

공기 중 휘발성 유기화합물의 측정을 위한 열탈착-분석시스템의 구성 및 평가

이 수 형, 송 희 남, 김 희 갑^{1,*}

(주)도남인스트루먼트 기술연구소.
¹강원대학교 자연과학대학 환경과학과

Composition and Evaluation of the Thermal Desorption-Gas Chromatographic System for the Measurement of Volatile Organic Compounds in Air

Soohyung Lee, Heenam Song and Hekap Kim^{1,*}

Technical Research Institute, Donam Instrument, Inc., Seongnam, Kyonggi Do 462-838, Korea,
¹Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon,
Kangwon Do 200-701, Korea

ABSTRACT

The thermal desorption-gas chromatographic (TD-GC) system has been constructed for the measurement of volatile organic compounds. The thermal desorption unit is composed of four major parts: 1) the control part; 2) the thermal desorption part; 3) the focusing part; and 4) the injection part. The peltier element was introduced to the focusing part for the temperature of the focusing tube to reach -35°C . The system was tested for the linearity of the calibration curves and reproducibility of instrumental analyses using some disinfection by-products (DBPs) and BTXs (benzene, toluene and *p*-xylene). The coefficients of determination (r^2) for all the calibration curves made were higher than 0.998, and the coefficients of variation (CV) for triplicate measurements were all within 10%. The system also has been tested for field applicability. The analysis of field samples showed that there was no breakthrough problem in the sampling system and that the system could be applied to field measurements.

Key words : Thermal desorption, Volatile organic compounds, Peltier element, Disinfection by-products

서 론

휘발성 유기화합물 (Volatile Organic Compounds: VOCs)은 음용수의 소독과정, 자동차 및 공장의 배기가스, 화석연료 및 나무의 연소 등 다양한 경로를

통해 대기 중으로 배출된다(Schauer and Kleeman, 2001; Schifter *et al.*, 2000). 이러한 VOCs는 인체에 흡입되어 급성 및 만성적인 악영향을 유발할 뿐만 아니라, 광화학반응을 통해 오존을 생성하는 전구물질로 작용하기도 한다. 따라서 VOCs에 대한 관심과 중요성이 점차 증가하고 있지만, 이러한 화합물들은 공기 중에 미량으로 존재하는데다가 그 종류도 매우 다양하여 시료의 채취 및 분

* To whom correspondence should be addressed.

Tel: 033-250-8577, E-mail: kimh@kangwon.ac.kr

석이 쉽지 않아 관련된 연구를 수행하는데 어려움이 뒤따르고 있다. 이러한 상황 하에 국내에서는 최근에 들어 VOCs의 측정에 관한 연구가 활발하게 수행되고 있다(백성욱, 1996; 허귀석과 김병조, 1998; 전준민 등, 2001).

공기 중 VOCs를 채취하는 방법에는 일정한 부피를 갖는 스테인리스 재질의 용기 (canister)에 채취하는 방법(용기 채취법)과 스테인리스 재질의 가는 관에 Tenax, Carbotrap 등의 흡착제 (adsorbent)를 채운 후 펌프를 사용하여 채취하는 방법(흡착관 채취법)이 있다. Canister를 사용할 경우 채취 후 시료가 안정하고 분석시 회수율이 높다는 장점이 있지만, 초기에 장치를 꾸미는데 비용이 많이 소요되고 용기 내부가 오염될 수 있다는 단점이 있다. 반면에, 흡착관 채취법은 비교적 장치가 간단하고 비용이 적게 들지만 시료 채취시 돌파 (breakthrough) 부피를 고려하여 흡착제의 종류와 양을 결정해야 하며, 또한 화합물에 따라 채취 효율이 일정하지 않다는 단점이 있다. 따라서 각 채취법은 나름대로의 장단점을 가지고 있기 때문에 채취 장소, 대상 화합물의 특성, 기상 조건, 연구목적 등을 고려하여 적당한 채취 방법을 선택해야 한다.

이 중에서 흡착관 채취법에 대해 일부 연구자들은 흡착관에 충전되는 흡착제의 종류에 따른 채취 효율, 시료채취 후 화합물의 안정성, 최대 공기 채취량 등에 관한 연구를 수행하였다(Rothweiler *et al.*, 1991; Cao and Hewitt, 1993; Pierini *et al.*, 1999). 회수율(탈착 온도에 따른 탈착 효율)에 관한 연구에 따르면 Tenax TA는 BTXs에 대해 180°C 이상에서 탈착시킬 경우 100%의 회수율을 나타내는 것으로 보고되었다(Cao and Hewitt, 1993). 또한 새로운 흡착제를 개발하고 보다 나은 시료 채취 방법을 모색하기 위해 흡착제들간의 성능을 비교하기도 하였다(Rothweiler *et al.*, 1991).

