

# 확산포집기로 공기중 ppb 농도수준의 휘발성유기물질 포집시 확산길이와 기류변화가 시료포집속도에 미치는 영향

변상훈<sup>‡</sup> · 톰 스톡<sup>1)</sup> · 마리아 모란디<sup>1)</sup> · 아프샤<sup>1)</sup> · 제이 크로스<sup>1)</sup>

고려대학교 병설 보건대학, 텍사스대학 공중보건학교실<sup>1)</sup>

## The effects of face velocity and path length on the uptake rates of volatile organic compounds measured by diffusive samplers

Sang-Hoon Byeon<sup>‡</sup> · Thomas H. Stock<sup>1)</sup> · Maria T. Morandi<sup>1)</sup> · Masoud Afshar<sup>1)</sup> · Jay Cross<sup>1)</sup>

Dept. of Environmental Sanitation, College of Health Sciences, Korea University, Seoul, Korea  
University of Texas-Houston, Health Science Center, School of Public Health, TX, USA<sup>1)</sup>

Passive samplers have been used for personal, indoor, and outdoor air monitoring of VOCs at ppb concentrations in community and office environments. The path length of modified passive sampler was shortened, so it was intended to increase an uptake rate.

The performance of the modified 3M 3500 organic vapor monitor(OVM) as a tool for assessing exposures to toxic air pollutants in nonoccupational community environments was evaluated using combined controlled test atmospheres of six selected target volatile organic compounds(VOCs): benzene, methyl tert-butyl ether(MTBE), chloroform, 1,4-dichlorobenzene, tetrachloroethylene, and toluene. The experiments were conducted by exposing the dosimeters to concentrations of 50~100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  on six face velocity(0.00, 0.02, 0.06, 0.12, 0.20, 0.30 m/sec) for 24 hours.

If the uptake rate was increased, that means that we could use the passive sampler more effectively. The uptake rates were increased linearly according to reduce the path length.

Although the diffusion path length was shortened, the change of uptake rate was within  $\pm 25\%$  of theoretical value, indicating that the modified passive sampler(TM) can be effectively used over the range of concentrations and environmental conditions tested with a 24-h sampling period if the face velocities were over 0.12 m/s for 6 components of VOCs. But when the face velocities were less than 0.12 m/s, uptake rates were reduced more than expected values. So, the passive sampler with the shortened path length should be used at indoor or outdoor environment where the face velocity should be over about 0.10 m/s. If the path length was shortened more, the uptake rate was more effected by starvation.

**Key Words :** Diffusive(passive) sampler, Volatile organic compounds(VOCs), Face velocity, Path length, Uptake rate

## I. 서 론

활성탄관을 이용하여 제조한 확산포집

기(또는 수동형 시료채취기)는 원래 ppm 농도수준에서 15분에서 8시간 정도의 포집시간을 가지고 휘발성유기용제에 대한

근로자의 노출을 측정하기 위해 개발되었다. 근래에는 이러한 포집기는 1일부터 8주동안에 걸친 시료포집시간을 가지고 지역 사회와 사무실환경에서 ppb 농도수준에서 휘발성유기물질(Volatile Organic Compounds, 이하 VOCs)에 대한 개인, 실내, 실외 공기를 모니터링하는데 이용되고 있다.

\* 본 연구는 1998년 과학재단에서 후반기 연수자로 선정된 해외 Post-Doc. 연수과정에서 연구한 것임.

접수일 : 2000년 12월 4일, 채택일 : 2001년 3월 21일

‡ 교신저자 : 변상훈(서울 성북구 정릉동 산 1번지 고려대학교 병설 보건대학 환경위생과

Tel : 02-940-2860, Fax : 02-943-5304, E-mail : bsh@korhealth.ac.kr)

Zabiegata(1999)에 의하면 성인은 매일 대략적으로 집에서 60%, 일터에서 30%, 이동에 5% 그리고 밖에서는 단지 3% 만 지낸다고 한다. 위의 수치는 실내공기질 (IAQ)이 인간의 건강과 삶의 질에 영향을 미칠 수 있다는 것을 나타낸다. Zabiegata (1999)는 자체적으로 제작한 확산포집기를 가지고 실내공기질의 유기물질 측정에 있어 능동포집법과 비교를 한 결과 통계적으로 비슷한 결과를 보여주어 대치사용의 가능성을 제시하였다. 하지만 Coutant 등(1982)은 확산포집기로 실내공기질의 유기용제를 측정할 경우 유기용제의 농도가 워낙 낮게 나오기 때문에 성분에 따라서 검출한계이하로 나오는 수도 있으며 또한 활성탄 자체의 미량의 오염으로 인하여 방법검출한계(Method Detection Limit, MDL)값이 높아져서 검출력의 약화를 초래하므로 확산포집기의 사용은 신중하게 하여야 한다고 지적하였다.

