

## GC-PDECD를 이용한 공기 중 포름알데하이드의 분석

김 희 갑\*, 박 미 진, 김 만 구

강원대학교 자연과학대학 환경과학과

### Determination of Airborne Formaldehyde Using the Gas Chromatograph-Pulsed Discharge Electron Capture Detector

Hekap Kim\*, Mijin Park and Man Goo Kim

Department of Environmental Science, Kangwon National University,  
Chunchon, Kangwon Do 200-701, Korea

#### ABSTRACT

A gas chromatographic method for the determination of airborne formaldehyde was established. In order to be highly detectable with the electron capture detector, formaldehyde was derivatized to its pentafluorobenzyl oxime form by reacting with *O*-(2,3,4,5,6-pentafluorobenzyl)hydroxylamine hydrochloride (PFBHA) at pH of 4.6 and temperature of 50°C for 1 hour. Air samples were collected into a Tedlar® bag followed by transferring into water contained in two impingers in series. Collection efficiency in the front trap was higher than 90%. Measurement of selected indoor and outdoor air samples showed higher formaldehyde concentrations in indoor air environments and the importance of ventilation for reducing indoor pollution.

**Key words** : air, formaldehyde, gas chromatography, impinger, PFBHA

#### 서 론

시간-활동 패턴(Time-activity pattern)을 고려한다면 포름알데하이드(HCHO, formaldehyde)에 대한 노출은 실내의 공기질에 의해 좌우된다고 할 수 있는데, 이는 대부분의 사람들이 하루 중에서 1시간 이하의 시간을 실외에서 보내고 대부분의 시간은 실내에서 보내기 때문이다(Samet and Spengler, 1991). 게다가 실내 환경 중에서도 가정에서 보내는 시간이 가장 많아 약 70% 이상을 차지하는 것으로 보고되었다.

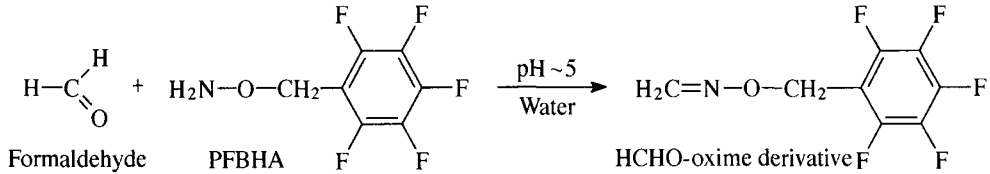
실내 공기 중 포름알데하이드의 주된 배출원에는

흡연, 목재 연소, 요리, 가구용 도료, 합판의 접착제, 의류, 화장품, 단열재 등을 들 수 있다(Pickrell *et al.*, 1983; Feinman, 1988). 반면에, 실외 공기 중 포름알데하이드의 농도는 일반적으로 실내 공기 중에서의 농도보다 훨씬 더 낮은 것으로 알려져 있는데, 주요 배출원에는 가정에서의 연소 과정, 자동차나 트럭에서 사용되는 화석연료의 연소, 배출된 탄화수소의 2차 광화학반응 등을 들 수 있다(Shah and Singh, 1998).

포름알데하이드는 눈, 코, 목구멍 등에 자극을 주며, 기침, 가래, 현기증, 구토 등을 유발하고(Ritchie and Lehnen, 1987; Godish *et al.*, 1990), 또한 폐와 비인강 부분에 암을 유발하는 물질로 추정되고 있다(IARC, 1995). 또한 포름알데하이드에 대한 노출은 어린아이들에게 있어서는 아토피와도 연관

\* To whom correspondence should be addressed.

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



**Fig. 1.** The reaction of formaldehyde with PFBHA [*O*-(2,3,4,5,6-pentafluorobenzyl)hydroxylamine] at pH of approximately 5 in water yields a formaldehyde-oxime derivative, which is highly sensitive in the electron capture detector.

