

# 작업현장의 환경조건에 따른 방독마스크 정화통의 수명예측

—모사에 의한 정화통과 샘플관의 파과시간—

## Prediction of Service Life of a Respirator Cartridge by the Occupational Environment

—Simulation of Breakthrough Curve for Respirator Cartridge and Sampling Tube—

김 덕 기\*·신 창 섭\*\*

Deog-Ki Kim · Chang-Sub Shin

### ABSTRACT

To predict the service life of an organic vapor respirator cartridge, the breakthrough curve of respirator was simulated using a fixed-bed adsorption model and compared with that of sampling tube. And the effects of bed porosity, length to diameter ratio and flow rate of the sampling tube were studied.

The life time of respirator cartridge was increased with the decrease of particle size and bed porosity. And the breakthrough time of sampling tube was affected by the flow rate, however not by the length to diameter ratio. The 10% breakthrough time of the sampling tube was corresponded with that of cartridge.

### 1. 서 론

작업환경에서 발생하는 유해물질로부터 근로자를 보호하기 위하여 방독마스크가 많이 쓰이고 있으며, 이때 방독마스크 정화통에서 유해물질이 파과되는 시점을 정확히 판단하여 유해물질의 허용농도 이상에 작업자가 폭로되는 것을 막는 것은 이들의 건강과 안전을 위하여 아주 중요한 일이며,

또한 정화통의 경제적 이용도 가능하게 한다. 그런데 정화통에 사용되는 활성탄의 물성뿐만 아니라 화학물질의 종류 그리고 작업현장의 농도, 습도 등에 따라 정화통의 수명은 크게 달라진다.

각 작업현장조건에 따른 정화통의 수명을 예측하는 방법에는 샘플관에 정화통에서 꺼낸 활성탄을 소량 충전하고 파과곡선을 구하는 방법이 있다. 이 경우 흡착모델에 샘플관의 파과곡선을 적

\* 충북대학교 대학원

\*\* 충북대학교 안전공학과

용시켜 정화통의 수명을 예측할 수 있으며 특별한 장비없이 각 사업장에 많이 보급된 기존의 공기 채취기 및 샘플링 튜브를 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다.

한편, 방독마스크의 수명예측에 대하여는 여러 모델식이 제안되었으며, Underhill<sup>1)</sup>은 Dubinin-Radushlievich식과 Polanyi Potential 이론을 적용하여 높은 수준의 습도에서 활성탄의 성능을 평가하였으며, 또한 Cohen등<sup>2)</sup>은 정화통에서 채취한 활성탄을 층 잔류시간이 같게 관에 충전시켜 습도에 따른 정화통의 수명을 예측하였다. Yoon등<sup>3,4)</sup>은 시간에 따른 분자의 흡착될 확률의 감소 속도는 흡착될 확률과 파과될 확률에 비례한다는 원리를 적용하여 농도와 습도의 변화 그리고 혼합물에 대한 정화통의 파과시간을 예측하였다.

본 연구에서는 고정층 흡착모델을 이용하여 정화통의 파과곡선을 모사하고 입자직경, 공극률 등의 영향을 파악하였다. 그리고 측정관의 모양 및 크기변화, 유량의 변화 등이 파과곡선에 주는 영향을 파악하여 정화통의 파과현상을 추정할 수 있는 방법을 찾고자 하였으며, 층 잔류시간에 따른 파과시간을 모사하여 10% 파과시간을 비교하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 연구의 배경

작업현장에서 정화통의 수명에 영향을 줄 수 있는 인자는 경쟁 흡착을 일으키는 다른 화학물질, 수명을 단축하거나 혹은 경우에 따라 증가시킬 수 있는 습도, 대상되는 유해가스의 농도 그리고 작업자의 작업강도에 따른 호흡량의 영향 등으로 정화통에 파과시간이 표시되어 있지만 이것은 시험규격에 의한 일정 농도에서의 수치이므로 실제로 현장에서 파과되는 시간과는 커다란 차이가 있다.

가장 많이 사용되는 유기가스용 방독마스크 정화통은 흡착제로 주로 활성탄을 사용하고 있으며, 산업안전보건법에서는 일정 이상의 습도에서 사염화탄소를 사용하여 이의 흡착 제거 능력으로 그 성능을 검정 받도록 되어 있다. 그런데 정화통의 흡착능력은 유기가스의 종류 및 사용 환경에 따라 크게 달라지며, 현장에서는 수 많은 종류의 유기가스를 사용하고 있으므로 사염화탄소만으로 추정할

성능을 모든 유기가스에 적용할 수 없다.

