

산업단지 및 일반생활 지역의 공기 중 톨루엔에 대한 개인노출 및 생체시료의 상관성 분석

이병준* · 허정* · 정다영* · 김순신** · 류현수* · 최민지* ·

좌이지엔페이* · 임성국*** · 양원호*†

*대구가톨릭대학교 산업보건학과

**순천향대학교 구미병원 유해가스노출 환경보건센터

***대한산업보건협회 산업보건환경연구원

Correlation Relationship between Personal Exposure and Biological Monitoring for Airborne Toluene in an Industrial Complex and General Environments

Byoungjun Lee*, Jung Heo*, Dayoung Jung*, Sunshin Kim**, Hyeon-Su Ryu*,
Jian-Fei Shuai*, Min-Ji Choi*, Sung-Guk Im***, and Wonho Yang*†

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

**Environmental Health Center for Hazardous Gas Exposure, Gumi Hospital,

Soonchunhyang University College of Medicine, Gumi, Korea

***Institute of Occupational and Environmental Health, Korean Industrial Health Association

ABSTRACT

Objectives: The purpose of this study was to assess the correlation relationship between personal exposure and urinary hippuric acid in biological monitoring for airborne toluene in an industrial complex and in general environments.

Methods: Personal exposure to toluene and its metabolite, hippuric acid, in urine were simultaneously measured in occupational environments area near an industrial complex and in general environments. The study subjects were divided into three types: 137 workers who use organic solvents in the workplace, 210 residents living near a dyeing industrial complex, and 379 residents living in general environments. The toluene exposures of workers and residents were measured by a passive sampler for four days. The urine of participants was sampled when the passive samplers of personal exposure were collected.

Results: The toluene and hippuric acid concentrations of workers were the highest, followed by the concentrations of residents living near a dyeing industrial complex and residents living in general environments. The coefficient of correlation between the concentrations of toluene and hippuric acid among workers was 0.749 ($p < 0.01$) in the workplace. On the contrary, correlations between the concentrations of toluene and hippuric acid among residents living near a dyeing industrial complex and residents living in general environments were all not significant. The relationship between the concentrations of hippuric acid and toluene in three types could be described by the exponential growth model.

Conclusions: This study analyzed the relationships between toluene exposure and the concentrations of hippuric acid in urine in high, middle, and low exposure environments, and could be described by the exponential growth model.

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

Received: 01 August 2017, Revised: 03 August 2017, Accepted: 04 August 2017

Keywords: Toluene, hippuric acid, personal exposure, biological monitoring

I. 서 론

톨루엔(toluene)은 달콤하고 자극적인 냄새와 무색의 투명한 가연성 액체로 페인트, 합성수지, 오일 등의 용제로 이용되며, 페놀(phenol), 트라이나이트로톨루엔(trinitrotoluene), 톨루엔 다이아이소사이안산(toluene-diisocyanate, TDI), 염료, 사카린, 약품 등과 같은 물질을 합성하는 데 사용되는 등 산업현장에서 폭넓게 사용되는 유기용제 중 하나이다.¹⁾ 특히 물리화학적 특성이 비슷한 벤젠에 비해 독성이 낮고 가격이 저렴하여 인쇄용 잉크, 접착제, 페인트 등의 용매로도 광범위하게 사용된다.²⁾ 한편 우리나라에서는 생활환경에 존재하는 화학물질을 대상으로 사회적 관심도가 반영된 구체적인 국가 우선순위 물질 목록을 마련하고자 국가 우선 관리 대상 물질 100종을 선정하였으며, 그중에서 상위 10종에 해당하는 물질에는 벤젠, 폼알데하이드 그리고 톨루엔 등이 포함되어 있다.³⁾ 이처럼 톨루엔은 산업현장 외에 일반 생활환경에서도 폭넓게 이용되기 때문에 전 인구집단에 노출될 수 있는 유해 화학물질이다. 톨루엔은 대부분 호흡기를 통해 체내로 축적되고 약 3% 정도만 피부로 흡수되며 체내로 흡수된 톨루엔의 약 15~20%는 호기를 통해 배출된다. 그리고 나머지 약 80%는 주로 간장에서 벤조산(benzoic acid)으로 산화된 후 글리신(glycine)과 결합하여 약 80% 정도가 요 중 마뇨산(hippuric acid, HA)으로 그리고 일부는 크레솔(cresol)로 배설된다.⁴⁾ 톨루엔은 신경독성 유발물질 중 하나로 노출 시 눈, 코, 목 피부에 나타나는 자극증상과 두통, 어지럼증, 기억력 장애 또는 환각 증세와 같이 신경계에 유해한 영향을 미치며, 이와 같은 증상들은 톨루엔에 노출되는 정도와 밀접한 연관성이 있는 것으로 보고되고 있다.⁵⁾

노출은 환경 유해인자와 입, 피부, 코와 같은 인간의 시각적 외부 경계와의 접촉으로 정의하며 호흡기, 소화기, 피부가 주된 노출 경로이다.⁶⁾ 이러한 환경 유해인자의 노출평가 방법은 생체지표(biomarker) 및 호흡기 근처에서 측정하는 개인노출(personal exposure)로 대표되는 직접적인 방법과, 실내·외 공기와 같이 국소환경의 유해물질 농도를 이용하는 간

