3-1)을 제시하였다(표 3). 1종과 2종 사업장(주로 대형 사업장)의 BTEX 배출량이 각각 전체 배출량의 95.3%와 3.5%를 차지하였다. 그러므로 대형 사업장 위주로 VOCs 배출을 저감하고 소형 사업장의 배출 저감을 고려할 필요가 있다. 시나리오 3에서는 1종과 2종 사업장의 BTEX 배출량을 15% 저감하고, 3종 사업장에서는 10% 저감하는 것을

Table 3. Information on Scenario 3-1 reducing emissions of PRTR BTEX by the type of industrial facilities.

Facility type	Compound	Emission (kg/y)	Reduction rate (%)	Scenario applied emission (kg/y)*
Type 1 facility	Benzene	42	15	36
	Toluene	166	15	141
	Ethylbenzene	1,246	15	1,059
	m,p,o-Xylenes	5,034	15	4,279
	BTEX	6,488	15	5,515
Type 2 facility	Benzene	15	15	13
	Toluene	90	15	77
	Ethylbenzene	2	15	2
	m,p,o-Xylenes	132	15	112
	BTEX	239	15	204
Type 3 facility	Benzene	6	10	5
	Toluene	13	10	12
	Ethylbenzene	3	10	3
	m,p,o-Xylenes	49	10	44
	BTEX	71	10	64
Type 4 facility	Benzene	1	-	1
	Toluene	20	-	20
	Ethylbenzene	3	-	3
	m,p,o-Xylenes	22	-	22
	BTEX	46	-	46
Type 5 facility	Benzene	1	-	1
	Toluene	3	-	3
	Ethylbenzene	0	-	0
	m,p,o-Xylenes	3	-	3
	BTEX	7	-	7
Total		6,851	14.8	5,836

*Data were rounded up to zero decimal places.

목표로 설정하고, 4종과 5종 사업장(주로 소형 사업장)에서는 현재의 배출을 유지한다고 가정하였다. 이 시나리오를 적용하면, VOCs 총 배출량은 14.8% 감소하였다. 그러나 이러한 대형 사업장 위주의 배출 저감은 산업별 배출 특성을 감안하지 못하는 단점이 있으므로, 업종별로 배출량 저감 목표를 별도로 적용하는 것을 고려해야 한다. 시나리오 3-1의 VOCs 농도 저감 효율성을 파악하기 위해, 동일한 배출 저감률(14.8%)을 모든 사업장에 동일하게 적용한 시나리오 3-2를 대조군으로 설정하였다.

3.3 대기확산모델을 이용한 배출량 저감 효과 평가

배출 저감 시나리오별 배출량을 대기확산모델에 입력하여 주거지역의 대기 농도 저감 효과를 평가하였다. 인구밀도가 높은 행정동을 평가대상 주거지역으로 설정하였으며, 산단이 포함된 행정동은 제외하였다. 또한, 울주군은 면적이 넓고 대부분 산지이므로 주거지역 선정에서 제외하였다. 배출원별로 차등 저감을 실시한 시나리오 1-1에서는 울산 모든 지역의 TVOCs 농도가 15.5% 감소하였고, 북구, 남구, 동구, 중구의 주거지역에서는 각각 15.4, 15.6, 15.4, 15.5% 감소하였다. 지역과 배출원을 고려하지 않고 일괄적으로 동일한 양을 저감한 시나리오 1-2에서는 모든 지역의 대기 중 농도가 균일하게 15.0% 감소하였다(표 4). 두 시나리오의 총 배출 저감률은 동일하지만 주요 배출원을 우선적으로 저감한 시나리오 1-1의 농도 저감률이 울산 전역에서 0.5%p 높았다. 구·군별로는 남

구, 중구, 북구, 동구의 주거지역에서 시나리오 1-1의 저감률이 0.5~1%p 높았다(그림 3a). 총 배출 저감률이 동일하지만 시나리오 1-1과 1-2에 따른 농도 차이가 발생한 이유는 지역별로 기상조건과 배출원 위치가 달라서 대기확산 경향이 지역별로 상이하기 때문이다. 한편, 본 연구에서는 배출원별 차등 저감의 상대적인 효과를 평가하는 것이 주요 목적이며 시나리오별 배출 저감 비율은 상황에 따라 조정이 가능하므로, 저감률 0.5~1%p의 절대 수치보다 양의 값이 중요한 의미를 갖는다. 따라서 주거지역의 VOCs 농도 감소 차원에서는 시나리오 1-1이 더 효과적이라고 판단된다. 시나리오 1-1에서는 CAPSS 자료의 TVOCs가 대상이므로 SOAFP 저감률 산정이 불가능하였다.

