

소형 GC 모듈의 개발 및 특성

이명기 · 오준식 · 정광우*

원광대학교 화학과 & 나노과학기술연구소
(접수 2010. 9. 27; 수정 2011. 1. 24; 게재확정 2011. 2. 5)

Development and Characteristic Study of a Portable Gas Chromatography

Myeong-Gi Lee, Jun-Sik Oh, and Kwang-Woo Jung*

Department of Chemistry and Institute of Nanoscience & Tech., Wonkwang University, Iksan, Chonbuk 570-749, Korea
(Received September 27, 2010; Revised January 24, 2011; Accepted February 5, 2011)

요 약. 대기 중 휘발성 유기화합물을 포함한 기체 성분을 현장에서 실시간으로 검출할 수 있는 소형 GC 모듈을 개발하였다. 상용의 모세관 또는 충전 컬럼을 열선과 함께 다발 형태로 감아 소형 케이스에 내장 하였고 소형·경량의 센서, 밸브, 펌프, 그리고 재충전이 가능한 운반기체 캐니스터 등을 사용하여 분석 시료의 채취, 주입, 및 분리 및 검출이 10 분 이내에 이루어지도록 하였다. 다양한 기체 혼합물을 소형 GC 모듈과 불꽃이온화 및 열전도도 검출기로 측정한 결과 모세관 컬럼의 경우 $R=8.3$ 의 분해능을 나타냈으며 우수한 감도는 물론 재현성 및 직진성을 나타내었다. 따라서 소형 GC 모듈은 대기 중 휘발성 유해물질의 농도 감시, 화학 공정 및 오염 배출원 규제 등에 매우 효과적으로 활용되리라 기대된다.

주제어: 가스 크로마토그래피, 휴대형, 실시간 분석

ABSTRACT. In the present study, we developed a portable GC module for real-time, quantitative determinations of gas mixtures in air sample. Capillary or packed column was coiled together with a heater wire and thermocouple in a small case. Together with the small and light weight sensors and valves as well as the rechargeable carrier gas canister, which permits collection and separation of samples, this system can determine the components of complex mixtures of air contaminants at low concentrations with a duty cycle of 10 min. When measured the various samples with a FID and TCD, the system showed, for a capillary column, a good resolution ($R=8.3$), high sensitivity, reproducibility, and linear dynamic range greater than three orders of magnitude. These results indicate that the portable GC module is expected to be used for a wide range of applications, particularly for *in situ* environmental monitoring, chemical processes, and regulation of contaminant emission.

Keywords: Gas Chromatography, Portability, Real-time Analysis

서 론

최근 들어 대기오염과 오존 발생의 전구체로 작용할 뿐만 아니라 물질 그 자체로서도 유해성을 가지는 휘발성 유기오염원(VOHAPs), 발암성과 유전적 변이까지 초래하여 후손에까지 악영향을 끼칠 수 있는 EPA규정의 188 가지 유해물질(HAPs), 산업 폐기물의 연소로부터 배출되는 다이옥신을 비롯한 난분해성 유기오염원(POPs)들에 대한 방지나 규제 대책 수립 등이 절실히 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 대기 중 유해물질들에 대한 정확한 정보 파악이 선행되어야 하며 현장 적용성과 신속한 실시간 측정이 가능한 기술 개발이 필요하다.¹⁻³

대기 중 오염물질의 정성 및 정량분석을 위하여 현장에서 실시간 모니터링이 가능한 가스 크로마토그래피(GC), 이온 크로마토그래피(IC), 적외선 분광기(IR), 질량 분석기(MS), 이온 이동도 분광기(IMS) 등 다양한 분석 장비들이

소형·경량화로 개발되어 시판되고 있다.⁴ 그 중 GC는 혼합물의 분리 능력이 우수하고 정성분석과 정량분석이 뛰어나며 정밀도가 높은 것은 물론 질량분석기와 함께 사용되어 고감도 분석의 구현이 용이하다. 특히 석유화합물 정제 및 공정제어, 약품제조의 품질관리, 생체 내 신진대사 물질의 추적 감시, 토양, 수질 및 대기 오염 분석 등 다양한 분야에 널리 사용되고 있다.^{5,6} 그러나 기존의 GC는 장치가 크고 무거울 뿐만 아니라 전력을 많이 소모하므로 휴대가 어려워 현장 적용이 어렵다.