접적인 방법으로 구분할 수 있다.⁷⁾ 노출평가에서는 간접적 방법보다 직접적 방법이 우선시 되며, 직접적 방법 중에서는 공기 중 유해물질에 대한 개인노출 평가와 생물학적 모니터링(biological monitoring)이 주로 사용된다. 개인노출을 평가하는 것은 비교적 정확하고 정량적인 노출 정보를 제공한다. 또한, 개인노출 평가에서 공기 시료채취(air sampling)는 근로자에 대한 연구뿐만 아니라 고노출이 의심되는 특정 집단에 대한 연구에서도 사용되는 것이 일반적이다.⁸⁾ 생물학적 모니터링은 생체지표의 농도를 측정하여 노출을 평가하며, 환경 유해인자에 노출된 사람의 소변, 혈액, 변 등에서 유해인자에 내재되어 있는 용량으로 노출 및 건강위험을 평가하는 것으로 모든 노출경로에 의한 통합적 노출정보를 제공한다.⁹⁾ 공기 중 유해물질에 대한 개인노출 평가와 생물학적 모니터링은 각각 장·단점을 가지고 있기 때문에 상호보완적 관계라고 할 수 있다.¹⁰⁾

우리나라에서는 기존에 톨루엔의 공기 중 개인노출 농도와 생체지표인 마뇨산 농도에 대한 연구들이 수행되었으나,¹¹⁻¹⁵⁾ 대부분 작업환경에서 측정된 결과를 이용하였기 때문에 톨루엔이 검출되는 일반 생활환경에까지 적용하기에는 한계가 있었다. 따라서 이 연구에서는 공기 중 톨루엔 노출에 대해 작업환경에서 일반 생활환경까지 포함할 수 있는 자료들을 이용하여 공기 중 톨루엔의 개인노출 농도와 생체지표인 요 중 마뇨산 농도의 상관관계를 통하여 노출평가 모델 산정에 기초자료를 제시하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상

1) 사업장 근로자

사업장에서 혼합 유기용제(톨루엔 포함)를 사용하는 근로자를 대상으로 2012년 5월부터 9월까지 조사하였으며, 대부분 세척제와 접착제 용도로 톨루엔을 사용하는 사업장 이었다. 사업장은 잉크제조 사업장 1곳, 화학약품제조 1곳, 스크린 제작 사업장 1곳, 신발 제조 사업장 2곳, 자동차 부품 제조 3곳, 접착 스티커 제조 사업장 2곳, 인쇄 사업장 9곳으

로, 총 19개 사업장에서 세척 및 접착작업을 담당하고 있는 근로자 137명을 대상으로 조사하였다.

2) 산업단지 인근 거주 주민

대구시 서구 염색 산업단지에서는 톨루엔이 배출되고 있었으며, 조사는 염색 산업단지로부터 반경 약 5 km 이내에 거주하는 인근 주민들을 대상으로 하였다. 시청, 구청, 동 주민 센터의 순으로 층화표본 추출을 통해 대상자를 선정하였고 사전에 동의를 얻은 후 직접 방문하여 인근 거주자 1,261명에 대한 설문조사를 하였다. 또한, 설문 대상자 중 산단으로부터의 거리를 고려하여 210명을 택하였고 톨루엔의 개인 노출과 생체시료를 측정하였다. 측정기간은 2013년 7월부터 8월까지 이었다.

3) 일반 생활환경 거주 주민(일반인)

환경부 국립환경과학원 제2기(2012~2014년) 국민 환경보건기초조사와 연계하여 총 40개의 조사구를 선정하였으며 강원도, 경기도(서울, 경기, 인천), 경상도(대구, 부산, 울산, 경남, 경북), 전라도(광주, 전남, 전북), 충청도(대전, 충남) 지역에 거주하는 주민들을 대상으로 2012년 6월부터 2013년 11월까지 조사하였다. 연구 기간 중 샘플러 미착용 및 분실, 설문지 미작성, 참여 거절 등 조사에 참여하지 못한 인원을 제외하고 240가구 총 379명을 대상으로 톨루엔의 개인 노출과 생체시료(마노산)를 측정하였다.

2. 측정 및 분석

1) 톨루엔의 개인 노출

공기 중 톨루엔에 대한 개인노출은 수동식 시료 채취기(passive sampler)를 이용하여 참여자들의 호흡기로부터 약 30 cm 범위 부근에서 측정하였으며, 시료 채취는 3M사의 Organic Vapor Monitor(OVM) #3500를 사용하였다. 사업장 근로자의 공기 중 톨루엔 측정은 6시간(점심시간 제외) 동안 측정하였으며, 산업단지 인근 거주 주민과 일반인의 개인노출은 4일간 측정하였다.

측정된 수동식 시료채취기는 용매를 이용하여 탈착하고 2 mL 바이알(vial)에 옮긴 뒤 분석기기를 사용하여 분석하였다. 농도는 톨루엔의 표준물질을 이용하여 표준 곡선을 작성하여 산출하였다. 사업장 근로자와 산업단지 인근 거주 주민, 일반인을 대상으

로 측정한 시료채취기는 이황화탄소(CS₂) 1 mL를 이용하여 탈착하였다. 사업장 근로자의 시료 분석은 불꽃이온화검출기(flame ionization detector, FID)가 장착된 가스크로마토그래피(gas chromatography; GC, CP-3800, Bruker)로 분석하였으며, 대구 염색 산업단지 인근에 거주하는 주민과 일반인의 시료는 가스크로마토그래피-질량분석기(GC/MS, Perkin Elmer, Tubomass GOLD, UK) SIM(selected ion monitoring) mode로 분석하였다.

