

극미량 휘발성유기화합물질의 기체상 표준시료 조제와 열탈착분석방식에 기초한 분석안정도의 평가

박신영 · 김기현*

세종대학교 지구환경과학과
(2006. 9. 18. 접수, 2006. 11. 7. 승인)

Evaluation of experimental reliability for trace-quantity of gaseous VOC working standards based on thermal desorption analysis

Shin-Young Park and Ki-Hyun Kim*

Dept. of Earth & Environmental Sciences, Sejong University, Gun Ja Dong 98, Gwang Jjin Gu, Seoul 143-747, Korea
(Received September 18, 2006; Accepted November 7, 2006)

요 약: 본 연구에서는 Tedlar bag을 사용하여 조제한 작업용 기체상 표준시료를 열탈착과 GC/FID를 조합한 시스템으로 분석할 때, 발생 가능한 오차를 평가하고자 하였다. 이를 위해, 여러 가지 VOC성분 (Benzene, Toluene, p-Xylene, Styrene)을 함유하는 표준시료를 4 가지 초기농도대(4-40 ppb)에서 조제하였다. 그리고 이들 작업용 시료를 이용하여, 각각의 검량결과를 도출하고 비교분석을 실시 하였다. 본 실험에서 설정한 4-40 ppb 농도대의 검량결과를 비교하기 위해, 공기분배/저온농축/열탈착 전용기(Air server/thermal desorber (AS/TD))와 조합한 GC/FID 시스템을 사용하였다. 본 연구의 결과, 표준시료의 조제방식이나 그와 연관된 초기농도의 차이가 검량 특성에 영향을 미친다고 하기는 어렵다는 결론을 내릴 수 있었다. 그러나 테들러백을 사용하는 경우, 여타 성분들에 비해 Styrene성분에서 감도가 떨어지는 경향이 크게 나타나는 점을 확인할 수 있었다.

Abstract: In this study, an attempt was made to measure uncertainties involved in the VOC analysis for the VOC working standards prepared by a dilution technique using Tedlar bags. For this purpose, VOC standard gases of benzene, toluene, xylene, and styrene were prepared at four different concentrations (4, 8, 20, and 40 ppb). These standard samples were then loaded on to the GC system equipped with air server/thermal desorption (AS/TD) system. Each of these four standard concentrations was analyzed individually to derive their respective calibration results. These calibration data sets were then compared across four different compounds. According to this comparison, differences in calibration patterns were moderately insignificant within the selected concentration range of 4-40 ppb. It was also observed that the loss of styrene standard was fairly high compared to other VOCs investigated simultaneously. The results of our study suggest that the analytical uncertainty associated with the preparation of VOC standard gas using a dilution technique can be assessed in a fairly reasonable manner for samples with a narrow concentration range.

Key words: thermal desorption, calibration, tedlar bag, VOC, styrene

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)2-499-9151 Fax : +82-(0)2-499-2354

E-mail: khkim@sejong.ac.kr

1. 서 론

일반적으로 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds: VOC)은 탄소, 수소를 포함하는 탄화수소 화합물의 상당 부분을 차지한다. 이들은 다양한 화합물의 형태를 취하며, 환경대기 중에서 극미량 농도대로 존재한다. 이들 VOC 중 다수는 인체독성을 강하게 띠는 점¹ 또는 오존의 전구물질로 기능한다는 점 때문에 적절한 관리방안의 필요성이 강조되고 있다.² 이처럼 VOC 관리의 중요성에 대한 인식이 확산되면서, 관련 분야에 종사하는 많은 연구자들은 여러가지 관점에서 분석기술을 향상하기 위해 노력하고 있다.³ 대기 중 VOC의 채취와 분석은 여러가지 기법들을 조합할 수 있을 정도로 다양하다. 따라서 특정한 방법으로 측정된 VOC 자료에 대한 신뢰도(혹은 불확실성)는 선택한 방법별로 일정 수준 이상 차이를 보이기도 한다.⁴ 따라서 실제로 대기 중에 존재하는 이들 극미량 물질의 측정을 위한 정도관리의 계획을 수립하고 검정하는 작업은 중요한 의미를 지닌다.⁵

