

실내공기질 조사 표본 중 BTEX 노출 수준과 관련한 생체지표 발굴

장호영 · 서혜경*

신한대학교 보건기술융합학과

Identification of Biomarkers Associated with BTEX Exposure in Indoor Air Quality Survey Samples

Ho Young Jang · Hyekyung Seo*

Department of Health Technology Convergence, Shinhan General Graduate School, Korea

ABSTRACT

Objectives: Recent environmental health research has expanded beyond traditional occupational hazards to examine the long-term health impacts of chemical exposures in everyday environments. Volatile organic compounds (VOCs), particularly benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX), are commonly emitted from indoor sources such as household products, construction materials, and vehicle exhaust. Despite increasing concerns, limited evidence has been gathered on the health effects of BTEX exposure in the general population. This study aimed to quantitatively assess BTEX exposure using urinary biomarkers and investigate the associations between BTEX metabolites and key health indicators among South Korean adults.

Methods: We conducted a cross-sectional analysis using data from 1,980 adults aged ≥ 19 years who participated in the "Indoor Air Quality and Biomonitoring of Environmental Chemicals" component of the KNHANES (2019-2021). Urinary concentrations of BTEX metabolites—including S-phenylmercapturic acid (SPMA), benzylmercapturic acid (BMA), phenylglyoxylic acid (PGA), 2-methylhippuric acid (2-MHA), and combined 3- and 4-methylhippuric acids (3-MHA+4-MHA)—were measured and creatinine-corrected. Health outcomes included blood pressure, fasting glucose, lipid profile and liver enzymes. Complex sample design elements were accounted for in regression analysis, adjusting for sociodemographic and life style confounders.

Results: Higher urinary levels of SPMA and PGA were significantly associated with increased fasting glucose, and HbA1c. SPMA also showed a strong association with age and systolic blood pressure. PGA was linked with BMI and liver enzymes.

Conclusions: Indoor BTEX exposure showed potential associations with certain metabolic and inflammatory markers in this cross-sectional analysis of a subsample from the Korean National Health and Nutrition Examination Survey. However, given the study design and limited representativeness, these findings cannot be generalized to systemic health outcomes at the population level and should be interpreted with caution.

Key words: BTEX, occupational hazards, PGA, SPMA, volatile organic compounds


I. 서 론


최근 환경보건학적 관심은 전통적인 산업재해 중심에

서 벗어나, 일상생활 속의 환경 유해인자들이 인체 건강에 미치는 장기적 영향으로 확대되고 있다. 특히 주거 공간과 같은 실내 환경은 현대인의 생활에서 상당한 비중을 차지

*Corresponding author: Hyekyung Seo, Tel: 010-3955-5229 E-mail: seohk65@hanmail.net
The College of Biotechnology and Health, Shinhan University, 95 Hoam-ro, Uijeongbu-city, Gyeonggi-do11644, Republic of Korea

Received: August 29, 2025 Revised: September 19, 2025, Accepted: September 22, 2025

 Hyekyung Seo <https://orcid.org/0000-0002-5615-8523>

 Ho Young Jang <https://orcid.org/0000-0001-7522-6969>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

함에도 불구하고, 그에 따른 화학물질 노출은 비교적 간과되어 왔다. 그러나 생활습관, 건축자재, 가전제품, 차량 배기가스, 흡연 등 다양한 요소들로 인해 실내 공기질이 악화되고 있으며, 이에 따라 실내 환경에서의 휘발성유기화합물(volatile organic compounds, VOCs) 노출이 새로운 건강위험 요인으로 부상하고 있다(Rajabi et al., 2020).

VOCs는 실내외에서 흔히 발생하는 유해화학물질로, 특히 벤젠(Benzene), 톨루엔(toluene), 에틸벤젠(ethylbenzene), 자일렌(xylene)으로 구성된 BTEX는 대표적인 VOCs로 분류된다. 이들은 접착제, 도료, 방향제, 세정제, 담배 연기, 자동차 배기가스 등 매우 다양한 실생활 물질에서 방출되며, 일반 가정에서도 흔하게 검출된다(Yu & Jeong, 2010). BTEX는 휘발성이 매우 높아 공기 중에서 쉽게 흡입되며, 인체에 흡수되었을 경우 간에서 대사되어 주로 소변을 통해 배출된다(Ross, 1996; Snyder and Hedli, 1996; Sekar et al., 2023). 이러한 대사산물은 SPMA(S-phenylmercapturic acid), MA(mandelic acid), PGA(phenylglyoxylic acid) 등으로 구성되어 있으며, 이는 체내 BTEX 노출을 반영하는 생체지표로 활용된다. 특히, 크레아티닌 보정을 거친 소변 내 BTEX 대사산물 농도는 개인의 내부 노출수준을 정량적으로 평가할 수 있는 신뢰도 높은 지표로 간주된다(Sekar et al., 2023).

BTEX 노출이 인체 건강에 미치는 영향은 다수의 국내외 연구를 통해 입증되어 왔다. 선행연구에서는 BTEX와 같은 VOCs의 장기적 노출이 심혈관, 호흡기, 신경계, 발암성 및 자극성 효과 등 다양한 만성질환과 유의미한 관련성이 있음을 보고하였다(Halios et al., 2022). 또한, BTEX의 주요 대사산물 농도와 혈압, 공복 혈당, 중성지방(triglyceride, TG) 등의 주요 건강지표 간에 통계적으로 유의한 상관관계가 관찰된 바 있다(Kang et al., 2018; Koh et al., 2024). 이러한 결과는 BTEX 노출의 체내 영향 경로가 단순한 국소적 반응에 국한되지 않고, 전신적인 염증 반응과 대사계 조절 기전에 영향을 줄 수 있음을 시사한다.

이러한 건강위험에도 불구하고, 국내에서는 일반 국민을 대표하는 표본을 기반으로 실내 BTEX 노출 수준과 생체지표 및 건강지표 간의 연관성을 확인한 연구는 아직 제한적이다. 다만, VOC 대사산물이 대사중후군과 독립적으로, 공복혈당 및 혈압과도 유의하게 연관됨이 보고되었으며(Koh et al., 2024), 이는 본 연구에서

BTEX 대사산물과 대사 및 간기능 지표 간 연관성 검토의 필요성을 뒷받침한다. 한편 대부분의 기존 연구들은 산업근로자 또는 특정 고위험군을 대상으로 한 단면조사에 국한되어 있으며, 일반 환경에서의 BTEX 노출에 대한 정량적 분석 및 건강영향 평가에 있어 한계가 존재한다. 또한, 실내공기질과 체내 BTEX 대사산물 간의 정량적 연계 분석은 자료 접근성 및 복합표본 분석의 복잡성 등으로 인해 제한적으로 다루어져 왔다.

이에 따라, 본 연구는 질병관리청이 주관한 국민건강영양조사 제8기(KNHANES 8th, 2019-2021)의 '실내 공기질 및 환경유해물질 생체지표 조사'에 참여한 총 1,980명의 성인을 대상으로 하여, 소변 내 BTEX 대사산물 농도를 통해 개인의 BTEX 내부 노출 수준을 추정하고, 이것과 관련한 건강지표 간 연관성을 분석하고자 한다. 구체적으로는 첫째, BTEX 대사산물의 농도 분포와 성별, 연령, 교육 수준 등과 같은 인구사회학적에 따른 차이를 기술통계 및 복합표본 분석을 통해 검토하고, 둘째, 주요 건강영향지표(혈압, 공복혈당, HbA1c, 지질 프로파일 등)와 BTEX 노출 간의 상관성을 복합표본 회귀모형을 활용해 평가한다. 본 연구는 대표성 있는 국민 건강자료를 기반으로 일반 환경에서의 BTEX 노출과 건강 영향 간의 연관성을 최초로 분석함으로써 산업 근로자 및 고위험군 작업장에서의 유해인자 노출에 대한 상승효과 가능성을 인식하도록 한다. 이 연구 자료는 향후 일상생활 공간 및 작업장에서의 환경유해물질 노출 기준 설정, 건강영향 감시체계 구축, 노출 환경의 취약계층에 대한 정책 방향 수립에 있어 실질적이고 과학적인 근거를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 연구방법

1. 연구대상자

본 연구는 질병관리청(KDCA)에서 수행한 국민건강영양조사 제8기 원시자료를 기반으로 수행된 단면적 관찰연구이다. 국민건강영양조사는 국민의 건강상태, 건강행태, 식생활, 환경노출 등에 대한 정보를 수집하고자 전국의 가구를 대상으로 실시되는 국가 단위의 보건조사이다. 특히 일부 표본에 대해 실내공기질 조사와 더불어 소변 유래 환경유해물질 생체지표 분석이 추가로 수행되었다. 이 자료는 2단계 층화집락 확률표본추출(stratified multistage clustered probability sampling) 방식을 통해 모집단의 대표성을 확보하도록 설계되었으

며 익명화된 2차 자료로서, 개인 정보가 포함되어 있지 않으므로 연구기관 생명윤리위원회(IRB) 심의 면제 대상에 해당된다. 원자료는 질병관리청 기관생명윤리위원회의 승인(2019년(2018-01-03- P-A), 2020년(2018-01-03-C-A), 2021년(2018-01-03-2C-A)을 받았다.

