

논문

실시간질량분석장치 (SIFT-MS) 장착 이동측정시스템에 의한 산업단지 유해대기오염물질 오염도 측정 연구

Measurement of Hazardous Air Pollutants in Industrial Complex Using Mobile Measurement System with SIFT-MS

윤승진, 조강희, 김형석, 송건범, 이승복¹⁾, 정주영*

한국환경공단 기후대기본부 대기환경처, ¹⁾한국과학기술연구원 환경복지연구소

Seung-Jin Youn, Kang-Hee Jo, Hyung-Suk Kim, Gun-Bum Song, Seung-Bok Lee¹⁾, Ju-Young Jeong*

Department of Atmospheric Environment, Korea Environment Corporation, Incheon, Republic of Korea

¹⁾Center for Environment, Health and Welfare Research, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Republic of Korea

접수일 2020년 5월 29일
수정일 2020년 7월 28일
채택일 2020년 8월 10일

Received 29 May 2020
Revised 28 July 2020
Accepted 10 August 2020

*Corresponding author
Tel: +82-(0)32-590-4675
E-mail: jyjeong001@keco.or.kr

Abstract In this paper, we describe the application of a mobile measurement system with SIFT-MS for measuring gaseous hazardous air pollutants (HAPs) concentrations in the ambient air of an industrial complex. Both stationary and mobile monitoring methods were tested to evaluate the HAPs. The field monitoring campaign was conducted for 7 days in the selected industrial complex, where petroleum manufacturing facilities were located. It was found that the accuracy of SIFT-MS quantification was improved by correcting the reaction rate constant (k-factor) through standard gas testing. In stationary monitoring, methanol showed the highest concentrations regardless of the measuring sites. It is notable that the concentration of some pollutants such as methanol and C₂-benzene increased considerably to several hundred ppbv at a certain time, indicating that people living in the industrial complex may be exposed to a high health risk. It was possible to estimate the emission source by analyzing real-time monitoring results and wind direction and speed. Methanol showed the highest concentrations also in the mobile measurements, indicating that methanol is widely emitted in this area. The mobile measurements together with HAPs pollution mapping were used to investigate the spatial distribution of a number of pollutants concentrations. We believe that this measurement system using SIFT-MS is a useful tool for evaluating the temporal and spatial concentrations of HAPs in the ambient air of the vicinity of industrial complexes instead of conventional analysis techniques such as gas chromatography.

Key words: HAPs, SIFT-MS, Mobile monitoring, Stationary monitoring, Industrial complex

1. 서론

우리나라 국가산업단지에는 원유정제 시설과 합성 고무·합성수지·플라스틱 등의 석유계 화학물질 제조 사업장이 다수 밀집되어 있다. 이들 사업장에서는 인체에 유해한 대기오염물질 (Hazardous Air Pollutants; HAPs)이 다량 취급되고 있어, 관리 소홀로 대기

중으로 비산되면 인근 주민의 건강에 단·장기적으로 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 산업단지와 주변 지역에서 대기 중 HAPs 모니터링을 통한 감시가 매우 중요한 이슈가 되고 있다. 환경부와 국립환경과학원에서는 특정대기유해물질 저감대책에 대한 중장기 계획을 수립하였고, 시화·반월 (MOE, 2008)을 시작으로 연차별로 대규모 국가산업단지에 대해 HAPs 모

니터링 사업을 진행하여 현재까지 총 10개 단지에 대해 조사하였다. 이 조사는 산업단지 주요지점과 인근 도시지역에서 휘발성유기화합물(VOCs), 카보닐화합물, 다환방향족탄화수소(PAH) 및 중금속 농도의 주간(7일) 및 계절별 변화 특성을 종합적으로 평가한 연구사례로서, HAPs 정책수립에 중요한 정보를 제공한 것으로 평가되고 있다(Baek and Jeon, 2013). 다만, 한 개 산업단지에 대한 연구비용이 매우 많고, 분석 시간도 오래 걸리기 때문에 조사 주기가 10년 이상 길어져 사실상 사후조사가 이루어지지 않은 채 단발성 연구에 그치고 있다. 측정지점과 횡수도 제한되어, 1일 4회 정도의 시료 채취만이 이루어져 산업단지 HAPs 오염도를 효율적으로 조사하는 데 한계가 있었던 것으로 평가되고 있다. 한편, 2009년부터는 한국환경공단에서 산업단지 포함 전국 31개 지점에서 유해대기측정망을 구축·운영하고 있으며, HAPs 물질 중 휘발성유기화합물(VOCs)과 다환방향족탄화수소(PAHs)를 주기적으로 모니터링(수동 2회/월, 자동 12회/일)하고 있다(KECO, 2016).

현재 가스상 HAPs 물질의 측정방법으로는 가스크로마토그래피(GC)법이 재현성과 정확성이 높기 때문에 주로 활용되고 있다. 그러나 on-line GC의 경우, 저농도 물질 측정을 위해서는 농축/열탈착 등의 복잡한 전처리 과정과 장비가 필요하고, 1회 분석에 1시간 이상의 장시간이 소요되며(Krol *et al.*, 2010; Kumar and Viden, 2007), 또한 진동 등에 취약하여 차량 탑재가 어려워 고정된 지점에서만 사용되는 등의 단점이 있다. 따라서 시·공간적으로 실시간 변화가 큰 산업단지 대기 중에서 HAPs 농도 거동 특성을 신속하고 정확히 반영하기에는 한계가 있으므로 이를 대체할 새로운 분석기술에 대한 도입 요구가 커지고 있다.

최근 기존 GC법의 단점을 극복한 기술로 화학적 이온화(CI, Chemical Ionization) 방법을 적용한 실시간 질량분석장치가 개발되어 활용되고 있다(Son *et al.*, 2018; Lourenco *et al.*, 2017; Yacovitch *et al.*, 2015). Lourenco *et al.* (2017)은 실시간 분석장치인 Proton

Transfer Reaction Mass spectrometry (PTR-MS) 및 Selective Ion Flow Tube Mass Spectrometry (SIFT-MS)의 분석 정확성을 평가하기 위해 TD-GC-MS와 비교실험을 수행하였다. 그 결과 Acetaldehyde 등 6개 표준물질에 대한 오차가 SIFT-MS $\pm 20\%$, PTR-MS $\pm 50\%$, TC-GC-MS 20% 수준으로 SIFT-MS의 경우 기존 GC법과 동일한 수준의 정확성을 보이는 것으로 보고하였다. 더욱이 H_3O^+ 이온과 VOCs의 최적의 반응속도 상수를 적용할 경우 표준오차를 더 감소시켜 보다 정확한 측정이 가능하다고 보고하고 있다. 이러한 SIFT-MS, PTR-MS 등은 별도의 전처리 장치가 필요 없이 실시간 연속 분석이 가능하므로 차량에 설치하여 측정하는 이동측정(Mobile monitoring)에 적용되고 있다. Yacovitch *et al.* (2015)와 Olagurer (2015)는 산업단지에서 HAPs 위해도 평가에 필요한 노출량을 평가하기 위해 PTR-MS 탑재 차량을 이용한 이동측정 방법으로 1,3-butadiene, Benzene 농도를 측정하였다. 이 연구에서는 수집된 데이터의 통계처리를 위해 2차원 히스토그램 접근법을 적용함으로써 공간-지리학적으로 평균화하는 방법에 대해 보고하였다. Son *et al.* (2018)은 SIFT-MS 탑재 차량을 현장에 이동시켜 실시간 연속 측정하는 연구를 진행하였으며, 그 결과 총 60종의 VOCs에 대해 시간적으로 해상도가 높은(수십 초 이내) 측정자료의 생산이 가능하다고 보고하였다. Ryu *et al.* (2019)은 도심 산단 지역의 대기오염원 추적을 위해 SIFT-MS를 탑재한 실시간 이동형 감시시스템과 드론을 활용하는 연구를 수행한 바 있고, Yu *et al.* (2019)은 염색산업단지에서 SIFT-MS를 이용하여 대기오염 및 악취물질의 농도를 조사한 결과를 보고하였다. 이와 같이 실시간 질량분석 장치는 차량에 탑재하여 원하는 지역에 빠르게 이동 후 장시간 측정할 수 있는 장점이 있다. 다만, 현재까지 수행된 연구들은 HAPs 농도 측정에 실시간질량분석장치 적용을 시도한 초기 단계의 연구로, 대기 중의 거동특성을 규명하기 위한 구체적인 적용방법에 대한 제시가 아직 미흡한 것으로 생각된다.