지금까지 방독마스크 정화통의 수명 예측에 대한 모델은 여러 가기가 발표되었으나, 그 대부분은 특정 유기증기를 여러 농도와 유량에서 실험하여 추정할 수 있으며 이때 흡착제의 여러가지 물리적 특성을 측정해야 한다. 이를 위하여 특별한 실험장치가 있어야 하며, 그리고 작업현장의 다양성을 감안한다면 현장에 직접 적용할 수 있는 자료는 거의 없다고 할 수 있다. 본 연구에서는 작업현장에서 방독마스크 정화통의 수명을 작업현장의 여러 조건에 따라 간편하게 추정할 수 있는 방법을 강구하고자 하는 것이며, 이를 위하여 작은 측정관을 만들어 이 관속에 현장에서 사용하고자 하는 방독마스크의 정화통에서 꺼낸 활성탄중 소량을 충전하고, 작업현장에서 측정값을 얻어낸다. 작업환경 측정에 일반적으로 사용되는 샘플링 튜브를 이 측정관의 후미에 연결시키거나, 가스분석 장치를 사용하여 파과곡선을 측정하며, 이 결과를 흡착모델에 적용시켜 실제 정화통의 수명을 예측한다. 본 연구에서는 이 방법에 의한 수명 예측을 위하여 방독마스크 정화통과 샘플관에 대한 파과곡선을 모사하고 충전밀도, 샘플관의 모양 등의 영향에 대하여 고찰하고 수명을 예측할 수 있는 방법을 찾고자 하였으며, 흡착관의 형태는 Fig. 1과 같다.

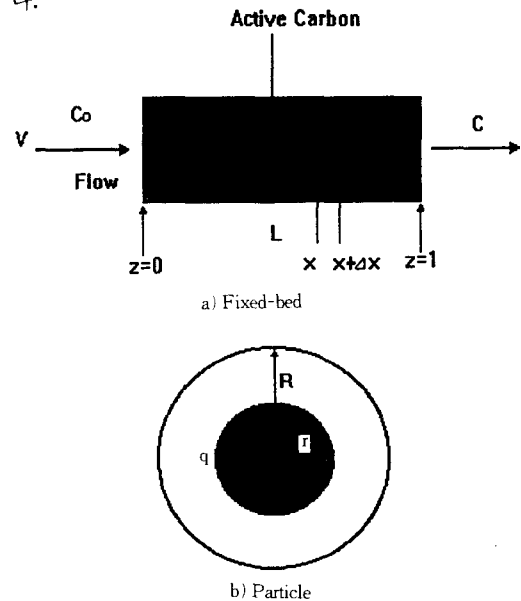


Fig. 1 Schematic of the fixed-bed and particle model

## 2.2 고정층 흡착모델

흡착 과정에서 흡착물질의 이동은 유체내에서의 이동, 유체-흡착제 사이에 형성된 격막을 통한 분자확산, macropore 를 통한 확산, 그리고 micro-pore 표면에서의 흡착과 같은 단계로 이루어진다. 이러한 여러 단계에서 유효단계는 흡착제의 종류 및 흡착장치의 형태 등에 따라 달라질 것이나, 대부분의 경우 유체내에서의 이동과 세공표면에서의 흡착은 매우 빠른 속도로 진행되기 때문에, 격막 저항 및 입자 내부에서의 물질전달 저항이 전체의 흡착속도를 지배하게 된다.

흡착관이 길거나 유속이 매우 느린 경우는 흡착 평형관계가 파과곡선을 지배하고, 흡착관이 짧고 유속이 빠른 경우는 물질 이동이 상대적으로 중요하게 된다.

본 연구에서는 축방향분산을 고려한 고정층 흡착모델식을 방독마스크 정화통 및 측정관에 적용하였다.

여기서 유기가스용 방독마스크 정화통과 샘플관의 파과곡선을 모사하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 관내의 온도는 등온이다.
- 2) 흡착제를 통과할 때 유체의 압력강하는 무시한다.
- 3) 흡착제 시료 입자의 크기는 동일하며 구형이다.

