

# Yoon과 Nelson의 흡착모델을 이용한 방독마스크 정화통의 수명예측(I)

김기환<sup>1</sup> · 원정일<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국소방안전협회, <sup>2</sup>충북과학대학 환경생명과학과

## Prediction of Service Life of a Respirator Cartridge for Organic Solvent by Using Yoon and Nelson's Adsorption Model

Ki-Hwan Kim<sup>1</sup> · Jung-Il Won<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Fire Safety Association

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, Chungbuk scientific collage

A respirator is useful to protect a worker from the harmful gases and vapors in the workplace, and the evaluation of respirator cartridge service life is important for the worker's health and safety. The performance of cartridge is effected by several factors such as concentration of gas and vapor, humidity, temperature, adsorbents and cartridge packing density.

Adsorption model was applied to both sampling tube and respirator cartridge to predict the service life for organic vapors. The variables of the adsorption model were measured from the experiment with the sampling tube, and it was used to predict the service life of respirator cartridge. In the experiment, we used carbon tetrachloride as a organic vapor and activated carbon take out respirator cartridge as activated carbon.

As a result, it was possible to predict the service life of

respirator cartridge and predicted service life was quite correct. Breakthrough time decreased with increase of CCl<sub>4</sub> concentration. In case of sampling tube, adsorbed amount of CCl<sub>4</sub> was larger than respirator cartridge due to linear velocity. Also, rate constant of sampling tube was larger than respirator cartridge, because of, effect of flow rate, packing density. In the prediction of service life of respirator cartridge by using sampling tube, the time required for 50% contaminant breakthrough( $\tau$ ) is more effective than the rate constant( $k'$ ).

**Key Words :** Prediction, Respirator Cartridge, Yoon and Nelson's Adsorption Model  
Organic Solvent, Service Life, Sampling Tube

## I. 서론

작업현장에서 사용되는 화학물질은 산업구조의 고도화에 따라 점점 다양화되고 있어, 근로자가 직접 혹은 간접적으로 유해화학물질에 폭로될 가능성이 증가하고 있다. 이러한 폭로에 의하여 유해물질이 인체내로 침입되는 경로는 호흡기, 피부, 소화기로 나눌 수 있고 이중 호흡기를 통한 폭로가 가장 많은 것으로 나타나있다.

유기용제가 공통적으로 인체에 미치는 영향은 중추신경계의 활성을 저하시키며 생체막의 지방이나 지질을 제거하여 자극성을 유발시키는 것이다. 이에 따라 작업장에서는 유기용제와 같은 유해화학물질로부터 작업자를 방호해주기 위하여 방독마스크를 사용하고 있다.

방독마스크는 면체의 종류에 따라 격리식, 직결식, 직결소형식으로 분류되나 모두 정화통을 사용하여 유해가스, 증기를 여과하도록 되어있어 해당 작업장에서 사용하는 유해물질의 종류와 작업상태에 알맞는 방독마스크 및 정화통을 선택하여 사용해야 한다.

가장 많이 사용되는 유기가스용 방독마스크 정화통은 흡착제로 활성탄을 주로 사용하고 있는데 그 이유는 여러 종류의 유기증기에 대한 활성탄의 친화력과 넓은 표면적 때문이며, 흡착능력은 유기가스의 종류 및 사용환경에 따라 크게 달라진다.

작업현장에서 정화통의 수명에 영향을 줄 수 있는 인자는 경쟁흡착을 일으킬 다른 화학물질의 영향, 수명을 단축하거나 혹은 경우에 따라 증가시킬 수 있는 습도의 영향, 대상되는 유해가스의 농도의 영향 그리고 작업자의 작업강도에 따른 호흡량의 영향 등이다.

Ruth et al.(1972), Nelson과 Hodgkins(1972), Nelson et al.(1972), Nelson과 Harder (1972,1974), Nelson et al.(1976), Nelson과 Correia(1976)은 유기용제의 농도가 증가하면 파과시간은 대수적으로 반비례하여 감소하고, 대기온도가 10℃ 증가할 때마다 파과시간은 유기용제의 종류에 따라 다르지만 대부분 1 ~ 10%씩 감소하며, 대기중 수증기는 가스나 증기상태의 화학물질보다 극성이 강하여 활성탄의 기공에 먼저 흡착되기 때문에 작업환경의 상대습도가 50% 이하일 때는 별 영향이 없으나 65% 이상에서는 흡착능력이 급격하게 감소한다고 보고하였다. 또한, 파과시간은 정화통을 통과하는 유량에 따라 반비례하여 감소하며, 활성탄의 충전량이 2배로 증가하면 파과시간 역시 2배로 증가한다고 보고하였다.

Yoon과 Nelson(1984, 1988, 1990, 1992)은 시간에 따른 분자의 흡착될 확률의 감소 속도는 흡착될 확률과 파과될 확률에 비례한다는 원리를 적용하여 정화통의 농도와 습도변화, 그리고 단일물질 및 혼합물에 의한 정화통의 파과시간을 예측

하였다. 이들의 연구는 새로운 이론을 이용하여 계산한 정화통과 샘플관 흡착량과 파과시간이 실험값과 잘 일치함을 보였다.

본 연구에서는 각 작업현장의 환경조건에 따른 정화통의 수명을 예측하기 위하여 샘플관에 정화통에서 꺼낸 활성탄 소를 소량 충전하고 파과곡선을 구하였다. 이를 Yoon과 Nelson(1984, 1988, 1990, 1992)의 흡착모델식에 적용시켜 필요한 변수값을 얻은 후, 이 변수값을 이용하여 작업현장 조건에 따른 정화통의 수명을 예측하고, 이를 실험값과 비교하여 가장 정확히 파과시간을 예측할 수 있는 방법을 찾고자 하였다.

## II. 이론적 배경

### 2.1. 흡착 모델식

Yoon과 Nelson(1984, 1988, 1990, 1992)은 시간에 따른 분자의 흡착될 확률의 감소 속도는 흡착될 확률과 파과될 확률에 비례한다는 원리를 이용하여 다음과 같은 흡착 모델식을 제시하였다.

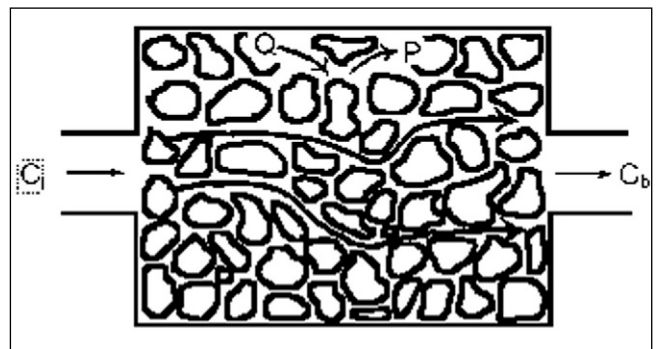


Fig. 1. Schematic diagram of gas flow system used here.

Fig.1에서 흡착될 확률의 감소(파과농도의 변화)속도는  $C_b$ 와  $C_i - C_b$ 에 비례하므로 식(1)과 같다.

$$-\frac{dQ}{dt} \propto QP \quad (1)$$

여기서,  $C_i$ 는 오염가스 주입농도(ppm),  $C_b$ 는 파과농도(ppm),  $P$ 는 통과될 확률,  $Q$ 는 흡착될 확률이다.