한편, 최근에는 도시 및 산업단지에서 대기오염물질 오염도를 평가하기 위해 이동측정차량을 이용한 이동측정(Mobile monitoring) 방법이 활발히 적용되고 있다(Bossche *et al.*, 2016; Olaguer *et al.*, 2016; Bae and Lee, 2013; Dreniwick *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2009). Bae and Lee (2013)는 이동측정차량을 활용하면 넓은 지역에서 자동차에 의한 대기오염 영향을 신속히 감시할 수 있고, 또한 유해화학물질의 노출 사고 발생 시 확산경로 추적에 유용하게 사용될 수 있다고 보고하고 있다. 중국에서는 2008년 베이징 올림픽 기간 중 NO_x, CO, BTEX, PM 등의 대기오염물질 측정이 가능한 이동측정 차량을 이용해 도시 대기 중의 대기오염도 변화를 조사함으로써 정부의 오염물질 저감정책의 시행 효과를 평가하는 데 활용한 사례가 보고되고 있다(Wang *et al.*, 2009). Dreniwick *et al.* (2012)은 실시간 질량분석기를 설치한 이동측정 장비를 활용하여 오염된 지역에서 고정측정 및 이동측정을 실시하여 얻어진 데이터를 효과적으로 통계처리하는 기법을 제공함으로써 효과적인 활용방안에 대해 보고하였다.

본 연구에서는 SIFT-MS를 차량에 탑재한 이동측정시스템을 활용하여 국내 대표적인 국가 산업단지를 대상으로 대기 중 HAPs 거동 특성 연구 사례를 제시하고, 효과적인 활용방안에 대해 논하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 SIFT-MS 개요

SIFT-MS (VOICE200 ultra, Syft technologies. Co. Ltd.)는 기체상 오염물질을 화학적으로 이온화시켜 이온성 오염물질의 질량과 강도를 분석하여 정량·정성하는 장비로, 수습 중의 가스상 물질을 단시간에 분석할 수 있다(Son *et al.*, 2018). SIFT-MS에서는 검량선을 이용하는 상대정량법이 아닌 이온화된 물질의 분자수를 개별 측정하여 (식 1)에 의해 직접 반응물의 농도를 산출하는 절대정량법을 이용한다.

Table 1. Analytical conditions of SIFT-MS.

Sampling and analytical conditions of SIFT-MS	
Sampling line temperature	120°C
Inlet pipe temperature	120°C
Upstream pressure	1.60 × 10 ⁻⁴ Torr
Flow tube pressure	140~150 Torr
Flow tube temperature	120°C
Downstream pressure	1.00 × 10 ⁻⁶ Torr
Source pressure	420.9 Torr

$$[A] = \frac{[P^+] \cdot ICF_P}{k \cdot [R^+] \cdot ICF_R} \quad (1)$$

여기서, [A]는 반응물 농도, [P⁺]는 생성이온 농도, [R⁺]는 반응이온(H₃O⁺, NO⁺, O₂⁺) 농도, k는 반응속도 상수, ICF_P와 ICF_R는 기기보정 계수이다.

반응속도 상수(k-factor)는 생성이온과 반응이온이 단위시간 내에 반응하는 속도이며, 이 값에 의해 반응물의 정량 결과가 달라질 수 있는데, SIFT-MS 제조사에서 기본 값을 제공하고 있다. 표 1은 본 연구에서 적용된 SIFT-MS의 기본적인 분석조건을 나타낸 것이다.

2.2 이동측정시스템 구성

그림 1은 본 연구에서 사용한 SIFT-MS 장착 이동측정시스템을 나타낸 것이다. 시료 도입구는 차량 운전석 상부에 있으며, 지상에서 약 3 m 높이로 빗물 유입을 방지할 수 있는 백엽상 구조로 제작되었다. 대기 시료는 차량 내부에 설치된 흡인펌프를 통해 SIFT-MS까지 이송되고, 시료 도입구의 T자형 커넥터를 통해 이송된 시료 중 일부(25 mL/min)가 SIFT-MS로 도입된다. 시료 이송관은 테플론 재질로, 길이는 약 3 m이며, 이송과정 중 관내 흡착에 의한 손실을 최소화하기 위해 180°C까지 가열이 가능하도록 열선을 설치하였다. 기상측정을 위해서 Weather station 장치(Vantage pro2™, Davis Ins.)를 차량 상부에 설치하였다. 도로 주행 시 실시간 위치정보 확인을 위해 GPS 수신기(GPS631A, Ascen Co.Ltd.)를 그림 1(d)에 나타낸 바와 같이 차량 전면 유리에 설치하였다.

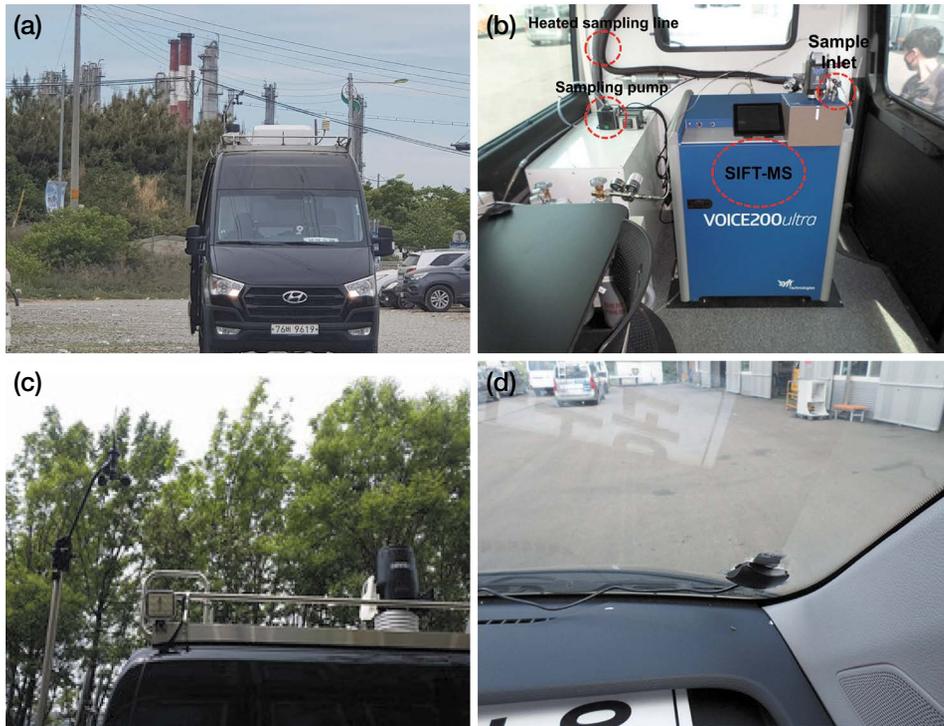


Fig. 1. Mobile monitoring system used in this study: (a) Outside view, (b) SIFT-MS with sampling devices, (c) Weather measurement device, (d) GPS view installed in front glass.

2.3 SIFT-MS 정도관리

SIFT-MS에 대기 시료 대신 고순도 공기를 주입했을 때 측정되는 오염물질의 농도 즉, 바탕(Blank)농도를 조사하였다. 시험을 위해 대기 시료 측정 시와 동일 분석조건에서 시료 도입관에 고순도 공기(Purity 99.999%, Rigas Co. Ltd.)를 주입하였다. 또한 SIFT-MS를 켜다가 재기동할 때마다 총 5회에 걸쳐 바탕농도 변화를 조사하였다. 조사항목은 총 25종의 HAPs 물질이며, 이때 SIFT-MS의 1회 스캔(scan)시간은 약 21초로, 총 5분간 스캔을 통해 얻어진 측정데이터의 평균값을 취하여 한 개의 5분 데이터를 수집하였다. 시험은 약 30분간 실시하여 총 6개의 5분 평균데이터를 수집 후 최종농도를 산출하였다. SIFT-MS 측정농도의 검출한계(LOD; Limit Of Detection)는 바탕농도 측정값 표준편차의 3배에 해당하는 농도로서, 총 5회의 바탕농도 시험에서 얻어진 각각의 LOD 값을

평균하여 제시하였다.