2) 톨루엔의 생체시료

연구 대상자들의 소변 시료는 공기 중 톨루엔을 포함한 시료 채취기를 수거할 때 채취하였으며, 시료 손실을 최소화하기 위해 아이스박스 속에 보관하여 운반하였다. 분석기관으로 이송하기 전까지 시료를 냉장 보관하였다. 사업장 근로자의 생체시료는 자외선 검출기가 부착된 고성능액체크로마토그래피(high performance liquid chromatograph; HPLC, UVD, 1200 series, Agilent)로 분석하였으며, 일반인의 생체시료는 액체크로마토그래프/질량분석계(ultra performance liquid chromatograph/mass spectroscopy; UPLC-MS(Flexar SQ300, Perkin Elmer))를 이용하여 분석하였다. 산업단지 인근에 거주하는 주민의 생체시료는 가스크로마토그래프 질량분석기(GC-MS, Clarus SQ 8T, Perkin Elmer)를 사용하여 분석하였다. 분석 후에는 요 중 대사물질의 분석농도를 보정하기 위하여 크레아티닌 농도 보정을 실시하였다. 요 중 크레아티닌 농도는 자동분석기(Hitachi 7600, Japan)를 사용하여 분석하였다.

3. 통계 분석

연구 결과의 통계적 검정은 IBM SPSS statistic v20.0(IBM Co., Armonk, NY, USA)와 Origin 9.0(Origin Lab. Co., Northampton, MA, USA) 소프트웨어를 이용하여 분석하였다. 공기 중 톨루엔과 요 중 마노산 측정결과는 Kolmogorov-Smirnov 분석을 통하여 데이터에 대한 정규성을 검정하였으며, 환경별 공기 중 톨루엔과 요 중 마노산의 평균 비교는 독립표본 T-검정(independent sample t-test)과 일원배치 분산분석(one-way analysis of variance, ANOVA)을 이용하여 분석하였다. 각 환경의 공기 중 톨루엔과 요 중 마노산 농도의 상관성 분석은 상관계수(Pearson

correlation coefficient)와 단순선형회귀모형(simple linear regression model)을 이용하였으며, 전체 환경에 대한 공기 중 톨루엔과 요 중 마노산 농도의 상관성은 비선형 회귀분석을 이용하여 분석하였다. 또한, 모든 통계적 검정의 유의성 판단은 유의수준 0.05(신뢰도 95%)를 기준으로 검정하였다.

III. 연구결과

1. 대상자들의 일반적 특성

톨루엔이 포함된 혼합 유기용제를 사용하는 사업장의 근로자, 다양한 오염물질 중 톨루엔의 배출량이 가장 높은 산업단지 인근에 거주하는 주민, 그리고 강원도, 경기도, 경상도, 전라도, 충청도 지역에 거주하는 일반 주민에 대한 일반적 특성(성별, 연령, 흡연 및 음주 여부)을 Table 1에 나타내었다.

사업장에서 근무하는 참여 대상자 137명 중 성별의 경우는 남성이 121명(88.3), 여성이 16명(11.7%)으로 남성의 비율이 높았다. 대상자의 평균 연령은

40.6±10.9세로 나타났으며, 연령대는 30대가 41명(29.9%)으로 가장 높은 분포를 나타내었다. 흡연의 경우는 흡연자가 58명(42.3%), 비흡연자가 79명(57.7%)으로 비흡연자의 비율이 높았으며, 음주의 경우는 음주자가 91명(66.4%), 비음주자가 44명(32.1%), 미응답자가 2명(1.5%)으로 음주자의 비율이 높은 것으로 나타났다.

산업단지 인근에 거주하는 대상자 210명 중 성별의 경우는 남성이 72(34.3%)명, 여성이 128명(61.0%)으로 여성의 비율이 높은 것으로 나타났다. 대상자의 평균 연령은 54.1±13.6세로 나타났으며, 연령대는 50대가 81명(38.6%)으로 가장 높은 분포를 나타내었다. 흡연의 경우는 흡연자가 13명(6.2%), 비흡연자가 187명(55.7%)으로 비흡연자의 비율이 높았으며, 음주의 경우는 음주자가 83명(39.5%), 비음주자가 117명(55.7%)으로 비음주자의 비율이 높았다.

일반 생활환경에 거주하는 참여 대상자 379명 중 성별은 남성이 157(41.4%)명, 여성이 222(58.6%)명으로 여성이 높은 비율을 나타내었다. 대상자의 평

Table 1. General characteristics of subjects in this study

Category	Workplace		Industrial complex		General environments		
	N(%)	Mean	N(%)	Mean	N(%)	Mean	
Gender	Male	121(88.3%)	72(34.3%)		157(41.4%)		
	Female	16(11.7%)		128(61.0%)		222(58.6%)	
	No answer			10(4.7%)			
Age	10's		4(1.9%)	14.8±2.6 yrs			
	20's	24(17.5%)	24.9±1.8 yrs	12(5.7%)	23.3±3.1 yrs	21(5.5%)	24.2±2.9 yrs
	30's	41(29.9%)	34.3±2.8 yrs	8(3.8%)	35.5±2.3 yrs	71(18.7%)	35.5±4.8 yrs
	40's	34(24.8%)	44.2±2.9 yrs	26(12.4%)	45.5±2.7 yrs	75(19.8%)	44.8±2.9 yrs
	50's	33(24.1%)	53.1±2.9 yrs	81(38.6%)	54.7±2.7 yrs	73(19.3%)	55.1±3.0 yrs
	60's	5(3.6%)	61.6±1.7 yrs	43(20.5%)	63.7±3.1 yrs	77(20.3%)	65.0±2.8 yrs
	70's			23(11.0%)	73.0±2.3 yrs	58(15.3%)	73.9±2.7 yrs
	80's					4(1.1%)	82.5±2.7 yrs
	No answer			13(6.2%)			
Total	137(100.0%)	40.6±10.9 yrs	210(100.0%)	54.1±13.6 yrs	379(100.0%)	52.8±15.3 yrs	
Smoking	Yes	58(42.3%)		13(6.2%)		73(19.3%)	
	No	79(57.7%)		187(89.0%)		306(80.7%)	
	No answer			10(4.8%)			
Alcohol	Yes	91(66.4%)		83(39.5%)		354(93.4%)	
	No	44(32.1%)		117(55.7%)		25(6.6%)	
	No answer			10(4.8%)			