흡착될 확률의 감소속도는 가스의 농도와 유속에 비례하고, 활성탄의 양에 반비례한다. 또한, 활성탄의 양은 활성탄의 흡착량과 비례하므로 식(1)은 식(2)와 같다. 이때, 활성탄의 양은 활성탄의 흡착량과 비례하므로 식(2)는 식(3)과 같다.

$$- \frac{dQ}{dt} \propto \frac{CF}{W_c} QP \quad (2)$$

여기서, C 는 오염가스농도(g/L), F 는 유속(L/min),  $W_c$  는 활성탄의 중량(g charcoal/cartridge)이다. 식(2)는 무차원 비례상수  $k$ 를 사용하여 다음식(3), (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$- \frac{dQ}{dt} = \frac{kCF}{W_c} QP \quad (3)$$

또는

$$- \frac{dQ}{dt} = k' QP, \quad k' = \frac{kCF}{W_c} \quad (4)$$

여기서,  $k'$  는 속도상수(min<sup>-1</sup>)이며, 식(4)를 풀면 다음식과 같다.

$$\ln \frac{Q}{1-Q} = k'(\tau-t) \quad (5)$$

여기서,  $\tau$ 는 50% 파과를 얻기 위해 필요한 시간이다.

$$Q = \frac{1}{1+e^{k'(\tau-t)}}, \quad P = \frac{1}{1+e^{k'(\tau-t)}} \quad (6)$$

$$t = \tau + \frac{1}{k'} \ln \frac{P}{1-P} \quad (7)$$

여기서,  $t$ 는 파과시간(min/cartridge)이다.

식(6)의 파과곡선을, 원점  $t=0, P=0$ 에서부터  $t=\tau, P=1/2$ 까지 이동시킨다면 Fig.2 와 같다.

여기서  $W=W''$  즉,

$$W_e = CF\tau \quad (8)$$

따라서 식(5)의  $k'$  값은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k' = \frac{kCF}{W_e} = \frac{k}{\tau} \quad (9)$$

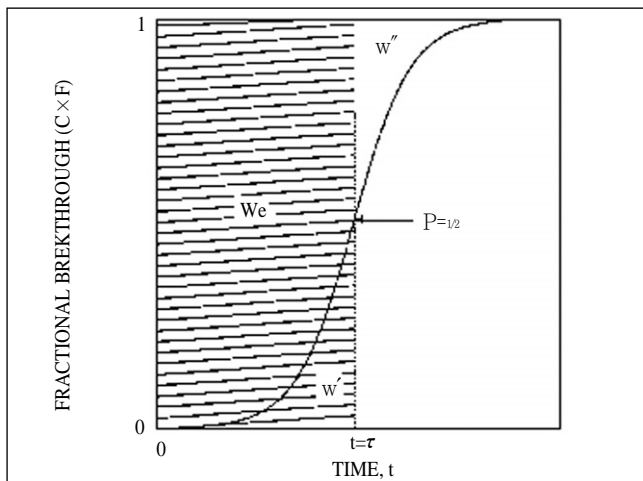


Fig. 2. Graphical illustration of the breakthrough curve and the relationship.

0부터 시간  $t$ 까지 흡착된 양( $W_t$ )은 식 (10)과 같다.

$$W_t = \int_0^t QCF dt = \int_0^t CF(1-P)dt \quad (10)$$

만약, 농도와 유속이 시간에 따라 변하지 않는다면, 식 (11)과 같이 풀 수 있다.

$$W_t = CF \left[ t - \frac{1}{k'} \ln(1+e^{k'(\tau-t)}) + \frac{1}{k'} \ln(1+e^{k'\tau}) \right] \quad (11)$$

정화통의 실제 적용에 있어  $k\tau$  값은 충분히 크므로 마지막 항은 무시할 수 있다.

$$W_t = CF \left[ t - \frac{1}{k'} \ln(1+e^{k'(\tau-t)}) \right] \quad (12)$$

따라서, 식 (12)를 이용하여 샘플관으로 부터, 흡착량을 구할 수 있다.

## 2.2 샘플관을 이용한 정화통 파과곡선 예측 방법

샘플관 실험은 유속(F) 5.5 l/min, 농도(C) 1000 ppm 에서 300 ppm 까지 실시하고,  $[\ln P/(1-P)]$  와  $t$ 의 1차식을 유도하여 실험결과로부터 샘플관의 속도상수( $k'$ )를 구하며, 50% 파과하는데 걸리는 시간( $\tau$ )값을 찾아낸다.

시간이 무한대로 가면, 샘플관 내의 활성탄 입자의 흡착량과 정화통내의 활성탄 입자의 흡착량은 같다고 할 수 있으므로, 식 (12)에 의하여 샘플관의 최대흡착량( $W_e$ )를 구할 수 있다. 이 값을 이용하여 정화통의 흡착량을 구할 수 있으며, 식 (12)을 이용하여 정화통의 50% 파과하는데 걸리는 시간 ( $\tau$ )을 구할 수 있다.

Yoon과 Nelson(1984, 1988, 1990, 1992)이 제시한 식을 이용하여 정화통의 파과곡선을 구하기 위하여는 식 (8)에서 보는 바와 같이, 50% 파과하는데 걸리는 시간( $\tau$ )과 속도상수( $k'$ )를 구해야 한다. 여기서는,  $k'$ 를 구하기 위하여 앞서 구한  $k_1$ 와  $k_2$ 를 비교, 고찰하였다.

## III. 실험 장치 및 방법

### 3.1 실험장치

본 실험에 사용한 유기용제용 방독마스크 정화통의 실험 장치는 Fig.3 과 같다. 공기는 압력용기에 압력조절기를 설치하여 유량을 일정하게 유지하였으며, 분진과 수분을 제거하기 위하여 여과장치를 설치하였다. 사염화탄소의 농도와 유

입공기의 상대습도는 30℃의 항온조 속에 임핀저를 설치하고, 임핀저를 통과하는 공기량을 변화시켜 조절하였다. 공기의 유량은 유량계로 조절하였고, 유입공기의 상대습도는 습도계를 사용하여 측정하였으며, 활성탄 층을 통과한 사염화탄소와 공기의 혼합가스는 주입밸브를 사용하여 분석기에 주입하였다.

Fig.4 는 샘플관 측정시 사용한 실험장치로써 샘플관을 통과한 공기와 사염화탄소의 혼합가스를 펌프를 사용하여 배출하였다. 이때 샘플관을 통과하는 유량을 측정하기 위하여 샘플관과 펌프 사이에 유량계를 설치하였다.

본 실험에서 사염화탄소의 분석은 불꽃이온화 검출기(FID)가 설치된 GC 를 사용하였으며, column 은 6ft 의 10% Carbowax 를 사용하였다.

### 3.2 실험방법

0.47g/cm<sup>3</sup>의 밀도로 압축된 활성탄 45g이 충전되어 있는 유기증기용 정화통을 실험에 사용하였다. 샘플관은 아크릴로 제작하였으며, 정화통의 활성탄을 꺼내어 충전시켜 충전 밀도를 0.40g/cm<sup>3</sup>로 하였다. 이때 시험가스는 사염화탄소(CCl<sub>4</sub>)를 사용하였다.

농도에 따른 흡착특성을 측정하기 위하여 사염화탄소의 농도를 1000 ppm 에서 300 ppm 까지 변화시켰으며, 정화통의 혼합가스 유량은 32 l/min, 샘플관은 5.5 l/min 로 일정하게 하였고, 유량을 확인하기 위하여 wet-test meter로 보정하였다.

