

DNPH cartridge/LC-MS 방법에 의한 반월·시화산업단지의 폼알데하이드 분석에 관한 연구

조덕희*, 송일석, 김인구, 김웅수, 김종보, 김태현, 황선민, 남우경
경기도보건환경연구원 약취분석팀

Analysis of formaldehyde using DNPH cartridge/LC-MS in the Ban-Woll · Shi-Hwa Industrial Complex

Deok-Hee Cho*, Il-Seok Song, In-Gu Kim, Woong-Soo Kim
Jong-Bo Kim, Tae-Hyun Kim, Sun-Min Hwang, Woo-Kyong Nam
Odor Analysis Team, Gyeonggi-do Institute of Health and Environment

Abstract

Formaldehyde is important because of their irritant and toxic properties, mutagenicity and carcinogenicity. In this study, liquid chromatography-mass spectrometry (LC-MS) is used for the analysis of formaldehyde after derivatization with 2,4-dinitrophenylhydrazine (DNPH) cartridge. Analytical parameters such as linearity, repeatability and minimum detection limit were evaluated. The linearity (r^2) was 0.9997 when analyte concentration ranges from 25 to 200 $\mu\text{g}/\text{l}$. The relative standard deviation (%RSD) was 1.25 % for concentration of 200 $\mu\text{g}/\text{l}$. The minimum detection limit (MDL) was 0.73 ppbv. It was shown that LC-MS method has a great potential for formaldehyde analysis.

The results of formaldehyde from the survey of Ban-Woll and Shi-Hwa Industrial Complex samples, the highest level was 6.20, 3.93 ppb, respectively. The highest emission level of formaldehyde at chemical plants in the Ban-Woll · Shi-Hwa Industrial Complex was 5421.25 ppb.

KeyWords : Formaldehyde, DNPH cartridge, LC-MS, Ban-Woll · Shi-Hwa Industrial Complex

*Corresponding author E-mail : deokheec@kg21.net

I. 서론

폼알데하이드는 아세트알데하이드와 함께 카르보닐화합물의 주요성분이며, 다양한 고장발생원, 이동발생원 및 1, 2차 발생원으로 배출되고 있다. 특히 폼알데하이드는 눈, 코, 목을 자극하고 기관지 천식, 피부 알레르기를 일으킬 뿐만 아니라 동물실험 결과 발암물질로 입증되었으며 아세트알데하이드 및 이들 산화물 역시 돌연변이원성 물질로서 연구의 대상이 되어오고 있다¹⁻²⁾. 폼알데하이드의 주요 발생원은 포르말린 제조, 합판제조, 합성수지, 및 화학제품제조, 소각로, 석유정제, 접착제, 핵사민제조공정 등으로 매우 광범위하며, 실내공기오염의 주요 원인물질로 일반주택 및 공공건물에 많이 사용되는 단열재인 우레아폼 (Urea formaldehyde form insulation)과 이 외에 실내가구의 칠, 가스난로 등에서의 연소과정, 접착제, 흡연 등에 의해 발생된다. 또한 폼알데하이드는 차량으로부터 직접 배출되며, 일부 국가에서는 자동차의 연료로서 가솔린대신 메탄올, 에탄올 등을 첨가한 대체 연료를 사용하기 때문에 배기가스 중 폼알데하이드와 아세트알데하이드의 농도가 증가하고 있으며³⁾, 광화학 반응에 의한 부산물로 생성되어 1차 또는 2차 대기오염물질로 존재하게 된다⁴⁾. 또한 카르보닐화합물은 탄화수소의 불완전연소의 부산물로서 생성되는 1차 화합물일 뿐만 아니라 대기 중 유기화합물의 광산화에 의해서 중간생성물로 형성되는 2차 화합물이기도 하며⁵⁾, 오존, 과산화아세틸질산염 (PANs), 과산화카르복실산을 포함하는 산화물과 카르복실산 형성에 있어서의 전구체로 작용하는 동시에 광분해, 수산화라디칼 ($\cdot\text{OH}$) 또는 질산염라

디칼 ($\text{NO}_3\cdot$)과의 반응 또는 치환성이 있는 광산화에 의해서도 형성될 수 있다⁶⁻⁷⁾.