연구대상자는 ‘실내공기질 및 환경유해물질 생체지표 조사’에 참여 및 설문한 만 19세 이상의 성인 중, 연구 목적에 필요한 변수들이 모두 포함된 1,980명이다. 이들 자료 중 소변 내 BTEX 관련 대사산물(SPMA, MA, PGA 등)의 측정값을 보유하고 있고, 혈압, 공복혈당, 당화혈색소(hemoglobin A1c, HbA1c), 총콜레스테롤, 중성지방, AST(aspartate aminotransferase), ALT (alanine aminotransaminase) 등 생체 지표에 결측값이 없는 경우를 분석 대상으로 하였다. 반면, 소변 내 대사산물이나 주요 생체지표 등 변수에 결측이 있는 경우, 임신 또는 출산 직후로 생리적 영향이 가는 경우, 혹은 암, 심부전 등 중증 만성질환 진단으로 인해 건강 상태가 노출과 결과 간의 해석에 혼란을 야기할 수 있

는 283명 자료는 분석에서 제외시켰다(Figure 1).

2. BTEX 노출 생체지표 및 건강영향 지표

환경유해물질 생체지표는 소변 내 BTEX 대사산물 농도를 주요 노출변수로 활용하였다. BTEX 노출 후 인체 내에서 대사과정을 거쳐 생성되는 지표는 S-phenylmercapturic acid(SPMA), benzylmercapturic acid (BMA), phenylglyoxylic acid(PGA) 그리고 2-methylhippuric acid(2-MHA)와 3-methylhippuric acid + 4-methylhippuric acid(3-MHA+4-MHA)가 있으며, 이들은 각각 benzene, toluene, ethylbenzene, xylene 노출의 대사산물로 알려져 있다. 해당 분석은 조사 당시 공인된 분석기관에서 LC-MS/MS를 이용하여 수행되었고, 분석결과는 개인의 신장기능과 요농도의 영향을 보정하기 위해 크레아티닌 농도($\mu\text{g/g creatinine}$)를 이용하여 정규화하였는데 생체지표는 고농도 분포의 비대칭성을 고려하여 로그변환 후 분석에 사용하였다. 주요 독립변수는 소변 내 BTEX 대사산물의 크레아티닌 보정 농도이며, SPMA, BMA,

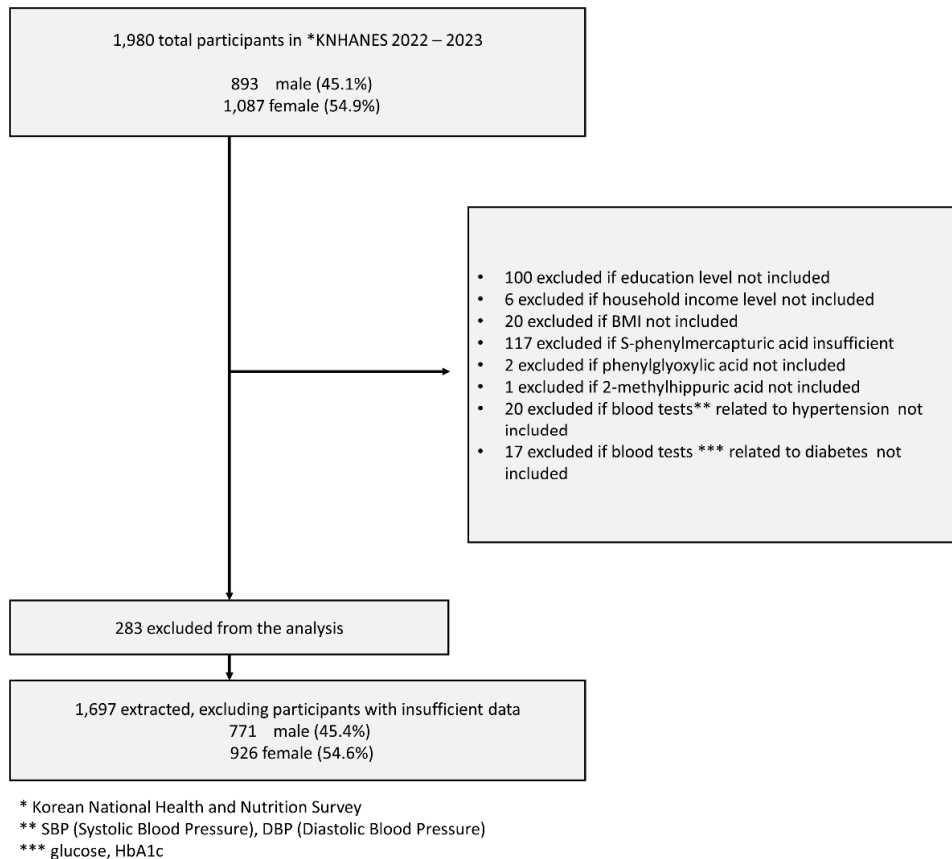


Figure 1. Flowchart of the selection of the study sample

PGA, 2-MHA 그리고 3-MHA+4-MHA 다섯 가지 지표 수치를 이용하였다.

모든 생체지표는 표준화된 SOP(KNHANES, 2025)에 따라 분석되었기 때문에 측정 간의 정밀도와 비교 가능성이 확보되었다. 또한, 대사 관련지표인 혈압, 중성지방, 총콜레스테롤, 공복혈당 및 염증 지표(고감도 C-반응성 단백질) 등 건강영향 지표를 분석에 사용하였다. 이들 건강지표 및 임상적 이상 여부 등은 종속변수로 포함되며, 연속형 변수로는 혈압(수축기 및 이완기), 공복혈당, 중성지방, 고밀도 콜레스테롤(high density lipoprotein cholesterol, HDL cholesterol), AST, ALT 등이 사용되었다. 고혈압 및 이상지질혈증 등의 변수는 국내 진료지침 및 건강검진 기준(KNHANES, 2025)을 따랐다. 이를 통해 BTEX 노출 수준과 건강지표 간의 관계를 정량적 및 범주형 양상 모두에서 평가할 수 있도록 설계하였다.

3. 공변량

BTEX 대사산물과 건강지표 간의 인과 추론을 위한 통계모형 구성에 있어 교란(confounding) 요인을 통제하여 독립변수인 BTEX 노출의 순수한 효과 파악을 위해 다양한 교란변수를 공변량으로 설정하였다. 이는 인구사회학적, 생활습관, 건강상태, 환경노출, 생리학적 교란변수 등으로 나이(age), 성별(sex), BMI, 흡연 여부(smoking status), 음주 상태(alcohol status), 가정소득(household income), 교육 수준(education level), 직업분류(occupational classification)를 포함하였다. 이들 변수는 선행 연구들에서 혈압, 혈당 등 대사 및 심혈관 질환의 주요 위험요인으로 알려져 있으며, 동시에 생활 습관 및 주거 환경과도 연관되어 BTEX 노출 수준에 영향을 줄 수 있으므로, 잠재적 교란변수로 선정하여 통제하고자 하였다.

