

가

, * **
† . * . **

- Abstract -

Study on Accuracy and Validity Tests for Various Prediction Models for Gas and Vapor Respirator Cartridge Service Lives

Doo Yong Park[†], Ji Young Park*, Chung Sik Yoon**

Department of Industrial Safety Engineering, Hansung University, Seoul, Korea

*Center for Safety Science & Technology Institute, Hansung University, Seoul, Korea**

*Wonjin Institute for Environmental and Occupational Health***

Most breakthrough tests are conducted at higher concentration levels compared to those in the field of air-purifying respirator applications. For example, typical challenge concentrations for breakthrough tests against carbon tetrachloride are ranged between 250- 1000 ppm although applicable concentrations range for air-purifying cartridge is 5- 50 ppm for carbon tetrachloride. However, no guarantee has been made that isotherms derived from the experiment at high challenge concentrations could estimate adsorption capacity at the lower concentration range where workers wear usually air-purifying respirators.

Three models of adsorption isotherms (Freundlich, Langmuir and Dubinin/Radushkevich(D/R) isotherms) that have been commonly applied for respirator

cartridge testing were evaluated. Adsorption capacity at each challenge concentration was calculated from the Reaction Kinetic equation fitted for the breakthrough data. These data were used for derivation of three isotherms.

In general, the D/R isotherm has given the best agreement between estimated adsorption capacities and experimentally measured. If the challenge concentration of 100 ppm is included for derivation of models, Freundlich and D/R models could successfully produced good estimations for adsorption capacities at 50 ppm level. Estimated adsorption capacities by both models ranged in 94 - 109 % of the experimentally measured. However, Langmuir model gives underestimation in all cases.

“ 1997 () ”
† : 271

Tel) 02- 760- 4325 Fax)02- 760- 4217 Email) dooyong@hansung.ac.kr

I.

and Nelson, 1984a, 1984b, 1988, 1990, Yoon et al., 1991, Moyer, 1983, 1987).

가

가

가

가 1

(

1996).

가

가

(breakthrough time)

가

가

(mass transfer balance equation)

, 가

가

(Jonas and Rehrmann, 1973,

(cartridge)

Wood, 1985).

가

가

. 가

가

가

,

가

가

가

가

가

가

가

가

,

(isotherm

adsorption models)

가

Freundlich

, Langmuir

, Dubinin/Radushkevich(D/R)

(Wood, 1985, McBain, 1932, Langmuir, 1918,

Dubinin, 1975).

가,

가

가

가

(Nelson and Harder, 1972, 1974, 1976,

가

Nelson et al., 1976, Nelson and Correia 1976, Yoon

II.

1.

1)

가

Fig. 1

2 (: 0-200
L/min, Dwyer RMC-104, : 0-75
L/min, Gilmont F-1500) 32 ± 1 L/min
(rotameter)
가 (Dry Gas Meter,
American Meter Company, model DTM-325)

가

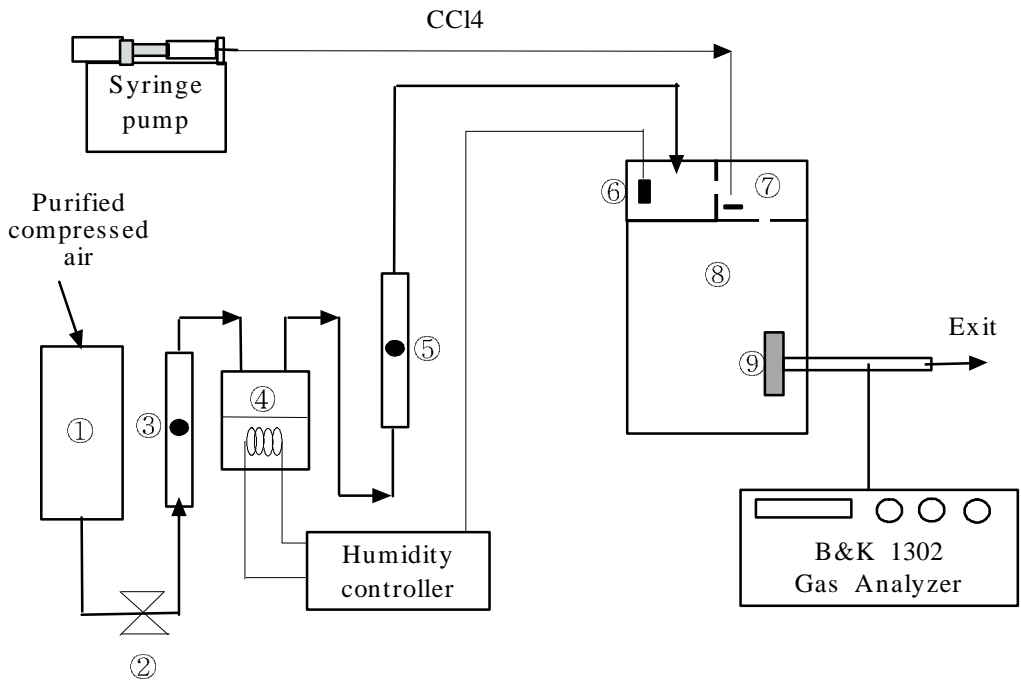


Figure 1. The schematic of the experimental apparatus and system. ① Compressed air filter and regulator panel, ② Valve to adjust main air flow, ③ Rotameter, ④ Humidity generator, ⑤ Rotameter, ⑥ RH probe, ⑦ Flash evaporator, ⑧ Test chamber, ⑨ Tested cartridge.