대기 중에 존재하는 극저농도의 VOC를 측정하기 위해서는 기본적으로 고감도의 검출기술을 적용하여야 한다. 그런데 수 ppb 또는 그 이하의 수준에서 VOC 시료를 분석하려면, 추가적으로 보다 고효율의 농축기법(저온농축과 열탈착)을 적용하는 부분이 필요하다.⁶ 이처럼, 분석이 가능한 수준으로 시료를 처리하는 과정에서는 반응성이 큰 성분의 손실과 같은 문제가 발생하기도 한다. 이 밖에도 검량을 위한 작업용 표준시료의 제조 또는 분석기계에 대한 조작 숙련도의 차이 등에 따른 오차가 추가적으로 발생할 수 있다.⁴

저농도의 VOC 시료를 정확하게 분석하기 위해서는 분석단계 뿐만 아니라, 시료의 채취단계에서도 여러가지 기술적인 차이와 특성을 감안해 주어야 한다. 이들의 채취는 주로 용기채취법, 흡착관 방식, SPME 방식 등을 이용한다.^{5,7} 전자의 경우 Tedlar Bag이나 Canister의 내부 표면에 흡착, 내부오염, 수분에 의한 손실 등의 오차요인이 존재한다.⁸ 반면, 흡착관법은 채취시점에 시료가 흡착매체에 너무 강하게 흡착하거나 또는 반대로 불완전하게 흡착하는 문제가 발생하기도 한다.⁹ 따라서, 선택한 흡착제의 흡착효율에 대한 적정성 또는 보관과 관련된 안정도의 문제를 파악하는 것이 중요하다.¹⁰

본 연구에서는 VOC의 용기채취법과 연계하여 공기분배/저온농축+열탈착 전용기(Air server/thermal desorber (AS/TD): Markers International Ltd., UK)의 운용방식

에 대한 특성을 조사하고자 하였다. 이를 위해, 보다 경제적이고 다른 용기방식보다 사용이 편리한 테들러 백으로 가스상 VOC의 작업용 표준시료를 준비하였다.⁸ 테들러 백에 준비한 표준시료는 AS/TD시스템에 주입하여, 열탈착을 유도하는 방식으로 검량하였다. 이러한 결과의 비교분석을 통해, AS/TD 시스템과 백을 조합하여 분석한 자료들의 오차발생 특성을 평가하고자 하였다. 분석대상 VOC의 표준시료를 다양한 농도 범위대에서 조제해 줌으로써, Tedlar Bag을 이용한 보관 방식과 저온농축 분석법의 관계를 다각도로 평가하고자 하였다. 특히, 용기방식으로 준비한 작업용 표준시료들의 주입유속이나 주입시간의 조절을 통해, 최초에 제조한 표준시료의 농도 차이가 VOC의 검량결과에 어떻게 영향을 미치는 가를 위주로 조사하고자 하였다.

2. 연구방법

Table 1에 제시한 바와 같이, 4~40 ppb까지 총 4가지 농도대에서 표준시료를 준비하였다. 이들 각 농도대의 VOC 표준시료를 개별적으로 AS/TD 시스템에 주입하면서, 주입량을 조절시켜 주는 방식으로 각각의 표준시료를 대표할 수 있는 농도대별 검량자료를 도출하였다. 이들 각각의 농도를 대표하는 개별 표준시료로부터 3개의 검량점을 확보하였다. 이들에 대한 절대적인 총주입량(pmol)은 Table 1에 설명한 것과 같이, 4가지 농도대의 표준시료 모두 동일한 방식으로 일치시켜 주었다. 이렇게 초기농도가 다른 표준시료의 분석을 통해, VOC의 검량특성이 어떻게 영향을 받는 가를 검토해 보고자 하였다.