폼알데하이드 측정법으로는 발색법과 화학적 유도체화법을 겸한 크로마토그래피법 등이 있다⁸⁾. 특히 발색법 중에서 크로모트로핀산법은 국내 대기오염공정시험방법으로 규정되어 있으며 발색법 중 가장 널리 사용되는 방법이기도 하다. 그러나 페놀이나 일부 유기물, 그리고 폼알데하이드를 제외한 다른 종류의 알데하이드류에 의해 방해받을 것으로 알려져 있으며, 또한 일반 대기환경 중에 존재하는 저농도 수준 (대체로 10 ppb 이하)의 폼알데하이드 검출에는 적합하지 않다는 단점을 지니고 있다⁹⁾. 또한 황¹⁰⁾등의 연구에서도 크로모트로핀산법과 DNPH/HPLC법을 비교·평가해 본 결과 재현성, 선형성, 채취효율의 측면에서는 두 방법 모두 양호한 결과를 나타내었으나, 회수율 평가에서는 폼알데하이드가 10 ppb 이하의 저농도로 존재하는 환경에서는 크로모트로핀산법이 적합하지 않은 것으로 나타났다. 2,4-Dinitrophenylhydrazine (DNPH) 유도체화법은 시료채취 시 알데하이드화합물 뿐만 아니라 케톤과도 쉽게 반응하여 안정한 DNPH 유도체를 형성하게 되므로 카르보닐화합물에 대한 측정이 가능하다. DNPH cartridge에 시료채취 후 상온에서는 2주, 냉장보관에서는 4주 동안 안정한 것으로 입증되어 각 시료채취장소로부터 실험실까지 운반하는데 따른 문제점은 발견되지 않으나 시료채취 시 오존에 의한 방해가 심하기 때문에 Ozone scrubber를 사용하여 오존을 반드시 제거해야 하는 것으로 알려져 있으며^{8,11)}, 분석은 DNPH cartridge로 유도체화 하여 가스크로마토그래피 (GC)나 고성능액체크로마토그래피법 (HPLC)으

로 분석하는 방법이 주로 사용되고 있다. 본 연구에서는 폼알데하이드 분석을 위해서 2,4-Dinitrophenylhydrazine (DNPH) cartridge 로 유도체화 시킨 다음 아세토니트릴로 용출 후 액체크로마토그래피-질량분석기법 (LC-MS)으로 최적조건을 정량화하고, 이 분석방법을 이용하여 경기도 반월·시화산업단지에서의 폼알데하이드 농도분포를 조사하고자 수행하였다.

II. 실험재료 및 방법

1. 시약 및 표준용액

1.1. 용매

유도체화된 폼알데하이드의 용출 및 용리액으로 사용된 아세토니트릴 (acetonitrile, ACN), 테트라하이드로퓨란 tetrahydrofuran, THF), 증류수는 HPLC grade로 Bardick & Jackson (U.S.A.)사에서 구입하여 사용하였다.

1.2. 표준물질

유도체화 된 carbonyl-DNPH 혼합표준액 (each compound at 15 mg/l as carbonyl in ACN, Supelco)을 아세토니트릴 (ACN)으로 희석하여 0.5 mg/l의 중간표준용액을 제조한 후, 아세토니트릴로 희석하여 25, 50, 100, 200 µg/l의 표준용액을 제조하여 사용하였다.

2. DNPH cartridge

폼알데하이드의 흡착 및 유도체화에 사용된 2,4-dinitrophenylhydrazine (DNPH) cartridge는 Sep-Pak XPoSure™ Aldehyde Sampler (Waters, U.S.A.)를, 오존제거를 위해 Sep-Pak Ozone Scrubber (Waters, U.S.A.)를 사용하였으며, DNPH cartridge의 물리화학적 특성은 표 1에 나타내었다.

Table 1. Physical and Chemical Characteristics

Item	Characteristic
Hold-up volume	0.7 ml
Particle size	500 to 1000 µm
Quantity of DNPH-Silica	0.35 g/sampler(~1mg DNPH)
DNPH Cartridge Capacity	Approximately 70 µg formaldehyde
Collection efficiency	>95 % for sampling rates up to 1.5 l/min
Background level	0.06 µg below as formaldehyde
	0.15 µg below as acetaldehyde
	0.38 µg below as acetone

3. 시료채취

폼알데하이드 분석을 위해서 반월·시화 산업단지에서 2006년 3월부터 2006년 5월 까지 시료채취 하였으며, 현장에서 카르보닐화합물 채취 시 오존이 존재하면 DNPH 유도체가 감소되거나, 오존과 DNPH가 반응하여 인위적인 불순물이 형성될 수 있으므로^{8,12)}, 시료채취 시 DNPH cartridge 앞에 Ozone scrubber를 장착하고 적산유량계 (SIBATA Σ -300, Japan)를 이용하여 1.5 m의 높이에서 2.0 l/min 의 유량으로 10분 동안 채취하였다. 채취된 시료는 마개를 한 후 알루미늄호일로 포장하여 외부공기 및 햇빛을 차단시켜 운반하였으며, 즉시 또는 용매로 추출하기 전까지 냉장 (4℃이하)보관하여 3일 이내에 분석하였다.

