

우리나라 성인의 체내 PAHs 및 벤젠 대사체 노출수준 및 영향요인 분석 - 국민환경보건 기초조사(2009-2017) -

권영민 · 주영경 · 박충희 · 김성연 · 최경호* · 이철우 · 유승도 · 유지영†
국립환경과학원 환경보건연구과, *서울대학교 보건대학원 환경보건학과

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) -

Young Min Kwon, Youngkyung Joo, Choong-Hee Park, Sung Yeon Kim, Kyungho Choi*,
Chulwoo Lee, Seung Do Yu, and Jiyoung Yoo†

Environmental Health Research Department, National Institute of Environmental Research
**Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University*

ABSTRACT

Objectives: The aim of this study is to compare exposure levels of PAHs and benzene metabolites in the urine of nationally representative adults in Korea and identify exposure factors in relation to questionnaire results.

Methods: The study analyzed PAHs and benzene metabolites in the urine of adults aged 19 and older recruited in Cycles 1-3 of the Korean National Environmental Health Survey (KoNEHS). Participants were administered questionnaires on demographic characteristics, lifestyle, and dietary habits to identify the association with exposure levels to environmental chemicals.

Results: 1-hydroxypyrene and t,t-muconic acid levels in this study were higher than those in large-scale biomonitoring conducted in other countries (the US and Canada), while 2-hydroxynaphthalene levels were lower. Most environmental chemicals exhibited significant differences depending on gender and age, and exposure levels tended to increase with grilled food intake. In addition, variables such as smoking, distance between home and a road, travelling on public transportation, and ventilation time had a significant effect on exposure to environmental chemicals.

Conclusions: The importance of this study lies in utilizing the representative results of KoNEHS, large scale biomonitoring conducted in Korea over roughly ten years. Variables including smoking and roasted food intake were found to affect exposure to PAHs and benzene, which can be used to establish baseline exposure levels of environmental chemicals in Korea.

Key words: Biomonitoring, Adult, PAHs, Benzene, KoNEHS

I. 서 론

우리나라에서는 2008년 환경보건법을 제정하였으며, 이에 따라 2009년부터 우리나라 국민의 생체 내

환경유해인자 농도를 확인하기 위하여 국가단위 바이오모니터링 사업인 국민환경보건 기초조사를 3년 단위로 실시하고 있다.¹⁾ 제1기 조사를 시작으로 약 10년 이상 지속되어 왔으며, 환경성질환 예방 관리

†**Corresponding author:** Environmental Health Research Division, National Institute of Environmental Research, Hwankyung-ro 42, Seo-gu, Incheon, 22689, Republic of Korea, Tel: +82-32-560-7129, Fax: +82-32-568-2035, E-mail: yjy0216@korea.kr
Received: 17 September 2019, Revised: 2 October 2019, Accepted: 4 October 2019

를 위해 장기간 지속적으로 관리가 필요한 물질 뿐 아니라 사회적 이슈 및 노출 우려가 있는 물질을 장기적으로 확대해왔다.

외국의 국가단위 대규모 바이오모니터링 조사는 미국 National Health and Nutrition Survey (NHANES), 캐나다 Canadian Health Measures Survey (CHMS), 독일 German Environmental Survey (GerES) 등이 대표적으로 실시되고 있으며, 국민환경보건 기초조사는 우리나라 국민의 환경유해 물질 노출수준의 대략값을 파악하여 외국의 노출수준과의 비교 및 평가를 진행하고 있다.²⁻⁴⁾

본 사업에서는 다환방향족탄화수소(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 중 pyrene의 대사체인 1-Hydroxypyrene (1-OHP)와 naphthalene의 대사체인 2-Hydroxynaphthalene (2-NAP) 및 휘발성유기화합물(Volatile organic compounds, VOCs) 중 벤젠의 대사체인 t,t-Muconic acid(tt-MA) 등이 제3기 조사까지 모니터링 항목으로 유지되어왔다.

다환방향족탄화수소는 순수화학물질로서 원유, 화산, 화재 등 자연적으로 발생되기도 하지만, 자동차 배기가스, 석탄연소 배출물, 담배연기 등 인위적 발생이 더욱 심각하다. 또한 식품을 굽고 튀기는 등 조리과정에서 탄화에 의해 발생되기도 하며, 이러한 요인들로 인한 호흡노출 및 경구노출이 주요 노출경로로 알려져 있다.⁵⁾ 발암성 물질을 포함하고 있는 PAHs의 종류가 전체의 70~90%를 차지하며, 대기 중 PAHs 농도가 증가하면 암 발생율이 증가한다는 연구결과가 있다.^{6,7)}

휘발성유기화합물 중 벤젠은 방향족화합물 생산에 주로 사용되고, 순수벤젠은 염료, 고무, 합성섬유, 농약, 방충제 등 다양한 분야에 이용되어 왔으나, 그 독성이 알려지며 사용이 지속적으로 줄어들고 있다.^{8,9)} 자동차와 사업장 등에서 사용되는 연료에서 주로 발생되어 대기 중으로 확산되며, 유류 방출 등을 통해 수질오염을 일으킬 수 있다.⁹⁾ 벤젠의 노출을 평가하기 위한 생물학적 모니터링에서 가장 유용한 지표는 소변의 대사산물 중 t,t-뮤콘산이다.¹⁰⁾ 물론 페놀, 하이드로 퀴논, S-페닐머캅토산 등 다른 대사체도 존재하지만, 이 중 t,t-뮤콘산은 가장 신뢰성 있고 상대적으로 편리한 바이오마커로 인식되고 있다.¹¹⁻¹³⁾ 또한 미국산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)는

벤젠에 대한 노출 평가를 위한 적절한 바이오 마커로서 t,t-뮤콘산을 권장하고 있다.¹⁴⁾

본 연구는 제1~3기 국민환경보건 기초조사 대상자 중 성인을 대상으로, 전 조사기수에 포함된 환경유해인자인 일부 PAHs 및 벤젠 대사체의 각 조사기수별 노출수준 및 경향을 파악하고, 설문결과를 활용한 연계분석을 통해 노출영향요인을 확인하고자 하였다.

II. 연구내용 및 방법

1. 연구 대상 선정

2009년부터 시작된 국민환경보건 기초조사는 각 조사기수별로 3년간 만 19세 이상 성인 약 6,000명을 조사하였으며, 제3기 조사부터는 어린이, 청소년을 추가하여 조사대상 범위를 확대하였다. 제1기 조사는 2005년 인구주택총조사 자료를, 제2~3기 조사는 2010년 인구주택총조사 자료를 활용하였으며, 조사구를 기반으로 가구형태가 ‘일반가구’인 대상을 표본으로 하였다. 인구 제곱근 비례와 2단계 층화 계통 추출을 이용하여 표본을 설계하였으며, 제1기는 350개 조사구에서 성인 6,311명, 제2기는 400개 조사구에서 성인 6,478명, 제3기는 233개 조사구에서 성인 3,787명을 조사 완료하였다. 본 조사는 국립환경과학원 생명윤리위원회(IRB) 승인을 받았으며, 사전 동의를 받은 대상자에 한하여 조사를 진행하였다.

2. 생체시료 수집 및 분석

PAHs 대사체 및 벤젠 대사체 분석을 위한 소변시료 채취는 현장에서 일시노를 채취하였으며, 채취된 시료는 이송 시 온도유지를 확인하기 위해 온도 데이터근거시스템을 활용하여 안정성을 확보하였다. 이송된 시료는 채취 당일에 각 환경유해인자별 전용 용기에 분취되었으며, 분석 전까지 -20°C 에 보관하였다.