2.1. 작업용 표준가스의 제조

본 연구에서는 기본적으로 대기 중에서 검출빈도가 높고 인체에 유해성이 높은 것으로 알려진 C₆-C₁₀영역의 방향족 화합물을 대표하는 4가지 성분들(benzene, toluene, p-xylene, styrene)을 주 연구대상으로 선정하였다. 이들 성분의 정성정량분석을 위해 두 개의 실린더로 분리한 상태에서 표준시료를 구매하였다(Ri gas, Korea). 3종의 VOC(benzene, toluene, p-xylene)를 동시에 함유한 실린더와 styrene 표준가스를 단독으로 함유한 실린더(모두 20 ppm의 등농도)를 각각 사용하였다. 본 연구에서는 목적에 따라, 이들 ppm농도의 원표준가스를 한 단계의 희석을 통해, 최종적으로 사용하고자 하는 4가지 농도대(4, 8, 20, 40 ppb)의 작업용 표준가스로 곧 바로 조제하였다(이들 농도는 벤젠

Table 1. The total amount of VOC loaded into the system for the derivation of calibration data sets is computed by considering the total volume loaded and the transferred standard concentration

Order	Initial concentration of VOC standard		Time (min)	Total amount				mean \pm deviation	
	(ppb)	Point		pmol	ng				
			All	Benzene	Toluene	p-xylene	Styrene	All	
1		1	5	16.3	1.27	1.47	1.73	1.70	1.55 \pm 0.20
2	4	2	10	32.7	2.55	2.94	3.46	3.40	3.10 \pm 0.40
3		3	15	49.0	3.82	4.41	5.19	5.10	4.65 \pm 0.59
4		1	2.5	16.3	1.27	1.47	1.73	1.70	1.55 \pm 0.20
5	8	2	5	32.7	2.55	2.94	3.46	3.40	3.10 \pm 0.40
6		3	7.5	49.0	3.82	4.41	5.19	5.10	4.65 \pm 0.59
7		1	1	16.3	1.27	1.47	1.73	1.70	1.55 \pm 0.20
8	20	2	2	32.7	2.55	2.94	3.46	3.40	3.10 \pm 0.40
9		3	3	49.0	3.82	4.41	5.19	5.10	4.65 \pm 0.59
10		1	0.5	16.3	1.27	1.47	1.73	1.70	1.55 \pm 0.20
11	40	2	1	32.7	2.55	2.94	3.46	3.40	3.10 \pm 0.40
12		3	1.5	49.0	3.82	4.41	5.19	5.10	4.65 \pm 0.59

*All VOC are loaded at a fixed flow rate of 20 mL/min

기준으로 할 경우, 각각 12950, 25900, 64750, 129510 $\mu\text{g/L}$ 에 해당한다.). 이들 작업용 표준가스의 희석조제는 10 L짜리 Tedlar bag(Polyvinyl fluoride)에 초순수 N_2 가스와 정해진 양의 표준가스를 가스타이트 주사기(gas tight syringe)로 혼합희석하는 방식으로 준비하였다.

2.2. 분석시스템의 구성 및 검량방식의 설정

단계별로 조제한 VOC 표준가스의 검량 및 비교분석을 위해, 가장 보편적인 GC/FID(Model 3400 Varian, USA) 검출시스템을 분석에 활용하였다. 그리고 저농도 시료의 분석을 위해, AS/TD를 조합한 극미량 분석기법을 적용하였다. 이들 분석시스템을 이용하여 수 ppb 농도대의 VOC 성분들에 대한 검량곡선을 도출하고자 하였다. 이 때, 작업용 표준가스의 초기농도 차이가 검량특성에 미치는 영향을 조사하기 위해, 다음과 같은 방식으로 비교분석을 하였다. 우선 Table 1에 제시한 바와 같이, 총 4가지 농도대의 작업용 표준가스를 함유한 각각의 Tedlar Bag을 각각 개별적으로 AS/TD 시스템에 연결하여 검량선을 도출하였다. 이들 검량자료를 이용하여, 이들 표준시료의 농도 크기 차이가 검량선의 경향성에 어떻게 영향을 미치는가를 비교하였다.