4. 분석방법

DNPH cartridge에 채취된 시료는 아세토니트릴 (ACN) 5 ml로 용출하였으며 용출액은 2 ml 바이얼 (Waters)에 담은 후 마개로 밀봉하여 실험하였다. 폼알데하이드 분석에 Waters 2695 separation module 과 Waters 2996 Photodiode Array Detector 를 장착한 Micromass ZQ (Waters, U.S.A.)에 C₁₈ 컬럼 (XTerra MSC18 3.5 μ m, 2.1 \times 150 mm, Waters)을 사용하여 표 2의 조건으로 분석하였다. 정량을 위해서 SIR (selected ion record) mode를 이용하여 [M-H]⁻ pseudomolecular ion 209 를 선택하여 폼알데하이드 정량에 사용하였다.

Table 2. Operation conditions for LC-MS

Class	Conditions
Column flow	0.2 l/min
Column Temp.	30 °C
Injection volume	5 μ l
Gradient	Solvent B ¹⁾ 100% held 1 min, decrease solvent B to 70%
Timetable	for 19 min, and held 1.5 min, solvent A ²⁾ 100% held 1 min, and solvent B 100% held 8.5 min. (total time 30 min)
PDA Detector (λ)	350 ~ 370 nm
Mode	ESI negative, SIR mode
Capillary	3.5 kV
Cone	20 V
Extractor	3.0 V
Mass (Source)	Source Temp. 120 °C
	Desolvation Temp. 320 °C
	Cone gas flow 10 l/hr
	Desolvation gas flow 400 l/hr
	Multiplier 500 V

1) water : acetonitrile : tetrahydrofuran = 50 : 45 : 5

2) acetonitrile 100%

III. 결과 및 고찰

1. 분석의 직선성, 재현성 및 검출한계

폼알데하이드 분석을 위한 LC-MS 분석법의 직선성 (linearity)을 알아보기 위해서 유도체화 된 폼알데하이드 표준용액 25, 50, 100, 200 $\mu\text{g}/\ell$ 로 분석하였으며, 재현성(Reproducibility)은 폼알데하이드 농도 200 $\mu\text{g}/\ell$ 을 3회 분석하여 상대표준편차 (%RSD)로, 최소검출한계 (Minimum Detection Limit, MDL)를 결정하기 위하여 검출한계에 다다를 것으로 생각되는 폼알데하이드 표준용액 농도 25 $\mu\text{g}/\ell$ 을 7회 반복측정한 후 이 농도 값을 바탕으로 하여 표준편차에 3.14 (7회 반복분석에 대한 99% 신뢰구간에서의 자유도 값)를 곱하여 나타내었다.

표 3에서와 같이 폼알데하이드의 상관계수 (r^2)는 검량선 농도범위 25~200 $\mu\text{g}/\ell$ ($n=4$)에서 LC-MS 분석방법과 Photodiode Array (PDA, UV) 분석에서 각각 0.9997, 0.9998으로 직선성이 우수하게 나타났으며, 상대표준편차 (%RSD)는 LC-MS분석법에서 1.25 %, PDA (UV) 분석법에서 0.40 %로 높은 재현성을 나타냈다. 최소검출한계 (MDL)는 20 ℓ 의 시료공기를 채취할 경우

