

사회·인구학적 요인과 시간활동양상에 따른 톨루엔 개인노출의 영향요인 분석

정순원*·이석용**·김현정*·최옥희*·김수진*·유승도*·양원호**†

*국립환경과학원 환경보건연구과

**대구가톨릭대학교 산업보건과

Affecting Factors of Personal Exposure to Toluene according to Sociodemographic Characterization and Time-activity Pattern

Soon-Won Jung*, Seok-Yong Lee**, Hyun jeong Kim*, Wookhee Choi*,
Suejin Kim*, Seungdo Yu*, and Wonho Yang**†

*Environmental Health Research Division, National Institute of Environment Research, Incheon, Korea

**Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu, Gyeongsan, Korea

ABSTRACT

Objectives: Exposure to hazardous air pollutants could be affected by sociodemographic factors such as age, gender and more. Information on time spent in microenvironments has a critical role in exposure assessment. The purpose of this study was to analyze the exposure pathways which influence personal exposure through time-activity patterns and sociodemographic factors.

Methods: A total of 379 subjects were collected from the second term of the Korean National Environmental Health Survey. A questionnaire survey in relation to sociodemographic factors and a time-activity diary were carried out for personal exposure to toluene. Focusing on personal exposure to toluene, factors affecting personal exposure were analyzed using multiple regression analysis.

Results: Participants spent their time in an indoor house for 16.8±4.0 hr, workplace or school 2.3±3.5 hr, and other indoor 2.1±2.2 hr. Sociodemographic factors were significantly different among each personal exposure and microenvironment. Time of staying at an office turned out to be a main factor from point of exposure in exposure pathway using multiple regression analysis. As a result, this means that exposure may be different according to the time of staying in each microenvironment.

Conclusions: Personal exposure to air pollutants might be decided by time-activity pattern indicating when, where, and which activities people pursue, as well as individual sociodemographic factors.

Keywords: Toluene, sociodemographics, time activity pattern, exposure assessment, exposure pathway

I. 서 론

현대사회에 살고 있는 사람들은 주택, 직장, 학교와 같은 다양한 실내환경에 머물며 공기오염물질에

노출되고 있다. 실내공기오염으로 인한 건강영향 관심이 높아지면서 재실자의 노출수준 추정,¹⁾ 건강영향평가,^{2,3)} 개인노출 수준을 정확히 평가하기 위한 방법론 개발 등 관련 연구들이 활발하게 수행되고

†Corresponding author: Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu, Gyeongsan, Korea, Tel: +82-53-850-3739, E-mail: whyang@cu.ac.kr

Received: 31 March 2017, Revised: 09 April 2017, Accepted: 10 April 2017

있다. 선진국에서는 실내공기 오염물질로 인한 건강 영향을 보다 정확히 평가하기 위하여 하루 24시간 중 개인의 시간활동양상에 따라 특정 오염물질에 노출되는 양을 조사하고 있으며 관련 연구들이 활발히 진행되고 있다.^{4,5)} 국내 연구에 의하면 한국인들이 실내에서 생활하는 시간은 미국, 유럽연합 등과 비교하여 비슷한 수준인 약 87%로 나타났다. 그러나 주택실내에서 보내는 시간은 1일 중 대략 한국인이 14.2 시간(59.3%), 미국과 유럽연합 국가들의 사람들이 16.8 시간(70.0%)으로 보고되고 있어 주요 실내 환경에서 생활하는 시간의 차이가 있음을 확인할 수 있다.⁶⁾ 이것은 사람들이 어떤 실내 환경에서 얼마 동안의 시간을 보내는지에 따라 개인노출의 크기가 다를 수 있음을 고려할 때 중요한 의미를 나타낸다. 세계보건기구(WHO)는 인구집단을 대상으로 환경유해인자 노출에 대한 건강영향 평가 시 노출 모델링(modeling)을 주요 방법 중 한가지로 제시하고 있으며, 시간활동양상 자료는 노출 모델링에 필수적인 요인으로 보고하고 있다.⁷⁾ 일반적으로 사람은 한 장소에 머물지 않고 계속적 또는 일정한 패턴을 가지고 주기적으로 이동하며, 각기 다른 국소 환경의 유해 공기오염물질 농도가 다르기 때문에 총 인간노출(total human exposure)의 개념이 도입되었다.⁸⁾ 사람의 시간활동양상 연구는 공기오염물질 노출평가 및 예측모델링에 적용될 수 있으며, 공기오염물질 개인노출을 평가하기 위한 위해도 관리 측면에서 핵심적인 부분이라 할 수 있다.^{5,9)} 사람들의 시간활동양상은 성별, 나이 등과 같은 인구학적 특성 뿐만 아니라 직업, 교육수준, 수입 등과 같은 사회경제적 요인에 의하여 차이를 보일 수 있는 것으로 보고된 바 있다.^{4,10)} 외국의 연구사례에 따르면 사회·인구학적 변수들에 따라 시간활동양상이 인구집단 특성별로 다르게 나타나며, 결과적으로 개인노출에 영향을 미치는 요인으로 평가되었다. 이것은 환경유해인자들의 노출을 파악하는데 있어 사회·인구학적 변수와 시간활동양상이 주요한 노출경로(exposure pathway)로 평가된다고 하였다.¹¹⁾