흡착관을 사용하여 시료를 채취한 후 탈착시켜 분석하고자 하는 기기로 주입하는 과정은 매우 중요한 부분을 차지한다. 일반적으로 흡착제로부터 분석물질을 탈착하기 위해서는 CS₂와 같은 용매를 사용하여 추출하거나(용매 추출) 헬륨이나 질소와 같은 기체를 흘려주면서 가열(열탈착)한다. 전자의 경우 용매에 의해 희석되어 낮은 농도로 존재하는 화합물에 대해서는 적합하지 않은

반면에, 후자의 방법은 열에 의해 흡착관에 존재하는 전량의 화합물이 탈착되어 높은 감도로 분석이 가능하지만 시료 처리 중 오류가 발생할 경우에는 시료 전체를 잃어버릴 수 있다는 단점을 가지고 있다. 이 중에서 후자의 방법이 일반적으로 더 널리 사용되고 있으며, 몇몇 회사들(Perkin-Elmer, Supelco, Tekmar, Alltech 등)에 의해 시판되고 있다. 미국 EPA Method TO-17에서는 채취된 시료를 열탈착(1차 탈착)시켜 저온트랩에 농축시킨 후에 이를 다시 빠른 속도로 가열(2차 탈착)하여 GC와 같은 분석 장치로 주입하여 분석하는 과정을 설명하고 있다(U.S. EPA, 1997).

열탈착된 분석물질이 기기로 주입되기 이전에 농축하는 과정도 또한 매우 중요하다. 이를 위해서는 저온으로 냉각되는 매질(주로 Tenax TA와 같은 흡착제가 소량 충전된 흡착관)을 사용하는 데, 냉각을 위해 액체 질소나 드라이아이스를 사용하는 방법은 취급하기가 다소 어렵고 비용이 많이 소요되는 반면에, 펠티어(peltier) 소자를 이용하는 전자 냉각 방식은 반영구적이고 경제적이면서 효과적으로 저온 농축시킬 수 있는 장점이 있다. 그렇지만, 아직 국내업체에서는 이와 같은 열탈착시스템을 개발하여 생산, 판매하고 있지 않기 때문에, 국내의 대부분의 연구자들은 많은 비용을 들여 이와 같은 시스템을 외국으로부터 수입하여 사용하고 있는 실정이다.

이러한 국내의 상황에 비추어 저온 농축부에는 펠티어 냉각 소자를 사용하고 주입부에서는 급속 가열 방식을 채택한 열탈착장치를 구성한 후 기체 크로마토그래프(GC)와 연결하여 열탈착-분석 시스템을 제작한 후 현장 적용 가능성에 대하여 평가하였다. 분석 대상 화합물로는 휘발성 염소소독부산물(chlorination by-products: CBPs) 중 chloroform (CF), bromodichloromethane (BDCM), dichloroacetonitrile (DCAN), 1, 1-dichloropropanone (DCP) 및 1, 1, 1-trichloropropanone (TCP)을, BTXs 중에서는 benzene, toluene 및 *p*-xylene를 선정하였다.

재료 및 방법

1. 시약 및 재료

시험 대상 화합물로 선택한 화합물들 중에서

benzene과 toluene은 Katayama에서, *p*-xylene과 CF는 Junsei Chemical에서, BDCM은 Fluka에서, DCAN과 DCP는 Aldrich Chemical에서, 그리고 TCP는 Supelco에서 구입하였으며 모두 정제하지 않고 사용하였다. 시스템의 성능 평가 및 현장 시료의 채취를 위해 흡착제로서 Tenax TA (60/80 mesh, Supelco) 0.20 g을 외경 1/4 inch, 길이 10 cm의 스테인리스 재질의 튜브에 넣고 유리솜과 스프링을 차례대로 넣은 후 Swagelok®사의 캡을 사용하여 막아주어 흡착관을 제작하였으며, 테플론 재질로 된 ferrule을 사용하여 별도의 도구 없이 손으로 캡을 풀고 조일 수 있도록 하였다.

2. 열탈착-분석시스템의 구성

열탈착장치 (Thermal Desorption Unit: TD)는 가열 온도 및 시간을 제어하는 제어부, 흡착관에 함유된 시료를 탈착시키는 시료 탈착부, 탈착된 시료를 저온에서 농축시키는 저온 농축부, 그리고 농축된 시료를 재탈착시켜 기체 크로마토그래프 (Gas Chromatograph: GC)로 도입하는 주입부로 구성되었다 (Fig. 1).

