

## 대기 중 휘발성유기오염물질의 환경, 개인 및 인체 노출의 상관성 연구

조성준\*, 신동천<sup>1</sup>, 정 용<sup>1</sup>, Patrick N. Breyse

존스홉킨스 대학교, <sup>1</sup>연세대학교 환경공해연구소

## A Correlation Study between the Environmental, Personal Exposures and Biomarkers for Volatile Organic Compounds

Seong-Joon Jo\*, Dong-Chun Shin<sup>1</sup>, Yong Chung<sup>1</sup> and Patrick N. Breyse

Johns Hopkins University, Bloomberg School of Public, Health Environmental Health Science, Baltimore, USA  
<sup>1</sup>Institute for Environmental Research Yonsei (IERY), Yonsei University, Seoul, Korea

### ABSTRACT

Volatile organic compounds (VOCs) are an important public health problem throughout the world. Many important questions remain to be addressed in assessing exposure to these compounds. Because they are ubiquitous and highly volatile, special techniques must be applied in the analytical determination of VOCs.

Personal exposure measurements are needed to evaluate the relationship between microenvironmental concentrations and actual exposures. It is also important to investigate exposure frequency, duration, and intensity, as well as personal exposure characteristics. In addition to air monitoring, biological monitoring may contribute significantly to risk assessment by allowing estimation of absorbed doses, rather than just the external exposure concentrations, which are evaluated by environmental and personal monitoring.

This study was conducted to establish the analytic procedure of VOCs in air, blood, urine and exhaled breath and to evaluate the relationships among these environmental media.

The subjects of this study were selected because they are occupationally exposed to high levels of VOCs. Environmental, personal, blood, urine and exhalation samples were collected. Purge & trap, thermal desorber, gas chromatography and mass selective detector were used to analyze the collected samples. Analytical procedures were validated with the "break through test", "recovery test for storage and transportation", "method detection limit test" and "inter-laboratory QA/QC study".

Assessment of halogenated compounds indicated that they were significantly correlated to each other ( $p$  value  $< 0.01$ ). In a similar manner, aromatic compounds were also correlated, except in urine sample.

Linear regression was used to evaluate the relationships between personal exposures and environmental concentrations. These relationships for aromatic and halogenated are as follows:

$$\text{Halogens}_{\text{personal}} = 3.875 + 0.068\text{Halogens}_{\text{environment}} \quad (R^2 = .930)$$

$$\text{Aromatics}_{\text{personal}} = 34217.757 - 31.266\text{Aromatics}_{\text{environment}} \quad (R^2 = .821)$$

Multiple regression was used to evaluate the relationship between exposures and various exposure determinants including, gender, duration of employment, and smoking history. The results of the regression model-

\* To whom correspondence should be addressed.

Tel: +1-410-614-5751, E-mail: sjjo@jhsph.edu

ing for halogens in blood and aromatics in urine are as follows:

$$\text{Halogens}_{\text{blood}} = 8.181 + 0.246\text{Halogens}_{\text{personal}} + 3.975\text{Gender} (R^2 = .925),$$

$$\text{Aromatics}_{\text{urine}} = 249.565 + 0.135\text{Aromatics}_{\text{personal}} - 5.651\text{D.S} (R^2 = .735),$$

In conclusion, we have established analytic procedures for VOC measurement in biological and environmental samples and have presented data demonstrating relationships between VOCs levels in biological media and environmental samples.

**Abbreviation :** GC/MS, Gas Chromatography/Mass Spectrometer; VOCs, Volatile Organic Compounds; OVM, Organic Vapor Monitor; TO, Toxic Organics

**Key words :** Volatile Organic Compounds (VOCs), Exposure Assessment, Risk Assessment, Environmental measurement, Biological monitoring, Personal dosimetry, Active Sampler, Passive Sampler

## 서 론

전 세계적으로 인간의 생활 활동에 기인하여 대기중으로 방출되는 휘발성유기오염물질 (이하 VOCs)의 양은 약 2억3천5백만 ton (Cullis and Hirschler, 1989), 그리고 자연적 발생량은 연간 8억 3천백만 ton (Zimmermann, 1977)에서 21억 백만 ton (Volz *et al.*, 1981) 정도 되는 것으로 추산되고 있다. 배출된 VOCs는 일반 대기 중에서 광화학 반응에 의해서 다른 물질로 바뀌거나 혹은 분해되기도 하고, 기후 조건에 의해 확산, 희석된다. 하지만, 절대적인 발생량의 증가는 인체 건강 측면에서 매우 중요시되는 문제이다.

VOCs는 발생원의 다양성과 함께 인체에 미치는 잠재적 악영향은 개인의 활동과 기호 등에 따라 개인차를 보이기 때문에 실내 오염의 평가와 더불어 개인의 행태 (life style)를 감안한 개인 노출 평가가 더욱 중요시 된다 (Patrick, 1994). 대부분의 VOCs는 호흡을 통하여 노출되지만, chloroform과 같은 할로겐화 물질은 염소 소독 부산물 (chlorination by-product)로써 이 수돗물 섭취에 의해 노출되기도 하며, 자연 식품이나 가공 식품 섭취에 의해서 노출되기도 한다.

VOCs의 건강상 장해를 만성독성으로 인한 장해 (암 등)와 급성독성으로 인한 자극 (벨딩 증후군 등)으로 나누어 볼 수 있는데, 급성 자극은 만성 장해보다 관리적 측면에서 더 우선시 되어야 할 부분이다 (Wallace, 1993). VOCs는 그 특성상 폐에서 직접 흡수되어 혈액을 통하여 우리 몸에 퍼지게 되며, benzene이나 vinyl chloride 혹은 carbon tetra-

chloride와 같이 현재까지 인체 발암물질이나 발암 가능성이 있는 물질이 포함되어 있고, 대부분이 동물에서 암을 발생시키거나 발생시킬 가능성이 많은 물질들이다.