Osten 등(1992)은 3M 3500 Organic Vapor Monitor(이하 OVM)와 Pro-Tek 모델 G-AA를 10종의 VOCs에 대해 50~5000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도와 23-28  $^{\circ}\text{C}$ 에서 습도 26-30 %, 51-53% 그리고 90% 상대습도에서 그리고 0.01, 0.05 그리고 1.8 m/s의 면속도에서 24시간동안 실험한 결과 비록 실험적으로 유도한 시료포집속도와 3M에서 제시된 시료포집속도와는 어느정도 차이는 있었지만 펌프를 이용한 활성탄관법과 상관관계가 양호한 것으로 보고하였다. 또한 같은 연구자는 3M 3500 OVM을 가지고 VOCs에 대하여 10, 25, 36  $^{\circ}\text{C}$  그리고 20 과 90 %RH의 조건에서 50, 250, 1000, 그리고 5000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도에서 활성탄관법과 비교하였을 경우 정밀도가 우수하였으며 90-110 %의 회수율을 가지는 것으로 보고하였다. 이 실험에서 면속도의 변화에 따라 관찰된 어떤 영향도 없었으나 반면에 온도의 증가는 약간의 시료채취속도의 증가를 가져왔으며, 습도의 증가는 어느 정도의 시료채취속도의 감소를 가져오는 것으로 나타났다(Chung 등, 1999).

한편 Shields와 Weschler(1987)는 3M 3500 OVM이 전화국과 정보처리실의 실내공기질을 모니터링하는데 있어 좋은 재

현성과 민감도를 보여 주었다고 보고하였다. 그들은 여기서 최소한 시료채취를 하기 위하여 면속도가 0.017 m/s 이상이 되어야 한다고 하였다. 그러나 확산 길이에 따른 기류의 영향을 실험한 자료는 보고되지 않았다.

그리고 Cao와 Hewitt(1991)는 실내와 대기공기중 낮은 농도의 VOCs를 측정하기 위한 확산 포집기 응용을 검토하였다. 그들은 분석의 정량한계를 높이기 위하여 뱃지타입의 확산 포집기의 시료채취속도를 증가시킬 수 있도록(확산길이의 감소를 통하여) 디자인 되어야 한다고 제안하였다.

Morandi와 Stock(1997)은 실험 결과 실내외의 24시간 측정에 있어 여러 가지 VOCs가 방법검출한계(Method Detection Limits, MDL) 이하로 나타났다. 따라서 그들은 적절한 폭로 분포를 알기 위하여 목표로 한 VOCs의 많은 성분들에 대하여 48시간 시료채취가 필요함을 제기하였다. 그러나 만일 시료채취기의 확산 길이를 반으로 한다면, 시료채취속도는 두배로 될 것이고 따라서 이렇게 수정한 시료채취기는 24시간 시료채취에 대하여 사용될 수 있을 것임을 제기하였다.

본 연구의 목적은 공기중 ppb 농도 수준의 일부 VOCs에 대하여 3M 3500 OVM을 이용한 확산 길이와 기류의 변화에 따른 시료포집속도의 변화를 알아보고자 하였다. 특히 이 실험을 통하여 확산포집기의 확산길이가 짧아 짐에 따라 기류의 영향을 얼마나 받는지 알고자 하였으며 이러한 실험을 통하여 얻은 자료는 일반 작업환경뿐만 아니라 실내공기 오염등 광범위하게 사용할 수 있는 보다 적합한 확산포집기의 개발에 이용될 수 있으리라 생각된다.

## II. 실험방법

하나의 확산길이와 하나의 흡착웨이퍼를 가지는 3M 3500 OVM에 대한 수정은 두가지 단계로 하였다. 처음에는 확산길이는 차콜웨이퍼뒤에 2.0, 4.3, 5.1, 6.2 cm

두께의 특별히 제작된 고체 테프론 디스크를 넣어 짧게 하였다. 그리고 웨이퍼를 지탱하는 지지 링은 더 짧아진 확산길이에 맞추기 위하여 약간 짧게 하였다. 그리하여 테프론 디스크를 넣지 않은 것과 3M 3520을 이용하여 확산길이가 20 mm가 되게 한 것을 포함하여, 3.8, 4.9, 5.7, 8.0, 10.0, 20.0 mm의 확산 길이가 되도록 하였다. 여기서 확산 경로를 원활히 하기 위하여 확산포집기 내의 중간 턱을 없앴다.

두 번째로 뱃지의 원래 바람막이는 포집기를 열 때 쉽게 손상되고 다시 마개를 할 때 원래의 형태로 돌아가지 않기 때문에 테프론 필터(37 mm, Gelman 2 $\mu\text{m}$ , PTFE membrane)로 대체하였다. 이러한 타입의 필터는 알데히드를 위한 확산포집기를 위한 바람 막으로서 만족스럽게 평가되었다(Grosjean과 Williams, 1992). 각 4 개씩의 포집기를 폭로 챔버 내에 넣어서 총 여섯 종류의 면속도(0.00, 0.02, 0.06, 0.12, 0.20, 0.30 m/sec)에서 평가하였다.

실험용 휘발성물질은 실내 공기중 VOCs로 많이 검출되는 벤젠, 톨루엔, 클로로포름, 1,4-디클로로벤젠(1,4-dichlorobenzene), 메틸 tert-부틸에테르(methyl tert-butylether, MTBE), 테트라클로로에틸렌(tetrachloroethylene)을 대상으로 하였다.

