

작업현장의 환경조건에 따른 방독마스크 정화통의 수명예측(Ⅱ)

Prediction of Service Life of a Respirator Cartridge by the Occupational Environment(Ⅱ)

김기환*·김덕기*·신창섭**

Ki-Hwan Kim · Deog-Ki Kim · Chang-Sub Shin

(1996년 6월 14일 접수, 1996년 12월 14일 채택)

ABSTRACT

The breakthrough curves of a sampling tube were studied to predict the service life of a respirator cartridge for organic vapors. The fixed bed adsorption model was applied to respirator cartridge and its variables were calculated from the experiment of sampling tube.

By the experiment and simulation, it was possible to predict the service life of a respirator cartridge, however, not adequate at low CCl_4 concentration less than 700ppm and at high air humidity. The breakthrough curves of sampling tube were irregular compare to that of respirator cartridge due to packing density.

1. 서 론

작업장에서 발생하는 유해물질의 인체내로의 침입 경로중 호흡기를 통한 폭로가 가장 많으며, 방독마스크는 이들 유해물질로부터 작업자를 보호해 주는 중요한 보호구이다. 그러나, 방독마스크의 정화통에서 유해물질이 파파되는 시점을 정확히 판단하지 못하면 유해물질의 허용농도 이상에 작업자가 폭로되어 치명적인 영향을 줄 수 있으므로

로 정화통의 정확한 교체시기는 작업자의 건강과 안전에 매우 중요하며 또한 정화통의 경제적 이용도 가능하게 한다.

정화통의 수명에 영향을 주는 인자는 수명을 단축하거나 혹은 경우에 따라 증가시킬 수 있는 습도, 유해가스의 농도, 그리고 작업자의 작업강도에 따른 호흡량 등이 있으며, 또한 흡착제의 종류, 입자크기, 정화통의 충전밀도, 온도 등이 영향을 준다.

* 충북대학교 대학원

** 충북대학교 공과대학 안전공학과

Swerengen¹⁾와 Hori²⁾ 등은 유기증기의 종류별 흡착능력은 분자량이 작고, 끓는점이 낮을수록 작은 것으로 발표하였으며, 온도의 증가는 방독마스크의 수명을 감소시키는 중요한 원인으로 작용하는 것으로 알려져 있다. Trout³⁾ 등은 정화통의 충전상태에 대하여 흡착제가 불충분하게 채워진 경우 편류현상에 의해 정화통의 수명이 감소하는 것에 대하여 발표하였으며, 활성탄의 기공크기에 따른 흡착특성은 오염물의 농도가 높거나 액상인 경우 흡착질의 확산속도가 느리기 때문에 큰 기공이 효과적인 것으로 알려져 있다.

그리고, Wood⁴⁾ 등에 의하면 대기중에 존재하는 수분은 방독마스크 정화통의 유해물질 제거에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 흡착질에 따라 3가지의 형태로 나눌 수 있다. 첫째 활성탄의 흡착성능이 향상되는 경우로 수용성이며 가수분해되는 흡착질의 경우, 둘째 흡착에 영향을 주지 않는 경우로 수용성이지만 가수분해되지 않는 흡착질의 경우, 셋째 흡착이 감소하는 경우로 흡착질이 불용성인 경우이다.

방독마스크의 수명에 대하여는 Cohen⁵⁾ 등이 정화통에서 채취한 활성탄을 관에 충전시켜 충전류 시간이 같을 경우의 정화통의 수명을 예측하였으며, Yoon^{6,7)} 등은 농도와 습도의 변화 그리고 혼합물에 의한 정화통의 파과시간을 예측하였으나, 그 대부분은 이론적인 추정을 위하여 특정 유기증기를 여러 농도와 유량에서 실험하여야 추정할 수 있으며, 이때 흡착제의 여러가지 물리적 특성치를 필요로 한다. 그런데 이를 위하여는 특별한 실험장치가 있어야 하며, 작업현장의 다양성을 감안하면 현장에 직접 적용할 수 있는 자료는 거의 없다고 할 수 있다.