PAHs 대사체 2종은 시료에 가수분해효소(β -glucuronidase/arylsulfatase enzyme)를 첨가하여 배양 후 고상 추출하여 N-tert-butyl dimethylsilyl-N-methyl-trifluoro-acetatamide (BSTFA) 유도체화 시약으로 유도체화 하였으며, 전처리된 시료는 GC-MS를 이용하여 동시분석이 이루어졌다. 벤젠 대사체는 SPE 카트리지를 이용하여 고상추출 후 LC-MS/MS를 이용하여 분석하였다.¹⁵⁻¹⁷⁾

Table 1. Detection rate and detection limits of each chemicals

Chemical	CAS No.	Cycle 1		Cycle 2		Cycle 3	
		Detection rate (%)	LOD* (µg/L)	Detection rate (%)	LOD (µg/L)	Detection rate (%)	LOD (µg/L)
Polycyclic aromatic hydrocarbon metabolites							
1-Hydroxypyrene	5315-79-7	96.3	0.015	98.3	0.015	74.7	0.015
2-Hydroxynaphthalene	135-19-3	99.9	0.05	99.6	0.05	99.1	0.05
Volatile organic compounds metabolites							
trans,trans-Muconic acid	3588-17-8	99.6	3	100	2.3	99.9	2.3

*Limit of detection

연2회 이상 국내·외 정도관리 프로그램(독일 G-EQUAS, 국립환경과학원 숙련도평가 등)에 참여하였으며, 매년 주기적인 내부정도관리(검정곡선의 직선성 및 기울기, 검출한계, 정확도, 정밀도 등)를 실시하여 분석결과의 신뢰도를 확보하였다.

검출한계는 해당물질을 검출할 수 있는 최소한의 농도로, 바탕농도 수준의 동일시료 7개를 제조 후 분석하여 얻은 결과의 표준편차의 3.14배에 해당하는 값인 방법검출한계(Method Detection Limit, MDL)로 나타냈으며, 각 조사기수별 검출한계와 검출율은 Table 1과 같다.

3. 설문조사

환경유해인자의 노출요인과 경로 분석을 위한 설문조사는 인구, 사회, 경제학적 특성과 교통수단 이용, 거주환경, 최근의 생활 및 식습관 등을 파악하기 위하여 현장에서 1:1 대면조사를 실시하였다. 제1기 조사는 146문항, 제2기 조사 142문항, 제3기 조사 163문항으로 각 조사기수별 유해물질 종류에 따른 환경 및 특성에 대한 설문이 추가되거나 개정되었다.

본 연구에서는 성별, 나이, 흡연여부, 음주여부, 구운 고기와 구운 생선의 섭취빈도 및 3일 이내 섭취 여부, 거주지와 도로와의 거리(50 m 기준), 환기시간(1시간 기준), 대중교통 이용여부, 주로 생활하는 장소에서의 개보수 작업 여부 등의 설문결과를 이용하여 환경유해인자의 노출경로를 파악하였다.

4. 통계 분석

통계분석은 층화변수, 집락변수, 가중치 등을 반영한 SAS 분석법(PROC SURVEFREQ, PROC SURVEYMEANS)을 사용하였다. 본 연구에서 얻어

진 생체시료 중 환경유해물질 대사체 농도는 산술평균과 기하평균, 95백분위수의 95% 신뢰구간으로 나타냈으며, 측정값이 불검출인 경우, LOD/√2 로 추정하여 활용하였다. 생체시료별 농도와 설문조사 결과 간 각 지표의 유의성은 ANOVA와 t-test로 확인하였으며, p값이 0.05 미만인 경우를 통계적으로 유의한 것으로 간주하였다. 요 중 크레아티닌 농도가 0.3 g/L 미만 및 3.0 g/L을 초과하는 대상자는 제외 후 분석하였으며, 모든 통계분석은 SAS software(version 9.4)를 사용하였다.

III. 연구 결과

1. 대상자의 인구학적 특성

본 연구에서 활용한 각 조사기수별 대상자의 인구학적 특성은 Table 2와 같으며, 크레아티닌 농도의 적합 범위(0.3~3.0 g/L)를 벗어나는 참가자를 제외하여 최종적으로 제1기 5,700명, 제2기 5,550명, 제3기 3,338명을 대상으로 하였다. 가중치를 적용한 참여율은 제1~3기 모두 남성이 여성에 비해 참여율이 다소 높았고, 제1~2기는 30~40대 참여비율이 높았으며, 제3기는 40~50대 참여비율이 높았다. 또한 시료부족 등의 이유로 각 물질별로 대상자수의 차이가 존재했다.

2. PAHs 및 VOCs 대사체의 노출수준

제1~3기의 각 물질별 농도추이는 Fig. 1과 같다. 1-OHP의 제1기 기하평균은 0.121 µg/L였으며, 제2기에 0.171 µg/L로 다소 증가했으나 제3기에 0.144 µg/L로 비교적 감소되는 경향을 보였다. 미국 NHANES의 0.132 µg/L, 캐나다 CHMS의 0.096 µg/L

Table 2. Characteristics of participants in KoNEHS cycle 1-3

	Cycle 1		Cycle 2		Cycle 3	
	N*	Weighted %	N	Weighted %	N	Weighted %
Total	5,700	100	5,550	100	3,338	100
Gender						
Male	2,744	50.4	2,555	52.2	1,527	52.1
Female	2,956	49.6	2,995	47.8	1,811	47.9
Age						
20-29	672	18.6	477	17.8	250	17.6
30-39	1,077	21.3	920	20.1	489	18.4
40-49	1,229	22.4	1,065	21.7	530	20.0
50-59	1,330	17.8	1,241	19.8	784	20.3
60-60	1,000	10.7	1,118	10.7	827	12.7
≥70	392	9.2	729	9.8	458	11.0