대상성분의 선택에 대한 근거와 평가를 위해 특별히 제작한 동적챔버시스템에 대한 것은 그림 1과 같았다. 각 휘발성물질은 일정한 온도로 유지되는 오일통(oil bath)에 유리관을 장치하고 그 속에 퍼미에이션 관(permeation tube)을 장치하여 발생시켰다. 그리고 폭로챔버내에서는 각 0.0, 0.02, 0.06, 0.12, 0.20, 0.30 m/sec 인 면속도에서 50~100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (약 7~31 ppb)의 농도와 실내온도와 습도(25 $\pm$ 3  $^{\circ}\text{C}$ , 55 $\pm$ 5 % RH)에서 여섯 개씩의 확산포집기를 동시에 24시간 동안 폭로시켰다. 확산포집기는 테프론 재질의 회전 봉에 연결된 테프론 원형절이에 수직으로 위치시켰다. 면속도는 기본 기류를 거의 흐르지 않게 하고 확산포집기가 매달린 회전 봉을 모터로 돌리는 속력으로 상대적으로 얻었다. 그리고 그림 1에서와 같이 능동포집

법으로 활성탄관법을 이용한 NIOSH '공정시험법 1500'을 이용하여 폭로챔버의 유기용제 농도를 활성탄관(SK, Charcoal tube, USA)으로 지속적으로 측정하였으며 이 농도를 기준으로 하여 Byeon등(1997)이 발표한 논문에서와 같은 방법으로 시료포집속도(uptake rate)를 계산하였다.

그리고 확산길이 5.7 mm이고 바람막이로서 테프론 막을 사용한 것을 TM (Total Modified)이라 하고, 기존의 확산길이 10 mm인 3M OVM을 그대로 이용한 것을 UM(Unmodified) 이라고 하여 기류의 변화에 따른 시료포집속도의 변화를 알아보았다.

#### 추출

1.5 mL CS<sub>2</sub> 단독(Cohen 등, 1990) 대신에 부피 비로 2:1로 아세톤(glass distilled, Catalogue #: AX0116-1; EM Science, Gibbstown, NJ)과 CS<sub>2</sub>(99.9+% redistilled, Catalog #: 42464-1; Sigma-Aldrich Chemical Co. Inc., Milwaukee, WI) 1 mL로 추출하였다. 추출용매 조성과 부피에 관한 것은 Chung등(1999)이 한 것을 이용하였다. 4-bromofluorobenzene 25,000 µg/mL 표준용액(Supelco, Inc., Bellefonte, PA)으로부터 200 µg/mL 용액을 최종 농도가 5 µg/mL가 되도록 탈착효율시험용(surrogate)으로 첨가하였다. 추출용액은 매 분석시마다 새롭게 만들어 사용하였다.

추출공정 방법 중 추출동안에 용매와 용질의 손실을 줄이기 위해 수정하였다. 3500 OVM안의 활성탄 막층을 분리하여 2 mL 갈색 바이알에 넣고 1.0 mL의 추출용액을 넣었으며 그리고 바이알은 Teflon 처리된 마개로 막았다. 활성탄 막은 40분동안 약간의 열을 첨가하여 15~18 °C로 유지된 물속이 들어있는 초음파 욕조에서 처리하였다.

#### 분석

초음파 처리후 추출액중 200 µL량을 가스타이트 실린지를 이용하여 고무마개를 통하여 꺼낸 다음 다른 표시된 갈색 바이알의 작고 투명한 유리관이 들어있는 속으로 옮겼다. 20µL의 내부표준용액을 첨가한 다음 마개를 한 후 GC/MS로 분석하였다. 분석표준물질농도 범위는 0.1~10

µg/mL로 하였다. 내부표준물질은 100 µg/mL 1,4-difluorobenzene과 chlorobenzene- d<sub>5</sub>를 2500 µg/mL 농도의 상업적으로 판매되는 표준용액(Supelco, Inc, Bellefonte, PA)을 구입하여 사용하였다.

모든 추출물은 휴렛팩카드(HP) 5890 시리즈 II 플러스 가스크로마토그래피, 질량분석검출기(GC/MS, HP 5972 Detector), 오토샘플러(HP 18593B Autosampler), NBS 75K Spectra Library(Hewlett-Packard, Palo Alto, CA)가 내장된 Vectra 486 컴퓨터로 구성된 GC/MS를 이용하여 분석하였다. 칼럼은 RTX-1/60 m/ 0.25 mmID/ 1 µm 필름 두께를 가진 모세관 칼럼(Restek Corp., Bellefonte, PA)을 사용하였다. 분석 모드는 SCAN 혹은 SIM 모드를 사용하였다. 1µL를 주입하였으며 0.5분 후 40:1로 분리시켰다. 주입구 온도는 180 °C로 하였으며 초기 2분 동안에는 3.0 psi의 초기압력을 유지시켰으며 25 psi까지는 분당 10 psi의 속도로 올렸다. 초기오븐온도는 35°C에서 8분 동안 유지시킨 다음 180 °C까지 분당 8 °C의 속도로 증가시켰다. 그 다음 280 °C까지는 분당 20 °C의 속도로 증가시켰다. 0과 4.5분 사이와 다시 7.8과 9.75분 사이는 검출기를 켜었다.