이러한 분석을 위한 시료의 농축은 AS/TD를 통과하는 시료의 주입유속을 20 mL/min으로 고정된 상태로 유도하였다. 각각의 검량점에 해당하는 농도를 모든 표준시료마다 동일하게 일치시켜주기 위해, 각시료

의 주입시간(loading time)을 조절하였다(Table 1). 시료별 주입조건을 일정하게 유지하면서, 2차례 반복적으로 연속방식의 분석을 적용해 주는 방식으로 각각의 검량선을 확보하였다. Table 1에 제시한 바와 같이, 4가지 표준시료 모두 3개의 검량점에 해당하는 VOC의 주입량을 benzene을 기준으로 비교하면, 16.6, 33.2, 49.7 pmol에 해당한다. 이를 다시 절대질량(ng)으로 환산하면, 1.29, 2.59, 3.88 ng에 해당한다.

AS/TD시스템에 표준가스를 주입하면서, 펠티어쿨러(Peltier cooler)로 cold trap의 온도를 -10°C 로 유지하는 조건에서 VOC의 저온농축을 유도하였다. 이런 과정을 통해, 저온농축이 이루어진 시료는 다시 열탈착과정을 유도하였다. 탈착이 이루어진 VOC 성분들은 GC column(DB-VRX(Length: 60 m, ID: 0.32 mm, Film thickness: 1.8 μm , J&W))으로 전달하였다. 이들 성분은 다시 GC/FID 시스템의 정상적인 운용방식에 따라 분리검출이 이루어졌다. 본 연구에 활용한 GC/FID시스템의 검출한계는 benzene 0.26 ng, toluene 0.25 ng, p-xylene 0.21 ng, styrene 0.32 ng의수준을 유지하였다(Table 2).

3. 결과 및 고찰

3.1. 성분별 농도차이에 따른 검량선 기울기의 변화 경향 비교

Table 3에는 Tedlar Bag에 조제한 각각의 작업용 표

Table 2. The detection limit of VOC for the GC/FID measurement system used in this study*

	Detection limit			
	Benzene	Toluene	Xylene	Styrene
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.44	0.41	0.35	0.53
ppb	0.14	0.11	0.08	0.12
$\mu\text{g C}/\text{m}^3$	0.41	0.38	0.32	0.49
ppb C	0.83	0.76	0.65	1.00
ng	0.26	0.25	0.21	0.32

*All experiments are conducted at a fixed flow rate of 40 mL/min for the total duration of 15 min

준가스를 GC와 결합한 AS/TD시스템으로 분석한 결과를 제시하였다(Table 3). Table 3의 자료를 사용하여 검량한 결과를 제시한 Table 4를 보면, 초기농도의 크기에 따라, 검량결과의 차이가 어느정도 영향을 받는다는 것을 알 수 있다(Table 4). 그러나 대체로 그 차이가 아주 작아서, 검량기울기가 거의 일치하는 수준이란 것을 확인할 수 있다. Table 4B에는 본 분석시스템의 기본적인 분석변수들을 평가할 수 있는 통계량들을 동시에 제시하였다. 모든 농도대의 검량기울기를 취합하여, 상대표준오차를 구하였다. 그 결과, Benzene 2.01%, Toluene 4.17%, p-Xylene 1.84%, Styrene 1.69%로 나타났다. 이와 같이 상대표준오차는 본 실험에서 설정한 모든 성분에서 4%대 이하로, 각 성분별 검량결과의 재현성이 양호하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 실험에서 설정한 4~40 ppb 수준의 표준가스를 분

Table 3. Calibration results of VOC standard gases made at 4 different concentrations are compared in terms of integrated peak area*

