

총휘발성유기화합물 (TVOC) 검량의 오차인자에 대한 연구

김기현★

세종대학교 지구환경과학과 대기환경연구실
(2004. 6. 16 접수, 2004. 10. 4 승인)

Consideration of the analytical bias involved in the detection of total volatile organic compounds (TVOC)

K. H. Kim★

Dept. of Earth and Environmental Sciences, Sejong University
(Received Jun. 16, 2004, Accepted Oct. 4, 2004)

요 약 : 본 연구에서는 실내오염관리와 관련하여, 주분석 대상의 하나로 간주되는 총휘발성유기화합물 (total volatile organic compounds: TVOC)의 검출에 개입된 분석화학적 오차의 발생소지를 여러 가지 관점에서 비교검토하였다. 이를 위하여 톨루엔 검량선을 이용한 TVOC의 산출방법과 개별 VOC 성분들의 검량선들로부터 TVOC를 산출하는 방법을 이질적인 공기 시료에 동시에 적용하는 방식으로 비교하였다. 본 연구의 결과에 의하면, 일반적으로 많이 사용되는 톨루엔 중심의 검량방법에는 여러 가지 오차발생요인이 근원적으로 내재되어 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과, 궁극적으로 TVOC란 개념을 활용하기 위해서는 앞으로 여러 가지 관점에서 보완이 이루어져야 한다는 결론을 도출하였다.

Abstract : In this article, various aspects of errors involved in the measurement of TVOC were examined as part of study to develop the indoor pollution indices. For this purpose, TVOC term was computed by two different calibration approaches, i.e., by assuming all VOC are detected in the same manner as toluene and by summing up as many individual VOC as possible. The results of our study indicate that the common, toluene-based method suffers from errors inherent in the development of such theory. Consequently, it is concluded that more research efforts have to be directed to the improvement of such concept as TVOC.

Key words : :TVOC, VOC, indoor pollution, toluene, individual VOC

★ Corresponding author
Phone : +82+(0)2-3408-3233 Fax : +82+(0)2-499-2354
E-mail : khkim@sejong.ac.kr

1. 서론

실내공기오염의 심각성에 대한 일반 대중의 인식은 세집 증후군 등의 어휘로 대별되는 시대적 조류의 단면을 형성하는 계기를 제공하였다.^{1,5} 이와 같은 여건을 감안하여, 많은 연구자들은 이러한 문제를 해소하기 위한 방법들을 중요한 연구테마로 간주하게 되었다. 이를 해결하기 위한 방안의 하나로 실내환경에서 고농도로 발견되는 휘발성 유기화합물 (volatile organic compounds: VOC)과 같은 주요 지시성 인자들 (indicative factors)의 측정에 대한 중요성이 강조되고 있다. 따라서 벤젠, 톨루엔, 자일렌 등으로 대변되는 여러 가지 유해성 VOC의 개별적 정성 및 정량의 객관성을 확보하기 위한 노력이 다각도로 이루어져 왔다. 그리고 이와 함께, VOC 성분의 기여도를 포괄적으로 평가하기 위한 기본적인 방법으로, TVOC (total VOC) 개념의 도입과 이에 대한 계량적 분류의 필요성이 강하게 제기되었다.⁶ 원래 이러한 용어는 GC 칼럼에 의해 분리되는 좁은 집단의 VOC 성분들을 대표하는 개념으로 출발하였다. 그러나 이와 같은 개념을 정리하는데 있어, 단순히 분석학적 관점의 복잡성 또는 대표성의 여부 등과 관련된 여러 가지 현실적인 문제점들이 발견되고 있다.

TVOC 개념은 분석학적인 분류의 용이성 측면에서 출발하였기 때문에, 실제로 실내환경 중에 존재하는 여러 가지 중요한 VOC 성분들을 포괄적으로 대표하지 못한다는 취약성이 내재한다. 예를 들어, 반응성이 강한 유기화합물 (알데하이드 또는 과산화수소), 오존과 질소산화물들의 생성반응에서 단계별로 발생하는 물질들의 존재를 반영하지 못하고 있다.⁷ 또한 TVOC로 분류된 성분들조차, 일부는 공기 중의 산화제에 쉽게 소멸되는 문제 또는 분석시스템의 검지능력 한계와 같은 문제 등으로 인해, 실제 측정 단계에서 농도의 축소, 왜곡되는 현상이 일어나게 된다.⁸