*Number of participants

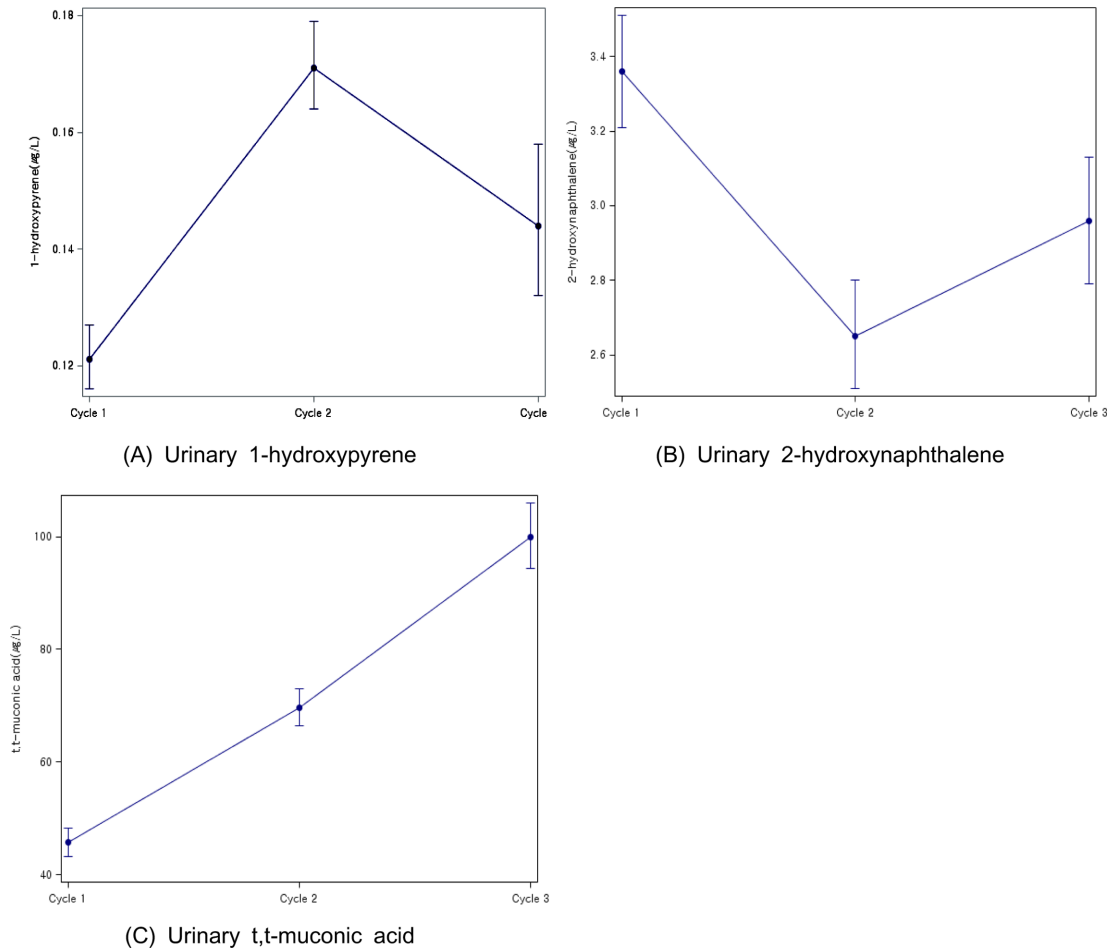


Fig. 1. Temporal trends in measured PAHs and benzene metabolites. Geometric means and 95% confidence interval (error bars) are shown.

L에 비해 다소 높은 것으로 나타났다.^{2,3)} 2-NAP은 제1기에 3.36 µg/L에서 제2기 2.65 µg/L로 감소했다가 제3기 2.96 µg/L로 약간 증가하는 경향을 보였으며, 미국 3.55 µg/L, 캐나다 4.6 µg/L에 비해 낮았다.^{2,3)} t,t-뮤콘산의 경우, 제1기 45.7 µg/L, 제2기 69.6 µg/L, 제3기 100 µg/L로 시간이 지날수록 증가하는 경향을 보였으며, 3기 조사에서 미국 72.8 µg/L, 캐나다 67 µg/L에 비해 비교적 높은 수준을 보였다.^{2,3)}

3. 설문결과를 활용한 노출요인 분석

3.1. 인구학적 특성

남성이 여성에 비해 모든 조사기수에서 소변 중 PAHs와 벤젠의 노출수준이 통계적으로 유의하게 높았으며, 이는 미국 NHANES와 캐나다 CHMS와도 동일한 경향이였다.^{2,3)} 1-OHP와 t,t-뮤콘산의 경우, 연령별로도 유의한 차이를 보였으나, 2-NAP은 제3기에서만 유의한 차이를 보였다.

3.2. 생활 및 식습관

흡연자가 비흡연자에 비해 3종의 환경유해물질의 노출수준이 높았다. 제3기 결과를 보자면, 흡연자의 1-OHP 농도는 0.281 µg/L, 비흡연자는 0.122 µg/L로 2배 이상 차이를 보였고, 2-NAP은 흡연자가 8.07 µg/L로 비흡연자 2.28 µg/L에 비해 3배 이상 높았으며, t,t-뮤콘산은 흡연자 158 µg/L, 비흡연자 89.0 µg/L로 전반적으로 흡연자의 노출수준이 높은 경향을 보였다. 해당 물질의 체내 노출이 흡연자가 비흡연자에 비해 높게 나타나는 경향은 다른 선행 연구에서도 발표된 바 있다.¹⁸⁻²⁰⁾ 또한, 음주행태에 따른 노출수준은 술을 마신다고 응답한 그룹이 음주하지 않는 그룹에 비해 모든 물질에서 높은 경향을 나타냈다.

3일 이내 구운 음식(육류 및 해산물 등)을 섭취한 그룹의 t,t-뮤콘산 평균농도는 제1기 47.9 µg/L, 제2기 73.3 µg/L, 제3기 102 µg/L로 그렇지 않은 그룹의 평균인 제1기 43.8 µg/L, 제2기 67.0 µg/L, 제3기 98.7 µg/L에 비해 노출수준이 높았으며, 각 조사기수별로 2개 그룹 간 결과를 비교했을 때 통계적으로 유의하였다. PAHs 대사체의 경우도 섭취그룹이 통계적으로 유의하지 않았지만 비교적 높은 경향을 보였다. 구운 고기를 주 1회 이상 섭취하는 그룹과 그렇지 않은 그룹을 비교했을 때, 1-OHP는 제1기 조

사에서 주 1회 이상 섭취군의 노출수준이 높았으며 통계적으로 유의하였다. 2-NAP는 모든 조사기수에서 주 1회 이상 섭취군의 노출수준이 높게 나타났으나, 제1기 조사에서는 통계적으로 유의하지 않았다. t,t-뮤콘산은 전반적으로 주 1회 이상 섭취군이 그렇지 않은 그룹에 비해 유의하게 높았다. 2-NAP을 구운 생선을 주 1회 이상 섭취하는 그룹과 그렇지 않은 그룹을 비교했을 때, 제2기와 제3기 조사에서 주 1회 이상 섭취군의 노출수준이 높았으나, 제2기 조사에서만 유의한 결과를 보였다. 또한, 보존제로 사용되는 소르브산이 t,t-뮤콘산으로 대사되어 배설되는 경우도 있으므로,^{21,22)} 소르브산 함유 식품의 최근 섭취여부를 함께 조사하여 보정할 필요가 있다.

3.3. 거주환경 및 교통 이용

거주하는 집과 도로와의 거리를 50 m 기준으로 구분하였을 때, 50 m 미만인 그룹이 50 m 이상인 그룹에 비해 모든 항목에서 높은 경향을 나타냈으며 제1기에서는 모두 유의한 결과를 보였으나, 2-NAP은 제3기에서 상반된 결과를 보였다.

거주하는 집에서의 6개월 이내 개보수작업 여부에 따른 노출수준을 비교했을 때, 1-OHP는 제1기와 제2기 조사에서 개보수 경험이 있는 그룹이 그렇지 않은 그룹에 비해 높은 수준이었으나, 통계적으로 유의하지 않았다. 2-NAP은 제2기와 제3기 조사에서 경험이 있는 그룹이 높은 수준이었으나, 통계적으로 유의하지 않았다. t,t-뮤콘산은 모든 조사기수에서 개보수 경험이 있는 그룹이 높은 수준이었으며, 제1기와 제2기 조사에서 통계적으로 유의하였다.

가정에서의 환기시간을 1시간 기준으로 구분하였을 때, 2-NAP은 제3기에서 1시간 이상 환기시킨 군이 그렇지 않은 군에 비해 노출수준이 유의하게 높았다. t,t-뮤콘산은 제2기와 제3기에서 1시간 이상 환기시킨 군이 비교적 높은 경향을 보였으나 통계적으로 유의하지 않았다. 제1기 조사에서는 환기시간을 조사하지 않아, 결과를 비교할 수 없었다.

대중교통을 주로 이용하지 않는 그룹이 이용하는 그룹에 비해 유해물질 3종의 노출수준이 유의하게 높았으나, t,t-뮤콘산의 경우, 3기에서 특별한 경향을 보이지 않았다.

