

## 신평·장림 산단 인근 주민의 PAHs 및 VOCs 노출

윤미라  · 조혜정  · 김근배  · 장준영  · 이철우  · 이보은<sup>†</sup> 

국립환경과학원 환경건강연구부 환경보건연구과

### Exposure to PAHs and VOCs in Residents near the Shinpyeong·Jangrim Industrial Complex

Mi-Ra Yoon, HyeJeong Jo, GeunBae Kim, JunYoung Chang,  
Chul-Woo Lee, and Bo-Eun Lee<sup>†</sup>

*Environmental Health Research Division, Environmental Health Research Department,  
National Institute of Environmental Research*

#### ABSTRACT

**Objectives:** This study aims to investigate the atmospheric concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and volatile organic compounds (VOCs) and the urinary concentration of biomarkers in residents near the Shinpyeong·Jangrim Industrial Complex to compare them with those of residents in a control area.

**Methods:** Hazardous air pollutants (PAHs and VOCs) were measured in an exposure area (two sites) and a control area (one site). Urine samples were collected from residents near the industrial complex (184 persons) and residents in the control area (181 persons). Multiple linear regression analysis was used to identify which factors affected the concentration of PAHs and VOCs metabolites.

**Results:** The average atmospheric concentration of PAHs in Shinpyeong-dong and Jangrim-dong was 0.45 and 0.59 ppb for pyrene, 0.15 and 0.16 ppb for benzo[a]pyrene, and 0.29 and 0.35 ppb for dibenz[a,h]anthracene. The average atmospheric concentration of VOCs was 1.10 and 0.99 ppb for benzene, 8.22 and 11.30 ppb for toluene, and 1.91 and 3.05 ppb for ethylbenzene, respectively. The concentrations of PAHs and VOCs in residents near the Shinpyeong·Jangrim Industrial Complex were higher than those of residents in the control area. Geometric means of urinary 2-hydroxyfluorene, 1-hydroxypyrene, methylhippuric acid, and mandelic acid concentrations were 0.45, 0.22, 391.51, and 201.36  $\mu\text{g/g}$  creatinine, respectively. Those levels were all significantly higher than those in the control area ( $p < 0.05$ ). In addition, as a result of multiple regression analysis, even after adjusting for potential confounding factors such as gender and smoking, the concentration of metabolites in urine was high in residents near the Shinpyeong·Jangrim Industrial Complex.

**Conclusion:** The results of this study show the possibility of human exposure to VOCs in residents near the Shinpyeong·Jangrim Industrial Complex. Therefore, continuous monitoring of the local community is required for the management of environmental pollutant emissions.

**Key words:** Industrial complex, residential area, PAHs, VOCs

<sup>†</sup>**Corresponding author:** Environmental Health Research Division, National Institute of Environmental Research, Hwangyong-ro 42, Seogu, Incheon 22689, Republic of Korea, Tel: +82-32-560-7120, Fax: +82-32-568-2035, E-mail: boeunlee@korea.kr

Received: 21 January 2021, Revised: 16 February 2021, Accepted: 17 February 2021

## I. 서 론

산업단지는 규모와 관리주체에 따라 국가산업단지, 일반산업단지, 도시첨단산업단지, 농공단지 등으로 구분되며 현재 전국에 1,220여개의 크고 작은 산업단지가 운영되고 있다.<sup>1)</sup> 이들 산업단지에서 배출되는 화학물질의 양은 2016년 기준으로 국내 전체 배출량(57,248톤)의 약 70% 이상을 차지하고 있다.<sup>2)</sup>

사업장이 밀집되어 있는 산업단지 주변의 주거지역은 다양한 유해대기오염물질이 유입될 우려가 높으며 특히, 다환방향족탄화수소(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs), 휘발성유기화합물(Volatile organic compounds, VOCs) 등은 높은 독성 및 발암성을 포함하고 있어 장기적으로 노출 시 암 발생 등 질병을 유발 할 수 있다.<sup>3,4)</sup> 따라서 산업단지 주변의 주거지역은 환경 및 건강영향 측면에서 지속적으로 조사·감시가 필요한 취약지역에 속한다. 우리나라는 국토 면적이 좁고 인구밀도가 높으며 산업화에 따라 도시의 형태가 변화하면서 산업단지와 주거지역이 인접·혼재되어 개발된 경우가 많아 산업단지에서 배출되는 오염물질이 주민의 건강에 영향을 미칠 가능성이 높다.<sup>5)</sup>

대규모 국가산업단지의 경우 인근지역 주민을 대상으로 환경유해물질 노출 및 건강영향을 평가하는 조사가 수행되고 있으며 일부 연구에서 산업단지 주변 주민의 환경유해물질 노출수준이 높고 유해물질 노출과 관련하여 건강영향이 있는 것으로 보고되었다.<sup>6)</sup> 하지만 국내 산업단지의 55%를 차지하는 중·소규모의 일반산업단지 주변 지역 주민에 대한 환경노출 및 건강 조사는 미흡한 실정이다.

부산은 국내 광역시 중에서 가장 많은 35개(국가산업단지 1개, 일반산업단지 30개, 도시첨단 3개, 농공단지 1개)의 산업단지가 운영되고 있다. 이 중 신평·장림 일반산업단지(이하 신평·장림 산업단지)는 20년 이상 운영된 부산의 대표 산업단지 중 하나로 도심에 산재한 업체를 정비하기 위하여 조성되었다. 기계, 섬유·의복, 운송장비 등 약 600여개의 소규모 업체들로 구성되어 있으며 주요 업종은 염색, 피혁, 도금 등으로 도장 작업이 빈번히 이루어지고 있다.<sup>1)</sup>

신평·장림 산업단지 주변은 부산 내에서도 PM<sub>10</sub> 농도 기준 초과 사례 빈도가 많은 곳으로 최근 15년 간 미세먼지 평균농도는 62 µg/m<sup>3</sup>이며 부산 평균(50 µg/

m<sup>3</sup>) 뿐만 아니라 전국 평균(51 µg/m<sup>3</sup>) 보다 높은 수준이다.<sup>10)</sup> 또한 VOCs와 광화학반응으로 생성되는 오존 농도는 일평균 기준 초과일수가 2015년에 전국 최고 수준(259개 측정망 중 19위)으로 나타났다.<sup>10)</sup> 신평·장림 산업단지의 화학물질 배출량(2014~2016)은 884톤으로 부산시 전체 배출량의 약 20% 수준이며 xylene, methyl ethyl ketone, dichloromethane, toluene 등의 VOCs가 대부분을 차지하고 있다. 또한 도장 작업 중 비산되는 분진 및 VOCs 등의 유해물질이 주거지로 확산되면서 신평·장림 산업단지 주변은 복합악취 민원이 제기된 바 있고 두통, 점막자극증상, 기침 등의 건강피해를 호소하기도 하였다.<sup>11)</sup> 한편, 세계보건기구(World Health Organization)에서 1급 발암물질로 규정한 benzo[a]pyrene 농도가 2015년 부산의 사상 산업단지 인근에서 대기측정망 농도 및 국외 사례보다 높게 나타난 바 있으며 신평·장림 산업단지 주변의 PAHs 노출 실태에 대한 자료는 찾아보기 힘든 실정이다.<sup>12)</sup>

이와 같이 신평·장림 산업단지 주변은 지역에서 모니터링 되고 있는 먼지나 악취 외에 환경유해물질인 PAHs, VOCs의 노출실태에 대한 연구가 부족하여 본 연구에서 신평·장림 산업단지 주변 지역의 대기 중 PAHs와 VOCs 농도와 주민 노출 실태 수준을 파악하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 연구지역 및 대상 선정

부산광역시 서남지역 낙동강 유역에 위치하고 있는 신평·장림 산업단은 행정구역으로는 신평동, 장림동, 다대동에 포함되며 산업단지 주변에는 대규모 주거지역이 조성되어 있다(Fig. 1).