본 연구의 대상물질인 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs) 중 톨루엔(toluene)은 대기 중에서도 자주 검출되는 물질로, 그 자체로도 신경계 등 인체에 유해한 영향을 미친다.¹²⁾ 환경 중에서도 널리 분포하고 있으며 일반 환경에서도 다양한

발생원을 갖고 있는 VOCs는 대표적 발암물질인 벤젠을 비롯해 많은 이성체로 합쳐진 복합물질로서, 주로 호흡을 통해 체내로 사람에게 노출된다.¹³⁾ 특히 톨루엔은 생활제품 중 손톱 광택제, 화장품, 접착제, 얼룩제거제를 포함한 다양한 크리닝 제품에 포함될 수 있어 일반 사람들에게 쉽게 노출될 수 있는 주요한 오염물질이라 할 수 있다.¹⁴⁾ 또한 톨루엔은 산업장 이외에도 일반 환경에서 자동차 배출가스 및 담배연기를 통해 노출될 수 있어¹⁵⁾ 가정, 직장 또는 학교, 기타 실내 장소, 이동수단 등 각 국소환경에서 보낸 개인의 정확한 노출평가가 중요하다. 그러나 기존의 연구들은 개인노출을 직접 측정하지 않고, 주택실내, 직장 및 학교, 이동 수단 등 각 국소환경에서의 농도만을 이용하여 개인노출을 예측 또는 평가하는 경우가 많았다.¹⁶⁾ 본 연구에서는 개인노출에 영향을 미칠 수 있는 시간활동양상 및 사회·인구학적 요인들을 고려하여 톨루엔의 개인노출 농도에 영향을 미치는 주요한 노출영향 요인을 파악하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상

본 연구는 환경부 국립환경과학원 제 2기(12~14년) “국민환경보건기초조사” 참여자를 대상으로 사회·인구학적 특성, 시간활동양상, 군집별 특성 및 계절과 같은 요인을 반영하여 총 40개 조사구를 선정하였다. 조사대상 지역은 서울, 부산, 인천, 대전, 대구, 울산, 광주, 강원도, 경기도, 경남, 경북, 전남, 전북, 충남 지역이었다. 연구기간 중 탈락자를 제외한 240가구 총 379명을 대상으로 환경노출 설문 및 시간활동양상을 조사하였으며, 휘발성 유기화합물 중 톨루엔의 주택 실내·외 및 개인노출을 측정하였다.

2. 설문 및 시간활동양상 조사

환경노출을 평가하기 위한 설문조사는 인구학적 특성, 사회·경제적 특성, 생활습관 등에 관한 기본항목과 거주지 실내·외 환경, 교통 및 이동수단 등 노출경로 파악을 위한 내용으로 약 140개의 문항으로 구성되었다. 시간활동조사는 연구 참여자들이 하루 24시간 어느 국소환경에서 어떤 행동을 하였는지 알아보기 위하여 30분 단위로 시간활동일지에 참여자

가 직접 기록하였다. 조사기간은 평일 2일, 주말 2일이었으며, 실내 환경은 주택실내, 직장 및 학교, 기타실내로 구분하였고, 실외장소, 이동환경 등 총 5가지 국소환경으로 설정하였다. 시간활동일지에 매 시간 기록된 횟수를 이용하여, 각 국소환경에서 보낸 시간을 산출하였다.

3. 휘발성 유기화합물(VOCs) 측정 및 분석

VOCs 측정은 참여자의 주택실내·외뿐만 아니라 개인노출을 동시에 측정하기 위하여 수동식 시료채취기(OVM, 3M 3500, USA)를 이용하였으며, 평일 2일, 주말 2일 총 4일간 측정하여 톨루엔 농도를 활용하였다. 주택실내는 사람들이 가장 잘 모이는 장소인 거실에 설치하여 측정하였다. 측정 위치는 연소장치 발생원으로부터 3 m 이상, 창문 또는 문에서 2 m 이상, 높이는 지면으로부터 1.2 m 이상 되도록 하였다. 주택 실외 측정의 경우 비나 눈이 맞지 않도록 비 마개(rain protector)를 수동식 시료채취기 위에 설치하였으며, 지면에서 1 m 이상 떨어진 곳에 위치하도록 하였다. 개인노출은 대상자의 호흡기에서 약 30 cm 이내에 설치하여 측정하였다. VOCs 분석은 수동식 시료채취기에 이황화탄소(CS₂) 1 ml을 주입 후 30분간 정치 및 가볍게 흔들어 탈착하였으며, 바이알(vial)에 저장한 용액은 가스크로마토그래피(GC/MS(gas chromatography/mass spectrophotometry, Turbo Mass Gold, Perkin elmer, USA)를 이용하여 분석하였다. 시료채취 후 실험실에서 분석을 위한 VOCs 수동식 시료채취기의 표준곡선은 지역별로 분석할 때마다 표준곡선을 작성하여 농도값을 구하였다. 수동식 시료채취기를 이용하여 측정한 톨루엔의 검출한계(LOD)는 0.05 µg/m³ 이었으며, field blank가 검출되지 않았기 때문에 standard solution에서 검출 가능한 최소 표준용액을 7회 이상 분석한 후 표준편차에 3.14를 곱하여 구하였다. 시료 분석에서 불검출되거나 검출한계 이하로 분석된 농도는 제외하였다.¹⁷⁾