### 3.3 파과량(%) 계산방법

파과량은 주입농도와 정화통 및 샘플관을 통과한 후의 농도를 이용하여 식 (13)과 같이 계산하였다.

$$\text{파과량(\%)} = \frac{\text{정화통 또는 샘플관을 통과한후의 농도}}{\text{주입농도}} \times 100 \quad (12)$$

## IV. 실험결과 및 고찰

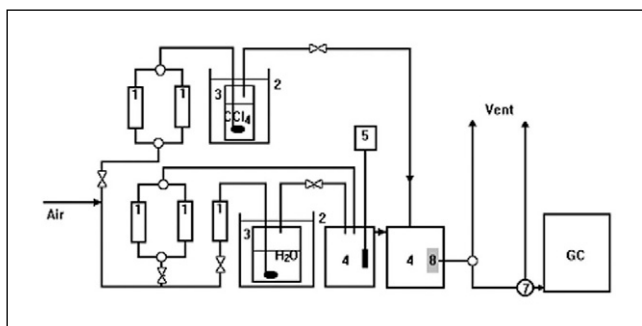
### 4.1 샘플관의 파과 특성

본 연구에서는 정화통의 수명을 예측하기 위하여 Table 1에 제시된 샘플관을 사용하여 파과특성을 측정하였다.

Fig. 5 는 샘플관에 주입농도 1000 ppm 에서 300 ppm 까지의 파과곡선을 측정하여 나타낸 것이다. 실험 초기부터 파과가 시작되어 파과율 10% 이전에는 주입농도에 따른 파과시간이 큰 차이를 보이지 않았으나, 그 이후에서는 주입농도에 따른 특성이 뚜렷해지는 것을 알 수 있었다. 또한, 유량에 비하여 충전량이 적어 전체 파과시간이 매우 짧았으며, 파과곡선의 상승속도는 낮게 나타났다. 600 ppm 과 700 ppm 의 경우 파과율 50%까지 약간의 불규칙한 경향이 나타나고 있다.

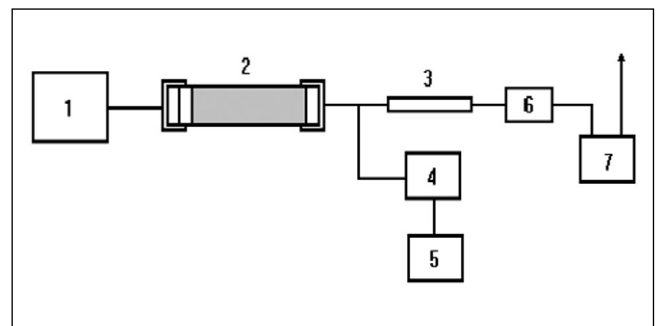
각 사염화탄소의 농도에 대하여 k<sub>1</sub> 을 결정하기 위하여, 시간에 따른 [lnP/(1-P)] 를 Fig. 6 에 나타내고 선형관계를 회귀분석 하였다. 1000 ppm 과 800 ppm 사이, 600 ppm 과 500 ppm 사이에 k<sub>1</sub> 의 차이가 거의 없는데 이는 작은 샘플관의 경우 충전시 불균일한 점이 영향을 준 것으로 볼 수 있다.

여기서 계산한 k<sub>1</sub> 와 τ 및 비례상수(k)를 Table 2 에 나타내었다. 본 연구에서는 k<sub>1</sub> 은 주입농도가 감소할수록 감소하는 경향을 보였으나, 800 ppm과 500 ppm 부근에서 불규칙한 값이 나타났는데 이는 실험상의 오차로 생각할 수 있으며, τ 는 주입농도 감소와 함께 증가하는 경향을 보였다. 이로써, k<sub>1</sub> 와 τ 는 농도에 의존한다는 것을 알 수 있었으며, 비례상수(k)는 식 (9)를 이용하여 계산할 수 있었고, 평균이 5.60 이



- |               |                     |
|---------------|---------------------|
| 1. Flowmeter  | 5. Thermohygrometer |
| 2. Water bath | 6. Adsorption tube  |
| 3. Impinger   | 7. Sampling valve   |
| 4. Vessel     |                     |

Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus.



- |                            |                      |
|----------------------------|----------------------|
| 1. Organic vapor generator | 5. Recorder          |
| 2. Sampling tube           | 6. Flowmeter         |
| 3. Charcoal sampling tube  | 7. Air sampling pump |
| 4. Gas Chromatography      |                      |

Fig. 4. Schematic of sampling tube.

었다.

Table 2의 값들을 가지고, 샘플관에 이론식을 적용하여 1000 ppm과 300 ppm에서 이론값과 실험값의 파과곡선을 비교하여 Fig. 7와 Fig. 8에 나타내었다. 이때, 이론값을 계산하기 위하여 식 (7)을 이용하였고, 각 농도에 따른  $k'$ 과  $\tau$ 는

Table 2의 값을 사용하였다. 주입농도 1000 ppm과 300 ppm에서 약간의 차이가 있었으나, 전체적으로 거의 이론식과 같은 파과곡선을 나타내었으며, 이로써 샘플관의  $k'$ 과  $\tau$ 가 이론식과 잘 일치하는 것을 알 수 있었고, 이를 정화통의 수명 예측에 사용할 수 있다.

Table 1. Classification of sampling tube by size.

Type	Sampling tube		Weight of packed activated carbon (g)	Packing density (g/cm <sup>3</sup> )
	Length (mm)	Diameter (mm)		
A	30.0	8	0.603	0.40
Respirator cartridge	21.0	76	45.00	0.47

Table 2. Values of the parameters  $k'$ ,  $\tau$  and  $k$  for various concentration of carbon tetrachloride on the sampling tube

concentration (ppm)	$k'$ (min <sup>-1</sup> )	$\tau$ (min)	$k$
	Sampling Tube	Sampling Tube	Sampling Tube
1000	0.373	13.66	5.10
800	0.380	15.72	5.97
700	0.272	17.41	4.74
600	0.242	20.64	4.99
500	0.246	23.62	5.81
300	0.187	37.25	6.97

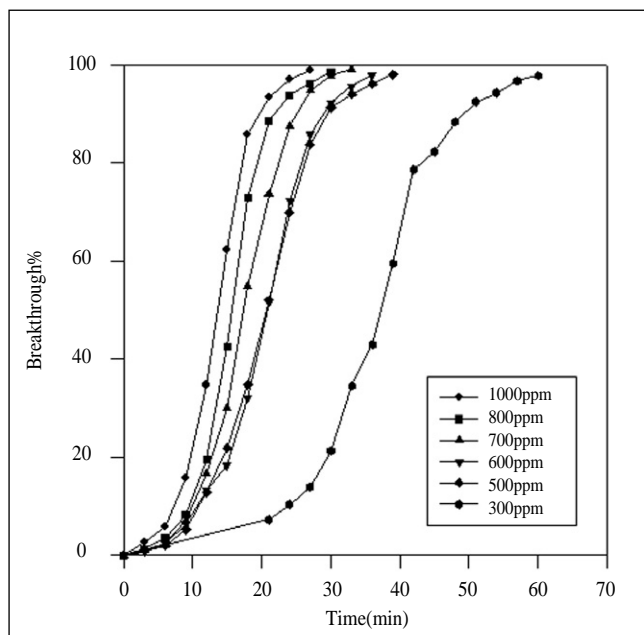


Fig.5. Effect of concentration on the adsorption characteristics of sampling tube.