Order	quantity	Absolute Peak Area											
		1st run				2nd run				Average			
		pmol	Benzene	Toluene	p-xylene	Styrene	Benzene	Toluene	p-xylene	Styrene	Benzene	Toluene	p-xylene
1	16.3	60,958	73,191	62,853	42,885	59,548	55,869	62,166	38,193	60,253	64,530	62,509	40,539
2	32.7	122,057	141,686	111,164	83,907	121,846	119,290	103,272	88,912	121,952	130,488	107,218	86,410
3	49	189,385	189,477	160,754	120,118	174,322	174,191	159,429	128,029	181,854	181,834	160,091	124,074
4	16.3	57,948	55,879	46,553	39,358	54,606	44,996	50,626	35,386	56,277	50,437	48,590	37,372
5	32.7	124,405	130,503	121,742	84,825	106,175	96,305	106,935	75,430	115,290	113,404	114,339	80,128
6	49	161,449	159,557	165,223	124,721	177,029	166,769	172,750	118,357	169,239	163,163	168,987	121,539
7	16.3	50,250	50,752	40,317	26,103	51,962	58,923	51,723	42,600	51,106	54,837	46,020	34,351
8	32.7	111,316	125,763	92,135	73,742	112,088	129,258	111,371	84,290	111,702	127,511	101,753	79,016
9	49	174,911	198,633	156,469	118,512	166,885	185,961	171,568	128,682	170,898	192,297	164,019	123,597
10	16.3	51,766	45,445	39,092	26,103	46,242	53,616	50,498	42,600	49,004	49,531	44,795	34,351
11	32.7	118,653	133,999	113,541	76,112	93,776	131,717	113,184	70,963	106,215	132,858	113,362	73,538
12	49	181,199	219,625	174,783	119,987	163,324	196,127	181,271	118,412	172,262	207,876	178,027	119,200

*For all sample loading conditions and the corresponding amount of analytes

Table 4. Comparison of calibration slopes obtained using standards prepared at four different concentrations
A. Calibration slope value

Order	concentration (ppb)	Calibration slope			
		Benzene	Toluene	p-Xylene	Styrene
1	4	3662	3735	3296	2406
2	8	3419	3288	3413	2509
3	20	3392	3803	3228	2514
4	40	3354	4026	3506	2614

B. Correlation coefficient of calibration slopes

Order	concentration (ppb)	r			
1	4	0.9999	0.9920	0.9953	0.9984
2	8	0.9998	0.9958	0.9972	0.9987
3	20	0.9978	0.9934	0.9958	0.9943
4	40	0.9935	0.9890	0.9858	0.9940
Average		0.9978	0.9926	0.9935	0.9964

C. Relative standard error (RSE) of VOC derived using their calibration slopes

Order	RSE(%)			
	Benzene	Toluene	p-Xylene	Styrene
Average	3457	3713	3361	2511
SD	139	309	124	85
SE	70	155	62	42
RSE(%)	2.01	4.17	1.84	1.69