4. 통계분석

자료의 통계학적 분석은 SPSS ver. 21(IBM Company, USA)를 이용하였다. 설문조사 중 톨루엔 개인노출에 영향을 줄 것으로 판단되는 사회·인구학적 변수(성별, 연령, 학력, 가구수입, 직업 등)

와 국소환경(주택실내, 직장 및 학교, 실외, 이동 등)에서 보낸 시간활동양상 변수들을 추출하였으며, 추출된 변수들을 사용하여 톨루엔 개인노출농도와 변수들 간의 상관성을 분석하였다. 연구대상자의 시간활동양상과 사회·인구학적 변수의 특성, 주택 실내·외 및 개인노출 농도는 기술통계분석과 빈도분

Table 1. The description and categories of variables in this study

Variables	Description and categories of each variable
Dependent variables	
Personal exposure concentration (µg/m ³) of toluene	Continuous variable
Independent variables	
Seasons	Spring=1, summer=2, autumn=3, winter=4
Gender	Female=0, male=1
Age	Continuous variable
House types	Detached house=0, apartment=1
Buy a new furniture	No=0, yes=1
Smoker	No=0, yes=1
Second handed smoker	No=0, yes=1
Drink alcohol	No=0, yes=1
Exercise	No=0, yes=1
Education	Less than high school=0, over university=1
Marital status	Single=0, married=1
Income(10,000 won)	0-99=0, 100-199=1, 200-299=2, 300-399=3, 400-499=4, 500-599=5, Over 600=6
Job	No=0, yes=1
Industrial complex near house	No=0, yes=1
Staying time in house indoor	Continuous variable
Staying time in workplace or school	Continuous variable
Staying time in other indoors	Continuous variable
Staying time in outdoor	Continuous variable
Staying time in transport	Continuous variable

석을 사용하여 제시하였다. 사회·인구학적 특성에 따른 개인노출농도 간 평균의 비교는 T-검정이나 일원배치분산분석을 사용하였다. 톨루엔의 개인노출 농도와외의 관련성을 분석하기 위하여 회귀분석을 실시하였다. 본 연구에 포함된 변수를 정리하면 다음과 같다(Table 1).

III. 연구결과

1. 인구학적 특성

전체 379명의 설문을 통해 조사된 인구·사회학적 특성, 생활습관, 교육수준, 직업유무를 Table 2에 나타내었다. 참여자의 성별 비율은 여성이 58.6%로 남성 41.4%보다 높았으며, 전체 평균 연령은 52.8±15.3세로 나타났다. 대상자 중 흡연자는 19.3%이었으며, 25.6%가 간접흡연을 하고 있다고 응답하였다. 학력은 고졸 이하의 참여자가 245명(64.6%)으로 대졸이상의 참여자 134명(35.4%)보다 많았으며, 직업을 가진 참여자는 192명(50.7%), 무직자는 187명(49.3%)로 비슷한 비율을 나타내었다.

2. 시간활동양상

총 참여자 379명에 대하여 평일과 주말의 시간활동양상을 Table 3에 나타내었다. 평일 실내환경에서 머무르는 시간은 주택실내 16.6±4.6 hr, 직장 및 학교 3.0±4.3 hr, 기타실내 1.8±2.1 hr로 하루 중 실내 환경 재실률은 88.7%이었으며, 실외에 머무르는 시간은 1.1±1.9 hr, 이동시간은 1.6±1.7 hr로 나타났다. 주말은 평일에 비해 주택실내에서 보내는 시간이 평균 0.7 hr 더 길었으며, 직장 및 학교에서 보낸 시간은 1.4 hr 줄어들었고 기타실내에 머문 시간은 0.5 hr 늘어났다. 실외에 머무르는 시간 및 이동시간도 주말이 평일보다 각각 평균 0.3 hr 및 0.1 hr 더 긴 것으로 나타났다.