이 열탈착-분석시스템은 다음과 같은 일련의 과정으로 작동되었다. 시료 탈착부에 흡착관을 장착한 후 고순도의 He 가스를 약 30 ml/min의 유속으로 흘려주면서 250°C의 온도에서 10분 동안 가열하면 분석물질은 탈착되어 저온 농축부로 이동하게 된다. 저온 농축부에는 액체 질소를 사용하여

는 대신에 표면의 온도가 -35°C까지 냉각 가능한 peltier 소자가 사용되었으며, 시료 분석시 저온 트랩의 실제 온도는 -30°C 정도로 유지되었다. 저온 트랩 (focusing trap)은 700°C/min의 빠른 속도로 240~280°C까지 5분 동안 가열되고 이 과정에서 분석물질은 다시 탈착되어 GC로 주입됨으로써 분리, 분석되었다. 저온 트랩으로는 내경 1/8인치의 스테인리스 재질로 된 튜브에 15 mg의 Tenax TA(60-80 mesh)를 충전하여 사용하였다. Fig. 2는 열탈착-분석시스템의 실물 사진이다

열탈착장치로부터 도입된 분석 시료는 기체 크로마토그래프 (DS 6200 Gas Chromatograph, 도남인스트루먼트)로 분리된 후에, BTXs를 검출하기 위해 FID (도남인스트루먼트)가, 그리고 CBPs를 검출하기 위해서는 PDECD (Pulsed Discharge Electron Capture Detector, Valco)가 사용되었다. 분리용 칼럼으로는 길이 30 m(내경 0.25 mm, 필름 두께 1.0 μm)의 DB-624 (J & W Scientific) 모세관 칼럼이 사용되었다. 구성된 열탈착-분석시스템을 사용하여 분리, 분석된 조건은 Table 1에 요약하여 나타내었다.

3. 표준가스 및 표준시료의 제조

CBPs 및 BTXs 각각의 혼합 표준가스는 2리터 용량의 정적 희석 용기 (static dilution bottle, Supelco)에 제조하였다 (Fig. 3). 액체상의 각각의 표준물질을 10 μl의 마이크로시린지를 사용하여 일정한

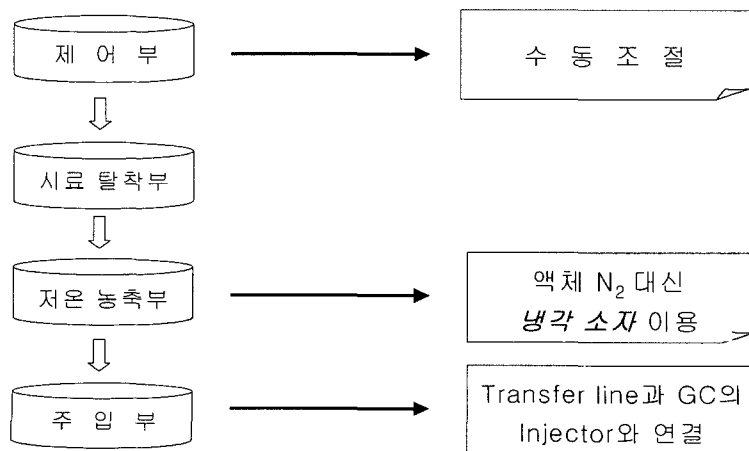


Fig. 1. A schematic diagram of the thermal desorption unit.