본 연구에서는 각 작업현장의 환경 조건에 따른 정화통의 수명을 예측하기 위하여 샘플관에 정화통에서 꺼낸 활성탄소를 소량 충전하고 파과곡선을 구해 이를 흡착모델에 적용시켜 정화통의 수명을 예측하였으며, 이 경우 특별한 장비없이 짧은 시간에 수명을 예측할 수 있는 장점이 있다. 그리고 습도, 오염물의 농도 등 환경적인 요인들이 파과시간에 주는 영향을 파악하고, 예측된 수명과 실험결과를 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 흡착 모델

방독마스크 정화통과 샘플관에서의 흡착과정은 유체 내에서의 흡착질의 이동, 유체-흡착제 사이에 형성된 격막을 통한 분자확산, 기공을 통한 확산, 그리고 미세공 표면에서의 흡착과 같은 단계로 이루어진다. 그런데 대부분의 경우 유체 내에서의 이동과 세공표면에서의 흡착은 매우 빠른 속도로 진행되기 때문에, 격막저항 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 고정층 흡착모델식⁸⁾을 방독마스크 정화통 및 샘플관에 적용하기 위하여 관내의 온도는 등온이며, 흡착제를 통과할 때 유체의 압력 강하는 무시하고, 흡착제 시료 입자의 크기는 동일하며 구형이라는 가정하에 물질수지식을 만들었다.

흡착제 단일구형입자내의 물질수지식을 세위 무차원화하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 Q}{\partial \eta^2} + \frac{2}{\eta} \frac{\partial Q}{\partial \eta} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, Q는 무차원화한 입자의 내부 농도로 q/c_0 , τ 는 구입자의 중심으로 부터의 반지름 거리로 Dt/R^2 , η 는 무차원화한 입자내의 반지름 거리로 r/R 을 나타낸다.

또한, 흡착제가 충전된 정화통에서 축방향분산을 고려하여, 고정층내의 물질수지식을 세운다음 이를 무차원화하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

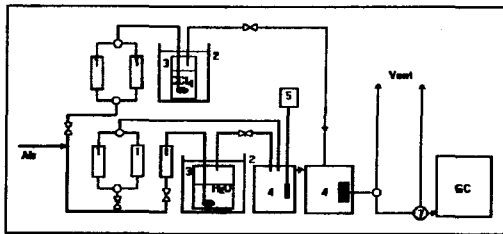
$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = -\frac{1}{Pe} \Psi \theta \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \Psi \theta \frac{\partial U}{\partial x} + 3\Psi \xi \left[U - \frac{Q|_{\eta=1}}{K} \right] \dots\dots\dots (2)$$

여기서, U는 무차원한 유체상태의 농도로 c/c_0 , Pe는 Peclet number로 vL/DL , Ψ 는 분포율로 $K(1-\epsilon)/\epsilon$, θ 는 bed length 인자로 $vR^2\epsilon/[LDK(1-\epsilon)]$, χ 는 무차원화한 축 거리로 z/L , ξ 는 film 저항 인자로 kR/DK 를 나타낸다. 윗식의 자세한 적용 과정은 앞의 논문⁹⁾에 나타내었으므로 여기서는 생략한다.

3. 실험장치 및 방법

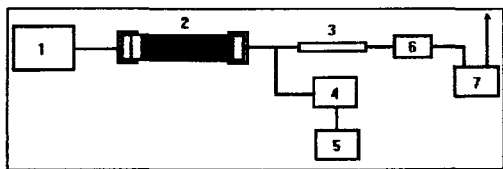
3.1 실험 장치

본 실험에서 사용한 방독마스크 정화통의 실험 장치는 Fig. 1과 같으며, 압력용기로 부터 나오는 공기중의 분진을 제거하고 유량을 일정하게 유지하기 위해 압력용기에 여과장치와 완충저장조를 설치하였다. 사염화탄소의 농도는 항온조속에 임편저를 설치하여 임편저를 통과하는 공기량을 변화시켜 조절하였으며, 상대습도도 같은 방법을 이용하였다. 공기의 유량은 rotameter로 조절하였고, 유입 공기의 상대습도는 습도계를 사용하여 측정하였으며, 활성탄층을 통과한 공기는 주입밸브를 사용하여 분석기에 주입하였다. 사염화탄소의 분석은 불꽃 이온화 검출기(FID)가 설치된 GC를 사용하며, 이때 column은 6ft의 10% carbowax를 사용하였다. Fig. 2는 샘플관측정시 사용한 실험장



