

# 확산식 시료채취기에서 기류제어 막 공극 크기에 따른 시료채취율의 변화특성에 관한 연구

이 광 용<sup>‡</sup> · 박 두 용<sup>1)</sup> · 정 지 연

한국산업안전공단 산업안전보건연구원 · 한성대학교<sup>1)</sup>

## Effects of the pore size of the passive sampler's windscreen to the sampling rates

Gwang Yong Yi<sup>‡</sup> · Doo Yong Park<sup>1)</sup> · Jee Yeon Jeong

Occupational Safety and Health Research Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency · Hansung University<sup>1)</sup>

Windscreen for the passive sampler plays critical role to obtain constant sampling rates. To minimize variation of the sampling rates, smaller pore size of the windscreen would show better performance. However, larger pore size of the windscreen is preferable in the view point of analytical perspective since the larger pore size increases the sampling rate. Therefore, there is a tradeoff between the sampling rate and variation.

Several filters having different pore size(11, 20 $\mu$ m, 60 $\mu$ m, 100 $\mu$ m, 140 $\mu$ m and 180 $\mu$ m) were tested in this study to investigate the effects of pore size to the increase of the sampling rate and its' variation. Filters were replaced with the windscreen of the 3M OVM #3500 badge for this study. These modified passive samplers installed with various windscreen were tested in the environmental chamber against benzene, toluene and o-xylene.

1. Same level of sampling rate were shown for all the filters with no apparent air movement (<0.25m/s) in the chamber during sampling period.

2. Both the random variation and magnitude of the sampling rates were increased as the pore size of the windscreen increased. Passive samplers installed the windscreen of the pore size of 11 and 20 $\mu$ m showed relatively small variation (<5% RSD).

3. Sampling rates with the windscreen of the pore size of 11 $\mu$ m were 36.8cc/min for benzene, 32.6cc/min for toluene, and 30.4cc/min for o-xylene respectively.

4. Sampling rates with the windscreen of the pore size of 20 $\mu$ m were 38.2cc/min for benzene, 33.0cc/min for toluene, and 31.0cc/min for o-xylene respectively.

5. Sampling rates for 3M OVM #3500 badge were 35.4cc/min for benzene, 31.2cc/min for toluene, and 29.5 for o-xylene respectively. These values were similar to the sampling rates provided by 3M(35.5cc/min for benzene, 31.4cc/min for toluene, and 27.3cc/min o-xylene)

**Key Words:** Passive sampler, Windscreen, Pore size, Sampling rates

## I. 서 론

공기 중 유기용제 채취방법에는 물질별

로 다양한 공정시험법으로 제정되어 있다. 그 중에서 활성탄관 방법을 이용한 유기용제의 채취는 정확도와 정밀도가 우수

하여 미국 국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)에서 추천하고 있다(NIOSH, 1977). 그러나 이 방법은 고가의 개인시료 채취기를 구매해야 하는 부담과 배터리 충전 및 시료채취 전·후 유량보정

접수일 : 2004년 4월 8일, 채택일 : 2004년 8월 2일

‡ 교신저자 : 이광용(인천시 구산동 34-6, 산업안전보건연구원 산업보건위생연구실

Tel : 032-5100-905, E-mail : yigy@kosha.net)

등의 과정으로 인하여 많은 시간을 소비하게 되며, 이러한 과정들은 기술적인 부분이 다르므로 전문가가 취급해야 한다. 그리고 사업장에서 작업자에 개인시료 채취기를 착용 시켰을 때, 장시간 착용에 대한 부담 및 작업방해 등으로 기피하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해서 개발된 것이 확산식 시료채취기이다. 확산식 시료채취기는 취급이 편리하고 간단하며, 작업에 방해가 되지 않아 전문가가 아니라도 누구나 쉽게 자신이 경영하거나 일하는 작업환경을 모니터링 할 수 있다 (백남원, 1995; Harper et al., 1987).

확산을 근거로 한 시료채취방법은 1920년대 후반에 개발되기 시작하였으며, 1973년 아황산가스를 채취하기 위해 Palms와 Gunison이 만든 확산식 시료채취기가 최초이다(Palms, 1973). 그 후 많은 연구자들이 확산식 시료채취기에 대한 연구가 진행되었으며, 적용가능성이 매우 높은 것으로 평가되었다. 이러한 연구결과를 바탕으로 미국 NIOSH와 몇몇의 나라에서는 일부 물질에 대해서 작업환경측정 분야에서 활성탄판 방법과 함께 공정시험법으로 채택하고 있다(NIOSH, 1994; Pristas, 1994). 우리나라의 경우에는 노동부에 작업환경측정에서 확산식 시료채취기의 사용이 가능한지에 대한 공개질의에서 사용이 가능하다고 회신함으로써 법적인 작업환경측정에 사용할 수 있다(노동부, 2000). 확산식 시료채취기의 최대 단점은 활성탄판 방법에 비하여 정확도가 떨어진다는 점이다. 확산식 시료채취기의 정확도 및 정밀도와 관련된 가장 중요한 인자는 시료채취율이다. 시료채취율과 관련된 요인들을 살펴보면 시료 농도, 외부 기류, 습도, 온도, 탈착율, 시료 채취 후의 저장의 안정성(재 확산으로 인한 시료손실률) 등 다양하다. 이처럼 다양한 요인 중 가장 큰 영향을 미치는 요소 중에 하나가 외부기류를 제어하는 기류제어 막(windscreen)이다. 본 연구의 목적은 실험실 조건에서 기류제어 막 공극(pore size)의 크기에 따라 외부기류가 시료채취에 미치는 영향을 평가하고, 시료채취율의 변이계수가 NIOSH의 개인시료 채취기의

오차(pump error) 권고기준(NIOSH, 1995)인 5% 미만의 기류제어 막을 선정하여, 평가대상물질의 시료채취율(sampling rate)을 구하는데 있다.