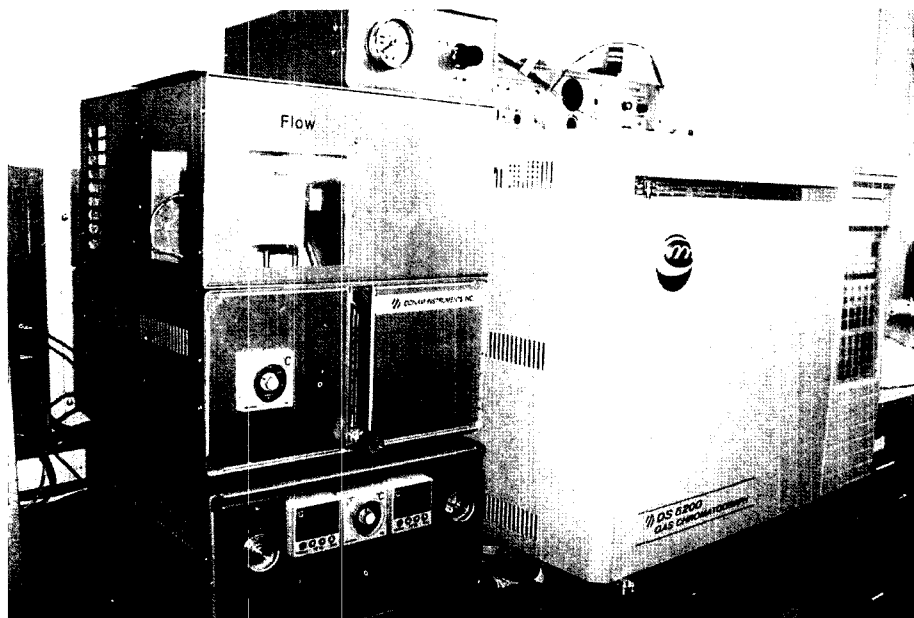


Fig. 2. The photo of the thermal desorption (left)-gas chromatographic (right) system. The thermal desorption unit is composed of four major parts: 1) the control part; 2) the thermal desorption part; 3) the cryofocusing part; and 4) the injection part. The desorbed VOCs are transferred into the GC injection port through the 1/16" stainless steel tubing.

Table 1. Operating conditions of the thermal desorption-gas chromatographic system

Thermal desorber	Trap desorption	Gas (He) flow rate: 30 ml/min Temperature (duration): 250°C (10 min)
	Cryofocusing/Injection	Focusing trap temperature: -28 ~ -33°C Gas (He) flow rate: 50 ml/min Sample injection temperature (duration): 260°C (5 min)
Gas chromatograph	Column	Capillary DB-624 (30 m × 0.25 mm × 1.0 μm) Flow rate: ~1.0 ml/min
	Oven temperature programming	CBPs: 70°C (8 min) → 30°C/min to 240°C (12 min) - 29.67 min BTXs: 50°C (7 min) → 10°C/min to 120°C → 30°C/min to 250°C (4 min) - 22.33 min
	Injector temperature Detector temperature Split ratio	200°C FID: 250°C, PDD: 280°C BTXs 1:10, CBPs 1:20

부피씩 취해 용기에 넣은 후 용기를 맨틀을 이용하여 150°C 정도에서 1시간 동안 가열하여 표준 물질을 기화시켰다. 약 50°C 정도로 용기를 식힌 후에 gas-tight syringe (Hamilton)에 일정한 부피를 취하여 120°C 정도로 가열되고 있는 500 ml 용량의 gas sampling bulb에 septum을 통해 주입하였다. 이 때 고순도의 질소 가스를 250 ml/min의 유

속으로 5분 동안 흘려주어 주입된 표준가스들이 흡착관에 흡착되도록 장치하였다.

4. 열탈착-분석시스템의 성능 평가 및 현장의 적용

제작된 시스템을 현장에 적용할 수 있는지를 시험하기 위해 실험실에서 검량선의 직선성 및

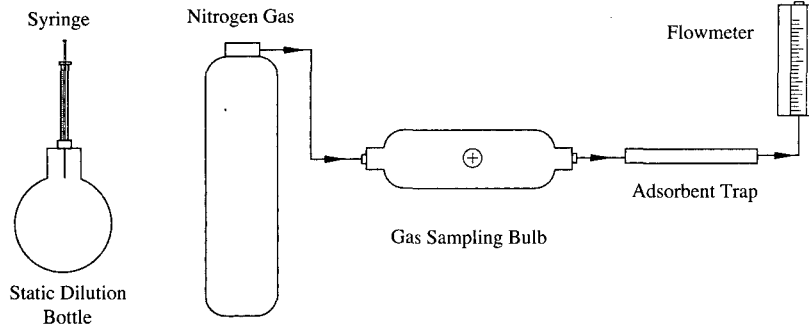


Fig. 3. The apparatus for preparing standard gases and standard adsorbent traps. The static dilution bottle was heated at about 150°C for the evaporation of liquid standard compounds. Gaseous compounds were then transferred into the hot (120°C) gas sampling bulb using the gas-tight syringe. Zero grade nitrogen gas (250 ml/min) continuously flowed to move the introduced gaseous standard compounds into adsorption tubes.

재현성에 대하여 시험한 후에, 현장에서 소수의 시료를 채취, 분석하여 현장에의 적용 가능성을 검토하였다. 검량선은 최소 세 점에서부터 최대 여섯 점까지를 이용하여 작성하였고, 재현성은 같은 수준의 시료를 세 개씩 준비한 후 반복 분석하여 얻은 크로마토그램의 피크 면적에 대한 변동계수(CV)를 계산하여 평가하였다.