#### 탈착효율

OVM의 탈착효율은 실내·외 환경에서 예상되는 VOCs 농도에 따라 결정하였다. 혼합된 목표 VOCs들에 대하여 실온에서 배지당 성분당 0.5부터 50 µg의 범위의 량의 흡착에 대한 탈착효율을 3M의 추천된 탈착방법에 따라 결정하였다. 탈착은 미리 계산된 양을 미량 주사기를 이용하여 확산포집기의 흡착층에 주입한 다음 마개를 한 후 실온에서 24시간 이상 방치한 다음 탈착후 GC/MS를 이용하여 분석하였다. 탈착효율은 회수된 각 목표 분석물질에 대해서 해당물질을 이용하여 표준농도범위에서 측정한 회귀검량선을 적용하여 구하였다.

#### 방법검출한계(Method Detection Limits, MDL)

3M OVM은 공시료에서도 미량의 벤젠, 스티렌, 테트라클로로에틸렌 그리고 톨루엔이 검출되는 경우가 있다. OVM에 있어 VOCs에 대한 방법검출한계(MDL)

는 다음과 같이 평가하였다(Morandi MT와 Stock TH., 1998).

$$MDL = X + SD \cdot t_{(0.01, n-1)}$$

여기서

X = 활성탄에서의 평균 분석량

SD = 공시료에서 분석물에 대한 표준편차

$t_{(0.01, n-1)}$  = 스튜던트 t 분포의 99<sup>th</sup> 퍼센트분율

n = 공시료의 갯수

공시료의 추출물에서 존재하지 않는 성분에 대해서는 방법검출한계를 신뢰할 수 있는 가장 낮은 표준용액을 일곱 번 주입한 것에 대한 상대표준편차가 10% 이내인 결과를 적용하였다.

### III. 실험결과 및 고찰

표 1에서 시료 성분당 0.5, 5, 50 µg의 양을 3개씩 미량 주사기로 OVM과 활성탄관에 주입시킨 것에 대한 탈착효율의 평균을 나타내었다. 탈착효율은 3M OVM의 활성탄 흡착제의 경우 1,4-Dichlorobenzene을 제외하고는 0.89~1.01로서 3M의 카타로그 수치와 비슷한 것으로 나타났다. 하지만 1,4-Dichlorobenzene의 경우 0.75로서 상대적으로 다른 VOCs 보다 탈착효율이 떨어지는 것으로 나타났다. 그리고 활성탄관(SK, Charcoal tube, U.S.A)의 경우 0.91~1.07로서 3M OVM 확산포집기의 흡착층에서 보다 탈착효율이 약간씩 더 높게 나타나는 것으로 나타났다. 그리고 각 물질의 농도별 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

표 2에서 보는 바와 같이 검출한계(Limit of Detection, LOD)(Birch M. and Cary R., 1996)의 경우 벤젠은 0.13 µg/m<sup>3</sup>, 톨루엔은 0.04 µg/m<sup>3</sup>로 낮게 나타났으나 방법검출한계(MDL)의 경우 벤젠은 3.94 µg/m<sup>3</sup>, 톨루엔은 18.39 µg/m<sup>3</sup>으로 높게 나타났다. 이렇게 차이가 나는 것은 본 실험에서 3M OVM 흡착제에서 원래 톨루엔과 벤젠이 미량 존재하는 것으로 나타났

Table 1. Desorption efficiencies

VOC	n	3M OVM This Study	3M OVM Catalogue	SKC Charcoal tube, This Study
Benzene	9	0.90±0.03*	0.95	1.03±0.09
tert-Butyl Methyl Ether	9	0.99±0.03	0.95	1.07±0.09
Chloroform	9	1.01±0.03	0.95	1.07±0.08
1,4-Dichlorobenzene	9	0.75±0.02	-	0.91±0.06
Tetrachloroethylene	9	0.89±0.03	1.00	1.02±0.08
Toluene	9	0.89±0.15	1.00	1.02±0.08

\* Mean ± SD

Table 2. Estimated MDLs and LOD of 3M OVM for evaluation study

VOC	n	MDL			LOD
		Chamber Evaluation 24-hours	Chamber Evaluation 48-hours	Chamber Evaluation 72-hours	Chamber Evaluation 24-hours
Benzene	12	3.94	1.97	1.31	0.13
tert-Butyl Methyl Ether	12	0.17	0.09	0.06	0.20
Chloroform	12	0.61	0.31	0.20	0.04
1,4-Dichlorobenzene	12	0.30	0.15	0.10	0.17
Tetrachloroethylene	12	0.84	0.42	0.28	0.11
Toluene	12	18.39	9.20	6.13	0.04

다. 따라서 이러한 경우 방법검출한계 수치가 높아지기 때문에 실내공기중의 미량으로 존재하는 톨루엔이나 벤젠을 분

석 할 경우 방법검출한계 미만으로 나올 가능성이 많다. 따라서 톨루엔, 벤젠등 잔유 휘발성 유기물질등이 거의 존재하

지 않는 흡착제를 사용한든지 아니면 노출시간을 길게 한다든지, 시료채취속도를 높여서 시료채취량을 많이 하도록 하여 방법검출한계 이상으로 하는 것이 필요하다.