기저 농도의 TO-15A 표준가스(100 ppbv, Supelco Co. Ltd.)를 이용하여 SIFT-MS 기준 k-factor 적용에 의한 정량결과와 비교시험을 실시하였다. 시험 후 표준농도 대비 실측농도의 오차량만큼 k-factor 값을 보정하였고, 보정된 k-factor 값을 적용하여 동일 시험을 반복하였다.

2.4 산업단지 대기 중 HAPs 오염도 측정

2.4.1 조사대상 및 측정지점

조사대상지는 온산 국가산업단지, 원유정제 등 다수의 석유화학물질 제조시설과 함께 비철금속(제련소 등) 업종이 혼재된 국내 대표적 산업단지이다. 우선 고정된 지점에서의 연속 측정을 위해 산업단지 내부의 3개 지점을 선정하였다. 측정지점은 자동차



Fig. 2. Stationary monitoring sites and mobile monitoring routes.

배기가스의 영향을 최소화하기 위해 도로에서 최소 10m 이상 이격된 곳으로 선정하였다. 고정측정 시에는 차량 발전기 배기가스의 영향을 배제하기 위해 전기 공급을 통해 SIFT-MS 장비를 구동하였다. 이동측정 시에는 발전기를 사용하였으나, 발전기 배기가가 차량 후방에 있어 측정 중에는 시료 도입구와 반대방향으로 토출되므로 배기가스 유입은 경미할 것으로 판단되었다. 한편, 전방 주행 중인 자동차 배기가스의 영향을 확인하기 위해 HAPs 고정발생원이 없는 지역의 자동차 전용도로에서 장시간 이동측정을 실시하였다. 그 결과, 본 연구 측정항목에 미치는 영향이 매우 경미한 것으로 확인되어 산업단지 현장측정을 진행하였다.

이동측정 경로는 중복 주행이 최소화되도록 계획하였고, 불가피한 중복구간에서는 시료 분석 일시정지 기능을 적용하였다. 그림 2는 본 연구에서 선정할 측정지점과 이동측정 경로를 나타낸 것이다.

2.4.2 측정일정

측정은 2018년 2월 20일(월)부터 2월 28일(화)까지 기간 중 7일에 걸쳐 수행되었으며, 이 중 고정지점에서의 측정은 기간 중 3일간, 이동측정은 기간 중 4

일간 진행되었다. 이동측정의 경우 산업단지를 1회 완주하는 데 걸리는 시간은 대략 2시간 정도였다.

2.4.3 측정항목

측정항목은 대기환경보전법에서 비산배출시설 관리대상물질로 관리하고 있는 46종 중 SIFT-MS에서 분석이 가능한 가스상 29종을 대상으로 하였다. 다만, SIFT-MS에서는 일부 이성질체 물질이거나, 본래 분자량이 매우 유사한 물질 및 이온화된 물질의 분자량이 동일한 물질들은 개별 분석되지 않고, 하나의 물질로 분석되는 특징이 있다. 본 측정대상 29종의 항목 중 m,p,o-Xylene과 Ethylbenzene(분자량 106, C_8H_{10} , 이하 C_2 -benzene이라 함), Phenol(분자량 94.11, C_6H_6O)과 Dimethyl disulfide(분자량 94.19, $C_2H_6S_2$), Chloroform(분자량 119.38, $CHCl_3$)과 Dichloromethane(분자량 84.93, CH_2Cl_2), 1,2-Dichloroethane(분자량 98.86, $C_2H_4Cl_2$)과 Chloroethene(분자량 62.49, C_2H_3Cl) 등이 이에 해당되어 실제 정량되는 항목은 총 25종이다. 단, Chloroform+Dichloromethane의 분석 시 Tetrachloroethane도 분리되지 않고 정량되지만, 비산배출시설 관리대상물질이 아니므로 본 연구의 결과에서는 표기를 생략하였다.

Table 2. Summary of pollutant's blank concentration test and LOD with SIFT-MS.

Compounds	Measured blank concentrations (ppbv)					Mean	RSD (%)	LOD (ppbv)
	1 st (n=6)	2 nd (n=6)	3 rd (n=6)	4 th (n=6)	5 th (n=6)			
1 1,2-Dichloroethane + chloroethene	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	25.8	0.16
2 1,3-Butadiene	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	14.1	0.11
3 2-Propanol	0.7	0.6	0.7	0.3	0.5	0.5	34.7	0.22
4 Acetaldehyde	7.4	7.2	9.6	7.3	8.7	8.1	14.6	0.64
5 Acrylonitrile	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	79.7	0.08
6 Aniline	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	21.1	0.11
7 Benzene	1.0	1.0	1.2	0.8	0.7	0.9	17.8	0.40
8 Benzidine	1.8	1.0	0.4	0.5	0.2	0.8	81.2	0.30
9 Butanone	1.0	0.5	0.4	0.4	0.3	0.5	53.0	0.23
10 C ₂ -benzene	1.7	1.9	1.7	2.8	1.3	1.9	28.2	0.65
11 Carbon tetrachloride	0.9	1.0	0.5	0.5	0.3	0.7	38.7	0.28
12 Chloroform + dichloromethane	5.6	2.9	4.1	4.3	2.4	3.9	28.3	0.79
13 Dimethyl disulfide + phenol	0.7	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5	42.4	0.19
14 Ethylene oxide	11.1	10.9	20.0	13.6	24.9	16.1	26.3	3.25
15 Formaldehyde	12.7	10.9	10.8	9.6	8.4	10.5	12.4	0.82
16 Hydrogen cyanide	7.4	7.0	6.5	4.8	6.4	6.4	17.4	0.52
17 Methanol	6.1	5.9	9.3	6.0	5.3	6.5	24.9	0.61
18 Methyl tert-butyl ether	3.9	3.2	5.4	4.9	2.9	4.1	23.8	0.50
19 n-hexane	3.9	2.7	4.5	3.7	2.5	3.5	20.7	1.13
20 Naphthalene	0.9	0.5	1.2	1.7	0.4	0.9	50.1	0.31
21 Propylene oxide	4.7	4.8	7.9	6.3	6.7	6.1	25.1	0.70
22 Styrene	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	24.7	0.11
23 Tetrachloroethylene	1.9	1.1	0.5	0.6	0.3	0.9	75.2	0.40
24 Toluene	2.1	1.7	1.5	1.9	1.1	1.6	15.8	0.31
25 Trichloroethylene	0.6	0.6	0.9	1.0	0.5	0.7	27.7	0.48

2.4.4 측정 및 분석방법

고정측정의 경우 선정된 측정지점에 이동측정시스템을 정차시킨 후, 지점별로 약 20시간 이상 연속적으로 측정하였다. 이동측정은 산업단지 도로를 주행 중 대기 시료를 연속 도입하여 분석하는 방법이며, 전체 도로를 1회 이동측정 후 얻어진 측정값을 산술 평균하여 1회 측정농도로 하였다. 측정농도의 정확성을 높이기 위해서는 다수의 데이터가 필요하므로 차량 주행속도를 평균시속 15 km 이하로 서행 운전하였다. 횡단보도 또는 불가피한 사유에 의해 정차 시에는 특정지점 측정값이 다수 발생하여 평균농도에 영향을 줄 수 있으므로 SIFT-MS 분석을 일시 정지하였다.

이동측정 결과는 HAPs 오염지도 작성에 활용되었으며, 이때 주행 중 측정된 실시간 GPS 좌표를 이용

하였다. 오염지도는 전문 데이터 분석 프로그램인 OriginPro (ver. 9.0.0, Originlab Co.Ltd.) 프로그램을 사용하였고, 측정농도는 구간별로 표시색을 달리하여 점으로 표시하였다. 측정농도는 SIFT-MS 1회 분석시간(시간적 해상도)과 주행속도에 따라 이동한 거리마다 지도에 표시된다. 즉, 본 연구의 시간적 해상도는 21초이고, 주행속도는 평균 15 km/h 정도이므로 약 87.5 m 간격마다 농도가 출력되었다. 오염지도는 주간과 야간에 실시한 측정결과 중 대표적인 1회 결과를 각각 이용하여 작성하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 정도관리

표 2는 고순도 공기에 의해 측정된 SIFT-MS 바탕

Table 3. Summary of pollutant's concentrations measured before and after k-factor correction.