일반적으로 노출 평가는 발생원과 그 발생원으로부터 배출되는 발생량의 추정에서부터 시작한다. 그리고 발생된 오염물질의 환경 중 소멸 과정 (fate, chemical process) 및 이동 경로 (transport, physical process) 추적 등으로 이어진다. 또한 이들 물질의 수용체인 인체나 혹은 인구 집단의 생활 행태 (activity patterns)와 연결 지어 최종적으로 수용체 외부의 노출량 평가 그리고, 수용체 내부 전체 혹은 각각의 장기에서의 오염물질의 정량 등을 고찰하게 된다 (Patrick, 1994).

노출 평가에 사용되는 일반적인 도구는 환경 측정 (environmental measurement), 생체 모니터링 (biological monitoring), 노출량 측정 (personal dosimetry) 및 모델링 (mathematical modeling) 등이 사용되며, 큰 의미에서 이 모든 것이 모두 종합되어 이루어지는 것을 노출 평가라 한다. 이들 각각은 대상 장기의 내적 용량 (dose) 측정과 더불어 노출 기간, 노출 빈도 및 노출 농도에 대한 다양한 가능성을 연계하여 볼 때 이를 일괄적으로 계층화 할 수 있다. 여기에서 중요한 것은 모든 개념 자체가 인체 중심이러는데 있다. 환경 노출량이 많더라도 노출 기회가 적거나 혹은 무시할 정도의 영향권 밖이라면 이는 중요한 관리의 대상이 아니라는 것이다. 하지만, 인간의 생활 형태와 행태 등의 다양성과 더불어 각각의 인체가 받고 있는 환경 오염 물질에 의한 인체 부담 (body burden) 정도도 개인 간의 차이와 민족간의 차이가 존재한다는 한계에

도 불구하고 일반화되는 model을 만들 수밖에 없다.

이러한 VOCs에 대한 인체 모니터링을 중심으로 한 노출 평가 연구는 VOCs 일부 물질에서 chamber study를 통한 생체 모니터링 및 이에 대한 exposure와 dose의 관계 또는 PB-PK (Physiologically Based-Pharmacokinetics) 연구 등이 많이 되어져 왔다(Tardif *et al.*, 1991; Ashley, 1997). 그리고, 이들을 기초로 낮은 농도인 환경 혹은 비 노출군을 대상으로 매체간(노와 혈액)측정과 model 설정에 응용하고 있다(Kawai, 1992).

하지만, VOCs를 대상으로 환경 노출 및 개인 노출 그리고 인체 monitoring이 가능한 매체(혈액, 호기, 뇨)를 대상으로 같은 노출군에서 동시 측정이 이루어진 연구가 많이 되어있지 않다.

따라서, 본 연구에서는 VOCs의 직업적 노출군을 대상으로 인체 노출량(혈액, 뇨, 호기)이 환경 노출, 개인 노출과 어떠한 관계에 있는지를 알아보고, 환경 및 개인 노출이 인체 노출을 설명하는데 더 좋은지를 확인하고자 하며, 인체 노출 평가시에 어떤 인체 측정 매체가 전체 노출 평가에서 합리적인지를 알아보고자 한다.

이 자료는 위해성 평가시의 노출 평가 방법에 적용되어 질 수 있으며, 노출군 연구에서 얻어진 자료는 외부 노출에 의한 인체 내적 용량 추정 모델 설정과 VOCs의 체내 흡입량(intake)을 추정하는 기본 자료로 쓰여질 수 있다.

## 연구 및 방법

### 1. 연구 대상

직업적 노출군을 대상으로 혈액, 뇨, 호기를 채취 하였다. 대상자는 모두 14명으로 주로 도장(painter)을 담당하는 근무자를 선택하였다. 대상자 중 흡연자는 하루 전부터 흡연을 삼가도록 하였다. 조사 대상자 중 남자들은 칠(주로 spray) 작업자였으며, 여자들은 칠 작업 후의 sanding작업이나, 혹은 polishing작업을 담당하고 있었다.

조사 대상자의 특성은 Table 1과 같다.

### 2. 연구 대상 물질

연구 대상이 VOCs의 노출 가능성이 많은 작업

**Table 1.** The characterization of subject group

	Median	Mean	Minimum	Maximum
No. of subject	14 (male = 9, female = 5)			
Age	33.50	32.21	18	55
Height (cm)	165.00	165.21	151	178
Weight (kg)	66.50	64.14	45	80
Duration of employment (years)	1.54	3.08	0.25	10
No. of daily smoking cigarettes	8.50	8.71	0	20
Duration of smoking (years)	8.00	10.29	2	25

**Table 2.** Target compounds of this study

Halogenated compounds	Aromatic compounds
1, 1, 1-Trichloroethane	Benzene
1, 1, 2-Trichloroethane	Ethylbenzene
1, 2-Dichloroethane	Cumene
Bromobenzene	Butylbenzene
Bromoform	Isocumene
Chlorobenzene	<i>o</i> -Xylene
Dibromochloromethane	<i>m, p</i> -Xylene
Tetrachloroethylene	Styrene
Trichloroethylene	Toluene

장이기는 하나, 차후 진행될 비 직업성 일반인을 대상으로 하는 연구 등을 감안하여 일반 대기에서 주로 나타나는 휘발성 유기 오염물질을 대상으로 하였다. 이들 중 발암물질(carcinogens), 잠재성 발암물질(potential carcinogens) 혹은 신경 독성(neurotoxins) 등을 감안하여 대상 물질을 선정하였다(EPA, 1980).

