



Original Article

부산 내 미세먼지 고농도 지역 탐색 및 체내 휘발성유기화합물 바이오모니터링 조사

주현지^{1,2}, 이승호^{1,2*}, 민재희^{1,2}, 황용식³, 홍영섭^{1,2}

¹동아대학교 의과대학 예방의학교실, ²부산광역시 환경보건센터, ³신라환경건설링(주)

Exploration of an Area with High Concentrations of Particulate Matter and Biomonitoring Survey of Volatile Organic Compounds among the Residents

Hyunji Ju^{1,2}, Seungho Lee^{1,2*}, Jae-Hee Min^{1,2}, Yong-Sik Hwang³, and Young-Seoub Hong^{1,2}

¹Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Dong-A University,
²Environmental Health Center for Busan, Dong-A University, ³Silla Environmental Consulting Co., Ltd.

ABSTRACT

Background: With its developed port and related industries, the concentration of fine dust is high in Busan compared to other cities in South Korea. Many studies have reported the health effects of fine dust, but there has been a lack of information regarding concentrations of volatile organic compounds among those who exposed to high levels of fine dust.

Objectives: This study aimed to define an area with high concentrations of particulate matter and perform biomonitoring surveys among the residents of the area.

Methods: Air quality data was collected and the mean level of each district in Busan was derived. We then defined the area with the highest concentrations of PM₁₀ as a target site. Urine samples were collected from the 400 participants and analyzed for VOCs metabolites - trans,trans-Muconic Acid (t,t-MA) and N-Acetyl-S-(benzyl)-L-cysteine (BMA). Interviews were conducted by trained investigators to examine demographic information. The levels of t,t-MA and BMA were compared with representative South Korean population data (Korean National Environmental Health Survey). The association of the VOC metabolites and fine dust were analyzed by general linear regression analysis.

Results: The mean of PM₁₀ in the target site was 42.50 µg/m³ from 2018 to 2020. Among the 400 participants in the target site, 74.8% were female and the average age of the participants was 66 years. The geometric mean of t,t-MA was 71.15 µg/g creatinine and the BMA was 7.00 µg/g creatinine among the residents. The levels were higher than the geometric mean from the 4th KoNEHS. The levels of t,t-MA showed significance in BMI, smoking status, and household income. BMA showed significance in gender and age.

Conclusions: Compared to the general population of South Korea, the target site's residents had higher biomonitoring levels. Based on this study, continuous screening for high risk areas, including the target site, and biomonitoring of the residents are required.

Key words: Particulate matter, t,t-MA, BMA, biomonitoring, KoNEHS

Received November 20, 2023

Revised December 7, 2023

Accepted December 13, 2023

Highlights:

- The concentration of fine dust is high in Busan.
- We determined high dust area and performed biomonitoring survey for VOCs in the area.
- The mean of PM₁₀ in the target site was 42.50 µg/m³ from 2018 to 2020.
- The participants had the higher biomonitoring levels than the general population.
- Continuous screening for the high risk area is required.

*Corresponding author:

Department of Preventive Medicine,
College of Medicine, Dong-A University,
32 Daesingongwon-ro, Seogu, Busan
49201, Republic of Korea
Tel: +82-51-240-2680
Fax: +82-51-240-2680
E-mail: lgydr1@gmail.com

1. 서 론

부산은 전세계 항만의 질소산화물(Nitrogen Oxide)과 황산화물(Sulfur Oxides) 배출의 20%를 차지하는 10대 컨테이너 항만으로 선정되는 등 대기환경적 측면에서 취약한 도시이다.¹⁾ 환

경부 등이 운영하는 부산 내 대기정규측정소를 통해 지역 특성을 일부 확인 가능하나, 화학성분 자료 등이 수도권에 비해 많지 않아 부산의 미세먼지에 대해 상세한 특성 분석이 어려운 실정이다.²⁾ 1960년대 부산 내 조성된 공업지대에 거주하는 주민 대상으로 5년간(2015년~2020년) 미세먼지 변화가 있었는



지에 대한 인식도 조사 결과, “악화되었다” 및 “동일하다”라고 응답한 비율이 과반이 넘는 등 대책을 마련하지 못하고 있어 지역 주민의 피해가 우려된다는 보고가 있다.³⁾

세계보건기구(World Health Organization, WHO)에 따르면 매년 대기오염으로 인하여 7백만 명이 사망하는 것으로 보고 하였다.⁴⁾ 국내에서도 대기오염으로 인한 사망률과 유병률 관련 된 많은 연구가 진행되고 있으며,^{5,6)} 실내공기 중 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs) 등 유해물질 농도를 분석한 선행 연구들이 보고되었다.^{7,8)} VOCs는 2차 미세먼지의 원인 물질이 되는 탄화수소화합물^{9,10)} 대기중으로 휘발되어 악취를 유발하는 유해물질이며 파라핀, 방향족화합물 등 생활에서 흔히 사용하는 대부분의 탄화수소류가 이에 해당된다. 이러한 VOCs는 천식 등 호흡기계 질환의 원인 물질이며,¹¹⁾ 강한 발암성 또는 돌연변이 원성을 가진 화합물들이 포함되어 있어 고농도에 장기간 노출 시 중추신경계에 영향을 준다.¹²⁾ 특히 VOCs 물질 중 하나인 벤젠(Benzene)은 발암 물질로 알려져 있으며, t,t-MA는 벤젠의 대사물질로 흡연에 의해 크게 영향을 받는 물질이다.¹³⁾ 톨루엔(Toluene)은 신경독성을 일으키는 물질로 두통, 환각 증세 등을 유발하는 것으로 알려져 있으며,¹⁴⁾ BMA는 톨루엔의 대사물질이다.

VOCs의 유해성을 입증한 연구가 다수 보고되고 있으며 이에 많은 국가에서 VOCs 대사체 바이오모니터링을 수행하고 있다.¹⁵⁻¹⁷⁾ 국내 대표 바이오모니터링 조사인 국민환경보건기초조사(Korean National Environmental Health Survey, KoNEHS)에서도 VOCs는 모니터링 중인 대상 물질군이다. 국민환경보건기초조사는 국민의 생활과 밀접한 관련성이 있고 사회적 이슈가 높은 물질과 분석 인프라가 구축된 물질, 그리고 노출 가능성이 높으면서 인체 유해성이 우려되는 물질을 조사물질로 선정하고 있다.¹⁸⁾ 현재 국내에서는 국민환경보건기초조사 5기를 수행하고 있으며 VOCs 대사물질 중 t,t-MA (trans,trans-Muconic Acid), BMA (N-Acetyl-S-(benzyl)-L-cysteine) 2종을 조사 대상 물질로 선정하여 모니터링 중이다.