Table 3. Arithmetic and geometric means and 95 percentiles of urinary 1-Hydroxypyrene (µg/L) for the Korean adult population

Variables	Cycle 1					Cycle 2					Cycle 3				
	N	AM*	GM†(95% CI)	P95‡(95% CI)	p-value	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	p-value	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	p-value
Total	5689	0.218	0.12(0.116-0.127)	0.655(0.606-0.705)	<0.05	5504	0.249	0.171(0.164-0.179)	0.649(0.593-0.705)	<0.05	3310	0.375	0.144(0.132-0.158)	1.30(1.08-1.51)	
Gender															
Male	2737	0.250	0.146(0.137-0.155)	0.780(0.695-0.866)	<0.05	2534	0.266	0.189(0.180-0.200)	0.680(0.611-0.749)	<0.05	1517	0.414	0.169(0.151-0.189)	1.44(1.17-1.72)	<0.05
Female	2952	0.186	0.100(0.095-0.106)	0.513(0.476-0.550)	<0.05	2970	0.230	0.153(0.146-0.161)	0.580(0.514-0.645)	<0.05	1793	0.333	0.122(0.110-0.136)	1.11(0.894-1.33)	<0.05
Age															
20-29	671	0.183	0.112(0.100-0.125)	0.520(0.436-0.605)	<0.05	474	0.233	0.162(0.146-0.180)	0.578(0.376-0.779)	<0.05	248	0.369	0.151(0.122-0.187)	1.44(0.889-2.00)	<0.05
30-39	1075	0.205	0.118(0.108-0.130)	0.548(0.484-0.611)	<0.05	917	0.254	0.167(0.154-0.180)	0.622(0.552-0.692)	<0.05	486	0.374	0.140(0.115-0.171)	1.17(0.880-1.46)	<0.05
40-49	1227	0.225	0.132(0.121-0.143)	0.744(0.634-0.853)	<0.05	1057	0.253	0.181(0.170-0.193)	0.651(0.559-0.742)	<0.05	529	0.377	0.154(0.128-0.186)	1.30(0.831-1.76)	<0.05
50-59	1326	0.235	0.133(0.122-0.143)	0.819(0.694-0.943)	<0.05	1233	0.247	0.175(0.163-0.188)	0.689(0.594-0.784)	<0.05	776	0.400	0.156(0.135-0.181)	1.36(0.853-1.86)	<0.05
60-60	998	0.204	0.115(0.106-0.125)	0.626(0.544-0.709)	<0.05	1107	0.267	0.183(0.170-0.198)	0.705(0.575-0.835)	<0.05	821	0.406	0.143(0.121-0.167)	1.22(0.968-1.48)	<0.05
≥70	392	0.288	0.107(0.089-0.129)	0.752(0.538-0.966)	<0.05	716	0.240	0.156(0.144-0.170)	0.637(0.456-0.819)	<0.05	450	0.306	0.109(0.086-0.139)	1.19(0.923-1.46)	<0.05
Smoking status															
Non-smoker	4380	0.170	0.096(0.091-0.102)	0.495(0.467-0.524)	<0.05	4460	0.209	0.147(0.141-0.154)	0.527(0.484-0.570)	<0.05	2758	0.325	0.122(0.110-0.134)	1.09(0.924-1.26)	<0.05
smoker	1307	0.360	0.238(0.222-0.254)	0.992(0.869-1.12)	<0.05	1044	0.385	0.288(0.272-0.306)	0.971(0.830-1.11)	<0.05	552	0.571	0.281(0.239-0.330)	1.77(1.37-2.18)	<0.05
Drinking status															
No	2339	0.204	0.104(0.097-0.111)	0.562(0.501-0.622)	<0.05	2201	0.218	0.153(0.144-0.163)	0.578(0.534-0.621)	<0.05	666	0.306	0.122(0.103-0.144)	0.940(0.732-1.15)	<0.05
Yes	3350	0.227	0.133(0.126-0.140)	0.699(0.640-0.758)	<0.05	3303	0.265	0.181(0.173-0.190)	0.683(0.627-0.739)	<0.05	2644	0.388	0.149(0.135-0.164)	1.32(1.08-1.57)	<0.05
Grilled food intake within 3days															
No	3121	0.204	0.118(0.112-0.124)	0.657(0.598-0.717)	0.213	3325	0.240	0.171(0.163-0.178)	0.620(0.554-0.687)	0.932	2053	0.385	0.143(0.127-0.160)	1.37(1.09-1.64)	0.690
Yes	2568	0.235	0.125(0.117-0.133)	0.638(0.570-0.706)	0.213	2179	0.261	0.172(0.162-0.183)	0.676(0.610-0.742)	0.932	1257	0.361	0.147(0.131-0.166)	1.21(1.02-1.39)	0.690
Grilled meat intake at least once a week															
No	1968	0.225	0.116(0.108-0.125)	0.656(0.593-0.718)	<0.05	3707	0.252	0.171(0.164-0.179)	0.638(0.567-0.710)	<0.05	2113	0.386	0.144(0.130-0.160)	1.33(1.04-1.62)	0.114
Yes	3721	0.215	0.123(0.117-0.130)	0.641(0.580-0.702)	<0.05	1797	0.244	0.171(0.161-0.183)	0.660(0.592-0.729)	<0.05	1197	0.361	0.145(0.127-0.165)	1.24(0.989-1.50)	0.114
Distance from the roads															
<50 m	1400	0.218	0.129(0.121-0.138)	0.692(0.598-0.785)	<0.05	1611	0.253	0.185(0.171-0.194)	0.675(0.505-0.844)	<0.05	1024	0.368	0.144(0.124-0.167)	1.21(0.852-1.57)	0.687
≥50 m	4271	0.218	0.118(0.112-0.125)	0.640(0.581-0.699)	<0.05	3893	0.247	0.167(0.159-0.175)	0.636(0.587-0.685)	<0.05	2286	0.379	0.145(0.131-0.160)	1.31(1.06-1.55)	0.687
Public transportation															
No	2733	0.231	0.132(0.124-0.140)	0.728(0.630-0.825)	<0.05	2834	0.265	0.185(0.176-0.195)	0.721(0.632-0.809)	<0.05	1983	0.401	0.158(0.141-0.177)	1.33(1.08-1.58)	<0.05
Yes	2956	0.208	0.113(0.106-0.119)	0.588(0.526-0.650)	<0.05	2670	0.234	0.159(0.150-0.169)	0.603(0.552-0.654)	<0.05	1327	0.344	0.129(0.114-0.147)	1.21(0.894-1.52)	<0.05
Repair work at home within 6 months															
No	4912	0.218	0.121(0.115-0.127)	0.654(0.603-0.706)	0.852	4667	0.244	0.170(0.163-0.177)	0.653(0.590-0.717)	0.304	2879	0.384	0.146(0.133-0.160)	1.31(1.05-1.57)	0.244
Yes	777	0.221	0.124(0.111-0.138)	0.650(0.519-0.780)	0.852	837	0.276	0.179(0.165-0.195)	0.622(0.568-0.676)	0.304	431	0.321	0.135(0.110-0.166)	1.10(0.790-1.41)	0.244

*Arithmetic mean, †geometric mean, ‡95% confidence interval, §95th percentile

Table 4. Arithmetic and geometric means and 95 percentiles of urinary 2-Hydroxynaphthalene (µg/L) for the Korean adult population