전체 대상 물질은 18종으로 방향족 화합물(aromatic compounds)이 9종, 할로겐 화합물(halogenated compounds)이 9종이었다(Table 2).

### 3. 실험 방법

인체 노출량 측정 방법 중 혈액과 뇨는 purge & trap 방법(Ashley *et al.*, 1992), 호기 측정은 TEAM study 방법(Wallace *et al.*, 1984), 개인 및 환경 노출량 측정 방법은 passive monitor 방법(Stock *et al.*, 1996) 그리고 환경 노출량 측정 및 인체 노출량 측정을 위해 EPA TO-17 Method인 trap 방법(EPA, 1997) 등을 응용하거나, 보완하여 사용하였으며, 필

요한 장치는 제작하였다. 이 방법들의 신뢰성을 확보하기 위해 trap 용량 결정을 위한 break through test, trap 보관 시간에 따른 회수율 test, trap과 passive monitor의 method detection limit test, passive monitor의 보관과 이동에 따른 회수율을 보기 위한 실험실간 QA/QC study 및 최종적으로 passive monitor 방법과 trap 방법간의 신뢰성을 높이기 위한 비교 실험을 하였으며, 각 매체의 시료채취 방법, 전처리 방법 및 분석 방법은 조성준 등(2002)의 방법에 따라 실시하였다.

#### 4. 통계 분석

자료의 집계 및 분석은 SPSS/PC+(statistical package for social science, Window Version 8.0) 통계 package를 사용하였다.

측정 매체간 물질에 따른 각각의 관계를 보기 위해 상관 분석(pearson correlation)을 하였다.

또한, 환경 노출과 개인 노출 및 흡연 여부, 성별 등을 독립변수로 하고 혈액, 뇨 및 호기 중 VOCs 농도간의 회귀 분석(stepwise-regression)을 통하여, 환경 및 개인 노출에 따른 각 매체 내의 VOCs 의 농도를 설명할 수 있는 회귀 모형을 설정하였다.

## 결 과

### 1. 연구 대상 노출군의 VOCs 노출량

Table 3은 연구 대상 노출군의 환경, 개인 및 혈액, 뇨, 호기에서 18종의 대상 VOCs 중 할로겐 화합물(halogenated compounds) 그룹 농도를 측정하는 것이다.

환경 노출량 중 bromobenzene이 가장 높아 노출군의 평균 330.99  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 1, 1, 2-trichloroethane은 평균 22.38  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮았다. 전체 할로겐 화합물의 환경 노출량은 평균 834.74  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

개인 노출량은 1, 1, 1-trichloroethane가 22.19  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았다. Bromoform은 조사 대상 할로겐 화합물 중 가장 낮아 0.39  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, 할로겐 화합물의 개인 노출량은 61.23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

인체 노출량에서 혈액 중 VOCs 농도는 1, 1, 1-trichloroethane이 10.81  $\pm$  3.231  $\mu\text{g}/\text{l}$ 로 가장 높았다. Bromoform은 개인 노출에서와 같이 평균 0.19  $\mu\text{g}/\text{l}$ 로 조사 대상 할로겐 화합물중 가장 낮게 검출된 물질이었다. 혈액 중 조사 대상 할로겐 화합물의 합은 평균 27.29  $\mu\text{g}/\text{l}$ 였다.

인체 노출량에서 뇨 중 VOCs 농도는 1, 1, 1-trichloroethane이 8.31  $\text{ng}/\text{l}$ 로 가장 높았다. Bromoform은 개인 노출에서와 같이 평균 0.16  $\text{ng}/\text{l}$ 로 조사 대상 할로겐 화합물 중 가장 낮게 검출된 물질이었다. 뇨 중 조사 대상 할로겐 화합물의 합은 평균 22.59  $\text{ng}/\text{l}$ 였다.

인체 노출량에서 호기 중 VOCs 농도는 1, 1, 1-trichloroethane이 11.91  $\text{ng}/\text{m}^3$ 로 가장 높았다. Bromoform은 개인 노출에서와 같이 평균 0.22  $\text{ng}/\text{m}^3$ 로 조사 대상 할로겐 화합물 중 가장 낮게 검출된 물질이었다. 호기 중 조사 대상 할로겐 화합물의 합은 평균 31.23  $\text{ng}/\text{m}^3$ 이었다.