본 연구에서는 분리 컬럼과 GC 부품들을 소형화하고 감도 및 분해능을 최적화함으로써 현장에서 10 분 이내에 대기 유해물질의 신속한 정량분석이 가능한 휴대형 GC 모듈을 개발하였다. 가장 보편적으로 사용되는 불꽃이온화(FID)와 열전도도(TCD) 검출기를 이용하여 다양한 컬럼과 혼합물 시료에 대한 분리능과 검출한도를 측정하였다.

실 험

컬럼 모듈의 소형화

소형 GC 모듈의 가장 핵심부는 기체 혼합물을 분리하는 컬럼이다. 기존 GC의 경우 크기의 대부분을 차지하는 오븐을 사용하는 대신 컬럼을 열선과 함께 감아서 모듈화함으로써 컬럼의 분리 능력을 그대로 유지하면서도 부피를 크게 줄였다.⁷⁻¹⁰ 분리 컬럼과 테프론으로 피복된 열선(Bosung silicone, Ni/Cr wire, 0.48 Ω /m)을 자체 제작한 틀을 이용하여 내경 70 mm의 다발 형태로 감고 온도 센서(Cole-Parmer, EW-08505-87 Kapton J-type 열전쌍)를 컬럼 다발의 중심에 내장시킨 뒤 소형 알루미늄 케이스(110×110×35 mm³)에 장착하였다. 컬럼의 열 손실을 줄이고, 균일하게 열이 가해지도록 방열소재(Cole-Parmer, EW-93785-61)를 컬럼 다발의 주위에 균일하게 바른 후 은박지로 감아주었다. 컬럼 모듈의 온도 조절은 PID 컨트롤러(Watlow, 96A0-FAAA-00-GR, 24 VDC)를 사용하여 200 °C까지 시간에 따른 온도 조절(ramp)이 가능하도록 하였고, 샘플의 연속적인 분석이 신속하게 이루어지기 위해서는 분석이 끝난 후 컬럼의 온도를 초기 조건의 온도(약 60 °C)로 급속히 냉각시킬 필요성이 있기 때문에 소형 냉각 팬(NMB-MAT, 2406KL-05W-B40)을 케이스에 부착하였다.

또한 비활성 무기 기체(inert inorganic gases)를 분리하기 위하여 Molesive 13X, Carboxen 1000, Carbosieve S-II 등의 고정상 물질들을 다양한 길이(2~3 m)와 내경(1/16~1/8 인치)의 스테인리스 관에 충전하여 분리 컬럼을 제작하였다. 스테인리스 관 양끝에는 고정상 물질의 분말이 세어 나오는 것을 방지하고 컬럼 내의 고정상 물질의 움직임을 막기 위해 스테인리스 재질의 그물망(Valco, 10FR4-10, ϕ 6.35 mm, 2 μ m, 1 mm)를 장착하였다. 고정상 물질들이 충전 되어 있는 분리 컬럼도 내경 70 mm의 다발 형태로 감아 열선과 온도센서를 부착하여 온도 컨트롤을 하였다.

소형 GC 모듈

GC 모듈의 소형, 경량화 설계(Fig. 1a)를 토대로 시료도 입부, 운반 기체의 일정한 흐름을 유지시키기 위한 유량 조절 시스템, 10-포트 밸브, ON/OFF 밸브 및 온도 컨트롤 시스템을 15×15×10 cm³의 공간에 모두 배치하였으며 전체 시스템의 무게도 열전도도 검출기를 포함하여 4.0 Kg 이하가 되도록 소형·경량의 각 부품을 사용하였다(Fig. 1b).

소형의 스테인리스 캐니스터 카트리지(ϕ 6.5 mm×150 mm, 용량 520 mL)에 고 순도 운반 기체(N₂)를 100 psi로 충전하여 소형 GC 모듈에 공급되도록 하였다. 스테인리스 관(Valco, PCS415F, I.D. 6.35 mm×50 mm)의 기수분리기(moisture trap)에 흡습제를 넣어 운반 기체의 수분을 제거하였고 먼지나 이물질이 소형 GC 모듈로 유입되는 것을 막기 위해 스테인리스 재질의 다공성 분리막(Valco, 10FR4-10, ϕ 6.35 mm, 2 μ m, 1 mm)을 기수분리기 내에 설치하였다.

