

복합유기용제에 노출된 호흡보호구용 정화통의 파과에 관한 연구

서울대학교 보건대학원 산업보건학교실

정 해 등 · 백 남 원

— Abstract —

A Study on Breakthrough of Respirator Cartridge Using Multi-Organic Vapor Mixtures

Hai-Dong Chung and Nam Won Paik

*Division of Industrial Health, School of Public Health,
Seoul National University, Seoul, Korea*

This study was conducted to evaluate breakthrough characteristics of respirator cartridge using multi-organic vapors, including carbon tetrachloride, trichloroethylene, and toluene. The organic vapors were used as single phase, binary system, and ternary system. The results are summarized as follows.

1. Organic vapors studied were 1,000 ppm, 750 ppm, 500 ppm and 250 ppm in single phase. Carbon tetrachloride having the highest molecular weight showed the breakthrough first, and breakthrough sequency by organic vapor was dependent on its molecular weight. The 10% breakthrough times at 1,000 ppm of organic vapor were 97 minutes for carbon tetrachloride, 129 minutes for trichloroethylene and 135 minutes for toluene.
2. When concentrations of organic vapors were at levels of the Threshold Limit Values, the lives of the respirator cartridges were 122 hours in carbon tetrachloride, 18 hours in trichloroethylene and 28 hours in toluene.
3. In the binary system at a total concentration of 1,000 ppm with carbon tetrachloride and trichloroethylene, breakthrough times ranged from 104 minutes to 125 minutes, which were longer than 97 minutes in a single phase (1,000 ppm) for carbon tetrachloride, but shorter than breakthrough times for TCE and Toluene.
4. Breakthrough times in the binary system with carbon tetrachloride and toluene were 131~132 minutes.
5. Breakthrough times in the ternary system with carbon tetrachloride, toluene, and trichloroethylene were 120 ± 8 minutes, which were longer than 97 minutes in the single phase (1,000 ppm) for carbon tetrachloride, equal to 129 minutes for trichloroethylene, and shorter than 135 minutes for toluene. Those were almost similar to 124 ± 9 minutes of breakthrough times in the binary systems.

Key Words : Respirator Cartridge, Breakthrough Time, Organic Vapor, Concentrations, Carbon Tetrachloride, Trichloroethylene, Toluene, Single Phase, Binary System, Ternary System.

I. 서 론

최근 우리나라 직업병발생 현황을 살펴보면 유기용제에 의한 직업병발생은 1991년 60명, 1992년 90명, 1993년 114명으로 매년 증가하는 경향을 보이고 있다(노동부, 1992~1994).

유기용제는 도료제조, 자동차제조의 도장, 합성수지제조, 금속 또는 의류의 세정, 의약품등 화학약품의 추출 및 탈지 등 거의 모든 사업장에서 광범위하게 사용되고 있는 화학물질이며 다른 물질을 녹여서 균일하게 분산된 용액 상태가 유지되도록 하는 액체이다. 종류에는 알코올류, 방향족탄화수소류, 아민류, 에테르류, 케톤류, 에스테르류 및 염소화탄화수소류 등이 있다. 대부분 사업장에서는 이러한 단일성분의 유기용제나 또는 적정 비율로 혼합하여 제조된 제품들을 사용하고 있다.

산업위생분야에서 유기용제에 의한 직업병을 예방하기 위해 권장하는 방법의 하나는 근로자들로 하여금 호흡보호구(respirators)를 착용토록 하는 것이다.

호흡보호구에 사용하는 유기용제용 정화통(cartridge)은 활성탄(activated carbon)인 흡착제가 충전되어 있다. 이것은 유기용제가 함유된 오염공기가 정화통을 통과할 때 유기용제가 활성탄에 흡착 제거되고 깨끗한 공기만을 근로자가 호흡할 수 있도록 하는 기능을 가지고 있다. 이러한 정화통의 성능은 파과(破過)시간(breakthrough time or service life)으로 표시되고 있다. 이 파과시간은 작업환경의 유기용제 농도, 작업공간의 온도 및 습도 또는 근로자의 작업부하량(호흡량) 등에 의하여 결정된다.

Nelson(Nelson 과 Harder 등, 1976)의 연구 결과에 의하면 유기용제의 농도가 증가하면 파과시간은 대수적으로 반비례하여 감소하며, 대기온도가 10℃ 증가할 때마다 파과시간은 유기용제의 종류에 따라 다르나 대부분 1~10 % 씩 감소한다. 또한 상대

습도가 65 % 이상일 때는 급격하게 감소하며, 정화통을 통과하는 유량(근로자의 호흡량)에 따라 반비례하여 감소하고, 활성탄의 충전량이 2 배로 증가하면 파과시간은 2 배로 증가한다.

이러한 연구의 대부분은 작업환경 중에는 유기용제가 순수하게 단일성분(single phase)으로 존재한다는 가정하에서의 파과시간인 것이다. 최근에는 공기 중에 2개 물질의 유기용제가 혼합되어 있는 상태인 2성분계(binary system)에 노출된 정화통의 파과시간에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Jonas 등, 1983; Yoon과 Nelson, 1984; Swearengen 등, 1988; Yoon등, 1991; Cohen등, 1991; Yoon 등, 1992).

이 중에서 Yoon등(1991, 1992)의 연구 보고에 따르면 2성분계에 사용한 활성탄의 파과시간은 일반적으로 단일성분일 때 보다 매우 짧게 나타난다고 한다. 특히 혼합되어 있는 2개 성분의 유기용제가 분자량들 상호간에 차이가 크면 활성탄의 정화 특성은 어느 파과시간이 지나면 활성탄에 흡착되어졌던 분자량이 작은 유기용제가 분자량이 큰 물질에 의해 탈착되어져 오히려 근로자는 고농도의 유기용제에 노출되어지는 결과를 초래한다고 보고한 바 있다.