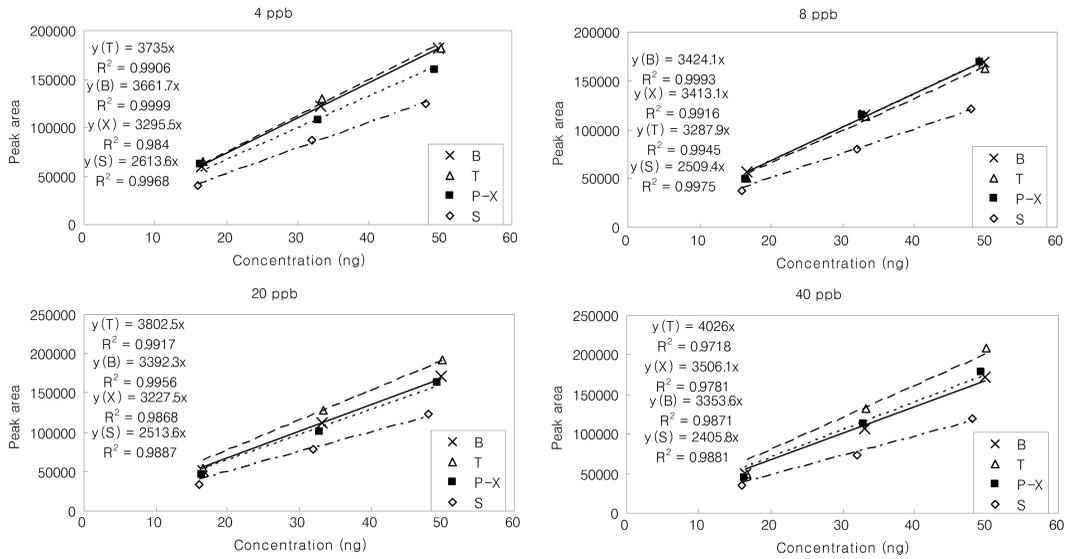


Fig. 1. Comparison of the same data sets shown in terms of 4 concentration values. In each Fig., calibration results are compared across 4 different chemicals with short names of B, T, p-X, and S. Correspond to benzene, toluene, p-xylene, and styrene, respectively.

석했을 때, 초기농도에 상관없이 검량특성이 상당히 유사하다는 것을 알 수 있다. Table 4C에는 Table 4A에 제시한 검량선의 직선성을 확인해 보았다. 그 결과, 3가지 성분(benzene, toluene, p-xylene)에서 모두 상당히 양호한 직선성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 그러나 styrene의 경우 다른 성분들에 비해 직선성이 다소 떨어지는 것으로 나타났다.

Fig. 1에는 표준시료의 농도대별로 구분하여 결과를 제시하였다(Fig. 1). 따라서 Fig. 1은 동일 농도대에서 비교대상 성분들간의 경향성을 동시에 비교할 수 있다. 이러한 비교를 통해, 백 내부에 동시에 존재하는 성분들간 검량기울기의 상대적 및 절대적 관계를 평가하는 것이 가능하다. 이러한 비교에 의하면, 성분들간의 기울기 값에 비교적 뚜렷하게 규칙적인 경향성이 존재하는 것을 확인할 수 있다. Benzene, toluene, p-xylene의 결과를 보면, toluene이 가장 큰 기울기를 보인다. 그러나 대체로 이들 3성분 사이의 그 검량기울기 순위의 상대표준오차 값이 5% 이내로 비슷한 크기의 기울기 값을 유지하는 것으로 나타났다. 반면, styrene은 초기농도가 다른 4개의 백 모두에서 예외없이, 다른 성분들에 비해 기울기 값이 약 28.4% 정도 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

스티렌의 특이한 경향성을 좀 더 명확하게 확인하기 위해, 기울기의 절대값들을 초기표준시료의 농도에

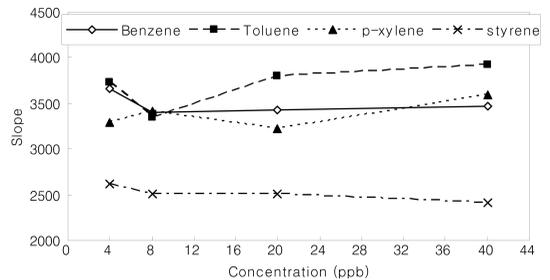


Fig. 2. The variation patterns of VOC calibration slope values as a function of working standard concentration.

대한 함수로 비교해 보았다(Fig. 2). 이러한 비교결과에 의하면, toluene의 기울기 값들이 여타성분들에 비해 감도가 다소 높다는 것을 확인할 수 있다. 특히, styrene의 경우 Fig. 2에서 보는 바와 같이, 기울기 값이 다른 성분들에 비해 낮다는 것이 확연하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이미 여러가지 선행연구들을 통해, 용기내부에 분석대상물질들이 흡착, 손실 또는 반응에 의해 변화할 수 있다는 특성을 파악한 바 있다.¹¹ 그리고 그러한 현상은 고분자 성분에서 손실이 더 크게 나타난다는 것이 잘 알려져 있다.