소형 GC 모듈의 샘플링과 시료 분석의 효율성을 위해서 10-포트 밸브(Valco, DV22-2110)를 사용하여 여러 방향의 기체 흐름을 동시에 제어하였다. 다이어프램(diaphragm) 방식의 10-포트 밸브(V5)는 전기를 사용하지 않고 운반 기체의 일부를 사용하기 때문에 소형 GC 모듈의 소비 전력을 최소화할 수 있다. 10-포트 밸브는 40 psi 이상의 압력에서만 개폐 구동이 가능한데, GC 모듈을 장시간 운용하게 되면 운반 기체의 소모로 인해 카트리지 내의 질소 기체가 40 psi 이하로 떨어지게 되고, 따라서 10-포트 밸브의 구동이 불가능해지게 된다. 이런 문제점을 극복하기 위하여 60 cm³ 부피의 보조 용기(buffer chamber)를 장착하여 압력 센서의 측정 값이 40 psi 이하로 낮아지면 V3 밸브(ASCO Valve Inc., AL1324)를 사용하여 보조 기체를 사용할 수 있도록 하였다.

대기 중 기체 샘플이 소형 GC 모듈 내에 주입되어 분리 컬럼의 입구까지 이동하는 동안 밸브 및 튜브 내에서 응축 또는 흡착되는 것을 방지하기 위하여 60-80 °C의 항온을

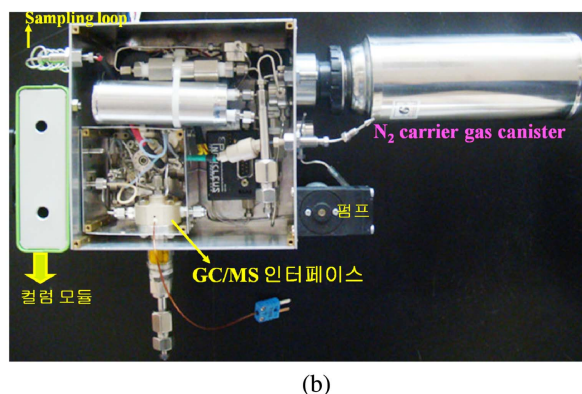
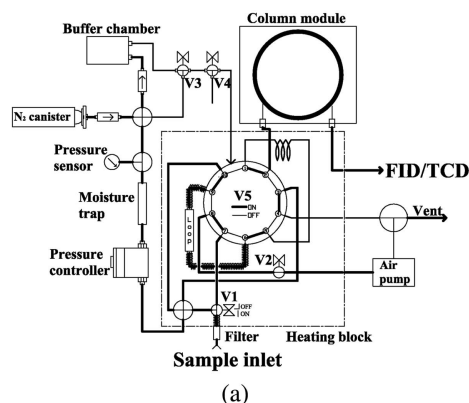


Fig. 1. (a) Schematic diagram of a portable GC module. (b) Portable GC module.

min Device	1	2	3	---	10	11	Reset
V1	ON	OFF				ON	
V2	ON	OFF				ON	OFF
V4	OFF	ON	OFF				
V5	OFF	ON	OFF				
Air Pump	ON	OFF				ON	OFF
Column Heater	Set Point	Ramp				Set Point	
Cooling Fan	OFF					ON	OFF
Status	Sampling	Injection	Separation			Back-flush	Ready

Fig. 2. Representative event schedule for the analysis with the portable GC module.

유지시켰다. 특히 튜브의 경우 둘레에 온도 감지를 위한 열전쌍을 부착하고 절연튜브로 감싸주고 그 주위로 코일형 Ni/Cr 열선(Omega, NIC80-020-125-25)을 감은 뒤 다시 절연튜브로 절연을 하였다.

