

## 토양상에 의한 Trichloroethylene 처리에 관한 연구

이혜령 · 고경숙 · 임경택  
동아대학교 환경공학과

### A Study on Control of Trichloroethylene by Soil bed

Hea Ryoung Lee, Kyoung Suk Ko and Gyung Teck Lim  
Dept. of Environmental Engineering, Dong-A University

#### ABSTRACT

The purpose of this research is evaluation of adsorption capacity of the cast for TCE comparing with the yellow clay. Furthermore, the experimental data was fitted with the Langmuir and Freundlich isotherm and was found to be applicable to the adsorption isotherm equation. The soil bed reactor used in this study was made of glass(10 cm in diameter, 100 cm in depth). The cast and yellow clay used as adsorbents were screened with 8-20 mesh mechanically. Results from Equilibrium test with adsorbents showed that the equilibrium time of the cast and yellow clay was 9min independent of the amount of the adsorbents. The adsorption efficiencies of the cast and yellow clay for TCE was 66.3% and 56.2%, respectively. In the application of Freundlich isotherm,  $1/n$  of the cast and yellow clay were 0.786 and 0.704, respectively. These results showed that the cast was more available than the yellow clay as TCE adsorbent. The best adsorption capacity was showed at 0% moisture content, 70 ppm inlet concentration and 25°C temperature.

**Keywords :** Adsorption, Cast, Yellow clay, Trichloroethylene

## I. 서 론

휘발성 유기화합물(volatile organic compounds ; 이하VOCS)은 유기용제를 사용하는 각종 산업공정에서 배출되고 있으며, 악취와 암을 유발시키거나 건강장해를 일으키고, 대기중에서 광화학반응을 유발시키는 전구물질로 알려져 있다. 유기용제를 사용하는 작업장등에서 VOCS에 대한 문제가 심각하게 대두되고 있지만, 현재 그 대책은 물론 현황조차도 파악되지 않고 있는 실정이다.

VOCS규제는 1963년 미국의 대기정화법(Clean Air Act)이 발효되면서 세계 최초로 시작되어 주로 미국과 유럽을 중심으로 관리되고 있으며, 미국환경보호청(EPA)에서는 189개의 유해대기오염물질(Hazardous Air Pollutants : HAP) 목록에 상당수의 유기물질을 포함시켰고 주로 배출원 중심으로 규제하고 있다. 국내의 경우 1995년 12월 공포된 대기환경보전법 개정법률에는 1999년 1월 1일부터 대기

오염규제지역내의 VOC 배출시설에 대한 규제를 명시하고 있고 정부는 이에 따른 시행계획을 준비중에 있다.<sup>1)</sup>

VOCS중 염소계 휘발성 유기화합물(chlorinated volatile organic compounds ; 이하CVOC)은 고용매력, 고휘발성, 저인화성 등으로 인하여 용매, 세척제로 많이 사용되고 있으며, 함유되어 있는 염소로 인하여 대기, 수질환경 및 인체에 몹시 유해하여 그 처리가 특히 문제시 되고 있다.

CVOC중 TCE(Trichloroethylene)의 사용은 1940년대부터 시작되었으며 '70년대에 환경 오염 물질로서 주목을 받게 된 물질이다. '40년대부터 TCE는 용매, 세척제 등으로 다량 사용되었고 이러한 사용은 '70년대 중반 미국의 국립암기관의 연구 결과에 의한 발암 가능성 때문에 EPA의 규제대상에 오르게 되어 최근에는 그 제거에 많은 노력이 경주되고 있다.<sup>2)</sup>

이러한 VOCs를 처리하는 방법으로는 소각(Thermal or Catalytic oxidation), 흡수(Absorption), 응

축(Condensation), 흡착(Adsorption) 및 생물학적 방법과 신기술로서 자외선 및 초음파를 이용한 분해, 막분리, 코로나기술 등이 있다. 이들 방법중에서 흡착법이 가장 많이 이용되고 있다. 활성탄 흡착은 각종 오염물질에 대한 적용성이 우수하기 때문에 효과적으로 이용되고 있는 것으로 보고되고 있으나 활성탄은 원료 및 그 제조방법에 따라 오염물질의 제거특성에서 큰 차이를 보일뿐 아니라 상대적으로 고가이기 때문에 유지관리가 많이 든다는 단점이 있다. 따라서 오늘날 경제적인 활성탄 원료의 선택과 제조방법에 대한 연구와 더불어 폐기물을 재활용한 경제적인 흡착제의 개발 등에 대한 연구들이 진행되고 있다.<sup>3)</sup>