2)		3. (breakt hrough curve)
General Eastern	가 50±5%가	가
(model 850)		2
(LEF model		()
2003)	가	100% 가 가
3)		Fig. 2
(Harvard Apparatus		
model 22)		가
(flash evaporator, Aldrich #Z11737- 4)		(mass transfer balance equation)
가	가	Reaction Kinetic(RK) equation
가	3	(Wood, 1994, Vermeulen, et
가	가	al., 1984).
4)		
(Bruel & Kjaer B&K 1302)	가	
Bruel & Kjaer B&K 1302 가		where
UA0980		t_b :breakthrough time(min)
RS- 232	IBM	C_x :exit concentraon (g/cm ³)
PC B&K 1302 가		C_o :inlet concentraion (g/cm ³)
3		Q : volumetric flow rate(cm ³ / min)
2.		W : weightof carbonadsorbant(g)
		W_e :equilibrium adsorptioncapacity(g/gcarbon)
		ρ_β : bulk densityof thepackedbed (g/cm ³)
		k_v :adsorptionratecoefficient (min ⁻¹)
		(tb) (Cx)
(carbon tetrachloride)		(We) (kv)
가		Jandel Scientific Software
3M Model		SigmaPlot computer program(SigmaPlot for Windows
#7251	50, 100,	95, version 3.0) curve fitting
250, 500, 1000 ppm		

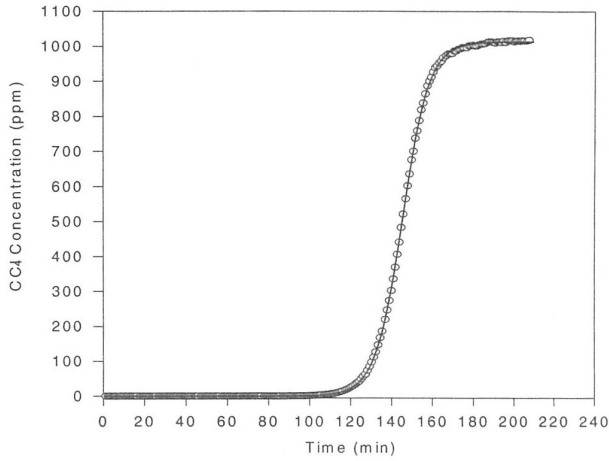


Figure 2. The breakthrough curve obtained from the experiment for 3M cartridge #7251 against carbon tetrachloride at the challenge concentration of 1000 ppm. Blank circles represent the measured breakthrough concentrations. The black line is the theoretical breakthrough curve of the RK equation derived from the experimental data using curve fitting program.

4. 등온흡착곡선식(isotherm adsorption equation)

활성탄의 흡착용량은 다른 환경요인이 고정되어 있는 경우, 전적으로 공기 중 유기용제의 농도의 함수이다. 따라서 유기용제의 농도에 따른 흡착용량을 수식적으로 표현하기 위하여 다양한 모델이 제시되어 왔는데 그 중에서 정화통의 수명예측에 적용되었거나 연구되어온 모델은 Freundlich 등온흡착모델, Langmuir 등온흡착모델, Dubinin/Radushkevich-(D/R) 등온흡착모델 등이다(McBain, 1932, Langmuir, 1918, Dubinin, 1975).

• Freundlich 등온곡선식 모델

$$W_e = aC_o^{1/n}$$

W_e : 흡착용량
 a : 상수
 C_o : 환경농도
 n : 상수

• Langmuir 흡착곡선식 모델

$$W_e = \frac{W_{\max} K_H C_o}{1 + K_H C_o}$$

W_e : 흡착용량
 W_{\max} : 고농도에서의 최대흡착용량
 C_o : 환경농도
 K_H : 헨리 상수

• Dubinin/Radushkevich(D/R) 등온곡선식 모델

$$W_e = W_o d_L \exp \left[-b W_o P_e^{-1.8} R^2 T^2 \left(\ln \left\{ \frac{P}{P_{sat}} \right\} \right)^2 \right]$$

W_e : 흡착용량
 W_o : carbon micropore volume
 d_L : liquid density of absorbate
 b : empiricl coefficient t
 P : partial pressure at C_x
 P_{sat} : saturation vapor pressure at T
 P_e : molar polarization
 R : gas constant
 T : absolute temperature