## II. 대상 및 방법

### 1. 대상물질

본 연구에서는 복합물질을 대상으로 확산식 시료채취기의 기류제어 막에 대한 기초자료를 얻고자 네 가지의 선정조건을 가지고 대상물질을 선정하였다. 대상물질의 선정요건은 1) 사업장에서 널리 사용되고, 2) 확산식 시료채취기의 성능시험에 비교적 많이 사용되는 물질이어야 하며, 3) 저농도에서의 시료채취율을 평가하기 위하여 노출기준이 낮은 물질, 4) 유해성이 높아 사용에 있어 매우 민감한 물질을 대상으로 하였다. 이러한 선정요건을 기준으로 벤젠, 톨루엔 그리고 오르소-크실렌을 선정하였으며, 선정된 대상물질을 연구목적에 맞게 일정비율로 혼합한 후 사용하였다.

대상물질의 우리나라 노출기준은 벤젠이 1 ppm, 톨루엔 100 ppm 그리고 오르소-크실렌은 100 ppm으로 규정하고 있다(노동부, 2002). 그러나 벤젠의 노출기준은 미국산업위생전문가협회(American Conference of Government Industrial Hygienists, ACGIH)의 노출기준(Threshold Limit Values, TLVs)에서는 벤젠 0.5 ppm, 톨루엔 50 ppm 오르소-크실렌은 100 ppm으로 권고하고 있다(ACGIH, 2003).

### 2. 가스발생장치를 이용한 시료 제조

실험실에서 확산식 시료채취기의 시료채취 효율 및 기류제어 막의 성능을 평가하기 위해서는 공기 중 유기용제 농도 및 기류가 일정하게 유지되어야 한다. 실험을 위하여 Figure 1과 같은 장치를 설치하였다. 가스발생장치에서 공기 중 일정농도를 만드는 방법은 다음과 같은 과정을 통해서 이루어진다. 공기정화장치와 건조

기가 부착된 Air Compressor에서 만들어진 시험용 공기(dry air)는 유량조절기(0 - 50 L/min, Dwyer RMC-104, USA)에서 약 37 L/min의 유량으로 공급되며, 이 시험용 공기는 습도를  $50 \pm 2\%$ 가 유지되도록 조절하기 위해서 수욕조가 설치된 습도조절 장치를 통과하여 유기용제와 공기가 혼합되는 혼합조로 이동하게 된다. mixing chamber의 습도는 습도계(CH-8303(series no. 7675 018), Roteonic ag, Swiss)를 이용하여 측정하고, 이 신호를 받아 습도조절 장치의 수욕조의 온도가 조절됨으로서 일정한 습도가 유지되도록 한다.

벤젠, 톨루엔, 오르소-크실렌이 혼합된 유기용제는 미량주사기 펌프(Sege<sup>TM</sup> Pump model M365, Orion, USA)에서 일정 유량으로 mixing chamber 상부에 있는 알루미늄 가열판 위로 공급된다. 유기용제 농도가 일정하게 유지되기 위해서는 가열판의 온도가 일정하게 유지되어야 하며 온도를 조절하기 위해서 전압조절기(slide dials, Dealim Electric Ltd, Korea)를 사용하였다. 가열판에서 기화된 유기용제는 공기압축기로부터 공급된 시험용 공기 함께 mixing chamber (30cm×40cm×40cm)에서 골고루 혼합되며, 이 혼합된 공기는 test chamber (60cm×60cm×70cm)로 이동하여 유기용제 농도가 일정하게 유지되도록 설계되었다. 시료채취는 test chamber에서 이루어지며, 기류에 의한 시료채취 효율을 알아보기 위해 팬(WSES, A2V-12C38TST-1, Taiwan)을 달아 전압조절기로 기류를 0.3m/sec(0.17 ~ 0.51m/sec)로 조절하였다. test chamber의 기류와 습도 측정은 열선풍속계(Kanomax 24-6111, Kanomax, Japan)로 평가하였다. Test chamber에서 유기용제 농도는 실시간 모니터링 장비인 Photoacoustic Multigas Monitor (Model 1312, Annova, Denmark)에 장착된 UA0987 펄티(중심파장 3.4 $\mu$ m, LOD : 0.04 ppm)를 이용해서 실시간으로 확인하였다. 실험에 필요한 유기용제 농도는 Multigas Monitor에서 실시간으로 검출된 결과를 확인한 후 시험용 공기와 가열판의 온도 그리고 유기용제 주입량을 조절하여 일정한 농도로 만들었다.

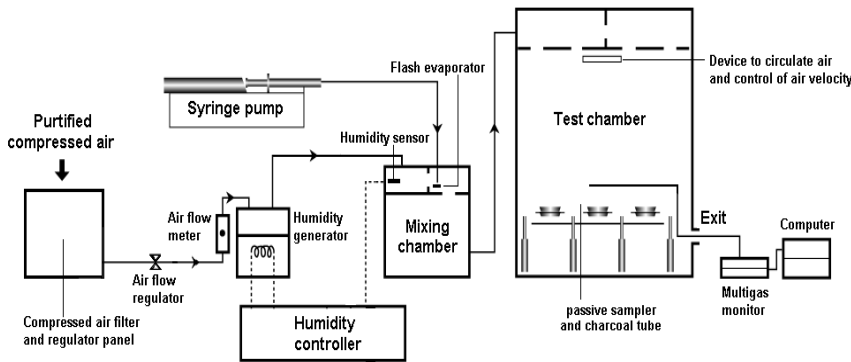


Fig 1. Schematic diagram of the experimental apparatus and systems.