현재까지 수행된 VOCs 선행연구들은 생체 내 노출 수준보다 실내의 공기 중 대기오염물질 농도 모니터링에 초점을 맞춘 연구가 많고,^{7,8,19)} 미세먼지와 VOCs 두 항목 모두에 초점을 맞춘 선행연구는 다수 보고되고 있으나,^{20,21)} 미세먼지 고농도 지역에서 VOCs 노출을 확인한 연구는 미비하다. VOCs는 대기질과 기후변화에 중요한 인자로서 특히 인구밀도가 높고 교통량이 많은 도시지역에서는 다양한 VOCs 노출원이 존재한다.²²⁾ 따라서 유해대기물질측정망을 통해 VOCs를 측정하고 있으나, 국내 VOCs에 대한 생체 노출 수준에 대한 연구는 많이 수행되지 않았다. 특히, 부산지역의 미세먼지 배출량은 높은 수준이지만,²³⁾ 지역 특성에 따른 주민 노출 수준 조사는 수행되지 않았다. 따라서 본 연구는 부산 내 미세먼지 고농도 지역을 파악하고 해당 지역 주민에 대한 바이오모니터링 조사를 통해 VOCs 노출

수준을 확인하고자 하였다. 또한 체내 VOCs 농도의 기여요인을 파악하기 위해 대사체 t,t-MA, BMA와 인구통계학적 정보와의 연관성을 확인하였다.

II. 재료 및 방법

1. 미세먼지 고농도 지역 선정

본 연구는 부산 내 미세먼지 고농도 지역을 선정하기 위해 에어코리아(대기환경정보실시간공개시스템) 사이트를 통해 부산 지역에 운영 중인 대기오염측정망 31개소의 2011년부터 2020년까지의 대기환경 자료를 수집하였다. 수집한 대기환경 자료를 활용하여 PM₁₀ 미세먼지에 대한 10년(2011년~2020년), PM_{2.5} 미세먼지에 대한 5년(2015년~2020년) 각 평균 농도와 PM₁₀, PM_{2.5} 모두에 대한 3년(2018년~2020년) 평균 농도를 확인하였다. Surfer 23 (Golden Software, Golden, CO, USA)을 이용하여 미세먼지 평균 농도에 대한 GIS 분석을 실시하였다.

2. 참여자 모집 및 설문조사

측정망 31개소 중 2018년부터 2020년 PM₁₀ 미세먼지 평균 농도가 가장 높았던 대기측정망 반경 2 km 이내를 조사지역으로 선정하였다. 만 19세 이상 성인 중 영향권 지역에 1년 이상 거주한 주민을 대상으로, 지역주민 대표성을 위하여 지역 내 통별 7명씩(총 63통) 할당 추출로 참여자를 모집하였다. 참여자의 인적사항을 확인하여 참여자들의 일시노 19 mL를 채취하였다. 설문조사는 표준화 교육을 받은 조사원이 대상자와 1대 1 대면 방식으로 성별(남, 여), 나이(만 나이), 월 가구 수입(100만원 미만, 100만원 이상 200만원 미만, 200만원 이상 300만원 미만, 300만원 이상 400만원 미만, 400만원 이상) 등의 일반적 특성과 현재 흡연 및 음주 여부를 조사하였다. 또한, 구운 생선 및 고기의 섭취 빈도(거의 먹지 않는다, 월 1회 이하, 월 2~3회, 주 1~2회, 주 3~4회, 매일) 등의 식생활 습관과 주거지 인접 도로의 통행량(매우 많다, 많은 편이다, 보통이다, 적은 편이다)과 버스용 도로까지의 거리(50 m 이내, 50~99 m, 100~499 m, 500 m 이상) 등에 대한 인식도 조사를 실시하였다. 본 연구는 동아대학교 생명윤리위원회의 승인을 받았으며 (IRB No. 2-1040709-AB-N-01-202203-HR-022-03), 조사 전 참여자들에게 서면으로 참여 동의서를 받아 수행하였다.

3. 생체시료 분석

참여자들로부터 수집한 소변시료는 현장에서 분주 후 즉시 냉장 상태로 보관하여 분석 기관으로 이송하였다. 시료 이송은 -4°C에 보관 후 진행하였으며, 분석 전까지 -70°C에 냉동 보관하여 시료의 안정성을 확보하였다. 채취된 소변 시료 분석은 국민환경보건기초조사 VOCs 분석 지정기관(Smartive Co., Gyeonggi-do, Korea)에서 수행하였으며, 분석 항목은 t,t-MA

와 BMA 2종이다.

LC-MS Grade Water에 Acetic Acid (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) 0.01%로 제조하여 이동상을 만든 뒤, 이동상 용매 375 μL 와 소변 100 μL , 그리고 내부표준물질 25 μL 를 첨가하여 충분히 혼합하였다. 혼합한 용매를 원심 분리하여 상층액을 고성능액체크로마토그래피(Nexera XR LC-20AD, Shimadzu, Kyoto, Japan) 텐덤 질량분석기(Triple Quad 5500 [API 5500], Sciex, Framingham, MA, USA)로 분석하였다. 검출한계(Limit of Detection, LOD)는 t,t-MA 0.585 $\mu\text{g/L}$, BMA 0.044 $\mu\text{g/L}$ 로 매질바탕시료에 검량선용 표준용액 중 최저 농도수준의 표준물질을 첨가한 시료 7개를 분석하여 결과 값의 표준편차에 3.14를 곱한 값을 검출한계로 설정하였다. LOD 미만의 값은 LOD/ $\sqrt{2}$ 로 처리하여 분석을 진행하였다. 정도 관리는 NIST (National institute of standards and technology, Gaithersburg, MD, USA)사의 인증표준 QC 물질 두가지를 각각 3번씩 분석하였다. 정확도는 95.9~107.0%로 기준 값 $\pm 20\%$ 이내, 정밀도는 1.9~6.8%로 10% 이내로 적합범위를 인정받았다.