유기용제 제품은 10여종 이상의 단일성분으로 또는 혼합하여 생산하거나 사용하고 있기 때문에 유기용제를 취급하는 사업장의 작업환경은 단일성분의 유기용제보다 복합적인 성분으로 대기중에 혼재하고 있다. 따라서 단일성분의 유기용제로 실험하여 표시하고 있는 호흡보호구용 정화통의 성능에는 신뢰성에 문제가 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 호흡보호구용 정화통의 파과시간을 검증하는데 사용되는 사염화탄소(carbon tetrachloride), 유기용제 취급사업장의 작업환경에서 빈번히 사용되고 있는 톨루엔(toluene) 및 삼염화에틸렌(trichloroethylene)을 이용하여 이들 유기용제가 단일성분으로 존재할 때와 2성분 또는 3성분이 복합적으로 혼합되어 있는 상태인 2성분계 또는 3성분계(ternary system)로 존재할 경우에 정화통의

Table 1. Airborne Concentrations of Organic Vapors Studied

	Type of Organic Vapors	Concentrations Studied ^A			
		(ppm)			
Single Phase	CCl ₄ , Toluene or TCE	250,	500,	750,	1,000
Binary System	CCl ₄ /Toluene,	250/750,	500/500,	750/250	
	Toluene/TCE or CCl ₄ /TCE				
Ternary System	CCl ₄ /Toluene/TCE	250/250/500			
	CCl ₄ /Toluene/TCE	250/500/250			
	CCl ₄ /Toluene/TCE	500/250/250			

A) assault concentrations range (n = 3)

: 250 ± 20 ppm, 500 ± 30 ppm, 750 ± 50 ppm, 1,000 ± 100 ppm

파괴시간 특성들을 비교 검토하였다. 이러한 연구 결과는 유기용제 취급사업장에 있어서 정화통의 교환시기를 파악하는데 기초 자료가 될 것이다.

II. 재료 및 방법

1. 재료

본 연구에서 사용한 호흡보호구용 정화통은 합성수지재질로서 총무게는 52.22 ± 0.18 g, 두께는 1.72 ± 0.03 cm, 직경은 7.57 ± 0.02 cm, 그리고 단면적은 45.01 ± 0.01 cm² 이다. 정화통 내부에 충전되어 있는 활성탄은 일본국의 Kuray사에서 생산한 과실각계 파쇄형 활성탄(coconut shell based activated carbon)으로서 29.43 ± 0.18 g이 충전되어 있다. 그리고 입자의 비표면적은 1,200~1,400 m²/g, 입자크기는 10×12 mesh 이고 충전밀도(packed carbon density)는 0.38 ± 0.02 g/cm³ 이다.

연구실험용 유기용제의 목적농도(assault concentration)를 만들기 위해 사용한 표준시약은 독일의 Merck사 제품으로서 순도는 99.5 %인 유기용제이다.

2. 방법

1) 실험장치 및 방법

압축공기를 분당 30 l 유량으로 온도 20 ± 1 °C가 유지되도록 수욕조(water bath) 내부에 있는 4개의 혼합조(mixing chambers)를 통과토록 하였다. 이 중에서 2개의 혼합조는 회석용 공기가 상대습도

50 ± 5 %가 되도록 증류수를 넣었고 마지막 혼합조에는 표 1과 같은 실험목적농도를 제조하기 위해 유기증기가 유입되는데, 이 유기증기는 극미량주사기로 주입한 적정량의 유기용제가 가열기를 통과하여 기화된 유기증기이다. 회석공기와 유기증기가 혼합되어 실험목적농도가 된 혼합공기는 유량계에 의해 분당 30 l씩 실험대상의 정화통을 통과토록 하였다.

정화통의 파괴시간을 구하는 본 실험을 실시하기 이전에 먼저 혼합공기를 분당 1.0 l씩 연속시료채취 방법으로 Gas Chromatography (Shimadzu사, Model: HCM-1B, 총탄화수소계)에 자동 유입시켜 수소염이온화검출기(Flame Ionization Detector)로 실험목적농도를 측정하였다. 이후에 실험대상의 정화통을 Cartridge Holder에 장착시킨 다음 정화통을 통과한 혼합공기의 유기증기농도 역시 같은 방법으로 정량분석 하였다. 또한 정화통에 흡착된 유기용제의 총량을 산출하기 위해 각 실험을 실시하기 전과 후에 정화통 무게를 칭량(Sartorius: Model-2354)하였다.

실험방법은 표 1과 같은 종류의 유기용제가 단일 성분일 경우에 파괴시간을 구하기 위해 유기증기 농도를 250 ± 20 ppm, 500 ± 30 ppm, 750 ± 50 ppm, 1,000 ± 100 ppm으로 하였으며, 2성분계 및 3성분계에 대해서는 복합유기용제의 농도가 1,000 ± 100 ppm이 되도록 하였다. 이러한 여러가지 농도에 따라 정화통이 100 % 파괴되는 시간(t_{100%}; 초기의 실험목적농도가 검출될 때 까지의 시간)과 통과된 농도를 동시에 측정하였고 아울러 정화통에 흡

착된 유기용제의 양은 실험 전과 후에 측정하였던 무게차이를 계산하여 구하였다.

모든 실험은 3회씩 반복 실시하였고 그 산술평균치를 실험 결과치로 하였다.

2) 10 % 파과시간($t_{10\%}$) 이론

미국산업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration)에서 규정한 유기용제용 정화통의 성능시험 방법은 사염화탄소 1,000 ppm의 유기증기를 분당 32 l로 정화통을 통과토록 하여 사염화탄소 농도가 5 ppm이 검출될 때까지 시간이 50 분 이상이어야 그 성능을 인정하고 있다. 한국과 일본의 검정기준 역시 호흡보호구가 직결식소형인 경우 분당 30 l의 유량으로 300 ppm의 사염화탄소를 기준농도로 실험하고 파과농도가 5 ppm 일 때 그 시간은 50 분 이상이어야 한다고 규정하고 있다.

또한 미국산업안전보건청은 정화통 사용기준을 작업환경의 유기용제 농도가 1,000 ppm 이하이거나 또는 허용농도수준(Permissible Exposure Limit)의 10 배 이하의 작업장에서 착용토록 권장하고 있다.