### 3. 기류제어 막

현재 시판되고 있는 확산식 시료채취기 (Organic Vapor Monitor #3500 badge, 3M, USA)의 기류제어 막을 제거한 후, 11 $\mu$ m, 20 $\mu$ m, 60 $\mu$ m, 100 $\mu$ m, 140 $\mu$ m 그리고 180 $\mu$ m의 공극 크기를 갖는 나일론 필터(100 Nylon net filters, Millipore, USA)를 기류제어 막으로 장착하여 평가하였으며, 현재 시판 중인 3M사 OVM #3500 badge 기류제어 막의 공극의 크기에 대한 정확한 자료는 얻을 수 없었다(3M, 1999).

### 4. 측정 및 분석

활성탄관을 이용한 방향족탄화수소류의 측정 및 분석은 NIOSH Method 1500의 방법에 준하여 시료를 채취하고 분석하였다(NIOSH, 1994). 활성탄관은 앞측과 뒤측을 분리한 후, 이황화탄소(Crown guaranteed reagents, Yakuri Pure Chemicals Co. Ltd., Japan) 1mL로 탈착하였다. 확산식 시료채취기를 이용한 측정은 3M OVM #3500 badge에 장착되어 있는 기류제어 막을 연구대상 기류제어 막으로 교환한 후, 시료를 채취하였다. 시료를 채취한 후 기류제어 막을 제거하고 탈착용 뚜껑으로 바꾸어 끼운 후, 이황화탄소 2mL로 탈착하였다(3M, 1999). 탈착한 시료는 불꽃이온화 검출기가 부착된 가스크로마토그래피(Gas chromatography-Flame Ionization Detector(GC/FID), Model Agilent 6890N,

Agilent Technologies, USA)로 분석하였다. 표준용액은 벤젠 0.42~870  $\mu$ g/sample, 톨루엔 0.42~1730  $\mu$ g/sample 그리고 오르소-크실렌이 0.43~1760  $\mu$ g/sample 범위로 10~14개를 조제하여 검량선을 작성한 후 시료를 분석하였다. 활성탄관 방법으로 측정된 농도는 확산식 시료채취기를 평가하기 위한 기준값으로 사용하였다.

### 5. 시료채취율 산정

본 연구에서는 벤젠, 톨루엔 그리고 오르소-크실렌이 혼합된 혼합물질을 기류제어 막 공극의 크기별로 활성탄관 방법과 함께 측정하여 시료채취율을 구하였다(식 1). 기류제어 막 공극의 크기에 따른 정밀도 평가는 시료채취율 및 시료 농도의 변이계수를 구하여 평가하였으며, 정확도 평가는 확산식 시료채취기로 측정한 대상 물질의 농도와 활성탄관 방법으로 측정된 대상물질의 농도를 분산분석을 통하여 비교 평가하였다.

$$\text{Sampling Rate (cc/min)} = \frac{W_p \times PFR}{W_c} \times 1000 \quad \dots\dots\dots (\text{식 1})$$

$W_p$  = contaminant weight in passive sampler,  $\mu$ g or mg

$W_c$  = contaminant weight in charcoal tube,  $\mu$ g or mg

$PFR$  = flow rate of personal air sampler, liter per minute(lpm)

## III. 결과 및 고찰

### 1. 기류가 시료채취에 미치는 영향

기류제어 막은 확산식 시료채취기에 적용되는 확산과 투과이론 중 투과이론에 근거를 두고 있으며 일정한 기류가 존재하지 않는 곳에서 시료를 채취할 때 확산에 의해 시료가 채취되고 나면 표면의 농도가 없어지거나 감소하는 결핍(starvation)현상이 발생하게 된다(박동욱 등, 2002; 3M, 1999). 이러한 결핍현상을 발생시키지 않고 시료를 채취하기 위해서 현재 시판되고 있는 제품은 제조사에 따라 다르지만 일반적으로 0.05~0.1m/sec의 기류가 요구되고 있다(박동욱 등, 2002). 이 정도의 기류는 대부분의 사업장에서 발생되고 있으며, 작업자의 활동에 의해서도 원하는 기류가 발생한다. 이처럼 기류에 의한 영향을 받는 확산식 시료채취기에서 불규칙한 외부기류의 영향을 효과적으로 제어하여 시료채취율의 변이를 줄이기 위해서 기류제어 막을 설치하고 있다.

외부기류가 발생하지 않는 조건에서 기류제어 막의 종류에 따른 시료채취율을 평가하기 위해서 test chamber의 공기 중 벤젠의 농도를 0.46ppm, 톨루엔 13.39ppm 그리고 오르소-크실렌 11.78ppm으로 평가하였다. 연구대상 기류제어 막 공극의 크기에 따른 시료채취율은 Table 1과 같다.

벤젠의 시료채취율은 25.9 $\pm$ 3.0~27.9 $\pm$ 2.3cc/min의 범위로 기류제어 막 공극의 크기에 관계없이 일정한 시료채취율을 보여주고 있으며, 톨루엔과 오르소-크실렌의 시료채취율은 21.5 $\pm$ 3.0~24.4 $\pm$ 3.2 cc/min과 19.1 $\pm$ 3.3~21.0 $\pm$ 3.2cc/min으로 역시 비슷한 경향을 보였다.