대기 중의 농도로 환산하였을 경우 LC-MS 분석법에서 폼알데하이드의 검출한계가 0.73 ppbv, UV 분석에서 0.32 ppbv에 해당되므로 일반적으로 실제 대기 중에서의 검출한계는 매우 낮은 값이다. Suze¹³⁾등은 atmospheric pressure photoionization-mass spectrometry (APPI-MS) 와 atmospheric pressure chemical ionization-mass spectrometry (APCI) 방법에서 폼알데하이드의 직선성 (r^2)이 각각 0.986, 0.998이었으며, 조¹⁴⁾등의 연구에서도 폼알데하이드 농도 25~250 $\mu\text{g}/\ell$ ($n=6$)를 LC-MS 방법과 UV 방법으로 분석한 결과 상관계수 (r^2)가 각각 0.9998, 0.9991, 상대표준편차가 각각 0.61, 0.36 %, 최소검출한계가 0.34, 1.04 ppbv이었으며, 황¹⁰⁾등의 연구에서는 DNPH/HPLC 방법에서 직선성이 0.999, 일간 재현성이 0.9 %, 김¹⁵⁾등의 연구에서도 DNPH cartridge로 유도체화 시켜 HPLC로 분석 시 카르보닐화합물의 재현성이 상대표준편차로 1.22~2.67 %, 폼알데하이드의 검출한계농도가 0.37 ppb, 다른 카르보닐화합물은 0.24~0.37 ppb로 나타났다. 따라서 DNPH cartridge로 유도체화 시킨 후 LC-MS 분석방법의 직선성 및 재현성이 우수하다고 판단되므로 폼알데하이드 분석은 매우 효과적인 분석방법이라고 사료된다.

Table 3. Correlation coefficients (r^2) of linearity, minimum detection limit (MDL) and repeatability (200 $\mu\text{g}/\ell$) at standard concentration range from 25 to 200 $\mu\text{g}/\ell$

Compound	r^2		MDL(ppbv) ²⁾ , (n=7)		%RSD, n=3	
	MS	PDA ¹⁾	MS	PDA	MS	PDA
Formaldehyde	0.9997	0.9998	0.73	0.32	1.25	0.40

1) Photodiode Array Detector (PDA)

2) Estimated by sample volume of 20 ℓ (2 ℓ /min, 10min)

2. 반월·시화산업단지에서의 폼알데하이드 농도분포

경기도 반월·시화산업단지에는 2006년 1월 현재 8,000여개 업체가 입주하여 가동 중에 있으며, 반월·시화산업단지에서의 폼알데하이드 농도분포를 알아보기 위해서 반월 및 시화산업단지에서 각각 8개 지점을 선정하여, 2006년 4월에 주간(day time ; 10:00~16:00) 및 야간(night time ; 19:30~23:00)에 DNPH cartridge에 시료 채취를 하여 앞에서 정량화된 LC-MS 방법으로 분석하였다.

표 4에서와 같이 폼알데하이드 농도 분석 결과 반월산업단지에서 주간 평균농도 및 최고농도가 각각 2.78, 6.20 ppb, 야간 평균 및 최고농도가 각각 2.12, 4.42 ppb로 야간에 비해 주간에 높은 농도가 측정되었다. 시화산업단지에서도 주간 평균농도 및 최고농도가 각각 1.85, 3.93 ppb, 야간에 평균 및 최고농도가 각각 0.97, 1.60 ppb로 반월산업단지와 같이 주간이 야간보다 높게 검출되었다. 반월산업단지와 시화산업단지를 비교할 때 반월산업단지에서의 폼알데하이드 농도가 다소 높게 검출되었다. 김¹⁶⁾등의 연구에서도 시화지구의 차단녹지 내

에 설치되어 있는 Open-path FTIR gas analyzer를 이용하여 2003년 8월부터 2004년 6월까지 폼알데하이드의 농도를 측정한 결과 3~4월에 3~5 ppb 범위이고 11월 및 1월에 1.5 ppb 내외이며 그 외는 0.5 ppb 이하의 농도를 나타냈다.

반월 및 시화산업단지의 폼알데하이드 농도를 다른 지역과 비교하기 위하여 폼알데하이드와 아세트알데하이드의 농도비를 적용해 보았는데, 주간 폼알데하이드/아세트알데하이드의 비가 각각 2.14, 1.85, 야간에는 각각 2.89, 0.95로 나타났다. 여¹⁷⁾등의 연구에서 1997년 10월부터 1998년 8월 까지 폼알데하이드의 부친 및 광화문의 연평균 주간농도가 각각 8.86 ± 7.28 , 10.13 ± 8.58 ppb로 측정되었으며, 부친 및 광화문에서 폼알데하이드/아세트알데하이드의 연평균 비는 각각 1.1, 1.3 이었다. 이 농도비는 측정지점의 지역적인 특성 및 자연기원 탄화수소의 광화학 반응 정도를 파악하는데 유용한 지표로 사용 된다¹⁾. 해안지역과 교외지역에서는 자연기원 탄화수소의 대기 중 광산화를 통한 폼알데하이드의 기여가 증가하기 때문에¹⁷⁾이 농도비의 값이 증가하게 된다. 따라서 농도비가 감소하면 인위적인 배출량이 많은 것이라고 할 수 있다.