3. 톨루엔 개인노출 농도

수동식 채취기를 이용하여 측정된 톨루엔의 주택실내 및 주택실외, 개인노출 농도를 Table 4에 나타내었다. 개인노출 농도는 39.5±85.5 µg/m³로 주택실내 38.2±112.7 µg/m³, 주택실외 17.1±31.8 µg/m³보다 높게 나타났으며, 개인노출 농도와외의 Spearman 상관계수는 주택실내 0.645(p<0.01), 주택실외 0.273

Table 2. Socioeconomic and demographic characteristics of participants in this study

Category		N (%) or Mean
Gender	Female	222 (58.6%)
	Male	157 (41.4%)
Age (Mean±SD)		52.8±15.3 years
House type	Detached house	130 (34.3%)
	Apartment	249 (65.7%)
Ventilation time (Mean±SD)		6.5±7.4 hrs
Alcohol	No	25 (6.6%)
	Yes	354 (93.4%)
Smoking	No	306 (80.7%)
	Yes	73 (19.3%)
Second-hand smoking	No	282 (74.4%)
	Yes	97 (25.6%)
Education	Less than high school	245 (64.6%)
	More than Junior college	134 (35.4%)
Existence of Job	Total	Unemployed 187 (49.3%) Employed 192 (50.7%)
	Male	Unemployed 46 (12.1%) Employed 111 (87.9%)
	Female	Unemployed 141 (37.2%) Employed 81 (62.8%)

(p<0.01)로 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 보였다. 따라서 톨루엔의 개인노출 농도는 주택실외 보다 주택실내 톨루엔 농도와 양의 상관성이 높은 것으로 나타났다. 주택 실내-외 농도비(I/O)는 3.4로 높게 나타났으며, 실내/실외 농도비가 1±0.5일 경우 일반적으로 실외 영향이 주된 것으로 판단하며, 5 이상인 경우 실내 발생원이 주된 것으로 보고하고 있다.¹⁸⁾ 따라서 본 연구의 결과는 실외 유입뿐만 아니라 실내 발생원이 존재함을 나타낸다고 할 수 있다. Table 5는 성별, 연령, 흡연유무, 가구수입, 교육수준, 직업유무에 따른 톨루엔의 개인노출 차이가 있는지 나타내었다. 연령별 톨루엔 개인노출 농도를 살펴본 결과, 20, 30대 연령군이 40대 이상 연령군보다 개인노출 농도가 높은 것으로 나타났다(p<0.05). 흡연자의 개인노출 농도는 52.4±114.0 µg/m³로 비흡연자 35.3±76.0 µg/m³보다 높게 나타났으며, 직업을 가진 사람이 41.3±90.9 µg/m³로 직업이 없는 사

Table 3. Time (hr) spent in the micro-environments of participants in weekday and weekend

	Micro-environment	M±SD (%)	Sum (%)	Range	Interquartile range				
					25%	50%	75%	95%	
Total	Indoor	House Indoor	16.8±4.0 (70.1)	88.3	1.4-24.0	14.3	17.0	20.0	22.5
		Workplace (or School)	3.0±3.5 (9.5)						
		Other indoors	2.1±2.2 (8.7)						
	Outdoor	1.2±1.7 (5.1)	5.1	0.0-11.4	0.0	0.5	1.8	5.0	
	Transport	1.6±1.5 (6.6)	6.6	0.0-10.4	0.8	1.4	2.0	3.9	
	Weekday	Indoor	House Indoor	16.5±4.6 (68.6)	88.7	2.8-24.0	12.8	16.8	20.5
Workplace (or School)			3.0±4.3 (12.5)						
Other indoors			1.8±2.1 (7.6)						
Outdoor		1.1±1.9 (4.6)	4.6	0.0-14.0	0.0	0.0	1.5	5.5	
Transport		1.6±1.7 (6.7)	6.7	0.0-13.8	0.5	1.3	2.0	4.5	
Weekend		Indoor	House Indoor	17.2±4.3 (71.6)	87.9	0.0-24.0	14.8	17.8	20.5
	Workplace (or School)		1.6±3.4 (6.5)						
	Other indoors		2.4±2.9 (9.8)						
	Outdoor	1.3±2.0 (5.6)	5.6	0.0-10.0	0.0	0.5	2.0	5.8	
	Transport	1.6±1.6 (6.5)	6.5	0.0-9.8	0.5	1.0	2.3	5.0	

Table 4. Micro-environmental and personal exposure concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of toluene

Location	M±SD	I/O	GM	Range	Inter-quartile range			
					25th	50th	75th	95th
House indoor (n=224)	38.2±112.7	3.4	14.1	0.1-1156.4	7.1	13.3	26.4	151.8
House outdoor (n=221)	17.1±31.8		9.2	0.1-352.4	5.0	9.7	15.0	58.9
Personal (n=370)	39.5±85.5		18.0	0.4-847.6	8.8	15.6	34.8	156.9

람 $35.8 \pm 78.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높았으나 통계적으로 유의하지는 않았다. 학력이 높은 사람이 낮은 사람보다 개인노출 농도값이 높았으나 통계적으로 유의하

지 않았으며, 성별, 가구수입에 따른 개인노출 농도는 비슷한 수준이거나 특별한 경향은 발견할 수 없었다.