소형 샘플링 펌프(KNF Neuberger, NMP830KNDC)를 켜고 V1(The Lee Company, LFRX0501900B, 3-way valve), V2 밸브(The Lee Company, LFVA2410120H, 2-way valve)를 열어 250 μ L 용량의 샘플 루프에 시료를 채운다. 그 다음 V1, V2, 밸브를 닫고 샘플링 펌프를 정지시킴과 동시에 V4를 열어서 10-포트 밸브를 ON 상태로 바꿔주면 운반 기체가 루프 안의 시료와 함께 컬럼 모듈로 주입되고, 분리 컬럼에 의해 성분별로 분리된 화합물은 검출기에 의해 측정된다. 샘플 루프에 시료를 채취할 때와 분리 컬럼에 주입될 때 그리고 역류(backflush)로 작동 할 때 각종 밸브의 개폐, 펌프, 컬럼 히터, 냉각 팬의 시간에 따른 동작 기능을 최적화하였다(Fig. 2). 소형 GC 모듈의 전원은 배터리 또는 어댑터로부터 5 V 및 24 V 전압을 동시에 공급받아 소형 인쇄회로 기판(바이오니아, 11 \times 11 cm²)을 통해 구성 부품들을 RS-422 통신으로 자동 제어하였고 검출기를 제외한 GC 모듈의 전력 소모량은 최대 60 W이다.

표준 시료의 제조

Tedlar 백(SK, 232-05)에 일정 부피의 오염되지 않은 공기를 대용량 주사기(Restek, 500MAR-LL-GT, 500 mL)를 이용하여 주입하고, 액체 상태의 휘발성 유기화합물을 성분별로 마이크로 주사기를 이용해 Tedlar 백에 주입시켜 ppm 또는 ppb 농도의 표준 시료를 제조하였다.

결과 및 고찰

자체 개발한 컬럼 모듈의 특성을 상용의 GC와 비교하기 위해 대표적인 휘발성 유기혼합물에 대한 분석을 수행

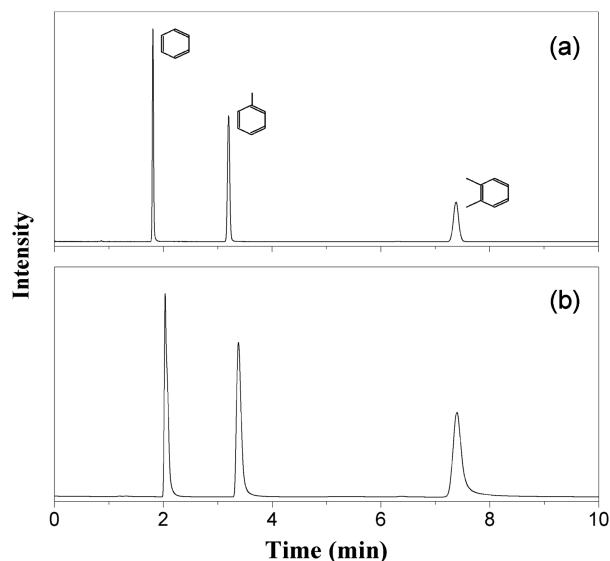


Fig. 3. Comparison of chromatograms for the BTX mixture sample measured with (a) an Agilent 7890A GC and (b) the portable GC module.

하였다. 컬럼은 HP-1(Agilent, 15 m \times 0.32 mm \times 1 μ m)을 사용하였으며 컬럼 온도는 60 $^{\circ}$ C로 일정하게 유지하고 운반 기체는 고순도 질소를 사용하여 3 mL/min 유량으로 흘려주었으며 불꽃이온화 검출기를 사용하였다. Fig. 3a는 상용 Agilent 7890A GC의 오븐 내에 HP-1 컬럼을 장착하고 벤젠, 톨루엔, *o*-크실렌의 기체 혼합물(각 100 ppm)을 주입하여 얻은 크로마토그램이다. 벤젠, 톨루엔, *o*-크실렌의 머무름 시간(retention time)은 1.81 분, 3.20 분, 7.38 분이고 피크 폭(FWHM), w_R 은 각각 0.026 분, 0.047 분, 0.107 분이였다. 벤젠과 톨루엔 피크로부터 계산한 이론단수(N)와 분해능(R)은 각각 26000과 19.0이 얻어졌다.