산업단지에서 배출되는 대기오염물질의 확산 영향을 평가하기 위해 지역의 바람장미 분석과 CALPUFF 모델링을 수행하였다. 바람장미 분석은 신평동 내 기상관측소의 2013~2015년 자료를 이용하였다. CALPUFF 모델링은 Clean Air Policy support system (CAPSS)의 대기오염물질 배출량자료, 지형·토지피복자료, 지표·상층 기상관측자료 등을 이용하였다. 대상 물질은 최근 15년간 대기환경기준을 초과한 PM<sub>10</sub>과 신평·장림 산업단지가 위치한 사하구의 배출오염물질 중 배출량이 35%로 높은 NO<sub>x</sub>로 선정

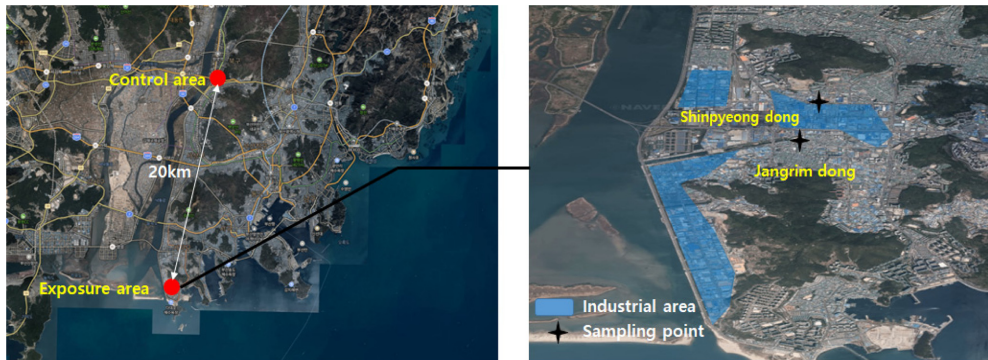


Fig. 1. Study areas and sampling points

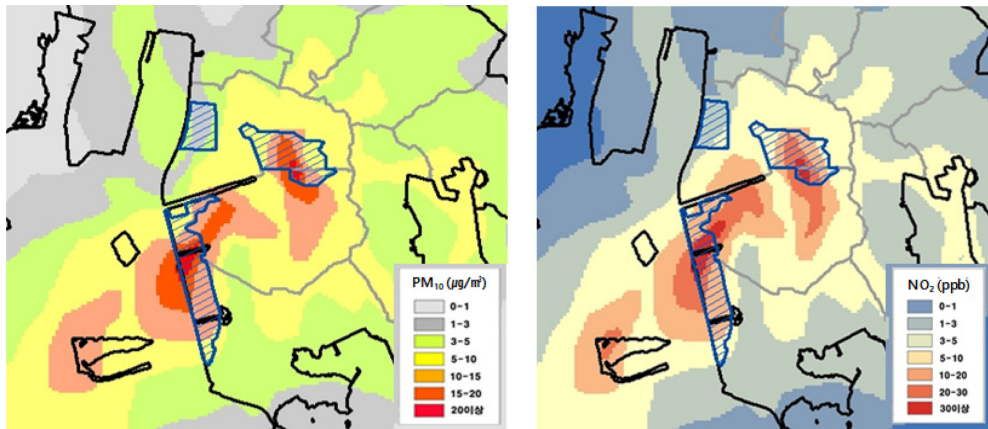


Fig. 2. Air pollution modeling for PM<sub>10</sub> and NO<sub>2</sub> in Shinpyeong·Jangrim industrial complex

하였다. 지역의 주풍향은 북서, 남동풍 계열로 모델링 결과 북서풍이 불 경우 신평동, 장림동의 주거지역이 영향권인 것을 확인하였다(Fig. 2). 환경측정지점은 모델링 결과를 이용하여 산업단지에 인접하며 주민 민원이 많고 측정 협조가 가능한 2개 지점으로 선정하였다. 대조지역은 신평동의 주요 바람방향을 고려하여 신평·장림 산단과 북쪽으로 20 km 이격거리가 있고 주변에 산단이 없는 북구 덕천동으로 선정하였다.

조사대상자는 해당 동에 1년 이상 거주한 주민으로 하였고 신평·장림 산단의 현장 근로자 및 외국인 은 제외하였다. 영향범위에 속하는 신평동과 장림동 주민이 평등하게 참여할 수 있도록 각 동의 통(108개)을 균등 배분하여 표본수를 선정하였고 성·연령 분포를 고려하여 20세 이상 성인 750명을 추출

하였다. 대조지역 또한 동일한 기준으로 750명을 추출하였다. 2016년 6월부터 8월까지 전문 조사원이 각 가정을 방문하여 일대일 면접조사를 통해 인구사회학적 특성(성, 연령 등), 거주지역 및 기간, 흡연 여부, 식이(3일 이내 구운 음식 섭취 여부) 등을 파악하였다. 설문조사 참여자 중 유해물질 노출수준 파악을 위한 생체시료 제공에 동의한 대상자는 402명(노출군 203명, 대조군 199명)이었다.

본 연구는 국립환경과학원 생명윤리위원회(IRB) 검토 및 승인을 받았으며(NIER-2016-01-01-114), 조사 참여자에게 사전 동의를 받아 수행하였다.

## 2. 환경시료 채취 및 분석

2016년 6, 7, 9월, 2017년 1월에 각각 1주일 간 연속으로 대기 중 PAHs와 VOCs 농도를 측정하였다.

대기 중 benzo[a]pyrene 등 PAHs는 미국 환경청 (EPA) TO-13A 분석방법을 이용하였다.<sup>13)</sup> GC/MS (Clarus 680/Clarus SQ-8T)를 이용하였으며 GC 컬럼(DB-5MS, 0.25 mm×60 m×0.25 µm)을 사용하였다. GC/MS 분석 후에는 시료 추출 전에 주입한 대리표준물질(surrogate standard, SS)의 회수율을 이용하여 개별 대상 물질의 농도를 보정하였다. VOCs는 미국 환경청(EPA) TO-14 분석방법을 이용하여 Tenax TA (40/60 mesh, Markers Inc., UK) 280 mg을 스테인레스 스틸 흡착관(1/4"×9 cm, Perkin Elmer, UK)에 충전하여 사용하였다.<sup>14)</sup> Tenax TA가 장착된 Low Volume 샘플러를 이용하여 유량을 100 mL/min으로 하여 시료를 포집하였다. VOCs 분석은 자동 열탈착 장치(TurboMatrix 350, PerkinElmer, USA)가 GC컬럼(DB-1, 0.32 mm×60 m×3 µm, Agilent Technologies, USA)으로 직접 연결된 GC/MS (Clarus SQ 8T, Perkin Elmer, USA) 시스템을 사용하였다.