그러므로 호흡보호구를 사용하는 근로자들은 사염화탄소 이외의 유기용제에 관한 정화통의 파과시간을 파악하고 있어야 한다.

일반적으로 사염화탄소 이외의 유기용제의 단일성분에 대한 정화통의 파과시간을 추정하는데는 Mecklenburg의 식, Wheeler의 식 및 Nelson의 식을 사용하고 있다.

이 중에서 다음의 방정식(1)로 표현되는 Nelson의 식이 10 % 파과시간($t_{10\%}$)을 산출하는데 자주 사용되고 있다 (Nelson과 Correia, 1976).

$$t_{10\%} = \frac{(2.4) (10^6) (W_c) (a+bT)}{(C^{2/3}) (M) (Q)} \dots\dots\dots (1)$$

$t_{10\%}$: 10 % breakthrough time (min)

W_c : carbon weight [g]

a, b : constants of relative solvent volatility

T : solvent boiling point [°C]

C : contaminant concentration (ppm)

M : molecular weight [g]

Q : breathing rate [l/min]

그리고 최근에 와서는 2성분계의 유기용제에 노출

된 정화통에 흡착된 분자량이 작은 유기용제의 양은 방정식(2)로 표현되고 있으며 10 % 파과시간은 이 양(W_t)을 이용하여 산출하고 있다. 각 상수는 복합 유기용제별로 구해진 실험계산치이다. 따라서 본 연구에서는 실험결과 나타난 10 % 파과시간과 방정식(1)과 (2)에서 산출한 10 % 파과시간을 이론치로 하여 비교 고찰하였다(Yoon등, 1991 ; Cohen등, 1991 ; Yoon등, 1992).

$$W_t = (C) (F) \int_0^t (Q_1) dt \dots\dots\dots (2)$$

$$= (C) (F) \int_0^t (Q_1) dt - (C) (F) (A_m) \int_0^t (Q_2 - Q_1) dt$$

W_t : total weight of compound 1 at time t (g)

t : detected time of compound 1(min)

Q_1 : probability of the adsorption compound 1 (-)

Q_2 : probability of the adsorption compound 2 (-)

A_m : maximum fractional excess breakthrough of compound 1 in the assault concentrations (-)

C : contaminant assault concentration (g/l)

F : flow rate(l/min)

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 단일성분계의 파과시간

사염화탄소(이하 CCl_4 로 약칭 함), 삼염화에틸렌(이하 TCE로 약칭 함) 및 톨루엔(이하 Tol로 약칭 함)이 단일물질로서 대기중에 1,000 ppm, 750 ppm, 500 ppm 및 250 ppm으로 존재할 때 농도별 10 % 파과시간은 표 2와 같다. 그리고 각 농도별 정화통의 파과곡선(t_b)은 그림 1, 2, 3과 같다. 파과순서는 사염화탄소, 삼염화에틸렌 그리고 톨루엔이었으며 유기용제의 분자량이 클수록 빠른 파과시간이 나타났다. 1,000 ppm 일 때 10 % 파과시간은 사염화탄소가 97 분으로 가장 빠르고 삼염화에틸렌은 129 분, 톨루엔은 135 분으로 나타났다. 유기용제의 농도가 750 ppm, 500 ppm, 250

Table 2. Comparison of Experimental and Calculated 10 % Breakthrough Time in Single Phases

Concentration [ppm]		10 % Breakthrough Time		
		Experimental ^A [min]	Calculated ^B [min]	Difference ^C [%]
CCl ₄	1,000	97	86.7	10.6
	750	125	105.0	16.0
	500	176	137.6	21.8
	250	301	218.4	27.4
	Mean ± SD			18.9 ± 7.3
TCE	1,000	129	72.5	43.8
	750	155	87.8	43.4
	500	194	115.0	40.7
	250	360	182.6	49.3
	Mean ± SD			44.3 ± 3.6
Toluene	1,000	135	98.5	27.0
	750	158	119.3	24.5
	500	232	156.3	32.6
	250	423	248.2	41.3
	Mean ± SD			31.3 ± 7.4

A) Values obtained from this study

B) Values calculated from equation (1)

$$W_c = 29.43\text{g}, Q = 30\text{ l/min}$$

C) by $[(A) - (B)] / (A) \times 100$

ppm으로 낮아짐에 따라 파과시간은 길어졌고 파과 순서는 1,000 ppm 일 때와 마찬가지로 동일하였다. 또한 유기용제의 농도가 낮을수록 파과곡선의 기울기는 완만한 경사를 보였다(그림 1, 2, 3 참조). 이것은 각 유기용제의 분자량, 증기압, 분자구조, 극성 및 확산계수 차이 때문인 것으로 생각되며 유기증기의 양이 적은 저농도에서는 당연한 결과로 판단된다.

한편 Nelson 등(1976)이 위의 3종류 유기용제농도를 1,000 ppm으로 하고 정화통의 활성탄 양을 52.2 g, 통과유량을 분당 53.3 l로 실험한 결과 사염화탄소는 68.8 분, 삼염화에틸렌은 83.0 분 그리고 톨루엔은 114.0 분으로 보고하였고, 방정식(1)에 의한 10 % 파과시간은 각각 86.8 분, 72.6 분 및 98.7 분이었으며 실험치와 차이는 - 26.2 %, 12.5 % 와 13.4 % 이라고 보고한 바 있다.

본 연구의 실험결과치를 위와 같은 방법으로 비교

한 결과는 표 2에 제시되어 있다. 각 유기용제의 농도가 낮아질수록 실험치와 계산치 차이는 증가하였다. 이것은 유기용제의 종류에 따라서 차이가 있었으며 ($p < 0.05$) 각 물질의 농도 변화와 확산계수 및 분자량의 차이인 것으로 판단된다.