본 연구에서는 TVOC의 계측과 관련된 특성을 평가하기 위한 목적으로 일부 환경시료를 대상으로 개별 VOC 성분들에 대한 분석을 수행하였다. 그리고 이들 자료를 이용하여 TVOC의 정의방식에 따른 계측결과의 차이를 직접적으로 비교분석하였다. 그리고 이를 토대로 TVOC의 계측과 관련된 분석학적 특성과 제한성을 진단하고자 하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 TVOC 농도의 관측과 관련된 기본적인 정도관리를 달성하기 위한 한 가지 방법으로서, 이들의 정의방식과 관련된 불확실성의 실체에 접근하고자 하였다. 이를 위해, TVOC 농도의 산정에 이용되는 검량방식들의 기본적인 차이를 다음과 같이 두 가지 방식으로 분석하고자 하였다. 그 중 첫 번째는 GC-FID 방식에 의해, 검출된 개별 VOC 성분들에 대하여, (검량이 가능한 선에서 최대한) 개별 성분의 검량선을 이용하여 검량한다. 그리고 이렇게 화학적 성분에 대한 확인이 이루어진 개별 성분들의 농도 값을 최대한 반영하는 방식을 의미한다. 본 연구에서 개별적인 성분의 분석은 Table 1에 제시된 바와 같이 일상적으로 분석이 용이한 benzene, toluene, ethylbenzene, xylene (각각의 대문자를 이용해서, BTEX 라는 약칭을 사용 함 성분 및 일반적인 방향족 성분 11가지를 중심으로 이루어졌다. 이와 같은 방식으로 구한 농도는 편의상 TVOC_i (individual) 라고 명명 하였다. (이 경우, 개별적인 검량이 이루어지지 않은 모든 미지 성분들은 일괄적으로 톨루엔의 검량 커브를 이용하여, 농도를 산출하였다.) 이에 반하여, 또 다른 방법의 검량은 검출이 이루어진 모든 성분들에 대해, 처음부터 톨루엔의 검량선을 곧바로 적용하여 TVOC 농도를 산출하는 방식에 의존하였다. 이렇게 계산이 이루어진 경우, 편의상 TVOC_t (toluene) 방법이라 칭하였다.

검량방식에 따른 TVOC 농도의 오차 발생 가능성을 분석하기 위하여, 본 연구진이 지속적으로 연구 중인 환경대기 및 배출원으로부터 채취한 시료들을 대상으로

Table 1. A list of VOC routinely analyzed in this study

Order	Compound	Short name
1	Total VOC	TVOC
2	Benzene	B
3	Toluene	T
4	Ethylbenzene	E
5	m,p-Xylene	MPX
6	Styrene	STY
7	o-Xylene	OX
8	Bromobenzene	BB
9	1,3,5-Trimethylbenzene	1,3,5-TMB
10	1,2,4-Trimethylbenzene	1,2,4-TMB
11	p-Isopropyltoluene	p-IPT
12	n-Butylbenzene	n-BB

2 가지 검량방식의 결과를 비교해 보았다. 이를 위해, 본 연구진이 2004년 1월 대구광역시 폐기물 매립장 및 주변 지역에서 채취한 환경대기 시료 그리고 매립장 내부에 산재한 배출공으로부터 직접 채취한 극단적인 고농도 VOC 시료의 분석 결과에 동시에 적용하였다.⁹ 이미 본 연구진이 수행한 매립장 지역의 연구방법 등에 대한 내용은 대략 다음과 같이 요약할 수 있다.

시료의 채취는 10리터 용량의 테들러 백에 진공상태를 걸어 주는 링챔버(lung chamber) 방식의 시료채취 시스템을 이용하여, 대략 1 L/min 의 유속으로 수행하였다. 채취된 시료는 곧바로 실험실로 수송하여 채취후 24시간 내에 분석하는 것을 원칙으로 하였다. 시료의 분석은 GC-FID (Model DS 6200, Donam Instrument)를 이용하여, Table 1에 제시된 바와 같이 주로 benzene, toluene, ethylbenzene, m,p-xylene과 o-xylene을 위시한 12가지 방향족 성분의 VOC에 대한 정량적인 분석을 수행하였다.