균 연령은 52.8±15.3세로 나타났으며, 60대가 77명 (20.3%)으로 가장 높은 분포를 나타내었다. 그러나 20대와 80대를 제외하고 나머지 연령대(30대, 40대, 50대, 60대, 70대)는 비교적 비슷한 분포를 나타내었다. 흡연의 경우는 흡연자가 73명(19.3%), 비흡연자가 306명(80.7%)으로 비흡연자의 비율이 높았으며, 음주의 경우는 음주자가 354명(93.4%), 비음주자가 25명(6.6%)으로 음주자의 비율이 높았다.

2. 톨루엔의 개인노출과 요 중 마뇨산 농도

1) 톨루엔의 개인노출 농도

각 환경에서 측정된 공기 중 톨루엔 개인노출 농도는 대수정규분포를 나타내었으며(K-S test, p>0.05), 측정된 농도 결과를 Table 2에 나타내었다. 사업장 근로자의 톨루엔 개인노출 평균 농도는 33.37 ppm (33694.73 ppb)으로 가장 높은 농도를 나타내었으며, 고용노동부의 화학물질 및 물리적 인자의 노출기준 (50 ppm)을 초과하지 않았다. 산업단지 인근 거주 주민의 농도는 30.55 ppb, 일반인의 농도는 9.61 ppb로 나타났다. 각 환경의 톨루엔 개인노출 농도는 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다(p<0.01).

2) 요 중 마뇨산 농도

각 환경의 대상자들로부터 수집한 요 중 마뇨산 농도는 대수정규분포를 나타내었다(K-S test, p>0.05) (Table 3). 사업장 근로자의 요 중 마뇨산 농도는 1.02 g/g-creatinine, 산업단지인근 거주 주민의 농도는 0.40 g/g-creatinine, 일반인의 농도는 0.25 g/g-creatinine으로 사업장 근로자가 가장 높은 것으로 나타났다. 각 환경의 요 중 마뇨산 농도는 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다(p<0.01).

3. 톨루엔의 개인노출과 요 중 마뇨산 농도의 상관성

1) 공기 중 톨루엔 개인노출과 요 중 마뇨산 농도에 대한 상관계수

각 환경에서 톨루엔 개인노출 농도와 요 중 마뇨산 농도의 상관성은 상관계수(Pearson correlation coefficient)를 이용하였다(Table 4). 사업장 근로자의 공기 중 톨루엔과 요 중 마뇨산 농도에 대한 상관계수는 0.749(p<0.01)로 나타났으며, 산업단지 인근 거주 주민의 공기 중 톨루엔과 요 중 마뇨산 농도에 대한 상관계수는 0.012(p>0.05)로 나타났다. 그리고 일반인에 대한 공기 중 톨루엔과 요 중 마뇨산

Table 2. Personal exposure concentrations (ppb) of airborne toluene

Participants	N	AM ¹⁾ (SD) ²⁾	GM ³⁾ (GSD) ⁴⁾	Range	p-value* (AM)
Occupational workers	137	33694.73 (32165.16)	22898.13 (2.47)	2292.00-143221.00	
Area near industrial complex	173	30.55 (56.06)	18.03 (2.45)	0.09-448.91	<0.001
General public in general environments	370	9.61 (20.80)	4.38 (3.04)	0.11-206.14	

¹⁾Arithmetic Mean, ²⁾Standard Deviation, ³⁾Geometric Mean, ⁴⁾Geometric Standard Deviation
*One-way analysis of variance (ANOVA)

Table 3. Urinary hippuric acid concentrations (g/g-creatinine) of participants

Participants	N	AM ¹⁾ (SD) ²⁾	GM ³⁾ (GSD) ⁴⁾	Range	p-value* (AM)
Occupational workers	137	1.02 (0.73)	0.79 (2.15)	0.03-4.95	
Area near industrial complex	210	0.40 (0.46)	0.22 (3.38)	0.00-2.89	<0.001
General public in general environments	365	0.25 (0.27)	0.14 (3.95)	0.00-1.66	

¹⁾Arithmetic Mean, ²⁾Standard Deviation, ³⁾Geometric Mean, ⁴⁾Geometric Standard Deviation
*One-way analysis of variance (ANOVA)

Table 4. Correlation between personal exposures to toluene and urinary hippuric acid concentrations

Participants	Pearson correlation coefficient	
	r	p-value
Occupational workers	0.749**	<0.001
Area near industrial complex	0.012	0.871
General public in general environments	-0.037	0.489

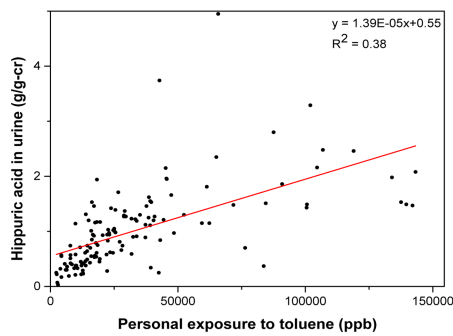
** : Correlation is significant at the 0.01 level

농도의 상관계수는 -0.037(p>0.05)로 나타났다.