그림 2~7은 벤젠, 톨루엔, 클로로포름, 1,4-디클로로벤젠, 메틸 *tert*-부틸에테르(MTBE), 테트라클로로에틸렌의 확산 길이에 따른 시료포집속도를 기류의 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 점선으로 나타낸 것은 3M 3500 OVM의 시료포집속도로서 확산길이가 10 mm일 경우 제조회사가 제시한 시료포집속도를 기준으로 계산한 것을 표시한 것이다.

그림 2에서 보는 바와 같이 확산 길이가 짧아질수록, 그리고 기류가 흐르지 않을 수록 고갈현상(starvation effect)(Harper M. 과 Purnell C., 1987)의 영향을 더 크게 받아 예상치(점선)로 부터 시료포집속도의 상대적인 차이가 더 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 경우 과소평가가 될 수 있음을 알 수 있는데 확산길이가 짧아질수록 심해진다는 것을 알 수 있다. 반면에 확산 길이가 길어질수록 과소평가가 되는 영향은 줄어드는 것으로 나타났다. 이

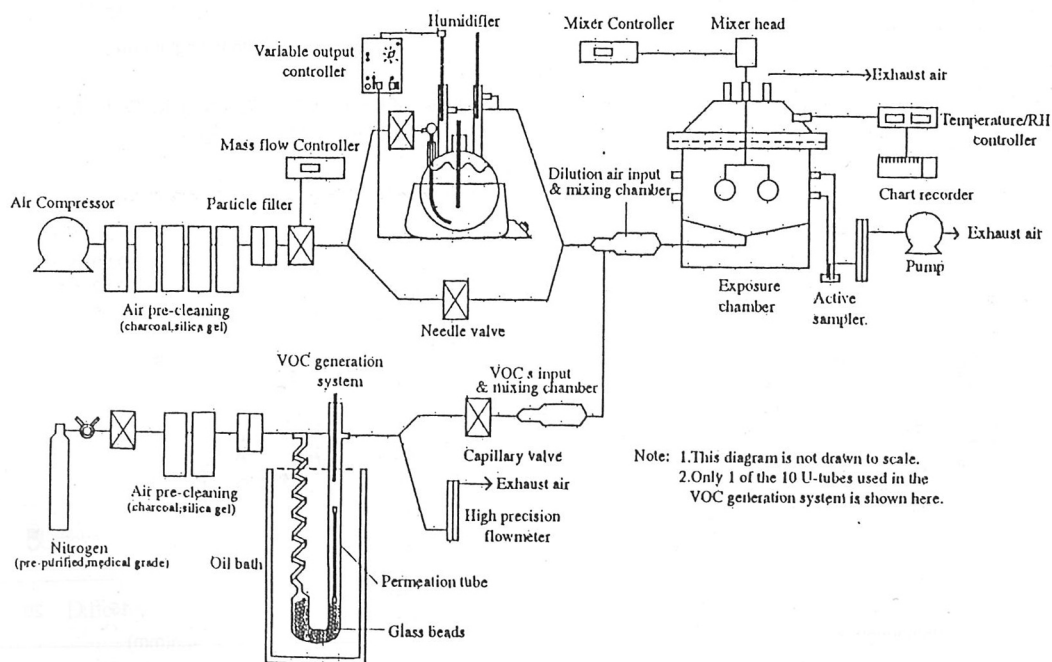


Fig. 1. Diagram of the exposure chamber system



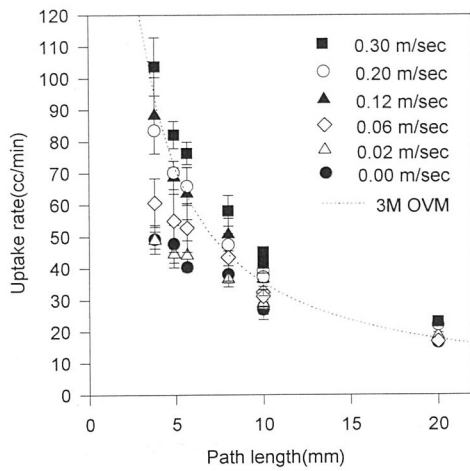


Fig. 2. Uptake rates according to path length and face velocities for benzene

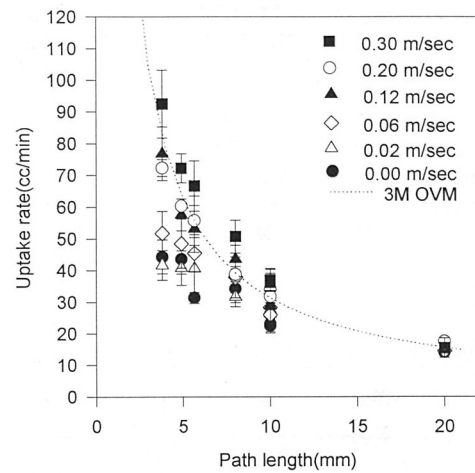


Fig. 3. Uptake rates according to path length and face velocities for toluene

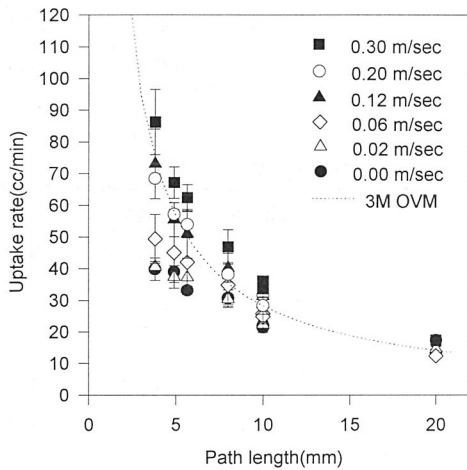


Fig. 4. Uptake rates according to path length and face velocities for tetrachloroethylene