성이 있는 것으로 보고되었다 (Garret *et al.*, 1999).

공기 중의 포름알데하이드에 대한 채취 및 분석 방법은 사용하는 분석기기에 따라 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 일반적으로 널리 사용되는 것은 DNPH (2,4-dinitrophenylhydrazine)로 코팅된 Sep-Pak C18 cartridge에 펌프로 공기 시료를 채취함으로써 hydrazone 형태의 유도체를 만든 후 acetonitrile로 추출하여 HPLC-UV로 분석하는 방법이다 (Zhou and Mopper, 1990; Zhang *et al.*, 1994).

또한 최근에 들어서는 증류수가 들어있는 임핀저 (impinger)에 공기를 빨아들인 후에 PFBHA [*O*-(2,3,4,5,6-pentafluorobenzyl)hydroxylamine hydrochloride]를 첨가하여 oxime 유도체를 만들어 GC-MS나 GC-ECD로 분석하는 방법이 보고되었다 (Lacheur *et al.*, 1993; Yu *et al.*, 1995). 이 방법은 HPLC-UV를 이용하는 방법에 비해 더 낮은 농도까지 분석할 수 있으며 모세관 칼럼을 이용하여 분리하기 때문에 포름알데하이드 이외의 다른 carbonyl 화합물들을 동시에 분석하고자 할 경우에는 더 효과적으로 분리할 수 있는 장점이 있는 것으로 알려져 있다.

이 연구에서는 증류수가 들어있는 임핀저에 공기 시료를 채취한 후 PFBHA 수용액을 첨가하여 포름알데하이드의 oxime 유도체를 만드는 방법을 최적화시킨 후 GC-PDECD (Pulsed Discharge Electron Capture Detector, Valco)로 분석하는 방법을 확립하였다. 그리고 확립된 분석법을 이용하여 일부 실내의 대기 환경 중의 포름알데하이드 농도를 비교하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 시약 및 재료

공기 시료 채취에 사용된 물은 강원대학교 캠퍼

스 내의 지하수였고, formaldehyde 수용액 (formalin, 37%)과 유도체를 만들기 위한 시약인 PFBHA는 Fluka에서 구입하였다. pH 4.6의 완충용액을 만들기 위해 사용된 acetic acid 및 NaOH와 내부표준물질로 사용된 decafluorobiphenyl은 Aldrich사의 것을 사용하였다. 임핀저는 (주)한일랩테크에서 제작한 30 mL 용량의 것을 사용하였으며, Tedlar® bag은 SKC사의 것을 사용하였다. 펌프는 두 종류를 사용하였는데, 임핀저에 채취시에는 (200 mL/min) SKC사의 것을, Tedlar® bag에 채취시에는 (1.9 L/min) A.P. Buck사의 것을 사용하였다.

### 2. 유도화 반응 온도 및 시간

포름알데하이드의 oxime 유도체를 만드는데 있어서 반응온도와 시간을 점검하였다. 2 mg/mL의 농도로 제조된 PFBHA 수용액 1 mL를 일정한 양의 표준물질이 함유된 15 mL의 물에 주입한 후 50°C에서 1시간 및 4시간, 25°C (상온)에서는 2시간 및 24시간 동안 방치한 후 hexane으로 추출하여 GC-PDECD로 분석하여 얻은 크로마토그램의 면적을 서로 비교하였다.