정화통의 파과실험결과로부터 얻어진 각 시험농도에서의 흡착용량(W_e)으로부터 위의 3가지 등온흡착모델은 RK equation을 유도한 것과 동일하게 컴퓨터 프로그램의 curve fitting기능을 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 파과실험결과

정화통의 파과실험으로부터 얻은 결과는 Fig. 2에 서와 같이 가스나 증기가 흡착제를 통과할 때의 전형적인 파과현상이 나타났다. 이러한 결과는 물질이 동평형방정식의 적용에 매우 적합하였으며 실제로 실험결과로부터 유도된 파과곡선(Fig. 2의 실선부분)은 실험에서 측정된 값과 거의 일치하였다. 파과가 일어나기 시작한 직후와 활성탄이 거의 포화상태에

이른 지점에서 이론적인 파과곡선 방정식과 실험을 통한 파과곡선은 완벽하게 일치하지 않고 미세한 차이가 나타났는데, 이러한 차이는 주로 정화통의 물리적인 구조나 불균일한 활성탄의 충전으로 인하여 시험공기가 정화통을 통과할 때 활성탄의 앞층부터 완벽하게 포화되지 않기 때문인 것으로 추정된다 (McBain, 1932).

2. 각 시험농도에서의 흡착용량 및 흡착율계수

RK equation을 적용하여 시간별 파과농도의 측정 값을 가장 적은 오차로 만족하는 곡선식을 산출하여 미지의 두 변수인 흡착용량(W_e)과 흡착율계수(k_v)를 계산한 결과 Table 1과 같았다. 각각의 실험농도에서 산출된 흡착용량(W_e)은 시험농도가 낮아질수록 감소하는 경향이 뚜렷하였다.

Table 1. The equilibrium adsorption capacity(W_e) and adsorption rate coefficient(k_v) values calculated from the RK equation derived from the experiment for carbon tetrachloride

Challenge Concentration		Flow rate	Adsorption capacity, W_e	Adsorption rate coefficient, k_v
Level(ppm)	Actual(ppm)	(Lpm)	(g/gC)	(min ⁻¹)
50	49.15	32.13	0.3237	5787.05
	106.4	32.10	0.4111	5089.48
	103.0	32.17	0.4021	5270.12
	106.0	32.11	0.4109	4450.75
	103.9	31.71	0.4101	4306.21
	101.0	32.11	0.3894	5323.70
	101.5	31.71	0.3742	4482.16
250	254.4	32.10	0.5319	5546.16
	259.0	32.17	0.5391	5279.40
	250.0	32.07	0.5229	5758.57
	496.0	32.11	0.6024	5166.79
500	510.0	31.17	0.5930	5704.15
	1006.5	32.27	0.6648	6089.02
	1009.9	31.81	0.6518	6695.82
	1006.5	32.10	0.6524	5882.04
1000	1012.9	32.17	0.6517	6651.83
	1014.0	32.10	0.6687	6062.91
	1011.3	32.17	0.6740	5195.78
	1016.2	32.10	0.6749	6300.24
	1006.3	32.17	0.6721	5315.20

Table 1과 같이 산출된 실험결과로부터 유기용제의 농도와 정화통의 흡착용량간의 관계를 파악하기 위하여 Freundlich 등온흡착모델, Langmuir 등온흡착모델, Dubinin/Radushkevich(D/R) 등온흡착모델을 적용하였다. 농도별 흡착용량의 실험값을 만족시키는 각 등온흡착모델을 변수는 Talbe 2와 같이 산출되었다. 따라서 각 모델을 이용하여 농도별 흡착용량을 추정할 수 있게 되었다. Table 3은 이러한 모델로부터 추정된 흡착용량과 실제 실험으로부터 얻은 값을 비교한 것이다.

각 시험농도수준에서 각 모델로부터 추정된 흡착용량은 실제 실험값과 큰 차이를 보이지 않았다. 다

만, Langmuir 등온흡착모델로부터 추정된 흡착용량은 시험농도가 낮아질수록 과소평가되는 경향을 보였으며 특히 50 ppm 수준에서는 실험값의 83.9 %수준으로 추정하였다. 이러한 경향은 각 모델로부터 추정된 농도별 흡착용량을 표현한 Fig. 3을 보면 더욱 뚜렷하게 알 수 있다. Fig. 3에서 보면 100 ppm 이상의 고농도조건에서는 Langmuir 등온흡착모델이 실제 실험값과 가장 근사한 것처럼 보인다. 그러나 50 ppm 이하의 수준에서 Langmuir 등온흡착모델에 의한 추정치는 현저하게 과소평가되는 것으로 보인다. Freundlich 등온 흡착모델에 의한 추정결과는 50 ppm 이하의 낮은 농도수준에서 약간 과대평가되고 있는 것으로 보인다.