물질과 지역별로 배출을 차등 저감한 시나리오 2-1에서는 울산 전역에서 BTEX 농도가 13.6% 감소하였고, 일괄적으로 BTEX 배출량을 12.2% 저감한 시나리오 2-2에서는 울산 전역에서 BTEX 농도가 12.7% 감소하였다(표 4). 시나리오 2-1과 2-2 모두 BTEX 배출량을 총 12.2% 저감하지만, 물질과 지역별로 차등 저감을 실시하면(시나리오 2-1), 동구의 일부 지역을 제외하고는 시나리오 2-2보다 모두 더 높은 저감률을 보였다(그림 3a). 북구에서는 -0.5~0.5%p의 저감률 차이를 보여 시나리오 2-1과 2-2의 효과가 거의 차이가 없었으며, 남구와 중구에서는 각각 1~2%p와 2~5%p의 저감률 차이를 보였다. 이와 같이 인구밀도가 높은 남구와 중구에서는 물질과 지역 특성을 고려한 차등 저감 시나리오가 VOCs 농도 감소에 더 효율적이었다.

Table 4. Reduction rates (%) of TVOCs and BTEX of each scenario in the residential areas of Ulsan.

Compound	Scenario	District				
		All areas	Buk-gu*	Nam-gu*	Dong-gu*	Jung-gu*
TVOCs	Scenario 1-1	15.5	15.4	15.6	15.4	15.5
	Scenario 1-2	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
BTEX	Scenario 2-1	13.6	1.2	2.9	15.5	6.4
	Scenario 2-2	12.7	0.9	1.9	15.8	4.1
	Scenario 3-1	13.9	1.3	2.5	16.3	5.5
	Scenario 3-2	14.5	1.5	3.0	16.3	6.8

*Only residential areas in each district were considered.

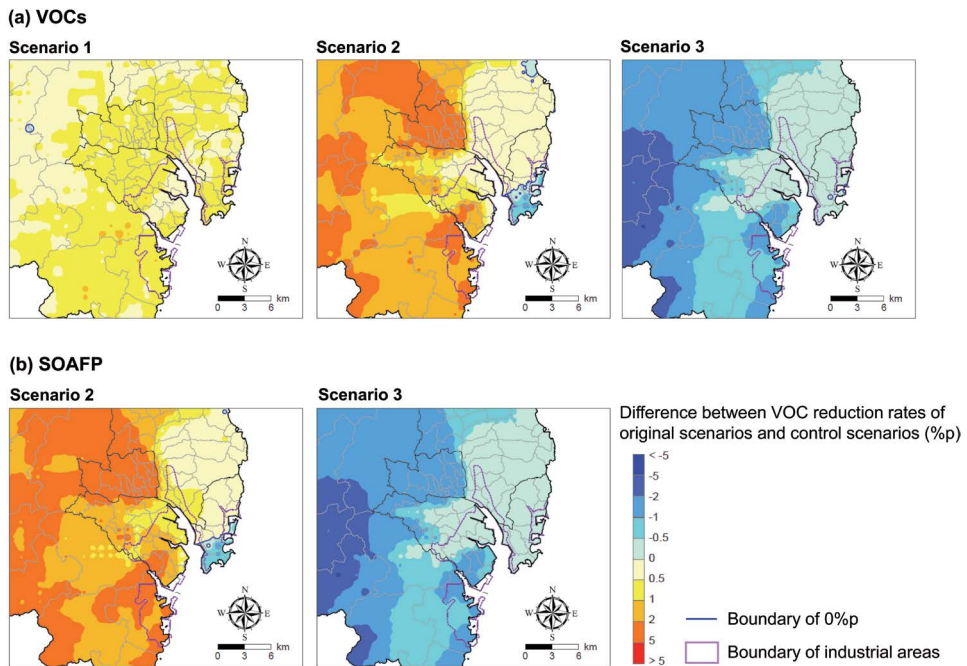


Fig. 3. Spatial distributions of reduction efficiencies for (a) TVOCs and (b) SOAFP in each scenario. The reduction efficiencies were calculated by subtracting the reduction rates of the control scenarios (1-2, 2-2, and 3-2) from those of the original scenarios (1-1, 1-2, and 1-3).