Table 5. Personal exposure concentration to toluene according to socioeconomic status

Category	Personal exposure ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				
	N	AM \pm SD	GM	P-value	
Gender	Female	222	37.8 \pm 39.7	18.1	0.830
	Male	157	39.7 \pm 96.1	18.0	
Age	20's	21	69.9 \pm 184.0	23.7	0.012
	30's	71	63.1 \pm 130.1	24.4	
	40's	75	38.8 \pm 72.5	18.6	
	50's	73	20.7 \pm 22.1	12.1	
	60's	77	37.3 \pm 60.2	19.5	
	\geq 70's	62	22.2 \pm 28.1	13.5	
Smoking	No	306	35.3 \pm 76.0	16.9	0.120
	Yes	73	52.4 \pm 114.0	23.5	
Income(10,000 won)	0-99	55	27.2 \pm 42.7	15.1	0.075
	100-199	68	23.8 \pm 35.2	14.4	
	200-299	68	61.5 \pm 127.0	19.6	
	300-399	70	33.9 \pm 55.0	19.4	
	400-499	40	47.9 \pm 133.3	20.8	
	500-599	44	52.6 \pm 103.0	24.2	
Education	\geq 600	34	21.2 \pm 18.5	16.4	0.330
	Less than high school	245	35.4 \pm 75.7	17.1	
Existence of job	More than Junior college	134	44.3 \pm 99.1	19.9	0.525
	Total	Unemployed	187	35.8 \pm 78.0	
		Employed	192	41.3 \pm 90.9	20.4

Table 6. Factors affecting personal exposure concentrations to toluene by using of multiple linear regression models

Dependent	Independent	Coefficient	Partial R ²	Model R ²	p-value
Personal exposure to toluene	Toluene concentration of house indoor	.656	22.8%	22.8%	0.000
	House construction year	.013	6.8%	29.6%	0.003
	Times (hr) spent in workplace or school	4.691	5.6%	35.2%	0.006
	Age	-1.205	3.1%	38.2%	0.034

5. 톨루엔 개인노출 영향요인 분석

톨루엔 개인노출 농도에 영향을 주는 요인의 관련성 분석을 위하여 사회·인구학적 특성을 포함한 설문조사, 시간활동조사, 주택 실내외 톨루엔 농도 변수를 이용하여 선형회귀분석을 실시하였다. 톨루엔 개인노출 농도 영향 요인 중 통계적으로 유의한 독립변수는 실외시간(-), 주택실외 톨루엔 농도(+), 주택실내 톨루엔 농도(+), 담배 개피수, 연령, 건축년도로 나타났다. Table 6은 톨루엔의 개인노출 농도에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위해 다

중회귀분석 방법 중 단계적 선택법(stepwise)을 이용하여 결과를 나타내었다. 톨루엔 개인노출 농도에 영향을 주는 설명변수는 주택실내 톨루엔 농도, 건축년도, 직장실내에서 보낸 시간(hr), 연령으로 나타났다(p<0.05). 주택실내 톨루엔 농도가 높고 건축년도가 최근일수록 톨루엔 개인노출 농도 증가에 영향을 주는 것으로 나타났으며, 직장실내에서 보낸 시간이 긴 경우에도 개인노출 증가와 관련성이 있었다. 또한 연령이 적을수록 톨루엔 개인노출 농도가 증가하는 것을 알 수 있었다.

IV. 고 찰

본 연구는 국립환경과학원에서 3년 주기로 실시하는 제 2기 국민환경보건기초조사와 연계하여 참여자들의 톨루엔 개인노출 및 주택실내의 농도 측정과 함께 개인노출 농도에 영향을 미칠수 있는 사회·인구학적 요인 및 국소환경에서 보낸 시간활동양상을 고려해 노출경로를 파악하고자 하였다. 연구대상자의 지역별 표본 선정은 국민환경보건기초조사 2기 참여자의 인구학적 변수와 지역을 고려하여 기초조사 참여자의 약 10% 내외로 선정하였으나 국민환경보건기초조사 2기(2012~2014년) 전체참여자가 아닌 2012년에 모집된 대상자만을 선정한 것으로 전체를 대표하기 어려운 제한점을 가지고 있다. 본 연구 참여자의 성별 비율은 남성 41.4%, 여성 58.6%로 국민환경보건기초조사 2기 전체참여자 남녀 각각 42.8%, 57.2%와 유사하였으며, 흡연유무, 교육수준 등도 비슷한 수준이었다. Yang 등의 연구결과에서는 평일의 주택실내에서 보낸 시간 14.2 hr (59.3%), 기타실내 6.8 hr (28.3%)로 하루 중 약 87.6%를 실내 환경에서 생활하는 것으로 보고하였으며,⁶⁾ 본 연구 결과의 평일 88.7% 및 주말 87.9%와 비슷한 결과를 나타내었다. 국외에서 보고된 시간활동조사의 경우 실내 환경에서 보내는 시간은 국내와 비슷하였으나 주택실내에서 보내는 시간은 미국 68.7%, 캐나다 65.9%, 영국 68.6%에 비해 주택실내 시간이 적은 것으로 나타났다.^{19,21)} 이 결과는 한국인이 직장 생활이나 음식점 등 기타실내의 활동이 높을 수 있음을 나타내고 있어 실내오염원으로 인한 개인노출의 차이가 있을 수 있다. 2009년 통계청 생활시간조사 자료를 이용한 분석 결과, 실내환경 중 주택실내에서 보내는 시간은 16.4±4.8 hr (68.2%), 직장 및 학교에서 머무는 시간이 6.8±4.3 hr (28.3%)로 본 연구와 비교 시 주택실내에서 보내는 시간은 큰 차이가 없었지만 직장 및 학교에서 보내는 시간은 약 4.5 hr 정도 차이가 있었다. 이것은 직장 및 학교에 다니는 참여자 중 일반 직장인이 아닌 단기아르바이트 또는 재택근무, 차량운행 근로자 등이 다수 포함되어 있어 근로기준법에 제시된 근로시간 8 hr에 비해 약 5.7 hr 적었으며, 통계청 생활시간 조사에서도 1.2 hr 정도 미달됨을 알 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 추후 연구에서는 직장인 특성별로 구분하여 시간활