Fig. 3b는 같은 시료에 대해 동일한 조건에서 자체 제작한 소형 GC 및 컬럼 모듈로 측정된 크로마토그램으로, 각 성분들의 머무름 시간이 Fig. 3a와 비슷하게 일치함을 알 수 있다. 벤젠(w_R =0.069 분)과 톨루엔(w_R =0.092 분)의 경우 이론단수와 분해능은 각각 4800과 8.3을 나타내었다. 수천에서 만 정도의 이론단수를 가진 컬럼을 사용할 경우 환경 시료 중에 공존하는 대부분의 혼합물을 분리하여 검출하는 것이 가능하다고 알려져 있으므로, 이 결과는 자체 제작한 소형 컬럼 모듈이 대기 샘플의 실시간 분석에 효과적으로 사용될 수 있음을 입증한다.^{11,12} 자체 개발한 소형 GC 모듈의 분리 피크 폭이 상용 GC 크로마토그램보다 약간 넓게 나타나는 것은 소형 컬럼 모듈 내의 모세관 컬럼의 온도가 상용의 GC 오븐 내에서만큼 이상적으로 균일하지 못하다는 것을 의미한다. 향후 분리 컬럼의 균일한 온도 컨트롤을 위하여 히터 및 온도센서의 장착기술을 개

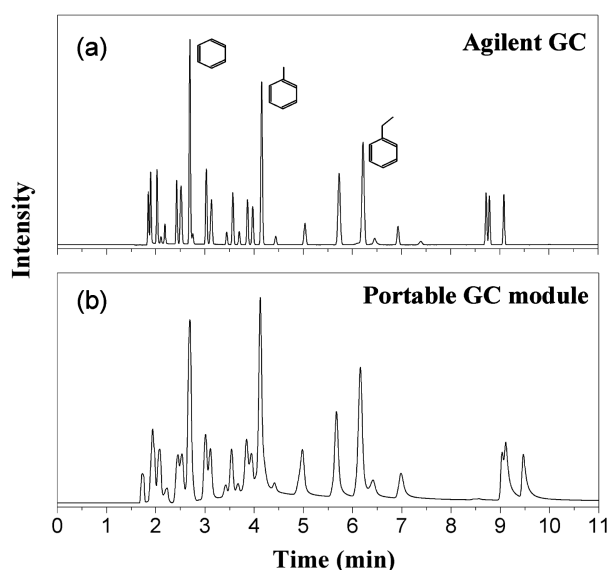


Fig. 4. Comparison of chromatograms showing the analysis of the 26-component mixture measured with (a) an Agilent 7890A GC and (b) the portable GC module.

선할 예정이다.

다양한 VOC류 혼합기체에 대한 분리 능력을 검증하기 위하여 26 가지의 극성 및 비극성 유기화합물을 포함한 Volatiles MegaMix(EPA Method 624, Restek #30497) 샘플을 분석하여 상용 GC의 결과와 비교하였다(Fig. 4). HP-1 (Agilent, 30 m×0.32 mm×1 μm) 컬럼을 사용하여 혼합물을 분리하였으며 온도는 2 분간 60°C 유지, 2 분간 ramp(10°C/min), 2 분간 80°C 유지, 4 분간 ramp(20°C/min), 5 분간 160°C 유지하였다. 운반 기체를 질소 기체로 사용하고(유량: 4 mL/min) 불꽃이온화 검출기로 측정하였다. Fig. 4a에서 볼 수 있듯이 상용 GC의 오븐 내에 HP-1 컬럼을 장착한 경우, 26 가지 휘발성 유기화합물들이 잘 분리된 크로마토그램을 얻을 수 있었다. 동일한 조건에서 자체 제작한 소형 GC 및 컬럼 모듈로 측정한 경우 각 피크들이 잘 분리되어 관찰되었다. 단지 머무름 시간이 길어질수록 피크 폭이 넓어지며 약간의 꼬리 끌기(tailing)가 나타났다. 그러나 혼합물의 분리 능력 면에서는 거의 대등하다는 것을 알 수 있으며, 앞에서 확인하였듯이 상용의 GC와 대등하게 소형 GC 모듈도 다양한 샘플을 분석하기에 충분한 분해능을 가지고 있음을 확인하였다.