현장 시료는 춘천에 위치하고 있는 17 가정을 방문하여 실내 공기를 채취하여 CBPs에 대해 분석하였고, BTXs는 실외 공기를 채취하여 분석하였다. 공기 시료를 채취하기 위해 휴대용 개인 펌프(Pocket Pump, SKC)를 사용하였으며, 펌프와 흡착관 사이에는 Tygon® tubing으로 연결하였다. 가정의 공기는 100 ml/min의 유속으로 약 30분 동안 채취하였고(공기 부피 약 2리터), 실외 공기는 20 ml/min의 유속으로 약 12시간 동안(공기 부피 약 14.4리터) 채취하였다. 또한, 시료 채취 동안에 breakthrough (돌파) 문제가 있는지 점검하기 위하여 두 차례에 걸쳐 두 개의 흡착관을 나란히 연결한 후 시료를 채취하여 평가하였다.

결과 및 토의

1. 검량선

표준가스를 gas-tight syringe로 취하여 흡착관 표준시료를 제조한 후에 열탈착-분석시스템으로 분석한 결과, 네 종류의 휘발성 CBPs인 CF, DCAN,

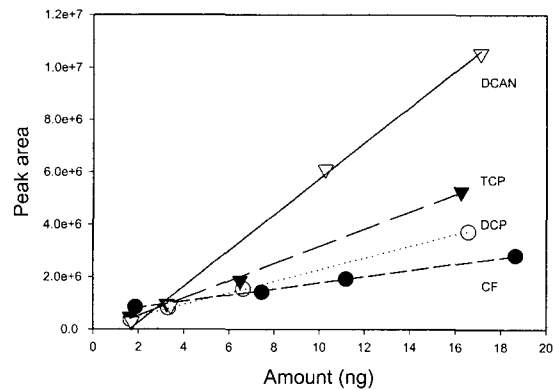


Fig. 4. Linearity of calibration curves for chloroform (CF), dichloroacetone (DCAN), 1,1-dichloropropanone (DCP), and 1,1,1-trichloropropanone (TCP). The coefficients of determination (r^2) for all the tested compounds were higher than 0.998.

DCP 및 TCP에 대한 검량선의 결정계수(r^2)는 각각 0.9978, 0.9994, 0.9995, 0.9990으로 모두 0.998 이상의 좋은 직선 관계를 나타내었다(Fig. 4).

또한, 위와 같이 표준물질을 부피가 일정한 용기에 가스상의 형태로 제조하는 대신에 EPA의 TO-17 method에서 언급하고 있는 액체 표준용액을 제조하여 시험하였다. 즉, methanol에 각각의 표준물질을 일정한 양씩 가하여 여러 수준을 갖는 표준용액을 별도로 만든 후에 각 수준별로 11씩 주사기로 취하여 약 120°C 정도로 가열되고

있는 gas sampling bulb에 가하여 흡착관 표준시료를 준비한 후에 제작된 시스템으로 분석하였을 경우에도 위와 유사한 결과를 나타내었다. 따라서 표준가스를 제조하지 않고도 표준물질의 methanol 용액을 만든 후 흡착관 표준시료를 제조하여 검량선을 작성하는 것은 또 다른 방법이 될 수 있다는 것을 알 수 있었다. 이는 methanol이 극성 용매이기 때문에 비극성을 갖는 Tenax TA에 아주 미량만이 흡착되기 때문이라고 할 수 있다.

BTXs에 대한 검량선은 여섯 점을 가지고 작성하였는데, benzene, toluene 및 *p*-xylene에 대하여 결정계수(r^2)가 각각 0.9991, 0.9995, 0.9991로 세 종의 화합물에 대해 모두 아주 좋은 직선의 관계를 나타내었다(Fig. 5).

또한, 한 번 분석이 종료된 흡착관을 다시 분석하였을 때 얻은 크로마토그램에서는 분석물질 뿐만 아니라 다른 피크가 거의 관찰되지 않아 시료

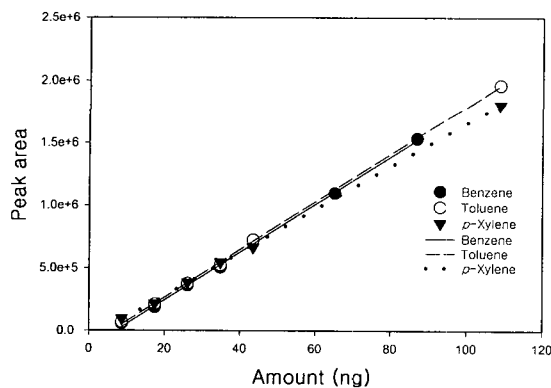


Fig. 5. Linearity of calibration curves for benzene, toluene, and *p*-xylene. The coefficients of determination (r^2) for the three tested compounds were higher than 0.999.