### 3. 생체시료 채취 및 분석

생체시료 분석 항목은 PAHs 대사체 중 2-hydroxyfluorene (2-OHFlu), 2-naphthol (2-NAP), 1-hydroxyphenanthrene (1-OHPhe), 1-hydroxypyrene (1-OHP) 등 4종이며 VOCs 대사체는 methylhippuric acid (MHA), mandelic acid (MA), phenylglyoxylic acid (PGA), t,t-Muconic acid (t,t-MA), benzyl Mercaptan acid (BMA) 등 5종이다.

시료는 대상자들에게 채뇨법을 숙지시킨 후 일시뇨 50 mL를 채취하였다. 채취된 시료는 냉장상태로 실험실로 이송하였으며 분석 전까지 -20°C에서 냉동 보관하였고 이후 일괄 분석하였다.

PAHs 대사체 4종은 시료 3 mL에 가수분해효소 ( $\beta$ -glucuronidase/aryl sulfatase enzyme)를 첨가하여 배양 후 MCX Cartiridge로 고상 추출 후 질소농축기 상에서 건조시킨 후 BSTFA 유도체화 시약으로 유도체화 하였으며, 전처리된 시료는 가스크로마토그래프 질량분석기(GC-MS)를 이용하여 분석하였다.

VOCs 대사체 3종(MHA, MA, PGA)은 시료 1 mL에 HCl 완충액을 첨가하였고 2종(t,t-MA, BMA)은 시료 1 mL에 phosphate 완충액을 첨가한 후 Solid phase extraction (SPE) 카트리지를 이용하여 고상 추출 후 액체크로마토그래프 질량분석기(LC-MS/MS)를 이용하여 분석하였다. PAHs 대사체의 방법검출

한계(Method Detection Limit, MDL)는 2-OHFlu 0.065 µg/L, 2-NAP 0.017 µg/L, 1-OHPhe 0.035 µg/L, 1-OHP 0.015 µg/L이며, VOCs 대사체는 2-MHA 1.951 µg/L, 3-/4-MHA 2.821 µg/L, MA 2.318 µg/L, PGA 2.323 µg/L, t,t-MA 2.199 µg/L, BMA 1.220 µg/L이다. 생체시료 분석은 국민환경보건기초조사 분석방법에 준하여 수행하였고 MDL 미만의 값은 MDL/2로 처리하였다.<sup>15)</sup>

### 4. 통계분석

대기 중 PAHs 및 VOCs 농도는 정규분포를 하지 않아 로그변환 후 t-test를 이용하여 산단 주변인 신평동과 대조지역, 장림동과 대조지역 각각 유의수준을 평가하였다.

산단 주변과 대조지역 주민의 소변 중 PAHs 및 VOCs 대사체 농도는 기하평균 및 기하표준편차를 산출하였으며, WHO 참고값인 요중 크레아티닌 농도가 0.3 g/L 미만이거나 3.0 g/L를 초과하는 경우에 해당하는 37명은 분석에서 제외하였다.

조사대상자의 성별, 연령, 거주기간, 흡연, 식이는 Chi-square 또는 t-test를 실시하여 유의성을 확인하였다. 지역 간 노출수준을 비교하기 위하여 소변 중 오염물질 농도를 로그변환 및 정규분포화한 후 t-test를 실시하였다. 또한 산단 주변 주민의 PAHs 및 VOCs 대사체 농도에 영향을 주는 요인을 파악하기 위하여 대사체 농도를 종속변수로 하고 성별, 연령, 거주기간, 흡연여부, 식이관련 요인을 독립변수로 하여 다중 회귀분석을 수행하였으며, 거주지역을 추가로 모형에 포함하여 산단 주변 거주가 미치는 영향을 살펴보았다. 통계적 검증은 p값이 0.05 미만인 경우를 유의한 것으로 간주하였으며 통계분석은 SAS software (version 9.4)를 사용하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 대상자의 일반적 특성

본 연구에 참여한 대상자의 일반적 특성은 Table 1과 같다. 대상자는 총 365명으로 산단 주변지역은 남성 91명(49.5%), 여성 93명(50.5%)이고 대조지역은 남성 90명(49.7%), 여성 91명(50.3%)이었다. 연령별로는 산단 주변지역은 50대(22.9%), 40대(17.9%), 30대(16.8%) 순이며 대조지역은 50대(19.9%), 60대

**Table 1.** General characteristics of study subjects

	Exposure area (N=184)	Control area (N=181)	p-value*
Gender			
Male	91 (49.5%)	90 (49.7%)	0.521
Female	93 (50.5%)	91 (50.3%)	
Age (years)			
20-29	27 (14.7%)	28 (15.5%)	0.803
30-39	31 (16.8%)	25 (13.8%)	
40-49	33 (17.9%)	30 (16.6%)	
50-59	42 (22.9%)	36 (19.9%)	
60-69	25 (13.6%)	31 (17.1%)	
≥70	26 (14.1%)	31 (17.1%)	
Mean±SD	49.72±16.02	50.41±17.10	
Residence period (years)	20.14±13.09	15.04±10.30	<0.001
Smoker			
Non-smoker	133 (72.3%)	131 (72.4%)	0.539
Smoker	51 (27.7%)	50 (27.6%)	
Grilled food intake within 3 days			
No	35 (19.0%)	31 (17.1%)	0.369
Yes	149 (81.0%)	150 (82.9%)	

\*chi-square test or t-test

(17.1%) 및 70대 이상(17.1%) 순으로 나타났다. 현 거주지에서의 거주기간은 산단 주변지역 20년, 대조지역 15년으로 산단 주변지역이 길었으며 통계적으로 유의한 차이를 보였다(p<0.001). 흡연은 현재까지 담배를 피우지 않은 비흡연자가 산단 주변지역 133명(72.3%), 대조지역 131명(72.4%)로 유사하였고 최근 3일 이내 구운 음식을 섭취한 경우도 산단 주변지역 149명(81.0%), 대조지역 150명(82.9%)으로 유사하였다.

## 2. 환경 중 유해물질 농도 수준 분석

### 2.1. PAHs

신평·장림 산단 주변 주거지역에서 대기 중 PAHs 노출 수준을 평가하였다(Table 2). 신평동, 장림동의 물질별 농도는 각각 naphthalene 0.12, 0.17 ng/m<sup>3</sup>, pyrene 0.45, 0.59 ng/m<sup>3</sup>, benzo[a]pyrene 0.15, 0.16 ng/m<sup>3</sup>, dibenzo[a,h]anthracene 0.29, 0.35 ng/m<sup>3</sup> 등으로 조사된 모든 항목이 대조지역인 덕천동 보다 높은 농도로 나타났으나 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않았다.

대조지역 측정지점과 약 2.5 km 떨어진 덕천동 내에 환경부 유해대기물질 측정망이 운영되고 있으며 2016년의 농도와 신평동, 장림동 농도를 비교하였다.<sup>10)</sup>

Benz[a]anthracene (0.23, 0.37 ng/m<sup>3</sup>), dibenzo[a,h]anthracene (0.29, 0.35 ng/m<sup>3</sup>), indeno[1,2,3-c,d]pyrene (0.28, 0.32 ng/m<sup>3</sup>) 농도는 신평·장림 산단 주변에서 측정망 농도보다 높았으며 benzo[a]pyrene, benzo[b]fluoranthene은 측정망 농도와 유사하였다. Chrysene 농도는 측정망 농도가 0.30 ng/m<sup>3</sup>으로 신평·장림 산단 주변의 농도(0.13, 0.10 ng/m<sup>3</sup>) 보다 높았다. 다만 매월 1회 측정하여 연평균 농도를 산출하는 측정망 자료와 달리 본 조사는 일주일간 4회 측정하여 산출된 농도로 측정시기와 기간 등을 고려할 때 직접적인 비교에는 한계가 있다.