흡연 여부는 현재 상태에 따라 비흡연자(never), 이전 흡연자(former), 현재 흡연자(current)로 나뉘며, 음주 빈도는 술을 전혀 마시지 않는 경우(non drinking)와 월 1회 미만 음주(<1 time/month) 그리고 월 1회 이상 음주(≥1 time/month)로 분류하였다. 교육 수준은 각각 초등학교 이하, 중학교, 고등학교 그리고 대학교 졸업 이상으로 나누었고, 가구 소득은 낮음, 중하, 중상, 높음으로 구분하였다. 직업은 관리자 및 전문가(manager/expert), 사무직(service/sales worker), 판매 및 서비스직(office worker), 농림어업 종사자

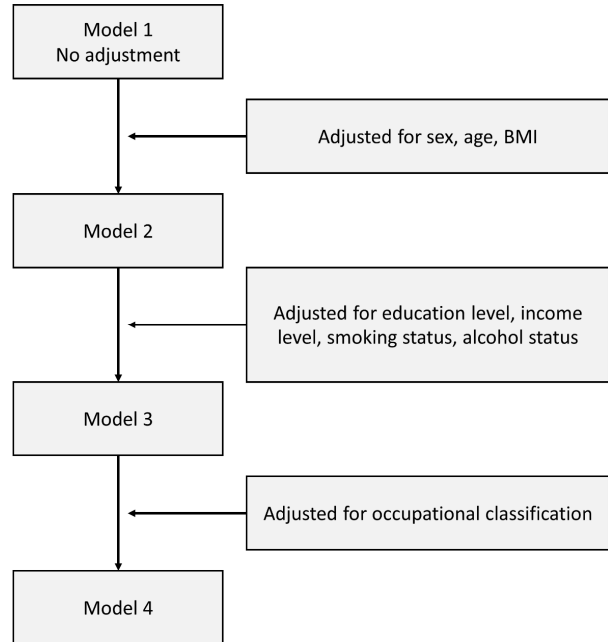


Figure 2. Sequential inclusion of covariates in logistic regression models

(agricultural&fishing), 기술직 및 장치 조작용(machine operators), 단순 노동자(daily labors), 무직(unemployed)으로 분류하였다.

회귀모형을 단계적으로 구성하여 모형 간 비교와 보정 변수의 영향 평가가 가능하도록 설계하였다. Model 1은 비조정(crude) 단순회귀 모델이며, Model 2는 Model 1에서 성별, 연령, BMI를 보정한 모델이다. Model 3에서는 Model 2의 공변량에서 교육수준과 가구소득과 같은 인구 사회학적 공변량과, 음주, 흡연의 생활습관 관련 변수를 수정하였고, Model 4는 Model 3의 공변량에서 직업 분류 상태 변수를 보정한 최종 모델이다(Figure 2). 모델링 접근을 통해 보정된 오즈비를 제시하고 다양한 공변량이 BTEX 대사산물과 질병 발생 사이에 미치는 영향을 평가하였다.

4. 자료분석

국민건강영양조사의 복합표본 설계를 반영하기 위해, 분산 추정을 목적으로 한 계층 변수 “kstrata”와 1차 조사구 번호를 나타내는 집락 변수 “psu”를 적용하였고, 가중치는 질병관리청에서 제공하는 환경유해물질 생체지표용 조사 가중치인 “wt_voc”를 활용하였다. 또한, 국민건강영양조사 자료 분석 시 사용되는 계층 변수(kstrata)는 분산 추정 등의 목적을 위해 통합된 층을

의미하며, 집락 변수(psu)는 표본 설계에서 1차 추출 단위로 활용된다. 특히 국민건강영양조사의 경우, 조사구의 추출 비율이 낮기 때문에, 표본 설계 단계에서 복원추출 방식과 유한모집단 수정계수가 적용되었다.

연속형 변수는 KNHANES의 이용지침서를 토대로 복합표본 일반선형모형을 사용하여 분석하였으며, 범주형 변수 또한 복합표본 교차분석과 복합표본 다중 로지스틱 회귀분석을 통해 분석하였다.

BTEX 대사산물의 분포, 중앙값, 사분위수, 최대 최소값 등을 산출하여 노출 수준을 기술하였으며 대상자의 인구 사회학적 특성에 따른 대사산물 농도 차이를 t-test, 카이제곱 검정, ANOVA 등으로 검토하고, 복합표본 설계를 반영한 가중치를 적용하였다. 각 건강지표를 종속변수로 하여 BTEX 대사산물 농도와의 복합표본 선형 회귀분석 또는 로지스틱 회귀분석을 이용하여 평가하였다.

회귀분석 결과는 오즈비(odds ratio, OR) 또는 회귀계수(β), 95% 신뢰구간(confidence interval, CI), p값으로 제시하였다. 모든 분석에서 유의수준은 $p < 0.05$

로 설정하였으며, 노출-반응 관계를 보다 정밀하게 확인하기 위해 사분위수 또는 분위수(tertile/quartile) 기반 분류 후 선형 추세(trend)를 검토하였다. 본 연구의 모든 통계 분석은 IBM SPSS Statistics 프로그램 (Version 20.1, IBM, NY, USA)을 사용하여 수행되었다.

III. 결 과

1. 연구 대상자의 일반적 특성

결측치를 제외한 연구 대상자는 1,697명으로 평균 연령은 48.6세였으며, 성별은 남성이 771명으로 54.57%를 차지하였고 여성은 926명으로 45.43%를 차지하였다. 가계 소득 수준은 고소득군이 32.35%로 높은 비율을 차지하였으며, 학력 수준의 경우 대학 졸업 이상이 40.90%로 가장 많았다. 직업군에서는 주부와 학생을 포함한 무직이 39.19%로 가장 높은 비중을 차지하였고, 관리자·전문직 14.14%, 서비스·판매직 11.96%, 일용직 10.31% 등의 순으로 분포하였다. 음주 상태는 월 1회 이상 음주자가 51.56%로 가장 많았으며, 흡연 상태는 비흡연자가

Table 1. General characteristics of subjects (n=1,697)

Classification	Total(%)	Classification	Total(%)	mean±SE	IQR*
Household income		Sex			
Low	291(17.15)	Male	771	(54.57)	
Middle-low	412(24.28)	Female	926	(45.43)	
Middle-high	445(26.22)	Age (yr)	48.76±0.63		55 (40-68)
High	549(32.35)	BMI (kg/m ²)	24.12±0.13		23.88 (21.58-26.35)
Education level		SPMA (µg/L Cr.)	0.89±0.02		0.81 (0.56-1.19)
Elementary school or lower	305(17.97)	BMA (µg/L Cr.)	8.05±0.42		4.97 (2.91-9.25)
Middle school	164 (9.66)	PGA (µg/L Cr.)	265.13±6.41		242.57 (172.06-333.92)
High school	534(31.47)	2MHA (µg/L Cr.)	34.00±3.69		17.82 (12.56-27.26)
College or higher	694(40.90)	3,4MHA (µg/L Cr.)	167.68±10.29		86.97 (59.50-141.60)
Occupation		Alcohol status			
Manager/Expert	240(14.14)	Non-drinking	194	(11.43)	
Office worker	179(10.55)	<1 time/mo	628	(37.01)	
Service/Sales worker	203(11.96)	≥1 time/mo	875	(51.56)	
Agriculture & fishing	65(3.83)	Smoking status			
Machine operators	170(10.02)	Never	1015	(59.81)	
Daily labors	175(10.31)	Former	428	(25.22)	
Unemployed	665(39.19)	Current	254	(14.97)	

Continuous variables were expressed as weighted means±weighted standard errors, and categorical variables were expressed as unweighted frequencies and weighted percentages.

*Values are expressed as median (interquartile range [IQR], lower-upper quartile).