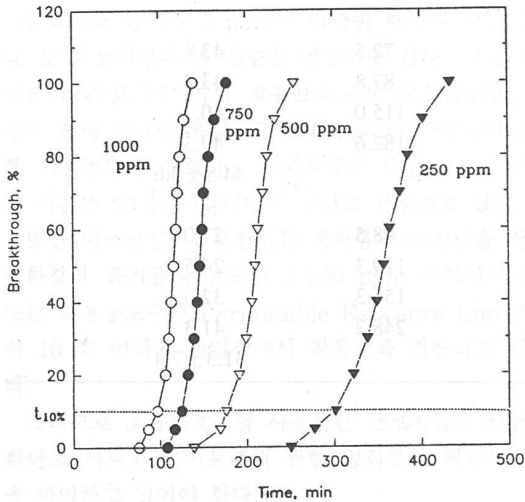
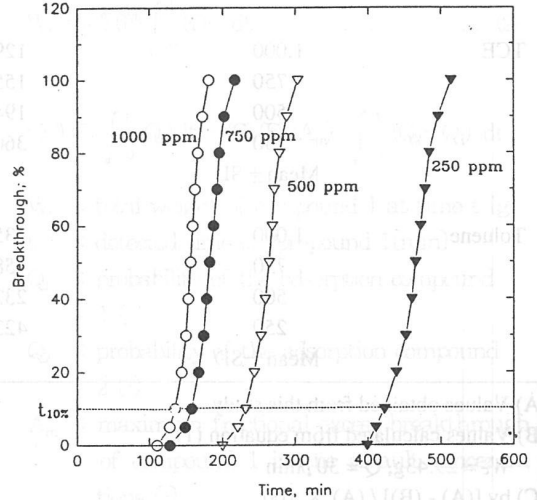
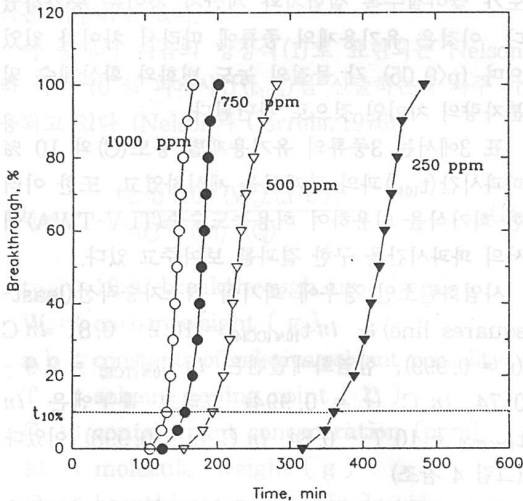
표 3에서는 3종류의 유기용제별 농도(C)와 10 % 파과시간($t_{10\%}$)과의 관계식을 제시하였고, 또한 이러한 회귀식을 이용하여 허용농도수준(TLV-TWA)에서의 파과시간을 구한 결과를 보여주고 있다.

사염화탄소인 경우에 회귀식 최소자승직선(least-squares line)은 $\ln t_{10\%}(\text{CCl}_4) = 10.2 - 0.81 \ln C$ ($r = 0.999$), 삼염화에틸렌은 $\ln t_{10\%}(\text{TCE}) = 9.9 - 0.74 \ln C$ ($r = 0.994$) 그리고 톨루엔은 $\ln t_{10\%}(\text{Tol}) = 10.7 - 0.84 \ln C$ ($r = 0.998$) 이었다(그림 4 참조)

Nelson 등(1976)의 연구결과에 따르면 정화통의 10 % 파과시간은 오염농도에 대수적으로 반비례하

Table 3. Experimental Values for a(Intercept) and b(Slope) of 10% Breakthrough Concentration

	TLV-TWA [ppm]	10 % breakthrough time at TLV-TWA [Min]	Least Squares Equation	
			a(intercept)	b(slope)
CCl ₄	5	7,305(121.7 hours)	10.2	- 0.81
TCE	50	1,102(18.3 hours)	9.9	- 0.74
Toluene	50	1,659(27.6 hours)	10.7	- 0.84
Mean ± SD				- 0.797 ± 0.051

**Fig. 1.** Breakthrough by time and concentration for carbon tetrachloride.**Fig. 3.** Breakthrough by time and concentration for toluene.**Fig. 2.** Breakthrough by time and concentration for trichloroethylene.

며 그 곡선의 기울기는 유기용제의 종류에 따라 다르지만 0.67 ± 0.17 이라고 하였다. 본 연구에서 단일성분에 대한 파과곡선의 평균기울기는 0.797 ± 0.051 로 나타났다.

표 3에서 알 수 있듯이 각 유기증기의 작업환경농도가 허용농도수준일 때 정화통의 사용시간은 사염화탄소가 7,305 분(121.7 시간), 삼염화에틸렌은 1,102 분(18.3 시간) 그리고 톨루엔은 1,659 분(27.6 시간)으로 나타났다. 이것을 1 일 8 시간 사용하는 것을 기준으로 할 때 사염화탄소 작업장은 15.2 일, 삼염화에틸렌 작업장은 2.3 일 그리고 톨루엔 작업장은 3.5 일간 사용할 수 있는 것으로 나타났다.

표 4는 정화통이 100 % 파과되었을 때 정화통의 활성탄에 흡착된 유기용제 양을 측정한 결과이다. 이론치와 비교할 때 그 차이는 작다.

그러므로 정화통의 물리적성질이나 유기용제의 화

학적 성질 별로 10 % 파괴시간을 산출하는 연구를 통한 이론식의 제시가 필요할 것으로 판단된다. 또한 호흡보호구를 착용하는 근로자가 노출되는 작업 환경 중의 농도를 정확히 평가하는 것이 중요하다. 왜냐하면 그 노출농도에서 정화통의 사용시간을 정확히 산출하여 정화통을 사용하여야 만이 유기용제의 과잉노출을 예방할 수 있기 때문이다. 따라서 정

화통 파괴시간의 산출계산식에 관한 연구가 더욱 더 절실히 필요하다.