탈착부 및 저온 농축부에서의 탈착은 거의 완전히 일어난다는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과로 미루어 볼 때 이 연구에서 선택한 흡착제인 Tenax TA (60/80 mesh)는 두 가지 그룹의 화합물들에 대해 좋은 흡착 및 탈착 효율을 가지고 있고 따라서 검량선도 아주 양호하게 작성될 수 있음을 알 수 있었다.

2. 재현성

구성한 열탈착-분석시스템의 재현성을 휘발성 CBPs 및 BTXs에 대하여 시험하였다.

CBPs에 대해서는 표준물질 CF, DCAN, DCP 및 TCP 약 7 ng을 Fig. 3의 장치를 이용하여 흡착관에 흡착시켜 총 3개의 시료를 제조한 후 구성한 시스템으로 분석하여 얻어진 크로마토그램의 피크 면적에 대한 변동계수를 계산하였으며, 각 화합물에 대해 10.0, 7.2, 9.7 및 8.2%로 비교적 양호하였다(Table 2).

BTXs에 대한 재현성 시험은 두 가지 수준으로 나누어 실시하였다. 각각에 대해 3회에 걸쳐 반복 분석하여 얻어진 크로마토그램의 피크 면적에 대해 변동계수를 계산한 결과 0.96~8.2%의 범위에 있는 것으로 계산되었다(Table 3).

이와 같은 결과로 미루어 볼 때 흡착관 표준시료를 만드는 과정과 제조된 표준물질을 분석하는 열탈착-분석시스템은 비교적 양호한 재현성을 가지고 작동된다는 것을 알 수 있었다.

3. 현장에의 적용을 통한 평가

1) 시료 채취 효율

현장에서 두 개의 흡착관을 나란히 연결한 후 펌프를 사용하여 공기를 채취한 후에 각 시료를 분석

Table 2. Reproducibility of the thermal desorption-gas chromatographic system based on the coefficients of variation (CV) of the peak areas obtained from the analysis of three adsorbent traps containing specific amounts of chloroform (CF), dichloroacetonitrile (DCAN), 1,1-dichloropropanone (DCP), and 1,1,1-trichloropropanone (TCP)

No	Chloroform	Dichloroacetonitrile	1,1-Dichloropropanone	1,1,1-Trichloropropanone
	7.5 ng	6.8 ng	6.6 ng	6.5 ng
1	1379851	1512130	1013649	1887957
2	1254415	1711937	1228094	1695829
3	1128136	1722645	1093802	1610552
CV (%)	10.0	7.2	9.7	8.2

Table 3. Reproducibility of the thermal desorption-gas chromatographic system based on the coefficients of variation (CV) of the peak areas obtained from the analysis of adsorbent traps containing specific amounts of benzene, toluene and *p*-xylene

No	Benzene		Toluene		<i>p</i> -Xylene	
	65.8 ng	219.3 ng	65.0 ng	216.5 ng	64.7 ng	215.5 ng
1	1098465	2956720	1057961	2771930	874973	3214362
2	965675	3273544	1071698	3273544	1030949	2933460
3	1090063	3397168	1077941	3397168	959741	3208894
CV (%)	7.1	5.7	0.96	7.1	8.2	5.2

하여 휘발성 CBPs 및 BTXs에 대한 채취 효율을 아래의 식에 의해 계산하여 평가하였다(Scobbie and Groves, 1998).

$$\text{Breakthrough (\%)} = \frac{\text{Peak area counts (backup tube)}}{\text{Peak area counts (front tube + backup tube)}} \times 100$$

모든 분석대상 CBPs는 앞의 흡착관에서만 검출되고 뒤의 흡착관에서는 피크가 발견되지 않은 반면에, BTXs는 뒤의 흡착관에서 일부 검출되어 위의 식에 의해 통과 정도를 계산할 때 낮은 2.5~4.9%의 통과를 나타내었다. 따라서 시료 채취시 흡착관은 분석물질을 효율적으로 채취할 수 있음을 알 수 있었다.