Table 4. Formaldehyde concentration levels in Ban-Woll·Shi-Hwa industrial complex (April 2006). Unit : ppb

	Ban-Wol			Shi-Hwa		
	Average	Minimum	Maximum	Average	Minimum	Maximum
Day time (n=8)	2.78	0.95	6.20	1.85	0.89	3.93
Night time (n=8)	2.12	0.89	4.42	0.97	0.42	1.60

day time : 10:00 ~ 16:00, night time : 19:30 ~ 23:00

Altshuller¹⁸⁾도 1, 2차 발생원에 따라 생성된 알데하이드의 기여율을 산정한 결과, 폼알데하이드는 1, 2차 발생원에 의한 영향이 유사하게 나타난 반면 아세트알데하이드는 2차 발생원에 의한 영향이 1차 발생원에 의한 영향보다 크게 나타났다. 그러나 반월 · 시화산업단지 등 산업단지에는 표 5에서와 같이 폼알데하이드 등 알데하이드화합물이 배출되므로 폼알데하이드/아세트알데하이드의 비를 일반지역과 비교평가 하기는 어렵다고 사료된다.

반월 및 시화산업단지의 업종 중에서 각종 공정에서 발생할 수 있는 폼알데하이드 농도를 알아보기 위해서 화학업종 10개 사업장을 선정하여 배출구 및 부지경계에서의 농도를 3월, 5월에 각각 1회 측정된 결과 표 5에서와 같이 3월에 배출구의 평균농도 및 최고농도가 각각 29.30, 155.13 ppb, 부지경계에서 평균 및 최고농도가 1.73, 3.63 ppb 이었으며, 5월에는 배출구의 평균농도 및 최고농도가 각각 828.21, 5421.25 ppb, 부지경계에서의 평균 및 최고농도가 각각 7.24, 19.08 ppb로 3월에 비해 상당히 높게 검출되었다. 이는 배출시설의 운영상태 즉 공장 조업상태 와 방지시설의 운영에 따른 제거효율의 차이라고 판단되고, 5월에 배출 최고농도인 5421.25 ppb는 최소감지농도인 500 ppb를 초과 하였으나, 대기환경보전법의 폼알데하이드 배

출기준 (모든 배출시설) 10 ppm 이하였다. 김¹⁵⁾등의 연구에서 2004년 6월부터 10월 까지 반월산업단지 내 37개 사업장에서 폼알데하이드의 배출농도를 측정된 결과 평균, 최저 및 최고 배출농도가 각각 474, 0.27, 32057 ppb 로 업종별로 배출량의 차이를 나타냈다.

IV. 결론

폼알데하이드 분석을 위하여 DNPH cartridge로 유도체 화시켜 LC-MS로 분석하는 방법을 정량화 하였고, 이 분석방법을 이용하여 경기도 반월 및 시화국가산업단지에서 폼알데하이드 농도분포를 조사하였다.

LC-MS 방법에 의한 폼알데하이드 분석을 위해 수행한 연구결과로, 폼알데하이드의 최소검출한계는 0.73 ppb이었으며, 폼알데하이드 표준농도 25 ~ 200 µg/l의 범위에서 직선성 (r²)이 0.9997으로 높은 상관성이 보장되었다. 또한, 폼알데하이드 농도 200 µg/l (n=3)의 상대표준편차가 1.25 %으로 재현성이 우수하였으므로 LC-MS 분석방법을 이용한 폼알데하이드 분석은 효과적인 방법이라고 사료된다.

Table 5. Formaldehyde concentration levels of Chemical Plants in Ban-Woll · Shi-Hwa industrial complex (2006). Unit : ppb

	March			May		
	Average	Minimum	Maximum	Average	Minimum	Maximum
Emission point (n=10)	29.30	0.92	155.13	828.21	7.31	5421.25
Boundary of plant (n=10)	1.73	0.60	3.63	7.24	3.29	19.08

2006년 4월 중 반월 및 시화산업단지에 서의 폼알데하이드 최고농도가 주간에 각각 6.20, 3.93 ppb, 야간에 각각 4.42, 1.60 ppb이었으며, 화학업종에서 배출되는 폼알데하이드의 최고농도가 3월 및 5월에 각각 155.13, 5421.25 ppb, 부지경계에서 각각 3.63, 19.08 ppb이었다.