외부기류에 의한 영향은 test chamber의 공기 중 벤젠 농도를 0.70ppm, 톨루엔 19.04ppm 그리고 오르소-크실렌 16.57ppm을 만든 후, 소형 팬을 이용하여 평균 0.3m/sec(0.17~0.51m/sec)의 기류를 발생시켜 평가하였다. Table 1에서 벤젠의 시료채취율은 11 $\mu$ m, 20 $\mu$ m 그리고 60 $\mu$ m에서 34.8 $\pm$ 1.8cc/min, 35.8 $\pm$ 2.1cc/min 및 38.1 $\pm$ 3.2cc/min으로 대체로 일정하였으나 100

Table 1. Sampling rates of the original 3M badge and the 3M badges replaced the windscreens having pore size of 11, 20, 60, 100, 140 and 180 $\mu$ m for benzene, toluene and o-xylene

Windscreen Pore Size( $\mu$ m)	Air Velocity,m/sec	No. of Samples	Analyte		
			Benzene	Toluene	o-Xylene
11	< 0.01	4	25.9 $\pm$ 3.0*	22.1 $\pm$ 1.8	21.0 $\pm$ 1.1
	0.3	15	34.8 $\pm$ 1.8	29.9 $\pm$ 1.6	26.8 $\pm$ 1.5
20	< 0.01	4	26.9 $\pm$ 2.6	22.6 $\pm$ 2.8	20.5 $\pm$ 1.5
	0.3	15	35.8 $\pm$ 2.1	30.7 $\pm$ 1.8	27.8 $\pm$ 1.7
60	< 0.01	4	26.4 $\pm$ 0.6	22.9 $\pm$ 3.1	19.7 $\pm$ 1.6
	0.3	15	38.1 $\pm$ 3.2	32.8 $\pm$ 2.6	29.9 $\pm$ 2.3
100	< 0.01	4	27.6 $\pm$ 1.3	21.5 $\pm$ 3.0	19.7 $\pm$ 2.4
	0.3	15	47.4 $\pm$ 7.4	40.9 $\pm$ 6.8	37.9 $\pm$ 6.6
140	< 0.01	4	26.5 $\pm$ 2.3	22.8 $\pm$ 3.0	19.1 $\pm$ 3.3
	0.3	15	59.9 $\pm$ 7.7	52.6 $\pm$ 7.5	49.4 $\pm$ 6.5
180	< 0.01	4	27.9 $\pm$ 2.3	24.4 $\pm$ 3.2	21.0 $\pm$ 3.2
	0.3	15	71.9 $\pm$ 12.1	63.6 $\pm$ 11.0	59.2 $\pm$ 10.5
3M	< 0.01	4	24.8 $\pm$ 1.4	22.1 $\pm$ 2.2	18.9 $\pm$ 1.5
	0.3	15	33.2 $\pm$ 1.8	28.4 $\pm$ 1.6	26.2 $\pm$ 1.4

\* Mean $\pm$ SD

$\mu$ m, 140 $\mu$ m 그리고 180 $\mu$ m에서는 47.4 $\pm$ 7.4 cc/min, 59.9 $\pm$ 7.7cc/min 및 71.9 $\pm$ 12.1 cc/min으로 시료채취율이 증가하였다. 시료채취율은 벤젠뿐만 아니라 톨루엔과 오르소-크실렌에서도 동일하게 100 $\mu$ m 이상의 기류제어 막에서 증가하였다.

## 2. 기류제어 막 공극 크기에 따른 시료채취율 및 변이

### 1) '기류제어 막의 시료채취율

벤젠은 분석하기에 충분한 양의 흡착되도록 60분간 채취하여 시료채취율을 구했으며, 톨루엔과 오르소-크실렌은 30분과 60분간 채취하여 Table 2와 같은 결과를 얻었다. 벤젠의 경우 11 $\mu$ m에서 시료채취율이 34.8cc/min이었으나 180 $\mu$ m에서는

71.9cc/min으로 기류제어 막 공극의 크기가 클수록 시료채취율이 증가한다. 톨루엔의 시료채취율은 31.2cc/min과 53.7 cc/min이었으며, 오르소-크실렌은 29.0 cc/min과 50.9cc/min로 벤젠과 동일한 경향을 보였다. 3M사 제품의 경우, 벤젠의 시료채취율은 33.2cc/min, 톨루엔 30.3 cc/min 그리고 오르소-크실렌은 28.8 cc/min으로 제조사에서 제시한 벤젠이 35.5cc/min, 톨루엔 31.4cc/min 그리고 오르소-크실렌이 27.3cc/min과 비슷하였다.

### 2) 기류제어 막 시료채취율의 변이

Figure 2는 기류제어 막의 공극 크기에 따른 세 가지 분석물질의 시료채취율에 대한 변이계수를 나타낸 것이다. Table 2에서 보듯이 기류제어 막 공극의 크기가

클수록 시료채취율은 높게 평가되었으나, 변이계수 역시 기류제어 막 공극의 크기가 큰 막에서 높은 결과를 나타냈다. 공극이 큰 기류제어 막에서 시료채취율이 높고 변이계수가 큰 이유는 기류의 영향으로 인하여 많은 양의 평가대상 물질이 확산에 의해 기류제어 막 안으로 유입되어 흡착체에 흡착되므로 시료채취율은 높아지는 반면, 기류제어 막 안으로 들어온 물질이 쉽게 역확산이 일어나 외부로 빠져나감으로서 시료채취율의 변이가 크게 나타난 것이라 판단된다. 100 $\mu$ m 미만의 기류제어 막에서는 변이계수가 낮아 시료채취율의 정밀도가 높으나 100 $\mu$ m 이상의 기류제어 막에서는 시료채취율의 정밀도가 낮아 시료채취가 일정하지 못하였다.