4. 통계분석

부산지역의 대기오염물질에 대한 분포를 확인하기 위해 2011년부터 2020년까지 10년간 대기환경자료를 분석하였다. 분석은 Kriging 방법을 이용하였고, 10년간(2011년~2020년) 그리고 3년간(2018년~2020년) PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 의 평균을 산출하였다. Grid 파일 생성 후 부산시 분포도를 작성하여 고농도 지역을 시각화하였다. 해당 고농도 지역 연구 참여자의 요 시료를 활용하여 체내 VOCs 농도 및 분포를 확인하였다. 정규성 확보를 위해 t,t-MA 및 BMA 농도는 자연로그로 변환하여 분석을 수행하였다. 기하평균, 95% 신뢰구간을 산출하여 농도분포를 확인하였고, 400명의 대상자 중 요 중 크레아티닌 농도가 WHO 참고 구간(0.3~3.0 g/L)²⁴⁾을 벗어나는 참여자는 분석에서 제외하였다. 참여자의 체내 VOCs 대사체 농도에 대한 영향 요인을 확인하기 위해 일반선형회귀분석을 실시하였다. 체내 t,t-MA와 BMA 농도 각각에 대하여 성별, 연령, 거주기간, 체질량지수, 흡연 및 음주여부, 월 가구 수입, 도로와 거주지의 거리, 거주지 인접도로의 통행량 인식도를 독립변수로 설정하여 다변량 회귀분석을 실시하였다. 통계분석은 SAS 9.4 (SAS

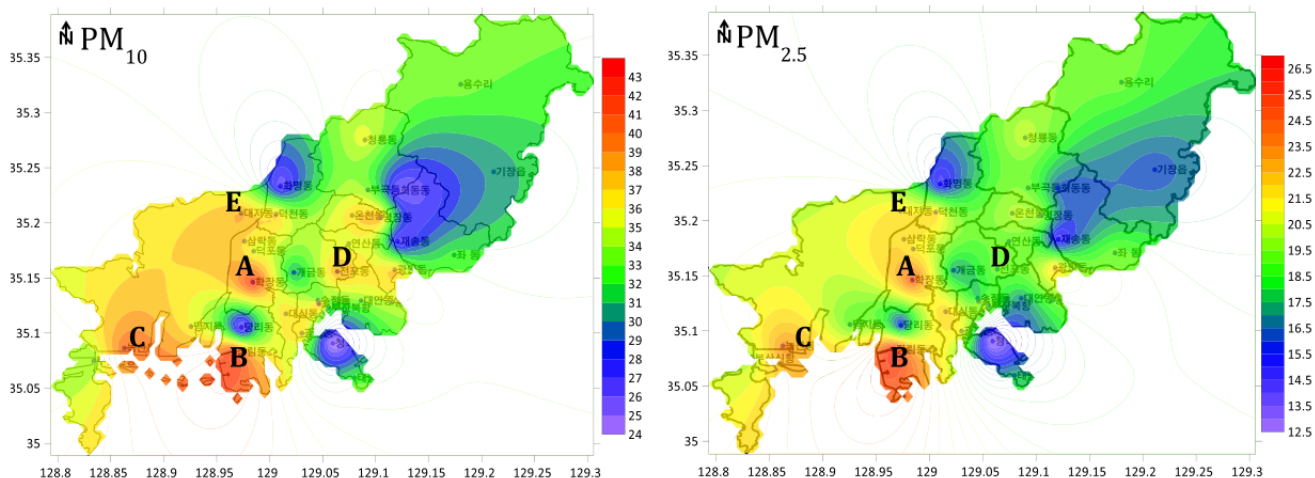


Fig. 1. Average fine dust spatial distribution in Busan for 3 years (2018~2020)

Table 1. PM_{10} average analysis ranking in Busan for 3 years (2018~2020) (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Rank	Point	Year		
		2018	2019	2020
			Median (min, max)	
1	A, western: Industrial area	53.00 (5.00, 296.00)	38.00 (2.00, 244.00)	33.00 (2.00, 260.00)
2	B, western: Industrial area	52.00 (6.00, 177.00)	39.00 (2.00, 241.00)	33.00 (2.00, 389.00)
3	C, western: Industrial area	44.00 (7.00, 191.00)	37.00 (2.00, 261.00)	33.00 (3.00, 167.00)
4	D, central: residential area	49.00 (10.00, 152.00)	35.00 (2.00, 252.00)	29.00 (2.00, 207.00)
5	E, western: residential area	46.00 (4.00, 179.00)	34.00 (2.00, 229.00)	25.00 (2.00, 127.00)

Institute, Cary, NC, USA)를 이용하였고 통계적 검정은 유의수준 5% 미만에서 실시되었다.

III. 결 과

1. 부산 내 미세먼지 고농도 지역 선정

Fig. 1은 부산지역 내 3년간(2018년~2020년) PM₁₀ 및 PM_{2.5} 미세먼지의 농도를 표현한 그림이며 서부권역이 높게 나타났다. 2011년부터 2020년까지 부산지역의 10년간 PM₁₀ 미세먼지 평

균은 40.87 µg/m³이었다. 권역별로 살펴보면, 서부권역과 중부권역이 높은 농도를 보였다. 2015년부터 2020년까지 5년간 PM_{2.5} 미세먼지 평균은 22.03 µg/m³로 서부권, 중부권뿐 아니라 남부권역의 일부 지역도 높은 농도를 보였다. 2018년부터 2020년까지 3년간 PM₁₀ 미세먼지 평균은 34.54 µg/m³, PM_{2.5} 미세먼지 평균은 19.53 µg/m³로 앞선 10년, 5년 평균에 비해 농도가 감소되었다. Table 1은 부산지역 내 2018년부터 2020년까지 3년간 PM₁₀ 미세먼지 평균 농도가 높은 지역 5곳에 대해 최솟값, 중위수, 최댓값을 나타냈다. A지역의 PM₁₀ 미세먼지 농도는 2018년에 중위수 53.00 µg/m³, 최댓값 296.00 µg/m³로 나타났다. B지역과 C지역의 PM₁₀ 미세먼지 농도 중위수는 각각 52.00 µg/m³, 44.00 µg/m³였다. 따라서 PM₁₀ 미세먼지 평균 농도가 42.50 µg/m³로 가장 높은 대기측정망 반경 2 km 내 지역인 A지역을 조사지역으로 선정하였다.