동조사가 자세히 이루어질 수 있도록 개선이 필요한 것으로 보인다.

본 연구에 사용된 수동식 시료채취기는 주로 개인노출을 측정하거나 기여도를 추정하기 위하여 개인노출과 함께 국소환경을 동시에 측정하는데 사용되어 왔으며,⁵⁾ 실내외 및 개인노출 시료를 채취하는데 있어서의 정밀도 및 정확도 등은 이전의 연구에서 입증되었다.^{22,23)} 수동식 채취기를 이용하여 참여자의 개인노출 농도와 주택실내 및 실외의 톨루엔 농도를 측정한 결과, 개인노출 농도는 주택실외의 보다 주택실내와 상관관계가 더 높은 것으로 나타나 톨루엔의 개인노출이 실외보다 실내공기질이 참여자 개인노출에 더 많은 기여를 한 것으로 보인다. Sexton 등은⁹⁾ 건강한 성인 비흡연자 70명을 대상으로 48시간 동안 호흡기 근처에서 VOCs 개인노출을 측정하였고, 동시에 주택실내 및 실외, 직장 또는 학교 실내, 버스와 같은 이동수단의 VOCs를 측정한 결과, 주택실내가 개인노출에 가장 많이 기여하고, 다음으로 직장 또는 학교실내 공기질이 개인노출에 가장 많이 기여하는 것으로 보고하고 있어 본 연구와 유사한 결과를 보였다. 본 연구의 톨루엔 개인노출 농도는 평균 39.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 NHANES (National health and nutrition examination survey)에 참여한 대상자 중 VOCs를 측정된 636명의 톨루엔 개인노출 농도 39.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 유사한 수준으로 나타났다.²⁴⁾ 한편, Dermirel 등²⁵⁾이 보고한 초등학교 65명의 톨루엔 개인노출 농도 26.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다는 본 연구가 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 각 연구대상자의 인구학적 요인 등의 차이가 주된 원인일 수 있으나, 개인노출 농도는 국소환경의 농도 및 머무는 시간에 의해 노출수준이 결정되기 때문에 성인과 초등학생의 시간활동양상 차이, 즉 시간 및 장소의 영향이 중요한 요인으로 작용했을 것으로 판단된다.

사회·인구학적 특성 중 연령에 따른 톨루엔의 개인노출 차이가 통계적으로 유의하게 나타났다. 20, 30대 연령군이 40대 연령군보다 노출이 높은 경향을 나타냈으며, 이는 시간활동조사 결과에서 20, 30대가 직장 또는 학교실내 및 기타 실내에서 보내는 시간이 더 많았기 때문인 것으로 생각된다. 성별에 따른 톨루엔 개인노출농도는 통계적으로 유의한 차이는 없는 것으로 나타났다. Wang 등¹¹⁾의 연구에서도 성별에 따른 톨루엔 개인노출은 통계적으로 차이

가 없는 것으로 나타났으나, 벤젠, 에틸벤젠, 자일렌 등에서는 성별에 따라 직장이나 학교에 머무르는 시간 및 실외 활동시간의 차이로 인해 노출에 차이가 있는 것으로 보고하였다. 한편 흡연 유무에 따른 톨루엔 개인노출 농도는 흡연자가 비흡연자 보다 높게 나타났으나 통계적으로 유의한 차이는 나지 않았으며, Wang의 연구에서도 동일한 결과를 나타내었다. 한편 가구소득에 따른 개인노출 차이는 본 연구에서 조사된 가구소득의 범위로는 저소득층과 고소득층을 구분하거나 범주를 나누기가 쉽지 않기 때문에 향후 연구에서 우리나라 평균 가구소득을 활용한 추가 연구를 수행한다면 사회경제수준에 따른 개인노출수준 및 건강불평등을 평가할 수 있을 것으로 보여진다.