2. 2성분계의 파괴시간

표 5는 3종류의 유기용제에 대하여 각 단일성분으로 1,000 ppm 존재할 때와 2종류의 유기용제를 동등비율과 비균등비율의 농도로 혼합하여 전체농도가 1,000 ppm으로 존재할 때 10 % 파괴시간을 비교한 것이다 (그림 5, 6, 7 참조).

[CCl₄/TCE]의 2성분계에서 10 % 파괴시간은 104~125 분으로서 사염화탄소가 단일성분일 때의 농도 1,000 ppm의 10 % 파괴시간보다 7~28 분 늦게 나타났다. 삼염화에틸렌의 단일성분 농도 1,000 ppm일 경우의 129 분 보다는 4~25 분 빠르게 나타났다 (그림 5 참조). 사염화탄소와 삼염화에틸렌 성분들이 동등비율(CCl₄(500)+TCE(500))일 때 보다는 비균등비율일 때가 파괴시간이 7~21 분 빠르게 나타났다. 이러한 결과는 사염화탄소와 삼염화에틸렌은 분자량과 분자구조가 비슷하기 때문에 혼합비율이 비균등일 때는 비율을 높게 (750 ppm) 차지하는 단일성분의 유기증기가 2성분계에서는 파괴시간에 영향을 주는 것으로 판단하였다.

2성분계가 [Tol/TCE]으로 혼합되어 있을 때 10 % 파괴시간은 톨루엔 또는 삼염화에틸렌의 단일성분농도 1,000 ppm의 10 % 파괴시간인 135 분과 129 분보다 0~8 분 빠른 121~129 분 사이에서 나타났다 (그림 6 참조). 또한 [Tol/TCE]이 혼합된 유기용제 자체들만의 10 % 파괴시간을 살펴보면 두

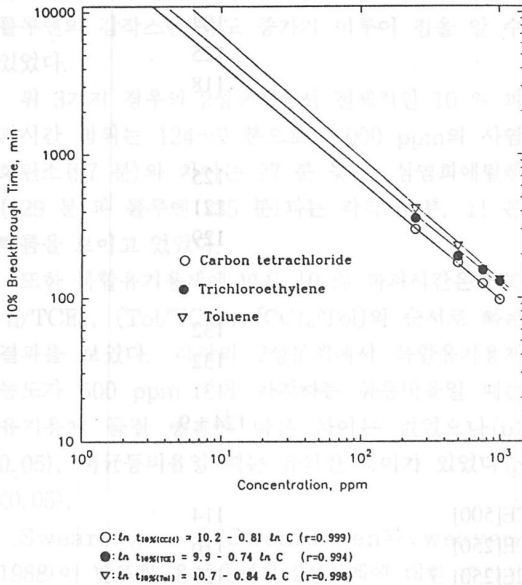


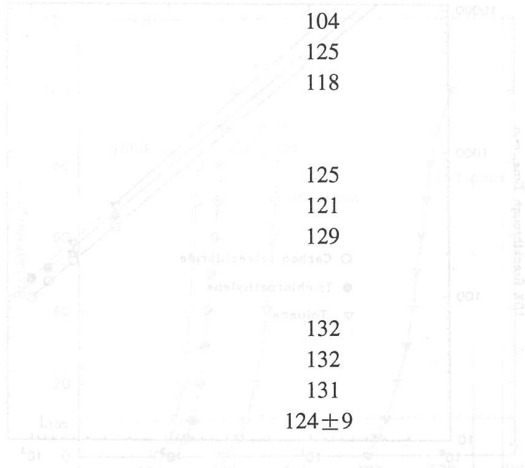
Fig. 4. Relationship between concentration and 10 % breakthrough time for organic vapors.

Table 4. Weight of Organic Solvent Adsorbed at 100% Breakthrough of Single Phase, Binary System and Ternary System

	Weight of solvent adsorbed [g]	Weight of solvent adsorbed per weight of carbon [g/g]	
		Experimental	Calculated
CCl ₄	17.64 ± 1.53	0.599 ± 0.052	0.677
Toluene	12.83 ± 0.88	0.436 ± 0.030	0.473
TCE	17.66 ± 1.96	0.600 ± 0.067	0.625
(CCl ₄ /Toluene)	15.50 ± 0.98	0.527 ± 0.033	
(Toluene/TCE)	15.80 ± 3.43	0.537 ± 0.117	
(CCl ₄ /TCE)	21.55 ± 0.10	0.732 ± 0.003	
(CCl ₄ /Tol/TCE)	17.76 ± 1.01	0.603 ± 0.034	

Table 5. Breakthrough Time in the Single Phase, Binary System and Ternary System at 1,000 ppm

Type and Concentration of Material [ppm]		10 % Breakthrough Time [min]
Single Phase,		
CCl ₄ [1,000]		97
TCE [1,000]		129
Tol [1,000]		135
Mean ± SD		120 ± 20
Binary System, case I		
CCl ₄ [750] + TCE[250]		104
CCl ₄ [500] + TCE[500]		125
CCl ₄ [250] + TCE[750]		118
Binary System, case II		
Tol[750] + TCE[250]		125
Tol[500] + TCE[500]		121
Tol[250] + TCE[750]		129
Binary System, case III		
CCl ₄ [750] + Tol[250]		132
CCl ₄ [500] + Tol[500]		132
CCl ₄ [250] + Tol[750]		131
Mean ± SD		124 ± 9
Ternary System,		
CCl ₄ [250] + Tol[250] + TCE[500]		114
CCl ₄ [250] + Tol[500] + TCE[250]		116
CCl ₄ [500] + Tol[250] + TCE[250]		129
Mean ± SD		120 ± 8



용액이 동등하게 혼합된 [Tol(500)/TCE (500)]에서는 121 분으로서 비균등혼합일 때보다 4~8 분 정도 약간 빠른 결과치가 나타남을 알 수 있었다.