### 3. Tedlar® bag 내에서 formaldehyde의 안정성

포름알데하이드의 Tedlar® bag 내에서의 안정성을 시험하기 위해 지하수를 임핀저에 넣은 후 공기 시료를 직접 채취한 것과 먼저 Tedlar® bag에 공기를 채취한 후 임핀저에 옮겨 분석하였을 때에 측정된 농도를 서로 비교하였다. 이를 위해 지하수 15 mL가 들어있는 임핀저 두 개를 나란히 연결하고 200 mL/min의 유속으로 작동되는 펌프와 연결하되 펌프에 물이 유입되는 것을 방지하기 위해 중간에 트랩을 설치하였다. 그리고 같은 장소에

서 동시에 같은 유속으로 10 L 용량의 Tedlar® bag 에 공기 시료를 채취한 후 실험실로 운반하여 1 시간 이내에 임핀저 두 개에 공기 시료를 옮겼다. 시료 채취 시간은 실내(가정: 고농도)의 경우에 25분, 실외(강원대학교 캠퍼스: 저농도)에서는 45 분 동안 채취하여 임핀저로 직접 채취한 경우와 Tedlar® bag에 채취한 후 임핀저에 옮겼을 경우를 서로 비교하였다.

#### 4. 매질에 PFBHA 첨가 유무에 따른 채취 효율

포름알데하이드는 도처에 있기 때문에 배경 농도가 최소인 물을 임핀저에 넣어 시료 채취에 사용하기 위해 강원대학교 캠퍼스 내의 지하수, 시판되는 여러 회사의 물 및 실험실에서 제조된 증류수에 대하여 PDECD에서의 반응을 비교하여 가장 낮은 면적을 나타낸 지하수를 매질로 선택하였다. 그리고 매질로 물만 사용하여 공기 시료를 채취한 후 유도체를 만들어 분석하였을 경우와, 매질에 PFBHA와 sodium acetate 완충용액(pH 4.6) 0.5 mL를 첨가하여 공기 시료를 채취하였을 때 앞의 임핀저에서의 채취 효율을 서로 비교하였다.

#### 5. 일부 실내외 공기 시료 채취 및 분석

실내 공기 시료는 강원대학교 인근의 PC방 및 음식점 각각 세 곳, 춘천 시내 중심에 위치한 지하상가 세 곳, 그리고 아파트 다섯 곳에서 각각 채취하였다. 또한 자동차 운전 시간에 따른 차내 포름알데하이드의 농도 변화를 알아보기 위하여 자동차 문을 닫은 채 강원대학교 캠퍼스 내의 도로를 주행하면서 주행 전, 주행 후 10분, 그리고 20분 경과 후 공기 시료를 채취하였다. 실외 공기 시료는 강원대학교에 인접한 세 곳, 춘천 시내 중심 세 곳, 그리고 도심지에서 약 4 km 정도 떨어진 외곽지역 세 곳 등 모두 아홉 곳에서 채취하였다.

모든 공기 시료는 1.9 L/min의 유속으로 5분 동안 Tedlar® bag에 채취하였으며, 광화학반응에 의한 농도 변화를 줄이기 위하여 채취한 시료는 빛으로부터 차단되었고 실내외 시료를 서로 비교하기 위하여 모든 시료는 유사한 시간대인 오후 7 시에서 9시 사이에 채취하였다.

#### 6. 시료의 분석 방법

임핀저에 함유된 물에 채취된 시료 15 mL에 pH 4.6의 sodium acetate 완충용액 0.5 mL를 넣고, oxime 유도체를 만들기 위해 PFBHA (2 mg/mL) 수용액 1 mL를 첨가하였다. 그리고 50°C의 수욕조에서 1시간 동안 방치한 후 상온으로 냉각시켰다가 진한 황산 0.3 mL를 주입하여 반응을 종결시켰다. 약 5분 정도 기다린 후 내부표준물질인 decafluorobiphenyl이 함유된 hexane 3 mL와 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 g을 넣은 후 손으로 격렬하게 흔들어 주었다. 두 층이 분리될 때까지 기다린 후 상층액 1 µL를 GC/PDECD로 분석하였다. 농도는 앞의 임핀저와 뒤의 임핀저에서 측정된 값을 더하여 계산하였다.