Variables	Cycle 1										Cycle 2										Cycle 3									
	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	p-value	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	p-value	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	p-value	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	p-value	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	p-value					
	Total	5687	6.94	3.36(3.21-3.51)	23.9(21.6-26.3)	<0.05	5510	5.75	2.65(2.51-2.80)	21.1(19.4-22.9)	<0.05	3310	5.84	2.96(2.79-3.13)	21.4(19.3-23.5)	<0.05														
Gender																														
Male	2737	8.53	4.61(4.34-4.88)	26.5(23.9-29.1)	<0.05	2541	6.87	3.31(3.09-3.56)	23.5(19.8-27.1)	<0.05	1517	6.84	3.50(3.21-3.80)	23.3(20.1-26.4)	<0.05															
Female	2950	5.33	2.44(2.30-2.58)	18.3(15.3-21.3)	<0.05	2969	4.52	2.08(1.94-2.22)	17.1(13.8-20.3)	<0.05	1793	4.76	2.46(2.30-2.63)	17.0(14.4-19.7)	<0.05															
Age																														
20-29	671	7.10	3.43(3.03-3.89)	23.5(12.4-34.6)	0.159	473	5.43	2.73(2.40-3.10)	18.7(14.8-22.7)	0.357	248	4.78	2.54(2.16-2.97)	16.1(10.8-21.3)	<0.05															
30-39	1075	7.04	3.48(3.15-3.83)	25.1(21.8-28.5)		914	5.83	2.81(2.53-3.12)	20.5(17.7-23.4)		486	5.97	3.02(2.66-3.44)	23.3(19.7-26.8)																
40-49	1227	7.03	3.63(3.35-3.94)	24.2(20.6-27.8)		1062	5.54	2.71(2.47-2.97)	21.4(16.2-26.7)		529	6.65	3.40(3.00-3.87)	21.5(17.1-25.8)																
50-59	1325	7.35	3.48(3.19-3.79)	22.1(18.7-25.4)		1234	6.10	2.64(2.36-2.96)	23.3(19.0-27.6)		776	6.51	3.10(2.75-3.51)	22.2(16.1-28.3)																
60-60	997	6.25	2.88(2.59-3.21)	22.5(19.7-25.3)		1109	5.84	2.40(2.16-2.68)	21.3(17.7-24.8)		821	5.95	2.95(2.63-3.31)	20.9(17.6-24.3)																
≥70	392	6.20	2.76(2.39-3.18)	27.4(14.9-39.9)		718	5.83	2.40(2.13-2.70)	22.1(15.6-28.5)		450	4.47	2.56(2.28-2.88)	16.4(10.9-21.9)																
Smoking status																														
Non-smoker	4378	4.56	2.29(2.18-2.40)	15.8(13.3-18.3)	<0.05	4462	3.96	1.87(1.77-1.98)	14.5(12.2-16.9)	<0.05	2758	4.05	2.28(2.16-2.41)	14.5(12.3-16.7)	<0.05															
smoker	1307	14.0	10.5(9.90-11.1)	32.4(30.4-34.4)	<0.05	1048	11.85	8.70(8.12-9.32)	30.6(28.3-33.0)	<0.05	552	12.8	8.07(6.92-9.41)	33.3(24.9-42.0)	<0.05															
Drinking status																														
No	2337	6.35	2.77(2.58-2.97)	23.7(20.2-27.2)	<0.05	2202	5.53	2.23(2.17-2.51)	21.9(17.7-26.2)	<0.05	666	4.49	2.46(2.20-2.75)	16.4(13.0-19.8)	<0.05															
Yes	3350	7.31	3.78(3.57-4.01)	24.1(21.2-27.0)	<0.05	3308	5.86	2.83(2.65-3.03)	20.9(19.2-22.7)	<0.05	2644	6.09	3.05(2.86-3.26)	21.8(19.5-24.2)	<0.05															
Grilled food intake within 3days																														
No	3119	6.86	3.25(3.07-3.44)	23.5(21.3-25.7)	0.114	3325	5.50	2.57(2.41-2.73)	21.0(18.9-23.0)	0.103	2053	5.93	2.89(2.69-3.10)	22.5(19.4-25.6)	<0.05															
Yes	2568	7.04	3.49(3.26-3.73)	24.4(20.6-28.3)		2179	6.08	2.77(2.55-3.01)	21.7(18.1-25.4)		1257	5.71	3.06(2.78-3.36)	19.6(17.5-21.6)	<0.05															
Grilled meat intake at least once a week																														
No	1966	6.94	3.12(2.89-3.37)	26.4(22.0-30.7)	0.090	3714	5.43	2.54(2.39-2.70)	20.0(18.1-21.9)	<0.05	2113	5.79	2.88(2.67-3.11)	20.5(16.8-24.3)	<0.05															
Yes	3721	6.94	3.47(3.30-3.66)	23.4(21.2-25.5)		1796	6.29	2.85(2.63-3.10)	23.5(18.8-28.3)		1197	5.92	3.06(2.79-3.36)	21.6(19.2-24.1)	<0.05															
Grilled fish intake at least once a week																														
No	2295	7.06	3.35(3.11-3.61)	25.5(21.9-29.1)	0.898	3921	5.46	2.53(2.39-2.69)	20.5(18.5-22.5)	<0.05	2702	5.81	2.91(2.73-3.11)	20.8(18.5-23.1)	0.411															
Yes	3392	6.86	3.36(3.18-3.55)	23.3(20.7-25.9)		1589	6.47	2.97(2.70-3.26)	23.9(18.8-29.0)	<0.05	608	6.01	3.17(2.79-3.59)	23.2(19.6-26.8)	<0.05															
Distance from the roads																														
<50 m	1400	7.26	3.53(3.24-3.84)	24.0(20.2-27.8)	<0.05	1611	6.13	2.70(2.47-2.96)	22.2(16.9-27.6)	0.559	1024	5.52	2.87(2.59-3.19)	19.1(15.1-23.0)	0.252															
≥50 m	4269	6.85	3.31(3.14-3.49)	23.8(21.0-26.7)	<0.05	3896	5.58	2.63(2.48-2.79)	20.7(18.9-22.6)	<0.05	2286	5.99	2.99(2.80-3.20)	21.8(19.7-24.0)	<0.05															
Public transportation																														
No	2733	7.75	3.80(3.56-4.05)	26.4(23.7-29.2)	<0.05	2830	6.04	2.91(2.72-3.12)	21.7(19.0-24.4)	<0.05	1983	6.23	3.17(2.92-3.43)	21.6(19.7-23.5)	<0.05															
Yes	2954	6.25	3.02(2.84-3.21)	21.8(18.7-25.0)		2680	5.48	2.43(2.26-2.61)	20.5(17.3-23.6)	<0.05	1327	5.37	2.72(2.50-2.95)	20.6(16.7-24.5)	<0.05															
Ventilation time																														
<1 hour	-	-	-	-	-	864	6.30	2.79(2.45-3.18)	23.2(16.7-29.6)	0.917	1210	5.35	2.68(2.43-2.95)	20.8(17.0-24.6)	<0.05															
≥1 hour	-	-	-	-	-	4534	5.66	2.63(2.48-2.79)	21.1(19.4-22.9)		2100	6.11	3.12(2.89-3.37)	21.6(19.0-24.1)	<0.05															
Repair work at home within 6 months																														
No	4910	7.03	3.37(3.21-3.55)	24.6(21.7-27.5)	0.611	4671	5.70	2.62(2.48-2.78)	21.0(19.0-23.0)	0.280	2879	5.91	2.94(2.77-3.12)	21.8(19.5-24.1)	0.985															
Yes	777	6.45	3.28(2.88-3.75)	21.4(18.0-24.8)		839	6.02	2.81(2.52-3.13)	21.7(16.1-27.4)		431	5.40	3.07(2.65-3.55)	19.5(15.6-23.3)																

Table 5. Arithmetic and geometric means and 95 percentiles of urinary trans,trans-Muconic acid ($\mu\text{g/L}$) for the Korean adult population