### 2. 방향족 화합물의 개인·인체 및 환경 노출량

Table 4는 연구 대상 노출군의 환경, 개인 및 혈액

**Table 3.** The halogenated compounds concentration in personal, blood, urine, exhalation and ambient air

Target compounds	Personal (n=14, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Blood (n=14, $\mu\text{g}/\text{l}$ )	Urine (n=14, $\text{ng}/\text{l}$ )	Exhalation (n=14, $\text{ng}/\text{m}^3$ )	Environment (n=4, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
1, 1, 1-Trichloroethane	22.19 $\pm$ 12.573	10.81 $\pm$ 3.231	8.31 $\pm$ 1.575	11.91 $\pm$ 4.293	57.19 $\pm$ 34.773
1, 1, 2-Trichloroethane	4.07 $\pm$ 2.416	2.07 $\pm$ 0.626	1.67 $\pm$ 0.315	2.37 $\pm$ 0.861	22.38 $\pm$ 23.763
1, 2-Dichloroethane	5.19 $\pm$ 3.077	2.52 $\pm$ 0.788	2.05 $\pm$ 0.379	2.93 $\pm$ 1.062	22.83 $\pm$ 27.154
Bromobenzene	7.35 $\pm$ 4.398	3.47 $\pm$ 1.067	2.96 $\pm$ 0.614	3.95 $\pm$ 1.513	330.99 $\pm$ 418.599
Bromoform	0.39 $\pm$ 0.254	0.19 $\pm$ 0.059	0.16 $\pm$ 0.031	0.22 $\pm$ 0.082	61.05 $\pm$ 50.210
Chlorobenzene	8.47 $\pm$ 6.109	3.83 $\pm$ 2.063	3.04 $\pm$ 1.451	4.49 $\pm$ 2.573	75.25 $\pm$ 34.259
Dibromochloromethane	6.01 $\pm$ 4.133	2.54 $\pm$ 0.766	2.69 $\pm$ 1.409	2.60 $\pm$ 0.668	152.23 $\pm$ 93.550
Tetrachloroethene	5.67 $\pm$ 4.725	1.59 $\pm$ 1.232	1.40 $\pm$ 0.945	1.80 $\pm$ 1.416	30.37 $\pm$ 35.608
Trichloroethene	1.88 $\pm$ 2.132	0.27 $\pm$ 0.133	0.29 $\pm$ 0.194	0.43 $\pm$ 0.293	24.29 $\pm$ 25.136
Halogens	61.23 $\pm$ 30.714	27.29 $\pm$ 8.217	22.56 $\pm$ 3.242	31.23 $\pm$ 10.616	834.74 $\pm$ 431.134

**Table 4.** The aromatic compounds concentration in personal, blood, urine, exhalation and ambient air

Target compounds	Personal (n = 14, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Blood (n = 14, $\mu\text{g}/\text{l}$ )	Urine (n = 14, $\text{ng}/\text{l}$ )	Exhalation (n = 14, $\text{ng}/\text{m}^3$ )	Environment (n = 4, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Benzene	79.98 ± 98.339	35.59 ± 45.000	23.20 ± 31.884	40.14 ± 52.655	235.57 ± 294.741
Butylbenzene	17.51 ± 13.878	6.76 ± 4.288	6.79 ± 3.947	7.30 ± 5.463	9.56 ± 1.232
Cumene	21.75 ± 14.087	9.16 ± 5.063	7.78 ± 3.019	10.35 ± 5.727	126.30 ± 90.200
Ethylbenzene	39.16 ± 35.537	18.04 ± 12.857	10.68 ± 7.853	21.62 ± 17.293	45.25 ± 36.991
Isocumene	36.58 ± 32.654	9.07 ± 8.658	11.71 ± 6.050	6.74 ± 7.877	181.46 ± 201.022
<i>m,p</i> -Xylene	45.04 ± 37.390	23.40 ± 10.347	13.14 ± 7.479	28.58 ± 14.074	92.80 ± 90.896
<i>o</i> -Xylene	42.55 ± 35.867	22.43 ± 9.510	12.63 ± 7.347	27.30 ± 12.992	141.35 ± 151.954
Styrene	2.30 ± 3.447	1.07 ± 1.782	0.38 ± 0.241	1.33 ± 2.038	54.81 ± 78.110
Toluene	371.91 ± 283.211	206.23 ± 81.588	217.61 ± 189.035	320.15 ± 313.710	124.00 ± 103.359
Aromatics	656.79 ± 408.697	331.76 ± 111.382	303.90 ± 189.626	462.97 ± 325.572	1073.38 ± 11.844

액, 뇨, 호기에서 18종의 대상 VOCs 중 방향족 화합물 (aromatic compounds) 그룹의 농도를 측정하는 것이다.

환경 노출량 중 benzene이 평균으로 가장 높아  $235.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, butylbenzene은 조사 대상 방향족 화합물 중에서 가장 낮은 물질로 각각  $9.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 전체 방향족 화합물의 환경 노출량은 평균  $1073.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다.

개인 노출량은 toluene이  $371.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사 대상 방향족 화합물 중 가장 높았다. Styrene은 조사 대상 방향족 화합물 중 가장 낮아 각각  $2.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 방향족 화합물의 개인 노출량은  $656.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

인체 노출량에서 혈액 중 VOCs 농도는 toluene이 가장 높았다 ( $206.23 \mu\text{g}/\text{l}$ ). Styrene은 개인 노출에서와 같이  $1.07 \mu\text{g}/\text{l}$ 로 조사 대상 방향족 화합물 중 가장 낮게 검출된 물질이었다. 혈액 중 조사 대상 방향족 화합물의 합은 평균  $331.76 \mu\text{g}/\text{l}$ 이었다.

인체 노출량에서 뇨 중 VOCs 농도는 toluene이 가장 높았다 ( $217.61 \text{ng}/\text{l}$ ). Styrene은 개인 노출에서와 같이 평균  $0.38 \text{ng}/\text{l}$ 로 조사 대상 방향족 화합물 중 가장 낮게 검출된 물질이었다. 뇨 중 조사 대상 방향족 화합물의 합은 평균  $303.90 \text{ng}/\text{l}$ 이었다.

인체 노출량에서 호기 중 VOCs 농도는 toluene이 가장 높았다 ( $320.15 \text{ng}/\text{m}^3$ ). Styrene은 개인 노출에서와 같이 평균  $0.38 \text{ng}/\text{m}^3$ 로 조사 대상 방향족 화합물 중 가장 낮게 검출된 물질이었다. 호기 중 조사 대상 방향족 화합물의 합은 평균  $31.23 \text{ng}/\text{m}^3$ 이었다.