분석에 사용된 칼럼은 HP-5 (30 m × 0.32 mm × 0.32 µm)이었고 운반기체로는 He을 사용하였으며 유속은 약 1.0 mL/min이었다. 주입구 및 검출기의 온도는 각각 200 및 280°C이었다. 온도 프로그래밍은 초기 90°C에서 3분 동안 머물다가 15°C/min로 150°C까지 상승한 후에 다시 40°C/min로 260°C까지 올려준 후 10분 동안 유지하였다. 시료 하나에 대한 크로마토그램은 Fig. 2에 나타내었다. 20~550 ng의 범위에서 작성된 검량선의 결정계수( $r^2$ )는 0.9981이었고(Fig. 3), 추정된 방법검출한계는 약 0.2 µg/m<sup>3</sup>이었다.

Tedlar® bag에 질소 가스 약 8 L를 넣고 포름알데하이드의 표준용액을 주입하여 충분히 확산시킨 후에 30분 동안 200 mL/min의 유속으로 채취

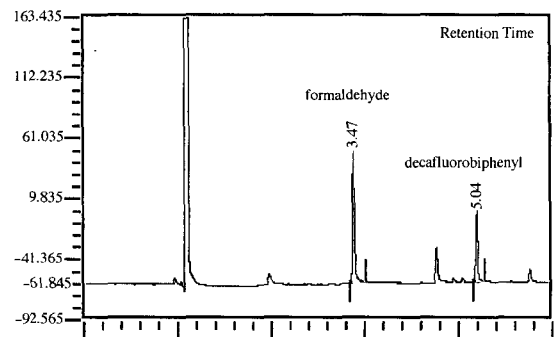


Fig. 2. A chromatogram of an air sample showing formaldehyde and decafluorobiphenyl (the internal standard) at retention times of 3.47 and 5.04, respectively.

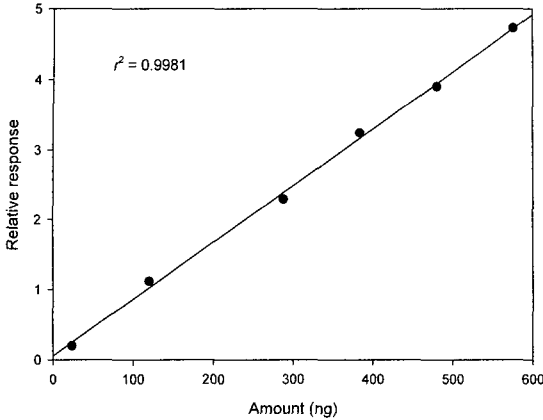


Fig. 3. A calibration curve of formaldehyde.

하고 분석해 계산한 회수율은 96~120%이었다.

## 결과 및 고찰

### 1. 유도화 반응 온도 및 시간

포름알데하이드를 PFBHA로 oxime 유도체를 만들 때 반응 온도와 시간에 따른 GC 면적을 서로 비교하였다. 50°C에서 1시간 동안 반응시켰을 경우에 가장 높은 농도를 나타내어 (Fig. 4) 공기 시료 분석에 있어서 이 조건을 채택하였다.

한편 Lacheur 등(1993)은 PFBHA로 유도체를 만들 때 pH 7 phosphate 완충용액 (이 연구에서는 pH 4.6 sodium acetate 완충용액)을 첨가한 후에 상온에서 24시간 방치하였다. 그러나 다른 온도, 반응시간 및 pH 조건에 대해서는 언급하지 않았다. Yu 등(1995)도 유사한 조건하에서 유도체를 만들었으나 염산으로 pH 2에 맞춘 후 반응시켰다. 반면에 Kobayashi 등(1980)은 pH를 언급하지 않은 상태에서 PFBHA를 첨가한 후 상온에서 40분 동안 반응시켰고 추출 용매로 hexane 대신 ethyl acetate를 사용하였다. 이 연구에서의 pH 4.6은 oxime 유도체가 만들어질 때 반응속도가 가장 빠른 조건으로 알려져 있기 때문에 선택하였고, 다른 pH 조건하에서는 실험하여 비교하지 않았다.