우리나라 산업폐기물 발생량의 약 13%를 차지하고 있는 유기성슬러지의 경제적 및 효율적인 처리기술의 하나인 지렁이를 이용한 퇴비화에서는 지렁이가 유기성슬러지를 섭취한후 배설물로서 안정화된 작은 단편상의 분변토를 생산한다. 이때 생산된 분변토는 비표면적이 크고 제올라이트와 같은 이온 흡착능력을 가진 다공질체로서 악취물질의 흡착능력이 있다고 알려져 있다.<sup>4,5)</sup> 그리고 토양상을 흡착제로 이용할 경우에는 자연자원을 이용한다는 경제적인 이점과 함께 물리적, 화학적 및 생물학적 작용이 복합적으로 일어나 VOCs를 제거한다는 점에서 효율이 좋고 반영구적이라는 장점을 가지고 있다.<sup>7,8)</sup>

따라서 본 연구에서는 가스 처리에 황토와 분변토를 이용하여 이들의 경제적인 흡착제로서의 활용가능성을 평가하고 고정층 흡착공정에서 가스 주입 농도, 온도, 수분함량을 변화시켜 실험을 실시하였다.

## II. 실험장치 및 방법

### 1. 실험장치

#### (1) 흡착평형 실험

실험장치는 2370 ml 용량의 가스체류 플라스크, 147 ml 용량의 흡착제 충전칼럼 및 공기순환 pump로 구성되어 있고 장치의 상세도는 Fig. 1과 같다.

실험의 정확성을 기하기 위해 피흡착제성분의 흐름이 흡착제 충전칼럼을 통과하지 않는 경우와 흡착제 충전칼럼을 통과하는 경우를 단계별로 조작할 수 있도록 연결된 유도관에 밸브를 장치하였으며, 연결부위를 제외한 장치는 유리제로 제작하여 흡착실험도중에 피흡착성분이 손실되지 않도록 하였다. 또한 흡착실험은 밀폐된 장치 안에서 0.2-2 l/min 용량의

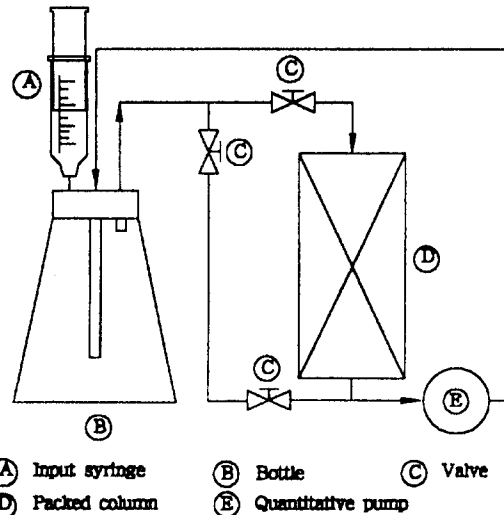


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

공기순환 pump에 의해서만 시계반대 방향으로 이동되도록 하였다.

#### (2) 고정층 흡착 실험

실험장치는 가스발생장치, gas adsorber, water bath등으로 구성되어 있으며, Fig. 2에 나타내었다. 가스는 고농도의 가스를 발생시켜 정량적으로 공급하고 동시에 희석용 공기는 compressor를 통해 mixing chamber로 유입시켜 완전혼합시킨후 유량계에 의해 유량이 조절되면서 흡착탑으로 공급된다.