2) 가정의 공기 중 CBPs의 농도 분포

춘천에 위치하고 있고 수도물을 사용하는 17가정을 방문하여 100 ml/min의 유속으로 약 30분 동안 공기 시료를 채취한 후 휘발성 CBPs 중에서 가장 일반적으로 많이 검출되는 다섯 가지의 화합물, 즉 CF, BDCM, DCAN, DCP 및 TCP을 대상으로 분석하였다. 이 중에서 단지 CF, BDCM 및 DCAN만이 검출되었으며, CF는 분석된 17개의 모든 시료에서, BDCM 및 DCAN은 각각 13개 및 4개의 시료에서만 검출되었다. Fig. 6는 현장 시료에 대한 전형적인 크로마토그램으로, CF, BDCM 및 DCAN의 머무름시간은 각각 5.66, 9.32 및 10.71이었다.

세 종류의 화합물들 중에서 중앙값을 기준으로 볼 때 CF의 농도가 가장 높아 0.51 µg/m³, BDCM은 그 다음으로 0.048 µg/m³이었다(Table 4). 이는 CF가 수도물 중에서 가장 농도가 높아 중앙값이 11 µg/l (3.4~14 µg/l), BDCM은 1.8 µg/l (0.70~

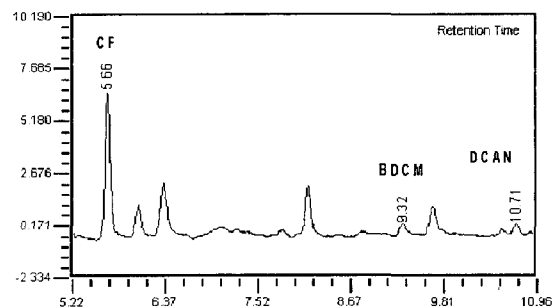


Fig. 6. A typical chromatogram showing the peaks of volatile chlorination by-products collected from the air of a home. The air was drawn into the adsorbent tube for 30 minutes at a rate of 100 ml/min. Chloroform (CF), bromodichloromethane (BDCM) and dichloroacetonitrile (DCAN) were the major constituents of volatile CBPs detected with retention times of 5.66, 9.32 and 10.71, respectively.

Table 4. Mean, median, standard deviation (SD), minimum, and maximum values (µg/m³) of chloroform, bromodichloromethane and dichloroacetonitrile measured for indoor air of 17 homes*

	Chloroform	Bromodi-chloromethane	Dichloroacetonitrile
Mean	0.85	0.14	0.11
Median	0.51	0.048	0.055
SD	0.83	0.18	0.14
Minimum	0.061	0.0060	0.027
Maximum	2.6	0.58	0.32
>DL**	17	13	4

*The three compounds listed were the major volatile CBPs found. Descriptive values were calculated based on the data alone measured above the method detection limit (approximately 0.03 ng per trap based on S/N=3).

**The number of samples in which the amount of each analyte per sorbent trap exceeds the method detection limit.

2.6 µg/l)이었으며, DCAN은 분석된 물 시료 중 단지 세 개의 시료에서만 검출되어 0.45~3.2 µg/l의 범위를 나타낸 것과 아주 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다.

이와 같은 농도 분포는 기존의 다른 연구 결과와 거의 유사한 수준을 나타내었다. 예를 들면 Weisel 등 (1999)의 연구에서 수돗물 중 CF 및 BDCM의 중앙값은 16 µg/l (범위 0.04~200 µg/l) 및 2.6 µg/l (범위 0.06~48 µg/l)이었으며, 수돗물 중 총 THMs에 따라 저농도 그룹과 고농도 그룹으로 나누었을 때 CF의 중앙값은 각각 0.20 및 1.25 µg/m³이었고, BDCM에 대해서는 각각 0.05 및 0.32 µg/m³이었다.

이와 같이 실내 공기 중의 휘발성 CBPs는 가정에서의 샤워, 세면, 요리, 설거지, 세탁 등과 같은 여러 가지 활동에서 비롯된다고 할 수 있다. 김과 이 (1999)는 국 및 찌개류 등의 요리를 수돗물을 사용하여 요리하는 것을 모사하였을 때 10분 동안의 가열에 의해 휘발성 CBPs는 대부분 공기 중으로 휘발되어 수돗물 중에서는 전혀 검출되지 않는다는 것을 보고하였다. 또한 샤워 및 목욕 과정에서 CF는 공기 중으로 배출되어 인체 내 부하를 증가시키기 때문에 (조완근, 1998; Jo *et al.*, 1990) 욕실로 배출된 CBPs는 가정 내의 거실, 침실 및 주방 등의 다른 공간으로도 확산되어 실내 공기 중의 CBPs에 기여할 것으로 예상된다. 게다가 설거지 과정에서도 CBPs가 배출될 것으로 예상된다. 이와 같은 여러 가지의 활동에 의해 증가된 실내 공기 중의 CBPs는 가정에 머무르는 동안에 호흡기를 통해 유입됨으로써 인체에 여러 가지의 악영향을 미칠 수 있으므로, CBPs에 대한 위해성평가에서는 경구섭취 및 피부접촉에 의한 노출 뿐만 아니라 이와 같은 흡입노출도 함께 포함되어 수행되어야 한다.