Variables	Cycle 1				Cycle 2				Cycle 3						
	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	p-value	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	p-value	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	p-value
Total	5653	79.5	45.7(43.3-48.2)	258(236-280)	<0.05	5474	111	69.6(66.4-73.0)	341(307-374)	<0.05	3,333	175	100(94.4-106)	532(444-619)	
Gender															
Male	2723	89.0	52.6(49.5-56.0)	275(248-302)	<0.05	2532	117	75.9(72.1-79.9)	359(313-405)	<0.05	1,525	181	110(103-117)	522(428-615)	<0.05
Female	2930	69.8	39.5(37.1-42.1)	233(204-262)	<0.05	2942	103	63.3(59.6-67.2)	328(291-365)	<0.05	1,808	168	90.3(83.2-98.1)	579(466-693)	<0.05
Age															
20-29	665	95.2	52.8(46.9-59.4)	347(266-429)	<0.05	467	139	75.1(66.3-85.1)	477(299-654)	<0.05	250	176	103(87.2-121)	521(292-750)	<0.05
30-39	1069	96.0	54.7(49.9-59.9)	304(239-368)	<0.05	913	132	84.5(77.7-91.9)	395(326-464)	<0.05	489	198	109(94.6-127)	730(504-955)	<0.05
40-49	1220	85.5	49.8(45.8-54.2)	266(228-305)	<0.05	1054	106	71.3(66.2-76.7)	310(261-358)	<0.05	530	200	115(103-128)	548(241-856)	<0.05
50-59	1318	63.7	40.4(37.4-43.6)	196(173-220)	<0.05	1226	94.8	64.7(60.2-69.4)	275(219-330)	<0.05	784	177	101(90.7-112)	529(412-646)	<0.05
60-60	993	53.2	32.9(30.0-36.1)	168(138-197)	<0.05	1101	87.0	57.8(53.8-62.0)	233(197-270)	<0.05	826	153	84.8(77.9-92.4)	426(354-498)	<0.05
≥ 70	388	56.1	33.8(29.5-38.6)	157(95.0-219)	<0.05	713	83.1	54.8(50.2-59.8)	278(199-356)	<0.05	454	111	76.7(68.0-86.4)	307(253-361)	<0.05
Smoking status															
Non-smoker	4351	64.8	37.6(35.5-39.8)	220(200-239)	<0.05	4434	98.4	60.4(57.5-63.6)	313(280-345)	<0.05	2,778	159	89.0(83.0-95.5)	487(412-562)	<0.05
smoker	1300	123	81.4(76.1-87.1)	347(297-397)	<0.05	1040	152	113(106-120)	431(365-498)	<0.05	555	237	158(140-177)	726(479-973)	<0.05
Drinking status															
No	2324	69.9	40.3(37.8-43.0)	223(189-257)	<0.05	2182	105	64.6(60.5-69.0)	310(263-358)	<0.05	673	139	84.6(73.9-96.9)	455(296-614)	<0.05
Yes	3329	85.4	49.3(46.3-52.5)	274(247-301)	<0.05	3292	113	72.3(68.5-76.3)	361(322-400)	<0.05	2660	181	103(96.7-110)	538(451-626)	<0.05
Grilled food intake within 3days															
No	3097	75.2	43.8(41.2-46.6)	249(222-275)	<0.05	3309	108	67.0(63.6-70.6)	332(300-364)	<0.05	2065	172	98.7(91.6-106)	531(438-624)	<0.05
Yes	2556	84.5	47.9(44.8-51.3)	260(227-294)	<0.05	2165	114	73.3(68.5-78.4)	362(294-429)	<0.05	1268	180	102(92.3-113)	556(351-761)	<0.05
Grilled fish intake at least once a week															
No	1956	70.8	41.6(38.8-44.7)	231(201-262)	<0.05	3682	105	67.1(63.7-70.7)	318(279-356)	<0.05	2127	167	94.0(87.3-101)	552(465-639)	<0.05
Yes	3697	83.5	47.7(44.9-50.6)	267(242-292)	<0.05	1792	120	74.0(69.3-79.0)	372(323-421)	<0.05	1206	186	109(101-118)	496(382-610)	<0.05
Distance from the roads															
< 50 m	1391	89.4	51.4(47.3-55.9)	288(226-350)	<0.05	1604	125	75.5(69.7-81.9)	381(304-458)	<0.05	1038	180	103(93.3-114)	523(404-641)	0.075
≥ 50 m	4244	76.5	44.1(41.4-46.9)	246(222-270)	<0.05	3870	104	67.2(64.0-70.5)	325(294-356)	<0.05	2295	173	98.7(92.1-106)	538(435-641)	<0.05
Public transportation															
No	2715	84.4	50.1(47.2-53.1)	257(233-281)	<0.05	2821	110	72.9(68.7-77.2)	332(295-369)	<0.05	2011	172	99.0(92.2-106)	527(454-599)	0.438
Yes	2938	75.2	42.2(39.3-45.4)	258(226-289)	<0.05	2653	111	66.7(62.9-70.7)	364(304-424)	<0.05	1332	178	101(92.1-112)	574(430-717)	<0.05
Ventilation time															
< 1 hour	-	-	-	-	-	862	105	68.2(62.4-74.5)	312(250-373)	0.499	1220	166	98.4(89.8-108)	473(330-616)	0.171
≥ 1 hour	-	-	-	-	-	4499	112	69.8(66.3-73.5)	354(318-389)	<0.05	2113	180	101(93.6-109)	563(462-664)	<0.05
Repair work at home within 6 months															
No	4885	77.4	44.5(42.1-47.1)	247(227-267)	<0.05	4638	108	68.6(65.4-72.0)	332(300-363)	<0.05	2898	174	98.5(92.6-105)	508(423-592)	<0.05
Yes	768	91.6	52.9(47.5-58.9)	280(191-370)	<0.05	836	123	74.9(68.1-82.4)	417(320-513)	<0.05	435	182	110(94.9-128)	593(426-760)	0.886

IV. 고 찰

생체시료를 이용한 PAHs 및 벤젠 노출에 관한 많은 연구가 이루어져 왔으며,^{6-8,10} 최근에는 대기오염이나 생활환경 및 습관 등으로 노출될 수 있는 저농도 유해물질 노출에 대한 관심이 고조되고 있다.²³⁾ 또한 국민환경보건 기초조사가 진행되며 각 조사기수별 보도자료가 배포되어, 환경유해물질 노출에 대한 국민들의 관심도 높아지고 있는 실정이다. 본 연구에서는 대표성이 있는 우리나라 성인의 약 9년간 바이오모니터링 자료를 분석하여 각 조사기수별 PAHs 및 벤젠 대사체의 농도추이 및 노출요인을 확인하였다.

1-OHP는 제1기에 비해 제2기에 다소 증가했으나 제3기에 비교적 감소되는 경향을 보였으며, 미국 NHANES과 캐나다 CHMS에 비해 다소 높은 것으로 나타났다.^{2,3)} 2-NAP은 제1기에 비해 제2기에 감소했다가 제3기에서 약간 증가하는 경향을 보였으며, 미국과 캐나다에 비해 낮았다.^{2,3)} t,t-뮤콘산은 시간이 지날수록 증가하는 경향을 보였으며, 제3기 조사에서 미국, 캐나다에 비해 비교적 높은 수준을 보였다.^{2,3)} 독일 GerES는 가장 최근에 발표된 성인 모니터링 결과가 1998년 제3기 조사였기 때문에, 시기의 차이로 인해 본 연구와 비교하기에는 무리가 있다.⁴⁾ 특히 t,t-뮤콘산은 지속적인 증가추세를 보이고 있는데, 현재 국민환경보건 기초조사 설문결과를 활용하여 증가 원인을 확인하기에는 힘든 실정이며, 향후 이에 대한 정밀조사가 이루어진다면 이에 대한 원인을 찾을 수 있을 것으로 사료된다.