이것은 Yoon등(Yoon등, 1991; Cohen등, 1991; Yoon등, 1992)이 연구 발표한 2성분계의 파과시간 특성과 같이 톨루엔이 삼염화에틸렌의 분자량보다 작기 때문인 것으로 생각되었다. 비균등혼합인 경우에 파과시간은 두 성분 중에서 비율이 높은 물질의 파과시간보다는 비율이 낮지만 분자량이 높은 삼염화에틸렌에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다.

[CCl₄/Tol]의 2성분계에서 10 % 파과시간은 [CCl₄/TCE] 및 [Tol/TCE]과는 매우 다른 특성을 보였다.

사염화탄소와 톨루엔의 혼합비율에 상관없이 10 % 파과시간은 131~132 분 사이로 거의 동일하였

고, 10 % 파과시간을 지나서 부터는 차이가 크게 발생하기 시작하였다 (그림 7 참조). [CCl₄/Tol]의 혼합물질들 사이에 100 % 파과시간까지의 전체적인 파과순서는 동등비율일 때보다 비균등혼합일 때 파과시간이 빨랐다. 10 % 파과시간 이후의 파과시간은 비균등혼합인 경우에는 분자량이 작고 비중이 가벼운 톨루엔의 함유비율이 높을 때 파과시간이 빨랐다. 단일성분일 때의 파과시간과 비교하면 사염화탄소와 톨루엔이 1,000 ppm일 때 파과시간인 97 분과 135 분의 사이에서 나타났다. 또한 [CCl₄(250)/Tol(750)]과 [CCl₄(500) /Tol(500)]의 2성분계에서는 각각 t_{30%}~t_{40%} 및 t_{80%}~t_{90%}의 파과시간에서 급격한 농도의 변곡점이 발생했다.

Yoon 등(Jonas등, 1983; Swearengen과 weaver, 1988; Yoon등, 1991)이 발표한 (Acet-

one/m-Xylene)과 (Acetone/Styrene) 혼합물의 파과시간에 대한 연구보고서에 따르면 분자량이 적은 유기용제인 아세톤은 활성탄에 최대도 흡착되어 질 때까지 증가하고, 그 이후는 계속적으로 정화통을 통과하는 혼합성분 중의 스티렌 또는 크실렌증기 때문에 이미 흡착되어졌던 아세톤은 탈착과 파과현상이 나타나 정화통을 통과한다고 설명하고 있다. 마찬가지로 $[CCl_4/Tol]$ 의 파과곡선특성 역시 복합 유기용제의 두 물질간의 분자량 차이가 크기 때문에 톨루엔의 갑작스런 농도 증가가 이루어 짐을 알 수 있었다.

위 3가지 경우의 2성분계에서 전체적인 10 % 파과시간 범위는 124 ± 9 분으로 1,000 ppm의 사염화탄소(97 분)와 차이는 27 분 늦게, 삼염화에틸렌(129 분)과 톨루엔(135 분)과는 각각 5 분, 11 분 빠름을 보이고 있었다.

또한 복합유기용제에 따른 10 % 파과시간은 $[CCl_4/TCE]$, $[Tol/TCE]$, $[CCl_4/Tol]$ 의 순서로 빠른 결과를 보였다. 각각의 2성분계에서 복합유기용제 농도가 500 ppm 씩을 차지하는 동등비율일 때는 유기용제 물질 종류에 따른 차이는 없었으나($p > 0.05$), 비균등비율일 때는 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$).

Swearengen 등(Swearengen과 weaver, 1988)이 발표한 유기용제의 2성분계에 대한 파과시

간 연구보고서를 살펴보면 유기용제의 분자량, 끓는점 및 증기압에 따라 2 group으로 분류하여 유기용제의 파과시간을 실험한 바 있다. 실험한 결과 역시 분자량이 작은 group의 혼합물에서도 그 성분의 단일물질일 때의 파과시간보다 빠르게 나타남을 설명하였고 분자량이 큰 물질끼리의 복합유기용제의 파과시간 또한 단일성분의 파과시간보다 빨리 발생하였다고 보고하고 있다.

일반적으로 2성분계의 유기용제를 정화하는 활성탄의 파과시간을 추정하는데는 앞에서 언급한 방정식(2)로 표현되는 방정식을 사용하고 있다. 그러나 본 연구에서 사용한 가스크로마토그래피는 총탄화수소의 정량농도 검출기이므로 어떤 성분이 먼저 정화통을 통과하는지 정성분석을 할 수가 없어서 이론치와의 비교는 불가능 하였다. 한편 2성분계에서 100 % 파과시간까지 흡착된 유기용제의 양은 표 4에 정리되어 있다. 단일성분인 경우의 흡착량보다는 $[CCl_4/Tol]$ 과 $[Tol/TCE]$ 인 2성분계인 경우에는 적었으나 $[CCl_4/TCE]$ 에서는 더 많은 양이 흡착되었다. 이것은 각각 유기용제의 혼합비율에 따른 비중 차이 때문인 것으로 판단된다.

3. 3성분계의 파과시간

[사염화탄소/삼염화에틸렌/톨루엔]의 복합유기용제 농도가 1,000 ppm 일 경우인 3성분계(ternary

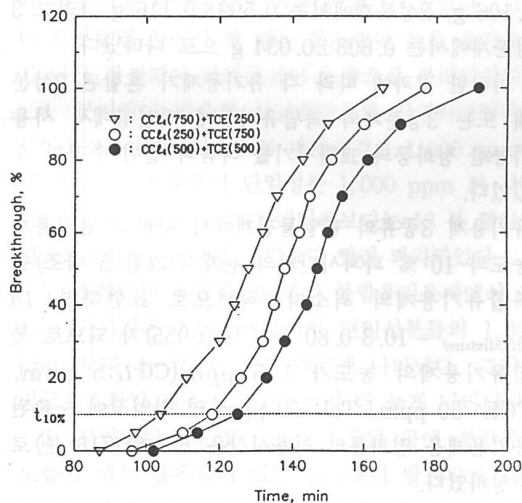


Fig. 5. Breakthrough by time and concentration for carbon tetrachloride/trichloroethylene mixtures.