참고문헌

1. Zhang J., Q. He, and P.J. Liroy, Characteristics of aldehydes : Concentrations, sources, and exposures for indoor and outdoor residential microenvironments, *Environmental Science Technology*, 28(1), 146-152, 1994.
2. WHO, Air quality guidelines for Europe, WHO European Series No 23, Copenhagen, Denmark, 1987.
3. Williams E.L. and Grogjean D., Removal of atmospheric oxidants with annular denuders, *Environmental Science Technology*, 24, 811-814, 1990.
4. Grosjean, E., E.L. Williams II, and D. Grosjean, Ambient levels of formaldehyde and acetaldehyde in Atlanta, Georgia, *J. Air Waste Management Association*, 43, 469-474, 1993.
5. Chang M.B. and C.C. Lee, Destruction of formaldehyde with dielectric barrier discharge plasmas, *Environmental Science Technology*, 29(1), 1428-1430, 1995.
6. Carlier P., H. Hannachi, and G. Mouvir, The chemistry of carbonyl compounds in the atmosphere: A review, *Atmospheric Environment*, 20(11), 2079-2099, 1986.
7. Vairavamrthy A., J.M. Roberts and L. Newman, Sampling of atmospheric carbonyl compounds for the determination by liquid chromatography after 2,4-dinitrophenylhydrazine labeling, sampling and analysis of airborne pollutants, Edited by E.D. Winegar, and Keith, L.H., Lewis Publishers, 150-151, 1993.
8. 황윤정, 박상곤, 백성욱, DNPH 카트리지와 HPLC를 이용한 대기 중 카르보닐 화합물의 농도측정-분석방법의 평가와 실제에의 적용, *한국대기보전학회지*, 12(2), 199-209, 1996.
9. Smith R.G., G.j. Bryan, M. Feldstein, B. Levadie, F.A. Miller, E.R. Stephens, and N.G. White, *Methods of Air Sampling and Analysis*, Edited by Jr., J.P. Lodge, Lewis Publishers Inc., Michigan, 274-278, 1988
10. 황윤정, 박상곤, 백성욱, 공기 중 포름알데히드 측정을 위한 크로모트로판산법과 DNPH/HPLC 방법간의 비교·평가, *한국대기환경학회지*, 14(5), 519-524, 1998.
11. Sirju A.P. and P.B. Shepson, Laboratory and field investigation of the DNPH cartridge for the measurement of atmospheric carbonyl compounds, *Environmental Science Technology*, 29(2), 384-392, 1995.
12. Slemmer J., Determination of volatile

- carbonyl compounds in clean air, Fresenius J. Analytic Chemistry, 340, 672-677, 1991.
13. Suze M. van Leeuwen, Laurens Hendriksen, Uwe Karst, Determination of aldehydes and ketones using derivatization with 2,4-dinitrophenylhydrazine and liquid chromatography-atmospheric pressure photoionization-mass spectrometry, Journal of Chromatography A, 1058, 107-112, 2004.
 14. 조덕희, 송일석, DNPH cartridge/LC-MS 방법에 의한 카르보닐화합물 분석에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 22(2), 201-208, 2006.
 15. 김기현, 최여진, 홍윤정, 사재환, 박종호, 전의찬, 최정렬, 구윤서, 반월공단 내 주요 산업시설물들의 대기배출시설을 중심으로한 주요 악취성분의 배출특성 및 배출원별 악취인자 선별방식에 대한 예비연구, 한국대기환경학회지, 21(2), 215-226, 2005.
 16. 김진용, 이효송, 유재근, 길인섭, 김덕현, 여영우, 시화지구에서 발생하는 VOCs 농도분포 특성 연구, 한국대기환경학회지, 21(6), 613-624, 2005.
 17. 여현구, 조기철, 임철수, 최민규, 선우영, 수도권지역에서 포름알데하이드와 아세트알데하이드의 계절별 발생원 특성, 국대기환경학회지, 18(1), 11-23, 2002.
 18. Altshuller, A.P., Estimating product yields of carbon-containing products from the atmospheric photooxidation of ambient air alkenes, J. atmos. Chem., 13, 131-154, 1991.