Compounds	Standard conc. (ppbv)	Before k-factor correction			After k-factor correction		
		Conc. (ppbv)	Error (%)	Raw k-factor	Conc. (ppbv)	Error (%)	Corrected k-factor
1 1,2-dichloroethane + chloroethene	220	154	30.0	H ₃ O + 2.6E-9	225	2.3	H ₃ O + 1.7E-9
2 1,3-butadiene	120	97	19.2	NO + 2.0E-9 O ₂ + 2.0E-9	125	4.2	NO + 1.6E-9 O ₂ + 1.6E-9
3 2-propanol	100	88	12.0	NO + 2.4E-9	101	1.0	NO + 2.1E-9
4 Benzene	110	111	0.9	NO + 1.5E-9	111	0.9	NO + 1.5E-9
5 Butanone	100	105	5.0	NO + 2.2E-9 O ₂ + 3.3E-9	105	5.0	NO + 2.2E-9 O ₂ + 3.3E-9
6 C ₂ -benzene	440	467	6.1	H ₃ O + 2.35E-9 NO + 1.95E-9	457	3.9	H ₃ O + 2.4E-9 NO + 2.0E-9
7 Carbon tetrachloride	110	139	26.4	O ₂ + 1.0E-9	107	2.7	O ₂ + 1.3E-9
8 Chloroform + Dichloromethane + Tetrachloroethane	340	265	22.1	O ₂ + 1.5E-9	346	1.8	O ₂ + 1.2E-9
9 Methyl tert-butyl ether	110	93	15.5	NO + 2.4E-9 O ₂ + 2.5E-9	111	0.9	NO + 2.0E-9 O ₂ + 2.1E-9
10 Naphthalene	120	74	38.3	H ₃ O + 1.8E-9 NO + 1.8E-9 O ₂ + 1.8E-9	122	1.7	H ₃ O + 1.3E-9 NO + 1.3E-9 O ₂ + 1.3E-9
11 N-hexane	110	85	22.7	O ₂ + 1.8E-9	110	0.0	O ₂ + 1.4E-9
12 Styrene	110	98	10.9	NO + 1.7E-9 O ₂ + 1.8E-9	110	0.0	NO + 1.5E-9 O ₂ + 1.6E-9
13 Tetrachloroethylene	110	127	15.5	O ₂ + 1.4E-9	111	0.9	O ₂ + 1.6E-9
14 Toluene	110	89	19.1	H ₃ O + 2.2E-9 O ₂ + 1.8E-9	109	0.9	H ₃ O + 2.0E-9 O ₂ + 1.6E-9
15 Trichloroethylene	110	95	13.6	O ₂ + 1.7E-9	108	1.8	O ₂ + 1.5E-9

농도를 나타낸 것으로, 오염물질별 평균농도가 0.1~16.1 ppbv 범위로 편차가 비교적 큰 것으로 관찰되었다. 1,3-Butadiene, Acrylonitrile, 1,2-Dichloroethane + chloroethene이 0.1 ppbv로 비교적 낮았고, Formaldehyde와 Ethylene oxide은 각각 10.5 ppbv, 16.1 ppbv로 상대적으로 높았다. 바탕농도 반복시험에 따른 상대표준편차(RSD)는 12.4~81.2% 범위로 나타났다. Formaldehyde가 12.4%로 가장 낮았고 Benzidine이 81.2%로 가장 높았는데, 전반적으로 농도가 낮을수록 RSD가 높아지는 경향을 보였다. 이러한 결과는 SIFT-MS 장비 상태에 따라 바탕농도가 변화될 수 있으므로, 주기적으로 조사할 필요성이 있음을 나타낸다. SIFT-MS 바탕농도 발생 원인으로 운반 가스 및 고순도 공기 중에 존재하는 미량 불순물의 영향, 분석장비 내부 부품(o-ring 등)에서 방산되는 불

순물 등이 추정된다. 향후 측정 결과의 정확성과 신뢰성 향상을 위해서는 바탕농도 발생 원인의 규명 및 최소화 대책이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 현장 측정 시작 전에 바탕농도를 측정 후 실측농도에서 바탕농도를 뺀 후 최종농도를 산출하였다. 한편, 검출한 계농도를 살펴보면 Ethylene oxide와 n-Hexane이 각각 3.25 ppbv와 1.13 ppbv로 상대적으로 높았지만, 대부분의 물질은 1 ppbv 미만으로 매우 낮은 농도값을 나타냈다.

표 3은 기지 농도의 표준가스를 이용하여 SIFT-MS의 기존 k-factor 값과 보정된 k-factor 값을 각각 적용했을 때 정량결과를 나타낸 것이다. 보정 전 k-factor에 의한 표준물질 농도 대비 물질별 오차율 범위는 0.9~38.3%로 조사되었다. Benzene이 0.9%로 가장 낮았고, Butanone 5.0%, C₂-benzene 6.1% 순이었으며,

Table 4. Summary of HAPs concentrations measured at each stationary monitoring sites.

	HAPs concentrations (ppbv)						Mean (Site 1~3)	Past measurements
	Site 1		Site 2		Site 3			
	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean	Max.		
1,2-dichloroethane + chloroethene	0.5	6.9	0.7	24.7	0.5	5.3	1.3	0.2
1,3-butadiene	0.2	10.2	0.1	2.2	0.2	1.7	0.2	<0.01
2-propanol	1.0	41.5	3.2	58	1.9	8.3	1.2	-
Acetaldehyde	0.0	1.5	1.8	210.5	0	2.2	0.3	1.4
Acrylonitrile	0.1	1.2	0	0.6	0.0	0.9	0.1	ND
Aniline	0.2	2.2	0.9	8.9	0.3	2.6	0.2	ND
Benzene	0.6	18.3	0.3	4.1	0.3	5.5	0.3	1.25
Benzidine	0.1	3.6	0.1	3.3	0.2	3.4	0.2	-
Butanone (MEK)	1.1	24.6	3	130.6	1.8	13.1	1.4	-
C ₂ -benzene	1.0	7.3	8.8	51	11.9	176.1	6.2	3.97
Carbon tetrachloride	0.3	3.1	0.3	3.4	0.4	3.2	0.9	0.12
Chloroform + dichloromethane	2.9	34.9	5.9	64.3	2.8	23.9	1.8	0.08
Dimethyl disulfide + phenol	0.2	1.6	0.2	1.9	0.2	2	0.3	0.01
Ethylene oxide	0.5	85.3	2.5	315.8	0.7	58.1	1.0	-
Formaldehyde	1.5	23	1.9	20.2	2.5	15.6	7.6	2.6
Hydrogen cyanide	0.0	12.6	0.1	57.8	0	0	0.1	-
Methanol	6.7	67.8	33.1	467.3	18.3	212.3	16.7	
Methyl tert-butyl ether	1.6	45.4	2.1	21.1	3.1	233.2	13.4	0.5
N-hexane	1.7	15.9	1.8	12.4	1.9	18.4	1.4	-
Naphthalene	0.3	3	0.2	2.7	0.2	1.9	0.2	0.3
Propylene oxide	2.1	73.5	4.3	38	2.4	47.4	3.1	-
Styrene	0.0	1.1	0.0	1.3	0.2	9.1	0.2	0.06
Tetrachloroethylene	0.2	2.3	0.2	2.7	0.2	2.6	0.3	0.17
Toluene	0.7	5.2	3.4	31.5	1.0	4.7	0.8	5.3
Trichloroethylene	0.2	3.3	0.2	3.5	0.2	2.7	0.2	0.17

Naphthalene이 38.3%로 오차율이 가장 높았다. 반면 보정된 k-factor를 적용한 시험에서는 대부분 오염물질의 오차가 5% 이내로 나타났다. 이는 SIFT-MS의 k-factor 값의 보정을 통해 측정값의 정확성을 향상시킬 수 있음을 나타내며, 본 연구에서는 보정된 k-factor를 적용 후 대기 중 HAPs 농도를 측정하였다.