Table 2. Sampling rates of the original 3M badge and the 3M badges replaced the windscreens having pore size of 11, 20, 60, 100, 140 and 180 $\mu$ m for benzene, toluene, o-xylene while air face velocity > 0.3m/s air velocity

Substance	No. of Samples	Windscreen pore size						
		11 $\mu$ m	20 $\mu$ m	60 $\mu$ m	100 $\mu$ m	140 $\mu$ m	180 $\mu$ m	3M
Benzene	15	34.8	35.8	38.1	47.4	59.9	71.9	33.2
Toluene	30	31.2	32.0	35.2	38.5	44.4	53.7	30.3
o-Xylene	30	29.0	29.6	32.9	36.1	42.1	50.9	28.8

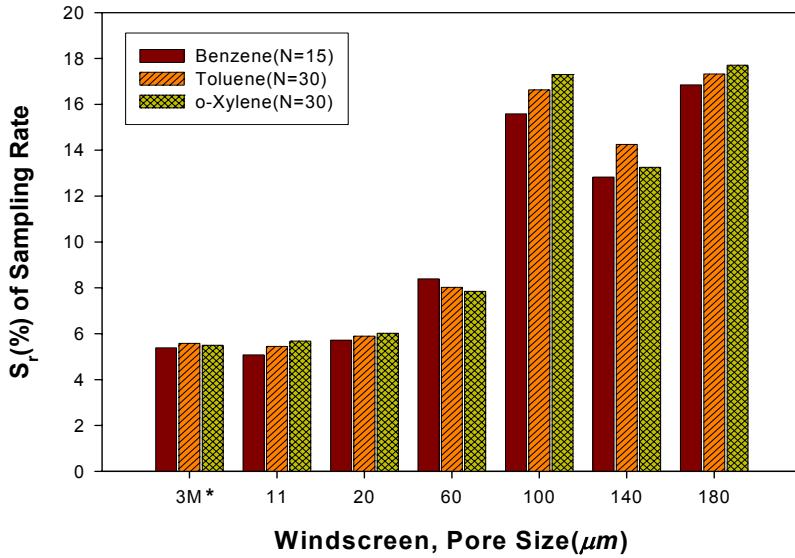


Fig. 2. Sr(RSD) of sampling rates of the original 3M badge and the 3M badge replaced the windscreens having pore size of 11, 20, 60, 100, 140 and 180 μm

### 3) 기류제어 막 공극 크기에 따른 시료농도 및 변이

Table 3은 연구대상물질을 동일조건에서 동시에 60분간 채취하여 기류제어 막 공극 크기에 따른 시료채취율을 적용하여

얻은 대상물질의 농도 결과이다. 공극의 크기에 상관없이 연구대상물질의 농도가 유사한 결과를 보여주고 있다. 그러나 시료채취의 정밀도를 나타내는 변이계수는 기류제어 막 공극의 크기가 11 μm, 180 μm

에서 각각 벤젠이 1.7%, 19.1%, 톨루엔 1.2%, 19.5% 그리고 오르소-크실렌 2.4%, 20.0%로 기류제어 막의 크기가 클수록 변이계수도 커져 Figure 2와 같은 경향을 보이고 있다.

### 3. 시료채취의 정확도 평가

#### 1) 시료채취율

100 μm 미만의 기류제어 막 4종을 대상으로 시료채취 시간과 공기 중 농도를 달리하여 시료채취율을 평가한 결과 Table 4와 Figure 3과 같은 결과를 얻었다. 기류제어 막 공극의 크기가 클수록 시료채취율은 높은 것으로 평가되었으며, 11 μm와 20 μm 기류제어 막에서는 변이계수가 안정하여 NIOSH에서 제시하는 개인시료채취기의 오차범위 5%를 초과하지 않는 것으로 평가되었으나 60 μm 기류제어 막에서는 개인시료 채취기 오차범위인 5%를 초과하여 재현성 있는 측정이 어려울 것으로 판단된다.

Table 5는 연구대상 기류제어 막과 3M사에서 제시하는 시료채취율간의 차이를 보여준다. 벤젠의 경우 3.7~31.5%, 톨루

Table 3. Calculated concentration with the use of sampling rates experimentally obtained and variations of the calculated concentration levels for the original 3M badges and the 3M badges replaced the windscreens having pore size of 11, 20, 60, 100, 140 and 180 μm

(unit : ppm)

Windscreen Pore Size(μm)	No of Samples	Analyte		
		Benzene	Toluene	o-Xylene
11 μm	3	0.69±0.01* 1.4†	18.23±0.21 1.2	16.53±0.40 2.4
20 μm	3	0.69±0.02 2.9	18.24±0.53 2.9	16.51±0.56 3.4
60 μm	3	0.69±0.06 8.7	17.71±1.25 7.1	16.50±1.13 6.8
100 μm	3	0.69±0.12 17.4	20.16±3.75 18.6	16.52±3.22 19.5
140 μm	3	0.69±0.10 14.5	22.49±3.51 15.6	16.53±2.37 14.3
180 μm	3	0.69±0.13 18.8	22.50±4.38 19.5	16.52±3.30 20.0
3M	3	0.69±0.02 2.9	17.82±0.32 1.8	16.54±0.29 1.8