### 2.2.1 구형입자내의 물질수지

흡착제 단일구형입자내의 물질수지식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial q}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 q}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial q}{\partial r} \right) \dots \dots \dots (1)$$

여기서 q는 입자내부의 농도(mol/m<sup>3</sup>), r은 입자 중심으로 부터의 거리(m), t는 시간(sec), D는 고체상의 확산도(m<sup>2</sup>/s)이며, 식(1)의 경계조건 및 초기조건은 다음과 같다.

$$q(r, t=0) = 0 \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \dots \dots \dots (3)$$

$$D \frac{\partial q}{\partial r} \Big|_{r=R} = k \left[ c(z, t) - \frac{q \Big|_{r=R}}{K} \right] \dots \dots \dots (4)$$

여기서 k는 물질전달계수(m/s), c는 흡착층내에서의 유체농도(mol/m<sup>3</sup>), K는 부피평형상수

(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)이다.

### 2.2.2 고정층내의 물질수지

흡착제가 충전된 정화통과 샘플관에서 축방향분산을 고려하면, 물질수지식은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$-D_L \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + v \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial c}{\partial t} = \left( \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \right) \left[ \frac{3k}{R} \left( c(z, t) - \frac{q \Big|_{r=R}}{K} \right) \right] \dots \dots \dots (5)$$

여기서 D<sub>L</sub>은 축방향 분산계수(m<sup>2</sup>/s), v는 유속(m/s), z는 고정층의 축방향 거리(m), R은 입자 반지름(m), ε은 고정층의 공극률이며, 식(5)의 초기 및 경계조건은 다음과 같다.

$$c(z, t=0) = 0 \dots \dots \dots (6)$$

$$D_L \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=0} = -v(c \Big|_{z=0} - c \Big|_{z=0+}) \dots \dots \dots (7)$$

$$\frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=1} = 0 \dots \dots \dots (8)$$

여기서 z=0은 고정층의 입구이며, z=1은 고정층의 출구이다.

## 3. 파과곡선의 모사결과

### 3.1 물질수지식의 수치해법

식(1)~(8)에 나타낸 물질 수지식을 무차원식으로 만들어 Crank-Nicolson Method<sup>5,6)</sup>를 이용하여 차분화하고 이를 반복 계산하여 시간의 변화에 따른 파과농도를 구하였으며, 이때 error 값은 10<sup>-5</sup>으로 하였다.

### 3.2 정화통의 모사결과 및 고찰

시간에 따른 파과농도를 수치 해석적으로 계산하기 위하여 필요한 변수값들 중 D<sub>L</sub>, D, k, K를 제외하고는 현재 널리 사용되는 방독마스크 정화통과 활성탄의 물리적 특성으로 결정하였으며, 본

Table 1 Values of parameters for calculation

Parameter	Values
D <sub>L</sub>	0.010×10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
D	0.215×10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
k	0.056 m/s
K	16200 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

연구에 사용된  $D_L$ ,  $D$ ,  $k$ ,  $K$ 의 값은 문헌<sup>7,8)</sup>에서 얻어 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 각 변수의 변화에 따른 상대적인 영향을 알아보기 위하여 일정한 표준 조건을 설정한 후 변수를 하나씩 변화시켜 가며 파과시간의 변화를 검토하였다. 본 연구에서 고려한 정화통의 표준 조건으로 크기가 직경 7cm, 길이 1.83cm 이며, 공극률 0.35, 활성탄의 입자크기 1.6mm 를 기준으로 삼았으며 유입 유량 30 l/min로 하여 입자의 반지름(R) 그리고 정화통의 공극률( $\epsilon$ )이 파과곡선에 미치는 영향을 분석하였다.

일반적으로 활성탄의 입자크기가 0.6mm 보다 작을 경우 파과시간은 입자크기의 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다. 그러나 Fig. 2에서와 같이 활성탄의 입자크기를 1.2mm~2.4mm로 변화시켰을 경우 입자크기가 작을 수록 정화통의 파과시간은 증가하였으며 상승속도도 증가하였다. 이는 활성탄의 입자크기에 따른 흡착능력의 차이에 의한 것이 아니라 입자 내부에서의 물질전달저항이 달라지기 때문이라 생각된다.