Abbreviations: BMI, body mass index; SPMA, S-phenylmercapturic acid; BMA, benzylmercapturic acid; PGA, phenylglyoxylic acid; 2-MHA, 2-methylhippuric acid; 3,4MHA, 3-methylhippuric acid + 4-methylhippuric acid

59.81%로 가장 많았다. 참여자의 평균 BMI는 24.06±0.12kg/m²로 나타났으며, 중앙값은 23.88kg/m²였다. 참여자의 소변 내 대사체 농도는 다음과 같았다. SPMA/크레아티닌 비율은 평균 0.89±0.02 µg/L Cr.였고, 중앙값은 0.81(0.56-1.19)였다. BMA는 평균 8.05±0.42 µg/L Cr.(중앙값 4.97), PGA는 평균 265.13±6.41 µg/L Cr.(중앙값 242.57), 2MHA는 평균 34.00±3.69

µg/L Cr.(중앙값 17.82), 3,4MHA는 평균 167.68±10.29 µg/L Cr.(중앙값 86.97)로 측정되었다.

2. BTEX 대사산물 농도와 인구사회학적 특성별 차이

성별에 따른 SPMA, BMA, 2MHA, 3,4MHA 농도는 모두 유의한 차이를 보였다(p<0.05). 반면 PGA는 성별에 유의한 차이가 관찰되지 않았다(p=0.132). 가계 소

Table 2. Sociodemographic characteristics of BTEX concentrations

	Classification	SPMA	BMA	PGA	2MHA	3,4MHA
Sex	Male	0.75±0.03	6.19±0.79	255.61±12.48	41.92±6.69	204.27±15.57
	Female	1.02±0.02	9.89±0.74	274.53±8.55	26.17±2.03	131.55±8.85
	p-value	<0.001**	<0.001**	0.132	0.020*	<0.001**
Household income	Low	1.15±0.06	11.92±1.59	323.40±21.86	35.09±6.53	193.50±27.55
	Middle-low	0.94±0.04	8.95±1.36	283.72±14.22	34.56±7.17	182.85±28.34
	Middle-high	0.85±0.04	7.50±0.67	258.64±16.15	41.90±11.76	176.33±25.67
	High	0.80±0.02	6.64±0.35	239.23±9.53	27.54±4.39	143.26±17.65
	p-value	<0.001**	0.003*	<0.000**	0.504	0.292
Education level	Elementary school or lower	1.23±0.05	13.88±1.44	372.92±24.23	46.59±11.71	209.48±32.25
	Middle school	1.24±0.06	15.01±4.17	299.14±16.51	29.31±3.55	157.03±19.51
	High school	0.86±0.04	6.89±0.49	265.67±13.11	42.45±8.37	200.01±17.96
	College or higher	0.76±0.02	6.30±0.34	231.00±8.23	24.61±1.89	132.20±8.72
	p-value	<0.001**	<0.001**	<0.001**	0.032*	0.001*
Occupation	Manager/Expert	0.77±0.05	5.24±1.06	220.69±16.02	25.53±4.85	133.83±19.59
	Officeworker	0.77±0.05	6.53±1.29	219.08±14.85	20.58±4.69	113.64±17.74
	Service/Sales worker	0.93±0.05	7.61±1.16	247.43±14.60	30.32±4.74	164.46±18.67
	Agricultural&fisher	0.93±0.10	11.58±2.61	323.68±20.18	29.81±6.70	171.75±31.23
	Machine operators	0.76±0.04	6.81±1.25	270.79±17.17	61.13±24.26	236.76±35.80
	Daily labors	0.97±0.06	8.42±1.28	335.87±34.98	43.23±11.09	232.93±49.62
	Unemployed (housewife,student)	0.99±0.03	10.17±1.01	285.60±9.80	32.53±4.45	163.08±15.19
		p-value	<0.001**	<0.001**	<0.001**	0.025*
Alcohol status	Non-drinking	1.21±0.08	10.79±1.47	295.83±14.25	19.99±5.86	95.91±13.32
	<1 time/month	0.94±0.04	9.75±1.03	271.31±12.56	31.72±6.25	161.06±15.99
	≥1 time/month	0.81±0.02	6.62±0.30	257.01±8.80	37.37±5.78	181.88±12.71
	p-value	<0.000**	0.001*	0.027*	<0.000**	<0.000**
Smoking status	Never	0.95±0.04	8.60±0.63	267.88±15.43	24.86±17.81	123.03±29.59
	Former	0.83±0.05	8.63±1.37	229.42±15.71	27.52±17.71	129.02±28.63
	Current	0.80±0.03	5.50±0.46	308.89±13.34	71.63±17.73	361.89±29.41
	p-value	<0.001**	<0.001**	<0.001**	0.034*	<0.001**

Continuous variables were expressed as weighted means±weighted standard errors.

p-value was calculated by complex sample general linear model. *P<0.05, **P<0.001.

Abbreviations: SPMA, S-phenylmercapturic acid; BMA, benzylmercapturic acid; PGA, phenylglyoxylic acid; 2-MHA, 2-methylhippuric acid; 3,4MHA, 3-methylhippuric acid + 4-methylhippuric acid

특 수준은 SPMA, PGA 농도가 $p < 0.001$ 으로 유의하게 차이를 보였으며, 특히 하 및 중하 소득군에서 상대적으로 높은 농도가 관찰되었다. 2MHA와 3,4MHA는 소득에 따른 유의한 차이가 없었다. 학력 수준별로는 SPMA, BMA, PGA, 2MHA, 3,4MHA는 유의한 차이가 나타났으며($p < 0.05$), 특히 초등학교 졸업 이하 및 중학교 졸업군에서 대부분의 농도가 높게 측정되었다. 직업군별로도 모든 지표에서 유의한 농도 차이가 확인되었다($p < 0.05$). 음주 상태에 따라서는 모든 지표에서 $p < 0.05$ 의 유의한 차이가 관찰되었으며, SPMA, BMA와 PGA 농도는 비음주군에서 높게 나타났다. 하지만 2MHA와 3,4MHA는 음주자군에서 가장 높은 농도가 관찰되었다. 흡연 상태별 분석에서도 모든 지표는 유의한 차이가 있었으며($p < 0.05$), SPMA는 과거 및 현재 흡연군에서 낮게 나타났지만, PGA, 2MHA와 3,4MHA는

현재 흡연자군에서 상대적으로 높은 농도를 보였다 (Table 2).

3. 소변 내 BTEX 대사산물 농도와 임상 건강 지표 간의 관련성

Table 3의 선형 회귀 분석 결과, SPMA 농도는 연령, 수축기 혈압 및 공복혈당과 유의한 양의 연관이 관찰되었다. 또한, ALT 수치와는 음의 상관관계를 나타냈으며 이는 통계적으로 유의하였다($\beta = -2.44$, $p = 0.013$). BMA 농도는 연령, 혈당과 유의한 양의 관련성을 보였으나, 총콜레스테롤 수치와는 유의한 음의 관계가 관찰되었다($\beta = -0.11$, $p = 0.030$). PGA는 전반적으로 대사 관련 지표들과 미약하나마 통계적인 의미가 있었다. 반면, 2MHA와 3,4MHA는 대부분의 건강 지표에 영향이 없는 것으로 확인되었다($p > 0.05$). 따라서 SPMA, BMA

Table 3. Associations between urinary BTEX metabolites (creatinine-adjusted) and clinical health indicators

Classification	SPMA	BMA	PGA	2MHA	3,4MHA
Age (yr)					
β	12.83	0.22	0.01	0.00	0.00
(95% CI)	(10.86, 14.80)	(0.10, 0.35)	(0.01, 0.02)	(0.00, 0.01)	(0.00, 0.00)
p-value	0.000**	0.000**	0.000**	0.726	0.618
BMI (kg/m ²)					
β	-0.24	-0.01	0.00	0.00	0.00
(95% CI)	(-0.64, 0.17)	(-0.02, 0.00)	(0.00, 0.00)	(0.00, 0.00)	(0.00, 0.00)
p-value	0.248	0.061	0.022*	0.018*	0.184
Systolic blood pressure (mmHg)					
β	7.11	0.06	0.00	0.00	0.00
(95% CI)	(5.45, 8.78)	(0.00, 0.13)	(0.00, 0.01)	(-0.01, 0.00)	(0.00, 0.00)
p-value	0.000**	0.053	0.183	0.449	0.842
Diastolic blood pressure (mmHg)					
β	0.58	-0.01	0.00	0.00	0.00
(95% CI)	(-0.51, 1.67)	(-0.04, 0.03)	(0.00, 0.00)	(0.00, 0.00)	(0.00, 0.00)
p-value	0.297	0.779	0.093	0.150	0.834
Glucose (mg/dL)					
β	7.72	0.05	0.00	-0.01	0.00
(95% CI)	(4.31, 11.13)	(99.19, 102.83)	(0.00, 0.01)	(-0.01, 0.00)	(0.00, 0.00)
p-value	0.000**	0.000**	0.135	0.075	0.890
HbA1c (%)					
β	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00
(95% CI)	(0.23, 0.46)	(0.00, 0.01)	(0.00, 0.00)	(0.00, 0.00)	(0.00, 0.00)
p-value	0.000**	0.152	0.035*	0.785	0.566