톨루엔 개인노출 농도에 영향을 주는 요인을 알아보기 위하여 회귀분석을 실시한 결과, 연령, 건물의 건축년도, 흡연량, 주택실내외 톨루엔 농도와 함께 국소환경에서 보낸 시간 역시 관련이 있는 것으로 나타났다. 톨루엔 개인노출 농도에 영향을 주는 요인을 노출 특성별로 정리해보면 인구학적 특성으로는 연령이, 생활습관 중에서는 흡연량이 개인노출 농도 증가와 관련성이 있는 것을 알 수 있었다. 또한 시간활동조사에서는 직장 또는 학교 실내에서 보낸 시간이 길수록 개인노출 농도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이상의 결과는 인구학적 요인 및 생활습관뿐만 아니라 개인의 시간활동 정보인 시간 및 장소가 개인노출 농도에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다. Edwards 등²⁶⁾은 VOC 노출과 사회·인구학적 요인 및 시간활동양상 사이에 관련성이 있다고 보고하고 있어 본 연구결과와 유사한 경향을 보였다. 본 연구에서 다중회귀분석 결과 특히 직장 또는 학교 실내 시간이 증가함에 따라 톨루엔 개인노출 증가와 관련성이 있는 것으로 나타났다. 이는 기존의 많은 연구에서 특히 노출평가를 실시할 때, 단순히 직업유무 정도와 노출물질과의 연관성에 대한 결과보다는, 직장 및 학교에서 머문 시간처럼 특정 국소환경에서 보낸 시간도 함께 고려되어야 환경오염물질에 대한 노출경로를 좀 더 정확하게 노출평가가 될 것이라 생각한다. 또한 이러한 결과는 국민환경보건기초조사의 목적 중 하나인 유해물질 노출수준을 조사하고 그 영향을 미치는 요인을 분석하는데 있어 노출에 실질적으로 기여하는 노출요인을 제시할 수 있을 것으로 본다.

V. 결 론

본 연구는 국립환경과학원에서 실시한 제 2기 국민환경보건기초조사 참여자를 대상으로 시간활동양상 및 사회·인구학적 요인 차이에 따른 톨루엔의 개인노출 특성 및 노출경로를 파악하고자 하였다. 본 연구결과를 종합하면, 톨루엔의 개인노출 농도는 각 국소환경에서의 시간활동양상 및 사회·인구학적 요인에 따라 다르다는 것을 알 수 있었다. 특히 시간활동양상은 각 국소환경에서의 개인노출을 추정할 수 있는 기본적인 자료로써 노출경로에 대한 해석과 함께 사회·인구학적 특성에 따른 노출수준을 파악할 수 있기 때문에 향후 개인노출평가에 있어 장소와 시간에 대한 정보는 필수적인 요소가 된다고 할 수 있다. 이는 환경보건 및 일반 환경에서 개인의 직접적인 노출량을 평가하는데 있어 국소환경과 같은 노출경로를 설정하는 것이 중요하다는 것을 의미한다. 본 연구는 인구집단의 사회·인구학적 요인과 시간활동양상 정보를 파악하여 노출평가를 하는데 있어 새로운 접근방법을 제시하는 도구로 사용될 수 있으며, 미세먼지와 같은 다른 공기오염물질 개인노출평가 등에도 활용될 수 있을 것이다.

References

1. Lai HK, Kendall M, Ferrier H, Lindup H, Alm S, Hänninen O, Jantunen M, Mathys P, Colville R, Ashmore MR, Cullinan P. Personal exposures and microenvironment concentrations of PM 2.5, VOC, NO₂ and CO in Oxford, UK. *Atmospheric Environment*. 2004; 38(37): 6399-6410.
2. Rabinovitch N, Adams CD, Strand M, Koehler K, Volckens J. Within-microenvironment exposure to particulate matter and health effects in children with asthma: a pilot study utilizing real-time personal monitoring with GPS interface. *Environmental Health*. 2016; 15(1): 96.
3. Masih A, Lall AS, Taneja A, Singhvi R. Exposure profile, seasonal variation and health risk assessment of BTEX in indoor air of homes at different microenvironments of a terai province of northern India. *Chemosphere*. 2017; 176: 8-17.
4. McCurdy T, Graham SE. Using human activity data in exposure models: analysis of discriminating factors. *Journal of Exposure Analysis and Environmen-*