Fig. 3은 정화통의 충전밀도의 영향으로 충전상태에 따른 영향을 나타낸 것으로, 이때 각각의 공극률은 3.1, 3.3, 3.5, 3.7로 공극률이 작을 수록 파과시간이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 Trout 등<sup>9)</sup>은 정화통의 충전상태에 대하여 흡착제가 불충분하게 채워지면 편류현상에 의해 정화통의 수명

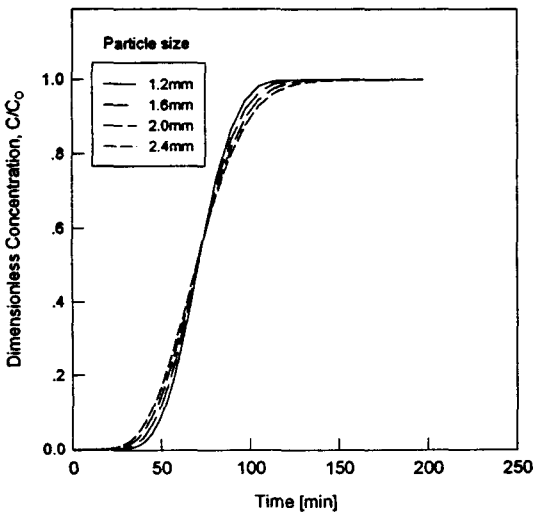


Fig. 2 Calculated breakthrough curves by particle size

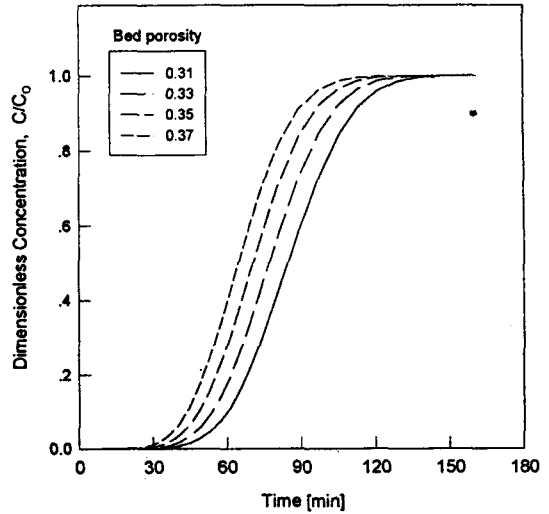


Fig. 3 Calculated breakthrough curves by bed porosity

이 감소한다고 발표한바 있어, 최대한의 충전으로 공극률을 줄이는 것이 정화통의 수명을 길게하는 방법임을 알 수 있다. 그리고 Hori등<sup>10)</sup>은 Fick의 법칙을 사용하여 유기가스의 속도가 작업자의 호흡에 의하여 직각적으로 변하는 비정상 상태와 일정한 연속적인 흐름의 정상 상태에서의 흡착능력은 거의 같으나, 파과시간은 비정상 상태에서 짧다고하여 실제 방독마스크 사용시 본 추정치 보다 수명이 짧을 것으로 생각할 수 있다.

### 3.3 샘플관과 정화통의 파과시간 비교

방독마스크 정화통의 수명을 예측하기 위하여 방독마스크 정화통에서 꺼낸 활성탄을 소량 충전한 샘플관을 사용하여 간편하게 작업 현장에서 파과시간을 측정, 이를 이용하여 정화통의 수명을 예측한다. 이를 위하여 정화통과 샘플관이 사용되는 작업환경과 활성탄의 물리적 특성이 같다는 가정하에, 직경 2.5cm, 길이 5cm이며, 공극률 0.43, 활성탄의 입자크기 1.6mm인 샘플관을 표준으로 하였다. 그리고 유입속도 0.563m/sec를 기준으로 샘플관의 길이/직경 비와 흡입 유속에 따른 파과시간의 특성을 알아보고 이를 총 잔류시간으로 환산하여 정화통과의 10% 파과시간을 비교하였다. 또한 정화통과 샘플관의 충전상태가 다르므로 이를 고려한 공극률 차이에 의한 10% 파과시간을 비교하였다.

여기서 총 잔류시간은 가스가 정화통과 샘플관을 통과하는데 걸리는 시간으로 다음 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$t = \frac{W}{\rho Q} \dots\dots\dots (9)$$

여기서 W는 흡착제의 무게(g), Q는 유속 (cm<sup>3</sup>/min) 그리고 ρ는 샘플관내의 활성탄의 벌크 밀도(g/cm<sup>3</sup>)이다.