본 연구에서 VOC의 분석방식은 광주지역을 대상으로 한 본 연구진의 선형연구¹⁰와 유사한 접근방식을 이용하였다. 본 연구에서는 매립지 및 주변지역의 환경 대기 중에 존재하는 VOC 성분을 정량적으로 관측하였다. 환경대기로부터 채취한 모든 시료는 도남인스트루먼트에서 제작한 GC-FID와 열탈착 전용기(SPIS)를 조합한 극미량 분석시스템을 활용하였다. 테들러백을 이용하여 채취한 시료는 실온 조건(23 + 2 °C)에서 전술한 열탈착 전용기 내부에 장착된 흡입펌프와 MFC(Mass Flow Controller)를 통해 일정한 유량(23.5 mL/min)으로 10분간 열탈착 전용기 내부로 주입시켰다. 주입된 시료는 펠티어 쿨러에 의해 -15 °C로 유지되는 조건에서 cold trap을 통해 저온농축(cryo-focusing)되었다. 이렇게 농축된 시료는 열탈착과정(330 °C에서 10분간)을 거친 후, GC(Gas chromatography) column(BP-1, 60 m × 0.32 mm, film thickness 5.0 μm, SGE사 제조)으로 주입하여, 최종적인 성분 분석을 수행하였다. 본 연구에서의 GC 운전조건은 대략 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. Detector: FID at 230 °C
2. Flow rate (mL/min-1): Air(1) flow=300, H2 flow=30, N2 flow=30(makeup)
3. Carrier gas: N2 (20 psi)
4. Oven condition: init temp.=50 °C, initial hold time :5 min , ramp= 6 °C/min, final temp=230 °C, final

hold=5 min, total time=40 min

5. TDU injection volume: 5 ~ 800 mL (splitless)
6. Cold trap: 'Carbopack B+ Carbopack C' (low=-10 °C, high=320 °C, hold time=5.0 min)

본 연구에서 방향족 성분들의 검량을 위해 1 μL에 각 성분을 각각 10, 20, 40 ng씩 함유하는 액상표준시료(UST BTEX mix, EPA VOC Mix 2, EPA 524 VOC Mix A)를 희석하는 방식으로 1 mL 만큼씩 준비하였다. 그리고 이들을 가스상태로 변환시켜, 작업용 표준 시료(working standard)로 사용하였다. 이들을 3개의 농도대에서 반복적으로 주입시키고 분석하여, 검량선을 확보하였다. 이와 같은 반복분석의 결과로부터 상대표준오차를 산출하면, 정밀도는 약 9% 이하를 유지하는 것으로 나타났다. 본 분석시스템의 정확도는 TO-14 표준가스(Restek, Alpha, NJ, USA) 등을 이용하여 BTEX 등을 중심으로 비교분석한 결과, 5% 내외로 확인되었다. 절대량을 기준으로 할 때, 본 연구에 활용된 GC-FID 시스템은 benzene을 기준으로 대략 0.1 ng 수준의 검출한계를 유지하였다. 본 연구가 수행되는 전체 기간동안 이동형 차량에 탑재된 환경관측시스템을 이용하여 주요 환경변수의 관측을 동시에 시도하였다.

3. 결과 및 토론

본 연구의 비교자료는 세종대 연구진이 2004년 1월 대구광역시 매립장 지역을 중심으로 한 환경대기 및 배출가스로부터 관측한 VOC 성분의 농도분석 결과를 이용하였다.⁹ Table 2에는 두 가지 분석대상으로부터 관측한 모든 관측자료의 통계량을 요약하여 제시하였다. Table 2의 상단에는 TVOC 농도를 산출하기 위해, 다음과 같이 두 가지 방식으로 접근하였다. [1] 개별성분들의 함량을 각자의 검량기울기로부터 산출하고, 이를 다시 탄소 기준의 ppbC 농도로 산출한 후 (TVOC_i)로 명명하였다. [2] 그리고 이에 대응하는 농도값을 구하기 위해, 먼저 톨루엔에 함유된 탄소성분만을 기준으로 피크의 면적을 대비시키는 방식으로 검량곡선을 산출하였다. 이 검량곡선에 모든 성분들로부터 도출된 피크면적을 대입시켜, 대비된 피크의 합에 상응하는 탄소 중심의 ppbC 농도를 산출하였다. 그리고 이를 (TVOC_c)라고 명명하였다. 이와 같이 TVOC를 두 가지 기준으로 비교하는 것과 동일한 방식으로 BTEX 성분들의 합산농

Table 2. Comparison of TVOC and BTEX concentrations of ambient air samples using different approaches

[A] Comparison of summation terms derived using the maximum number of individual components and toluene-based approximation (All concentration in ppbC unit).