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

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus



- 1. Organic vapor generator
- 2. Testing tube
- 3. Charcoal sampling tube
- 4. Miran detector
- 5. Recorder
- 6. Flowmeter
- 7. Air sampling pump

Fig. 2 Schematic diagram of testing apparatus

치로서 air sampling pump를 이용하여 sampling tube를 통과한 공기와 사염화탄소의 혼합가스를 배출하였다. 이때 사염화탄소의 분석은 GC를 사용하였으며, sampling tube를 통과하는 유량을 측정하기 위하여 중간에 유량계를 설치하였다.

3.2 실험 방법

본 실험에서 사용한 샘플관은 아크릴로 만들어, Table 1과 같은 세가지 종류에 대해 실험하였으며, 이때 공기의 유량과 사염화탄소의 농도는 각각 10 l/min을 기준으로 하였다.

Table 1 Classification of sampling tube by size

Type	Sampling tube		Weight of packed activated carbon (g)	Packing density (g/cm ³)
	Length (mm)	Diameter (mm)		
A	29.4	19	3.60	0.43
B	30.0	10	1.01	0.43
C	30.0	8	0.65	0.43

흡착질로 사용한 유기증기는 현재 산업안전보건 법상 유기가스용 방독마스크 정화통의 제독성능 시험의 기준 물질인 사염화탄소(CCl₄)를 사용하였고 정화통은 국내에서 많이 사용되는 A사의 제품을 사용하였으며, 샘플관에 충전한 활성탄은 실험에 사용된 정화통과 같은 종류의 제품에서 채취한 것을 사용하였다. 농도에 따른 흡착특성을 측정하기 위하여 사염화탄소의 농도를 1000ppm, 900ppm, 700ppm, 500ppm으로 변화시키며, 습도의 영향은 건조시킨 활성탄에 유입되는 공기의 상대 습도를 20%, 40%, 60%, 80%로 변화시켜 실험하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 샘플관의 파과 특성

정화통의 수명예측에 사용할 샘플관의 크기를 결정하기 위하여 Table 1에 제시된 세가지 크기의 샘플관을 사용하여 주입농도 1000ppm에서의 파과 곡선을 측정하여 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 샘플관의 충전량의 크기에 따라 파과곡선이 나타나고 있는데, 빠른시간에 파과곡선을 추산하기 위하여는 충전량이 작은 샘플관을 사용하는 것이 유리

하다. 그러나 본 연구에서는 이를 수학적 모델에 적용시켜야 하므로 파과곡선의 특성이 분명히 나타나있는 충전량이 큰 샘플관 A를 선택하여 실험에 사용하여 이 결과를 모사에 이용하였다.

Fig. 4는 샘플관 A를 사용하였을 때 유속에 따른 파과곡선을 나타내고 있다. 주입되는 공기중 CCl_4 의 농도가 1000ppm일때 200ppm이 파과하는 지점까지의 곡선을 나타낸 것으로 주입 유속이 낮

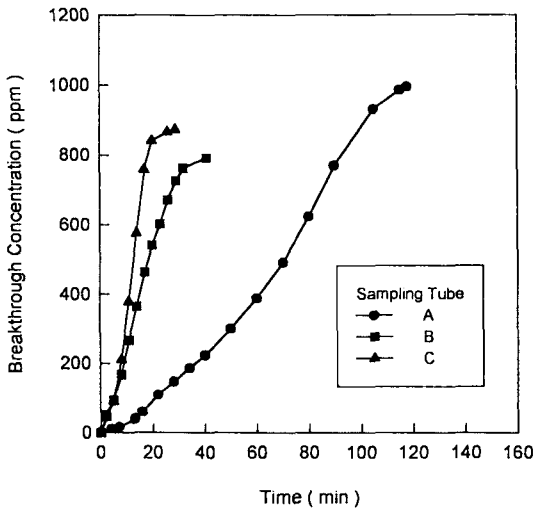


Fig. 3 The effect of tube size on the breakthrough curve(sampling tube)