유기물의 불완전 연소과정에서 생성되는 PAHs는 다양한 산업공정에서 배출되고 있으며 특히, 석유화학공장, 발전소 등이 주요 배출원으로 보고되고 있다.<sup>16)</sup> 2013~2015년도에 조사된 국내 석유화학산단 주변의 농도와 비교하면 세계보건기구(WHO)에서

**Table 2.** Concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in living areas near industrial complex (ng/m<sup>3</sup>)

	Exposure area				Control area		Annual report of air quality in Korea 2016
	Shinpyeong-dong		Jangrim-dong		Deokcheon-dong		
	N	Mean±SD*	N	Mean±SD	N	Mean±SD	Deokcheon-dong
Naphthalene	28	0.12±0.18	28	0.17±0.34	28	ND <sup>†</sup>	-
Pyrene	28	0.45±0.37	28	0.59±0.57	28	0.26±0.29	-
Benz[a]anthracene	28	0.23±0.22	28	0.37±0.42	28	0.17±0.26	0.15
Benzo[a]pyrene	28	0.15±0.20	28	0.16±0.23	28	0.07±0.16	0.14
Benzo[b]fluoranthene	28	0.22±0.25	28	0.24±0.40	28	0.04±0.09	0.20
Chrysene	28	0.13±0.09	28	0.10±0.10	28	0.05±0.07	0.30
Dibenz[a,h]anthracene	28	0.29±0.65	28	0.35±0.74	28	0.15±0.24	0.01
Indeno[1,2,3-c,d]pyrene	28	0.28±0.38	28	0.32±0.41	28	0.11±0.26	0.11

\*Standard Deviation, <sup>†</sup>Not detected, <sup>‡</sup>t-test: Shinpyeong-dong vs Deokcheon-dong, Jangrim-dong vs Deokcheon-dong, p<0.05

발암성 물질로 규정하고 있는 benzo[a]pyrene은 신평·장림 산단 주변의 농도가 석유화학산단 주변 농도(0.17~1.06 ng/m<sup>3</sup>)보다 낮았다. 석유화학산단 주변의 benz[a]anthracene, dibenzo[a,h]anthracene, indeno[1,2,3-c,d]pyrene 등의 농도는 각각 0.09~0.82, 0.02~0.64, 0.14~0.63 ng/m<sup>3</sup> 수준으로 신평·장림 산단 주변 농도와 비교하면 측정지점에 따라 농도 차이가 나타났다.<sup>17,18)</sup> 국내 화력발전소 주변 지역과 비교하면 benzo[a]pyrene 0.69 ng/m<sup>3</sup>, benz[a]anthracene 0.77 ng/m<sup>3</sup>, indeno[1,2,3-c,d]pyrene 0.59 ng/m<sup>3</sup> 수준으로 신평·장림 산단 주변이 낮았다.<sup>18)</sup>

국의 사례의 경우 대만의 석탄화력발전소 주변지역의 benzo[a]pyrene (0.06 ng/m<sup>3</sup>)을 포함하여 대부분의 PAHs 농도가 신평·장림 산단 주변에서 높았다.<sup>19)</sup> 또한 국내 조선소 주변의 benzo[a]pyrene (0.16 ng/m<sup>3</sup>) 농도와 유사한 수준이며 benz[a]anthracene (0.16 ng/m<sup>3</sup>), dibenzo[a,h]anthracene (0.05 ng/m<sup>3</sup>), indeno[1,2,3-c,d]pyrene (0.04 ng/m<sup>3</sup>) 등은 신평·장림 산단 주변이 더 높았다.<sup>20)</sup>

발암물질로서 benzo[a]pyrene 보다 상대독성등가 (Toxicity Equivalency Factors, TEFs)가 더 높은 것으로 평가되고 있는 dibenzo[a,h]anthracene의 경우 석유화학산단 주변 뿐만 아니라 조선소, 화력발전소 주변 지역 보다 높은 농도로 나타났다.<sup>20)</sup> 본 연구를 토대로 산단에서 배출되는 PAHs의 농도 분포현황, 계절 및 오염원별 특성 파악 등이 필요할 것으로 보인다.

## 2.2. VOCs

대기 중 VOCs 농도는 신평동, 장림동에서 각각 benzene 1.10, 0.99 ppb, trichloroethylene 1.06, 1.62 ppb, toluene 8.22, 11.30 ppb, styrene 0.14, 0.26 ppb, m,p-xylene 1.61, 2.17 ppb, o-xylene 1.06, 1.71 ppb, methyl ethyl ketone 2.32, 4.37 ppb로 대조지역의 benzene 0.33 ppb, trichloroethylene 0.21 ppb, toluene 3.59 ppb, styrene 0.05 ppb, m,p-xylene 0.54 ppb, o-xylene 0.21 ppb, methyl ethyl ketone 1.47 ppb 보다 높은 농도로 조사되었다. 이 중 benzene, trichloroethylene, toluene, ethylbenzene, xylene, methyl ethyl ketone의 농도는 산단 주변 주거지역에서 대조지역 보다 유의하게 높은 수준을 보였다(p<0.05) (Table 3).

신평동, 장림동의 VOCs 농도는 2016년 부산지역 유해대기물질 측정망 농도 보다 2배(benzene)에서 최대 11배(o-xylene)까지 높았다. 최근에 조사된 국내 다른 지역의 중·소규모 산단 주변지역 VOCs 농도는 benzene 0.09~0.88 ppb, toluene 0.44~6.85 ppb, styrene 0.03~0.37 ppb, m,p-xylene 0.43~2.07 ppb, o-Xylene 0.21~0.9 ppb, methyl ethyl ketone 0.73~1.14 ppb 수준으로 신평·장림 산단 주변 지역의 VOCs 농도가 대체적으로 다른 중·소규모의 일반산단 보다 더 높았다.<sup>21-24)</sup> 또한, 장림동은 2008년에 측정된 benzene (0.51 ppb), toluene (11.21 ppb), styrene (0.15 ppb), m,p-xylene (1.61 ppb), o-xylene (0.90 ppb), ethylbenzene (2.82 ppb) 보다 대부분의 물질에서 농도가 높게 나타났다.<sup>25)</sup>