Site	Concentration (in ppbC)				Concentration ratio (in ppbC/ppbC)		
	TVOC _i	TVOC _t	BTEX _i	BTEX _t	IIS/(TVOC _i)	Bias (TVOC)	Bias (BTEX)
Ambient	304±107 (307) [*]	282±95.8 (293)	90.7±54.6 (87)	82.4±48.9 (80.5)	0.34±0.13 (0.33)	0.08±0.06 (0.07)	0.09±0.03 (0.08)
	75.0~521 (42) ^{**}	72.1~443 (43)	14.8~229 (43)	13.5~189 (43)	0.11~0.65 (42)	0.02~0.30 (42)	0.03~0.20 (42)
Vent	1029±762 (1016)	929±732 (883)	582±563 (337)	538±549 (281)	0.55±0.21 (0.53)	0.11±0.05 (0.11)	0.14±0.09 (0.13)
	118~2590 (14)	109~2518 (14)	17.6~1946 (14)	12.2~1890 (14)	0.19~0.86 (14)	0.03~0.22 (14)	0.03~0.31 (14)

* denotes mean and SD and median in the parenthesis, while ** is for range and the total number of observations. IIS=Individually identifiable species

[B] Concentration of major aromatic VOC (ppb)

Site	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	m,p-Xylene	O-Xylene
Ambient	0.99±1.10 (0.67)	8.58±5.26 (8.28)	2.49±2.22 (2)	0.46±0.44 (0.36)	0.13±0.11 (0.11)
	0.32~6.69 (43)	1.04~17.7 (43)	0.41~12.6 (43)	0.08~2.47 (43)	0.02~0.52 (43)
Vent	1.36±0.83 (1.30)	64.8±74.4 (28.9)	12.6±7.31 (13.1)	2.04±1.22 (2.13)	0.50±0.37 (0.54)
	0.13~2.73 (14)	0.41~253 (14)	1.47~22.8 (14)	0.22~3.85 (14)	0.03~1.00 (14)

도도 톨루엔을 기준으로 (BTEX_t)를 그리고 모든 개별 성분들의 개별 검량결과를 합산하는 방식으로 (BTEX_i)를 각각 산출하였다. 그리고 이들 두 가지 농도값을 TVOC를 비교하는 것과 동일한 기준으로 비교하였다. 이러한 비교에 의하면, 환경대기나 배출가스를 막론하고, 개별성분의 농도가 반영된 결과들이 단일 톨루엔 성분으로 구한 값들보다 구조적으로 큰 값을 취하는 것으로 확인되었다.

이들의 관계를 보다 심층적으로 비교하기 위하여, 몇 가지 부수적인 비교를 산출해 보았다. Table 2의 상단 우측에 개별적으로 확인된 모든 성분들 (individually identifiable species: IIS)이 (TVOC_i)의 농도 결정에 얼마만큼 기여하는가를 설명하기 위해, IIS/(TVOC_i)의 값을 산출하였다. 이 결과 환경대기에는 34% 선에서 그리고 배출가스는 55% 선을 차지하는 것으로 나타났다. 이에 덧붙여 (TVOC_t - TVOC_i)/TVOC_i의 비교로 두 가지 검량방식의 사용에 따른 bias를 산출하였다. Bias를 산출한 결과를 보면, 대체로 배출공의 결과가 더 큰 것으로 나타났다.