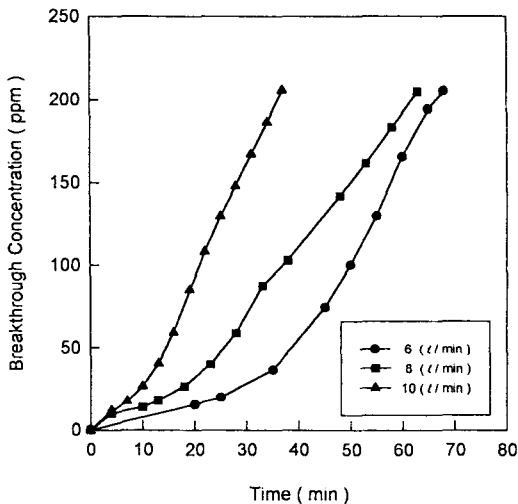


Fig. 4 The effect of air flow rate on the breakthrough curve(sampling tube)

을수록 파과시간이 길어지고 있으나, 본 실험에서는 비교적 빠른 유속에도 파과곡선의 특성이 잘 나타나고 있는 10 l/min을 기준으로 하여 실험하였다.

Fig. 5는 샘플관 A를 사용하여 유량 10 l/min에서 주입되는 CCl_4 의 농도를 변화시켰을 때의 파과곡선이다. 농도가 감소함에 따라 파과시간이 증가하는 일반적인 형태를 띠고 있으나 700ppm과

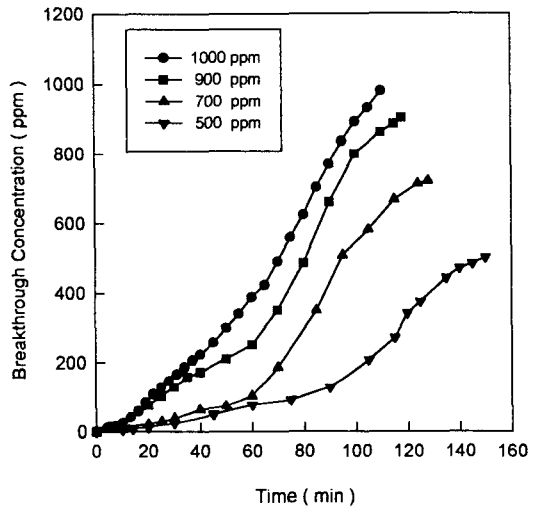


Fig. 5 The effect of CCl_4 concentration on the breakthrough curve(sampling tube)

900ppm의 경우 초기 부분에서 약간의 편향된 경향이 나타나고 있는데 이는 샘플관 충전시의 불균일성과 충전밀도가 낮은 것이 영향을 준 것으로 생각할 수 있다.

4.2 방독마스크 정화통의 수명예측

방독마스크 정화통의 주입농도에 따른 파과특성을 나타낸 것이 Fig. 6이다. 파과 초기의 곡선을 나타낸 것으로 샘플관의 파과곡선보다 훨씬 규칙적인 특성을 나타내고 있으며 이는 샘플관의 충전 밀도가 $0.43g/cm^3$ 인데 비하여 방독마스크 정화통은 $0.62g/cm^3$ 이므로 이러한 특성이 나타나는 것으로 생각할 수 있다. 방독마스크를 사용할 수 있는 한계는 파과되는 유해물질의 농도가 허용농도(TLV) 이하일때 이므로 이 농도까지 도달하는 시간이 중요하다.