Table 2. Estimated variables for each isotherms derived from the experiment for carbon tetrachloride

Freundlich isotherm		Langmuir isotherm		D/R isotherm	
α	n	W_{max}	K_H	b	W_o
0.1532	4.6033	0.7276	0.0127	0.6566	$2.9872 \times e^{-5}$

Table 3. Adsorption capacity (g/g Carbon) obtained from experiment and each isotherms at various challenge concentration levels (%)

Concnetration (ppm)	No. of experiment	Experiment	Freundlich	Langmuir	D/R
49.2	1	0.3314 (100.0)	0.3568 (107.7)	0.2788 (83.9)	0.3402 (102.7)
103.6	6	0.4093 (100.0)	0.4201 (102.6)	0.4138 (101.1)	0.4178 (102.1)
254.5	3	0.5441 (100.0)	0.5105 (93.8)	0.5557 (102.1)	0.5198 (95.5)
503.0	2	0.6120 (100.0)	0.5917 (96.7)	0.6290 (102.8)	0.6014 (98.3)
1010.5	8	0.6798 (100.0)	0.6886 (101.3)	0.6749 (99.3)	0.6863 (101.0)

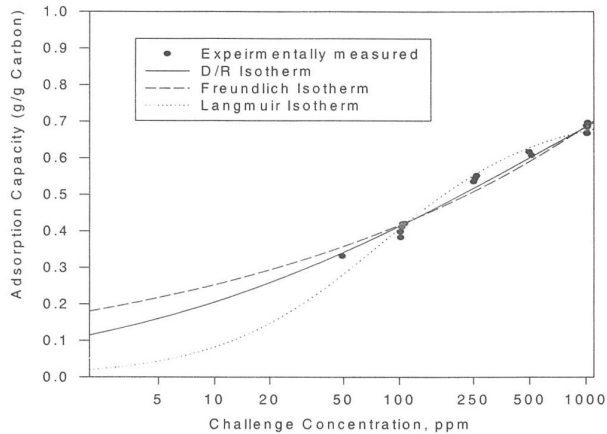


Figure 3. Experimentally measured adsorption capacity and various isotherms derived from the experimental values.

3. 시험농도 수준이 흡착용량의 추정에 미치는 영향

우리나라 호흡보호구 성능검정기준에서 유기용제용 방독마스크의 직결식소형 정화통에 대한 성능은 사염화탄소의 농도가 300 ppm인 시험가스로 검정을 실시한다(노동부, 1997). 미국의 경우에는 사염화탄소 1,000 ppm 농도수준에서 성능검정을 실시하고 있다. 또한 대부분의 정화통 성능검정이나 수명예측에 관한 연구도 실제 사용환경에 비하여 비교적 높은 농도수준에서 이루어져 왔다. 정화통의 흡착용량은 가스 및 증기의 종류에 따라 차이가 매우 크며 가스나 증기의 유해성이나 독성에 따라 적절한 방독마스크의 사용범위가 다르게 설정되어야 할 것이다. 실제 사업장의 작업환경에서 근로자의 노출농도가 허용기준의 10배를 초과하는 경우는 극소수를 제외하고는 거의 없다. 따라서 현재의 방독마스크 정화통의 성능검정 규정의 시험농도수준은 실제 사용환경과 비교하여 상당히 높은 수준이다. 사염화탄소의 경우, 근로자의 노출기준은 우리나라 노동부에서 설정한 노

출기준이나 미국 정부산업위생전문가협회(ACGIH)에서 설정한 TLV가 모두 5 ppm이다(노동부, 1998, ACGIH, 1998). 우리나라에서는 직결식소형 정화통의 사용범위를 가스 및 증기의 종류에 상관없이 0.1%이하라고 규정하고 있으나(노동부, 1997), 실제로 미국의 경우에는 직결식소형 정화통의 사용범위를 허용기준의 10배 이내로 제한하고 있다(OSHA, 1991, NIOSH, 1987). 즉, 직결식소형 정화통의 사용범위는 5 ~ 50 ppm의 범위가 적정수준이라고 보아야 할 것이다.

그러므로 정화통의 성능검정이나 수명예측을 위한 실험은 실제 사용환경조건과 유사한 농도수준에서 실시하는 것이 가장 바람직할 것이다(박두용, 1998). 그러나 낮은 농도수준에서 실험하기에는 과다농도가 시험농도의 100 %에 이르기까지 장시간이 소요된다. 과다실험의 시작에서부터 끝날 때까지 공기 중 시험물질의 농도를 낮은 상태로 균일하게 유지시키는 작업도 쉽지 않다. 즉, 고농도에서 실험하는 것보다 기술과 장비, 인력이나 시간 등의 제약이 따르게 된다. 이러한 이유로 정화통의 성능검정이나 수

명예측실험은 비교적 고농도조건에서 이루어져 왔다.