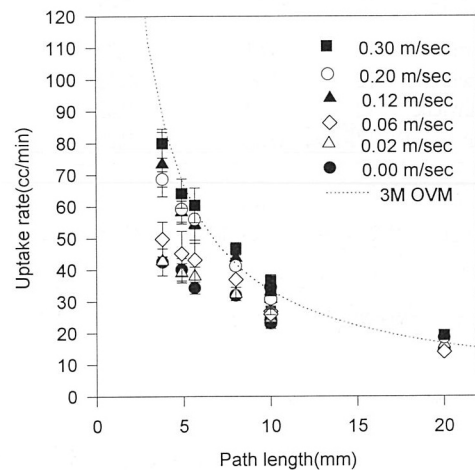


Fig. 4. Uptake rates according to path length and face velocities for chloroform

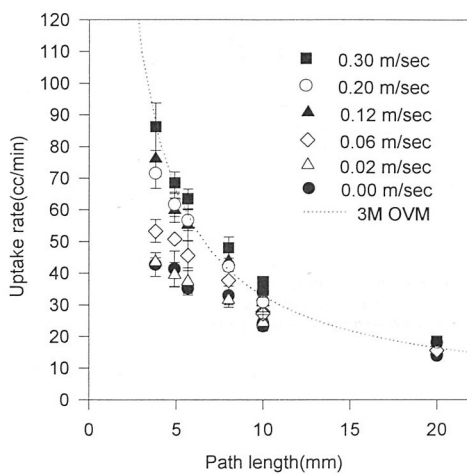


Fig. 6. Uptake rates according to path length and face velocities for MTBE

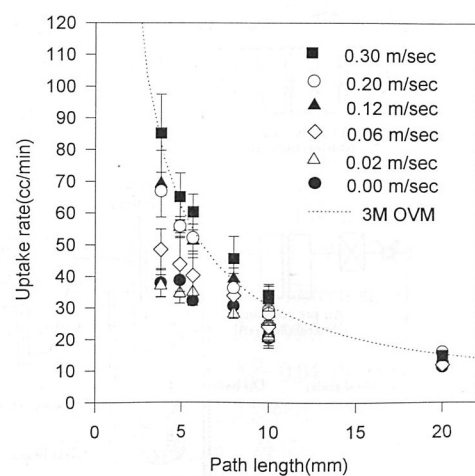


Fig. 7. Uptake rates according to path length and face velocities for dichlorobenzene

러한 현상은 나머지 휘발성유기물질 모두에게서 비슷한 현상으로 나타났다. 또한 그림 2~7에서 볼 수 있는 것과 같이 면속도가 0.06 m/sec와 0.12 m/sec 사이에서 시료포집속도의 차이가 심하게 나타남을 알 수 있는데 이러한 현상은 면속도가 0.06 m/sec이하에서 확산 길이가 짧아질수록 심해지는 것으로 나타났으며 반대로 확산 길이가 길어질수록 면속도에 의한 고갈현상의 영향이 줄어드는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 Happer(1987)가 지적한 대로 뱃지타입의 확산포집기의 경우 면속도가 최소한 0.05~0.1 m/sec 정도는 되어야 할 것이라는 것을 뒷받침해주는 것으로 나타났다.

현재 시중에 보급되고 있는 확산포집기의 확산길이가 10mm가 안되는 경우가 있는데 그러한 확산포집기를 사용할 때에는

기류가 최소한 0.1 m/sec 이상이 되는 곳에서 사용하여야 할 것으로 생각된다. 그러나 대부분의 작업장에서 면속도는 최소한 0.25~0.37 m/sec(Tompkins등, 1977)이므로 큰 영향을 받지 않을 것으로 판단된다. 그러나 실내 공기중의 휘발성 유기물질등을 측정할 경우 공기가 흐르지 않는 구석진 곳 등에서는 사용을 피하거나 혹은 이러한 경우를 위해서 확산길이가 긴 확산포집기의 개발이 필요할 것으로 생각된다.