**Table 3.** Concentration of volatile organic compounds in living areas near industrial complex (ppb)

	Exposure area				Control area		Annual report of air quality in Korea 2016
	Shinpyeong-dong		Jangrim-dong		Deokcheon-dong		Deokcheon-dong
	N	Mean±SD*	N	Mean±SD	N	Mean±SD	
Benzene	48	1.10±1.01 <sup>‡</sup>	48	0.99±0.83 <sup>‡</sup>	48	0.33±0.40	0.50
Trichloroethylene	48	1.06±0.93 <sup>‡</sup>	48	1.62±1.61 <sup>‡</sup>	48	0.21±0.21	0.05
Tetrachloroethylene	48	ND <sup>†</sup>	48	0.04±0.21	48	ND	ND
Toluene	48	8.22±4.82 <sup>‡</sup>	48	11.30±8.31 <sup>‡</sup>	48	3.59±2.67	1.33
Styrene	48	0.14±0.30	48	0.26±0.60	48	0.05±0.17	0.11
Ethylbenzene	48	1.91±1.50 <sup>‡</sup>	48	3.05±4.42 <sup>‡</sup>	48	0.70±0.74	0.38
m,p-Xylene	48	1.61±2.11 <sup>‡</sup>	48	2.17±4.24 <sup>‡</sup>	48	0.54±0.84	0.46
o-Xylene	48	1.06±1.00 <sup>‡</sup>	48	1.71±2.96 <sup>‡</sup>	48	0.21±0.39	0.15
Dimethylformamide (DMF)	28	0.54±0.99	28	0.48±0.61	27	0.17±0.31	-
Methyl ethyl ketone	48	2.32±2.62	48	4.37±5.96 <sup>‡</sup>	48	1.47±0.99	-
Dichloromethane	48	0.04±0.10	48	0.04±0.15	48	ND	0.59

\*Standard Deviation, †Not detected, ‡t-test : Shinpyeong-dong vs Deokcheon-dong, Jangrim-dong vs Deokcheon-dong, p<0.05

화학물질 배출·이동량 정보(Pollutant Release and Transfer Registers, PRTR)자료에 따르면 지난 15년간 꾸준히 배출된 물질은 xylene, methyl ethyl ketone, toluene이며, 이 물질들은 신평·장림 산단 배출량의 70% 이상을 차지하고 있어 산단 주변 지역의 대기 중 농도에 영향을 미쳤을 것이라고 보여진다. 특히, toluene은 중·소규모 산단 주변 뿐만 아니라 대규모 산단 주변 지역(울산 1.20 ppb, 포항 1.77 ppb, 여수 0.74 ppb, 시화 6.3 ppb)에 비해서도 높았고 국외 석유화학산업단지 주변(4.35 ppb) 보다 높았다.<sup>26-28)</sup> 산단의 배출량을 고려할 때 울산·미포 국가산단과 반월특수지역 국가산단(시화지구) 배출량의 약 15% 수준인 신평·장림 산단 주변지역에서 이들 산단 주변보다 높은 수준으로 나타난 점에 대해서는 단면조사 결과의 제한점이 있어 원인 파악을 위한 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

### 3. 생체 시료 중 대사체 농도

#### 3.1. 요 중 PAHs

PAHs는 대부분 유기화합물의 연소과정에서 발생하며 대기 등 환경적 노출, 직업적 노출, 흡연, 식이 등 다양한 경로를 통해 노출된다. 섭취, 흡입 및 경피 흡수를 통해 인체에 유입되고 체내 대사과정을 거쳐 소변으로 배출된다.<sup>29,30)</sup> PAHs의 체내 반감기는

pyrene 18시간, fluorene 4시간, phenanthrene 6시간으로 대체적으로 짧은 편이지만 생체시료를 이용한 모니터링은 특정 노출 집단에서 다양한 환경오염물질에 대한 노출 가능성을 유용하게 평가할 수 있다.<sup>31-33)</sup>

Table 4는 신평·장림 산단 주변 거주 주민과 대조지역 주민의 요 중 PAHs 농도를 분석한 결과이다.

Fluorene의 대사체인 2-OHFlu 평균 농도는 신평·장림 산단 주변 거주 주민(0.45 µg/g creatinine)이 대조지역 거주 주민(0.29 µg/g creatinine)보다 통계적으로 유의하게 높았고(p<0.001), 국가단위 바이오모니터링 사업인 국민환경보건기초조사의 전국 성인 평균(0.39 µg/g creatinine)보다 높은 수준이었다. 특히, 신평·장림 산단 주변 거주 주민의 농도는 2014년 유조선 충돌로 인한 기름 유출 사고 시 오염제거를 위해 방제작업에 참여한 작업자의 농도(0.45 µg/g creatinine)와 유사한 수준이었다.<sup>34)</sup>

유의하지는 않지만 대조지역에 비해 대기 중 높았던 pyrene 대사체인 1-OHP 농도는 0.22 µg/g creatinine로 대조지역 주민(0.12 µg/g creatinine)보다 통계적으로 유의하게 높았으며(p<0.001) 전국 성인 평균(0.15 µg/g creatinine) 및 제철산업단지 주변 지역 주민(0.17 µg/g creatinine) 보다 높은 수준이었다.<sup>35,36)</sup> 한편, 직업적 노출에 대한 연구들에 따르면 석유화학 종사자에서 1-OHP 농도가 높게 나타나는 것으

**Table 4.** Concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons metabolites in urine samples ( $\mu\text{g/g}$  creatinine)

	Exposure area		Control area		p-value
	N	GM (GSD)*	N	GM (GSD)	
2-OHFlu	184	0.45 (2.546)	181	0.29 (2.562)	<0.001
2-NAP	184	5.18 (2.800)	181	5.91 (2.641)	0.204
1-OHPhe	184	0.22 (3.934)	181	0.22 (3.810)	0.684
1-OHP	184	0.22 (5.394)	181	0.12 (4.048)	<0.001

\*Geometric mean (Geometric standard deviation)

**Table 5.** Concentrations of volatile organic compounds metabolites in urine samples ( $\mu\text{g/g}$  creatinine)

	Exposure area		Control area		p-value
	N	GM (GSD)*	N	GM (GSD)	
MHA	184	391.51 (2.660)	181	273.40 (2.975)	0.001
MA	184	201.36 (2.363)	181	138.35 (2.984)	<0.001
PGA	184	163.25 (3.301)	181	147.48 (3.448)	0.425
t,t-MA	184	86.96 (3.681)	181	95.56 (2.346)	0.415
BMA	184	3.43 (4.511)	181	8.60 (2.882)	<0.001

\*Geometric mean (Geometric standard deviation)

로 보고되고 있는데 신평·장림 주민들의 요중 1-OHP 농도는 국외 석유생산노동자(0.28  $\mu\text{g/g}$  creatinine) 보다는 다소 낮은 수준이었다.<sup>30,37)</sup>

Naphthalene의 대사체인 2-NAP 농도(5.18  $\mu\text{g/g}$  creatinine)와 phenanthrene 대사체인 1-OHPhe 농도(0.22  $\mu\text{g/g}$  creatinine)는 대조지역과 유사한 수준이었다.

### 3.2. 요 중 VOCs

VOCs는 높은 증기압으로 주로 흡입을 통해 인체에 노출되며 체내 대사과정을 거쳐 80% 정도가 소변으로 배출된다.<sup>3)</sup> VOCs의 반감기는 benzene 5시간, toluene 2-3시간, styrene 13시간, xylene 58시간으로 알려져 있다.<sup>34)</sup>

Table 5는 요 중 신평·장림 산단 주변 거주 주민과 대조지역 주민의 요 중 VOCs 농도를 분석한 결과이다.