정화통의 흡착용량은 가스 및 증기 농도의 함수이므로 고농도 수준에서의 실험결과로부터 적절한 등온흡착모델이 유도되면 이론적으로 낮은 농도수준에서도 흡착용량을 추정할 수 있다. 이 때 등온흡착모델을 유도하려면 반드시 2 단계이상의 다른 농도수준에서 실시한 파과실험으로부터 농도별 흡착용량이 파악되어야 한다. 그러나 실제로 고농도수준에서 실험한 결과로부터 유도된 모델이 실제 보호구의 사용환경인 저농도에서의 흡착용량을 정확하게 추정할 수 있는지의 여부와 어떤 모델이 정확도가 높은지에 대한 연구보고는 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 정화통의 일반적인 성능검정이 이루어지는 고농도조건(250-1000 ppm)에서의 파과실험결과만 이용하여 3가지의 등온흡착모델을 유도한 후에 이들 모델로부터 직결식소형 정화통의 실제 사용환경인 저농도 수준(50 ppm)에서 흡착용량을 추정하였다. 추정된 흡착용량은 50 ppm 수준에서 수행된 실험결과와 비교하여 정확도를 검정하였다. 또한 100 ppm과 1000 ppm, 250 ppm과 1000 ppm, 500 ppm과 1000 ppm 등 다양한 조합의 두 단계의 농도수준에서의 실험결과로부터 유도된 모델의 정확도를 검정하였다.

1) 고농도조건에서의 유도된 모델의 정확도

일반적으로 보호구의 성능검정이나 수명예측을 위하여 설정되는 시험농도수준인 250 ppm, 500 ppm, 1000 ppm에서 실험한 결과로부터 얻은 모델을 이용하여 흡착용량을 추정한 결과는 Fig 4에서 보는 바와 같다. 시험농도, 250 ppm, 500 ppm 및 1000 ppm에서 실시한 파과실험결과로부터 유도된 Freundlich, Langmuir, 그리고 D/R 등온흡착모델을 이용하여 50 ppm 수준에서의 흡착용량을 추정한 결과, 실제 측정값에 비하여 각각 126.0 %, 75.8 %, 그리고 116.4 %로 많은 차이를 보였다(Table 4참조). Fig. 4에서 보는 바와 같이 3 개의 등온 흡착모델로부터 추정된 흡착용량은 실제 보호구를 사용하는 농도수준인 50

ppm 미만에서 농도가 낮아질수록 더욱 큰 차이를 보인다.

이 실험결과로 볼 때, 고농도조건에서 실험한 결과를 이용하여 저농도수준에서의 흡착용량을 추정하는데는 3가지의 등온흡착모델 중에서 D/R 모델이 가장 정확한 것으로 판단된다. 이것은 D/R 모델이 호흡보호구의 수명예측에 가장 적합하다는 최근의 다른 연구결과와도 일치한다(Wood, 1994). 그러나 고농도조건에서 유도된 모델은 어느 것도 낮은 농도에서의 흡착용량을 정확하게 추정할 수 없었고, 오차는 농도가 낮아질수록 커진다는 결과를 놓고 볼 때, 모델을 유도하기 위한 시험농도가 추정된 흡착용량의 정확도에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 나타났다.

2) 적절한 시험농도수준 및 범위

Table 4는 다양한 조합의 실험결과로부터 유도된 등온흡착모델들로부터 49 ppm의 농도에서 추정된 흡착용량과 실험을 통하여 측정된 값을 비교한 것이다. 실험에서 측정된 흡착용량과 추정된 흡착용량이 유사하여 비교적 정확도가 높게 나타난 것은 100, 250, 500 및 1000 ppm의 시험농도에서 실험한 결과를 모두 사용하여 유도한 경우와 100과 1000 ppm의 시험농도에서 실험한 결과로부터 모델을 유도한 경우였다. 특히, 100과 1000 ppm의 두 시험농도에서 실험한 결과로부터 유도된 Freundlich와 D/R 등온흡착모델은 100, 250, 500 및 1000 ppm의 4 단계 시험농도에서나 250, 500 및 1000 ppm의 3 단계 시험농도에서 유도된 모델보다 오히려 정확도가 높게 나타났다.

시험농도가 250 ppm이상인 경우에는 어떠한 농도수준의 실험결과로부터 등온흡착모델을 유도하더라도 50 ppm 수준의 낮은 농도에서의 흡착용량을 추정하는데 비교적 큰 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 시험농도가 250 ppm 이상인 수준에서 유도된 Freundlich 모델이 추정된 49 ppm 수준의 흡착용량은 실제 실험값보다 123 - 129 %로 과대평가 하였으며, Langmuir 모델은 64 - 85 % 수준으로 과소평가 하였다. 비교적 오차가 적은 D/R 모델도 시험농도

250 ppm 이상의 실험결과를 토대로 유도되었을 경우, 다양한 시험농도 구간과 범위에 상관없이 모두 49 ppm에서의 흡착용량을 실험값의 약 116 %로 과대평가 하였다.