Table 2. Baseline characteristics of study population (n, %)

Variable	Categories	Total (n=400)
Sex	Male	101 (25.3)
	Female	299 (74.8)
Age	<50	21 (5.3)
	50~59	60 (15.0)
	60~69	159 (39.8)
	≥70	160 (40.0)
Total	Mean±SD	66.46±11.07
Residence (year)	<10	66 (16.5)
	≥10	333 (83.3)
Total	Mean±SD	24.03±13.14
Household monthly income (10,000 KRW)	<100	186 (46.5)
	100~199	80 (20.0)
	200~299	53 (13.3)
	300~399	34 (8.5)
	≥400	22 (5.5)
BMI (kg/m ²)	<18.5	4 (1.0)
	18.5~22.9	105 (26.3)
	23~24.9	81 (20.3)
	≥25	210 (52.5)
Total	Mean±SD	25.31±3.38
Smoking	Yes	39 (9.8)
	No	361 (90.3)
Drinking	Yes	178 (44.5)
	No	222 (55.5)
Road distance (M)	<50	65 (16.3)
	50~99	80 (20.0)
	100~499	194 (48.5)
	≥500	61 (15.3)
Traffic cognition	Few	28 (7.0)
	Normal	77 (19.3)
	Many	196 (49.1)
	Numerosity	96 (24.1)

Excluded from analysis if survey was missing (residence n=1, traffic cognition n=3).

2. 대상자 인구학적 특성

본 연구 참여자의 인구학적 특성은 Table 2와 같다. 연구 참여자는 총 400명으로 남성 101명(25.3%), 여성 299명(74.8%)으로 여성의 비율이 높았다. 참여자의 평균 연령은 66세로, 70세 이상(40.0%), 60대(39.8%), 50대(15.0%), 50세 미만(5.3%) 순으로 나타났다. 연구지역 내 참여자의 평균 거주기간은 24년 이었고 10년 이상 거주(83.3%), 10년 미만 거주(16.5%)로 영향권 지역에 10년 이상 거주한 참여자 비율이 높았다. 흡연 여부는 비흡연자(90.3%), 흡연자(9.8%)로 비흡연자의 비율이 높게 나타났고, 음주 여부 또한 비음주자(55.5%), 음주자(44.5%)로 비음주자의 비율이 높게 나타났었다. 참여자 거주지에서 시내 버스가 다니는 도로까지의 거리는 100 m에서 499 m (48.5%), 50 m에서 99 m (20.0%), 50 m 미만(16.3%), 500 m 이상 (15.3%) 순으로 나타났으며, 참여자 거주지에서 가장 인접한 도로의 통행량에 대한 인식도를 확인한 결과 많음(49.1%), 아주 많음(24.1%), 보통(19.3%), 적음(7.0%) 순으로 참여자의 절반 이상이 거주지 인접 도로의 통행량이 많다고 인식하고 있음을 확인하였다.

3. 생체시료 내 VOCs 대사체 농도 분포

Table 3은 연구 참여자의 특성에 따른 체내 요 중 VOCs 대사체 t,t-MA와 BMA의 농도를 분석한 결과이다. 전체 t,t-MA 농도 기하평균 값은 71.15 µg/g creatinine (95% CI: 65.26, 77.57)으로 나타났다. 성별에 따른 t,t-MA 기하평균 농도 값은 남성 72.04 µg/g creatinine (95% CI: 60.96, 85.13), 여성 70.82 µg/g creatinine (95% CI: 63.98, 78.40)으로 나타났다. 거주기간에 따른 t,t-MA의 기하평균 값은 10년 이상 거주한 참여자 73.72 µg/g creatinine (95% CI: 67.02, 81.09), 10년 미만 거주한 참여자 61.22 µg/g creatinine (95% CI: 49.80, 75.26)으로 10년 이상 거주한 참여자의 기하평균 값이 더 높

Table 3. Distribution of concentrations of VOCs in urine (creatinine adjust) (unit: $\mu\text{g/g}$ creatinine)

		N	GM (95% CI)	Percentiles			
				25th	50th	75th	95th
t,t-MA	Total	350	71.15 (65.26~77.57)	41.44	65.99	122.67	273.98
	Sex						
	Male	94	72.04 (60.96~85.13)	38.47	78.27	127.40	244.29
	Female	256	70.82 (63.98~78.40)	41.65	63.20	117.40	318.12
	Age						
	<50	20	59.23 (39.50~88.79)	30.75	53.62	102.49	287.61
	50~59	51	64.22 (49.92~82.61)	37.98	54.52	119.24	318.12
	60~69	136	76.17 (66.76~86.91)	45.50	73.21	124.68	259.06
	≥ 70	143	70.96 (61.86~81.39)	40.47	61.79	123.34	267.73
	Residence						
	<10	61	61.22 (49.80~75.26)	38.90	54.12	115.18	221.93
	≥ 10	288	73.72 (67.02~81.09)	41.79	68.43	123.46	318.12
	Smoking						
	Yes	36	105.02 (83.87~131.51)	78.07	120.94	157.00	271.47
	No	314	68.04 (62.07~74.59)	39.46	61.95	115.13	303.06
	Drinking						
	Yes	163	68.06 (59.99~77.21)	39.08	64.52	122.67	255.23
No	187	73.96 (65.64~83.32)	41.69	66.70	125.76	303.06	
BMA	Total	347	7.00 (6.22~7.86)	3.52	6.53	12.64	59.75
	Sex						
	Male	92	5.69 (4.59~7.05)	2.83	5.89	10.07	29.57
	Female	255	7.54 (6.56~8.66)	3.74	6.80	14.67	72.63
	Age						
	<50	20	1.98 (1.21~3.24)	1.01	2.49	4.07	7.86
	50~59	51	5.56 (4.09~7.55)	2.75	4.51	9.09	44.22
	60~69	134	7.24 (6.08~8.61)	3.57	7.18	13.60	37.94
	≥ 70	142	8.79 (7.35~10.52)	4.44	7.72	14.90	75.36
	Residence						
	<10	60	6.78 (5.12~8.98)	3.50	6.11	12.65	79.87
	≥ 10	286	7.03 (6.17~8.00)	3.56	6.65	12.44	44.22
	Smoking						
	Yes	36	5.87 (3.94~8.73)	2.90	5.89	9.75	76.16
	No	311	7.14 (6.32~8.07)	3.56	6.71	13.54	44.22
	Drinking						
	Yes	160	6.93 (5.79~8.30)	3.52	6.34	13.63	43.13
No	187	7.05 (6.04~8.23)	3.57	6.80	12.41	72.98	

Excluded from analysis if samples outside of the WHO standard concentration of creatinine of 0.3~3 g/L (t,t-MA n=50, BMA n=53).