대기 중 xylene은 대사체인 MHA 농도와 높은 상관성이 보고되고 있으며 본 연구에서도 대기 중 농도가 높았던 xylene의 대사체인 MHA 농도(391.51  $\mu\text{g/g}$  creatinine)는 대조지역 주민(273.40  $\mu\text{g/g}$  creatinine) 보다 통계적으로 유의하게 높았다( $p=0.001$ ).<sup>38)</sup> 제3기 국민환경보건기초조사에서는 항목이 제외되어 제2기

의 성인 평균농도(320  $\mu\text{g/g}$  creatinine)와 비교하면 신평·장림 산단 주변 주민에서 더 높은 수준이었다. 국내 산단 지역 주민과 비교하면 MHA 농도는 화학산단인 울산 산단(412.1  $\mu\text{g/g}$  creatinine)보다는 낮았지만 또 다른 화학산단인 여수 산단(307.38  $\mu\text{g/g}$  creatinine)보다는 높았고 제조업이 많은 시화·반월 산단(400.1  $\mu\text{g/g}$  creatinine, 390.3  $\mu\text{g/g}$  creatinine)과는 유사하였다.<sup>39,40)</sup>

Styrene은 체내에서 styrene-7,8-oxide로 변환되고 최종적으로 MA와 PGA로 변환된다.<sup>3)</sup> MA 농도(201.36  $\mu\text{g/g}$  creatinine)는 대조지역 주민(138.35  $\mu\text{g/g}$  creatinine)보다 유의하게 높았고( $p<0.001$ ) PGA 농도는 163.25  $\mu\text{g/g}$  creatinine으로 대조지역 주민(147.48  $\mu\text{g/g}$  creatinine)보다 높았으나 통계적 유의성은 없었다. MA 농도는 여수 산단 주변 지역 주민(303.30  $\mu\text{g/g}$  creatinine) 및 시화반월 산단 주변 지역 주민(256.29  $\mu\text{g/g}$  creatinine, 245.68  $\mu\text{g/g}$  creatinine) 보다는 낮았고 청주산단 주변 지역 주민(209.89  $\mu\text{g/g}$  creatinine) 과 유사하였다.<sup>27,40,41)</sup> 이탈리아의 일반인을 대상으로 한 연구결과와 비교하면 MA (443  $\mu\text{g/g}$  creatinine)는 낮은 수준이며 PGA (107  $\mu\text{g/g}$  creatinine) 농도는 높은 것으로 나타났다.<sup>42)</sup>

Benzene 대사체인 t,t-MA (86.96  $\mu\text{g/g}$  creatinine)



와 toluene 대사체인 BMA (3.43 µg/g creatinine) 농도는 대조지역 주민 보다 낮은 수준이었지만 95분위수 농도값은 신평·장림산단 주변 주민이 각각 664.42 µg/g creatinine, 62.03 µg/g creatinine로 대조지역 주민(361.59 µg/g creatinine, 54.46 µg/g creatinine) 보다 높았다.

**4. 생체시료 농도 관련 요인 분석**

PAHs와 VOCs는 노출 시 호흡기질환, 암, 생식독성 등 다양한 질환의 원인이 될 수 있는 대표적인 환경유해물질로 지역사회 환경오염 뿐 아니라 거주지 내의 실내공기질과 인테리어, 난방, 식생활, 음식 조리, 흡연과 직업 등 개인적인 요인들이 노출수준에 영향을 미칠 수 있다.<sup>43)</sup> 산단 주변 주민의 요 중 PAHs, VOCs 대사체 농도에 영향을 미치는 요인을 살펴보기 위하여 성별, 연령, 거주기간, 흡연여부, 식이를 독립변수로 하고 요 중 대사체 농도를 종속변수로 하여 다중회귀분석을 실시하였다. 또한 산단 주변 거주가 유해물질 노출에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 대조지역 주민을 추가로 포함하고 지역을 독립변수로 하여 다중회귀분석을 실시하였다.

Table 6은 요 중 PAHs 농도와 관련된 요인을 분석한 결과이다.

신평·장림 산단 주변 주민의 경우 2-OHFlu 농도에 영향을 미치는 요인은 흡연이며 흡연자가 비흡연자에 비해 2-OHFlu 농도가 높은 것으로 나타났다 (p<0.001). 2-NAP와 1-OHPhe 농도에 영향을 미치는 요인은 성별과 흡연이었고 1-OHP도 흡연자가 비흡연자에 비해 통계적으로 유의하게 농도가 높은 것으로 확인되었다(p<0.05). 흡연과 PAHs 농도의 관련성은 국내 연구 뿐만 아니라 국외 연구에서도 일관되게 보고되고 있으며 본 연구에서도 조사된 PAHs 대사체 모두 흡연이 영향 요인으로 나타났다.<sup>44)</sup>

식이와 관련해서는 육류 등을 프라이팬에 굽거나 불꽃이 직접 닿는 숯불에 구워 조리하는 경우 PAHs 농도가 증가한다고 보고되고 있어 구운 음식 섭취 또한 PAHs 노출과 관련이 있다고 볼 수 있다.<sup>45)</sup> 하지만 본 연구에서는 3일 이내 구운 음식 섭취여부에 따른 영향은 나타나지 않았다.

또한 2-OHFlu와 1-OHP 물질은 신평·장림 산단 주변 주민이 대조지역 주민에 비해 농도가 유의하게 높았고, 1-OHP의 경우 산단 주변에서의 거주기간이

길수록 체내 농도가 증가하는 것으로 나타났다 (p<0.001). 이는 산업단지 주변에 거주하는 것이 노출에 영향을 받을 가능성이 있음을 시사한다. 그러나 대기 중 PAHs 농도가 대조지역 보다 통계적으로 유의하게 높지는 않은 것으로 나타나 본 연구에서 환경 대기 중 PAHs 농도와 주민 생체 중 PAHs 노출 수준과의 상관성을 해석하기에는 제한점이 있다.

Table 7은 요 중 VOCs 농도와 관련된 요인을 분석한 결과이다.

신평·장림 산단 주변 주민의 MHA 농도는 흡연자가 비흡연자에 비해 높은 것으로 나타났다(p=0.017). 흡연은 VOCs의 주요 노출원 중 하나로 ethylbenzene, styrene, benzene 등은 담배연기와 관련이 있다고 알려져 있지만 본 연구에서는 xylene 대사체에서만 흡연 관련성을 보였다.<sup>46)</sup>

PGA, t,t-MA, BMA 농도에 영향을 미치는 요인은 연령으로 연령이 증가할수록 통계적으로 유의하게 농도가 증가하는 것으로 나타났다(p=0.013, p=0.041, p=0.028). 또한 PGA 농도가 연령이 증가함에 따라 농도가 더 높게 나타난 것은 국외 연구 결과와 유사하였다.<sup>47)</sup>

흡연 등 잠재적인 혼란요인을 보정한 후에도 산단 지역 거주가 영향 요인으로 나타난 대사체는 MHA와 MA이었다. Xylene의 경우 대기 중 농도가 대조지역보다 유의하게 높았으며 산단에서 지속적으로 배출(전체 배출량의 약 24%)되고 있는 물질로 지역 주민의 노출에 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 한편 산단 지역 거주와 대사체 농도간의 유의한 관련성을 보인 MA는 styrene의 대기 중 농도가 대조지역 보다는 높았지만 유의성은 나타나지 않았고 지난 10년간 산단에서 배출된 styrene 양도 전체 배출량의 0.12% 수준으로 매우 낮았다. 화학물질 배출량 조사는 물질에 따라 연간 1톤 또는 10톤 미만을 제조·사용하는 사업장은 대상에 포함되지 않는다. 따라서 PRTR 조사 대상에 포함되지 않는 소규모 사업장에서의 배출 가능성과 산단 외 다른 배출원에 의한 노출 가능성도 있다고 보여진다.