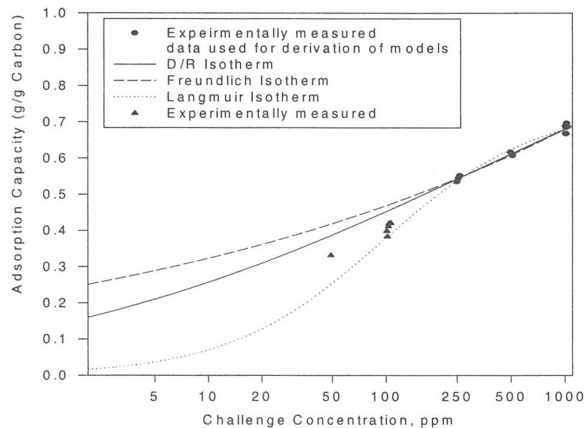


Figure 4. Estimated adsorption capacity from various isotherms derived from the experimental data at the challenge concentrations of 250, 500, 1000 ppm. Each curve derived from the black dots. Black triangles represent the measured adsorption capacities at 50 ppm and 100 ppm.

Table 4. Measured and estimated adsorption capacities (g/g Carbon) at the challenge concentration of 49 ppm (%)

Data used* (ppm)	Experiment	Freundlich	Langmuir	D/R
100-250-500-1000	0.3314 (100.0)	0.3611 (109.0)	0.2705 (81.6)	0.3416 (103.1)
250-500-1000	0.3314 (100.0)	0.4176 (126.0)	0.2513 (75.8)	0.3859 (116.4)
100-250	0.3314 (100.0)	0.3223 (97.3)	0.2788 (84.1)	0.3129 (94.4)
100-500	0.3314 (100.0)	0.3381 (102.0)	0.2792 (84.2)	0.3236 (97.6)
100-1000	0.3314 (100.0)	0.3461 (104.4)	0.2735 (82.5)	0.3316 (100.1)
250-500	0.3314 (100.0)	0.4093 (123.5)	0.2799 (84.5)	0.3866 (116.7)
250-1000	0.3314 (100.0)	0.4157 (125.4)	0.2554 (77.1)	0.3860 (116.5)
500-1000	0.3314 (100.0)	0.4278 (129.1)	0.2129 (64.2)	0.3850 (116.2)

* Data used for derivation of each model. Values indicate the challenge concentration levels for the breakthrough tests.

그러나 100 ppm의 시험농도를 포함하여 모델을 유도하였을 경우에는 추정치와 실험값의 차이가 현저히 감소하였다. 시험농도 100 ppm의 결과를 포함하여 유도한 D/R 모델로부터 추정된 49 ppm에서의 흡착용량은 94 - 103 %로 비교적 정확하였으며, Freundlich 모델이 추정된 49 ppm에서의 흡착용량도 실험값과 비교하여 97 - 109 % 수준으로 비교적 양호하였다. 다만, Langmuir 모델로부터 추정된 흡착용량은 실험값보다 낮은 81 - 84 %로 나타나 여전히 과소평가될 가능성이 큰 것으로 나타났다.

보호구의 수명예측이나 성능검정 실험에서 자원과 시간을 절약하고 효율성을 향상시키기 위해서는 가능한 시험농도단계를 최소한으로 설정하는 것이 바람직하다. 정화통의 과과실험으로부터 모델을 유도하기 위해서는 최소한 두 단계이상의 다른 시험농도 수준에서 실험이 수행되어야 한다. 위의 결과는 시험농도의 수준과 범위가 적절하게 선정된다면 과과실험 농도수준은 두 단계가 충분하다는 것을 암시한다. 일반적으로 실험실에서 시험농도 수준의 차이를 크게 설정하는 것은 그리 어렵지 않으므로 시험농도의 낮은 쪽은 가능한 실제 적용하고자 하는 농도수준에 가능한 근접하도록 하고 높은 쪽의 농도는 그 보다 몇 배 높은 수준에서 설정하면 될 것으로 판단된다. 즉, 시험농도를 설정할 때에는 낮은 농도수준은 실제 보호구를 사용하는 환경농도범위내에 포함하도록 하고, 두 시험농도 수준의 차는 가능한 크게 해야 할 것이다.

3) 3가지 등온흡착모델의 비교

여러 가지 등온흡착모델로부터 정화통의 수명이나 흡착용량을 파악하고자 할 때에는 반드시 모델이 유도된 시험농도를 고려해야 한다. 왜냐하면 모델의 정확도는 같은 모델이라고 하더라도 모델이 유도된 농도수준과 범위에 따라 큰 차이를 보이기 때문이다. 사염화탄소의 경우, 여러 가지 시험농도조건에서 유도된 Freundlich, Langmuir, D/R 등온흡착모델로부터 50 ppm수준의 흡착용량을 실험값과 비교한 결과,

전반적으로 Freundlich 모델과 D/R 모델의 정확도가 Langmuir 모델보다 높은 것으로 나타났다.