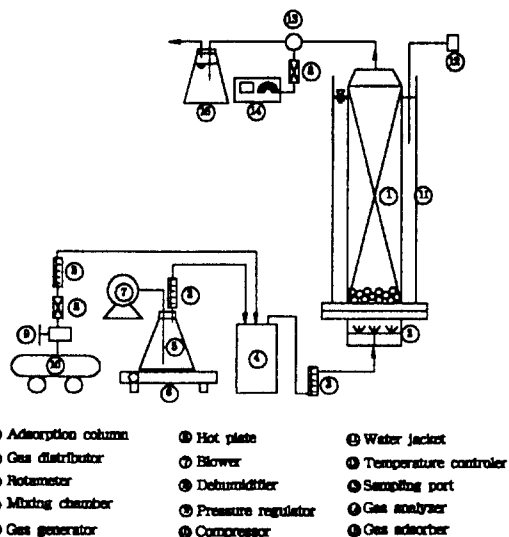


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

흡착탑은 이중관인 원통형으로서 내관은 유리를 재료로 하여 내경 10 cm, 길이 100 cm이고, 외관은 아크릴을 재료로 하여 내경 20 cm, 길이 100 cm로 제작하였다. 여기서 흡착탑의 외관은 항온조이다. 또한 균일한 가스분배를 위해 다공성파이프, 다공판을 흡착탑 하부에 장착하였고 가스분포와 충전제 하부 유출을 방지하기 위해 유리구슬을 흡착탑 하부에 약 2 cm정도 충전하였다.

## 2. 실험재료

본 연구의 피흡착제로서 TCE는 특급시약을 사용하였으며, 흡착제로는 분변토와 황토를 사용하고, 비교하기 위해 활성탄을 이용하였다.

분변토는 우분과 제지 폐수처리장의 슬러지를 지렁이의 먹이로 사육한 후 배설물을 사용하였고, 황토는 부산시 서구 동대신동 동아대학교 제1 캠퍼스 뒷산에서 채취하였다. 흡착제들의 물리적 특성은 Table 1과 같으며 함수율에 의한 제거능을 비교실험하기 위해 109°C에서 4시간 건조시킨 후 함수율을 0%로 한 것과 일부는 물을 분무하여 함수율을 분변토 53%, 황토 17%, 활성탄 43%로 조절한 것을 사용하였다.

## 3. 실험방법

### (1) 흡착평형 실험

흡착제로 함수율 0%와 53%인 분변토와 함수율 0%와 17%인 황토를 각각 취하여 흡착제 충전칼럼에 각각 20 g, 40 g, 60 g씩을 충전하였다. 대조실험의 흡착제인 활성탄은 함수율 0%와 43%인 활성탄을 각각 5g, 10g, 15g씩을 충전칼럼에 충전하였으며, 초기 TCE농도를 1300 ppm으로 조절하여 접촉시켰다.

가스발생은 피흡착제인 TCE용액 117 ml을 syringe로 2L 용량의 가스채류 플라스크에 직접주입하

여 확산평형에 도달되도록 20분간 가스 유도관을 통해 순환시켰으며 이때의 공기 순환펌프의 유량은 2l/min으로 조절하였다. 20분후 TCE가스 4 ml를 정확히 취하여 초기분석용 시료로 하였고 채취가 끝난 다음에도 공기순환펌프는 계속 작동시키고, 즉시 충전칼럼의 상하 밸브를 열고 공기순환펌프로 확산된 기체를 반시계바늘 방향으로 이동시켜 충전칼럼에 계속하여 통과시킨다. TCE 가스분석은 GC/FID(HP 6890-II Model, Hewlett-Packard Co.)를 사용해 분석했다.

### (2) 고정층 흡착 실험

흡착제로 함수율 0%와 53%인 분변토와 함수율 0%와 11%인 황토를 이용하여 흡착탑에 2100 g씩 충전하였다.

가스는 TCE용액이 담겨진 2L 용량의 플라스크를 끓는점 이상의 온도로 유지하면서 일정유량의 공기를 TCE액상 하부로 폭기시켜 이때 탈기된 TCE가스가 포화농도의 TCE가스가 되어 mixing chamber로 주입, 외기로부터 유입된 공기와 함께 완전 혼합되어 흡착탑하부로 흘러가도록 발생시켰다. 주입가스의 농도조정은 고농도의 TCE가스를 미량pump와 슬라이더스로 유량을 조절하여 희석공기와 혼합시킴으로서 이루어졌으며 흡착제에 의해 처리된 가스는 methanol 흡수액에 포집하였다.