Tompkins등(1977)은 Schmidt 수와 Sherwood 수 그리고 레이놀드 수를 이용한 Chilton-Colburn 유사식을 적용하여 다음과 같은 관계식을 구하였다.

$$\frac{R_{\text{diffusive}}}{R_{\text{convective}}} = k_1 V^{0.4}$$

$R_{\text{diffusive}}$  : 내부확산저항

$R_{\text{convective}}$  : 외부경계층 대류저항

$k_1$  : 분자성질과 포집기의 기하학적인 구조에 따른 비례상수

$V$  : 포집기 위를 흐르는 면속도

위 식에서 뱃지의 대류의 영향을 최소화하기 위하여 내부확산저항은 외부 경계층 대류저항을 훨씬 초과할수록 유리하다는 것을 알 수 있다. 저기류에서는 공기가 정체되어 확산길이가 연장된 것과 같은 효과, 즉 과소 평가가 관찰될 수 있다. 이것에 대한 실험결과들은 많은 연구자가 지적을 하였는데, Van der Wal등(1986)은 페인트 작업장에서 확산포집기를 이용하여 유기용제농도를 측정한 결과 0.2와 0.3 m/sec의 기류에서는 기존의 활성탄관법과는 잘 맞았으나 매우 낮은 기류(0.05 m/sec)에서는 낮은 포집량을 보였다고 하였다. 또한 Lautenberger등(1980)은 Du

Table 3. Update rates of TM\* and UM\* according to face velocities for VOCs based on reference

Components	Face Velocity(m/s)		0.0m/s	0.02m/s	0.06m/s	0.12m/s	0.20m/s	0.30m/s	Ref.*** Value
Benzene	Uptake rate (cc/min)	TM	40.29	44.11	52.80	63.65	65.95	76.37	62.84
		UM	26.89	28.82	31.17	36.67	37.28	41.58	35.5
	Difference ** (%)	TM	-35.88	-29.81	15.97	1.28	4.94	21.52	-
		UM	-24.26	-18.82	-12.19	3.30	5.01	17.13	-
Chloroform	Uptake rate (cc/min)	TM	34.32	38.02	43.16	54.25	56.00	60.42	52.29
		UM	23.03	24.55	26.05	30.79	30.81	33.38	33.50
	Difference (%)	TM	-34.22	-28.60	-17.90	4.22	6.25	22.79	-
		UM	-25.27	-24.43	-13.52	1.49	1.61	18.52	-
Dichloro-benzene	Uptake rate (cc/min)	TM	32.36	35.13	40.39	51.28	52.28	60.41	49.20
		UM	20.77	21.01	24.04	28.21	28.25	32.95	27.80
	Difference(%)	TM	-34.22	-28.60	-17.90	4.22	6.25	22.79	-
		UM	-25.27	-24.43	-13.52	1.49	1.61	18.52	-
MTBE	Uptake rate (cc/min)	TM	35.25	37.41	45.66	55.27	56.27	63.57	58.23
		UM	23.27	24.47	27.18	30.83	31.00	34.64	32.90
	Difference (%)	TM	-39.47	-35.75	-21.59	-5.08	-2.50	9.17	-
		UM	-29.26	-25.62	-17.40	-6.28	-5.78	5.28	-
Tetrachloro-ethylene	Uptake rate (cc/min)	TM	33.14	37.30	42.30	51.02	53.92	62.44	50.09
		UM	21.41	22.38	24.92	28.88	28.33	33.73	28.30
	Difference (%)	TM	-33.83	-25.53	-16.04	1.85	7.65	24.65	-
		UM	-24.34	-20.92	-11.94	2.04	0.21	19.18	-
Toluene	Uptake rate (cc/min)	TM	31.40	40.66	45.49	53.16	55.79	66.65	55.58
		UM	22.53	20.12	26.08	28.91	31.80	36.28	31.40
	Difference (%)	TM	-43.50	-26.85	-18.16	-4.35	0.37	19.92	-
		UM	-28.26	-35.91	-16.93	-7.94	1.28	15.53	-

\*TM: 5.7mm path length, \*UM: 10mm path length

\*\* Difference(%):((Uptake rate-Ref. uptake rate)/Ref. uptake rate)×100

\*\*\* Ref.value: Uptake values on 3M Catalogue

Pont PRO-TEK™ G-AA 유기용제 확산포 집기를 이용하여 실험한 결과 최소한의 기류를 0.175 m/sec(35 ft/min)로 보고하였다. 여기서 최소한의 기류가 상당히 높은 것은 Du Pont PRO-TEK™ G-AA의 확산 길이가 짧기 때문인 것으로 여겨진다. 한편 변상훈등(1997)도 활성탄섬유를 이용한 확산포집기를 제작하여 기류의 영향을 측정한 결과 0.01 m/sec 이하에서는 0.1 m/sec에서의 시료포집속도보다 27-29% 정도 떨어지는 것으로 나타났다.

표 3은 확산길이가 5.7 mm이고 바람막이로서 테프론 막을 사용한 것을 TM이라 하고, 기존의 확산길이가 10 mm인 3M OVM을 그대로 이용한 것을 UM이라고 하였을 경우의 기류 변화에 따른 시료포집속도를 나타낸 것이다. 또한 확산길이가 짧아질수록 면속도가 0.12 m/s 이하로 낮게 되었을 경우 시료포집속도가 3M에서 제시한 시료포집속도 보다 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 면속도가 감소할수록 그 영향은 더욱 큰 것으로 나타났다. 이것도 역시 고갈(starvation) 현상 때문에 확산 길이가 길어지는 효과가 나타나 그러한 것으로 보인다. 6개 성분 대부분이 UM보다는 TM에 있어 고갈현상이 더 영향을 미치는 것으로 나타났다. 여기서도 마찬가지로 확산 길이가 짧을수록 그만큼 고갈 현상이 영향을 더 미치는 것으로 보인다. 그러나 0.12 m/s 이상의 면속도에서는 3M에서 제시한 시료포집속도와 비슷하였으며 0.30 m/s 정도의 높은 면속도에서도 3M에서 제시한 포집속도를 기준으로 하였을 경우  $\pm 25\%$  내에 드는 것으로 나타났다.