Table 3. Continued

Classification	SPMA	BMA	PGA	2MHA	3,4MHA
Total cholesterol (mg/dL)					
β	-3.71	-0.11	-0.01	-0.01	0.00
(95% CI)	(-8.22, 0.79)	(-0.21, -0.01)	(-0.02, 0.00)	(-0.02, 0.00)	(-0.01, 0.01)
p-value	0.105	0.030*	0.055	0.255	0.584
Triglyceride (mg/dL)					
β	0.73	0.09	0.01	0.01	0.02
(95% CI)	(-9.55, 11.01)	(-0.32, 0.50)	(-0.02, 0.04)	(-0.03, 0.04)	(-0.02, 0.07)
p-value	0.889	0.665	0.475	0.699	0.312
AST (IU/L)					
β	0.48	0.03	0.00	0.00	0.00
(95% CI)	(-0.72, 1.68)	(-0.01, 0.06)	(0.00, 0.00)	(0.00, 0.00)	(0.00, 0.00)
p-value	0.434	0.103	0.881	0.878	0.170
ALT (IU/L)					
β	-2.44	-0.05	0.00	0.00	0.00
(95% CI)	(-4.34, -0.53)	(-0.10, 0.00)	(-0.01, 0.00)	(0.00, 0.00)	(0.00, 0.01)
p-value	0.013*	0.072	0.016*	0.480	0.375

p-value was calculated by complex sample general linear model. * $P < 0.05$, ** $P < 0.001$. β : coefficient
 Abbreviations: BMI, body mass index; SPMA, S-phenylmercapturic acid; BMA, benzylmercapturic acid; PGA, phenylglyoxylic acid; 2-MHA, 2-methylhippuric acid; 3,4MHA, 3-methylhippuric acid + 4-methylhippuric acid

는 BTEX 대사산물로 인한 특정 건강지표(연령, 혈당, 혈압)에 유의한 영향이 있으며 환경 노출과 만성질환 연관성을 의미한다.

4. 각 질병의 유병률과 소변 내 BTEX 대사산물 농도 간의 관련성

1) 고혈압 유병률 간의 관련성

SPMA, BMA, PGA, 2MHA는 각각의 최고 사분위수

(Q4)에서 고혈압 유병률이 가장 낮은 사분위수(Q1)보다 유의하게 높은 오즈비를 보였다. 비조정(crude)한 단순회귀 모델 1에서 SPMA는 OR=3.82, BMA는 OR=2.01, PGA는 OR=2.26, 2MHA는 OR=1.60으로 나타났다(Table 4). 모델 1에서 성별, 연령, BMI를 보정한 모델 2 및 교육수준과 가구소득과 같은 인구 사회학적 공변량과, 음주, 흡연의 생활습관 관련 변수를 수정한 모델 3 그리고 직업 분류 상태 변수를 보정한 모

Table 4. Estimated odds ratio for the risk of hypertension prevalence according to SPMA, BMA, PGA, 2MHA, 3,4MHA

	OR(95%CI)				
	SPMA	BMA	PGA	2MHA	3,4MHA
Q1	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference
Q2	2.06(1.45-2.92)**	1.29(0.90-1.86)	1.18(0.85-1.66)	1.09(0.75-1.58)	1.17(0.82-1.67)
Q3	2.86(1.91-4.28)**	1.69(1.22-2.34)*	1.50(1.06-2.12)*	1.81(1.24-2.65)*	1.42(0.99-2.04)
Q4	3.82(2.53-5.75)**	2.01(1.28-3.15)*	2.26(1.66-3.08)**	1.60(1.09-2.35)*	1.33(0.92-1.91)
p-value	<0.001**	0.006*	<0.001**	0.007*	0.259

p-value was calculated by complex sample multiple logistic regression. * $P < 0.05$, ** $P < 0.001$.
 Q1: 1st quartile (25th percentile), Q2: 2nd quartile (median, 50th percentile), Q3: 3rd quartile (75th percentile), Q4: Top quartile (maximum range beyond Q3)
 Abbreviations: OR, odds ratio; CI, Confidence interval; SPMA, S-phenylmercapturic acid; BMA, benzylmercapturic acid; PGA, phenylglyoxylic acid; 2-MHA, 2-methylhippuric acid; 3,4MHA, 3-methylhippuric acid + 4-methylhippuric acid

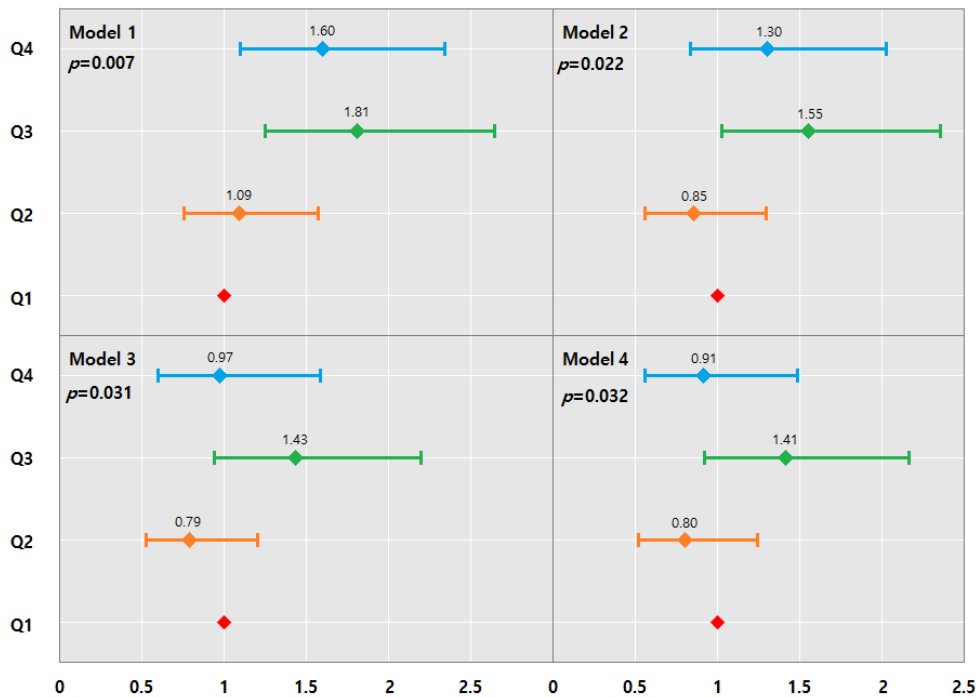


Figure 3. Estimated odds ratio for the risk of Hypertension prevalence according to the 2MHA

Model 1 is unadjusted. Model 2 adjusted for age, sex, BMI. Model 3 adjusted for Model 2 covariates plus education level, income level, alcohol status, smoking status. Model 4 adjusted for Model 3 covariates plus occupation. Q1 : 1st quartile (25th percentile), Q2 : 2nd quartile (median, 50th percentile), Q3 : 3rd quartile (75th percentile), Q4 : Top quartile (maximum range beyond Q3)

델 4까지 다변수 보정한 결과에서 SPMA, BMA, PGA는 통계적 유의성이 소실되었으나, 2MHA는 모델 2~4에서도 유사한 오즈비를 보였다(Figure 3).