SD: Standard deviation, GM: Geometric mean, CI: Confidence interval, t,t-MA: trans, trans-muconic acid, BMA: N-Acetyl-S-(benzyl)-L-cysteine.

았다. 흡연 여부에 따른 t,t-MA 기하평균 값은 흡연자 105.02 $\mu\text{g/g}$ creatinine (95% CI: 83.87, 131.51), 비흡연자 68.04 $\mu\text{g/g}$ creatinine (95% CI: 62.07, 74.59)으로 흡연자의 기하평균 값이 높게 나타났다. 구운 생선 섭취 빈도에 대해 분석한 결과 거

의 먹지 않는다는 응답자(91.99 $\mu\text{g/g}$ creatinine)가 매일 먹는다는 응답자(90.79 $\mu\text{g/g}$ creatinine)보다 높은 t,t-MA 농도를 보였고 구운 고기 섭취 빈도에 따른 분석 결과도 거의 먹지 않는 응답자가 매일 먹는 응답자에 비해 높은 수준을 보였다.

전체 BMA 농도 기하평균 값은 7.00 µg/g creatinine (95% CI: 6.22, 7.86)으로 나타났다. 성별에 따른 BMA 기하평균 농도 값은 남성 5.69 µg/g creatinine (95% CI: 4.59, 7.05), 여성 7.54 µg/g creatinine (95% CI: 6.56, 8.66)으로 여성의 기하평균 값이 더 높았다. 연령에 따른 BMA 농도 값은 70세 이상 8.79 µg/g creatinine (95% CI: 7.35, 10.52), 60세 이상 70세 미만 7.24 µg/g creatinine (95% CI: 6.08, 8.61), 50세 이상 60세 미만 5.56 µg/g creatinine (95% CI: 4.09, 7.55), 50세 미만 1.98 µg/g creatinine (95% CI: 1.21, 3.24) 순으로 연령이 높아질수록 기하평균 값이 높게 나타났다. 거주기간에 따른 BMA의 기하평균 값은 10년 이상 거주한 참여자 7.03 µg/g creatinine (95% CI: 6.17, 8.00), 10년 미만 거주한 참여자 6.78 µg/g creatinine (95% CI: 5.12, 8.98)으로 10년 이상 거주한 참여자의 기하평균 값이 더 높았다. 구운 생선 섭취 빈도와 구운 고기 섭취 빈도별 BMA 농도의 경향성은 확인되지 않았다.

4. VOCs 대사체 농도 영향 요인 회귀분석

Table 4는 연구 참여자의 체내 t,t-MA 및 BMA 농도에 대한

영향 요인을 확인하기 위해 일반선형회귀분석을 실시한 결과이다. 체내 t,t-MA 농도는 BMI (p=0.0365)와 흡연(p=0.0001)이 유의한 영향을 주는 것으로 분석되었다. 또한, 월 가구 수입 100만원 미만인 참여자를 기준으로, 300만원대 구간 (p=0.0479)과 400만원 이상 구간(p=0.0042)의 참여자들의 체내 t,t-MA 농도가 유의하게 낮은 것을 볼 수 있었다. 성별과 연령 등의 변수에서는 통계적 유의성을 확인할 수 없었다.

체내 BMA 농도에 영향을 주는 변수는 성별(p=0.0202)과 연령(p≤0.0001)으로 분석되었다. BMI와 주요 도로까지의 거리도 통계적으로 유의하진 않았으나 marginal한 연관성을 보였다. 그 외 흡연, 음주, 교통량 등은 체내 BMA 농도에 유의한 영향을 보이지 않았다.

IV. 고 찰

본 연구는 부산 내 미세먼지 고농도 지역을 파악하고, 해당 지역 거주민들을 대상으로 체내 t,t-MA 및 BMA 농도와 미세먼지 노출 수준과의 연관성을 확인하고자 하였다. 조사 참여자

Table 4. Analysis of influencing factors of VOCs in urine

		t,t-MA (n=349)			BMA (n=346)		
		β	SE	p-value	β	SE	p-value
Sex	Male	-0.080	0.113	0.4814	-0.352	0.151	0.0202
	Female	Ref					
Age		-0.003	0.005	0.5731	0.031	0.006	<0.0001
Residence		0.005	0.003	0.1655	0.007	0.005	0.1237
BMI		0.028	0.013	0.0365	-0.033	0.017	0.0607
Smoking	Yes	0.626	0.161	0.0001	0.010	0.214	0.9634
	No	Ref					
Drinking	Yes	-0.048	0.093	0.6043	0.198	0.123	0.1088
	No	Ref					
Traffic cognition	Normal	-0.003	0.112	0.9764	-0.107	0.149	0.4710
	Many	-0.180	0.138	0.1954	0.077	0.185	0.6785
	Numerosity	-0.068	0.189	0.7182	0.139	0.249	0.5779
Household monthly income (10,000 KRW)	Few	Ref					
	100~199	-0.263	0.124	0.0339	0.105	0.164	0.5202
	200~299	-0.127	0.144	0.3787	0.245	0.190	0.1972
	300~399	-0.359	0.181	0.0479	0.205	0.238	0.3900
Road distance (M)	≥400	-0.676	0.235	0.0042	-0.555	0.309	0.0732
	<100	Ref					
	50~99	0.220	0.148	0.1378	-0.126	0.197	0.5229
Road distance (M)	100~499	-0.107	0.126	0.3965	-0.280	0.167	0.0943
	≥500	0.133	0.157	0.3973	-0.401	0.210	0.0557
	<50	Ref					

Multiple general linear regression analysis.

Generalized linear models were used to examine the associations between VOCs and baseline characteristics of study population.

Excluded from analysis if survey was missing (t,t-MA n=1, BMA n=4).

SE: standard error, t,t-MA: trans, trans-muconic acid, BMA: N-Acetyl-S-(benzyl)-L-cystein.

의 체내 t,t-MA 및 BMA 농도 분석 결과, 두 물질 모두 국내 일반인구집단 평균보다 높게 나타났다. 회귀분석 결과 체내 t,t-MA 농도는 BMI와 흡연 여부, 월 가구 수입 항목에서 통계적 유의성을 확인할 수 있었고 체내 BMA 농도는 성별과 연령 항목에서 통계적 유의성을 나타냈다.