**IV. 결 론**

본 연구는 20년 이상 운영된 부산의 대표 산업단지로서 VOCs 배출량 등이 많아 환경오염이 우려되는

**Table 6.** Relationship between urinary polycyclic aromatic hydrocarbons levels and various independent factors

Variables	2-OHflu			2-NAP			1-OHPhe			1-OHP						
	β*	S.E†	t-value	β	S.E	t-value	β	S.E	t-value	β	S.E	t-value	p-value			
Gender (ref: male)	.079	.118	1.281	.201	.154	.121	.2547	.011	.161	.173	2.601	.010	.105	.209	1.706	.089
Age (years)	-.023	.003	-.411	.681	.023	.003	.412	.681	.044	.005	.790	.430	-.077	.006	-1.378	.169
Residence period (years)	.026	.004	.455	.650	-.032	.005	-.571	.568	.050	.007	.882	.378	.120	.008	2.122	.035
Smoking status (ref: none)	.249	.132	4.045	<0.001	.314	.136	5.189	<0.001	.153	.195	2.472	.014	.187	.234	3.031	.003
Grilled food intake within 3 days (ref: none)	-.012	.130	-.227	.820	.076	.133	1.474	.141	-.088	.191	-1.676	.095	-.098	.230	-1.877	.061
Area (ref: control)*	.237	.099	4.582	<0.001	-.060	.105	-1.144	.253	.010	.150	.182	.856	.191	.178	3.649	<0.001

\*Regression coefficient, †Standard error of regression coefficient, ‡include control

**Table 7.** Relationship between urinary volatile organic compounds levels and various independent factors

Variables	MHA			MA			PGA			tt-MA			BMA							
	β*	S.E†	t-value	β	S.E	t-value	β	S.E	t-value	β	S.E	t-value	β	S.E	t-value	p-value				
Gender (ref: male)	.045	.130	.719	.472	.085	.124	1.364	.173	.071	.151	1.137	.256	.015	.137	.240	.811	.122	.171	1.960	.051
Age (years)	-.029	.004	-.513	.608	.060	.003	1.063	.288	.140	.004	2.484	.013	.116	.004	2.048	.041	.125	.005	2.211	.028
Residence period (years)	.075	.005	1.330	.184	.039	.005	.676	.499	-.079	.006	-1.391	.165	.006	.005	.100	.920	-.039	.007	-.684	.494
Smoking status (ref: none)	.149	.146	2.399	.017	.102	.140	1.628	.104	.029	.170	.466	.642	-.054	.153	-.872	.384	.006	.192	.099	.922
Grilled food intake within 3 days (ref: none)	.097	.143	1.843	.066	.087	.137	1.649	.100	-.007	.166	-.126	.900	.096	.150	1.827	.068	-.022	.188	-.422	.673
Area (ref: control)*	.170	.111	3.210	.001	.196	.106	3.692	<0.001	.131	.063	1.161	.247	-.038	.118	-.712	.477	-.346	.140	-6.845	<0.001

\*Regression coefficient, †Standard error of regression coefficient, ‡include control

신평·장림 산단 주변에서 대기 중 PAHs 및 VOCs 를 측정하고 주민의 생체 중 노출 수준을 파악하였다.

산단 주변인 신평동과 장림동의 대기 중 PAHs 농도는 대조지역 보다 높았지만 유의한 차이는 나타나지 않았고 VOCs 농도는 benzene, trichloroethylene, toluene, ethylbenzene, xylene, methyl ethyl ketone 이 대조지역에 비하여 유의하게 높았다. 특히, VOCs 농도는 측정망 뿐 아니라 국내 다른 산단 보다 전반적으로 높은 수준으로 나타났다.

또한 PAHs 및 VOCs 일부 물질에서 주민의 생체 중 대사체의 농도가 국내 평균 및 다른 산단 주변 지역 주민보다 높았고, 성별, 연령, 흡연 등의 잠재적인 혼란요인들을 보정한 후에도 산단 주변에 거주하는 것이 체내 오염물질 농도와 통계적으로 유의하게 관련성이 있는 것으로 나타났다.

다만 동 연구는 단면조사로서 그 결과가 환경과 주민의 상시 노출 수준을 대표한다고 보기는 어렵고 산단 이외의 유해물질 배출 시설이나 이동오염원, 실내 발생원 등 다른 노출 영향을 고려하지 못한 제한점이 있다.

본 연구 결과를 통해 신평·장림 산단 주변 주민에서 VOCs의 인체 노출 영향 가능성을 확인함에 따라 환경오염물질 배출 관리에 대한 지역사회의 지속적인 모니터링이 필요한 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다 (NIER-2016-01-01-114).

### References

1. Korea Industrial Complex Corporation. Available: [https://www.kicox.or.kr/user/bbs/BD\\_selectBbs.do?q\\_bbsCode=1036&q\\_bbscttSn=20200316182324789&q\\_order=&q\\_clCode=2](https://www.kicox.or.kr/user/bbs/BD_selectBbs.do?q_bbsCode=1036&q_bbscttSn=20200316182324789&q_order=&q_clCode=2). [accessed 31 August 2020].
2. Pollutant release and transfer register. Available: <https://icis.me.go.kr/prtr/main.do>. [accessed 31 August 2020].
3. Yaghoub H, Hakim T, Shahrokn N, Iman P. Environmental and biological monitoring of exposures to VOCs in a petrochemical complex in Iran. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018; 25: 6656-6667.

4. Jiang Y, Hu X, Yves UJ, Zhan H, Wu Y. Status, source and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in street dust of an industrial city, NW china. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014; 11-18.
5. Kim SY, Kwon HO. Overlapping analysis of air dispersion simulation for odor damage to estimate the effect area in Busan and Ulsan. *J. Korean Soc. Hazard Mitig*. 2018; 18(2): 82-91.
6. Lee KH, Lee SW, Ahn RM, Kim JH, Son BS. A study on the concentration of biomarkers for heavy metals and VOCs in the residents living in the vicinity of Gwangyang Industrial Complex in Korea. *J. Odor Indoor Environ*. 2019; 18(3): 228-235.
7. Montero-Montoya R, López-Vargas R, Arellano-Aguilar O. Volatile organic compounds in air: sources, distribution, exposure and associated illnesses in children. *Annals of Global Health*. 2018; 84(2): 225-238.
8. Kampeerawipakorn O, Navasumrit P, Settachan D, Promvijit J, Hunsonti P, Parnlob V, et al. Health risk evaluation in a population exposed to chemical releases from a petrochemical complex in Thailand. *Environmental Research*. 2017; 152: 207-213.
9. Bnag H, Lee MR, Kim NS, Hwangbo Y, Kim HA, Lee SS, et al. The Health status of residents near Iksan industrial complex based on questionnaires. *J Environ Health Sci*. 2020; 46(1); 35-44.
10. National Institute of Environmental Research. Annual Report of Air Quality in Korea. 2016.
11. National Institute of Environmental Research. Pilot survey on Environmental Health in the Surrounding Areas of Industrial and Agricultural Industrial Complexes. 2009.
12. National Institute of Environmental Research. Monitoring of Hazardous Air Pollutants in the Urban Ambient Atmosphere (III). 2016.
13. Environmental Protection Agency (EPA). Compendium Method TO-13A, Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air using gas chromatography/mass spectrometry, 2nd. 1999.
14. Environmental Protection Agency (EPA). Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air. Second Edition. Compendium Method TO-14A. 1999.
15. KIM SJ, Paek YW, Kwon YM, Choi WH. Manual for Laboratory Procedures on The Second Stage Korean National Environmental Health Survey (Organic compounds), 2nd ed. Incheon: National Institute of Environmental Research; 2015.