**Table 5.** Correlation analysis of halogenated compounds in measure media

	P-Halogens	B-Halogens	U-Halogens	E-Halogens	EN-Halogens
P-Halogens	1.000				
B-Halogens	.947(**)	1.000			
U-Halogens	.845(**)	.889(**)	1.000		
E-Halogens	.946(**)	.961(**)	.924(**)	1.000	
EN-Halogens	.965(**)	.976(**)	.905(**)	.987(**)	1.000

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

P: personal, B: Blood, U: Urine, E: Exhalation, EN: Environment

### 3. 대상 VOCs의 환경, 개인 및 인체 노출 간 상관관계

환경 노출, 개인 노출 및 인체 노출(혈액, 뇨, 호기)간 VOCs 그룹의 상관 분석을 실시하였다 (Table 5, 6). 할로젠 화합물의 경우 각 노출간에는 통계학적으로 유의한 상관성이 존재함을 알 수 있었다. 하지만, 방향족 화합물의 경우 환경, 개인 노출 및 혈액, 호기간에는 상관성이 존재하나, 뇨 중 VOCs와 그 외 노출량 간에는 직선적 상관성이 존재하지 않았다. 또한 혈액 VOCs와 호기 VOCs간 그리고, 환경 노출과 호기 VOCs간에는 다른 노출간의 통계학적인 유의 수준 ( $p < 0.01$ )보다 다소 수준이 낮았다 ( $p < 0.05$ ). 이는 호기 측정 직전 순간적으로 많은 양의 방향족 화합물의 노출이 있었던 대상자가 있었던 것으로 추측할 수 있다. 또한 환경 노출 측정은 장시간의 평균 노출이기 때문에 통계학적인 상관관계가 다소 떨어지는 것으로 예측하나, 이 연구의 범위에서는 확인할 수 없었다.

**Table 6.** Correlation analysis of aromatic compounds in measure media

	P-Aromatics	B-Aromatics	U-Aromatics	E-Aromatics	EN-Aromatics
P-Aromatics	1.000				
B-Aromatics	.876(**)	1.000			
U-Aromatics	.196	.386	1.000		
E-Aromatics	.746(**)	.617(*)	.137	1.000	
EN-Aromatics	-.906(**)	-.906(**)	-.432	-.591(*)	1.000

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).  
 \* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).  
 P: personal, B: Blood, U: Urine, E: Exhalation, EN: Environment

**4. 인체 노출량에 미치는 요인 및 회귀 모형**

인체 내 VOCs와 관련이 있을 것으로 예상되는 요인, 즉 환경 VOCs 노출량, 개인 VOCs 노출량, 흡연 정도(개수), 흡연 연수, 성, 근무 연수 등이 개인 VOCs 노출량의 증가, 혈 중 VOCs의 증가, 뇨 중 VOCs의 증가 및 호기 중 VOCs의 증가에 미치는 영향과 이들의 증가에 얼마나 설명력이 있는지를 보기 위해 다중 회귀 분석을 실시하였다 (Table 7, 8).

다중 회귀 분석시 p value 0.05 이상인 변수를 회귀 모형에서 제외시키는 단계적 방법 (backward stepwise method)을 사용하였다.

할로젠 화합물의 경우 개인 노출량에 가장 많은 영향을 미치는 요인은 환경 노출이었으며, 흡연과 관련된 변수는 이 연구의 범위에서는 영향이 없었다. 이에 대한 회귀 모형은  $\text{Halogens}_{\text{personal}} = 3.875 + 0.068\text{Halogens}_{\text{environment}}$  ( $R^2 = .930$ )와 같이 설정되었다. 방향족 화합물 역시 할로젠 화합물과 같이 환경 노출량만이 개인 노출에 영향을 미쳤으며 이에 대한 회귀 모형은  $\text{Aromatic}_{\text{personal}} = 34217.757 - 31.266\text{Aromatic}_{\text{environment}}$  ( $R^2 = .821$ )와 같았다.

또한 할로젠 화합물의 경우 혈액의 VOCs 증가에 영향을 미치는 요인은 개인 노출의 농도와 성별이었는데, 이는 남, 여 별 담당하고 있는 업무가 다르므로 노출의 정도도 상이한 것에서 기인한다고 판단된다. 방향족 화합물에서는 뇨 중 VOCs 증가에 영향을 미치는 요인은 개인 및 환경 노출량과 각각의 흡연 기간이었다. 이들의 회귀 모형은  $\text{Halogens}_{\text{blood}} = 8.181 + 0.246\text{Halogens}_{\text{personal}} + 3.975\text{Gender}$  ( $R^2 = .925$ ),  $\text{Aromatic}_{\text{urine}} = 5655.191 - 4.951$

**Table 7.** Multiple regression analysis of halogenated compounds in measure media

Dependent	Independent	$\alpha$	$\beta, \gamma$	$R^2$	p value
Personal	*EN, G, DE, NC, DS,	3.875	.068	.930	.000
Blood	*EN, G, DE, NC, DS,	11.758	.029	.953	.000
	*P, *G, DE, NC, DS,	8.181	.246 (P), 2.975 (G)	.929	.000 (P), .049 (G)
Urine	*EN, G, DE, NC, DS,	16.881	.007	.819	.000
	*P, G, DE, NC, DS,	17.100	.089	.714	.000
Exhalation	*EN, G, DE, NC, DS,	10.946	.024	.974	.000
	*P, G, DE, NC, DS,	11.205	.327	.895	.000

EN = Environmental concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  
 P = Personal concentration ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ), G = Gender,  
 DE = Duration of employment (year),  
 NC = No. of daily smoking cigarettes (ea),  
 DS = Duration of smoking (year)  
 $y = \alpha + \beta x_1 + \gamma x_2$   
 \* : Including variables to model by stepwise.