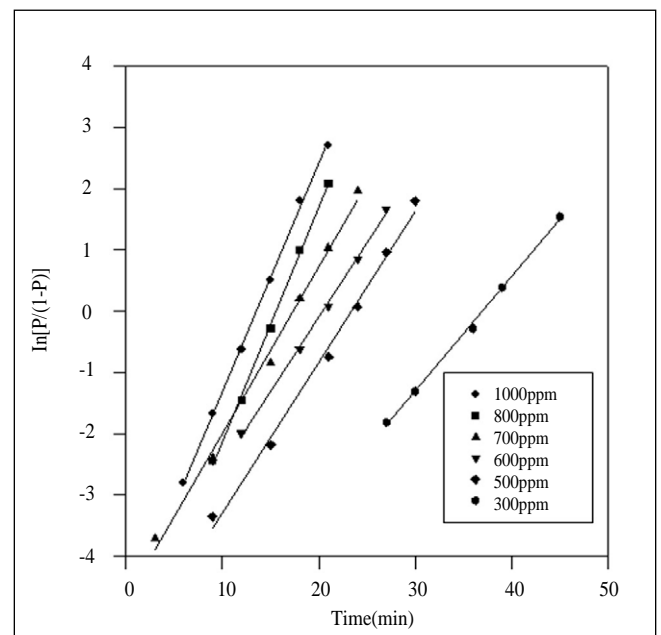


Fig.6. Representative plots of  $\ln [P/(1-P)]$  versus time for CCl<sub>4</sub> at various assault concentration on sampling tube.

## 4.2 방독마스크 정화통의 파괴특성

방독마스크 정화통의 주입농도에 따른 파괴특성을 Fig. 9에 나타내었으며, 샘플관의 파괴곡선보다 훨씬 규칙적인 특성을 나타내고 있는데, 이는 샘플관의 충전밀도가  $0.40\text{g/cm}^3$  인데 비하여 방독마스크 정화통은  $0.47\text{g/cm}^3$  이고, 정화통의 선속도가 샘플관에 비하여 1/4배 이상 작기 때문에 나타나는 것으로 생각할 수 있다. 또한, 방독마스크 정화통의 파괴는 샘플관과는 달리 활성탄의 충전량이 많아 어느 일정시간이 경과된 후 파괴하기 시작하였다.

Fig. 10은 주입농도에 따른 속도상수( $k'$ )를 계산하기 위하여 시간에 따른  $[\ln P/(1-P)]$ 를 나타낸 것이다. 주입농도가 감소할수록  $k'$ 가 감소하였으며, 샘플관보다 매우 낮은값을 나타내었다. 이는 정화통의 공간속도가  $335(\text{min}^{-1})$ 인 반면 샘

플관의 공간속도는  $6584(\text{min}^{-1})$ 이기 때문이라고 생각된다.

Fig. 9와 Fig. 10을 이용하여  $\tau$ 와  $k'$ 를 계산하여 Table 3에 나타내었다.  $k'$ 는 샘플관과 같이 주입농도가 감소할수록 감소하였으며,  $\tau$ 는 증가하였다. 또한 비례상수( $k$ )의 평균은 17.56이었다.

Table 2와 Table 3을 이용하여 정화통의  $k'$  값과 샘플관의  $k'$  값과의 관계를 알아낼 수 있으며, 이를 이용하여 전체 파괴시간에 미치는 영향을 파악할 수 있고, 정확한 정화통의 수명을 예측할 수 있을 것이다.

## 4.3 $k'$ 와 $\tau$ 의 영향

속도상수( $k'$ )와 50% 파괴하는데 필요한 시간( $\tau$ )은 주입되는 유기증기의 농도와 유속 그리고 충전량의 함수이며, 농도

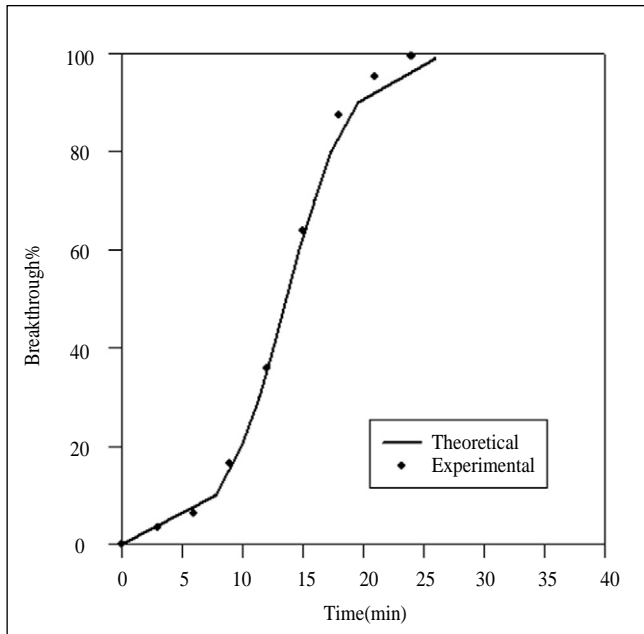


Fig.7. Comparison of theoretical breakthrough curve with experimental data for  $\text{CCl}_4$  at 1000 ppm.

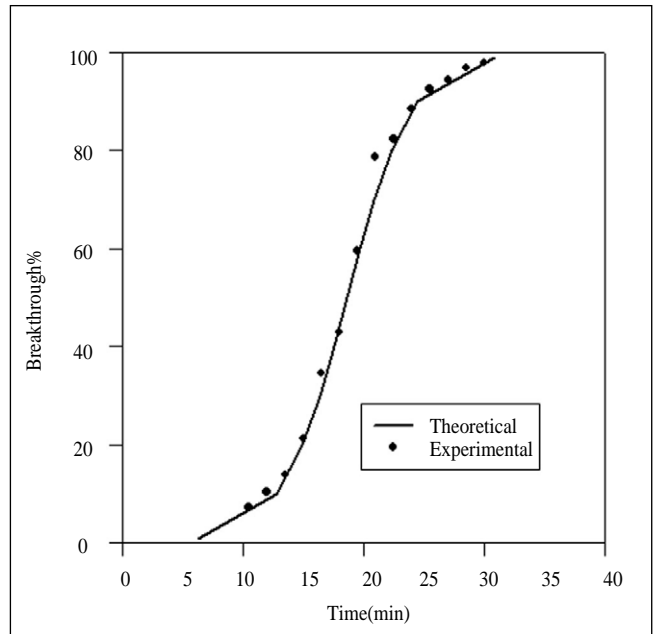


Fig.8. Comparison of theoretical breakthrough curve with experimental data for  $\text{CCl}_4$  at 300 ppm.

Table 3. Values of the parameters  $k'$ ,  $\tau$  and  $k$  for various concentration of carbon tetrachloride on the respirator cartridge.

concentration (ppm)	$k'(\text{min}^{-1})$	$\tau(\text{min})$	$k$
	Sampling Tube	Sampling Tube	Sampling Tube
1000	0.119	147.31	17.53
800	0.099	183.08	18.12
700	0.072	218.34	15.72
600	0.080	227.77	18.22
500	0.081	254.96	20.65
300	0.042	388.32	16.31

가 감소할수록  $k'$ 는 감소하고,  $\tau$ 는 증가하는 경향을 보이고 있다. 정화통의 수명을 예측하기 위하여는 식 (8)에서와 같이  $k'$ 와  $\tau$ 를 이용하여야 하는데, 이들의 영향을 분석하는 것은 매우 중요하다.

Fig.11 은  $\tau$ 가 일정할 때,  $k'$ 가 파과시간에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이때  $\tau$ 는 샘플관의 1000 ppm 값, 즉 151분을 기준으로 하였으며,  $k'$ 는 실험값 중 가장 작은 값 0.042 부터 가장 큰 값 0.380 사이에서 변화시켰다.