위 두 가지 검량 방식에 기초하여 산출한 농도값들을 이용하여, 양 산출방식의 상관성에 대한 강도를 확인하고자 하였다. 이런 비교를 목적으로 회귀분석을 수행한 결과를 Fig. 1과 2에 제시하였다. Fig. 1에는 환경대기 중의 TVOC 농도자료를 그리고 Fig. 2에는 배출공

의 농도자료를 이용하였다. 이 결과를 보면, 환경대기 및 배출가스 모두에서 상당히 뛰어난 상관성의 존재가 확인된다. 이런 결과를 보다 세부적으로 의미하기 위하여, 양 쪽 모두 가장 정량이 용이한 BTEX 성분들에 대해 두 가지 방식의 결과도 동시에 비교하였다. 그 결과 BTEX_i와 BTEX_t간에도 유사한 차이가 존재하는 것으로 확인되었다. Table 2에 표시된 내용 및 Fig. 1, 2의 비교 분석결과를 보면, 양 검량방식간에는 농도의 크기 차이가 구조적으로 존재한다는 것을 알 수 있다. 그렇지만, 이러한 차이는 내면적으로 동질한 성격을 지니기 때문에, 양자간에는 상당히 우수한 상관성이 유지된다는 것을 알 수 있다.

개별 성분의 농도를 얼마만큼 확인하는가의 여부가 TVOC의 오차증폭에 얼마만큼 영향을 미치는가를 파악하기 위해, Fig. 3에는 (Table 2에 제시한) IIS/(TVOC_i)의 값을 x축으로 그리고 두 가지 TVOC 산출방식의 오차 (bias)를 y축으로 비교하였다. 이 때 오차는 (TVOC_i)의 값을 기준으로 다음과 같이 산출하였다 [(TVOC_t - TVOC_i)/(TVOC_i)]의 값을 Fig. 3에는 TVOC 중 개별 성분의 기여 여부가 증가 또는 감소하는 수준에 대비하여, 오차의 크기가 어떻게 변화하는가의 관계를 비교해 보았다. 이 결과에 의하면, 환경대기를 대상으로 한 것과 배출가스를 대상으로 한 결과간에는 상당한 차이가 존재한다는 것을 알 수 있다. 먼저 환경대기 시료의 경

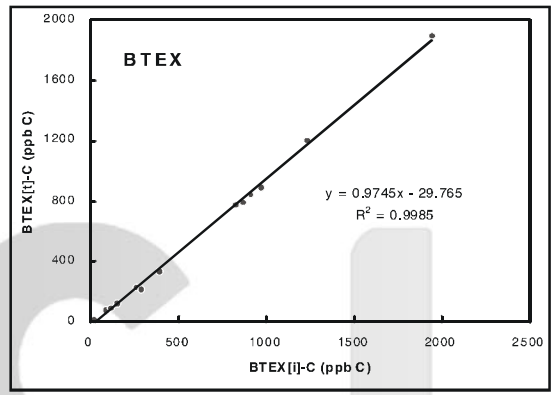
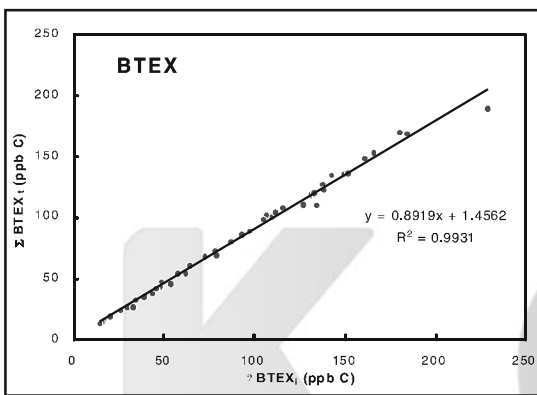
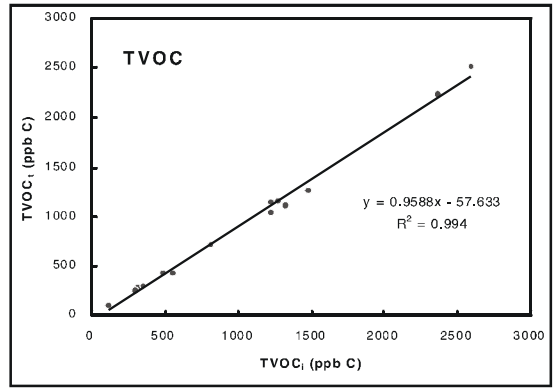
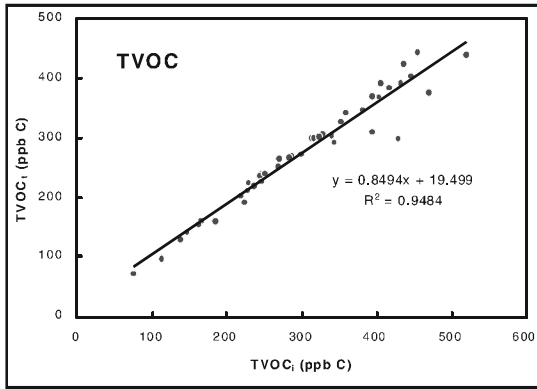