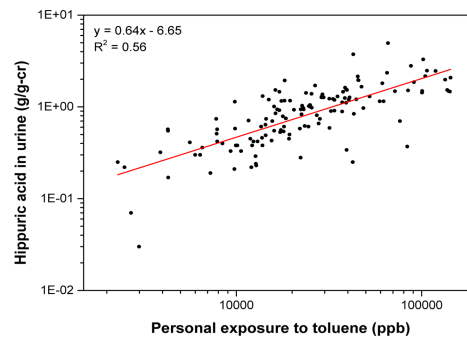
2) 단순선형회귀모형을 이용한 회귀 분석

단순선형회귀모형의 경우, 독립변수를 공기 중 톨루

엔 농도, 종속변수를 요 중 마뇨산 농도로 설정하였다. 사업장 근로자의 요 중 마뇨산 농도가 공기 중 톨루엔 농도에 의해 영향을 받는 정도의 설명력은 원자료가 약 35%, 자연로그를 적용하여 나타난 설명력이 약 55%를 나타내었다(Fig. 1). 산업단지 인근 거주 주민의 요 중 마뇨산 농도가 공기 중 톨루엔 농도에 의해 영향을 받는 정도의 설명력은 원자료가 약 0.4%로 음의 선형관계를 나타내었으며, 자연로그를 적용하여 나타난 설명력은 약 0.02%로 양의 선형관계를 나타내었다(Fig. 2). 그리고 일반인의 요 중 마뇨산 농도가 공기 중 톨루엔 농도에 의해 영향을 받는 정도의 설명력은 원자료가 약 0.03%로 음의 선형관계를 나타내었으며, 자연로그를 적용하여 나타난 설명력은 약 0.13%로 양의 선형관계를 나타내었다(Fig. 3).

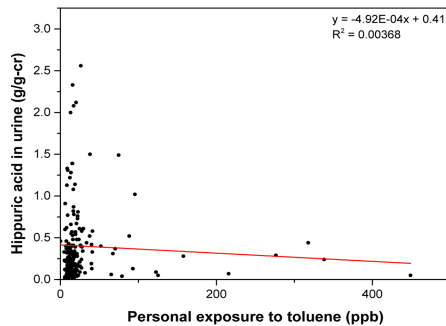


(a) Raw data

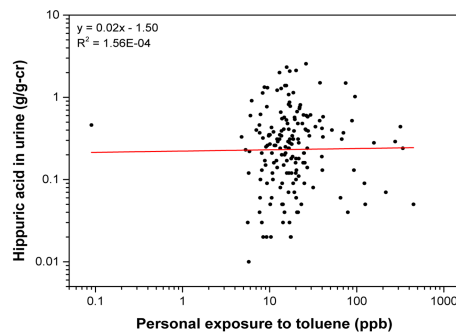


(b) Log-transformed data

Fig. 1. Correlation between personal exposures to toluene and urinary hippuric acid concentrations for the occupational workers



(a) Raw data



(b) Log-transformed data

Fig. 2. Correlation between personal exposures to toluene and urinary hippuric acid concentrations for the area near industrial complex

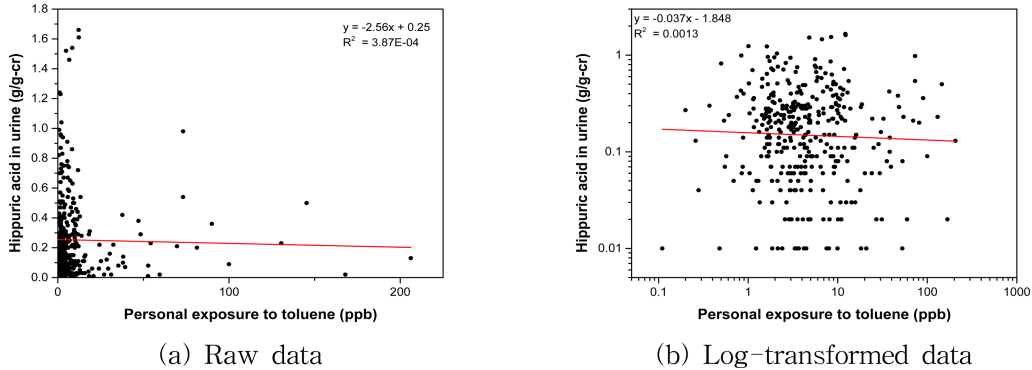


Fig. 3. Correlation between personal exposures to toluene and urinary hippuric acid concentrations for the general public in general environments

3) 지수성장 모델을 이용한 회귀 분석

사업장 근로자, 산업단지 인근 주변에 거주하는 주민 그리고 일반인의 공기 중 톨루엔과 요 중 마노산 농도를 결합하여 지수성장모델을 이용한 회귀곡선과 회귀식을 산출하였다(Fig. 4). 사업장 근로자, 산업단지 인근 거주 주민, 일반인의 각 농도 분포는 Fig. 4와 같이 분포하고 있다. 톨루엔 개인노출 농도의 분포는 각 환경별로 뚜렷한 차이를 나타내었으나, 요 중 마노산 농도는 산업단지 인근과 일반인의 경우는 차이를 보이지 않았다. 사업장의 경우는 톨루엔 개인노출 농도가 증가할수록 요 중 마노산의 농도가 증가하는 경향을 나타내었다. 지수성장모델을 이용하여 산출된 회귀식은 다음과 같다.