3.2 고정지점 측정결과

표 4는 고정측정에 의한 HAPs 농도의 평균 및 최대값을 나타낸 것이다. 우선 평균농도를 살펴보면, Site 1의 경우 Methanol이 6.7 ppbv로 가장 높았고, Chloroform + dichloromethane 2.9 ppbv, Propylene oxide 2.1 ppbv 순으로 나타났다. Site 2는 Methanol 33.1 ppbv, C₂-benzene 8.8 ppbv, Chloroform + dich-

loromethane 5.9 ppbv 순이었으며, Site 3은 Methanol 18.3 ppbv, C₂-benzene 11.9 ppbv, Methyl tert-butyl ether (MTBE) 3.1 ppbv 순이었다. 본 연구에서 온산공단의 화학물질배출이동등록 (PRTR) 자료 (MOE, 2016)를 조사한 결과, 상기한 오염물질 취급 사업장이 다수 있는 것으로 확인되어 이들 사업장의 산업활동 과정에서 배출된 것으로 판단된다. 특히 Methanol이 모든 측정지점에서 농도가 높았는데, 제조분야에서 세척용 알코올로 흔히 사용되지만, 상대적으로 관리가 소홀하여 대기 중으로 비산배출이 많은 것으로 생각된다.

최대농도를 살펴보면 Site 1에서는 Ethylene oxide가 85.3 ppbv로 가장 높았고, Site 2는 Methanol이 467.3 ppbv, Site 3은 MTBE가 233.2 ppbv를 나타냈다.

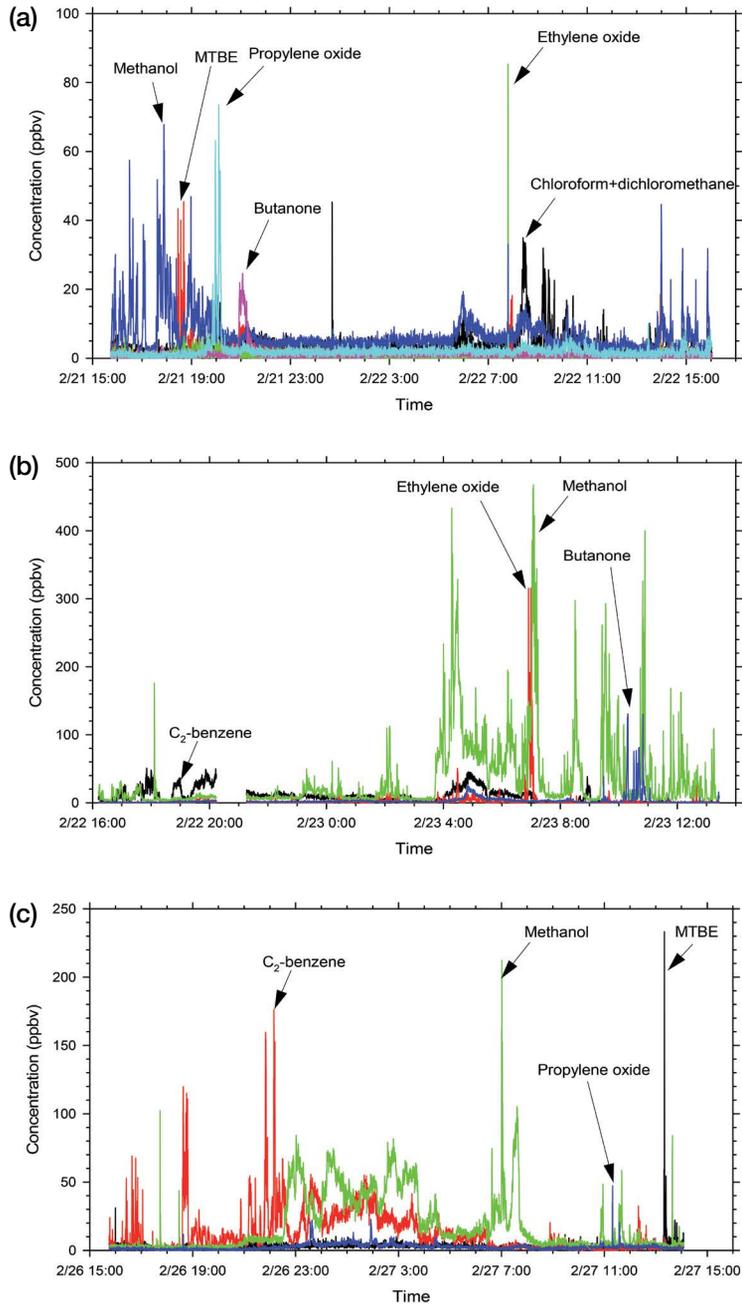


Fig. 3. Continuous monitoring results for target pollutants; (a) site 1, (b) site 2, (c) site 3.

이러한 결과는 산업단지 근무자들이 일시적으로 고농도에 노출될 수 있음을 나타낸다는 점에서 중요하다고 생각된다.

측정지점별로 오염물질의 평균농도 차이가 발생하였는데, 예를 들어 Toluene의 경우 Site 1은 0.7 ppbv, Site 2는 3.4 ppbv, Site 3은 1.0 ppbv로 Site 2에서 가장

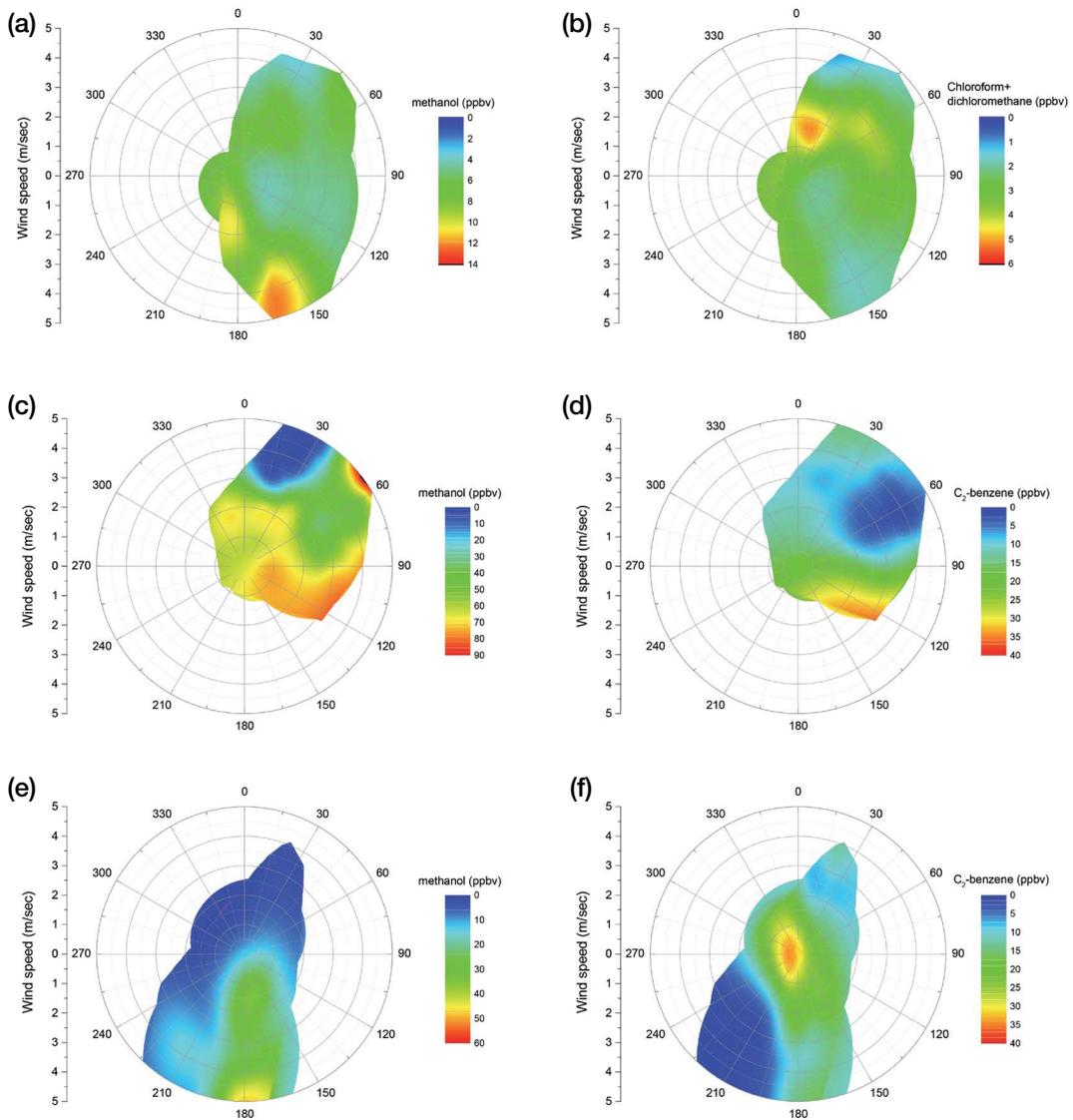


Fig. 4. The polar contour plotting results for concentration of pollutants and wind direction, speed at each sampling sites; (a) site 1, methanol, (b) site 1, Chloroform + dichloromethane, (c) site 2, methanol, (d) site 2, C₂-benzene, (e) site 3, methanol, (f) site 3, C₂-benzene.