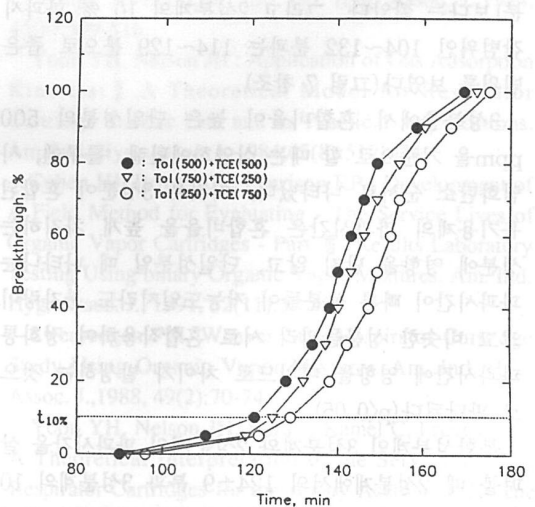


Fig. 6. Breakthrough by time and concentration for toluene/trichloroethylene mixtures.

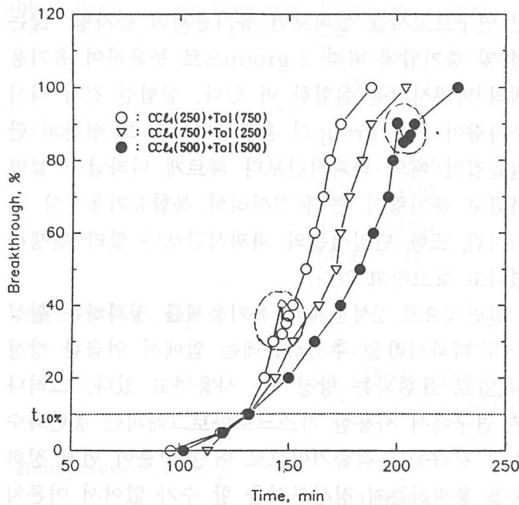


Fig. 7. Breakthrough by time and concentration for carbon tetrachloride/toluene mixtures.

system)에서 10 % 파과시간의 결과는 표 5에 나타내었다.

각각의 계에서 10 % 파과시간을 살펴보면 단일성분인 경우는 120 ± 20 분, 2성분일 때는 124 ± 9 분 그리고 3성분에서는 120 ± 8 분으로 차이가 발생하였다 ($p < 0.05$).

3성분계일 때의 파과시간의 범위는 114~129 분으로 1,000 ppm의 단일성분인 사염화탄소의 97 분보다는 길고 삼염화에틸렌 (127 분)과 톨루엔 (135 분)보다는 짧았다. 그리고 2성분계의 10 % 파과시간범위인 104~132 분과는 114~129 분으로 좁은 범위를 보였다(그림 7 참조).

3성분중에서 혼합비율이 높은 단일성분의 500 ppm을 기준으로 할 때는 삼염화에틸렌, 톨루엔, 사염화탄소 순서로 나타났다. 이것은 3성분이 혼합된 유기용제의 파과시간은 혼합비율을 높게 차지하는 성분에 영향을 받지 않고, 단일성분일 때 나타나는 파과시간이 빠른 성분들이 저농도일지라도 분자량이 크고 비슷한 성분들끼리 서로 혼합작용하여 정화통 파과시간에 영향을 미치므로 차이가 발생하는 것으로 판단된다 ($p < 0.05$).

복합성분계인 3성분계와 2성분계의 파과시간을 살펴볼 때 2성분계에서의 124 ± 9 분과 3성분계의 10 % 파과시간이 120 ± 8 분으로서 서로 비슷함을 보여주고 있었다.

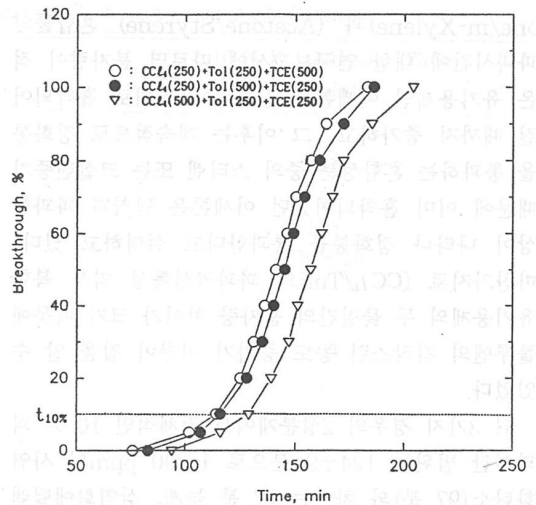


Fig. 8. Breakthrough by time and concentration on tetrachloride/toluene/trichloroethylene mixtures.

그리고 3성분계에서 정화통이 100 % 완전히 파과될 때까지 흡착된 유기용제의 전체량을 측정한 결과 또한 표 4에 제시되어 있다. 각각의 계를 살펴볼 때 3성분계 (17.76 ± 1.01 g)와 2성분계 (17.62 ± 0.41 g) 그리고 단일성분계 (16.04 ± 2.78 g)에서 흡착량은 서로 비슷하였다.

또한 단일성분과 복합유기용제의 농도가 1,000 ppm일 때 활성탄 1 g에 흡착된 유기용제의 양을 비교한 결과(표 4 참조) 단일성분계는 0.592 ± 0.106 g, 2성분계에서는 0.599 ± 0.116 g 그리고 3성분계에서는 0.603 ± 0.034 g 으로 나타났다.

이러한 결과에 따라 각 유기용제가 혼합된 2성분계 또는 3성분계의 복합유기용제 작업장에서 사용 가능한 정화통의 교환시기를 다음과 같이 추정할 수 있었다.