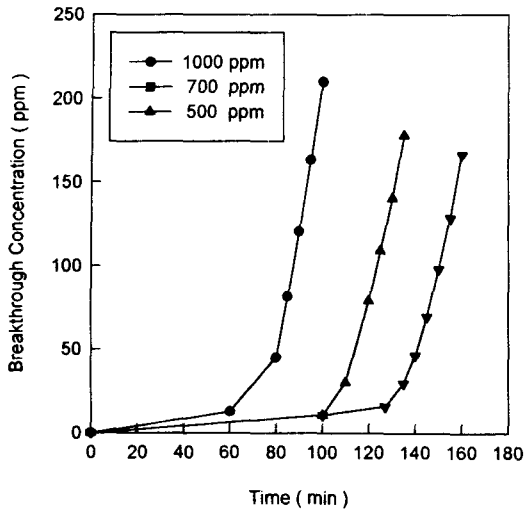


Fig. 6 The breakthrough curve of cartridge by the CCl_4 concentration in the air

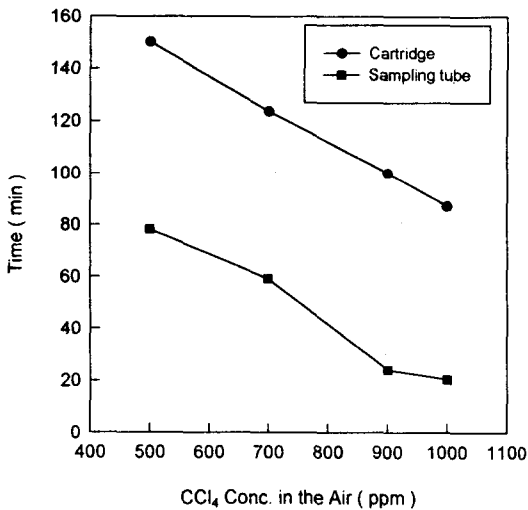


Fig. 7 The breakthrough times of cartridge and sampling tube (100ppm breakthrough)

Fig. 7은 TLV가 100ppm일 경우 주입되는 CCl_4 의 농도에 따라 100ppm이 파과되는 시간이다. 방독마스크 정화통과 샘플관을 동시에 나타낸 것으로 거의 같은 기울기로 비슷한 파과특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

샘플관의 파과특성을 자료로하여 정화통의 수명을 추정하는 것은 다음의 순서로 진행하였다.

- 1) 샘플관의 파과특성으로부터 정화통의 파과곡

선을 모사하는데 필요한 상수를 결정한다.

- 2) 이들 상수를 사용하여 정화통의 파과곡선을 모사한다.

- 3) 모사된 파과곡선에서 일정 농도의 파과시간을 산출한다.

정화통의 파과곡선의 모사를 위하여 필요한 상수중 활성탄의 입자크기, 유속, 정화통의 길이 등은 측정된 결과를 사용하였으며, 촉방항분산계수는 유속이 빠르고 흡착량이 짧으므로 그 영향을 무시하였다.

Fig. 8은 추산된 정화통의 수명과 실험에 의한 결과를 비교한 것이다. 주입되는 공기중 CCl_4 의 농도에 따른 것으로 실험결과보다 추정된 값이 길게 나타났다.

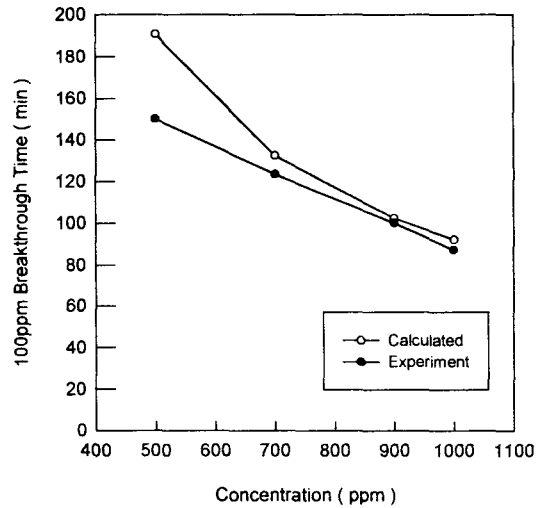


Fig. 8 Comparison of the predicted service life of respirator cartridge with the experimental results by CCl_4 concentration in the air

주입농도 900ppm에서는 추정된 시간이 100.9분인데 비하여 실험값은 102.31분으로 아주 근접하였고 700ppm의 경우도 추정값의 오차가 7.2% 정도이었다. 그러나 가장 낮은 농도인 500ppm에서는 추정된 값이 190.50분으로 실험값 150.11분과는 차이를 보이고 있어 이 식은 낮은 농도의 추정시는 오차가 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 상대습도를 20%에서 80%까지 변화시켰을 경우 주입농도 1000ppm에서의 결과이다. 실험치를 보면 습도가 증가할수록 파과시간이 짧아

지고 있어 습도의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 그리고 추산된 정화통의 수명을 보면 상대습도 50% 이하에서는 비교적 실험값과 일치하고 있으나 습도가 높아질수록 그 차이가 심하게 나고 있으며, 상대습도 80%에서는 계산된 값이 아주 큰 차이를 나타내었다. 이는 습도가 증가할수록 물분자의 흡착점 점유율이 증가하나 이를 효과적으로 나타내지 못하였기 때문으로 사료되므로 이의 보완이 필요한 것을 알 수 있다. 그러나 50% 이하의 낮은 습도 범위에서는 비교적 정확한 추정이 가능하였다.