**Table 8.** Multiple regression analysis of aromatic compounds in measure media

Dependent	Independent	$\alpha$	$\beta, \gamma$	$R^2$	p value
Personal	*EN, G, DE, NC, DS,	34217.757	-31.266	.821	.000
Blood	*EN, G, DE, NC, DS,	9475.240	-8.518	.821	.000
	*P, G, DE, NC, DS,	175.004	.239	.767	.000
Urine	*EN, G, DE, NC, *DS,	5655.191	-4.951 (EN) -5.902 (DS)	.775	.002 (EN) .004 (DS)
	*P, G, DE, NC, *DS,	249.565	.135 (P) -5.651 (DS)	.735	.005 (P) .010 (DS)
Exhalation	*EN, G, DE, NC, DS,	17891.632	-16.237	.349	.026
	*P, G, DE, NC, DS,	72.621	.594	.557	.002

EN = Environmental concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  
 P = Personal concentration ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ), G = Gender,  
 DE = Duration of employment (year), NC = No. of daily smoking cigarettes (ea), DS = Duration of smoking (year)  
 $y = \alpha + \beta x_1 + \gamma x_2$   
 \* : Including variables to model by stepwise.

$\text{Aromatic}_{\text{environment}} - 5.902\text{Duration of smoking}$  ( $R^2 = .775$ ),  $\text{Aromatic}_{\text{urine}} = 249.565 + 0.135\text{Aromatic}_{\text{personal}} - .651\text{Duration of smoking}$  ( $R^2 = .735$ )이었다.

이외의 모든 변수에서는 각 환경 및 개인 노출 (exposure)만이 체내 용량 (dose)에 영향을 미치고 있었다.

**고 찰**

이 연구는 대기 중의 대표적 유기 오염물질군인

휘발성 유기 오염물질 (volatile organic compounds, VOCs)의 환경 및 개인 노출평가와 생체 모니터링을 통하여, 이들 간의 상관관계를 알아보고, 환경 노출이 개인 노출 정도에 미치는 불확실성 및 환경 및 개인 노출이 인체 노출에 미치는 불확실성을 알아보고자 하였다.

노출군을 대상으로 환경 노출 혹은 주 노출원로부터의 노출량과 노출군 개인의 노출량 또한 그들의 혈액, 뇨 및 호기 중의 노출량을 동시에 측정하고 평가한 연구는 많지 않다. 일부 연구들도 대부분 chamber study를 통하여 통제된 범위 내에서 이루어졌으며, 인체 모니터링도 일부 매체만 (주로 혈액, 호기)을 대상으로 하고 있다. 물론 통제된 범위 내에서 이루어지는 연구들은 높은 상관 모델을 제공할 수 있겠으나, 일반 환경 중에서 노출되는 상황과는 다소 차이를 보일 수 있다. 또한 이들 연구가 대부분 단일 물질, 혹은 두, 세 가지 정도의 물질을 대상으로 하고 있기 때문에 복합 물질에 상호작용 또한 적절히 대비하지 못하고 있다.

전체 인구 집단 (population) 혹은 지역 인구 집단 (population segment)을 대상으로 하는 위험성 평가 (risk assessment)에서 노출 평가 (exposure assessment)를 실시할 때는 현실 가능한 범위 내에서 많은 양의 시료를 빠른 시간 내에 저렴한 비용으로 측정할 수 있어야 한다. 하지만 이 방법이 정밀도 (precision)와 정확도 (accuracy) 그리고 반복성 (repeatability)에서 신뢰할 수 있어야 하며, 객관적이고 보편 타당해야 한다. 이는 시간적, 공간적 범위 내에서 노출의 분포가 대상 집단 내에서 어떠한 분포를 가지고 있는가를 평가해야 하는 주요 목적에서 출발한다 (Stock et al., 1996).

저농도 유기 용매 노출군 (BTXE)에서 혈액 VOCs와 뇨 중 VOCs의 대사체 및 그 대용물을 측정하여 환경 노출과 비교한 연구 (Kawai, 1992)에서 환경 노출 변화에 따라 민감하게 반응하는 것은 뇨 중 VOCs 대사체보다 혈액 중 VOCs임을 제시한 바 있다. VOCs를 대상으로 한 동일 연구에서도 대상 물질이었던 styrene을 대상으로 조사한 연구 (Ong, 1994)에 의하면 공기 중 styrene의 영향에 가장 설명력 있는 biological monitoring 매체는 혈액 ( $r=0.87$ ), 호기 ( $r=0.76$ ) 그리고 뇨 ( $r=0.24$ )의 순서 이었다고 한다. TEAM study에서도 결론 지었듯이 (Wallace, 1987) 가장 좋은 생체 모니터링 매체

는 호기라는 것이다. 여러 결과에서 혈액 중 VOCs가 환경 노출을 가장 잘 설명하고는 있으나, 피 실험자에게 주어지는 시료 채취 과정에서의 부담과 실험자의 부담을 감안한다면, 호기가 가장 좋은 측정 매체라는 결론에 이른다. 이들 결과는 이 연구의 결과에서도 같은 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

이 연구의 대상 VOCs 그룹의 각 매체별 노출군 간의 노출 농도를 비교하여 보면, 할로겐 화합물의 총합과 방향족 화합물의 총합 모두 두 노출군간에 통계학적으로 유의한 차이를 보이고 있으며, 환경 노출, 개인 노출 및 인체 노출 (혈액, 뇨, 호기)간 VOCs 그룹의 상관 분석을 실시하여, 할로겐 화합물의 경우 각 노출간에는 통계학적 유의 수준 ( $p < 0.01$ )에서 상관성이 존재함을 알 수 있었다.