부산지역 내 미세먼지 관련 연구들 중, 에어코리아 2014년부터 2019년까지 자료를 이용하여 공업지역의 PM₁₀ 농도(mean: 49.0 µg/m³)가 주거지역의 PM₁₀ 농도(mean: 41.7 µg/m³)보다 높았음을 제시한 연구가 있었다.²⁵⁾ 흥미롭게도 선행연구에서 제시한 미세먼지 고농도 공업지역이 본 연구의 조사대상 지역과 일치하는 A지역임을 확인하였다. 본 연구에서 2018~2020년의 A지역 PM₁₀ 농도는 42.5 µg/m³로 가장 높게 나타났으며 이는 차량 이동량, 도장시설 및 공장 산재 등 산업지역의 특성으로부터 기인한 것으로 보인다.^{25,26)}

미세먼지 고농도 지역의 경우 미세먼지 속 포함되어 있는 VOCs 배출량도 증가하게 되며 다양한 형태로 배출되는 VOCs는 대기에 영향을 주고 있다.²⁷⁾ VOCs는 대부분 호흡을 통하여 인체에 유입되며, 대사체 형태로 요를 통해 배설된다.²⁸⁾ 대기 중 VOCs에 의한 호흡기와 건강영향을 파악한 연구에서는 산업단지에서 배출되는 VOCs에 대한 노출이 기관지염, 천식 등 만성하기도 호흡기계 증상을 증가시키고 산업단지와 인접할수록 VOCs 농도가 높음을 보고하였다.²⁹⁾ 또한 부산 내 산업지역의 표준화 의료이용률비를 확인한 결과, 본 연구 산업지역 영향권이 비영향권에 비해 호흡기 질환으로 인한 표준화 의료이용률비가 높게 나타나,³⁰⁾ 산업지역 인근 주민의 VOCs 노출에 의한 건강영향을 확인할 필요가 있음을 보여준다. 이에 본 연구에서는 조사 참여자의 요 시료를 채취하여 체내 VOCs 농도 분석을 통해 건강영향을 확인하였다.

본 연구 참여자의 체내 t,t-MA 및 BMA 농도 수준이 국내·외 각 일반인구집단을 대표하는 기하평균 값보다 높은 수준으로 나타났다(Fig. 2). 연구 참여자의 요 중 체내 t,t-MA 기하평균 농도 값은 71.15 µg/g creatinine으로 국내 일반인구집단을 대표하는 국민환경보건기초조사 4기 기하평균 값인 64.60 µg/g creatinine보다 높은 수준이었다. 또한 국외 연구 결과 중 NHANES (National Health and Nutrition Examination Survey) 기하평균 값인 61.30 µg/g creatinine, CHMS (Canadian Health Measures Survey) 기하평균 값인 60.00 µg/g creatinine 보다도 높은 수준으로 나타났다. 연구 참여자의 체내 BMA 기하평균 농도 값은 7.00 µg/g creatinine으로, 4기 국민환경보건기초조사 기하평균 값 5.02 µg/g creatinine보다 높게 나타났다. 또한 NHANES 기하평균 값인 6.44 µg/g creatinine보다 높은 수준이었다. 이는 본 연구 대상 지역이 1960년대부터 산업단지가 조성된 곳으로 공장 밀집지역이며,³⁰⁾ 그로부터 높아진 미세먼지 및 고농도 VOCs에 대한 노출 영향을 받았을 것으로 판단된다.

VOCs 물질 중 하나인 벤젠(Benzene)은 사람에게 암을 유발하는 물질로 알려져 있으며, 특히 벤젠 노출의 주요 원인은 담배 연기이다.¹³⁾ t,t-MA도 흡연에 의해 크게 영향을 받는 물질로 알려져 있다.³¹⁾ 흡연 여부와 소변 시료 농도와의 연관성을 확인한 국외 선행 연구에서는 흡연자가 비흡연자에 비해 t,t-MA 농도가 높았음을 보고하였다.¹⁶⁾ 본 연구에서 체내 t,t-MA 농도는 흡연 여부 항목에서 통계적 유의성을 확인할 수 있었다. 특히 연구 참여자 중 흡연자의 체내 t,t-MA 농도는 105.02 µg/g creatinine, 비흡연자의 체내 t,t-MA 농도는 68.04 µg/g creatinine으로 나타났다. 이는 흡연자의 체내 t,t-MA 농도가 흡연에 의해 크게 영향을 받고 비흡연자에 비해 높다는 선행 연구 결과와도 일치하였음을 보여주었다.

본 연구에서 체내 t,t-MA 농도는 BMI 집단에 따라 통계적 유의성이 나타났다. 특히 BMI는 당뇨와 상당한 연관성이 있으며,³²⁾ 요 중 t,t-MA 농도가 증가함에 따라 당뇨 위험성 증가가 보고되었다.³³⁾ 또한, 60세 이상 장년층을 대상으로 수행된 연구에서도 요 중 t,t-MA가 인슐린 저항성과 연관되어 있음을 보고하였다.¹⁵⁾ 본 연구 참여자의 60대 이상 비율은 79.8%였으며 요 중 체내 t,t-MA 농도는 71.15 µg/g creatinine으로 국내 일반인구집단보다 높은 수준이었기 때문에 본 연구 참여자들의 당뇨를 포함한 건강영향에 대한 추적조사가 필요하다.

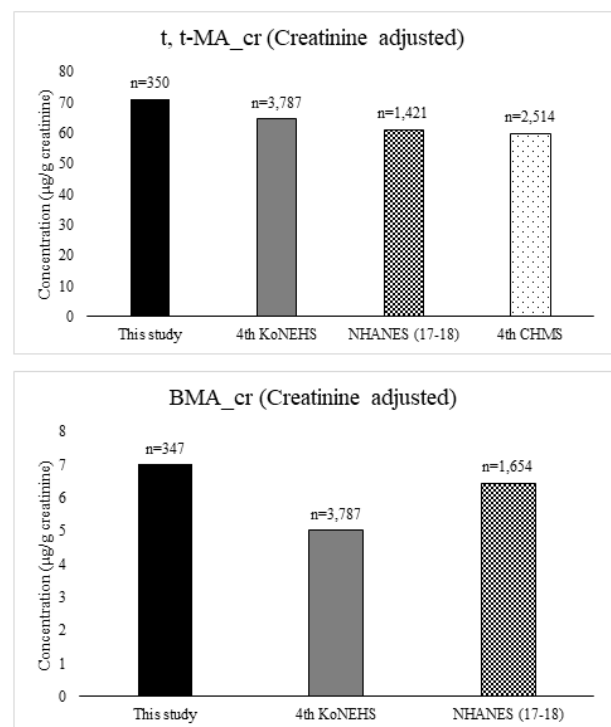


Fig. 2. Compared to domestic and foreign biomonitoring result. The results from the NHANES and CHMS were calculated from the subject over 20, and all participants, respectively.