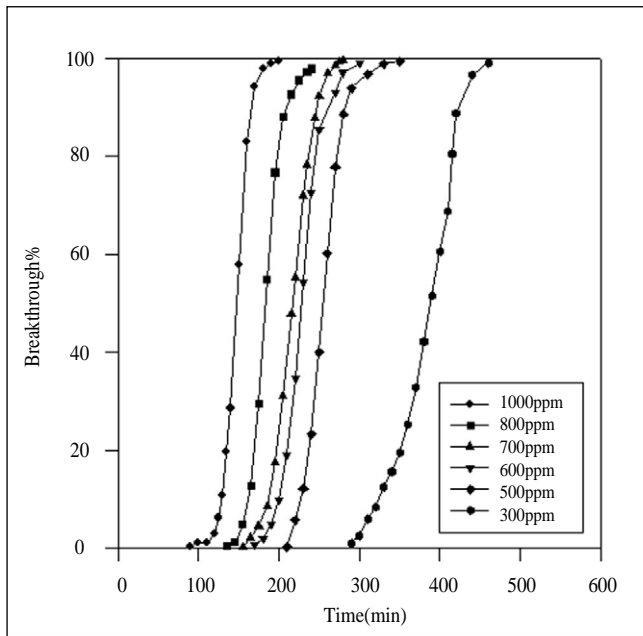


Fig.9. Effect of concentration on the adsorption characteristics of respirator cartridge.

$k'$  값은 파과곡선에 가장 큰 영향을 준다고 할 수 있으며,  $\tau$  값이 같다고 하더라도  $k'$  값에 따라 파과시간이 변하고,  $k'$  값이 작을수록 상승속도가 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다.

Fig.12 는  $k'$ 가 일정할 때  $\tau$ 가 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이때,  $k'$ 는 0.100로 하였으며,  $\tau$ 는 샘플관을 이용하여 예측한 샘플관의 값을 이용하여 변화시켰다. 샘플관의 흡착량을 이용하여 구한 정화통의 파과곡선은 흡착량에 따라  $\tau$  값에 커다란 영향은 주었는데,  $k'$ 가 일정할 때  $\tau$ 는 파과가 시작되는

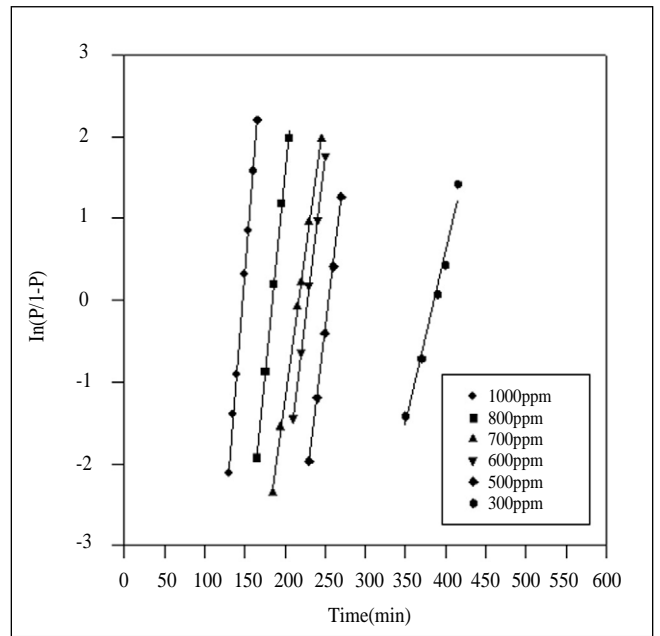


Fig.10. Representative plots of  $\ln[P/(1-P)]$  versus time for  $\text{CCl}_4$  at various assault concentration.

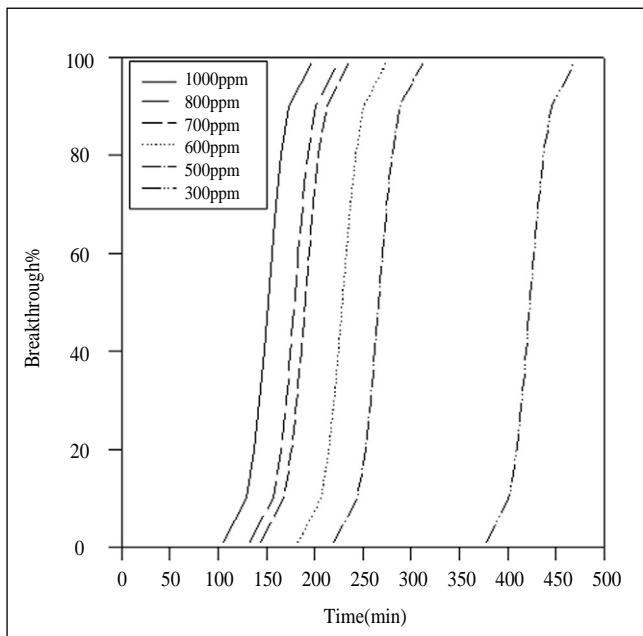


Fig.11. Effect of time required for 50% contaminant breakthrough on breakthrough curve.

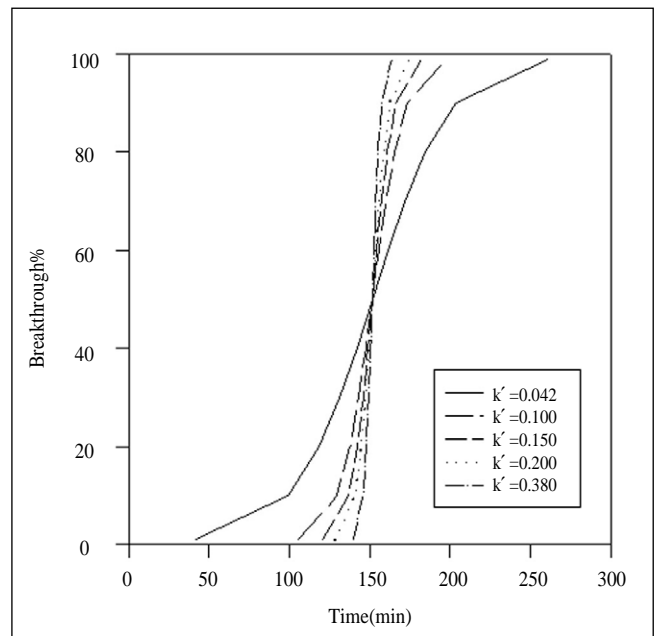


Fig.12. Effect of rate constant on breakthrough curve.

시간부터 끝나는 시간까지 92분으로 일정한 시간을 가지며,  $\tau$ 에 따라 파과곡선이 앞뒤로 이동한다는 것을 알 수 있었다.

#### 4.4 방독마스크 정화통의 파과곡선 예측

본 연구에서는 Yoon과 Nelson(1984, 1988, 1990, 1992)의 흡착모델식을 이용하여 정화통의 수명을 예측하여 보았다.

Table 4는 파과시간  $t$ 가 클때( $t \rightarrow \infty$ )의 샘플관의  $W_e$ 는 흡착층 전체의 포화흡착량을 나타내므로, 식 (12)와 Table 2의  $k'$ 와  $\tau$ 를 이용하여 샘플관에 대한 활성탄의 흡착량( $Wt1$ )을 계산하여 나타내었으며, 정화통에 대한 활성탄의 흡착량( $Wt2$ )과 비교하여 나타낸 것이다.

활성탄에 흡착되는 유기증기의 양은 정화통의 경우 보다 샘플관의 경우에 약간 큰 경향을 보이고 있다.

Wayne(1978)은 고정층내에서 액체의 선속도를 고려해본 결과 계에 있어 더 높은 선속도는 낮은 농도에서 활성탄 부피당 더 많은 액체를 흡착할 수 있으며 물질전달구간은 더 짧다고 하였다. 이로써, 샘플관의 활성탄에 흡착된 유기증기의 양이 약간 큰 현상도 샘플관이 정화통 보다 선속도가 큰 것이 원인으로 판단된다. 또한 농도가 감소할수록 흡착

량은 샘플관, 정화통 모두 감소하였다.