Table 5. Reduction rates (%) of SOAFP of each scenario in the residential areas of Ulsan.

Compound	Scenario	District				
		All areas	Buk-gu*	Nam-gu*	Dong-gu*	Jung-gu*
BTEX	Scenario 2-1	13.8	2.1	3.4	15.7	7.1
	Scenario 2-2	12.7	1.5	2.2	15.8	4.5
	Scenario 3-1	13.9	2.0	2.8	16.4	5.9
	Scenario 3-2	14.5	2.3	3.3	16.4	7.2

*Only residential areas in each district were considered.

또한, 시나리오 2-1의 경우, 물질별(BTEX) 농도가 산정되었기 때문에 SOA 수율 방법을 적용하여 SOAFP를 계산하였으며, 시나리오별 SOAFP 저감률을 표 5에 나타내었다. SOAFP의 경우도 BTEX 농도와 마찬가지로 시나리오 2-1(13.8% 감소)이 시나리오 2-2(12.7% 감소)보다 높은 저감률을 보였으며, 주거지역에서도 더 높은 저감률을 보였다. 동구 일부 지역을 제외한 전 지역에서 시나리오 2-1이 더 높은 저감률을 보였고,

BTEX 농도보다 SOAFP는 북구 일부지역에서 더 높은 저감률인 0.5~1%p의 저감률 차이를 보였다(그림 3b). 남구와 중구에서는 각각 1~2%p와 2~5%p의 저감률 차이를 보였으며, 2차 미세먼지 생성 저감을 위해서도 물질과 지역 특성을 고려한 VOCs 배출 저감 시나리오를 마련할 필요가 있다.

사업장별 BTEX 배출량 저감을 가정한 시나리오 3-1에서는 시나리오 2-1과 달리 울산 전역의 BTEX 농도

가 13.9% 감소하였고, 모든 지역에서 동일하게 BTEX 배출량을 14.8% 저감한 시나리오 3-2에서는 울산 전역의 BTEX 농도가 14.5% 감소하였다(표 4). 주거지역별 로도 시나리오 3-1이 시나리오 3-2에 비해 BTEX 농도가 적게 감소하였다. 시나리오 3-1과 3-2의 BTEX 농도 저감률 차이는 동구와 북구에서 $-0.5\sim 0.5\%$ 로 작았지만, 남구 일부지역과 중구의 주거지역에서는 $-2\sim -1\%$ 저감률 차이를 보였다(그림 3a). 시나리오 2와 달리, 종별 사업장을 고려하여 VOCs 저감을 실시하면 VOCs 농도 저감 효과가 다소 감소할 것으로 예상된다. 그러나 현실적으로는 대형 사업장 위주로 배출 저감을 실시할 수 있을 것이다. SOAFP의 경우도 BTEX 농도와 마찬가지로 시나리오 3-1(13.9% 감소)이 시나리오 3-2(14.5% 감소)보다 낮은 저감률을 보였으며, 주거지역에서도 더 낮은 저감률을 보였다(표 5). 동구와 북구에서는 시나리오별 저감률 차이가 없었으며, 남구 일부 지역과 중구에서 시나리오 3-1의 SOAFP 저감률이 $1\sim 2\%$ 정도 낮았다(그림 3b). 시나리오 3-1의 PRTR 사업장별 저감은 대형 사업장인 1, 2종 사업장의 배출을 우선 저감하는 현실적인 방안이지만, VOCs 농도와 SOAFP의 저감률은 시나리오 3-2에 비해 다소 낮았다.

세 저감 시나리오(1-1, 2-1, 3-1)에 따른 농도 감소율을 비교하였다. 시나리오 1-1에서는 VOCs 배출량을 15.3% 저감하면 농도(울산 전체)가 15.5% 감소하고, 시나리오 2-1에서는 배출량을 12.2% 저감하면 농도(울산 전체)가 13.6% 감소하고, 시나리오 3-1에서는 배출량을 14.8% 저감하면 농도(울산 전체)는 13.9% 감소하였다. 단위 배출량당 감소율 기준으로는 시나리오 2-1이 대기 중 VOCs 농도 저감에 가장 효과적이었다. 시나리오 1-1과 2-1은 각 대조군(시나리오 1-2와 2-2)에 비해 더 큰 농도 저감 효과를 보였고, 시나리오 3-1은 대조군(시나리오 3-2)보다 더 작은 농도 저감 효과를 나타냈다. 이를 종합하면, 물질과 지역을 고려한 BTEX 배출 저감이 사업장 위주의 저감보다 VOCs와 SOA 농도 감소에 더 효과적이다.