환경 노출을 독립변수로 하고 개인 노출 및 혈액, 뇨, 호기 등 인체 노출을 종속변수로 각각의 관계를 보았다. 할로겐 화합물의 경우 양적인 관계를 보여 환경 노출량이 증가함에 따라 각 매체의 노출량도 증가함을 알 수 있다.

하지만, 방향족 화합물의 경우에는 환경 노출과 각 매체의 노출량이 음적인 관계에 있어 환경 노출량이 커지면 오히려 개인 노출량 및 혈액, 뇨, 호기 중의 방향족 화합물이 적어졌는데, 이는 방향족 화합물 중 benzene의 환경 노출이 많았던 시료가 있었으나, 이 연구에서 이것을 밝힐 수는 없었다. 이를 종합해 보면 환경 노출보다는 개인 노출이 체내 VOCs에 더 많은 설명력을 부여한다는 것을 알 수 있다. 이것은 타연구 (Whitaker, 1995; Wallace, 1989)에서도 같은 결론을 내리고 있다.

개인 노출을 독립변수로 하고 혈액, 뇨, 호기 등 인체 노출을 종속변수로 각각의 관계를 보았다. 할로겐 화합물과 방향족 화합물 모두에서 개인 노출의 증가에 따라 혈액, 뇨 및 호기 중의 VOCs 농도가 증가하고 있음을 볼 수 있다.

환경 중 VOCs 그와 관련된 요인, 즉 흡연 정도 (개수), 흡연 연수, 성, 근무 연수 등이 개인 노출과 혈액 중 VOCs의 증가, 뇨 중 VOCs의 증가 및 호기 중 VOCs의 증가에 미치는 영향 개인 노출된 VOCs 그와 관련된 요인, 즉 흡연 정도 (개수), 흡연 연수, 성, 근무 연수 등이 개인 노출과 혈액 중 VOCs의 증가, 뇨 중 VOCs의 증가 및 호기 중 VOCs의 증가에 미치는 영향을 보기 위해 다중 회귀 분석 중 단계적 방법 (stepwise method)을 실시하였다.

할로겐 화합물의 경우 개인 노출량에 가장 영향을 많이 미치는 요인은 환경 노출량 이었으며, 흡연과 관련된 변수 등은 이 연구의 범위에서는 영향이 없었다. 흡연은 VOCs 노출의 중요 소스이긴 하나, 이 연구에서는 시료 채취 전 일정 기간 금연 기간을 두었으며, 혹은 간접 흡연이 있다고 하더라도 작업장 내의 VOCs 노출량에 over lapping 되었을 가능성이 있다. 하지만, 흡연과 관련되어 나온 결과는 이 연구의 목적에 부합되지 않는다고 보여진다. 이에 대한 회귀 모형은  $\text{Halogens}_{\text{personal}} = 3.875 + 0.068\text{Halogens}_{\text{environment}}$  ( $R^2 = .930$ )와 같이 설정되었다. 방향족 화합물 역시 할로겐 화합물과 같이 환경 노출량만이 개인 노출에 영향을 미쳤으며 이에 대한 회귀 모형은  $\text{Aromatics}_{\text{personal}} = 34217.757 - 31.266\text{Aromatics}_{\text{environment}}$  ( $R^2 = .821$ )와 같았다.

또한 할로겐 화합물의 경우 혈액의 VOCs 증가에 영향을 미치는 요인은 개인 노출 농도와 성별이었으며, 방향족 화합물에서는 뇨 중 VOCs 증가에 영향을 미치는 요인은 개인 및 환경 노출량과 각각의 흡연 기간이었다. 성별에 따른 차이는 이 연구의 대상자가 남, 여에 따라 담당 업무의 종류가 다르고, 이에 노출량도 다를 것이므로 영향 인자로 분석되었다 판단된다. 이들의 회귀 모형은  $\text{Halogens}_{\text{blood}} = 8.181 + 0.246\text{Halogens}_{\text{personal}} + 3.975\text{Gender}$  ( $R^2 = .925$ ),  $\text{Aromatics}_{\text{urine}} = 5655.191 - 4.951\text{Aromatic}_{\text{environment}} - 5.902\text{Duration of smoking}$  ( $R^2 = .775$ ),  $\text{Aromatic}_{\text{urine}} = 249.565 + 0.135\text{Aromatics}_{\text{personal}} - 5.651\text{Duration of smoking}$  ( $R^2 = .735$ )이었다.

이외의 모든 변수에서는 각 환경 및 개인 노출(exposure)만이 체내 용량(dose)에 영향을 미치고 있었다.

이 연구에서 설정한 노출군이 직업적 고 노출군임을 감안 한다면, 생활행태 등의 영향은 일반인들에 비해 덜 받았고, 결과 또한 일반 환경 노출과는 다소 차이가 있을 것으로 예측할 수 있으며, 환경 노출과 개인 노출의 상관분석에서 나타났듯이 할로겐 화합물의 경우 환경 노출 증가에 따라 개인 노출이 증가함을 보이나, 방향족 화합물의 경우에는 그 반대로 나타났다. 물론 방향족 화합물에서 환경 노출량에 차이가 극히 작다고는 하나 이의 결과를 놓고 본다면, 물질에 따라 환경 노출이 개인 노출을 대변할 수 없으므로 위해성 평가시 개인 노출을 우선시 해야 한다는 결론을 유도할 수