$$y = -26.68 + 1.36e^{(x+4.79)/1.60}$$

4) 지수성장모델을 이용한 노출평가 방법 제시

지수성장모델의 곡선 그래프로 산출된 공기 중 톨루엔 농도와 요 중 마노산 농도를 이용하여 적절한 노출평가를 위한 기준점을 나타내었다(Fig. 5). 기준점은 요 중 마노산이 최소한의 값이라도 농도가 계속적으로 증가하는 시점의 톨루엔 개인노출 농도 시점을 잡는 방법으로 제시하였다. 이것은 기준점 미만의 경우 생체시료를 이용한 노출평가 보다는 공기 중 톨루엔에 대한 개인노출 평가가 적절하다는 것을 의미한다. 곡선 그래프에 의하여 산출된 요 중 마노산 농도의 소수점 2번째 자리를 기준으로 제시된 개

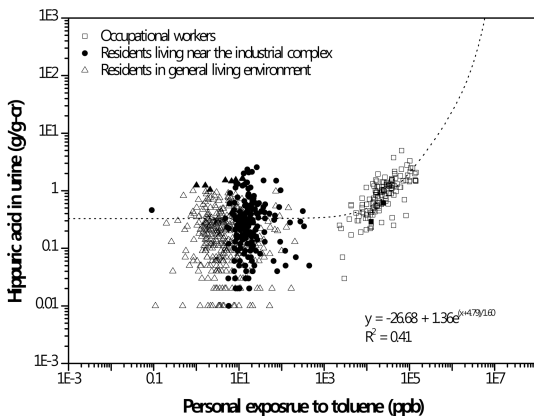


Fig. 4. Correlation between personal exposures to toluene and urinary hippuric acid concentrations using an exponential growth model.

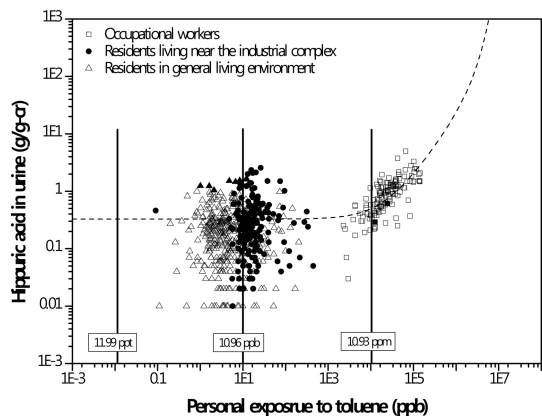


Fig. 5. Interception points of personal exposures for toluene according to urinary hippuric acid concentrations.

인노출 농도의 시점은 10.93 ppm으로 나타났으며, 소수점 5번째 자리를 기준으로 제시된 개인노출 농도의 시점은 10.96 ppb, 소수점 8번째 자리를 기준으로 제시된 개인노출 농도의 시점은 11.99 ppt로 나타났다. 데이터 범위를 초과하여 표현된 곡선의 경우는 외삽법(extrapolation)을 이용하여 추정된 구간으로 사업장 이상으로 높은 수준으로 노출되었을 경우의 농도를 추정할 때 사용 할 수 있다.

IV. 고 찰

이 연구에서는 공기 중 톨루엔을 대상으로 고노출, 중노출, 저노출로 추정되는 사업장 근로자, 산업단지 인근 주민, 일반인을 대상으로 개인노출 농도와 생체시료 농도를 종합하여 상관성을 분석하였다. 공기 중 톨루엔 개인노출 농도는 사업장 근로자, 산업단지 인근 거주 주민, 일반인 순으로 농도가 높았으며, 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다. 공단지역 인근 주민과 일반인(일반환경)을 비교한 다른 연구에서도 공단지역 인근 주민의 개인노출 농도가 높은 것으로 나타나 이 연구결과와 같은 경향을 나타내었다.¹⁶⁾ 사업장 근로자들은 톨루엔이 포함된 유기용제를 사용하고 있었으며, 염색 산업단지에서는 톨루엔(60,091.21 톤/년)이 환경에 배출되고 있었다. 이것은 사업장의 유해물질에 노출되는 대상이 근로자뿐만 아니라 인근 지역사회 주민에게도 영향을 미치는 것을 의미한다. 최근에는 사업장 외부 영향을 고려하여 유해화학물질 취급 시설을 설치, 운영하고자 하는 사업장은 장외영향평가서를 작성하여 환경부 장관에게 제출하도록 법으로 정하여 2015년 1월 1일부터 시행되고 있다.¹⁷⁾ 각 환경에서의 요 중 마노산 농도는 사업장 근로자, 산업단지 인근 거주 주민, 일반인 순으로 높은 농도를 나타내었다. 이것은 공기 중 톨루엔 농도와 같은 경향을 나타낸 결과로, 공기 중 톨루엔의 노출이 마노산 농도에 영향을 미친 것으로 판단한다.¹⁸⁾

각 환경에서 공기 중 톨루엔 개인노출과 요 중 마노산 농도의 상관성은 사업장 근로자의 경우 유의한 상관성을 보였지만 산업단지 인근 거주 주민과 일반인은 낮은 상관성을 보였다. 이것은 사업장과 같은 고농도 환경에서는 공기 중 톨루엔과 요 중 마노산의 농도의 관련성이 크지만, 사업장을 벗어난 산업