\* Mean±SD, † Sr(%) = the relative standard deviation(RSD)

Table 4. Sampling rates of the original 3M badge and 3M badges replaced the windscreens having pore size of 11, 20, and 60  $\mu\text{m}$ 

(unit : cc/min)

Substance	No of Samples	Windscreen pore size			3M
		11 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$	60 $\mu\text{m}$	
Benzene	105	36.8 $\pm$ 1.6 <sup>*</sup> 4.3 <sup>†</sup>	38.2 $\pm$ 2.1 5.5	46.7 $\pm$ 4.0 <sup>‡</sup> 8.6	35.4 $\pm$ 1.3 3.7
Toluene	190	32.5 $\pm$ 1.1 3.4	33.0 $\pm$ 1.2 3.6	38.0 $\pm$ 4.7 <sup>§</sup> 12.4	31.2 $\pm$ 0.8 2.6
o-Xylene	190	30.4 $\pm$ 1.1 3.6	31.0 $\pm$ 1.2 3.9	35.7 $\pm$ 4.8 <sup>§</sup> 13.4	29.5 $\pm$ 0.9 3.1

\* Mean $\pm$ SD, † N=20, ‡ Sr(%) = the relative standard deviation(RSD), § N=45.Table 5. Comparison of the sampling rates of the original 3M badges and 3M badges replaced the windscreens having pore size of 11, 20 and 60  $\mu\text{m}$  or the benzene, toluene and o-xylene

Substance	SR <sub>r</sub> <sup>*</sup> ml/min	Pore size $\mu\text{m}$	SR <sub>c</sub> <sup>‡</sup> (Mean) ml/min	(SR <sub>c</sub> -SR <sub>g</sub> )/SR <sub>g</sub> $\times$ 100, %
Benzene	35.5	11	36.8	3.7
	35.5	20	38.2	7.6
	35.5	60	46.7	31.5
	35.5	3M	35.4	-0.3
Toluene	31.4	11	32.6	3.8
	31.4	20	33.0	5.1
	31.4	60	38.0	21.0
	31.4	3M	31.2	-0.6
o-Xylene	27.3	11	30.4	11.4
	27.3	20	31.0	13.6
	27.3	60	35.7	30.8
	27.3	3M	29.5	8.1

\* SR<sub>r</sub>: Sampling Rate recommended by the manufacturer(3M)† SR<sub>c</sub>: Sampling Rate calculated in this study based on the reference value(measured by charcoal tube method in the test chamber).

엔 3.8~21.0% 그리고 오르소-크실렌이 11.4~30.8%로 3M에서 제시한 값보다 높았다. 3M OVM #3500 badge의 경우 벤젠이 35.4cc/min으로 제시된 시료채취율인 35.5cc/min과 비슷하게 나왔으며 톨루엔은 제시된 값보다 6% 정도 낮게 그리고 오르소-크실렌은 8% 높은 시료채취율을 얻었다.

## 2) 재상물질의 정확도 평가

### (1) 벤젠

Table 6은 벤젠의 정확도 평가를 위한 시료채취 결과이다. 시료의 농도는 미국의 ACGIH TLV 0.5ppm과 우리나라 노동부 노출기준의 범위인 1ppm을 참고로 하

여 공기 중 벤젠의 농도를 0.53~1.35ppm 범위에서 평가하였다. 벤젠의 농도가 가장 낮은 0.53ppm 수준에서는 11  $\mu\text{m}$ 의 기류 제어 막과 3M OVM #3500 badge의 변이 계수가 상대적으로 높았으나 다른 농도 수준에서는 변이계수가 작았다. 11  $\mu\text{m}$  기류 제어 막은 활성탄관 방법과 0.02~0.06ppm의 차이가 있었고, 20  $\mu\text{m}$  막은 0.01~0.06ppm의 차이를 그리고 3M OVM #3500 badge는 0.01~0.04ppm이었으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다( $p>0.05$ ).

### (2) 톨루엔

Table 7은 톨루엔의 정확도 평가를 위한 시료채취 결과이다. 시료의 농도는 ACGIH 노출기준 50ppm의 0.5배 수준에

서 평가하였다. test chamber내의 톨루엔 농도는 13.88~33.72ppm이었다. 톨루엔의 채취량을 활성탄관 방법과 비교해보면 활성탄관 방법의 시료채취량은 13.88~33.72ppm이었고, 11  $\mu\text{m}$  기류제어 막은 13.99~33.35ppm, 20  $\mu\text{m}$  막은 14.09~32.81ppm 그리고 3M OVM #3500 badge는 13.89~33.5ppm으로 활성탄관 방법과 비교하였을 때 차이를 보이지 않았다. 또한 3M사의 제품과 연구대상 기류제어 막을 비교해도 차이가 없었다.