정유 공장과 석유화학 공정에서는 H₂, CH₄, N₂, O₂, CO, CO₂ 등의 비활성 무기 기체(inert inorganic gases)를 상시 모니터링하기 위하여 GC를 사용하고 있다. 이들 기체를 정량, 정성 분석하기 위해서는 혼합물 분리에 적합한 컬럼과 열전도도 검출기를 사용하는 것이 가장 적합하다. 작은 분자들의 분리에 적합한 컬럼 모듈을 만들기 위하여 Molesieve

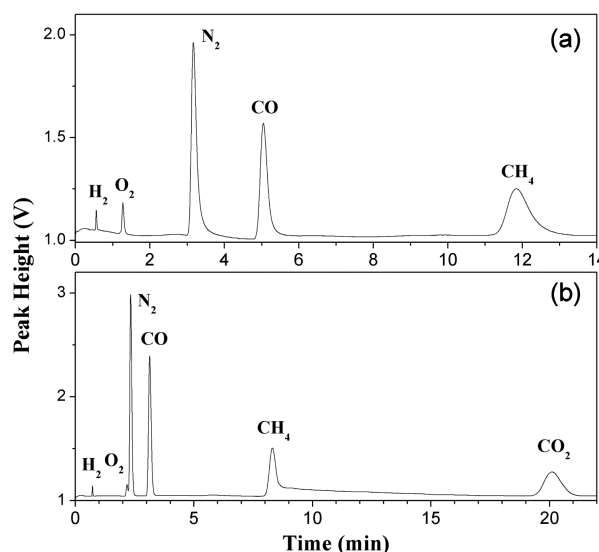


Fig. 5. Chromatograms for the H₂/CH₄/CO/CO₂ mixture gas measured with (a) a Molesieve 13X and (b) a Carboxen 1000 packed column.

13X, Carboxen 1000, Carboxisieve S-II 등의 다양한 고정상 물질을 충전하였다. Fig. 5a는 H₂, CH₄, CO, CO₂ 기체가 각각 5% 씩 He에 포함되어 있는 표준 혼합 기체(Hankook special gases Co. Ltd.)를 2 m 길이의 1/8 인치 스테인리스 관에 Molesieve 13X(Supelco, 80/100 mesh)로 충전한 소형 컬럼을 사용하여 분리하고 열전도도 검출기(Valco Instruments Co. Inc., TCD2-NIFE)로 측정한 크로마토그램이다. 운반 기체를 He으로 사용하고(유량: 30 mL/min) 분석하는 동안 컬럼의 온도는 상온(27°C)을 유지시켰으며 검출기와 필라멘트의 온도는 각각 100°C와 200°C로 설정했다. Molesieve 13X로 충전한 컬럼은 가벼운 기체들에 대해서 분리 능력이 아주 뛰어나도록 보여주었다. 단지 CO₂의 경우엔 분리 시간이 상당히 소요 되기 때문에 컬럼 온도의 ramp를 통한 분석 방법이 보다 효율적이라 판단된다. 그리고 혼합 기체에 들어 있지 않은 N₂와 O₂의 피크가 크로마토그램에서 관찰된 것은 시료의 채취와 희석을 하는 과정에서 적은 양의 공기가 Tedlar 백 안으로 유입되어 들어갔기 때문으로 판단된다.

Fig. 5b는 H₂, CH₄, CO, CO₂가 각각 2% 씩 He에 포함되어 있는 혼합 기체를 3 m 길이의 1/8 인치 스테인리스 관에 Carboxen 1000(Supelco, 60/80 mesh)을 충전하고 60°C로 일정하게 유지하면서 열전도도 검출기로 분석한 크로마토그램이다. He 운반 기체를 30 mL/min 유량으로 일정하게 흘려 주었으며 열전도도 검출기의 필라멘트 온도는 200°C로 유지하였다. 고정상이 Carboxen 1000으로 이루어진 컬럼 역시 대체로 분리능력이 우수하다는 것을 확인 할 수 있었다. 특히 앞에서 실험한 Molesieve 13X 충전 컬럼보다