단지 인근과 일반인과 같이 비교적 농도가 낮은 환경에 대해서는 공기 중 톨루엔과 요 중 마노산과의 관련성을 규명하기가 어려운 것으로 판단한다.¹⁹⁾ 이처럼 톨루엔 개인노출 농도와 요 중 마노산 농도의 상관성은 공기 중 톨루엔의 농도가 감소할수록 상관성이 낮아지는 경향을 나타내었다. 따라서 낮은 수준의 톨루엔에 대한 노출평가는 요 중 마노산이 아닌 톨루엔의 다른 생체지표를 이용하여 평가하였을 때, 비교적 적절한 평가가 가능할 것으로 판단한다.^{20,21)}

지수성장모델에 사용되는 곡선 적합(curve-fitting)은 기존자료의 분석을 통하여 데이터에 대한 이상적인 수식을 산출하여 데이터 간의 상관관계를 표현하고 예측하는 방법이다.^{22,23)} 비선형회귀분석의 다양한 모델을 적용한 결과, 지수성장모델로 산출된 회귀식의 결정계수가 가장 높은 값을 나타내었으며, 이것을 통하여 각 환경에 적합한 노출평가 방법을 제시하였다. 전체 농도가 결합된 곡선 그래프에서 사업장의 차단점은 10.93 ppm으로 나타났으며, 산업단지 및 일반 생활환경 부근에서는 10.96 ppb, 그 이하에서는 11.99 ppt로 산출되었다. 이것은 생체시료 농도가 중복되지 않고 계속적으로 증가하는 시점을 잡은 것으로, 사업장의 경우 10.93 ppm을 기준으로 차단점 이하에서는 개인노출 평가를 하는 것이 적절하며, 차단점 이상에서는 개인노출 농도와 생체시료 농도를 함께 사용하여 상호보완적인 노출평가를 하는 것이 적절하다는 것을 의미한다. Duydu et al.,의 연구에 의하면 작업환경에서 근로자를 대상으로 측정된 공기 중 톨루엔과 요 중 마노산 농도의 회귀 방정식을 이용하여 획득한 차단점은 18.51 ppm으로 나타났으며 18.51 ppm보다 높게 노출되는 시점부터는 요 중 마노산 농도가 상승하는 결과를 도출하였다.²⁴⁾ 이것은 차단점을 기준으로 적절한 측정방법을 선택하여 보다 정확한 노출평가가 가능하도록 하나의 측정 방법을 제시할 수 있는 결과로 판단한다. 또한 공기 중 톨루엔 노출의 경우는 우리나라 사람과 외국 사람들이 생체내 변환 차이 등으로 같지 않을 수 있음을 나타낸다.²⁵⁾ 산업단지와 일반 생활환경에서의 차단점은 10.96 ppb 이며 이 차단점의 의미는 연구 결과 부분에서 언급한 내용과 같다. 11.99 ppt의 경우는 차단점으로 잡혔지만, 낮은 수준의 농도값으로 특별한 의미가 없는 것으로 판단하였다. 외삽법으로 추정된 곡선의 구간은 사업장 이상으로 고

농도의 노출이 이루어지는 것으로 최근 이슈화 되고 있는 화학사고 발생 시 적용 가능한 것으로 판단한다. 화학사고가 발생하였을 때는 누출된 유해화학물질이 대기 중으로 빠른 시간 내에 확산되어 버리기 때문에 정확한 노출평가에 어려움이 많다. 그러나 회귀식을 이용하여 외삽법을 적용하게 되면 정확한 노출평가는 어렵지만, 화학사고와 같이 현실적으로 측정에 제한이 많은 경우 이상적인 값의 추정이 가능할 것으로 판단한다.²⁶⁾

V. 결 론

이 연구에서는 작업환경에서 더 나아가 일반 생활환경까지 그 범위를 확대하여 연구를 수행하였으며 사업장 근로자와 산업단지 인근 거주 주민, 그리고 일반인과 같이 전 환경에 대한 공기 중 톨루엔 개인노출과 요 중 마노산 농도의 상관관계를 규명하고자 하였다. 공기 중 톨루엔 농도와 마노산 농도는 사업장 근로자(고노출), 산업단지 인근 거주 주민(중노출), 일반인(저노출) 순으로 농도가 높았으며 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다. 사업장 근로자의 경우는 톨루엔의 개인노출과 요 중 마노산 농도의 상관성이 높게 나타났지만, 산업단지와 일반인의 경우는 상관성이 낮게 나타나 공기 중 톨루엔의 농도가 감소할수록 요 중 마노산에 대한 상관성이 낮아지는 경향을 나타내었다. 그리고 지수성장모델로 산출된 회귀식을 이용하여 각 환경에서의 차단점을 설정할 수 있었으며, 이를 통해 개인노출과 생체 모니터링 중 더욱 적합한 노출평가 방법을 제시할 수 있었다. 또한, 외삽법을 통하여 사업장 이상의 수준으로 고노출이 이루어지는 구간, 즉 화학사고와 같은 실제로 측정에 제한이 많은 이상적인 값의 추정을 통하여 대략적인 노출평가가 가능할 것으로 판단하였다.

이번 연구는 국내 기존 사례가 없는 결과로, 다양한 환경에 대하여 더욱 우리나라 실정에 적합한 노출평가를 제시할 수 있는 기초적인 연구 자료로 활용될 것으로 기대한다. 향후 정확하고 방대한 데이터의 축적과 추가적인 연구를 통하여, 다양한 환경의 노출 평가에 적용할 수 있는 모델의 생산이 가능할 것으로 생각한다.