### (3) 오르소-크실렌

Table 8은 오르소-크실렌의 정확도 평가를 위한 시료채취 결과이다. 시료의 농도는 톨루엔과 비슷한 농도 수준으로 만



#### IV. 결 론

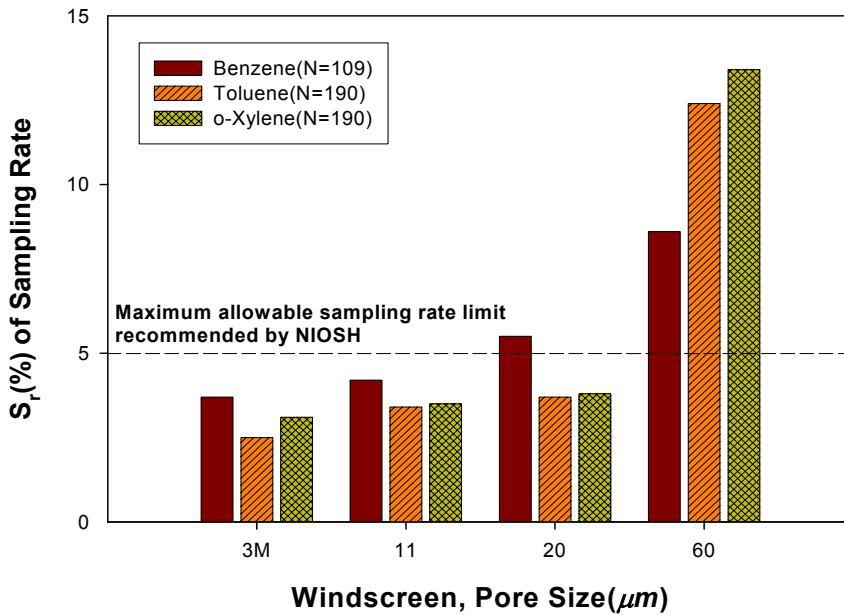


Fig 3. Sr(RSD) of sampling rate of the original 3M badges and 3M badges replaced the windscreens having pore size of 11, 20 and 60 μm

들어 평가하였다. test chamber내의 오르소크실렌 농도는 11.97~27.79ppm으로 톨루엔의 경우와 같이 높은 농도에서 시료를 채취함으로써 시료 채취량의 변이가 매우 작았다. 오르소크실렌의 채취량을

활성탄관 방법과 연구대상 기류제어 막을 비교해보면 두 방법 간의 차이를 보이지 않았으며, 3M의 제품과 연구대상 기류제어 막간에도 차이를 보이지 않았다.

확산식 시료채취기를 개발하는데 있어 외부기류의 제어 및 적절한 이용은 작업 환경 측정의 정확도와 시료채취율을 높이는데 중요한 요인이며 반드시 고려되어야 할 조건이다. 외부기류의 제어는 기류제어 막을 이용함으로써 가능하며, 기류제어 막 공극의 크기는 시료채취율 및 시료채취의 정밀도에 많은 영향을 준다. 본 연구에서는 방향족탄화수소류인 벤젠, 톨루엔 그리고 오르소크실렌을 대상물질로 선정하여 현재 시판되고 있는 확산식 시료채취기에 기류제어 막을 제거한 후, 11 μm, 20 μm, 60 μm, 100 μm, 140 μm 그리고 180 μm의 공극의 크기를 갖는 나일론 필터의 성능을 평가하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 외부기류가 발생하지 않을 때, 확산식 시료채취기의 모양이 일정하고 공기 중 대상물질의 농도가 일정하다면 기류제어 막 공극의 크기와는 관계없이 채취시간에 따라 일정하게 채취되었다.
2. 외부기류가 발생할 때, 외부기류의 영향으로 공극의 크기가 큰 기류제어 막에서 시료채취율이 높았으나 변이가 크다.

Table 6. Comparison of benzene concentrations and their RSDs among the results of charcoal tubes, the original 3M badges and the 3M badges replaced windscreens having the recommended pore size

(unit : ppm)

Level	No. of Samples	Windscreen pore size			
		Charcoal	11 μm	20 μm	3M
1	5	0.53±0.01* 1.9	0.58±0.07† 12.1‡	0.56±0.02 3.6	0.55±0.04 7.3
2	5	0.64±0.01 1.6	0.66±0.02 3.0	0.65±0.01 1.5	0.66±0.02 3.0
3	6	0.75±0.02 2.7	0.71±0.02 2.8	0.71±0.02 2.8	0.73±0.02 2.7
4	6	0.85±0.01 1.2	0.83±0.03 3.6	0.82±0.02 2.4	0.83±0.01 1.2
5	6	0.93±0.01 1.1	0.91±0.01 1.1	0.89±0.03 3.4	0.92±0.01 1.1
6	6	1.35±0.02 1.5	1.29±0.04 3.1	1.28±0.04 3.1	1.31±0.04 3.1

\* N = 4, † Mean±SD, ‡ Sr(%) = the relative standard deviation(RSD).

Table 7. Comparison of toluene concentrations and their RSDs among the results of charcoal tubes, the original 3M badges and the 3M badges replaced windscreens having the recommended pore size

(unit : ppm)

Level	No. of Samples	Windscreen pore size			
		Charcoal	11 $\mu$ m	20 $\mu$ m	3M
1	5	13.88 $\pm$ 0.25* 1.8	13.99 $\pm$ 0.34 <sup>†</sup> 2.4 <sup>‡</sup>	14.09 $\pm$ 0.38 2.7	13.89 $\pm$ 0.19 1.4
2	5	16.32 $\pm$ 0.48 2.9	16.76 $\pm$ 0.13 0.8	16.70 $\pm$ 0.41 2.5	16.34 $\pm$ 0.21 1.3
3	5	16.92 $\pm$ 0.46 2.7	16.99 $\pm$ 0.21 1.2	17.14 $\pm$ 0.43 2.5	17.03 $\pm$ 0.25 1.5
4	6	20.07 $\pm$ 0.50 2.5	19.72 $\pm$ 0.53 2.7	19.70 $\pm$ 0.60 3.0	19.90 $\pm$ 0.46 2.3
5	6	22.64 $\pm$ 0.17 0.8	22.10 $\pm$ 0.67 3.0	22.09 $\pm$ 0.55 2.5	22.38 $\pm$ 0.40 1.8
6	6	25.61 $\pm$ 0.16 0.6	25.26 $\pm$ 0.59 2.3	24.99 $\pm$ 0.65 2.6	25.51 $\pm$ 0.32 1.3
7	6	33.72 $\pm$ 0.60 1.8	33.35 $\pm$ 0.60 1.8	32.81 $\pm$ 0.89 2.7	33.5 $\pm$ 0.47 1.4