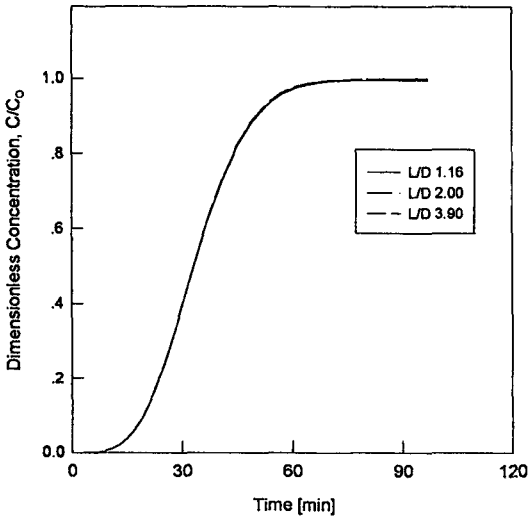


Fig. 4 Calculated breakthrough curves by the diameter/length of sampling tube

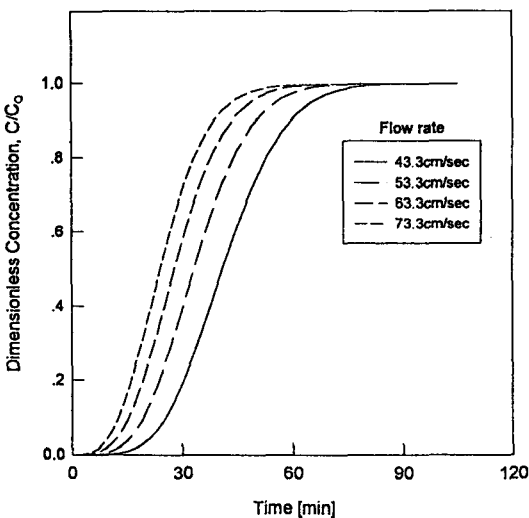


Fig. 5 Calculated breakthrough curves by air velocity

샘플관의 부피와 통과유량이 일정한 상태에서 샘플관의 길이/직경 비에 따른 파과곡선을 Fig. 4에 나타내었다. 파과곡선은 샘플관의 길이/직경 비의 변화에 따라 전혀 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 따라서 정화통의 수명예측을 위한 샘플관을 만들 경우 길이/직경 비는 고려하지 않아

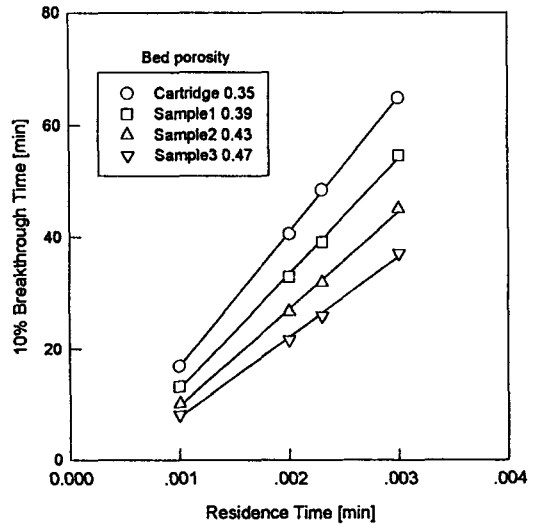


Fig. 6 Comparison of 10% breakthrough time of the cartridge and the sampling tube by the bed residence time

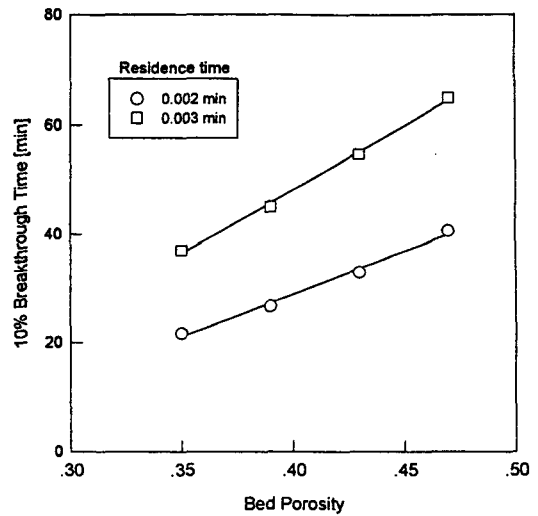


Fig. 7 Comparison of 10% breakthrough time of the cartridge and the sampling tube by the bed porosity

도 되는 것을 알 수 있다.