Table 5는 Table 4의 샘플관에 대한 활성탄의 흡착량을 이용하여 각 사염화탄소 농도에서 정화통의 전체 흡착량을 계산( $W_e$ )하였으며, 이 값을 가지고 식 (12)를 이용하여 정화통의  $\tau$ 를 구하여 나타낸 것이다. 전체 흡착량은 농도가 감소할수록 감소하였으며, 샘플관을 이용하여 예측한 정화통의  $\tau$ 는 농도가 감소할수록 증가하였다. 특히, 샘플관을 이용하여 정화통의  $\tau$ 는 Table 3과 비교하여 볼 때, 낮은 농도에서 큰 차이를 보였다.

Fig.13은 정화통의 수명을 예측하기 위한 속도상수( $k'3$ )를 구하기 위하여 샘플관의 속도상수( $k'1$ )와 정화통의 속도상수( $k'2$ )의 관계를 나타낸 것이다. 여기서  $k'1$ 과  $k'2$ 는 유속, 충전 밀도 등의 영향을 받는다고 판단되며, 이 관계식은 선형관계로 표현이 가능하다는 것을 알 수 있었고,  $k'3$ 를 얻어낼 수 있었다.

Table 5의  $\tau$ 와 Fig.13에서 구한  $k'3$ 를 가지고, 예측한 정화통의 파과곡선을 정화통 실험 파과곡선과 각 사염화탄소의 주입농도에 따라 비교하여 Fig.14부터 Fig. 19에 나타내었다. 그 결과 샘플관에 흡착된 유기증기의 양을 이용하여 방독마스크 정화통의 수명 예측이 가능하였으며, 주입농도가 낮아

Table 4. Adsorbed amount of CCl<sub>4</sub> on the activated carbon at various concentrations.

Concentration (ppm)	Adsorbed amount of CCl <sub>4</sub> on the activated carbon (g/g)	
	W <sup>1</sup> (Sampling Tube)	W <sup>2</sup>
1000	0.74	0.70
800	0.70	0.69
700	0.65	0.71
600	0.67	0.65
500	0.65	0.60
300	0.62	0.54

Table 5. Calculated time for 50% contaminant breakthrough and adsorption capacity of respirator cartridge.

Concentration (ppm)	Adsorption Capacity	Time required for 50% contaminant breakthrough
	W <sub>e</sub> (Sampling Tube)	$\tau$ (Sampling Tube)
1000	33.30	151.54
800	31.50	179.19
700	29.25	190.16
600	30.15	228.68
500	29.25	266.32
300	27.90	423.22



질수록 정화통 실험 파과곡선과 차이가 나는 경향을 보였는데, 이는 충전상태가 낮은 원인 때문으로 생각된다. 전체적으로는 1000 ppm, 500 ppm, 300 ppm 에서는 약간의 차이를 보였지만, 비교적 정확한 정화통의 수명을 예측할 수 있었다.

## V. 고 찰

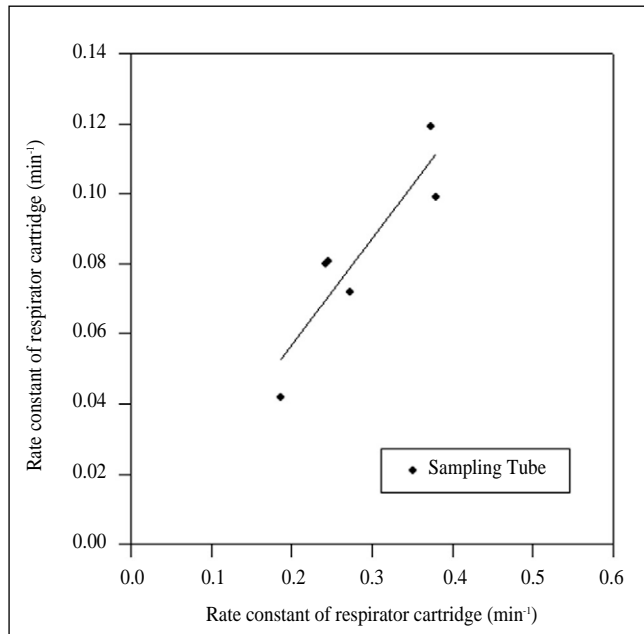


Fig.13. Comparison of rate constant of sampling tube with respirator cartridge.

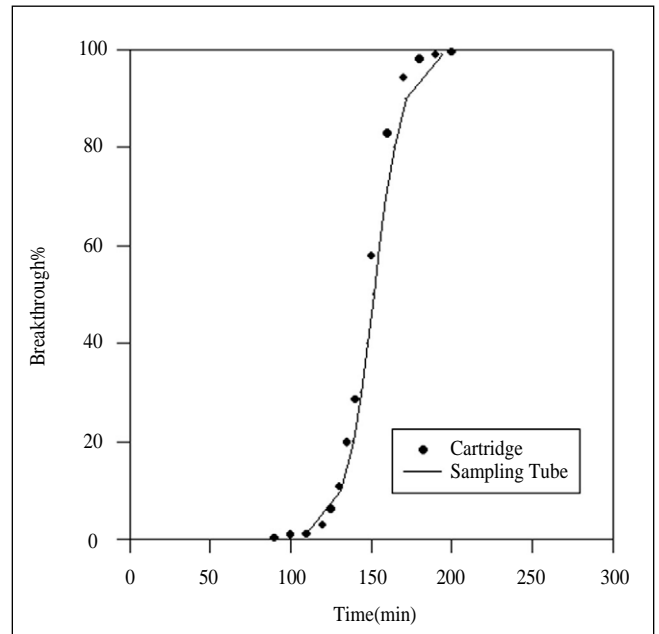


Fig.14. Comparison of the respirator cartridge breakthrough time with the breakthrough time by sampling tube at 1000 ppm.

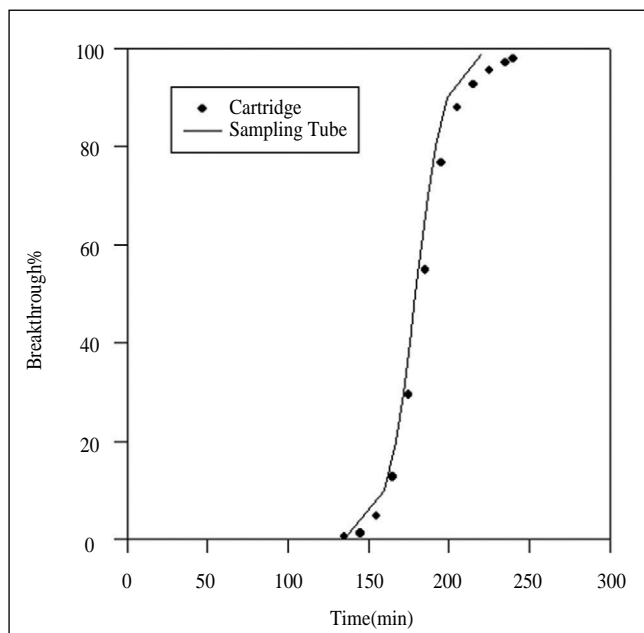


Fig.15. Comparison of the respirator cartridge breakthrough time with the breakthrough time by sampling tube at 800 ppm.