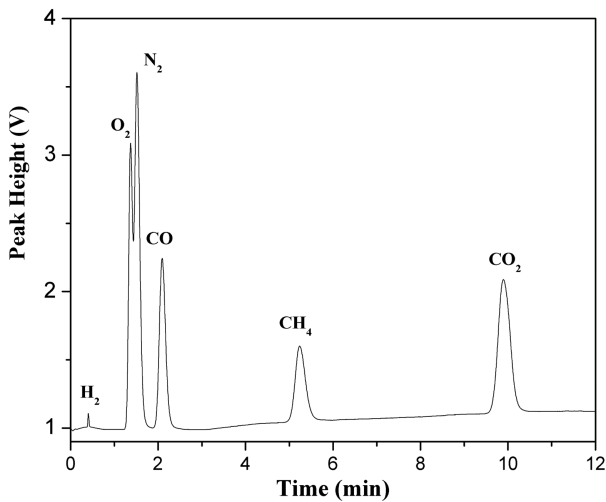


Fig. 6. Chromatogram of $H_2/CH_4/N_2/O_2/CO/CO_2$ mixture gas measured with a Carbosieve S-II packed column and a TCD.

긴 3 m 길이의 컬럼을 사용하였고 분석시간 동안 컬럼의 온도도 비교적 높지 않은 60°C 로 유지하였기 때문에 머무름 시간이 느리다는 것을 알 수 있다. 그러나 컬럼의 온도의 ramp를 이용하면 메탄과 이산화탄소의 머무름 시간을 크게 단축시킬 수 있다. 특히 Molesieve 13X 충전 컬럼에 비해 질소와 산소의 분리가 잘 이루어지지 않는다는 사실은 주목할 만하다.

고정상 물질의 종류에 따른 가벼운 기체들의 분리 효율을 관찰하기 위해 2 m 길이의 1/16 인치 스테인리스 관에 Carbosieve S-II(Supelco, 80/100 mesh)를 충전하여 컬럼 모듈을 제작하였다. Fig. 6은 H_2 , CH_4 , N_2 , O_2 , CO , CO_2 기체가 각각 2% 씩 He에 포함되어 있는 혼합 기체를 Carbosieve S-II 충전 컬럼으로 분리하고 열전도도 검출기로 분석한 결과이다. 컬럼의 온도는 처음 200초 동안은 50°C 유지하고 500 초간 80°C 까지 ramp 후 100 초간 130°C 로 유지시켰다. He 운반 기체는 20 mL/min 유량을 유지하였고 열전도도 검출기의 필라멘트 온도는 300°C 로 유지했다. Carbosieve S-II 충전 컬럼은 질소와 산소 기체의 완벽한 분리에 한계가 있지만 나머지 다른 기체들에 대해서는 분리 능력이 우수함을 보여주었다. 특히 Molesieve 13X의 경우에 비하여 더 작은 내경의 관을 사용했음에도 불구하고 컬럼 온도의 적절한 ramp를 통해 피크가 좁고 머무름 시간도 짧게 할 수 있었다. 따라서 앞에서 수행한 세 가지 고정상 Molesieve 13X, Carbosieve S-II, Carboxen 1000 중에서 가벼운 기체 혼합물의 분리능력과 분석시간을 고려해 보면 Carbosieve S-II로 채운 충전 컬럼이 가장 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다.

소형 GC 모듈에 의한 정량 분석의 능력을 확인하기 위하여 CH_4 , CO , CO_2 기체의 농도에 따른 GC 크로마토그램

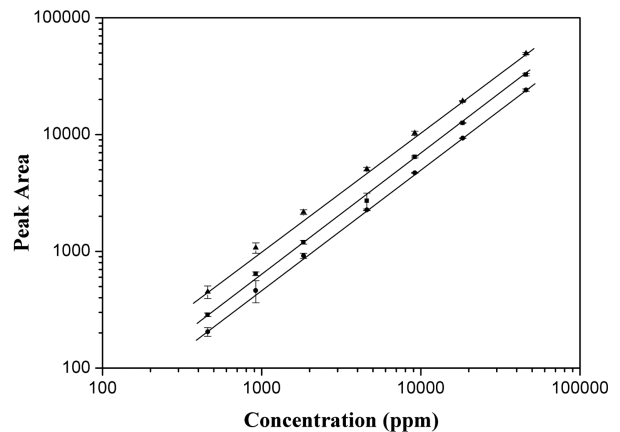


Fig. 7. Calibration curves of three different gases measured with a Carbosieve S-II packed column. ●, CH_4 ; ■, CO ; ▲, CO_2 .