높았다. C₂-benzene의 경우 Site 1은 1.0 ppbv, Site 2는 8.8 ppbv, Site 3는 11.9 ppbv로 Site 3가 Site 1보다 10배 이상 높았다. 측정지점별 농도 차이는 주변 사업장 업종과 취급물질 및 측정일 차이 등에 기인한 것으로 추정된다. 일반적으로 고정측정은 측정지점 선정에 따라 오염물질의 종류와 농도의 편차가 커질 수 있다

(Kwon *et al.*, 2017; Li *et al.*, 1997). 이에 따라 오염도 평가 결과도 크게 달라지는 단점이 있다. SIFT-MS 이동측정시스템은 측정방법이 간단하고, 이동이 용이하므로 가급적 많은 고정지점 측정을 통해 보다 객관성 있는 오염도 평가가 가능할 것으로 생각된다.

한편 표 4에 제시한 바와 같이 본 연구 조사대상인

Table 5. Summary of HAPs concentrations measured with mobile monitoring.

	HAPs concentrations (ppbv)									
	Day					Night				
	1 st	2 nd	3 rd	4 th	Ave. (sd)	1 st	2 nd	3 rd	4 th	Ave. (sd)
1,2-dichloroethane + chloroethene	0.8	1.1	0.6	0.7	0.8(±0.2)	0.8	0.5	0.5	0.5	0.6(±0.1)
1,3-butadiene	0.3	0.3	0.3	1.4	0.5(±0.6)	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2(±0.1)
2-propanol	1.5	1.2	3.5	0.8	1.7(±1.2)	2.4	0.9	1.0	1.0	1.3(±0.7)
Acetaldehyde	4.3	4.7	3.9	3.3	4.0(±0.6)	4.4	4.3	4.9	4.6	4.6(±0.2)
Acrylonitrile	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1(±0.0)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1(±0.0)
Aniline	0.7	0.4	0.2	0.3	0.4(±0.2)	0.8	0.3	0.4	0.4	0.5(±0.2)
Benzene	1.8	1.4	1.2	1.1	1.4(±0.3)	2.3	1.4	1.2	1.1	1.5(±0.6)
Benzidine	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4(±0.0)	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3(±0.1)
Butanone (MEK)	2.7	4.9	0.9	0.9	2.3(±1.9)	2.2	1.4	1.5	1.7	1.7(±0.4)
C ₂ -benzene	4.0	6.0	5.6	1.0	4.2(±2.2)	3.4	1.1	1.3	3.4	2.3(±1.3)
Carbon tetrachloride	0.8	0.8	0.4	0.7	0.7(±0.2)	0.7	0.5	0.6	0.5	0.6(±0.1)
Chloroform + dichloromethane	7.1	9.1	3.9	4.4	6.1(±2.4)	6.8	14.1	13.4	5.7	10.0(±4.3)
Dimethyl disulfide + phenol	0.8	0.7	0.6	0.4	0.6(±0.1)	0.7	0.5	0.5	0.6	0.6(±0.1)
Ethylene oxide	7.7	6.6	5.9	5.0	6.3(±1.1)	8.0	7.1	6.5	6.2	6.9(±0.8)
Formaldehyde	7.1	7.4	5.7	6.2	6.6(±0.8)	7.4	6.5	6.9	7.2	7.0(±0.4)
Hydrogen cyanide	3.4	3.1	2.7	2.1	2.8(±0.6)	3.3	3.5	3.7	3.6	3.5(±0.2)
Methanol	15.0	27.7	6.9	14.9	16.1(±8.6)	18.3	26.8	29.0	25.5	24.9(±4.6)
Methyl tert-butyl ether (MTBE)	3.3	3.3	2.2	2.4	2.8(±0.6)	9.6	2.6	2.5	2.4	4.2(±3.6)
N-hexane	4.1	3.7	2.6	2.7	3.3(±0.7)	4.7	3.2	3.2	3.4	3.6(±0.7)
Naphthalene	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5(±0.1)	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4(±0.0)
Propylene oxide	6.7	6.0	4.6	4.8	5.5(±1.0)	14.9	8.91	7.9	6.2	9.5(±3.8)
Styrene	0.3	0.2	0.2	0.6	0.3(±0.2)	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2(±0.0)
Tetrachloroethylene	0.5	0.4	0.3	0.2	0.4(±0.1)	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3(±0.1)
Toluene	1.6	1.0	0.7	0.6	1.0(±0.4)	3.2	1.1	1.1	1.5	1.7(±1.0)
Trichloroethylene	0.4	0.5	0.4	0.5	0.5(±0.0)	0.4	0.6	0.4	0.5	0.5(±0.1)

오산공단에 대한 기존 선행 연구의 측정 결과(MOE, 2010)와 비교해 보면 비록 조사지점, 측정지점 및 측정방법 등이 상이한 것을 고려하더라도 전반적으로 유사한 수준으로 판단된다.

그림 3은 고정지점 측정결과 중 농도변화가 많았던 오염물질에 대한 연속 측정결과를 나타낸 것이다. 측정지점별로 일부 오염물질의 농도가 특정시간대에 최대 수백 ppbv까지 증가되는 현상이 관찰되었다. Site 1의 경우 Methanol과 Propylene oxide 등의 농도가 오후시간대에 높게 관찰되다가 야간에는 감소되는 경향을 보였다. Site 2에서는 Methanol이 새벽 3시 이후에 급격히 증가되었으며, Site 3에서는 저녁 9시 이후 야간시간에 C₂-benzene 농도가 급격히 증가되는 것이 관찰되었다. 이러한 현상은 측정지점 주변

사업장의 분포, 취급물질 및 조업현황과 함께 기상조건(풍향·풍속)이 서로 복합적으로 영향을 주었기 때문으로 추정된다.

그림 4는 측정지점별로 농도가 높았던 상위 2개 오염물질에 대해 측정기간 중 풍향과 풍속에 따른 공간적 농도 분포 특성을 나타낸 것이다. Site 1에서 Methanol의 경우 측정지점 기준 남동쪽 풍향 특히 풍속이 4 m/s 이상일 때 농도가 높아지는 경향을 나타냈다. 실제 오산공단 업종별 분포를 조사한 결과, Site 1 지점 기준 남동 방향 약 1.5 km 지역에 석유제품 제조시설이 다수 위치해 있는 것으로 확인되어 이들 사업장에서의 비산배출에 의한 영향으로 판단되었다. 반면, Chloroform + dichloroform의 경우는 북풍 시 농도가 증가하였기 때문에 Methanol과 달리 북쪽에 위치한