- p. 92-111.
16. Rao PS, Ansari MF, Pipalatkhar P, Kumar A, Nema P, Devotta S. Measurement of particulate phase polycyclic aromatic hydrocarbon around a petroleum refinery. *Environ Monit Assess.* 2008; 137: 387-392.
  17. National Institute of Environmental Research. Environmental pollutant exposure and monitoring of health effects on people living near industrial areas in Ulsan (Ulsan, the 3rd year of the 2nd step study). 2015.
  18. National Institute of Environmental Research. Monitoring of Exposure to Environmental Pollutants and Health Effects of Inhabitants in Industrial Complexes. 2014.
  19. Hu SW, Chan YJ, Hsu HT, Wu KY, ChangChien GP, Shie RH. et al. Urinary levels of 1-hydroxypyrene in children residing near a coal-fired power plant. *Environmental Research.* 2011; 1185-1191.
  20. Lee SH, Lee BM, Kang BW, Jeon JM. Characteristics of VOCs and PAHs distribution in the ambient air in the area near the shipbuilding. *J. of the Korean Society for Environmental Technology.* 2017; 18(6): 501-516.
  21. National Institute of Environmental Research. Environmental health effects survey of residents around 4th phase general industrial complex. 2015.
  22. National Institute of Environmental Research. Environmental health effects survey of residents around 5th phase general industrial complex. 2016.
  23. National Institute of Environmental Research. Environmental health effects survey of residents around 3rd phase general industrial complex. 2014.
  24. National Institute of Environmental Research. Environmental health Assessment on the General Industrial Complex. 2018.
  25. Cheong JP, You SJ. Characteristics and identification of ambient VOCs sources in Busan industrial area. *J. Korean Soc. Environ. Eng.* 2011; 33(9): 644-655.
  26. National Institute of Environmental Research. Monitoring of Exposure to Environmental Pollutants and Health Effects of Inhabitants in Industrial Complexes in Sihwa-Banwol area. 2015.
  27. Kim MJ, Seo YK, Kim JH, Baek SO. Impact of industrial activities on atmospheric volatile organic compounds in Sihwa-Banwol, the largest industrial area in South Korea. *Environmental Science and pollution Research.* 2020.
  28. Hsu CY, Chiang HC, Shie RH, Ku CH. Ambient VOCs in residential areas near a large-scale petrochemical complex: Spatiotemporal variation, source apportionment and health risk. *Environmental Pollution.* 2018; 95-104.
  29. Kho YL, Lee EH. comparison of concentration of urinary metabolites of PAHs from smokers and non-smokers. *J Environ Health Sci.* 2011; 37(6): 474-481.
  30. Hopf NB, Kirkeleit J, Kramer SL, Moen B. Urinary 1-hydroxypyrene level in offshore worker. *Int Arch Occup Environ Health.* 2010; 83: 55-59.
  31. Jongeneelen FJ. Benchmark guideline for urinary 1-Hydroxypyrene as Biomarker of occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Ann. occup. Hyg.* 2001; 45(1): 3-13.
  32. Oliveria M, Slezakova K, Jose Alves M, Fernandes A. Firefighters' exposure biomonitoring: Impact of firefighting activities on levels of urinary monohydroxyl metabolites. *International Journal of hygiene and Environmental Health.* 2016; 219: 857-866.
  33. Aguilera I, Daponte A, Gil F, Hernandez A, Godoy P, Pla A, et al. Biomonitoring of urinary metals in a population living in the vicinity of industrial sources; a comparison with the general population of Andalusia. Spain. *Science of the total environment.* 2008; 407(1): 669-678.
  34. Kim GB, Kang TS, Yoon MR, Jo YJ, Joo YK, Yu SD, et al. Health effect assessment on cleanup workers of an oil spill in Yeosu. *J Environ Health Sci.* 2016; 42(6): 385-395.
  35. Korean Statistical Information Service. Available: <https://kosis.kr/index/index.do>. [accessed 31 August 2020].
  36. National Institute of Environmental Research. Monitoring of Exposure to Environmental Pollutants and Health Effects of Inhabitants in Industrial Complexes in Pohang Area. 2013.
  37. Hasen AM, Mathiesen L, Pedersen M, Knudsen LE. Urinary 1-hydroxypyrene (1-HP) in environmental and occupational studies-A review. *Int. J. Hyg. Environ. Health.* 2008; 471-503.
  38. Palma M, Briceno L, Idrovo AJ, Varona M. Evaluation of exposure of auto painters to organic solvents in the city of Bogota. *Biomedica.* 2015; 66-76.
  39. National Institute of Environmental Research. Comprehensive Evaluation on the Result of four years (2012-2015) Monitoring of Exposure to Environmental Pollutants and Health Effects among Residents Living near Industrial Complex. 2017.
  40. National Institute of Environmental Research. Study on the Exposure Assessment of Residents Near Petrochemical Industrial complex. 2013.

41. Im YJ, Song MS, Park TH, Cho HK, Lee JH, Kim YD, et al. Exposure of volatile organic compounds to residents living near Cheongju industrial complex. *Chungbuk Med. J.* 2020; 30(1): 1-8.
42. Manini P, Palma GD, Andreoli R, Goldoni M, Mutti A. Determination of urinary styrene metabolites in the general Italian population by liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Int Arch Occup Environ Health.* 2004; 77: 433-436.
43. Lee CW, Jeon HL, Hong EJ, Yu SD, Kim DS, Son BS. A study on the correlation and concentration in volatile organic compounds (benzene, toluene, xylene) levels according to the indoor/outdoor and the type of residents' house in industrial area. *J Environ Health Sci.* 2010; 36(5): 351-359.
44. Kwon YM, Joo YK, Park CH, Kim SY, Choi KH, Lee CW, et al. Exposure levels and influence factors of PAHs and benzene metabolites in the urine of the general korean adult population -Korean National Environmental Health Survey (2009-2017)-. *J Environ Health Sci.* 2019; 45(5): 529-540.
45. Lee Bh, An Yj, Park DY, Byun GY, Kim KD, Lee ML, et al. Characteristics of PAH occurrence during meat cooking. *Journal of Environmental Science International.* 2016; 25(11): 1459-1466.
46. Chambers DM, Ocariz JM, McGuirk MF, Blount BC. Impact of cigarette smoking on Volatile Organic Compound (VOC) blood levels in the U.S. population: NHANES 2003-2004. *Environment International.* 2011; 37(8): 1321-1328.
47. Capella KM, Roland K, Geldner N, deCastro BR, De Jesus VR, Bommel DV, et al. Ethylbenzene and styrene exposure in the United States based on urinary mandelic acid and phenylglyoxylic acid: NHANES 2005-2006 and 2011-2012. *Environmental Research.* 2019; 171: 101-110.

<저자정보>

윤미라(전문위원), 조혜정(전문위원), 김근배(연구관), 이보은(연구사), 장준영(연구관), 이철우(과장)