### 2. Tedlar® bag을 이용한 시료 채취

Fig. 5는 현장에서 높은 농도와 낮은 농도에 대

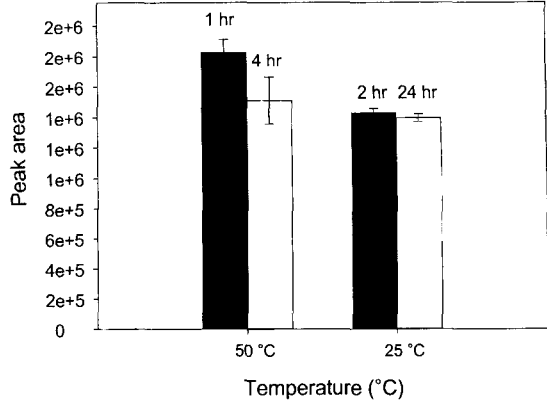


Fig. 4. Comparison of gas chromatographic responses of the formaldehyde oxime according to reaction temperature and time. Reaction temperature of 50°C and time of 1 hour were chosen for the derivatization of formaldehyde to its oxime compound in the analysis.

해 직접 임핀저로 채취한 것과 Tedlar® bag에 일차 채취한 후 1시간 이내에 다시 임핀저로 옮겨 분석한 결과로, 높은 농도에 대해서는 거의 동일한 농도로 측정되었으며 (80.9 vs. 80.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 낮은 농도에 대해서도 약 15%의 차이만을 나타내었다. 그러므로 Tedlar® bag에 채취된 시료는 임핀저에 옮기기 전에 화학적으로 안정한 것을 알 수 있었다.

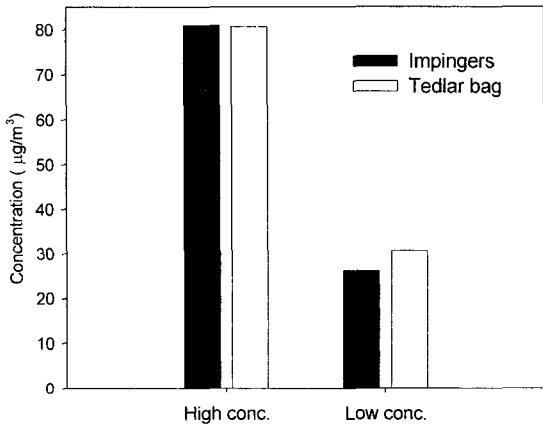
### 3. 매질에 따른 채취 효율 비교

두 개의 나란히 연결된 임핀저에 물만 넣어 채취한 후 PFBHA로 유도체를 만들어 분석한 경우와 물에 PFBHA를 첨가하여 pH 4.6으로 유지된 상태에서 공기 시료를 채취하면서 유도체를 만들어 분석한 경우를 비교한 결과 전자의 경우에는 앞의 임핀저에서 90~95%, 후자의 경우에는 73~82%의 채취 효율을 나타내어 물만을 매질로 사용하는 것이 더 효율적임을 알 수 있었다.

이는 공기 중의 포름알데하이드가 물 속에서 대부분이 (99.9%) 수화되어 gem-diol인  $\text{CH}_2(\text{OH})_2$ 의 상태로 존재하여 극성이 커짐에 따라 물에 대한 용해도가 매우 높아지기 때문인 것으로 설명할 수 있다.

#### 4. 일부 대기 중 포름알데하이드의 농도 비교

일부 실내 공기 시료 채취 지점에 대한 설명과 측정된 농도를 Table 1에 나타내었다. 전체 실내 공기 시료 중 가장 높은 농도(80.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 65.7 ppb)를 나타낸 PC방 1의 경우 창문이 없는 상태에서 환기가 거의 이루어지지 않았고 많은 흡연



**Fig. 5.** Comparison of measured formaldehyde concentrations between direct sampling into two impingers in series and sampling into a Tedlar bag followed by transferring into impingers.