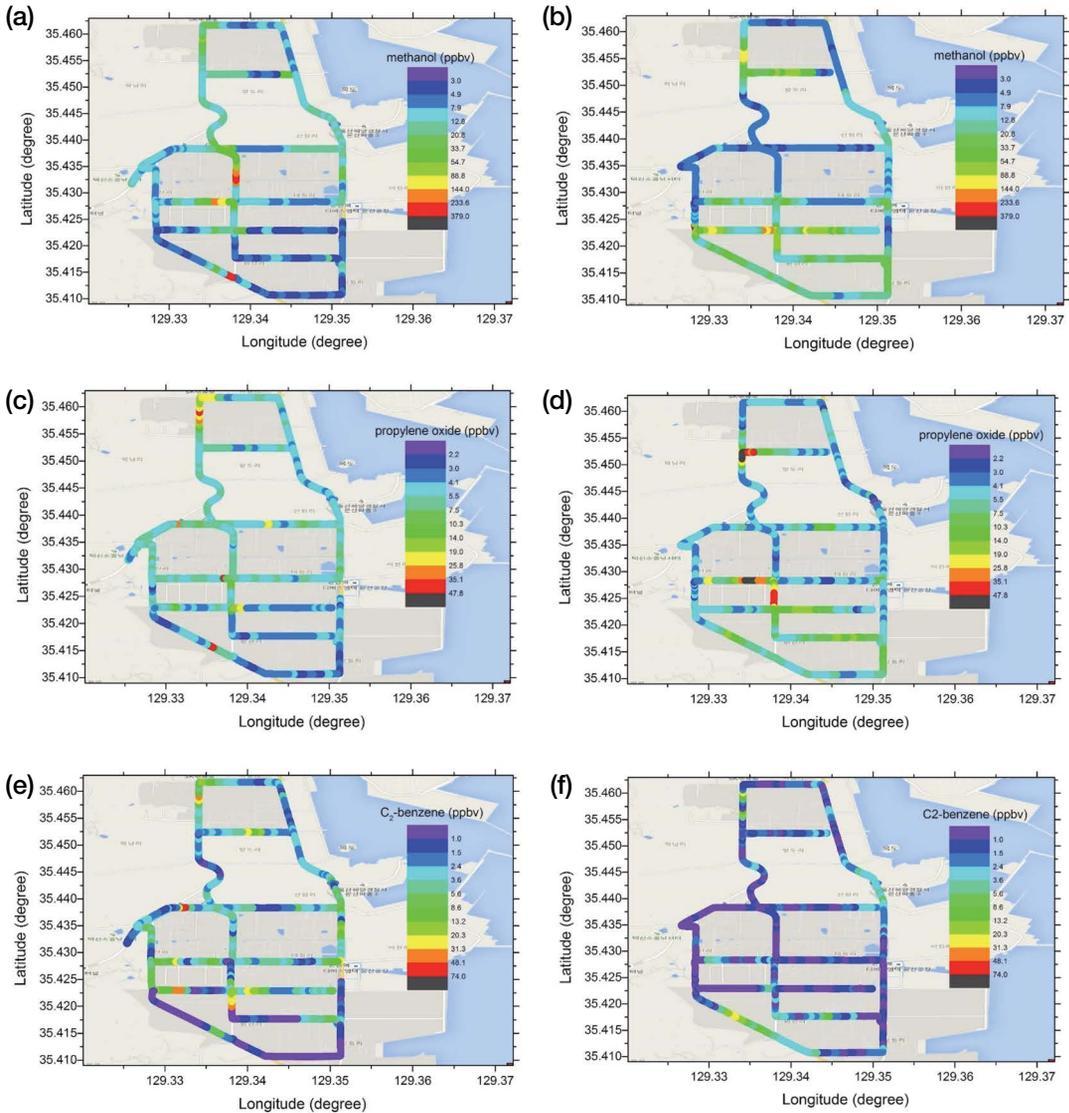


Fig. 5. Pollution maps for pollutants with relatively high concentrations: (a) Methanol (day), (b) Methanol (night), (c) Propylene oxide (day), (d) Propylene oxide (night), (e) C₂-benzene (day), (f) C₂-benzene (night).

다른 사업장의 영향으로 추정된다. Site 2의 Methanol과 C₂-benzene의 농도분포를 살펴보면, Site 1의 Methanol과 유사한 남동쪽 풍향에서 농도가 증가되는 것을 고려할 때 전술한 Methanol과 동일한 배출원의 영향으로 추정되었다. 상기 사례와 같이 SIFT-MS 이동측정시스템에 의한 측정결과, 기상관측자료 및 주변지역 사업장 특성 등을 종합적으로 분석하면

대기 중 HAPs의 거동 특성 파악과 발생원의 추적에 도움이 되는 자료의 생산이 가능할 것으로 판단된다.

3.3 이동측정결과

표 5는 산업단지 내부도로를 주·야간 각 4회씩 반복 이동측정하여 얻어진 회차별 및 전체 평균농도를 각각 나타낸 것이다. 우선 주간 측정에서 고농도 상

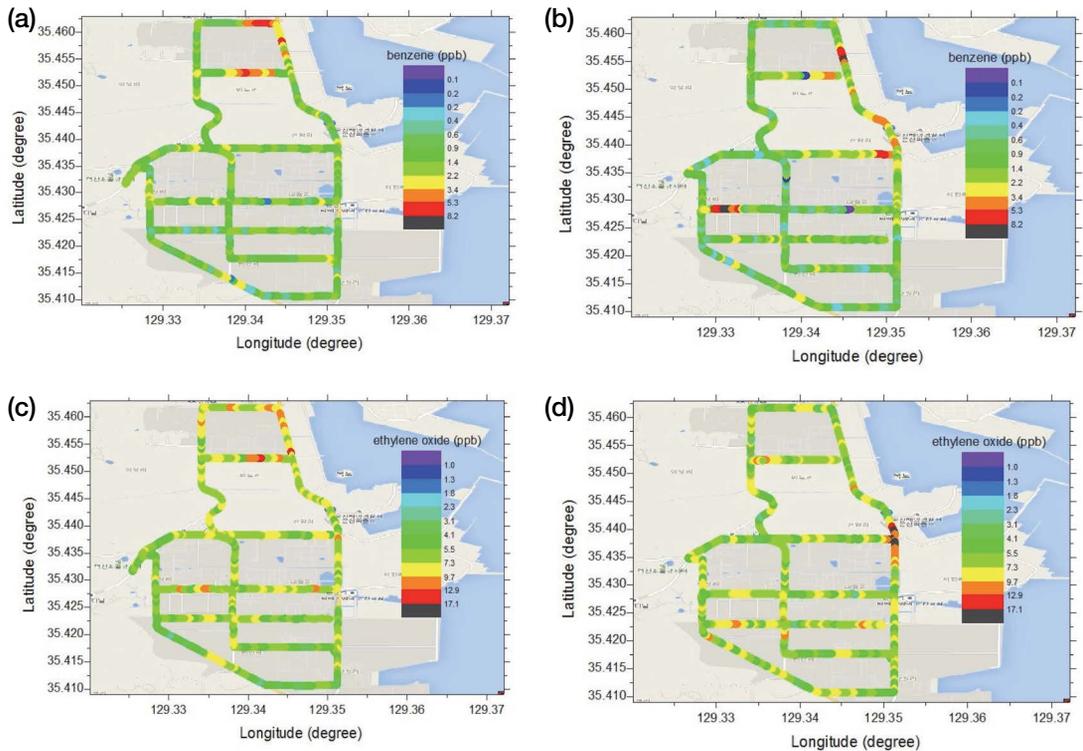


Fig. 6. Pollution maps for benzene and ethylene oxide: (a) Benzene (day), (b) Benzene (night), (c) Ethylene oxide (day), (d) Ethylene oxide (night).

위 5개 물질은 Methanol 16.1 ppbv, Formaldehyde 6.6 ppbv, Ethylene oxide 6.3 ppbv, Chloroform + dichloromethane 6.1 ppbv, Propylene oxide 5.5 ppbv로 나타났다. 야간에 측정된 상위 5개 물질도 주간과 동일하였으며, 측정농도도 전반적으로 유사한 수준임을 고려할 때 온산공단의 대표적 고농도 오염물질임을 알 수 있다. 이동측정은 산단 도로를 구석구석 주행하면서 측정하기 때문에 HAPs 오염도를 보다 객관적으로 평가하는데 효과적인 방법으로 생각된다.