흡연자가 비흡연자에 비해 3종의 유해물질 노출수준이 높게 나타났으며, 해당 물질의 체내 노출이 비흡연자에 비해 흡연자에서 높게 나타나는 경향은 다른 연구에서도 유사하게 발표된 바 있다.^{19,21)} 본 연구결과는 소변으로 배출되는 PAHs 및 벤젠 대사체의 상당 부분이 흡연과 관련이 있음을 나타낸다.

최근 구운 음식을 섭취하는 경우 유해물질 노출수준이 증가하는 것으로 나타났다. 육류를 포함한 식품은 가열하는 조리과정을 거칠 때 pyrene 및 naphthalene 등 PAHs 농도가 증가하며, 특히 불꽃이 직접 닿는 조리방법을 사용하거나 고온, 조리시간이 길어질수록 농도가 증가한다고 보고되고 있다.^{24,25)} t,t-뮤콘산의 원물질인 벤젠은 식품으로 인한 노출은 비교적 낮은 편이지만, 식품의 가열 등 제조공정에

서 생성될 수 있다고 보고되고 있다.^{26,27)} 본 연구에서도 이와 같은 영향으로 구운 음식을 섭취함에 따라 노출수준의 증가추세를 보이고 있다고 판단할 수 있다. 또한, 보존제로 사용되는 소르브산이 함유된 식품을 섭취하는 경우, 소르브산의 약 0.05~0.5% 정도가 t,t-뮤콘산으로 대사되어 배출되는 경우도 있다.^{22,28)} 직업적 노출이 아닌 저농도 벤젠노출을 평가하기 위해서는 소시지, 통조림 음식 등 소르브산 함유 식품의 최근 섭취여부를 함께 조사하여 보정한다면 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

거주하는 집과 버스가 다니는 도로와의 거리가 가까울수록 3종의 유해물질 노출수준이 높은 경향이 나타났으며, 이는 도로에서의 공기오염은 미세먼지를 포함한 PAHs 및 벤젠이 원인일 수 있으며,²²⁾ 본 연구는 이에 대한 설명이 가능한 결과라고 할 수 있다. 또한, 거주하는 집에서 6개월 이내 개보수 작업 경험이 있는 경우, t,t-뮤콘산 노출수준이 유의하게 높게 나타났다. 건축용 자재에서 적은 양이지만 벤젠 방출 가능성이 존재하고, 개보수 작업 및 가정에서 사용 가능한 각종 용제, 접착제, 세척제 등에 소량의 벤젠이 함유되어 있으며, 이를 통해 노출수준이 증가할 수 있다.⁵⁾

가정에서의 환기시간이 길수록 2-NAP의 노출수준이 유의하게 높게 나타났다. 선행 연구에서 봄이 다른 계절에 비해 PAHs의 노출수준이 높으며, 실내에 오래 머무를수록 농도수준이 낮다고 보고된 바 있다.^{23,30)} 이를 통해 환기로 인한 대기 중 PAHs의 실내유입이 적을수록 PAHs 노출수준이 낮을 것으로 판단된다. t,t-뮤콘산은 제2기와 제3기에서 1시간 이상 환기시킨 군이 비교적 높은 경향을 보였으나 통계적으로 유의하지 않았다. 제1기 조사에서는 환기시간을 조사하지 않아, 결과를 비교하는데 제한적이었다.

대중교통을 주로 이용하지 않는 그룹에서 3종의 유해물질 노출수준이 유의하게 높게 나타났는데, 일반적으로 자동차 내부에서는 PAHs와 벤젠에 노출될 수 있으며, 휘발유를 연료로 하는 승용차 실내에서의 VOCs 노출이 높게 나타난다는 연구결과가 보고된 바 있다.^{31,32)} 또한, 이용하는 교통수단의 종류에 상관없이 이용시간이 길어지면 해당 농도가 증가하는 경우도 있었다.²⁸⁾ 따라서, 대중교통을 이용하지 않고 개인차량 및 승용차를 주로 이용하는 그룹에서 해당 물질의 노출수준이 비교적 높게 나올 수 있다

고 추측 가능하지만, 주로 이용하는 교통수단의 종류 및 연료에 따른 노출에 대하여 추가 연구가 필요하다고 사료된다.

1-OHP의 원물질인 pyrene의 반감기는 약 18시간,³³⁾ 2-NAP의 원물질인 naphthalene은 약 46시간,³⁴⁾ t,t-뮤콘산의 원물질인 벤젠은 5시간 정도로 짧은 편이다.¹⁰⁾ 각 물질별 반감기를 고려하여 전반적으로 샘플링 시점을 지정하는 것이 바람직할 수 있지만, 전국적으로 대규모의 대상자를 표본추출하여 연령, 성별 등 대표성이 고려된 조사가 진행되어야 하는 국민환경보건 기초조사는 이러한 체계의 변경이 현실적으로 어려울 수 있다. 따라서 조사된 설문자료의 조사시점 및 문항의 범주를 고려하여 최근 노출을 반영할 수 있도록 통계분석이 이루어져야 한다.

이와 같은 결과를 종합하면, 외국의 대규모 바이오모니터링 결과(미국 NHANES, 캐나다 CHMS)와 비교했을 때 1-OHP와 t,t-뮤콘산은 외국에 비해 노출수준이 높았으며, 2-NAP은 낮은 것으로 나타났다. 모든 대상물질에서 성별과 연령별로 유의한 차이를 보였으며, 구운 음식을 섭취하는 경우 노출수준이 증가하는 경향을 보였다. 또한 흡연, 거주지와 도로와의 거리, 대중교통 이용여부, 환기시간 등의 변수가 유해물질 노출에 유의한 영향이 있는 것으로 확인되었다. 다만, 제1~3기의 설문조사 항목 및 항목별 범주가 각 조사기수별 개정으로 인해 일부 상이하거나 조사되지 않은 점은 각 조사기수별 노출요인을 비교하고 파악하는데 제한적이었으며, 일부 항목에서는 설문응답과 생물학적 노출지표의 불일치가 존재하였다. 이를 개선하기 위해 설문 문항의 보완이 필요하며, 더 나아가서는 누적된 데이터의 정제를 통한 국민환경보건 기초조사의 통합 DB를 구축할 필요가 있다.

V. 결 론

본 연구는 국내에서 진행된 대규모 바이오모니터링 국민환경보건 기초조사의 9년간 결과('09~'17)를 활용하였으며, 대표성이 있는 성인을 대상으로 전 조사기수에 포함된 일부 PAHs 및 벤젠 대사체의 노출수준을 각 조사기수별로 파악하고, 설문결과와의 연계분석을 통해 노출요인을 확인한 점에 의의가 있다. 본 연구에서 다룬 대상 물질의 대부분은 성별과 연령별로 유의한 차이를 보였으며, 각 물질별로 약

간의 경향 차이는 있지만 개인 생활 및 식습관, 거주환경에 따라 특정 노출특성을 파악할 수 있었다. 특히 흡연여부, 음주여부, 최근 구운음식 섭취여부, 대중교통 이용 등의 변수에서 유의한 차이를 확인하였다. 이는 일부 개인의 생활습관 등을 개선함으로써 화학물질의 노출수준을 줄일 수 있으며, 해당 물질의 위해성 및 노출경로 등의 정보를 활용한 적극적인 위해소통이 이루어진다면 우리나라 국민의 노출수준 저감이 지속적으로 가능할 수 있음을 의미한다. 향후, 본 연구결과를 이용하여 유의미한 변수를 보정한 각 조사기수별 참고값(Reference value 95)을 산출하여, 이를 토대로 국내 노출기준 설정에 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다. 제1기 국민환경보건기초조사, 제2기 국민환경보건기초조사(2014-01-01-074), 제3기 국민환경보건 기초조사(NIER-2017-01-01-001).