2) 당뇨병 유병률 간의 관련성

Table 5는 BTEX 대사산물과 당뇨병 유병률에 관한

오즈비를 보여준다. SPMA, BMA, PGA, 2MHA는 각각의 사분위수(Q4)에서 당뇨병 유병률과 유의한 관련을 보였다. SPMA는 모델 1에서는 음의 상관성이 관찰되었으나, 보정 후 유의한 양의 상관성으로 반전되는 양상을 보였다(Figure 4). 특히, Q4의 오즈비는 모델 4에서 OR=3.07로 증가하였다. 2MHA는 모델 1에 비하여

Table 5. Estimated odds ratio for the risk of diabetes prevalence according to the SPMA, BMA, PGA, 2MHA, 3,4MHA

	OR(95%CI)				
	SPMA	BMA	PGA	2MHA	3,4MHA
Q1	Reference	Reference	Reference	Reference	Reference
Q2	0.53(0.26-1.06)	0.67(0.40-1.12)	0.98(0.56-1.71)	0.91(0.57-1.47)	1.22(0.76-1.95)
Q3	0.21(0.12-0.39)**	0.45(0.28-0.72)*	0.56(0.34-0.92)*	0.78(0.47-1.28)	1.03(0.63-1.69)
Q4	0.17(0.09-0.31)**	0.41(0.25-0.68)*	0.37(0.23-0.59)**	0.42(0.27-0.65)**	0.77(0.50-1.16)
p-value	<0.001**	0.002*	<0.001**	<0.001**	0.201

p-value was calculated by complex sample multiple logistic regression. *P<0.05, **P<0.001.

Q1: 1st quartile (25th percentile), Q2: 2nd quartile (median, 50th percentile), Q3: 3rd quartile (75th percentile), Q4: Top quartile (maximum range beyond Q3)

Abbreviations: OR, odds ratio; CI, Confidence interval; SPMA, S-phenylmercapturic acid; BMA, benzylmercapturic acid; PGA, phenylglyoxylic acid; 2-MHA, 2-methylhippuric acid; 3,4MHA, 3-methylhippuric acid + 4-methylhippuric acid

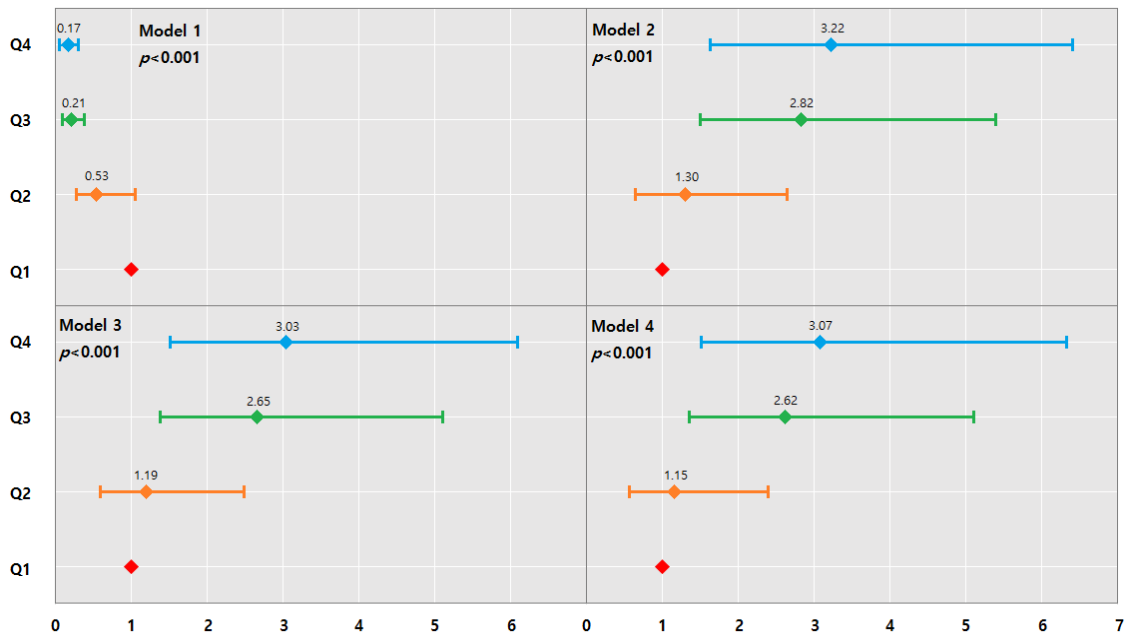


Figure 4. Estimated odds ratio for the risk of diabetes prevalence according to SPMA

Model 1 is unadjusted. Model 2 adjusted for age, sex, BMI. Model 3 adjusted for Model 2 covariates plus education level, income level, alcohol status, smoking status. Model 4 adjusted for Model 3 covariates plus occupation.
 Q1 : 1st quartile (25th percentile), Q2 : 2nd quartile (median, 50th percentile), Q3 : 3rd quartile (75th percentile), Q4 : Top quartile (maximum range beyond Q3)

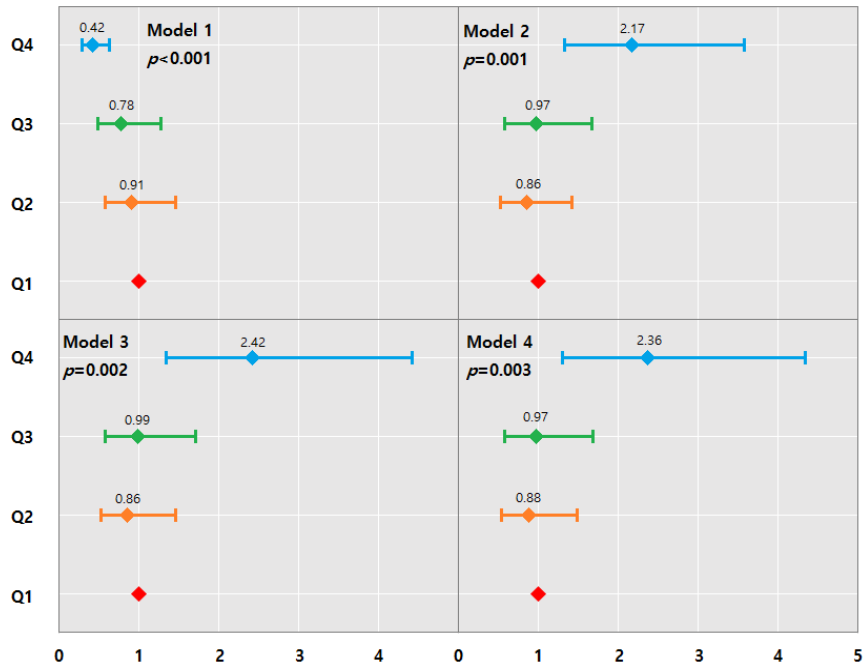


Figure 5. Estimated odds ratio for the risk of diabetes prevalence according to the 2MHA

Model 1 is unadjusted. Model 2 adjusted for age, sex, BMI. Model 3 adjusted for Model 2 covariates plus education level, income level, alcohol status, smoking status. Model 4 adjusted for Model 3 covariates plus occupation.
 Q1 : 1st quartile (25th percentile), Q2 : 2nd quartile (median, 50th percentile), Q3 : 3rd quartile (75th percentile), Q4 : Top quartile (maximum range beyond Q3)

일관된 증가를 보였으며, Q4 오즈비는 모델 4에서 2.36으로 유의하였다($p=0.003$)(Figure 5).

3) 고콜레스테롤혈증 유병률 간의 관련성

모델 1에서 SPMA, BMA, PGA는 고콜레스테롤혈증 유병률과의 통계적으로 유의한 양의 관련성을 보였다. 특히 SPMA는 농도 증가에 따라 유병률이 점진적으로 상승하는 경향을 보였으며, Q4에서의 오즈비는 3.20로 가장 높았다($p<0.001$). BMA와 PGA 또한 Q4 구간에서 오즈비는 1.64 및 1.74 이며, 이들 역시 모델 1에서만 유의한 추세를 나타냈다. 그러나 연령, 성별, BMI 및 사회경제적 변수 등을 단계적으로 보정한 이후 (Model 2~4), 이러한 유의성은 모두 소실되었다 ($p>0.05$).

4) 고중성지방혈증 유병률 간의 관련성

SPMA의 경우, Q2에서 다변수 보정 후에도 유의한 양의 연관성이 관찰되었으며, 모델 4에서 1.74 ($p = 0.024$)로 나타났다. PGA는 Q3에서 중성지방혈증 유병률과의 유의한 음의 연관성을 보였으며, 모델 3에서 0.52, 모델 4에서 0.51로 낮았다($p<0.05$).