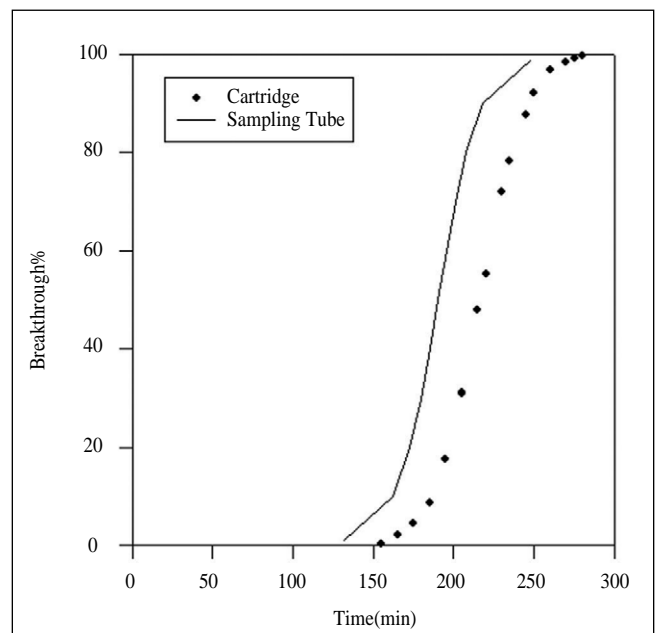


Fig.16. Comparison of the respirator cartridge breakthrough time with the breakthrough time by sampling tube at 700 ppm.

방독마스크 정화통의 수명을 예측하기 위하여 Cohen et al. (1992)은 bed-residence 흡착 모델을 사용하여 bed-residence time 이 같다면, 모든 파과시간을 하나의 직선에 나타낼 수 있으므로 이를 이용하여 습도에 따른 정화통의 수명을 예측하였으며, Moyer(1987)는 Potential Jonas 모델을 이용하여 작은 관의 가스흡착속도와 흡착량을 Wheeler 식의 활성탄의 양과 파과시간 사이의 선형관계를 이용하여 설명하였다. 또한

Yoon과 Nelson(1984, 1988, 1990, 1992)은 시간에 따른 분자의 흡착될 확률의 감소 속도는 흡착될 확률과 파괴될 확률에 비례한다는 원리를 적용하여 정화통의 파괴시간을 예측하였다. 이 Yoon과 Nelson(1984, 1988, 1990, 1992)의 모델식은 정화통 뿐만 아니라 샘플관에 있어서도 적용이 가능함을 알 수 있었고, 이를 이용하여 정화통의 파괴시간 예측이 가능하였다.

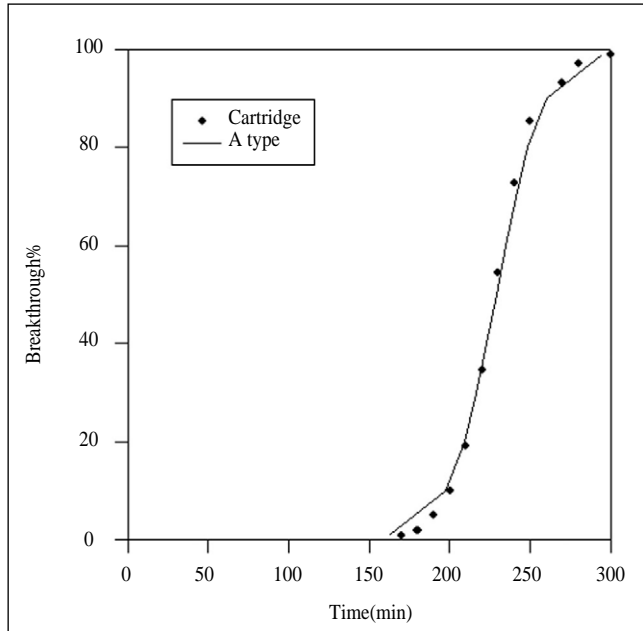


Fig.17. Comparison of the respirator cartridge breakthrough time with the breakthrough time by sampling tube at 600 ppm.

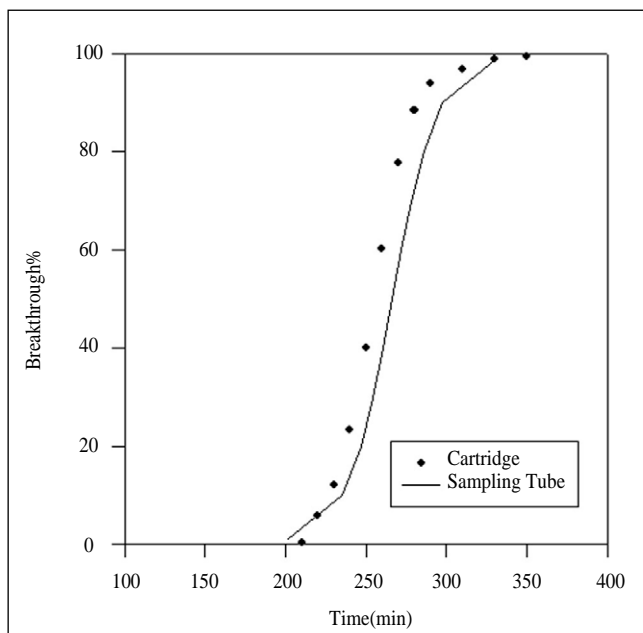


Fig.18. Comparison of the respirator cartridge breakthrough time with the breakthrough time by sampling tube at 500 ppm.

일반적으로 빠른시간에 방독마스크 정화통의 수명을 예측하기 위하여는 샘플관의 파괴특성이 잘 나타나야 하므로, 충전량이 작은관을 사용하는 것이 유리하다. 그러나, Cohen et al. (1992)은 층을 통과하는 유속이 크게 증가하면 탄소입자 표면에 흡착된 물질의 물질전달속도를 초과하기 때문에, RCT를 사용하여 파괴되기에 필요한 시간을 줄이기 위하여 매우 높은 유속을 사용한다면, 실제 정화통의 파괴시간을 낮게 예측하는 결과를 가져올 것이라고 하였다. 본 연구에서는 샘플관의 실험 데이터 값이 정확해야만, 정화통의 수명을 좀 더 정확하게 예측할 수 있으므로, 이를 고려하여 여러번의 시행착오를 거쳐 샘플관의 유속을 5.5 l/min으로 결정할 수 있었다.

또한, 흡착제가 충전된 작은관의 파괴실험은 Guenier과 Muller (1984), Cohen et al. (1992)에 의하여 행하여진 바 있으며, 이 중 Cohen et al. (1992)이 respirator carbon tube(RCT)를 이용하여 크기에 따른 영향을 실험한 결과 같은 유기증기의 주입농도에서 RCT의 길이 또는 직경이 커질수록 파괴시간이 증가한다고 보고하였다. 이러한 결과는 샘플관의 길이를 길게 하거나, 직경을 크게 할 경우에 샘플관에 충전되는 활성탄의 양이 많아져 Cohen et al. (1992)의 결과와 같이 파괴시간이 증가할 것으로 판단되나, 샘플관을 이용한 정화통의 수명 예측에 미치는 영향은 좀 더 연구되어야 할 것이다.

정화통의 충전상태에 대하여 흡착제가 불충분하게 채워지면, 편류현상에 의하여 수명이 감소한다고 Trout et al. (1986)은 발표한 바 있으며, 본 연구에 있어서 샘플관의 파괴

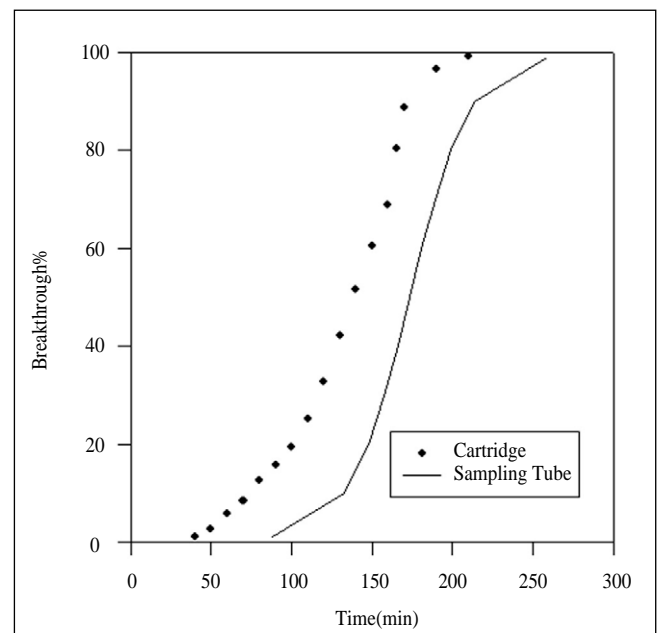


Fig.19. Comparison of the respirator cartridge breakthrough time with the breakthrough time by sampling tube at 300 ppm.