Freundlich 등온흡착모델의 정확도는 모델을 유도하기 위하여 실험한 시험농도수준과 흡착용량을 추정한 농도수준에 따라 많은 차이를 보였다. 보호구의 사용조건보다 훨씬 높은 시험농도조건에서 실험한 결과를 바탕으로 유도된 Freundlich 모델은 정화통의 흡착용량을 실제보다 과다하게 평가하는 것으로 나타났다. 따라서 호흡보호구의 수명을 과다하게 평가하여 실제 파과가 일어난 후에 정화통을 교체함으로써 보호구의 사용자로 하여금 유기용제에 대한 노출위험을 증가시킬 우려가 있으므로 주의해야 할 것이다. 그러나 1개 이상의 시험농도가 호흡보호구의 사용환경농도 범위에 근접한 경우, Freundlich 모델에 의한 흡착용량의 추정치는 매우 정확한 것으로 나타났다. 따라서 시험농도가 비교적 낮은 수준에서 설정된다면 보호구의 수명예측 및 성능검정 또는 정화통의 흡착특성을 파악하는데 매우 우수한 모델이라고 판단된다.

반면에 Langmuir 모델은 전체적으로 정화통의 흡착용량을 과소평가하는 것으로 나타나 정화통의 교체주기를 빠르게 설정함으로써 정화통의 낭비와 비용의 증가를 유발할 우려가 있는 것으로 나타났다.

D/R 모델은 전체적으로 가장 낮은 오차를 나타내어 일반적인 정화통의 흡착용량을 추정하는데 가장 적합한 모델이라고 판단된다. 시험농도 수준이 보호구의 사용환경농도 범위에 근접한 경우는 물론이고 시험농도 수준이 실제 사용조건보다 훨씬 높은 수준에서 유도된 경우에도 적절한 안전계수만 고려하면 실용적으로 사용하는데 문제가 없을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

정화통에 대한 과과실험으로부터 정화통의 흡착용량을 산출할 수 있으며, 여러 수준에서의 시험농도에서 산출된 흡착용량 자료로부터 농도별 흡착용량을 추정하는 등온흡착모델을 유도할 수 있다. 본 연

구에서도 최소한 2단계 수준이상의 시험농도에서 실시한 과과실험 결과로부터 지금까지 호흡보호구의 수명예측이나 성능검정에 널리 응용되어 온 대표적인 등온흡착모델인 Freundlich, Langmuir, D/R 모델을 유도할 수 있었다.

실험으로부터 유도된 세 모델로부터 역으로 흡착용량을 추정하는데 시험농도 범위내에서는 정확도가 비교적 높았다. 그러나 모델을 유도한 실험농도보다 낮은 농도에서의 흡착용량을 추정한 결과, 각 모델의 정확도에는 다음과 같은 차이가 나타났다. 실험흡착용량을 추정하고자하는 농도수준보다 시험농도가 훨씬 높은 경우(사염화탄소의 경우 추정하고자 하는 최대 농도수준은 50 ppm, 시험농도는 250 ppm이상), Freundlich 모델과 D/R 모델에 의한 예측값은 각각 실험값의 123 - 129 %와 116 - 117 % 정도로 과대평가 하는 것으로 나타났고 Langmuir 모델에 의한 예측값은 64 - 85 % 정도로 과소평가 하는 것으로 나타났다. 반면에 최소한 1 개이상의 시험농도가 흡착용량을 추정하고자하는 농도범위에 근접한 경우(사염화탄소의 경우, 추정하고자 하는 최대 농도수준은 50 ppm, 1 개의 시험농도수준이 100 ppm을 포함한 경우), Freundlich 모델과 D/R 모델에 의한 예측값은 각각 실험값의 97 - 109 %와 94 - 103 % 정도로 비교적 정확하게 평가하는 것으로 나타났다. 그러나 Langmuir 모델에 의한 예측값은 실험값의 82 - 84 % 정도로 여전히 과소평가 하는 것으로 나타났다.

따라서 실험으로부터 등온흡착모델을 유도하여 호흡보호구의 수명예측이나 성능검정을 하기 위해서는 적절한 시험농도의 선정이 중요하다. 시험농도를 설정할 때에는 최소한 1개 이상의 농도수준이 실제 적용하고자 하는 농도범위에 들거나 근접하도록 설정하는 것이 바람직하다. 시험농도 수준은 적절한 간격만 설정한다면 2 단계면 충분하다. 시험농도를 설정할 때에는 낮은 농도수준은 실제 보호구를 사용하는 환경농도범위내에 포함하도록 하고, 두 시험농도 수준의 차는 가능한 크게 해야 할 것이다.