그림 5와 6은 일부 고농도 및 유해성이 높은 물질의 오염지도를 주간과 야간으로 구분하여 나타낸 것으로, 주간과 야간에 수행된 복수의 이동측정 결과 중 대표적 1회 결과를 활용하여 작성하였다. 주간과 야간의 오염지도를 비교해 보면 대부분의 물질에서 주·야간 고농도 검출지점이 달라지는 것을 볼 수 있

는데, 이는 기상조건의 변화에 따른 영향으로 생각된다. 오염지도는 산업단지의 공간적 오염분포 특성을 시각적으로 파악하는 데 효과적이고, 동시에 국소 고농도 오염 현상(local hot spot phenomena)을 관찰하는 데 도움이 되는 자료라고 생각된다. 한편 오염지도에 점으로 표시된 농도는 이동측정 특성상 직전 데이터 출력 지점에서 현재 출력 지점까지의 평균 농도임을 해석 시 주의할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구는 실시간 질량분석장치(SIFT-MS)를 장착한 이동측정시스템을 이용하여 산업단지 대기 중 HAPs의 오염도를 평가하는 방법에 대해 조사하였다.

고정지점에서 시간적 해상도가 높은 측정을 통해 Methanol 및 C₂-benzene 등의 오염물질이 특정시간대에 수백 ppbv까지 증가되는 현상을 관찰할 수 있었다. 이는 산업단지 상주 근무자들이 특정시간대에 고농도에 노출될 수 있다는 점에서 중요한 결과로 생각된다. 또한 고정측정을 통해 얻어진 장시간 연속 측정 결과와 함께 기상 및 주변 사업장 연계분석을 할 경우 발생원의 추적에도 활용이 기대된다. 이동측정 방법은 산단 전체 구석구석을 주회하면서 측정하므로 다양한 오염물질의 공간적 오염 분포를 파악하는데 효과적이며, 오염지도 작성을 통해 국소구역 고농도 오염 현상을 파악하는 데 유용한 자료를 생산할 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구는 최신 분석장치인 SIFT-MS 이동측정시스템을 이용해 산업단지의 HAPs 오염도를 다양한 방법으로 평가한 사례를 제시한 것에 의의가 있다고 생각된다.

끝으로 본 장비의 활용성을 높이기 위해서는 다음의 몇 가지 단점에 대한 개선이 필요하다. 첫째, 이성질체 물질과 분자량이 매우 유사한 몇몇 물질들은 분리가 되지 않기 때문에 측정결과를 이용한 개별오염물질별 규제가 어렵고, 위해성 평가 자료로도 활용이 곤란하다. 둘째, 일부 측정물질의 경우 SIFT-MS 바탕농도가 다소 높다는 것이다. 현재 바탕농도 발생 원인은 국내·외적으로도 규명되지 않은 상태이므로, 향후 적극적인 원인규명과 해결방안이 필요하다. 셋째, 표준정도관리 방안이 마련되어야 할 것이다. 이를 위해 표준가스를 이용한 k-factor 보정, 상대검량 절차의 확립, 다양한 방해물질의 영향 검토 등의 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 환경부 역무대행사업으로 한국환경공단에서 추진하는 “비산배출시설 관리사업”과 환경부 환경정책 기반 공공기술 개발사업 (2016000160001)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Bae, G.N., Lee, S.B. (2013) Assessment method for roadside air pollution using a mobile laboratory, Proceeding of the annual conference of KSAE, Paper No. 1475-1476. 13, (in Korean with English abstract). <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NO-DE02309907>
- Baek, S.O., Jeon, C.G. (2013) Current status and future directions of management of hazardous air pollutants in Korea -Focusing on ambient air monitoring issues-, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 29(5), 513-527, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.5.513>
- Bossche, J.V., Theunis, J., Elen, B., Peters, J., Botteldooren, D., Baets, B.D. (2016) Opportunistic mobile air pollution monitoring: a case study city wardens in Antwerp, Atmospheric Environment, 141, 408-421. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.063>
- Drewnick, F., Bottger, T., von der Weiden-Reinmuller, S.L., Zorn, S.R., Klicach, T., Borrmann, S. (2012) Design of a mobile aerosol research laboratory and data processing tools for effective stationary and mobile field measurements, Atmospheric Measurement Techniques, 5, 1443-1457. <https://doi.org/10.5194/amt-5-1443-2012>
- Korea Environment Coporation (KECO) (2016) Management plan for ambient air monitoring system. (in Korean)
- Krol, S., Zabiegala, B., Namiesnic, J. (2010) Monitoring VOCs in atmospheric air II. Sample collection and preparation, Trends in Analytical Chemistry, 29(9), 1101-1112. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2010.05.010>
- Kumar, A., Viden, I. (2007) Volatile organic compounds: sampling methods and their worldwide profile in ambient air, Environmental Monitoring and Assessment, 131(1-3), 301-321. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9477-1>
- Kwon, H.O., Kim, S.J., Kim, Y.P., Kim, S.K., Hong, J.H., Choi, S.D. (2017) Suggestions on the selection method of priority monitoring sites for hazardous air pollutants in megacities, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33(6), 544-553, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.6.544>
- Li, R. (1997) Mobile mapping: an emerging technology for spatial data acquisition, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 63(9), 1085-1092. <https://doi.org/10.1002/9780470979587.ch24>

- Lourenco, C., Gonzalez-Mendex, R., Reich, F., Mason, N., Turner, C. (2017) A potential method for comparing instrumental analysis of volatile organic compounds using standards calibrated for the gas phase, *International Journal of Mass Spectrometry*, 419, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2017.05.011>
- Ministry of Environment (MOE) (2008) Investigation of hazardous air pollutants in Shi-wha and Ban-wol industrial complex. (in Korean)
- Ministry of Environment (MOE) (2010) Investigation of hazardous air pollutants in Ulsan district. (in Korean)
- Ministry of Environment (MOE) (2016) Report of pollutant release and transfer register (PRTR).
- Olaguer, E.P. (2015) Overview of the benzene and other toxics exposure (BEE-TEX) field study, *Environmental Health Insights*, 9, 1-6. <https://doi.org/10.4137/EHI.S15654>
- Olaguer, E.P., Erickson, M.H., Wijesinghe, A., Neish, B.S. (2016) Source attribution and quantification of benzene event emissions in a Houston ship channel community based on real-time mobile monitoring of ambient air, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66(2), 164-172. <https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1081652>
- Ryu, S.M., Kim, J.H., Kim, J.H., Yoo, J.W., Gong, B.J., Park, J.M. (2019) A study on air pollution point source tracking method in the industrial complex area using drone and real-time analyzer, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 19(4), 259-266, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.33768/ksue.2019.19.4.259>
- Son, H.D., An, J.G., Ha, S.Y., Kim, G.B., Yim, U.H. (2018) Development of real-time and simultaneous quantification of volatile organic compounds in ambient with SIFT-MS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 393-405, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.3.393>
- Wang, M., Zheng, Z.J., Zhang, R.Y., Zhang, S.Q., Xie, X.X., Han, Y.Q., Li, Y. (2009) Use of a mobile laboratory to evaluate changes in on-road air pollutants during the Beijing 2008 Summer Olympics, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 8247-8263. <https://doi.org/10.5194/acp-9-8247-2009>
- Yacovitch, T.I., Herndon, S.C., Roscioli, J.R., Floerchinger, C.W., Knighton, B., Kolb, C.E. (2015) Air pollutant mapping with a mobile laboratory during the BEE-TEX field Study, *Environmental Health Insights*, 9, 7-13. <https://doi.org/10.4137/EHI.S15660>
- Yu, J.G., Ryu, S.M., Kim, J.H., Kim, J.H., Park, J.G., Gong, B.J. (2019) Characteristics of emissions for air pollutants and odorous substances in a domestic dyeing industrial complex by using a real-time mobile monitoring system, *Journal of Odor Indoor Environment*, 18(4), 362-370, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15250/joie.2019.18.4.362>

Authors Information

- 윤승진 (한국환경공단 기후대기본부 대기환경처 차장)
 조강희 (한국환경공단 기후대기본부 본부장)
 김형석 (한국환경공단 기후대기본부 대기환경처 처장)
 송건범 (한국환경공단 기후대기본부 대기환경처 부장)
 이승복 (한국과학기술연구원 환경복지연구센터 선임연구원)
 정주영 (한국환경공단 기후대기본부 대기환경처 과장)