샘플관내로 흡입되는 유속에 따른 파과곡선의 변화를 Fig. 5에 나타냈으며, 유속이 감소할 수록 파과시간이 증가하였다. Fig. 6은 유속의 변화를 식(9)을 이용하여 총 잔류시간으로 환산하여 공극률이 0.35인 정화통과 0.39, 0.43, 0.47인 샘플관의 10% 파과시간을 총 잔류시간의 변화에 따라 비교한 것으로, 10% 파과시간은 공극률이 큰 샘플관이 정화통보다 빨리 파과되는 것으로 나타났다. 또한 공극률 차이가 증가함에 따라 총 잔류시간의 증가와 함께 파과시간의 차이도 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 동일한 총 잔류시간에 대하여 공극률의 변화에 대한 10% 파과시간을 나타낸 것으로, 공극률의 증가에 따른 10% 파과시간의 증가는 선형적인 관계를 갖고 있음을 알 수 있다. 정화통과 샘플관의 공극률과 유입되는 공기의 속도등을 변화시켜 총 잔류시간을 같게 하면 Fig. 8에 나타난 것과 같이 10% 파과시간이 일치한다. 그리고 샘플관의 총 잔류시간 변화에 따른 영향이 선형적으로 나타나고 있으므로 이를 이용하여 샘플관의 파과시간으로 부터 정화통의 파과시간을 예측할 수 있다.

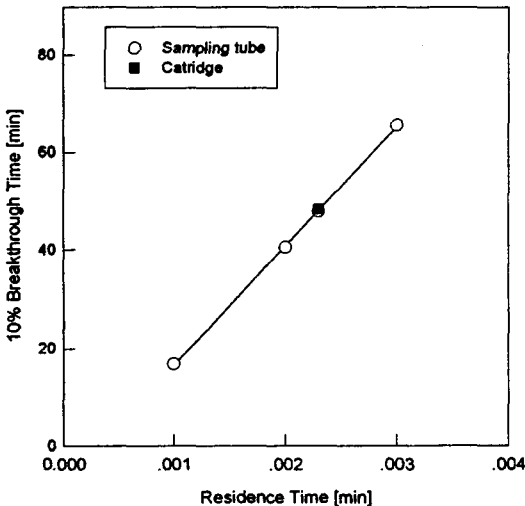


Fig. 8 Comparison of 10% breakthrough time of the cartridge and the sampling tube by the residence time

#### 4. 결 론

유기가스용 방독마스크 정화통의 수명예측을 위해 정화통과 샘플관의 파과곡선을 모사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 샘플관의 파과시간은 샘플관의 길이/직경 비의 영향을 받지 않았으며, 이에 따라 샘플관의 길이/직경 비는 임의로 선택할 수 있다.
- 2) 총 잔류시간에 따른 파과시간이 선형적으로 나타나고 있으므로 이를 이용하여 정화통의 수명을 예측할 수 있다.
- 3) 총 잔류시간이 같을 경우 정화통과 샘플관의 파과시간은 공극률이 큰 샘플관이 크게 나타났으며, 총 잔류시간이 증가할 수록 더 큰 차이를 보였다.
- 4) 유기가스용 방독마스크 정화통은 활성탄 입자 크기와 공극률이 작을 수록 파과시간이 증가하였다.

본 연구는 1995년도 산학협동재단 학술연구비 지원에 의하여 수행된 일부로 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Dwight W. Underhill, Calculation of the performance of active carbon at high relative humidities, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 48, pp. 909~913, 1987.
- 2) Howard j. Cohen, Edward T. Zellers and Richard P. 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., 51, pp. 575~580, 1990.
- 3) Young Hee Yoon and James H. Nelson, Application of gas adsorption kinetics-I. A theoretical model for respirator cartridge service life, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 45, pp. 509~518, 1984.
- 4) Young Hee Yoon and James H. 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., 45, pp. 517~524, 1984.
- 5) G. McKAY, S. McKEE, H. R. J. Walters, Solid-Liquid adsorption based on external mass transfer, macropore and micropore diffusion, Chemical Engineering Science, Vol. 42, No. 5, pp. 1145~1151, 1987.
  - 6) James B. Riggs, An introduction to numerical methods for chemical engineering, Texas Tech University Press.
  - 7) M.P. Srinivasan, J.M. Smith and B.J. McCOY, Supercritical fluid desorption from activated carbon, Chem. Engng Sci. 45, pp. 1885~1895, 1990.
  - 8) Ralph T. Yang, Gas Separation by Adsorption Process, Butterworth, 1985.
  - 9) D. Trout, P.N. 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., 47, pp. 491~496, 1986.
  - 10) Hajime Hori, Isamu Tanaka, Response characteristics of the diffusive sampler at fluctuating vapor concentration, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 54, pp. 95~101, 1993.
-