실험실에서 적용할 수 있는 시험농도가 실제 사용

환경보다 전반적으로 높은 경우에는 일반적으로 D/R 모델의 정확도가 가장 높았으나 이 모델도 최소한 하나 이상의 시험농도가 실제 보호구를 사용하는 농도범위내에 포함될 때 가장 좋은 결과를 나타냈다. 낮은 쪽의 시험농도가 실제 보호구의 사용환경 농도범위와 큰 차이를 보이지 않을 때에는 Freundlich 모델과 D/R 모델에서 모두 정확도가 매우 높게 나타났다. 따라서 보호구의 사용조건을 반영한 실험조건에서 유도된 경우, Freundlich 모델이나 D/R 모델을 적용할 수 있으며, 모델을 유도할 때의 시험농도가 보호구의 사용환경보다 높은 경우 또는 자세한 정보가 부족한 경우에는 D/R 모델을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- 노동부: 방독마스크의 규격, 노동부고시 제91-81호, 노동부, 1991.
- 노동부: 화학물질 및 물리적 인자의 노출기준, 노동부고시 제97-65호, 노동부, 1998.
- 정해동, 백남원 : 복합유기용제에 노출된 호흡보호구용 정화통의 파괴에 관한 연구. 한국산업위생학회지 1996: 6(1): 55-66.
- 박두용: 직결식 소형 방독마스크의 유기용제용 정화통에 대한 우리나라 성능검정기준 시험농도의 문제점과 개선방안, 한성대학교 논문집 1998: 22(3):347-363.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH): 1998 TLVs and BEIs, ACGIH Cincinnati, OH, 1998.
- Dubinin, MM: Physical Adsorption of Gases and Vapors in Micropores. Prog Surf Membr Sci 1975: 9:1-70.
- Jonas LA and JA Rehrmann : Predictive Equations in Gas Adsorption Kinetics Carbon, 1973; 11: 59-64.
- Langmuir I : The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum. J Chem Soc

1918; 40:1361-1402.

McBain JW : The Sorption of Gases and Vapors by Solids. London: Routledge, 1932.

Moyer ES : Review of Influential Factors Affecting the Performance of Organic Vapor Air-Purifying Respirator Cartridges. Am Ind Hyg Assoc J 1983; 44(1): 45-51.

Moyer ES : Organic Vapor (OV) Respirator Cartridge Testing-Potential Jonas Model Applicability. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 1987; 48(9):791-797.

National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH): Respirator Decision Logic(DHHS/NIOSH Pub. No. 87-108). U.S. Department of Human Health Services/NIOSH, Washington DC. 1987.

Nelson GO and CA Harder : Respirator Cartridge Efficiency Studies : IV. Effects of Steady-State and Pulsation Flow. Am Ind Hyg Assoc J 1972; 33: 797-805.

Nelson GO and CA Harder : Respirator Cartridge Efficiency Studies : V. Effects of Solvent Vapor. Am Ind Hyg Assoc. J 1974; 35: 391-410.

Nelson GO and CA Harder : Respirator Cartridge Efficiency Studies : VI. Effects of Concentration. Am Ind Hyg Assoc J 1976a; 37: 205-216.

Nelson GO, AN Correia and CA Harder : Respirator Cartridge Efficiency Studies : VII. Effects of Relative Humidity and Temperature. Am Ind Hyg. Assoc J 1976b; 37: 280-288.

Nelson GO and AN Correia : Respirator Cartridge Efficiency Studies : VIII. Summary and Conclusions. Am Ind Hyg Assoc J 1976c; 37: 514-525.

Occupational Safety and Health Administration (OSHA): Respiratory Protection Program Manual(OSHA Instruction 2-2.54), OSHA, Washington DC, 1991.

Vermeulen T, MD LeVan, NK Hiester, and G Klein : Adsorption and Ion Exchange. In Perry's Chemical Engineers Handbook, New York, edited by RH Perry, DW Green and JO Maloney. 6th ed., McGraw-Hill Book Company, 1984. Section 16.

Wood GO : Effects of Air Temperatures and Humidities on Efficiencies and Lifetimes of Air-Purifying Chemical Respirator Cartridges Tested Against Methyl Iodide. Am Ind Hyg Assoc. J 1985; 46(5):251-256.

Wood GO : Estimating Service Lives of Organic Vapor Cartridges, Am Ind Hyg Assoc J 1994; 55(1):11-15.

Yoon YH and JH Nelson : Application of Gas Adsorption Kinetics - I. A Theoretical Model for Respirator Cartridge Service Life. Am Ind Hyg Assoc J 1984a; 45(8): 509-516.

Yoon YH and JH Nelson : Application of Gas Adsorption Kinetics - II. A Theoretical Model for Respirator Cartridge Service Life and Its Practical Applications. Am Ind Hyg Assoc J 1984b; 45(8): 517-524.

Yoon YH and JH Nelson : A Theoretical Study of the Effect of Humidity on Respirator Cartridge Service Life. Am Ind Hyg Assoc J 1988; 49(7): 325-332.

Yoon YH and JH Nelson : Effects of Relative Humidity and Contaminant Concentration on Respirator Cartridges for Binary Acetone/m-Xylene System. Am Ind Hyg Assoc J 1991; 52(2): 65-74.