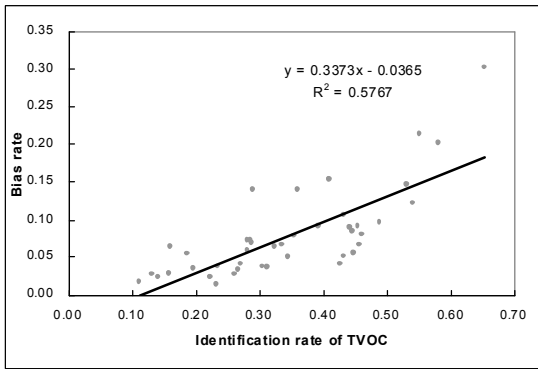
Fig. 1. Comparison of TVOC and Σ BTEX concentration terms derived by two different approaches - between individual identification of VOC and toluene-based gross summation. Comparison is made using the total of 42 ambient air samples in and around the Dae Gu municipal landfill site (samples collected during Jan. 2004).

Fig. 2. Comparison of TVOC and Σ BTEX concentration terms derived by two different approaches - between individual identification of VOC and toluene-based gross summation. Comparison is made using the total of 14 landfill gas (LFG) samples obtained from the Dae Gu municipal landfill site (Jan. 2004).

우, 개별 성분들의 기여도가 증가할수록 양 방식의 오차가 규칙적으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 따라서 톨루엔 중심의 개략적인 접근방법은 절대값의 산정에 구조적인 오차를 유발할 수 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 이러한 오차는 상당히 구조적인 규칙성을 지닌다는 것을 유추할 수 있다. 그런데 이에 반해 배출가스를 대상으로 비교한 결과를 보면, 오차의 발생과 개별성분의 기여도 간에는 특별한 유의성이 존재하지 않을 가능성이 더 크다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 TVOC의 산출을 톨루엔과 같이 단일성분에 기초한 약식 접근법을 이용하였을 때, 오차가 존재한다는 점을 인정하여야 할 것이다.

이와 같은 오차가 발생하는 근원적인 원인을 확인하기 위한 한 가지 방법으로, Table 3에는 본 연구실에서 장기간에 걸쳐 확보한 BTEX 성분들에 대한 검량곡선의 장기적 추이를 비교해 보았다. 이론적인 관점에서 보면, 개별 VOC 성분들의 검출은 탄소량에 정비례하여야 하기 때문에, 피크의 면적은 각 성분들에 함유된 탄소의 숫자와 적절하게 비례관계를 유지하여야 한다. 예를 들어, 벤젠과 톨루엔의 탄소수는 각각 6개와 7개이므로, 이론적으로 이상적인 크로마토그램에서 양 성분의 검량기울기 크기는 6:7 또는 1:1.167의 관계를 유지하여야 한다. 그러나 Table 3에 제시된 결과를 보면 이러한 이상적인 기준에 근접하는 사례는 대단히 드물다는

[A] Comparison using ambient samples



[B] Comparison using LFG samples

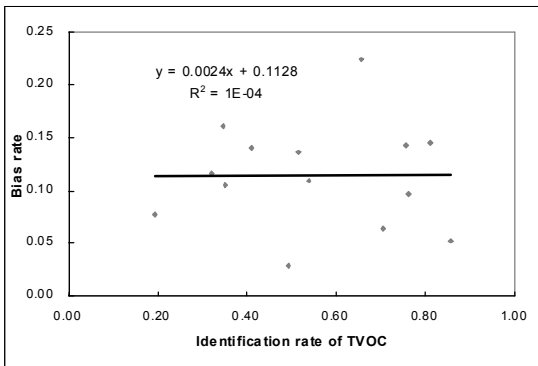


Fig. 3. Comparison of TVOC computation bias as a function of identification rate of individual VOC.