의 피크 면적을 측정하였다. Fig. 7은 Carbosieve S-II 충전 컬럼을 사용하여 측정한 보정 곡선으로, 각 농도마다 3 회 이상 측정을 반복하여 평균값을 나타내었다. 예러 바는 표준편차(one standard deviation)를 나타낸다. 세 가지 기체 모두 우수한 직선성(linearity)를 보여주고 있으며 넓은 농도 범위(100 ppm~100000 ppm)에서도 시료의 정량 분석이 가능함을 보여준다. 검출 하한치는 CH_4 (99 ppm), CO (98 ppm), CO_2 (102 ppm)의 검출 한도를 나타내어 100 ppm 이상의 농도 측정이 가능하다는 것을 확인하였다. 이 결과는 기존의 상용 GC에서 구현할 수 있는 정도의 측정 하한치와 거의 대등한 결과를 보여주는 것이다.

결론

휴대가 가능하여 현장에서 대기 중 가스를 실시간으로 정량분석이 가능한 무게 4.0 Kg의 소형 GC 모듈 개발하였다. 대표적인 휘발성 유기화합물(벤젠, 톨루엔, α -크실렌)을 사용하여 자체 개발한 소형 GC 모듈과 상용 GC의 분리능을 비교 하였고 26 가지 휘발성 혼합물을 분석함으로써 자체 제작한 소형 GC 모듈이 대기 환경 시료 중에 공존하는 대부분의 혼합물을 분리하여 검출하는데 효과적으로 사용될 수 있음을 입증하였다.

다양한 고정상(Molesieve 13X, Carbosieve S-II, Carboxen 1000)의 컬럼 모듈을 제작하여 H_2 , CH_4 , N_2 , O_2 , CO , CO_2 등의 가벼운 기체 혼합물에 대한 분석실험을 수행하였으며 우수한 직선성, 넓은 농도범위, 낮은 측정 하한치를 확인하였다. 따라서 소형 GC 모듈은 현장 분석이 가능하고 분석시간이 짧아 오염원의 발생이나 배출 정보를 보다 빨리 알 수 있어 오염원의 진원지 파악을 통한 빠른 대처로 오염을 최소화시킬 수 있으리라 기대된다.

Acknowledgments. This work was supported by the Korea Science and Engineering Foundation (KOSEF) grant (R01-2008-000-20689-0) and the Basic Science Research Program (2010-0008852) through the National Research Foundation of Korea (NRF) by the Ministry of Education, Science and Technology.

REFERENCES

1. Hodgson, M. *Occup. Med.* **2000**, *15*, 571.
2. Smedbold, H. T.; Ahlen, C.; Norback, D.; Hilt, B. *Indoor Air* **2001**, *11*, 223.
3. Wolkoff, P. *Indoor Air* **1995**, (Suppl. 3), 9-73.
4. J. J. Isbell and J. S. Brodbelt, *J. Am. Soc. Mass Spectrom.* **1996**, *7*, 565.
5. Burton, B. *Volatile Organic Compounds In Indoor Air Pollution and Health*; Bardana, E., Jr, Montanaro, A. Eds.; Marcel Dekker: New York, 1997; pp 127-153.
6. Peng, C. Y.; Batterman, S. *J. Environ. Monit.* **2000**, *2*, 313.
7. Wahl, J. H.; Riechers, D. M.; Vucelick, M. E.; Wright, D. W. *J. Sep. Sci.* **2003**, *26*, 1083.
8. Smith, P. A.; Sng, M. T.; Eckenrode, B. A.; Leow, S. Y. *J. Chromatogr. A* **2005**, *1067*, 285.
9. Agah, M.; Potkay, J. A.; Lambertus, G.; Sacks, R.; Wise, K. D.; *J. Microelectromech. Syst.* **2005**, *14*, 1039.
10. Whiting, J. J.; Sacks, R. D.; *J. Sep. Sci.* **2006**, *29*, 218.
11. Kim, M. G.; Shim, J. H.; Lee, D. S.; Lee, Y. K. *J. Korean Chem. Soc.* **1994**, *38*, 151.
12. Lee, J.-H.; Hwang, S. M.; Lee, D. W.; Heo, G. S. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2002**, *23*, 488.