따라서 확산포집기의 확산 길이를 짧게 하여 시료포집속도를 높여 저농도 환경에서도 사용할 수 있으나 그 대신 면속도가 최소한 약 0.10 m/s 정도 이상이 되어야 하는 것으로 나타났다. 확산길이를 짧게 하였을 경우 고갈 현상이 예상했던 대로 더 심한 것으로 나타났다.

이러한 연구를 토대로 하여 볼 때 확산포집기는 일반 대기환경이나 실내환경에서 너무 기류가 흐르지 않는 곳에서의 측정을 피한다면 휘발성 유기물질의 포집에

있어 효과적인 측정기기로 사용할 수 있으리라 생각된다.

## IV. 결 론

본 연구에서는 공기중 ppb 농도 수준의 휘발성유기용제를 측정하기 위한 확산포집기를 확산길이와 면속도에 따른 시료포집속도의 영향을 실험하여 본 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 확산길이를 짧게 할수록 면속도의 저감에 의한 고갈현상의 영향을 심하게 받았다.
  2. 6성분의 유기용제에 대한 확산포집기의 확산길이에 따른 포집속도의 변화를 조사하여 본 결과 면속도가 0.12 m/s 이상에서는 확산길이를 기존제품의 절반수준인 약 5.7 mm 정도로 짧게 하여도 포집속도 변화가 3M 3500 OVM의 시료포집속도를 기준으로 하였을 경우  $\pm 25\%$  이내에 들었다.
  3. 확산포집기의 확산 길이를 기존제품의 절반수준인 약 5.7 mm 정도로 짧게 하여 시료포집속도를 2배정도 높여 저농도 환경에서도 사용할 수 있으나 그 대신 면속도가 최소한 약 0.10 m/s 정도 이상이 되어야 하는 것으로 나타났다.
- 따라서 시료포집속도를 크게 하기 위하여 확산길이를 짧게 할 경우는 최소한의 면속도이상에서 사용해야 하는 것으로 나타났다. 면속도가 약 0.10 m/sec 이상에서는 기존의 확산길이를 반으로 줄여 시료포집속도를 증가시켜도 기류의 영향에 따른 사용상의 큰 문제가 없을 것으로 여겨진다.

## REFERENCES

- Birch ME and Cary RA. Elemental carbon-based method for monitoring occupational exposures to particulate diesel exhaust. *Aerosol Science and Technology* 1996;25:224-241
- Byeon SH, Oh SM, Kim WS, Lee CH. Evaluation of an activated carbon felt passive sampler in monitoring organic vapors. *Industrial Health(Japan)* 1997; 35:404-414
- Cao XL and Hewitt CN. Application of passive samplers to the monitoring of low concentration organic vapours in indoor and ambient air: a review, *Environmental Technology* 1991;12: 1055-1062
- Chung CW, Morandi MT, Stock TH, Afshar M. Evaluation of a passive sampler for volatile organic compounds at ppb concentrations, varying temperatures, and humidities with 24-h exposures 2. sampler performance. *Environ. Sci Technol* 1999;33:3666-3671
- Cohen MA, Ryan P, Yanagisawa Y, Hammond SK. *J Air Waste Manage Assoc* 1990;40:993-997
- Coutant RW. Applicability of passive dosimeters for ambient air monitoring of toxic organic compounds, *Eviron Sci Technol* 1982;16:410-413
- Grosjean D, Williams II EL. Passive Sampler for Airborne Formaldehyde. *Atmospheric Environment* 1992;26A (16):2923-2928
- Harper M and Purnell CJ. Diffusive sampling: a review, *Am Ind Hyg Assoc J* 1987;48(3):214-218
- Lautenberger WJ, Kring EV, Morello JA A new personal badge monitor for organic vapors. *Am Ind Hyg Assoc J* 1980;41 (10):737-747
- Morandi MT, Stock TH. Personal exposures to toxic air pollutants, The Mickey Leland National Urban Air Toxics Research Center, Houston, Texas 1998; 2:p. 38-39
- Oston R, Fellin P, Stoyanoff R. Development of personal exposure monitoring using passive sampler methods of ten volatile organic compounds(VOCs);

- Health and Welfare Canada, Health Protection Branch, Environmental Health Centre: Ottawa, 1992
- Tomkins FC, Goldsmith RL. A new personal dosimeter for the monitoring of industrial pollutants. *Am Ind Hyg Assoc J* 1977;38(8):371-377
- Shields HC, Weschler CJ. *J Air Waste Manage. Assoc* 1987;37(9):1039-1045
- Van der Wal, Moerkerken A. The performance of passive diffusion monitors for organic vapours for personal sampling of painters, *Ann Occup Hyg* 1984;28(1):39-47
- Zabiegata B, Przyjazny A, Namiesnik J. Passive dosimetry as an alternative technique to dynamic enrichment of organic pollutants of indoor air, *J. of Environ. Path., Toxicology and Oncology* 1999;18(1):47-59