산업현장에서 광범위하게 사용되는 VOCs 물질 중 하나인 톨루엔(Toluene)은 신경계에 유해한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.¹⁴⁾ 본 연구에서는 톨루엔의 대사산물인 BMA를 측정하였고, 체내 BMA 농도가 성별과 연령에 따라 유의한 차이가 있음을 확인하였다. 이러한 결과와 일치하게, 부산 소재 산단 주민 VOCs 노출 수준 관련 연구에서도 연령이 증가할수록 체내 BMA 농도가 통계적으로 유의하게 증가함을 보고하였다.³⁴⁾ 산단 주민들의 요 중 체내 t,t-MA 농도는 86.96 µg/g creatinine으로 본 연구 참여자들(71.15 µg/g creatinine)에 비해 다소 높았으나, BMA 농도는 3.43 µg/g creatinine으로 본 연구 참여자들(7.00 µg/g creatinine)의 농도가 두배가량 더 높았다. 두 연구 모두 국내·외 일반인구집단을 대표하는 값보다 높게 나타났으며 선행 연구보다 본 연구 참여자의 평균 연령이 높아 체내 BMA 농도가 연령이 증가할수록 유의하게 증가한다는 결과를 보여주었다.

외부환경적 요인 뿐 아니라 실내공기질, 인테리어, 난방, 식생활, 흡연 등의 개별적 요인들이 노출 수준에 영향을 미칠 수 있다.^{34,35)} 한 연구에서는 실내 거주시간이 높은 여성을 대상으로 요 중 t,t-MA 및 BMA 농도를 조사한 결과, 대상자의 체내 t,t-MA는 121.34 µg/g creatinine, BMA는 7.32 µg/g creatinine으로 보고하였다.¹²⁾ 본 연구에서도 최근 6개월 내 주거지의 리모델링 및 수리 여부, 사용하는 연료 종류 등 설문조사를 통해 개별적 요인들로 인한 노출 수준을 파악하였다. 분석 결과 리모델링 및 수리를 하지 않은 참여자의 비율이 92.5%이었고 사용하는 연료의 비율은 가스(91.0%), 석유(7.5%), 석탄 및 연탄(1.0%), 나무(0.5%) 순으로 나타났고 VOCs 체내 농도와의 유의성을 확인할 수 없었다. 본 연구의 모니터링 결과를 기반으로, 향후 연구에서는 주거지역 인근 환경에 의한 노출과 실내 환경적 요인을 모두 고려하여 체내 VOCs 농도의 주 노출요인을 확인하고 감소 대책 마련에 기여하고자 한다.

본 연구는 미세먼지 고농도 지역 파악과 해당 지역 주민 생체 내 VOCs 대사체 측정을 통해 미세먼지로 인한 노출 영향을 확인했다는 점에서 의미가 있다. 다만, 24 hr 소변 대신 spot sample을 수집하였기 때문에 최근 노출에 영향을 받는다는 제한점이 있다. 두 번째로 연구 참여자 다수가 여성이고 60대 이상이므로 해당 지역 전 연령대의 결과로서 일반화하기 어려운 점이 있었다. 마지막으로, 거주지 인근 도로 통행량은 개인의 주관에 따라 응답의 차이가 있을 수 있다. 이러한 제한점들을 고려하여, 향후 연구에서는 실내환경 중 VOCs 농도와 미세먼지 내 VOCs 조성비 분석결과를 확인하여 VOCs 노출원과 생체지표 간의 관계를 명확하게 규명하고자 한다.

V. 결 론

본 연구는 부산 내 미세먼지 고농도 지역의 미세먼지 노출

수준과 VOCs 대사체와의 연관성을 분석하였다. 본 연구 참여자의 체내 t,t-MA 농도는 71.15 µg/g creatinine, BMA 농도는 7.00 µg/g creatinine으로 국내·외 일반인구집단 대비 높은 수준이었고, 체내 t,t-MA 농도는 BMI, 흡연 여부, 월 가구 수입 항목에서, BMA는 성별, 연령 항목에서 유의성이 나타났다. 따라서 후속연구에서는 미세먼지 조성을 비롯해 다양한 영향 요인을 고려하여 바이오모니터링을 수행하고 이에 따른 건강영향을 확인하여 미세먼지 고농도 지역에 대한 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 환경부·한국환경보건학회 환경보건센터 “2023년 환경보건 전문인력 양성사업 위탁사업(환경보건학회)”에서 지원받아 수행된 결과이며, 이에 감사드립니다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

1. Wan Z, Zhu M, Chen S, Sperling D. Pollution: three steps to a green shipping industry. *Nature*. 2016; 530(7590): 275-277.
2. Kim JM, Jo YJ, Yang GH, Heo G, Kim CH. Analysis of recent trends of particulate matter observed in Busan - comparative study on Busan vs. Seoul metropolitan area (I). *J Environ Sci Int*. 2020; 29(2): 177-189.
3. Jeong SY. A study on the perception of Sasang-gu residents on the policy to reduce fine dust [dissertation]. [Busan]: Dong-Eui University; 2020.
4. World Health Organization (WHO). New WHO global air quality guidelines aim to save millions of lives from air pollution. Available: <https://www.who.int/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution> [Accessed October 16, 2023].
5. Shin DC. Health effects of ambient particulate matter. *J Korean Med Assoc*. 2007; 50(2): 175-182.
6. Choe JI, Lee YS. A study on the impact of PM_{2.5} emissions on respiratory diseases. *J Environ Policy Adm*. 2015; 23(4): 155-172.
7. Park OH, Kim HG, Song K, Kim SY, Jo E, Ahn SS, et al. Concentration of hazardous substances in indoor air from vulnerable class facility in Gwangju. *J Korean Soc Living Environ Syst*. 2022; 29(2): 191-199.
8. Kim DJ, Jang HN. Evaluation of indoor air quality of vulnerable class facility in public-use facility. *Korea Soc Environ Adm*. 2019; 25(2): 49-56.
9. Yang SB, Yu MS, Woo KB. A case study on the measurement volatile