실험시 600 ppm 과 700 ppm 의 경우 초기에 파과곡선이 불균칙한 경향을 나타내고 있는데, 이는 샘플관 충전시의 불균일성과 충전밀도가 낮은 것이 이러한 영향을 준 것으로 생각된다.

Guenier과 Muller (1984)는 900mg의 측정관(charcoal tube)을 이용하여 98 - 988 ppm사이의 농도범위에서 n - heptane에 대한 파과특성을 실험한 바 있으며, 실험한 결과, 농도가 감소할수록  $k_1$  은 감소하였으며,  $\tau$  는 증가하는 경향을 나타내었다.

여러 유기증기나 가스에 대한 방독마스크 정화통의 파과특성은 많은 연구자들이 실험을 통하여 발표한 바 있다. 특히, Nelson et al. (1976)은 오염물의 파과에 있어 농도에 따라 파과곡선이 대칭적으로 S 자 형태의 움직임을 나타내며, 농도가 낮을수록 더 긴 파과시간을 보인다고 발표하였는데, 본 연구에서도 방독마스크 정화통 뿐만 아니라 샘플관에서도 같은 현상이 나타남을 알 수 있었다. 그러나, 샘플관에 있어서 유속을 결정하기 위하여 시행착오를 거치지 않았다면 높은 유속의 경우, 샘플관의 파과곡선은 직선에 가까운 형태를 나타냈을 것이며, 낮은 유속의 경우는 S 자 형태의 움직임을 나타내기는 하나 파과시간이 길어져 샘플관을 이용한 정화통의 수명 예측이 필요 없었을지도 모른다.

앞으로, 샘플관의 길이를 길게하거나, 직경을 크게하여 충전되는 활성탄의 양을 많게 하고 충전밀도를 본 연구와 같게 하여, 파과곡선이 대칭적으로 S 자 형태의 움직임을 나타낼 수 유속으로 샘플관을 이용한 정화통의 수명예측에 미치는 영향에 대하여 연구되어야 할 것이다.

## VI. 결 론

유기가스용 방독마스크 정화통의 수명을 예측하기 위하여 샘플관을 이용하여 작업환경에 따른 흡착실험을 하였으며, 여기서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. Yoon과 Nelson의 흡착 모델식을 이용하여 방독마스크 정화통의 수명예측이 가능하며, 전체적으로 비교적 정확한 정화통의 수명을 예측할 수 있었다.

2. 샘플관에 대한 활성탄의 흡착량은 선속도의 영향으로 정화통에 대한 활성탄의 흡착량보다 크게 나타났다.

3. 샘플관을 이용하여 정화통의 수명예측시 속도상수( $k$ ) 값 보다는 50% 파과하는데 필요한 시간( $\tau$ )이 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4. 정화통의 속도상수( $k$ )는 샘플관의 속도상수( $k$ )보다 작게 나타났으며, 이는 유속, 충전밀도의 영향이라고 판단된다.

5. 샘플관을 이용하여 예측한 정화통의 10% 파과시간은 농도에 따라 이론값보다 약간 낮은 경향을 나타내었다.

## REFERENCES

- Ruch WE, GO Nelson, CL Lindeken, RE Johnson and DJ Hodgkins : Respirator cartridge efficiency studies : I. Experimental design. Am. Ind. Hyg. Assoc. J 1972;33:105-109.
- Nelson GO and DJ Hodgkins : Respirator cartridge efficiency studies : II. Preparation of test atmospheres. Am. Ind. Hyg. Assoc. J 1972;33:110-116.
- Nelson GO, RE Johnson, CL Lindeken and RD Taylor : Respirator cartridge efficiency studies : III. A mechanical breathing machine to simulate human respiration. Am. Ind. Hyg. Assoc. J 1972;33:745-750.
- Nelson GO and CA Harder : Respirator cartridge efficiency studies : IV. Effect of steady state and pulsating flow. Am. Ind. Hyg. J 1972;33:797-805.
- Nelson GO and CA Harder : Respirator cartridge efficiency studies : V. Effect of solvent vapor. Am. Ind. Hyg. Assoc. J 1974;35:391-410.
- Nelson GO, CA Harder and BE Bigler : Respirator cartridge efficiency studies : VI. Effect of concentration. Am. Ind. Hyg. Assoc. J 1976;37:205-216.
- Nelson GO, AN Correia and CA Harder : Respirator cartridge efficiency studies : VII. Effect of relative humidity and temperature. Am. Ind. Hyg. Assoc. J 1976;37:280-288.
- Nelson GO and AN Correia : Respirator cartridge efficiency studies : VIII. Summary and Conclusions. Am. Ind. Hyg. Assoc. J 1976;37:514-525.
- Trout D, PN Breyse, T Hall, M Corn and T Risby : Determination of organic vapor respirator cartridge variability in terms of degree of activation of the carbon and cartridge packing density. Am. Ind. Hyg. Assoc. J 1986;47:491-496.
- Wood GO : Effects of air temperature and humidities on efficiencies and lifetimes of air-purifying chemical respirator cartridges tested against Methyl Iodide. Am. Ind. Hyg. Assoc. J 1985;46:251-256.
- Cohen HJ, ET Zellers and RP Garrison : Development of a evaluating the service lives of organic vapor cartridges : Result so laboratory testing using carbon tetrachloride. Part II : humidity effects. Am. Ind. Hyg. Assoc. J 1992;51:575-580.
- Moyer ES : Organic Vapor (OV) respirator cartridge testing : Potential Jonas model applicability. Am. Ind. Hyg. Assoc. J 1987;48(9):791-797.

- Yoon YH and JH Nelson : Application of gas adsorption kinetics -  
I . A theoretical model for respirator cartridge service life. Am.  
Ind. Hyg. Assoc. J 1984;45:509-518.
- Yoon YH and JH Nelson : Application of gas adsorption kinetics -  
II . A theoretical model for respirator cartridge service life and  
its and practical applications. Am. Ind. Hyg. Assoc. J  
1984;45:517-524.
- Yoon YH and JH Nelson : A Theoretical Study of the Effects of  
humidity on respirator cartridge service life. Am. Ind. Hyg.  
Assoc. J 1988;49(7):325-332.
- Yoon YH and JH Nelson : Effects of humidity and contaminant  
concentration on respirator cartridge breakthrough. Am. Ind.  
Hyg. Assoc. J 1990;51:202-209.
- Yoon YH and JH Nelson : Contaminant breakthrough : A  
Theoretical Study of charcoal sampling tubes. Am. Ind. Hyg.  
Assoc. J 1990;51(6):319-325.
- Yoon YH and JH Nelson : Breakthrough time and adsorption  
capacity of respirator cartridge. Am. Ind. Hyg. Assoc. J  
1992;53:303-316.
- Guenier JP and J Muller : Sampling of gaseous pollutants on  
activated charcoal with 900 mg tubes. Ann. Occup. Hyg. J  
1984;28:61-75.
- Cheremisinoff PN and F Ellerbusch : Carbon adsorption handbook  
(Ann Arbor Science, Inc., Michigan.),, 1978. p.55-83.