자들로 인해 공기가 뿌옇게 보일 정도였다. 음식점은 평균 24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (19.6 ppb) 정도로 낮았는데 이는 세 음식점 모두 환기가 잘 이루어지고 있었기 때문이라고 생각한다. 지하상가에서 측정된 농도는 평균 40.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (32.9 ppb)으로 김윤신과 김미경 (1989)이 서울 지역의 지하상가에서 측정된 평균 농도인 122 ppb의 약 1/4 수준이었다. 이는 지역적인 차이 이외에도 인근에 설치된 환기장치가 효율적으로 작동되고 있었기 때문으로 생각된다.

아파트의 경우에는 건축시기 뿐만 아니라 실내 활동 및 환기 상태에 따라 농도가 크게 좌우됨을 알 수 있었다. 아파트 1의 경우 87.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (71.1 ppb)으로 다른 아파트에 비해 높은 농도를 나타내었는데, 시료 채취전 뿐만 아니라 채취 동안에 환기가 이루어지지 않고 있었고 주방에서는 도시가스를 이용하여 찌개 요리를 하고 있었으며 동시에 수돗물로 설거지를 하고 있었다. 따라서, 연소과정과 더불어 수돗물에서 배출된 포름알데하이드가 (Krasner *et al.*, 1989) 실내 공기 중에서의 높은 농도를 나타내었으리라고 볼 수 있다. 또한, 창문을 닫은 상태에서 자동차를 주행함에 따라 포름알데하이드의 농도가 점차 증가하여 장시간 운전자는 시간에 따라 포름알데하이드에 대한 노출이 증가됨을 알 수 있었다.

**Table 1.** Descriptions of indoor sampling sites and measured formaldehyde concentrations

	Site	Site descriptions	Concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ppb)
PC room	1	No windows; many smokers; poorly ventilated	80.6 (65.7)
	2	Windows open; several smokers	24.1 (19.6)
	3	Underground; poorly ventilated	41.0 (33.4)
Restaurant	1	Windows and door open	25.0 (20.4)
	2	Windows open; no smokers	22.9 (18.7)
	3	Windows and door open	24.1 (19.6)
Underground shopping center	1	Clothing store	42.7 (34.8)
	2	Shoe store	47.3 (38.5)
	3	Underground parking lot	31.1 (25.3)
Apartment	1	Built 2 years ago; cooking; poorly ventilated	87.2 (71.1)
	2	Built 2 years ago; well ventilated	37.6 (30.6)
	3	Built 10 years ago, windows open	30.0 (24.4)
	4	Built 15 years ago, poorly ventilated	51.7 (42.1)
	5	Built 10 years ago, cooking, poorly ventilated	56.8 (46.3)
Automobile (Sephia, 1996)		Before driving	31.3 (25.5)
		10 minute driving	45.0 (36.7)
		20 minute driving	50.4 (41.1)

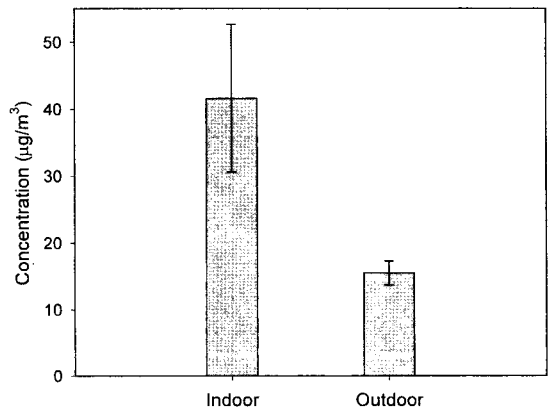
**Table 2.** Descriptions of outdoor sampling sites and measured formaldehyde concentrations