- organic compounds and total hydrocarbon concentrations in block paint-shops at a shipyard. *J Environ Sci Int*. 2016; 25(8): 1177-1189.
10. Jang YH, Noh YI, Lee SM, Kim SS. A study on the modification of NH_4^+ -zeolite for improving adsorption/desorption performance of benzene. *Clean Technol*. 2019; 25(1): 33-39.
 11. Son HD, An JG, Ha SY, Kim GB, Yim UH. Development of real-time and simultaneous quantification of volatile organic compounds in ambient with SIFT-MS (selected ion flow tube-mass spectrometry). *J Korean Soc Atmos Environ*. 2018; 34(3): 393-405.
 12. Woo K, Park H, Kang T, Kim G, Jeon J, Jang B, et al. Concentration of volatile organic compounds (VOCs) in ambient air and level of residents in industrial area. *J Korean Soc Occup Environ Hyg*. 2015; 25(1): 104-114.
 13. Bahadar H, Mostafalou S, Abdollahi M. Current understandings and perspectives on non-cancer health effects of benzene: a global concern. *Toxicol Appl Pharmacol*. 2014; 276(2): 83-94.
 14. Lee B, Heo J, Jung D, Kim S, Ryu HS, Choi MJ, et al. Correlation relationship between personal exposure and biological monitoring for airborne toluene in an industrial complex and general environments. *J Environ Health Sci*. 2017; 43(4): 324-333.
 15. Park HS, Seo JC, Kim JH, Bae SH, Lim YH, Cho SH, et al. Relationship between urinary t,t-muconic acid and insulin resistance in the elderly. *Korean J Occup Environ Med*. 2011; 23(4): 387-396.
 16. Lovreglio P, Barbieri A, Carrieri M, Sabatini L, Fracasso ME, Doria D, et al. Validity of new biomarkers of internal dose for use in the biological monitoring of occupational and environmental exposure to low concentrations of benzene and toluene. *Int Arch Occup Environ Health*. 2010; 83(3): 341-356.
 17. Kim JH, Moon N, Heo SJ, Kwak JM. Effects of environmental health literacy-based interventions on indoor air quality and urinary concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons, volatile organic compounds, and cotinine: a randomized controlled trial. *Atmos Pollut Res*. 2024; 15(1): 101965.
 18. Ministry of Environment. Fifth Korean National Environmental Health Survey... concentration survey of 64 types of hazardous substances. Available: <https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=10525&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=1471060> [Accessed October 16, 2023].
 19. Yoo H, Kim J, Shin J, Kim Y, Min S, Jegal D, et al. Health vulnerability assessment for PM_{10} due to climate change in Incheon. *J Environ Health Sci*. 2017; 43(3): 240-246.
 20. Maung TZ, Bishop JE, Holt E, Turner AM, Pfrang C. Indoor air pollution and the health of vulnerable groups: a systematic review focused on particulate matter (PM), volatile organic compounds (VOCs) and their effects on children and people with pre-existing lung disease. *Int J Environ Res Public Health*. 2022; 19(14): 8752.
 21. Tsai WT. Toxic volatile organic compounds (VOCs) in the atmospheric environment: regulatory aspects and monitoring in Japan and Korea. *Environments*. 2016; 3(3): 23.
 22. Park J, Song I, Kim H, Lim H, Park S, Shin S, et al. Characteristics of diurnal variation of volatile organic compounds in Seoul, Korea during the summer season. *J Korean Soc Environ Anal*. 2018; 21(4): 264-280.
 23. Kang YH, You S, Kim E, Bae M, Son K, Kim S. Local authority-level source apportionments of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations based on the CAPSS 2016: (VIII) Busan and Gyeongnam. *J Korean Soc Atmos Environ*. 2021; 37(6): 871-890.
 24. Cocker J, Mason HJ, Warren ND, Cotton RJ. Creatinine adjustment of biological monitoring results. *Occup Med (Lond)*. 2011; 61(5): 349-353.
 25. Choi SH, Choi SW, Kim DY, Cha YW, Park SW, Lee SI, et al. Evaluation of health risk from concentrations of heavy metal in PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ particles at Sasang Industrial Complex of Busan, Korea. *J Environ Anal Health Toxicol*. 2021; 24(3): 133-148.
 26. Jeon BY, Ahn YS, Lee MH. Analyzing spatio-temporal distribution characteristics of factory buildings within Sasang Industrial area in Busan. *J Urban Des Inst Korea Urban Des*. 2022; 23(2): 25-37.
 27. Baek SO, Kim SH, Kim MH. Characterization of atmospheric concentrations of volatile organic compounds in industrial areas of Pohang and Gumi cities. *J Environ Toxicol*. 2005; 20(2): 167-178.
 28. Jo SJ, Shin DC, Chung Y, Lee DH, Breyse PN. The development of exposure assessment tools for risk assessment of volatile organic compounds. *Korean J Environ Toxicol*. 2002; 17(2): 147-160.
 29. Lee CW, Choi SH, Hong SC, Chung EK, Chung YT, Yang WH, et al. Health risk assessment and VOCs levels of residents in industrial area. *J Environ Sci*. 2011; 20(11): 1373-1382.
 30. Kim GB, Lee BE, Chang JY, Kang TS, Yoon MR, Jo HJ, et al. Environmental health assessment on the general industrial complex (VI). Incheon: National Institute of Environmental Research; 2016 Dec. Report No.: NIER-RP2016-298.
 31. Fustinoni S, Buratti M, Campo L, Colombi A, Consonni D, Pesatori AC, et al. Urinary t,t-muconic acid, S-phenylmercapturic acid and benzene as biomarkers of low benzene exposure. *Chem Biol Interact*. 2005; 153-154: 253-256.
 32. Jung AR, Kim SA, Kim KT, Lee DT, Yoon KH, Choi YH. The relationship between smartphone-based physical activity and BMI in type 2 diabetes mellitus patients. *J Korean Soc Wellness*. 2020; 15(1): 389-398.
 33. Yang EH, Nam DJ, Lee HC, Shin SS, Ryoo JH. Association between urinary trans, trans-muconic acid and diabetes: a cross-sectional analysis of data from Korean National Environmental Health Survey (KoNEHS) cycle 3 (2015-2017). *Ann Occup Environ Med*. 2021; 33: e35.
 34. Yoon MR, Jo HJ, Kim GB, Chang JY, Lee CW, Lee BE. Exposure to PAHs and VOCs in residents near the Shinpyeong-Jangrim Industrial Complex. *J Environ Health Sci*. 2021; 47(2): 131-143.
 35. 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.

〈저자정보〉

주현지(석사과정), 이승호(교수), 민재희(박사과정), 황용식(박사), 홍영습(교수)