- tal Epidemiology*. 2003; 13(4): 294-317.
5. Liu W, Zhang JJ, Korn LR, Zhang L, Weisel CP, Turpin B, Morandi M, Stock T, Colome S. Predicting personal exposure to airborne carbonyls using residential measurements and time/activity data. *Atmospheric Environment*. 2007; 41(25): 5280-5288.
 6. Yang W, Lee K, Yoon C, Yu S, Park K, Choi W. Determinants of residential indoor and transportation activity times in Korea. *Journal of Exposure Science Environmental Epidemiology*. 2011; 21(3): 310-316.
 7. WHO. Air quality guidelines for Europe, Second edition. WHO Regional Publications, European Series. 2000.
 8. Ott WR. Human exposure assessment: the birth of a new science. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 1995; 5(4): 449-472.
 9. Sexton K, Mongin SJ, Adgate JL, Pratt GC, Ramachandran G, Stock TH, Morandi MT. Estimating volatile organic compound concentrations in selected microenvironments using time-activity and personal exposure data. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*. 2007; 70(5): 465-476.
 10. Schweizer C, Edwards RD, Bayer-Oglesby L, Gauderman WJ, Ilacqua V, Jantunen MJ, Lai HK, Nieuwenhuijzen M, Kunzli N. Indoor time-micro-environment-activity patterns in seven regions of Europe. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. 2007; 17: 170-181.
 11. Wang SW, Majeed MA, Chu PL, Lin HC. Characterizing relationships between personal exposures to VOCs and socioeconomic, demographic, behavioral variables. *Atmospheric Environment*, 2009; 43(14): 2296-2302.
 12. Greenberg MM. The central nervous system and exposure to toluene: a risk characterization. *Environmental research*. 1997; 72(1): 1-7.
 13. Shin DC, Park SE, Lim YW, Yang JY, Kim MS. Exposure assessment of volatile organic matters(VOCs) using exposure biomarker in the residents living near petrochemical industry areas. *Korea of Journal of Environmental Toxicology*. 2000; 15(3): 81-91.
 14. Agency for Toxic Substances, Disease Registry. Toxicological profile for toluene. ATSDR, Atlanta. 2000.
 15. Lovreglio P, Barbieri A, Carrieri M, Sabatini L, Fracasso ME, Doria D, Drago I, Basso A, D'Errico MN, Bartolucci GB, Violante FS, Soleo L. 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. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 2010; 83(3): 341-356.
 16. Chang LT, Koutrakis P, Catalano P, Suh H. Assessing the importance of different exposure metrics and time-activity data to predict 24-h personal PM 2.5 exposures. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*. 2003; 66(16-19): 1825-1846.
 17. Daisey JM, Hodgson AT, Fisk WJ, Mendell MJ, Ten Brinke J. Volatile organic compounds in twelve California office buildings: Classes, concentrations and sources. *Atmospheric Environment*. 1994; 28(22): 3357-3562.
 18. Blas MD, Navazo M, Alonso L, Durana N, Gomez MC, Iza J. Simultaneous indoor and outdoor on-line hourly monitoring of atmospheric volatile organic compounds in an urban building. The role of inside and outside sources. *Science of the Total Environment*. 2012; 426: 327-335.
 19. Klepeis NE, Nelson WC, Ott WR, Robinson JP, Tsang AM, Switzer P, Behar JV, Hern SC, Engelmann WH. The national human activity pattern survey (NHAPS) : a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2001; 11: 231-252.
 20. Lai HK, Kendall M, Ferrier H, Lindup I, Alm S, Hanninen O, Jantunen M, Mathys P, Colville R, Ashmore MR, Cullinan P, Nieuwenhuijzen MJ. Personal exposures and microenvironment concentrations of PM_{2.5}, VOC, NO₂ and CO in Oxford, UK. *Atmospheric Environment*. 2004; 38: 6399-6410.
 21. Leech JA, Nelson WC, Burnett RT, Aaron S, Raimonne ME. It's about time: A comparison of Canadian and American time-activity patterns. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. 2002; 12: 427-432.
 22. Cocheo C, Boaretto C, Pagani D, Quaglio F, Sacco P, Zaratini L, Cottica D. Field evaluation of thermal and chemical desorption BTEX radial diffusive sampler radiello compared with active (pumped) samplers for ambient air measurements. *Journal of Environmental Monitoring*. 2009; 11: 297-306.
 23. Pratt GC, Bock D, Stock TH, Morandi M, Adgate JL, Ramachandran G, Mongin SJ, Sexton K. A Field Comparison of volatile organic compound measurements using passive organic vapor monitors and stainless steel canisters. *Environmental Sci-*

- ence & Technology*. 2005; 39(9): 3261-3268.
24. Symanski E, Stock TH, Tee PG, Chan W. Demographic, residential, and behavioral determinants of elevated exposure to benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes among the U. S. population: Results from 1999-2000 NHANES. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*. 2009; 72: 903-912.
25. Dermirel G, Özden Ö, Dögeroglu T, Gaga EO. Personal exposure of primary school children to BTEX, NO₂, and ozone in Eskisehir, Tukey: Relationship with indoor/outdoor concentrations and risk assessment. *Science of the Total Environment*. 2014; 473: 537-548.
26. Edwards RD, Schweizer C, Llacua V, Lai HK, Jantunen M, Bayer-Oglesby L, Kunzli N. Time-activity relationships to VOC personal exposure factors. *Atmospheric Environment*. 2006; 40(29): 5685-5700.