있다. 또한 각각의 물질에 대한 회귀 모형에서도 환경 노출이 개인 노출과 각 생체 모니터링 매체 간에 음적인 관계에 있는 것들이 존재하여 -toluene (환경 노출과 개인 노출), trichloroethene (환경 노출과 호기), *m,p*-xylene (환경 노출과 혈액, 환경 노출과 호기), butylbenzene (환경 노출과 개인), bromoform (환경 노출과 개인)-인체 노출 예측을 위해서는 개인 노출이 우선시 되어야 하며, 노출 평가의 기본적인 모니터링 매체가 되어야 할 것으로 생각한다. 또한 직업적 노출군을 대상으로 한 이 연구의 결과에서는 볼 수 없었으나 일반인을 대상으로 한 연구에서는 개인 생활 패턴에 따라 내적 용량에 변화가 오게 되므로 개인노출을 중심으로 인체 노출을 예측하고 이에 따라 노출 평가가 이루어져야 할 것이다.

이상의 결과로 노출의 평가와 잠재 위해성(potential risk) 계산의 최종 단계인 VOCs의 체내 흡입량(intakes into the human body) 추정 of 기본적인 자료를 마련하였다고 보여지며, 이를 위한 환경, 개인 및 인체 노출량 평가 방법의 정립과, 각 측정 매체들의 동시 측정에 의해 환경 노출, 개인 노출 및 혈액, 뇨, 호기 중의 VOCs의 노출 관계를 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- 조성준, 신동천, 정 용, 이덕희 및 Breyse PN. VOCs의 위해성 평가를 위한 노출분석 방법 연구, 한국환경독성학회지 2002; 17(2): 147-160.
- 3M. Instruction for use organic vapor monitors # 3520/3530. 3M occupational health and environmental safety division. Paul St, MN, 1991.
- Ashley DL and Prah JD. Time dependence of blood concentrations during and after exposure to a mixture of volatile organic compounds. Archives of Environmental Health 1997; 32(1): 26-33.
- Ashley DL, Bonin MA, Cardinali FL, McCraw JM, Holler JS, Needham LL, and Patterson DG. Determining volatile organic compounds in human blood from a large sample population by using purge and trap gas chromatography/mass spectrometry. Anal Chem 1992; 64: 1021-1029.
- Cullis CF and Hirschler MM. Man's emission of carbon monoxide and hydrocarbons into the atmosphere. Atmos Environ 1989; 23: 1195-1203.



- EPA. Compendium of methods for the determination of toxic organic compounds in ambient air, Second Edition, Compendium method TO-17, determination of volatile organic compounds in ambient air using active sampling onto sorbent tubes: Center for environmental research information office of research and development: US EPA: Cincinnati OH, 1997.
- EPA. Potentia atmospheric carcinogens-phase 1. Identification and classification. US EPA. Research triangle park, NC, 1980.
- Kawai T, Yasugi T and Mizunuma K. Comparative evaluation of urinalysis and blood analysis as means of detecting exposure to organic solutions at low concentration. *International Archives Occupational and Environmental Health* 1992; 223-232.
- Ong CN, Shi CY, Chia SE, Chua SC, Ong HY, Lee BL, Ng TP, and Teramoto K. Biological monitoring of exposure to low concentrations of styrene. *Americal Journal of Industrial Medicine* 1994; 25: 719-730.
- Patrick DR. Toxic air pollution handbook. Van Noatranb Reinhold. NC, 1994.
- Stock TH, Morandi MT and Afshar M. Modified diffusion sampler for measuring 24-hour VOC concentration in personal, indoor and community air. *Indoor Air* 93; Proceedings of the 6th International Conference on Indoor Air and Climate, 1996.
- Tardif R, Lapare S, Plaa GL and Brodeur J. Effect of simultaneous exposure to toluene and xylene on their respective biological exposure indices in humans. *Int Arch Occup Envrion Health* 1991; 63 : 279-284.
- Volz A, Ehhalt DH and Derwent RG. Measurement of 14-CO: A method for determining OH concentrations in the troposphere. *J Geophys Res* 1981; 86 : 5163-5171.
- Wallace LA, Pellizzari E, Hartwell T, Rosenzweg M, Erickson M, Sparacino C and Zelon H. Personal exposure to volatile organic compounds: i. direct measurements in breathing-zone air, drinking water, food and exhaled breath. *Environmetal Research* 1984; 35 : 293-319.
- Wallace LA. VOCs and the environmental and public health -exposure: Blomen H.J.Th. and Burn J.: (Edi). *Chemistry and analysis of volatile organic compounds in the environment: Chapter 1.* London. Blackie Academic & ProgeSSIONal. 1993.
- Wallace LA, Pellizzari ED, Hartwell TD, Sparacino C, Whitmore R, Sheldon L, Zelon H and Perritt R. The TEAM Study: personal exposure to toxic substances in air, drinking water, and breath of 400 residents of New Jersey, North Carolina, and North Dakota. *Environmental Research* 1987; 43 : 290-307.
- Wallace LA, Pellizzari ED, Hartwell TD, Davis V, Michael C, and Whitmore. The influence of personal activities on exposure to volatile organic compounds. *Environmental Research* 1989; 50 : 37-55.
- Whitaker D, Fortmann RC and Lindstrom AB. Development and testing of a whole-air sampler for measurement of personal exposure to volatile organic compounds. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 1995; 5 (1) : 89-100.
- Zimmerman PR. Procedures for conducting hydrocarbon emission inventories of biogenic sources and some results of recent investigation. Paper Presented at the 1977. Environmental Protection Agency Emission Inventory /Factor Workshop. Raleigh. NC, 1977.