본 연구 결과에 의하면 저온응축 열탈착 시스템을 사용하여, Tedlar Bag으로 조제한 표준가스를 분석할 경우, styrene성분의 손실이 보다 크게 발생한다는 점

을 확인할 수 있다. 특히 benzene, toluene, p-xylene 성분보다 styrene 성분이 상대적으로 고분자 물질이란 점을 감안할 때, 주요 악취성분에 해당하는 styrene의 정도관리가 보다 쉽지 않다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

일반적으로 저농도 환경시료의 VOC물질들에 대한 분석을 위해, 시료의 채취 또는 표준시료의 조제에 Tedlar bag을 많이 활용하고 있다. 본 연구에서는 Tedlar Bag을 이용하여 작업용 표준시료를 희석조제하고, 이를 다시 열탈착 시스템을 조합시킨 GC/FID 시스템으로 분석하였다. 이러한 방식으로 기체상 VOC 표준시료를 검량함으로써, 희석조제방식으로 준비한 표준시료의 분석오차로부터 발생가능한 분석오차의 특성을 평가하고자 하였다. 특히, Tedlar bag과 같이 용기에 희석을 적용하여 준비한 VOC 표준시료의 농도차가 VOC의 검량에 어떻게 영향을 미치는가를 파악하고자 하였다. 또한 TD를 이용한 농축분석시스템의 운용이 이러한 검량인자의 변화에 어떻게 간여하는지도 동시에 조사하고자 하였다.

본 연구의 조사결과에 의하면, 일반적으로 저농도 VOC의 분석에 주로 사용하는 4~40 ppb 수준으로 조제한 BTX 성분들을 포함하는 표준가스의 초기농도가 검량결과에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 결과적으로 연구대상으로 설정한 농도 범위대에서는, BTX류의 검량결과가 표준시료의 초기농도에 영향을 받지 않고 일정한 검량특성을 유지한다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 benzene, toluene, p-xylene, styrene의 4 가지 성분들의 검량특성을 비교한 결과, 보다 고분자화합물인 styrene에서 상대적으로 감도가 떨어지는 차별화 경향을 확인할 수 있었다. 특히 styrene의 감도저하를 감안할 때, Tedlar bag이나 분석기기의 내부 표면에 흡착, 손실, 내부오염 등의 가능성이 상대적으로 크다고 추정할 수 있다. 이와 같은 문제의 소지를 줄여주기 위해서는, 여러 가지 시료의 손실요인을 정밀하게 분석하고, 그에 대한 방지책 또는 현재 방식의 보정인자를 확보하기 위한 연구가 필

요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행하였습니다 (KRF-2005-201-C00045).

참고문헌

1. F. I. Khan and A. Kr. Ghoshal, *Loss prevention in the process industries*, **13**, 527-545 (2000).
2. S. G. Brown, A. Frankel, H. R. Hafner, *Atmospheric Environment*, **40**(34), 6666-6675 (2006).
3. K. D. Oliver, J. R. Adams, E. H. Daughtrey, W. A. McClenny, M. I. Yoong M. A. Pardee, *Atmospheric Environment*, **30**(15), 2751-2757 (1996).
4. U. Vogt, A. Dreiseidler, G. Baumbach, R. Kurtenbach, M. Petra, M. Kohler, U. Corsmeier, *Atmospheric Environment*, **39**(32), 5642-5664 (2005).
5. B. Tolnai, J. Hlavay, D. Moller, H. J. Prumke, H. Becker M. Dostler, *Microchemical Journal*, **67**(1-3), 163-169 (2000).
6. B. M. Broderick, I. S. Marnane, *Atmospheric Environment*, **36**(6), 975-986 (2002).
7. K. H. Kim, *Environmental engineering science*, **21**(2), 181-194 (2004).
8. S. Beghi, J. M. Guillot, *Journal of chromatography A*, 1127, 1-5 (2006).
9. M. Cazaplicka, K. Klejnowski, *Journal of chromatography A*, **976**, 369-376 (2002).
10. 김영민, 박상근, 백성욱, *한국대기보전학회지*, **12**(1), 365-368 (1996).
11. 백성욱, 황승만, 박상근, 전선주, 김병주, 허귀석 (1998) 흡착포집/열탈착에 의한 VOC 측정방법론 평가(2)-실험실간의 분석정확도, 한국대기환경학회 학술대회 논문집, 제1권, 99.