Table 3. Comparison of calibration slope values obtained over long-term duration using gas-phase VOC standards.

VOC	Benzene	Toluene	E.B	m,p-xyl.	o-xylene
Formula	C ₆ H ₆	C ₇ H ₈	C ₈ H ₁₀	C ₈ H ₁₀	C ₈ H ₁₀
Number of C	6	7	8	16	8
02-11-27	1.85	2.75	2.07	4.61	2.32
02-12-21	2.35	3.39	2.32	4.18	2.62
03-1-2	2.36	3.28	2.30	4.65	2.77
03-1-17	1.43	1.94	1.43	2.84	1.59
03-1-23	2.44	2.39	2.36	4.82	2.73
03-2-10	0.64	0.64	0.78	1.87	0.88
03-2-11a	0.99	1.16	1.30	2.59	1.26
03-2-11b	1.25	1.25	1.32	2.64	1.26

것을 알 수 있다. Table 3에 8회의 검량선 중에 03-1-23a의 경우만 유일하게 이와 같은 이론적인 부분을 제대로 반영하는 것으로 나타났다. BTEX 성분이 비교적 검출이 용이한 성분이라는 점에도 불구하고, 이와 같이 이론적인 특성이 잘 반영되지 않는다는 점을 감안하면, 현실적으로 TVOC의 검량에는 여러 가지 오차소지가 존재한다는 점이 확인된다. 대부분의 연구자들이 톨루엔만을 이용하여 TVOC를 산출할 경우, 그러한 관측결과들에도 여러 가지 오차요인이 수반될 소지를 배제할 수 없다.

4. 결 론

본 연구에서는 TVOC의 산출과 관련된 구조적인 문제점을 다각도로 진단해 보고자 하였다. 이를 위해 가장 일반적으로 사용되는 톨루엔을 이용한 TVOC의 산출방법이 개별성분을 대상으로 구하는 방법과 얼마 만큼의 차이를 보일 수 있는가의 관점에서 분석하였다. 본 연구의 결과에 의하면, 산정된 TVOC의 절대적 차이는 검량방법에 따른 차이가 구조적으로 반영된다는 것으로 나타났다. 이와 같은 연구결과에 따르면, 분석화학적 개념 또는 TVOC의 대표성 등과 관련된 여러 가지 문제점과 함께 실질적으로 TVOC의 검량기준에도 어느 정도 문제점이 존재한다는 것을 알 수 있다. 근본적으로 TVOC의 개념이 실내환경과 같이 VOC의 오염이 중요한 환경에서 실내오염을 민감하게 감지하기 위한 기준으로 개발되었다는 점을 감안하면, 향후 이러한 기준을 보다 더 객관적으로 개발하기 위한 노력이 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 환경부가 주관하는 차세대과제의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

1. H. Guo, F. Murray, and S.C. Lee, *Building and Environment*, **38**, 1413-1422(2003).
2. H. Guo, S. C. Lee, and L. Y. Chan, *Environmental Research*, **94**, 327-335(2004).
3. P. Wolkoff, *Indoor air Supplimentary*, **3**, 9-73 (1995).

4. P. Wolkoff and Nielsen, *Atmospheric Environment*, **35**, 4407-4417(2001).
5. M. Tuomainen, A. L. Pasanen, A. Tuomainen, J. Liesivuori, and P. Juvonen, *Atmospheric Environment*, **35**, 305-313(2001).
6. ECA, European Collaborative Action ECA-IAQ. *Total volatile organic compounds TVOC in indoor air quality investigations. Report No . 19*, European Commission, Brussels(1997).
7. C.J. Weschler and H.C.Shields, *Indoor Air*, **10**, 92-100 (2000).
8. A. Calogirou, B.R. Larsen, C. Brussol, M. Duane and D. Kotzias, *Analytical Chemistry*, **68**, 1499-1506(1996).
9. 김기현, 오상인, 최여진, 선우영, 주도원, *한국환경분석학회지*, **6**(1), 7-14.(2003)
10. 김기현, 최규훈, 오상인, 최여진, 선우영, 전의찬, 주도원, *한국분석과학회지*, **16**(5), 407-417. (2003)