유기용제 3종류의 단일물질계에서 나타난 유기용제 농도와 10 % 파과시간과의 관계식(그림 5 참조)을 복합유기용제의 최소자승직선으로 표현하면 $\ln t_{10}(\text{Mixture}) = 10.3 - 0.80 \ln C$ ($r = 0.955$)가 되므로 복합유기용제의 농도가 105 ppm(CCl_4 : 5 ppm, TCE: 50 ppm, Tol: 50 ppm)인 작업장에 노출된 유기용제용 정화통의 사용시간은 1.5 일(718 분)로 추정하였다.

그러나 유기용제의 산업위생학적 위험도를 유기용제의 증기압과 허용농도수준과의 상호관계로 설명하

고 있는 William의 유기증기위험지수(vapor hazard index; VHI)와(Popendorf, 1984) 서론에서 언급하였던 정화통 파과시간에 영향을 주는 작업환경의 유기용제농도 이외의 다양한 영향인자가 존재하므로 정화통의 사용시간 결정은 매우 신중한 검토가 요구되며 지속적인 연구가 필요하다.

IV. 결 론

본 연구에서는 사염화탄소, 삼염화에틸렌 및 톨루엔을 단일성분, 2개의 성분 및 3개의 성분이 혼합되어 존재할 때 유기용제용 정화통의 파과시간 특성을 평가하고자 실시하였다. 전체 혼합기준농도는 1,000 ppm으로 하고 혼합비율이 변화할 때에 10 % 파과시간을 기준으로 각 계에 있어서의 정화통 사용시간을 연구하였다.

1. 유기용제 농도 1,000 ppm, 750 ppm, 500 ppm 및 250 ppm이 단일성분으로 존재할 때 모든 농도에서 정화통의 파과는 유기용제의 분자량에 따라 역비례하여 사염화탄소, 삼염화에틸렌, 톨루엔 등의 순서로 빠른 파과시간을 보였다.

2. 유기용제농도가 허용농도수준일 때 정화통의 사용시간은 사염화탄소에 대하여는 122 시간, 삼염화에틸렌은 18 시간 그리고 톨루엔에 대하여는 28 시간이었다.

3. 2성분계의 전체적인 파과순서는 분자량의 차이가 작을수록 파과시간이 빠름을 알 수 있었다. 그러나 분자량의 차이가 클 때는 분자량이 작은 유기용제가 다시 탈착되어 파과곡선이 2 중으로 분리되었다.

4. 분자량이 비슷한 사염화탄소와 삼염화에틸렌의 복합유기용제에서의 10 % 파과시간은 1,000 ppm에서 116 ± 11 분으로서 단일성분 1,000 ppm의 사염화탄소보다 19 분, 삼염화에틸렌보다는 13 분 짧았고 비균등혼합상태가 동등혼합보다 빨리 파과되었다.

5. 톨루엔과 삼염화에틸렌의 복합유기용제에서 10 % 파과시간은 125 ± 4 분이며 단일성분들의 1,000 ppm 보다 4~10 분 모두 빠르게 나타났다. 그리고 비균등혼합일 경우가 파과시간이 더 늦게 나타났다.

6. 사염화탄소와 톨루엔이 혼합된 곳에 정화통이 노출될 때는 흡착되어 있던 톨루엔이 탈착되어 호흡보호구 착용자는 고농도에 노출될 위험이 있었다. 이때 10 % 파과시간은 동등혼합이거나 비균등혼합

일 경우에 상관없이 131~132 분으로 거의 동일하였고 또한 사염화탄소 1,000 ppm 보다 34 분 늦게 파과되고 톨루엔 보다는 4 분 빠르게 나타났다.

참 고 문 헌

- 노동부 : 산업재해분석. 노동부, 1992-1994
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists : Documentation of the Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices. 5th Ed., Cincinnati, Ohio, ACGIH Inc., 1986
- Nelson GO, Harder CA, Bigler BE : Respirator Cartridge Efficiency Studies : VI . Effect of Concentration. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 1976, 37:205-216
- Nelson GO, Correia AN : Respirator Cartridge Efficiency Studies VIII. Summary and conclusions. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 1976, 37:514-525
- American Industrial Hygiene Association(AIHA) : Respiratory Protection - A Manual and Guideline. 1st ed., Akron, Ohio, AIHA, 1980
- Jonas LA, Sanson EB, Farris TS : Prediction of Activated Carbon Performance for Binary Vapor Mixtures: Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 1983, 44(10):716-719
- Clayton GE, Clayton FE : Patty's Industrial Hygiene and Toxicology. 3rd Ed., New York, John Wiley and Sons, Inc., 1982:Vol. II B:3283, II B:3553, II B:3472
- Yoon YH, Nelson JH : Application of Gas Adsorption Kinetics : I . A Theoretical Model for Respirator Cartridge Service Life. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 1984, 45(8):509-516
- Yoon YH, Nelson JH : Application of Gas Adsorption Kinetics: II . A Theoretical Model for Respirator Cartridge Service Life and its Practical Applications. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 1984, 45(8):517-524
- Cohen HJ, Briggs DL, Garrison RP : Development of A Field Method for Evaluating - The Service Lives of Organic Vapor Cartridges - Part III, Results Laboratory Testing Using binary Organic Vapor Mixtures. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 1991, 52(11):34-43
- Swearengen PM, Weaver SC : Respirator Cartridge Study Using Organic Vapor Mixtures. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 1988, 49(2):70-74
- Yoon YH, Nelson JH, Rara J, Kamel C, Fregeau D : A Theoretical Interpretation of the Service Life of Respirator Cartridges for the Binary Acetone/m-Xylene system. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 1991, 52(2):65-74
- Yoon YH, Nelson JH, Rara J, Kamel C, Fregeau D :

A Theoretical Model for Respirator Cartridge Service Life for Binary System to Acetone/Styrene Mixture. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 1992, 53(8):493-502

Code of Federal Regulations.30/CFR/11.Subpart L.11.1972,1x62-8,1972

노동부: 방독마스크의 규격. 노동부고시 제91-81

호, 1991, 노동부

노동성: 방독마스크의 규격. 노동성고시 제68호, 1991, 동경

Popendorf W : Vapor Pressure and Solvent Vapor Hazards. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 1984, 45(10):719-726