\* N = 4, <sup>†</sup> Mean $\pm$ SD, <sup>‡</sup> Sr(%) = the relative standard deviation(RSD).

Table 8. Comparison of o-xylene concentrations and their RSDs among the results of charcoal tubes, the original 3M badges and the 3M badges replaced windscreens having the recommended pore size

(unit : ppm)

Level	No. of Samples	Windscreen pore size			
		Charcoal	11 $\mu$ m	20 $\mu$ m	3M
1	5	11.97 $\pm$ 0.22* 1.8	11.98 $\pm$ 0.27 <sup>†</sup> 2.3 <sup>‡</sup>	11.91 $\pm$ 0.32 2.7	11.88 $\pm$ 0.18 1.5
2	5	14.65 $\pm$ 0.45 3.1	14.60 $\pm$ 0.11 0.8	14.57 $\pm$ 0.37 2.5	14.15 $\pm$ 0.24 1.7
3	5	15.10 $\pm$ 0.58 3.9	14.98 $\pm$ 0.11 0.7	15.17 $\pm$ 0.36 2.4	14.91 $\pm$ 0.14 0.9
4	6	18.21 $\pm$ 0.39 2.1	18.53 $\pm$ 0.45 2.4	18.42 $\pm$ 0.52 2.8	18.62 $\pm$ 0.44 2.4
5	6	20.41 $\pm$ 0.24 1.2	20.20 $\pm$ 0.68 3.4	20.22 $\pm$ 0.53 2.6	20.36 $\pm$ 0.18 0.9
6	6	23.53 $\pm$ 0.11 0.5	22.66 $\pm$ 0.51 2.3	22.50 $\pm$ 0.54 2.4	22.91 $\pm$ 0.34 1.5
7	6	27.79 $\pm$ 0.52 1.9	28.22 $\pm$ 0.85 3.1	27.88 $\pm$ 0.94 2.7	28.63 $\pm$ 0.32 1.1

\* N = 4, <sup>†</sup> Mean $\pm$ SD, <sup>‡</sup> Sr(%) = the relative standard deviation(RSD).

3. NIOSH의 펌프오차의 권고 기준인 5% 미만의 시료채취율을 가지는 기류제어 막 공극이 크기는 11 $\mu$ m와 20 $\mu$ m이었다.

4. 11 $\mu$ m 기류제어 막의 시료채취율은 벤젠이 36.8cc/min, 톨루엔 32.6cc/min, 오

르소-크실렌이 30.4cc/min이었으며, 20 $\mu$ m 기류제어 막에서는 벤젠 38.2cc/min, 톨루엔 33.0cc/min, 오르소-크실렌이 31.0cc/min이었다.

5. 3M OVM #3500 badge의 시료채취율

은 벤젠이 35.4cc/min, 톨루엔 31.2cc/min, 그리고 오르소-크실렌이 29.5cc/min이었다. 이는 3M사에서 제시한 벤젠 35.5cc/min, 톨루엔 31.4cc/min, 그리고 오르소-크실렌이 27.3cc/min과 유사하게 평가되



었다.

6. 11 $\mu$ m와 20 $\mu$ m 기류제어 막에 평가대상물질에 맞는 시료채취율을 적용하여 측정하면 활성탄관을 이용한 측정방법과 차이가 없었다( $p>0.05$ ).

## REFERENCES

노동부. 질의회신란. 2000. 8. 17일자 질의 및 2000. 8. 24일자 회신. 노동부; [www.mol.go.kr](http://www.mol.go.kr)  
노동부. 화학물질 및 물리적인자의 노출 기준(고시 제2002-8호). 노동부; 2002.  
박동욱, 윤충식, 백남원. 작업환경측정. 한

국방송통신대학교 출판부; 2002. (77-81쪽.)  
백남원. 산업위생학 개론. 신광출판사; 1995. (63, 98쪽.)  
American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). 2004 TLVs<sup>®</sup> and BEIs<sup>®</sup>: Threshold limit values for chemical substances and physical agents. ACGIH; 2003.  
National Institute of Occupational Safety and Health(NIOSH). NIOSH Manual of Analytical Method. 4th ed. NIOSH; 1994.  
NIOSH manual of sampling data sheet. DHEW(NIOSH) Publication No.

77-159, NIOSH; 1977. p. 6  
NIOSH. A NIOSH Technical Report - Guidelines for Air Sampling and Analytical Method Development and Evaluation. NIOSH; 1995.  
Palms ED, Gunnison AF. Personal monitoring devices for gas contaminants. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 1973;(34): 78  
Pristas R. Passive Badge for Compliance Monitoring Internationally. Am. Ind Hyg Assoc J. 1994;55(9): p. 841-844  
3M. 3M Technical data bulletin #1028 - Organic Vapor Monitor Sampling and Analysis Guide. 3M; 1999.