4. 결 론

본 연구에서는 울산의 VOCs 대기배출 특성을 파악하고, 사업장 VOCs 배출 저감을 위한 방안을 검토하였다. 배출 저감 시나리오를 제안하고 그 효과를 평가함으로써 VOCs와 미세먼지 농도 저감을 위한 기초자료를 제공하였다. CAPSS 자료를 이용하여 지역 및 산업별 VOCs 배출 저감 시나리오를 작성하고, PRTR 자료를 분석하여 지역 및 사업장별 VOCs 물질별 배출 저감 시나리오를 제시하여 VOCs 농도와 2차 생성 미세먼지의 저감 효율을 평가하였다. 울산에서는 생산공정(58.4%), 유기용제사용(22.2%), 폐기물처리(12.0%)가 주요 배출원이며, m,p,o-xylenes(72.9%), ethylbenzene(17.5%), toluene(4.1%)의 배출량이 가장 많았다. 산업단지를 제외한 남구, 동구, 중구, 산업단지 인근 북구의 주거지역에서 VOCs 배출량이 많고 인구밀도가 높으므로, 배출원과 지역 특성을 고려하여 저감 방향을 제시해야 한다. 이러한 배출 특성과 현실적인 사항을 고려하여 유기용제사용(20%), 생산공정(15%), 폐기물처리 및 에너지수송(10%) 부문별로 배출량을 저감하는 시나리오 1-1을 제시하였다. 이 시나리오는 지역과 배출원을 고려하지 않고 일괄적으로 동일한 양을 저감한 대조군 시나리오 1-2보다 VOCs 농도 저감률이 높았다. 동구에서는 m,p,o-xylenes과 ethylbenzene 배출을 각각 10% 저감하고 그 외 지역에서는 BTEX 배출을 20% 줄이는 시나리오 2-1은 울산 전역에서 동일 배출 저감을 가정한 시나리오 2-2보다 BTEX 및 SOAFP 저감률이 높았다. 마지막으로 BTEX 배출량을 1종과 2종 사업장에서 각각 15%와 3종 사업장에서 10%를 우선적으로 줄이는 시나리오 3-1을 설정하였으며, 대조군 시나리오 3-2보다 BTEX 및 SOAFP 저감률이 낮았다.

배출 저감 시나리오에 따른 VOCs 농도와 2차 생성 미세먼지 저감 결과를 종합하면, 울산에서 가장 많이 사용되는 유기용제에서 배출되는 VOCs를 우선 저감하고, 야외작업 특성상 배출량 저감이 어려운 동구의 xylenes와 ethylbenzene보다 그 외 지역에서의 BTEX

를 우선적으로 저감하는 것이 대기 중 VOCs 농도 저감과 2차 미세먼지 생성 저감에 가장 효과적이었다. 대형 사업장 배출을 우선 저감하는 방안이 현실적이지만, 이에 따른 농도 저감 효율은 배출원과 지역 특성을 고려한 저감 방안의 농도 저감 효율보다 낮았다. 개별사업장 또는 배출원별 CAPSS와 PRTR 배출량에는 큰 차이가 있기 때문에, 추후 VOCs 모니터링 자료와 배출량 정보를 종합적으로 고려하여, 우선 순위 저감대상 VOCs를 정하고, 개별 사업장의 배출량 저감 목표를 설정할 수 있다. 이를 통해 울산지역 맞춤형 VOCs 저감 및 관리 방안을 마련할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원 연구용역사업 (NIER-2021-03-03-001)의 지원을 받았습니다.