	Site	Site descriptions	Concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ppb)
Campus areas	1	Natural Sciences Building	13.2 (10.8)
	2	Mirae Square	14.1 (11.5)
	3	Front of the Kangwon National University back gate	23.4 (19.1)
Downtown areas	1	Front of the Chunchon City Hall	16.4 (13.4)
	2	Myung Dong	15.4 (12.6)
	3	Cinema	16.8 (13.7)
Rural areas	1	Shin Dong; fruit farms located nearby	21.4 (17.4)
	2	Mannchon Ri; agricultural fields adjacent	8.1 (6.61)
	3	Jinae Ri; agricultural fields and mountains	10.9 (8.88)

실외 공기 중에서의 농도를 비교해 보면 시료 채취 지점에 따라 큰 차이를 보이지 않았다 (Table 2). 시내 중심 지점에서의 농도가 나머지 다른 두 지점보다 농도가 더 높을 것으로 예상되었지만, 강원대학교 캠퍼스 인근의 지역은 음식점이 밀집해 있고 교통량이 많으며, 많은 보행자들이 흡연을 하여 지역적으로 포름알데하이드의 배출량이 비교적 많았기 때문이라고 생각된다. 시골 외곽 지역에서의 포름알데하이드는 자연적인 배출물질인 isoprene의 광산화에 주로 기인한 것으로 판단된다. 그렇지만, 이 밖에도 실외 공기는 기온, 습도, 풍향 및 풍속 등 여러 가지의 기상 인자들에 의해서도 영향을 받기 때문에 어느 한 요인에 의해 지배를 받았다고 단정할 수는 없다.

실내 공기와 실외 공기 중 포름알데하이드의 농도를 종합하여 서로 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 실내 공기 중에서의 농도가 실외 공기보다 더 높게 나타났으며 5%의 유의수준에서 통계적으로도 유의한 차이를 나타내었다 ( $p$ -값 0.025).

포름알데하이드는 수용성이 강해 빗물 뿐만 아니라 안개수 중에서도 검출된다. Adachi와 Kobayashi (1996)는 1992년에 일본 고베시의 세 지점에서 빗물 중의 농도를 4-amino-3-hydrazino-5-mercapto-1,2,4-triazole 시약을 사용하여 비색법으로 측정하여 최저 0.001 mg/L에서 최고 0.180 mg/L까지 검출되는 것으로 보고하였다. 안개 및 구름 중에서 포름알데하이드는 낮은 pH의 조건하에서 hydroxymethanesulfonate [ $\text{CH}_2(\text{OH})\text{SO}_3^-$ ]의 형태로도 존재하는 것으로 밝혀졌고 (Munger *et al.*, 1986), Ang 등 (1987)은 빗물과 눈 중의 포름알데하이드의 농도를 유리된 형태 (free form, 수화된



**Fig. 6.** Formaldehyde concentrations between indoor and outdoor air environments were significantly different at 5% level of significance with a  $p$ -value of 0.025.

HCHO)와 hydroxymethanesulfonate 형태로 구분하여 분석하기도 하였다.

따라서 이 연구에서 확립된 분석 방법은 공기 시료 뿐만 아니라 수돗물, 빗물, 구름, 안개 등의 다양한 종류의 매질에 존재하는 포름알데하이드 뿐만 아니라 기타 carbonyl 화합물 (aldehyde 및 ketone 화합물)의 분석에도 응용할 수 있을 것으로 생각된다.

## 결론

이 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다. 포름알데하이드를 분석하기 위한 조건은 빠른 반응을