IV. 고 찰

본 연구는 국민건강영양조사(KNHANES) 제8기 자료를 활용하여 일반 성인 인구집단을 대상으로 BTEX 노출의 생체지표와 주요 건강지표 간의 관련성을 분석하였다. 국내에서 대표성을 갖는 자료를 기반으로 한 실내 환경유해물질 노출과 건강영향 간 연관성 평가라는 점에서 의의가 있다.

소변 내 BTEX 대사산물 농도는 성별, 학력, 소득, 음주 및 흡연 상태 등 인구사회학적 요인에 따라 유의한 차이를 보였다.

특히 SPMA, BMA 농도는 여성에서 유의하게 높았으며, 2MHA, 3,4MHA 농도는 남성에서 유의하게 높았다($p<0.001$). 성별에 따른 차이는 생활 패턴과 생물학적 대사 과정의 차이에서 기인할 수 있다. 본 연구에서 SPMA, BMA 농도가 여성에게서 높게 나타난 것은, 화장품, 방향제, 세정제 등 벤젠과 톨루엔이 함유된 생활 화학제품의 사용 빈도가 남성보다 높기 때문일 수 있다. 반면, 2MHA, 3,4MHA 농도가 남성에게서 높게 나타난 결과는 흡연율이 높거나, 작업장 등에서 유성 페

인트, 접착제 등 자일렌 함유 제품에 대한 직업적 노출 가능성이 더 크기 때문으로 추정된다. 학력 수준이 낮을수록 대부분의 대사산물 농도가 높게 나타났다 ($p<0.05$). 이는 실내 환경 유해물질 노출이 특정 사회경제적 취약계층에서 더 높을 수 있음을 시사하며 실내 공기 오염 노출에 관한 선행자료(Ferguson et al., 2020)는 저 소득층이 더 오래 실내에 머무르고, 열악한 주거 환경으로 인해 실내 오염 노출이 증가함을 보여주고 있다.

또한, 흡연 및 음주 상태에 따라서도 대사산물 농도가 통계적으로 유의하게 달라지는 경향을 보여, 생활습관이 BTEX 노출에 영향이 미치는 중요한 요인임을 확인하였다. 선행연구(Oh et al., 2020; Rafiee et al., 2020)에서도 흡연 또는 간접흡연과 같은 생활습관들이 소변 내 BTEX 대사산물을 증가 시킨다고 하며, 특히 가정주부들의 생활 습관이 BTEX 노출에 영향을 미친다고 하였다.

직업 상태에 따라서도 대사산물 농도가 통계적으로 유의하게 달라지는 경향을 보였다. 관리자 및 전문가와 사무종사자 같은 경우 농림어업, 기능원 등에 비해 BTEX 대사산물의 농도가 낮은 결과를 보이고 있다. 주유소 직원 및 교통경찰과 같은 전문가와 사무종사자와 행정직을 비교한 경우 직무 특성에 따른 명확한 노출 차이가 있으며, 사무직의 경우 BTEX의 노출이 거의 없는 대조군으로 자주 사용되어왔다(Campo et al., 2015; Scheepers et al., 2019). 다만, 무직자 중 주부와 같은 경우 다른 직업군에 비해 BTEX 대사산물의 수치가 높은 값을 보이기도 한다. 주부와 같이 가정 중심인의 경우 BTEX 노출은 주로 실내 인테리어, 인접 교통, 주유소 등 주변 환경 요인에 의해 발생할 수 있다고 하며, 최근 리모델링 여부에 따라 농도가 유의하게 증가할 수 있으며, 100m 이내의 도로 인접성과 MHA 농도 상승 사이에 유의한 연관성을 보여주었다(Oh et al., 2017).

소변 내 BTEX 대사산물과 임상 건강지표 간 선형회귀 분석 결과, SPMA는 연령, 수축기 혈압, 혈당, HbA1c와 유의한 양의 상관관계를 보였다. 특히 SPMA와 HbA1c 간 양의 상관관계는 본 연구에서 주목할 만한 결과이며, 벤젠 노출이 혈당 대사 조절에 영향을 미칠 가능성을 시사한다. 동물 실험에 대한 선행연구(Bahadar et al., 2015; Abplanalp et al., 2019)에서는 벤젠에 반복적으로 노출된 마우스 모델에서 공복 혈당 및 인슐린 저항성이 유의하게 증가하였으며, 췌장의

β 세포 산화 손상과 간의 포도당 생산 증가가 관찰되었다. 이는 산화스트레스를 매개로 한 인슐린 신호 전달계 저해와 관련이 있으며, 췌장의 β 세포 산화 손상과 간의 포도당 생산 증가가 관찰되어, 인슐린 분비 및 대사 조절 기전 전반에 영향을 미칠 수 있음을 보고하였다 (Barreto et al., 2009). 또한, BMA는 혈당과 유의하게 관련되었고($p < 0.001$), PGA는 BMI, HbA1c, ALT 등 대사 및 간 기능 지표와 통계적으로 유의한 연관성을 나타냈다($p < 0.05$). BTEX 대사산물 농도와 만성질환 유병률 간의 관련성에서는 다음과 같은 유의한 결과가 도출되었다. 반면, 자일렌의 대사산물인 2MHA, 3,4MHA는 벤젠의 대사산물인 SPMA에 비해 대사 지표와의 일관성을 보이지 못하고 있는데, 이는 독성 기전 차이로 설명할 수 있다. 벤젠은 체내에서 강력한 산화 스트레스를 유발하는 반응성 대사체를 생성하여 혈당 조절과 혈관 기능에 직접적인 영향을 미친다. 반면, 자일렌은 주로 신경 독성 및 자극성 영향이 주된 기전으로 알려져 있으며, 벤젠과 같은 수준의 전신적 산화 스트레스나 대사 교란을 유발한다는 연구 근거는 상대적으로 부족하다. 따라서 본 연구에서 관찰된 대사산물별 연관성의 차이는 각 유해물질이 지닌 고유의 생물학적 독성 경로의 차이를 반영하는 결과일 가능성이 높다.

첫째, 고혈압 유병률과의 관련성 분석에서 SPMA, BMA, PGA는 비보정 모델(Model 1)에서 유의한 양의 연관성을 보였으나, 다변수 보정 이후 통계적 유의성은 소실되었다. 반면, 2MHA는 Model 2~4에서도 일관되게 유의성을 유지하였으며($p = 0.022, 0.032$), 이는 2MHA가 고혈압 유병률과의 관련성 측면에서 비교적 독립적인 위험지표일 수 있음을 시사한다. 이는 저농도 노출 근로자와 대조군 비교 연구(Zhou et al., 2024)에서, 소변 내 2MHA 농도가 유의하게 높았으며, 다변량 분석을 통해 BTEX 노출이 이완기 혈압의 독립적 상승 인자임을 확인하였는데 이 연구 결과와 유사하였다.

둘째, 당뇨병 유병률과의 분석에서는 SPMA가 모든 보정 모델(Model 2~4)에서 유의한 양의 연관성을 보였다($p < 0.01$). 특히 Q4 구간에서는 $OR = 3.07$ (95% CI: 1.49~6.34, $p = 0.003$)로 나타나, SPMA 농도가 높을수록 당뇨병 위험이 증가하는 뚜렷한 경향이 확인되었다. 2MHA 역시 Model 2~4에서 통계적으로 유의한 연관성을 보였다($p = 0.003 \sim 0.006$). 이는 벤젠 및 톨루엔 대사산물이 대사질환과 직접적인 연관이 있을 수 있음을 뒷받침한 선행 연구(Bahadar et al., 2015; Abplanalp

et al., 2019)와 유사한 결과이다.