References

1. Park CH, Yu SD. Status and Perspectives of the Korean National Environmental Health Survey (KoNEHS). *J Environ Health Sci.* 2014; 40(1): 1-9.
2. Centers for Disease Control and Prevention. Fourth National Report on Human Exposure to Environmental Chemicals, Update Tables. Washington, DC: CDC; 2015.
3. Health Canada. Fourth Report on Human Biomonitoring of Environmental Chemicals in Canada, Results of the Canadian Health Measures Survey Cycle 4 (2014-2015). Ottawa: Health Canada; 2017.
4. Becker K, Kaus S, Krause C, Lepom P, Schulz C, Seiwert M, Seifert B, et al. German Environmental Survey 1998 (GerES III): environmental pollutants in blood of the German population. *Int. J. Hyg. Environ. Health.* 2002; 205: 297-308.
5. Ministry of Food and Drug Safety. Risk profile-Polycyclic aromatic hydrocarbons, 1st ed. Cheongju: Ministry of Food and Drug Safety; 2010.
6. Lagorio S, Forastiere F, Lipsett M, Menichini E, et al. Air pollution from traffic and the risk of tumors. *Ann. Ist. Super. Sanita.* 2000; 36: 311-329.

7. Jacob J, Seidei A. Biomonitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons in human urine. *J Chromatogr. B. Analyt. Technol. Biomed. Life Sci.* 2002; 778: 31-47.
8. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Documentation of the TLVs and BELs, 7th ed. Ohio: ACGIH; 2001.
9. Ministry of Food and Drug Safety. Risk profile-Benzene, 1st ed. Cheongju: Ministry of Food and Drug Safety; 2010.
10. OH HC, KIM CN, Won JU, KIM HS, et al. Availability of trans, trans-muconic acid as a biomarker for exposure to low concentrations of benzene. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2004; 14(2): 155-164.
11. Medeiros A, Bird M, Witz G, et al. Potential biomarkers of benzene exposure. *J Toxicol Environ Health A.* 1997; 51: 519-539.
12. Amodio-Cocchieri R, Prete UD, Cirillo T, Agozzino E, Scarano G, et al. Evaluation of benzene exposure in children living in Campania (Italy) by urinary trans, trans-muconic acid assay. *J Toxicol Environ Health A.* 2001; 63: 79-87.
13. Scherer G, Renner T, Meger M, et al. Analysis and evaluation of trans,trans-muconic acid as a biomarker for benzene exposure. *J Chromatogr B Biomed Sci Appl.* 1998; 717: 179-199.
14. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Threshold limit values and biological exposure indices for 2010-2011, Cincinnati (OH): ACGIH; 2011.
15. Yu SD, Park KH, Kim HJ, Lee YM. Manual for Laboratory Procedures on The First Stage Korean National Environmental Health Survey (Organic compounds), 1st ed. Incheon: National Institute of Environmental Research; 2012. p. 71-82.
16. KIM SJ, Paek YW, Kwon YM, Choi WH, et al. 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.
17. Yoo JY, Kim SY, Kwon YM, Jung SK, et al. Manual for Laboratory Procedures on The Third Stage Korean National Environmental Health Survey (Organic compounds), 3rd ed. Incheon: National Institute of Environmental Research; 2018. p. 93-107.
18. Schulz C, Angerer J, Ewers U, Heudorf U, Wilhelm M, et al. Revised and new reference values for environmental pollutants in urine or blood of children in Germany derived from the German Environmental Survey on Children 2003-2006. *Int J Hyg Environ Health.* 2009; 212(6): 637-647.
19. Aquilina NJ, Delgado-Saborit JM, Meddings C, Baker S, Harrison RM, Jacob III P, Wilson M, Yu L, Duan M, Benowitz NL, et al. Environmental and biological monitoring of exposures to PAHs and ETS in the general population. *Environ Int.* 2010; 36(7): 763-771.
20. Kho YL, Lee EH. Comparison of Concentration of Urinary Metabolites of PAHs from Smokers and Nonsmokers. *J Environ Health Sci.* 2011; 37(6): 474-481.
21. Kim KM, Eom SY, Yim DH, Moon SI, Kim YD, Kim H, et al. Urinary Hippuric Acid and trans,trans-Muconic Acid Levels According to Commuting Mode and Duration, Residential Environment, and Intake of Preservative-Added Foods and Beverages in University Students. *Korean J Occup Environ Med.* 2012; 24(1): 61-71.
22. Jalai A, Ramezani Z, Ebrahim K, et al. Urinary Trans, Trans-Muconic Acid is Not a Reliable Biomarker for Low-level Environmental and Occupational Benzene Exposures. *Safety and Health at Work.* 2017; 8: 220-225.
23. Lee KH, Li ZM, Cho SH, Kwon HJ, Kang DH, et al. Urinary PAH metabolites as biomarkers of environmental PAHs exposure. *J Toxicol? Pub Health.* 2007; 23(1): 39-46.
24. Lee BH, An YJ, Park DY, Byun GY, Kim KD, et al. Characteristics of PAH Occurrence during Meat Cooking. *Journal of Environmental Science International.* 2016; 25(11): 1459-1466.
25. Hu SJ, Jin SH, Lee KH, Choi DM, et al. Dertermination of Polycyclic aromatic hydrocarbons in processed foods. *Analytical Science & Technology.* 2010; 23(2): 196-204.
26. European Commission. Human Exposure Characterization of Chemical Substances, quantification of exposure routes (HEXPOC), 1st ed. Bruxelles: European Commission; 2005.
27. Ministry of Food and Drug Safety. Survey of Benzene in Food, 1st ed. Cheongju: Ministry of Food and Drug Safety; 2013. p. 8-9.
28. Kim KM, Eom SY, Yim DH, Moon SI, Kim YD, Kim H, et al. Urinary Hippuric Acid and trans,trans-Muconic Acid Levels According to Commuting Mode and Duration, Residential Environment, and Intake of Preservative-Added Foods and Beverages in University Students. *Korean. J Occup Environ Med* 2012; 24(1): 61-71.

29. Castro D, Sleza K, Delerue_Matos C, Alvim-Feraz MC, Morais S, Pereira MC, et al. Contribution of traffic and tobacco smoke in the distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons on outdoor and indoor PM_{2.5}. *Global Nest Journal*. 2010; 12: 3-11.
30. Lee TH, Kim YS, Son BS, et al. An assessment of Korean housewives exposed to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in indoor air. *Journal of the Environmental Sciences*. 2007; 16(3): 323-331.
31. Jo WK, Lee JH. In-vehicle levels of naphthalene and monocyclic aromatic compounds according to vehicle type. *Environ Eng Res*. 2009; 14(3): 180-185.
32. Bakhtiari R, Hadei M, Hopke PK, Shahsavani A, Rastkari N, Kermani M, Yarahmadi M, Ghaderpoori A, et al. Investigation of in-cabin volatile organic compounds (VOCs) in taxi; influence of vehicle's age, model, fuel, and refueling. *Environ pollution*. 2018; 237: 248-355.
33. 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.
34. Wheeler AJ, Dobbin NA, Heroux ME, Fisher M, Sun L, Khoury CE, et al. Urinary and breast milk biomarkers to assess exposure to naphthalene in pregnant women: an investigation of personal and indoor air sources. *Environmental Health*. 2014; 13: 30.

<저자정보>

권영민(전문위원), 주영경(전문위원), 박충희(연구관), 김성연(연구사), 최경호(교수), 이철우(과장), 유승도(부장), 유지영(연구관)