감사의 글

본 논문은 대구가톨릭대학교 2014년 교내연구비 지원에 의해 이루어진 것임

References

1. Lee H, Moon K, Ahn K, Suh J. Health impairment and concentration of hippuric acid in urine of workers exposed to toluene. *Journal of the Environmental Sciences*. 2004; 13(10): 939-946.
2. Cha S, Yoon C, Lee S. Effect of hepatic damage on the toluene metabolism in carbon tetrachloride pre-treated-rats. *Journal Toxicology and Public Health*. 1998; 14(3): 321-328.
3. National Institute of Environmental Research. A study on preparation of national priority material management Plan(?), 2011.
4. Cohr, K.H, Stokholm, J. Toluene: A toxicologic review. *Scandinavian Journal of Work. Environment & Health*. 1979; 5(2): 71-90.
5. Sarma, S.N, Kim, Y, Song, M, Ryu, J. Induction of apoptosis in human leukemia cells through the production of reactive oxygen species and activation of HMOX1 and Noxa by benzene, toluene, and o-xylene. *Toxicology*. 2011; 280(3): 109-117.
6. United States Environmental Protection Agency (US EPA). Exposure factors handbook, Volume 1- General factors. Environmental Protection Agency. 1997; EPA/600/P-95/002Fa.
7. Maroni, M, A, Fait, C. Colosio. Risk assessment and management of occupational exposure to pesticides. *Toxicology Letters*. 1999; 107(1): 145-153.
8. Li, Z, Mulholland, A, Romanoff, C, Pittman, N, Trinidad, A, Lewinc, D, Sjodin, A. Assessment of non-occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons through personal air sampling and urinary biomonitoring. *Journal of Environmental Monitoring*. 2010; 12(5): 1110-1118.
9. National Institute of Environmental Research. A pilot study on the time-activity pattern for exposure pathway of hazardous pollutants (I), 2013.
10. Manini, P, G. De Palma, A. Mutti. Exposure assessment at the workplace: implications of biological variability. *Toxicology letters*. 2007; 168: 210-218.
11. Lee G, Shin T, Hong S, Kim K. Correlation of urinary hippuric acid concentration according to occupational exposure level of toluene and worker's characteristics. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 2015; 24(2): 154-162.

12. Lee S, Ahn K, Lee B, Nam T. A Study on Relationship between exposure to toluene and excretion of hippuric acid in urine with male solvent workers. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*. 1989; 22(4): 480-485 .
13. Chang S. A study on the correlation of ambient toluene and xylene with biological monitoring index. *Annals of Occupational and Environmental Medicine*. 1995; 7(2): 295-305.
14. Kim YH, Yang WH, Son BS. Risk assessment by toluene source emission model in indoor environments of new houses. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*. 2006; 32(5): 398-403.
15. Hwang C, Lee W, Chang S, Kim H. The relationship between hippuric acid in blood plasma and toluene concentration in the air of workplace. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*. 2000; 33(1): 45-50.
16. Lee C, Choi S, Hong S, Chung E, Jung Y, Yang W, Lee J, Son B. Health risk assessment and VOCs levels of residents in industrial area. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*. 2011; 20(11): 1373-1382.
17. Lee D, Park K, Kim T, Shin D, Shin S. Offsite risk assessment on flammable hazard site. *Korean Journal of Hazardous Materials*. 2015; 3(1): 52-58.
18. Sahri, M, Widajati, N. Evaluation of toluene exposure in workers at industrial area of sidoarjo. Indonesia by measurement of urinary hippuric acid. *Asia Pacific Journal of Medical Toxicology*. 2013; 2(4): 145-149.
19. Çok, I, Dagdelen, A, Gökçe, E. Determination of urinary hippuric acid and o-cresol levels as biological indicators of toluene exposure in shoe-workers and glue sniffers. *Biomarkers*. 2003; 8(2): 119-127.
20. Fustinoni, S, Buratti, M, Giampiccolo, R, Brambilla, G, Foa, V, Colombi, A. Comparison between blood and urinary toluene as biomarkers of exposure to toluene. *International archives of occupational and environmental health*. 2000; 73(6): 389-396.
21. Konjin, Z. N, Azari, M. R, Shekoohi, Y, Rahimzadeh, M, Seyedi, M. Efficacy of urinary hippuric acid as a biomarker of low level exposure to toluene in petroleum depot workers. *International Journal of Occupational Hygiene*. 2013; 5(3): 139-143.
22. Yoon Y, Jo Y. Prediction of failure time of tunnel applying the curve fitting techniques. *Tunnel And Underground Space*. 2010; 20(2): 97-104.
23. Chung S, Yun T, Han T. Usability Evaluation of RVE using exponential curve fitting. *Korean Society of Civil Engineers*. 2010; 10: 1184-1188.
24. Duydu, Y, Suzen, S, Erdem, N, Uysal, H, Vural, N. Validation of hippuric acid as a biomarker of toluene exposure. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 1999; 63(1): 1-8.
25. Ldeira, C, Viegas S. Human biomonitoring – An overview on biomarkers and their application in occupational and environmental health. *Biomonitoring*. 2016; 3: 15-24.
26. Denneman, E, Wu, R, Kearsleyb, E, Visserb, A. Discrete fracture in high performance fibre reinforced concrete materials. *Engineering Fracture Mechanics*. 2011; 78(10): 2235-2245.