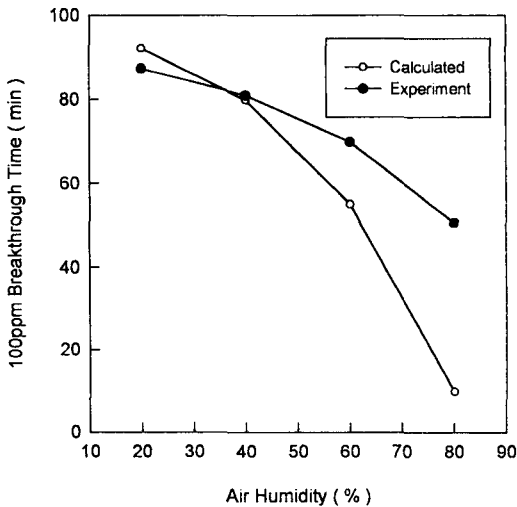


Fig. 9 Comparison of the predicted service life of respirator cartridge with the experimental results by air humidity

이상에서와 같이 본 연구에서 사용한 방법에 의하면, 정화통의 수명예측은 주입 농도가 700ppm에서 1000ppm사이의 농도범위, 그리고 상대습도 50% 이하에서 비교적 정확히 추정이 가능한 것으로 판단되며 앞으로 습도의 영향 등을 정확히 반영할 수 있는 방법의 계속적인 보완이 필요한 것으로 판단된다.

4. 결 론

이상의 샘플관을 사용한 방독마스크 정화통의 수명예측 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고정층 흡착모델을 사용하여 방독마스크 정화

통의 수명예측이 가능하며 특히 사염화탄소 주입농도 700ppm에서 1000ppm의 농도범위 그리고 상대습도 50% 이하에서 비교적 정확한 수명예측이 가능하다.

- 2) 주입농도에 따른 추정된 정화통의 수명은 실제 값보다 더 길게 나타났다.
- 3) 샘플관의 파과곡선보다는 방독마스크 정화통의 파과곡선이 규칙적으로 나타났으며, 이는 충전밀도의 영향인 것으로 판단된다.
- 4) 샘플관과 정화통의 파과시간은 주입되는 CCl₄의 농도, 주입되는 공기의 상대습도 및 유속의 증가에 따라 감소하였다.

【감사】

본 연구는 1995년도 산학협동재단 학술연구비지원에 의하여 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) P. M. Swerengen and S. C. Weaver, "Respirator cartridge study using organic vapor mixtures", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., Vol. 49, pp. 70~74, 1988.
- 2) Hajime Hori, Isamu Tanaka, "Response characteristics of the diffusive sampler at fluctuating vapor concentration", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., Vol. 54, pp. 95~101, 1993.
- 3) 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., Vol. 47, pp. 491~496, 1986.
- 4) Geery O. Wood, "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., Vol. 46, pp. 251~256, 1985.
- 5) 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 us-

- ing carbon tetrachloride. Part II : humidity effects", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., Vol. 51, pp. 575~580, 1990.
- 6) 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., Vol. 45, pp. 509~518, 1984.
 - 7) 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., Vol. 45, pp. 517~524, 1984.
 - 8) N. S. Raghavan and D.M. Ruthven, "Numerical simulation of a fixed-bed adsorption column by the method orthogonal collocation", AIChE J., Vol. 29, pp. 922~925, 1983.
 - 9) 김덕기, 신창섭, "작업현장의 환경조건에 따른 방독마스크 정화통의 수명예측(I)", 한국산업안전학회지, 제11권, 제2호, pp. 89~95, 1996.