References

- Choi, D.S., Youn, J.-S., Lee, I.H., Choi, B.J., Jeon, K.-J. (2021a) Considering condensable particulate matter emissions improves the accuracy of air quality modeling for environmental impact assessment, *Sustainability*, 13, 4470.
- Choi, S.-w., Bae, C.-h., Kim, H.-c., Kim, T., Lee, H.-k., Song, S.-j., Jang, J.-p., Lee, K.-b., Choi, S.-a., Lee, H.-j. (2021b) Analysis of the national airpollutant emissions inventory (CAPSS 2017) data and assessment of emissions based on air quality modeling in the Republic of Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 15, 114-141.
- Derwent, R.G., Jenkin, M.E., Utembe, S.R., Shallcross, D.E., Murrells, T.P., Passant, N.R. (2010) Secondary organic aerosol formation from a large number of reactive man-made organic compounds, *Science of The Total Environment*, 408, 3374-3381.
- Dresser, A.L., Huizer, R.D. (2011) CALPUFF and AERMOD model validation study in the near field: Martins Creek revisited, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 61, 647-659.
- Gilliam, R.C., Huber, A.H., Raman, S. (2005) Metropolitan-scale transport and dispersion from the New York World Trade Center following September 11, 2001. Part II: An application of the CALPUFF plume model, *Pure and Applied Geophysics*, 162, 2005-2028.
- Grosjean, D., Seinfeld, J.H. (1989) Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols, *Atmospheric Environment*, 23, 1733-1747.
- Gulia, S., Kumar, A., Khare, M. (2015) Performance evaluation of CALPUFF and AERMOD dispersion models for air quality assessment of an industrial complex, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 74, 302-307.
- Kim, J., Han, B., Baik, J. (2020) Temporal and spatial variations of workday-holiday particulate matter concentration differences in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36, 25-30.
- Lee, C.-B., Kim, J.-C. (2009) Evaluation of the calpuff model using improved meteorological fields in complex terrain of east sea coast, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25, 15-25.
- Lee, G., Park, J.H., Koh, M.S., Lee, M., Han, J.S., Kim, J.C. (2020) Current status and future directions of tropospheric photochemical ozone studies in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36, 419-441.
- Ministry of Environment (MOE) (2016) What is particulate matter? Ministry of Environment.
- Ng, N., Kroll, J., Chan, A., Chhabra, P., Flagan, R., Seinfeld, J. (2007) Secondary organic aerosol formation from m-xylene, toluene, and benzene, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 3909-3922.
- National Institute of Chemical Safety (NICS) (2022) Pollutant release and transfer register. National Institute of Chemical Safety. <https://icis.me.go.kr/prtr/main.do>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2012) A planning study on the improvement of VOC emission factor for atmospheric emission sources. National Institute of Environmental Research.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016) Improvement study on estimation method of emission factor for small-scale VOCs emission facilities. National Institute of Environmental Research.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2020) 2017 National air pollutants emission. National Institute of Environmental Research.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2022) 2019 National air pollutants emission. National Institute of Environmental Research.
- Pandis, S.N., Harley, R.A., Cass, G.R., Seinfeld, J.H. (1992) Secondary organic aerosol formation and transport, *Atmo-*

spheric Environment, 26, 2269-2282.

- Park, M., Kim, S., Song, S., Kwon, H., Choi, S. (2019) Size distributions of airborne particulate matter associated ions and their pollution sources in Ulsan, Journal of the Korea Society For Environmental Analysis, 22, 1-9.
- Scire, J.S., Strimaitis, D.G., Yamartino, R.J. (2000) A user's guide for the CALPUFF dispersion model. Earth Tech, Inc.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1995) A user's guide for the CALPUFF dispersion model. US EPA 1995 U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2022a) Hazardous air pollutants. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/haps>
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2022b) Support center for regulatory atmospheric modeling (SCRAM). U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/scram>

Authors Information

- 이상진 (울산과학기술원 도시환경공학과 박사과정)
(lsjin1347@unist.ac.kr)
- 이병규 (울산대학교 건설환경공학부 교수)
(bkleee@ulsan.ac.kr)
- 김성준 (울산과학기술원 도시환경공학과 박사후연구원)
(kimsj88@unist.ac.kr)
- 김대곤 (국립환경과학원 대기환경연구과 환경연구관)
(nierkdg@korea.kr)
- 이그림 (국립환경과학원 대기환경연구과 환경연구사)
(greemlee@korea.kr)
- 강현정 (국립환경과학원 대기환경연구과 전문위원)
(humble@korea.kr)
- 김효선 (국립환경과학원 대기환경연구과 전문위원)
(hskim127@korea.kr)
- 박대용 (국립환경과학원 대기환경연구과 전문위원)
(dypark0228@korea.kr)
- 최성득 (울산과학기술원 도시환경공학과 교수)
(sdchoi@unist.ac.kr)