결 론

흡착관에 채취된 시료를 휘발성 유기화합물에 대하여 분석할 수 있는 시스템을 구성하였다. 이 시스템은 제어부, 시료탈착부, 저온농축부 및 주입부로 구성되었으며, 저온농축부에서는 액체 질소나 드라이아이스를 사용하는 대신에 -35°C까지

냉각 가능한 peltier 소자를 사용하였다.

이 시스템의 올바른 작동 여부를 점검하기 위하여 검량선을 작성하고 재현성에 대해서도 시험해 보았다. 일부 휘발성 염소소독부산물 및 BTXs에 대해 검량선을 그려본 결과 높은 결정계수 ($r^2 > 0.998$)를 나타내었다. 재현성에 대해 시험한 결과에서도 모든 시험 대상 화합물에 대하여 변동계수 (CV)가 10% 이내에 들어 재현성은 비교적 양호한 것으로 판단되었다.

흡착관과 휴대용 펌프를 이용하여 가정 및 실외 공기를 채취하여 분석한 결과 시료의 돌과 문제는 없는 것으로 나타났다. 따라서 구성된 열탈착-분석시스템을 이용하여 공기 중 휘발성 유기화합물을 분석하는 것이 가능하다는 것이 밝혀졌고, 앞으로 이 시스템을 이용하여 실내외 공기 중 미량 유해화합물들에 대한 노출분석을 실시할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (2000-2-21900-001-2) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김희갑, 이수형, 조리시 가열에 따른 수돗물 중 염소소독부산물의 농도 변화와 인체 섭취 노출, 환경독성학회지 1999; 14(1-2): 35-43.
- 백성욱, 환경대기 중 휘발성 유기화합물의 포집과 분석 방법, 대기보전학회지 1996; 12(1): 1-13.
- 전준민, 허 당, 고오석, 김동술, 여수산업단지 대기 중 휘발성유기화합물의 측정과 농도경향, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집 2001; 52-53.
- 조완근, 목욕시 chloroform에 대한 흡기 및 피부 접촉 노출, 한국환경과학회지 1998; 7(3): 301-309.
- 허귀석, 김병조, VOC CRM 개발과 국내 실험실간 VOC 비교 분석 연구 (I), 한국대기보전학회 추계학술대회 논문집 1998, 253-254.
- Cao, XL and Hewitt CN, Evaluation of Tenax-GR adsorbent for the passive sampling of volatile organic compounds at low concentrations. Atmos. Environ. 1993; 27A(12): 1865-1872.

- Heinz R, W ger PA and Schlatte C. Comparison of Tenax TA and Carbotrap for sampling and analysis of volatile organic compounds in air. *Atmos. Environ.* 1991; 25B (2): 231-235.
- Jo WK, Weisel CP and Liroy PJ. Routes of chloroform exposure and body burden from showering with chlorinated tap water. *Risk Analysis* 1990; 10: 575-580.
- Pierini E, Sampaolo L and Mastrogiacomo AR. Evaluation of a dual-sorbent trap for monitoring organic compounds in air, *J. Chromatogr. A* 1999; 855: 593-600.
- Schauer, JJ and Kleeman, MJ. Measurement of emissions from air pollution sources. 3. C1-C29 organic compounds from fireplace combustion of wood, *Environ. Sci. Technol.* 2001; 35: 1716-1728.
- Schifter I, Diaz L, Lopez-Salinas E, Ramos F, Avalos S, Lopez-Vidal G and Castillo M. Estimation of motor vehicle toxic emissions in the metropolitan area of Mexico City, *Environ. Sci. Technol.* 2000; 34: 3606-3610.
- Scobbie E and Groves JA. Determination of dimethyl sulphate and diethyl sulphate in air by thermal desorption gas chromatography-mass spectrometry, *Ann. Occup. Hyg.* 1998; 42(3): 201-207.
- U.S. EPA. Compendium Method TO-17 - Determination of Volatile Organic Compounds in Ambient Air Using Active Sampling Onto Sorbent Tubes. 1997, Cincinnati, OH, USA.
- Weisel CP, Kim H, Haltmeier P and Klotz JB. Exposure estimates to disinfection by-products of chlorinated drinking water. *Environ. Health Perspect.* 1999; 107(2): 103-110.