다만, 고콜레스테롤혈증과 고중성지방혈증과 같은 지질 프로필에 의한 대사 질환은 BTEX 대사산물과 유의한 연관성을 보이지 않는다. 특히, 고콜레스테롤혈증에 대해서는 SPMA, BMA, PGA 모두 Model 1에서는 유의한 양의 연관성을 보였으나($p < 0.01$), 이후 보정 모델에서는 유의성이 소실되었다. 고중성지방혈증의 경우 SPMA가 Q2 구간에서 다변수 보정 후에도 유의한 양의 연관성을 유지하였으나(Model 4, $OR = 1.74, p = 0.024$) 그 외 물질들과 Model에서는 유의하지 않았다. 이는 SPMA 등이 지질 프로필에 의한 대사 질환에 직접적인 영향을 미친다기보다는, 연령이나 생활습관 등의 교차요인에 의해 영향을 받을 가능성을 의미한다.

이상의 결과는 실내 환경에서의 BTEX 노출이 단순한 국소적 건강문제를 넘어서, 혈압, 혈당, 지질대사 등 다양한 전신적 건강지표와 관련되어 있을 가능성을 제시한다. 특히 SPMA와 2MHA는 대사 관련 만성질환과의 관련성에서 일관된 유의성을 보여, 향후 건강영향 감시체계에서의 주요 노출지표로서의 활용 가능성을 확인하였다. 다만, 교차분석 특성상 인과관계를 단정할 수는 없으며, 향후에는 장기 추적 코호트 연구나 노출기전 분석을 통한 메커니즘 기반 연구가 필요하다. 나아가, 본 연구에서는 환기 상태, 주거 형태, 건축 자재 등 실내 BTEX 노출에 영향을 미칠 수 있는 주요 환경적 요인들을 공변량으로 포함하지 못했다. 이는 KNHANES 원시자료의 제한점으로부터 기인하며, 이러한 변수들의 잠재적 교란 효과가 완전히 통제되지 않았을 가능성이 있다. 또한, 본 연구는 실내공기 중 농도를 직접 측정하지 않았으므로 소변 중 대사산물 농도는 실내·실외·직업 등 다양한 경로의 통합적인 내부 노출을 반영할 뿐, 특정 노출원인 실내공기 오염 수준을 직접적으로 대변하지 않는다는 한계가 있다.

그러므로 이번 연구는 복합표본 선형회귀모델 이용한 모형간 보정 변수에 의한 영향을 평가하고 실내공기질과 개인의 건강 상태 간 연계를 정량적으로 평가할 수 있는 자료를 제공하였다는 의미를 지닌다. 특히 사회경제적 취약계층이나 특정 직업군에서의 노출 관리와 정책적 개입 필요성을 시사한다고 사료되었다.

V. 결 론

본 연구는 1,980명 성인의 KNHANES 데이터를 이

용하여 실내 BTEX 노출 수준과 주요 건강 영향을 평가한 횡단면 분석 연구이다. 그 결과, BTEX 대사산물 농도는 성별, 학력, 소득, 흡연 및 음주 등 인구사회학적 요인에 따라 유의한 차이를 보였으며, SPMA와 2MHA는 혈압, 혈당, HbA1c 등 대사 관련 지표 및 당뇨병 유병률과 유의한 연관성을 나타냈다. 이는 BTEX 노출이 전신 건강에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 또한 연령 및 수축기 혈압과 강한 연관성을 보였으며 PGA는 체질량 지수 및 간 효소와 관련이 있었다. 특히 SPMA는 다양한 건강지표와의 일관된 연관성을 보인다. 이는 실내 BTEX 노출의 건강영향을 평가하는 주요 생체지표로 활용 가능성이 높다. 특히 혈액학적 지표 및 심혈관계 위험인자 등과 연계함으로써 향후 노출이 인체 건강에 미치는 잠재적 영향 경로를 구체적으로 제시할 가능성을 확인하였다.

따라서 이 결과는 단면 연구 설계로 인해 인과관계 추론에 한계가 있음에도 불구하고, 실내 환경에서의 VOCs 노출과 건강 영향 간의 관련성을 정량적으로 제시하였으므로 향후 환경보건 정책 수립 및 작업장 노출 관리를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

References

- Abplanalp WT, Wickramasinghe NS, Sithu SD, Conklin DJ, Xie Z, Bhatnagar A, Srivastava S, O'Toole TE. Benzene exposure induces insulin resistance in mice. *Toxicol Sci* 2019;167(2): 426-437
- Bahadar H, Maqbool F, Mostafalou S, Baeri M, Rahimifard M, Navaei-Nigjeh M, Abdollahi M. Assessment of benzene induced oxidative impairment in rat isolated pancreatic islets and effect on insulin secretion. *Environ Toxicol Pharmacol* 2015;40:488-495
- Barreto G, Madureira D, Capani F, Aon-Bertolino L, Saraceno E, Alvarez-Giraldez LD. The role of catechols and free radicals in benzene toxicity: an oxidative DNA damage pathway. *Environ Mol Mutagen*. 2009;50:771-780
- Campo L, Rossella F, Mercadante R, Fustinoni S. Exposure to BTEX and ethers in petrol station attendants and proposal of biological exposure equivalents for urinary benzene and MTBE. *Ann Occup Hyg* 2015;59(1):1-16
- Ferguson L, Taylor J, Davies M, Shrubsole C, Symonds P, Dimitroulopoulou S. Exposure to indoor air pollution across socio-economic groups in high-income countries: A scoping review of the literature and a modelling methodology. *Environment International* 2020;143:105748
- Halios CH, Landeg-Cox C, Lowther SD, Middleton A, Marczylo T, Dimitroulopoulou S. Chemicals in European residences – Part I: A review of emissions, concentrations and health effects of volatile organic compounds (VOCs). *Sci Total Environ* 2022;839: 156201
- Kang GH, Uhm JY, Choi YG, Kang EK, Kim SY, Choo WO, Chang SS. Environmental exposure of heavy metal (lead and cadmium) and hearing loss: data from the Korea National Health and Nutrition Examination Survey (KNHANES 2010-2013). *Annals of Occupational and Environmental Medicine* 2018;30:22
- KNHANES, Standard Operating Procedure. (2025). Retrieved from <https://knhanes.kdca.go.kr/knhanes/postSendPage.do?url=%2FdataAnlsGd%2FutztnGd.do&postparam=%7B%22menuId%22%3A%20%22100310021001%22%7D>
- Koh HB, Chung JH, Moon SJ. Association of volatile organic compound exposure and metabolic syndrome. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 2024; 112:104581
- Oh HH, Park H, Kim DH, Son BC, Lee CK, Kim K, Ryu JY. The relationship between urinary BTEX metabolites and residence setting among Korean homemakers: the first Korea National Environmental Health Survey (2009-2011). *Ann Occup Environ Med* 2017;29:38
- Rafiee A, Delgado-Saborit JM, Sly PD, Amiri H, Hoseini M. Lifestyle and occupational factors affecting exposure to BTEX in municipal solid waste composting facility workers. *Sci Total Environ* 2019;656:540-546
- Rajabi H, Hadi Mosleh M, Mandal P, Lea-Langton A, Sedighi M. Emissions of volatile organic compounds from crude oil processing – Global emission inventory and environmental release. *Sci Total Environ* 2020;727:138654
- Ross D. Metabolic basis of benzene toxicity. *Eur J Haematol* 1996;57:111-118
- Scheepers PTJ, de Werdt L, van Dael M, Anzion R, Vanoirbeek J, Duca RC, Creta M, Godderis L, Warnakulasuriya DTD, Devanarayana NM. Assessment of exposure of gas station attendants in Sri Lanka to benzene, toluene and xylenes. *Environ Res* 2019;178:108670
- Sekar A, Varghese GK, Varma R. Exposure to volatile

organic compounds and associated health risk among workers in lignite mines. *Int J Environ Sci Technol* 2023;20:4293-4306

Snyder R, Hedli CC. An overview of benzene metabolism. *Environ Health Perspect* 1996;104:1165-1171

Yu CWF, Kim JT. Building pathology, investigation of sick buildings – VOC emissions. *Indoor Built Environ* 2010;19:30-39

Zhou BX, Wu QS, Fan SH, Su ZN, Peng JY, Lu CY,

Zhang ND, Jin L, Yu DE, Zhang J. Effect of low-concentration benzene, toluene, and xylene exposure on blood pressure of workers in a petroleum refining enterprise. *J Environ Occup Med* 2024;41(9):1012-1019

<저자정보>

서혜경(교수), 장호영(박사과정 연구원)