위하여 pH 5 정도에 맞춘 후에 약간 가열해 주면서 (50°C) 1시간 동안 방치하였을 때 시험한 조건 하에서 최고의 크로마토그램 반응(면적)을 나타내었다. 임핀저로 직접 시료를 채취해도 되지만, 단시간에 걸쳐 많은 시료를 채취하여 시간에 따른 농도 변화를 알고자 할 경우에는 Tedlar® bag에 우선 시료를 채취한 후에 임핀저로 옮겨 분석할 수 있다. 일부 공기 시료에 대하여 분석한 결과, 실외에서의 농도에 비해 실내 공기 중의 포름알데하이드의 농도가 유의하게 높은 것으로 나타났고, 실내 공기 중에서의 농도는 배출량 못지 않게 환기 상태에 따라 크게 달라진다는 것을 알 수 있었다. 여기에서 확립된 분석 방법은 수도물 및 안개수 중 포름알데하이드의 농도를 측정하는 데에도 응용될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-309-001-3)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- 김윤신, 김미경. 실내외 포름알데히드 농도에 관한 조사 연구. 한국환경위생학회지 1989; 15: 1-9.
- Adachi, A and Kobayashi, T. Formaldehyde levels in rain water from Kobe City in Japan. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 1996; 57: 556-559.
- Ang, CC, Lipari, F and Swarin, SJ. Determination of hydroxymethanesulfonate in wet deposition samples. Environ. Sci. Technol. 1987; 21: 102-105.
- Feinman, SE. Formaldehyde Sensitivity and Toxicity. Boca Raton, FL, CRC Press, 1988.
- Garret, MH, Hooper, MA, Hooper, BM, Rayment, PR and Abramson, MJ. Increased risk of allergy in children due to formaldehyde exposure in homes. Allergy 1999; 54: 330-337.
- Godish T., Zollinger, TW and Konopinski, V. Residential formaldehyde. Increased exposure levels aggravate adverse health effects. J. Environ. Health 1990; 53: 34-37.
- IARC. International Agency for Research on Cancer. Wood Dust and Formaldehyde. IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans. Vol. 62, Lyon: International Agency for Research in Cancer. 1995.
- Kobayashi, K, Tanaka, M and Kawai, S. Gas chromatographic determination of low-molecular-weight carbonyl compounds in aqueous solution as their *O*-(2,3,4,5,6-pentafluorobenzyl) oximes. J. Chromatogr. 1980; 187: 413-417.
- Krasner, SW, McQuire, MJ, Jacangelo, JG, Patania, NL, Reagan, KM and Aieta, EM. The occurrence of disinfection by-products in US drinking water. J. AWWA 1989; 81: 41-53.
- Lacheur, RML, Sonnenberg, LB, Singer, PC, Christman, RF and Charles, MJ. Identification of carbonyl compounds in environmental samples. Environ. Sci. Technol. 1993; 27: 2745-2753.
- Munger, JW, Tiller, C and Hoffmann, MR. Identification of hydroxymethanesulfonate in fog water. Science 1986; 231: 247-249.
- Pickrell, JA, Griffs, LC, Mokler, BV, Vanapilly, GM, and Hobbs, CH. Release of formaldehyde from various consumer products. Environ. Sci. Technol. 1983; 17: 753-764.
- Ritchie, IM and Lehnen, RG. Formaldehyde-related complaints of residents living in mobile and conventional homes. Am. J. Public Health 1987; 14: 635-657.
- Samet, JM and Spengler, JD. Indoor Air Pollution. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1991.
- Shah, JJ and Singh, HB. Distribution of volatile organic chemicals in outdoor and indoor air. Environ. Sci. Technol. 1998; 22: 1381-1388.
- Yu, J, Jeffries, HE and Lacheur, RML. Identifying airborne carbonyl compounds in isoprene atmospheric photooxidation products by their PFBHA oximes using gas chromatography/ion trap mass spectrometry. Environ. Sci. Technol. 1995; 29: 1923-1932.
- Zhang, J, He, Q and Liroy, PJ. Characterization of aldehydes: concentrations, sources, and exposures for indoor and outdoor residential microenvironments. Environ. Sci. Technol. 1994; 28: 146-152.
- Zhou, X and Mopper, K. Measurement of sub-parts-per-billion levels of carbonyl compounds in marine air by a simple cartridge trapping procedure followed by liquid chromatography. Environ. Sci. Technol. 1990; 24: 1482-1485.