가스시료 채취는 적절한 시간간격으로 유입가스관과 흡착탑 상부의 배출관, 각각의 시료채취구를 통하여 이루어졌으며 가스분석은 흡착평형실험과 동일하게 하였다.

주입농도변화에 따른 흡착특성을 조사하기 위해 주입가스농도를 70, 120, 240 ppm으로 하여 단계적으로 높였으며, 온도변화에 따른 흡착특성을 조사하기 위하여 흡착탑의 온도를 25°C와 40°C로 조절하여 실험하였다.

Table 1. Physical characteristics of adsorptions

Samples	Properties	Cast	Yellow clay	Activated carbon
Size range mesh		8-20	8-20	8-20
pH		7.2	4.7	9.9
Bulk density(g/cm <sup>3</sup> )		0.69	0.96	0.52
Particle density(g/cm <sup>3</sup> )		1.19	2.31	1.05
Porosity(%)		42.0	58.4	50.5
Specific surface area(m <sup>2</sup> /g)		610	470	1020
Volatile organic content(wt%)		61.3	4.8	15.6
Moisture content(wt%)		53	11	4

## III. 결과 및 고찰

### 1. 흡착평형

Fig. 3은 TCE의 건조한 활성탄, 분변토, 황토에 대한 흡착실험결과를 나타내고 있다. 활성탄의 충전량을 5g, 10g 및 15g 일때 9분, 6분, 5분 반응시킨 후 흡착제거율은 98.9%, 99.1%, 99.2%인 반면에 이시간 이후에서 60분 동안의 변화는 0.38%, 0.46%, 0.66%로 나타나 평형에 도달하는 시간이 각각 9분, 6분, 5분임을 알 수 있다.

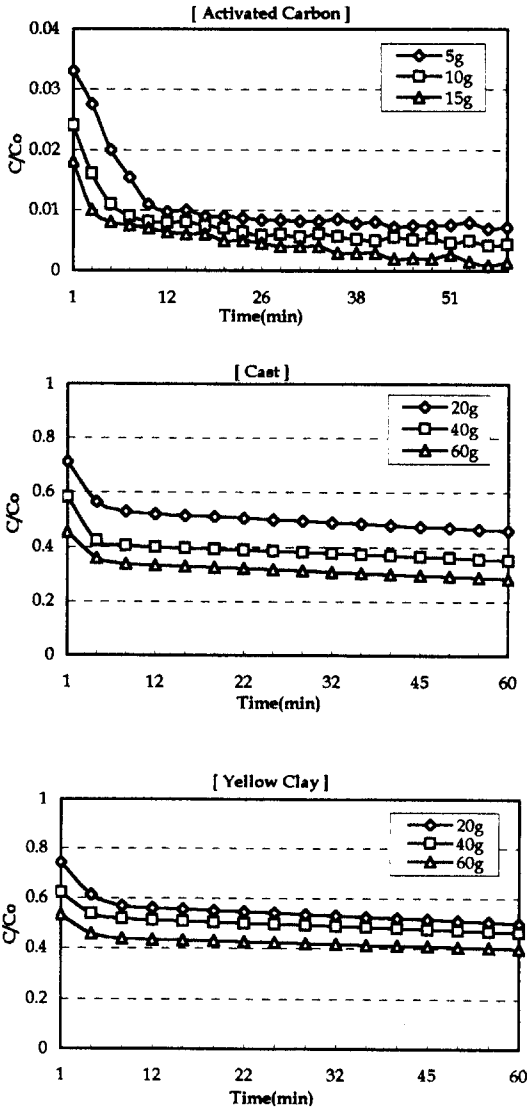


Fig. 3. TCE equilibrium test of activated carbon, cast and yellow clay.

분변토의 충전양이 20 g, 40 g 및 60 g일때 접촉시간 9분에서 흡착제거율은 각각 47%, 59.5% 및 66.3%이고 1 시간을 더 접촉시킨후 흡착제거율의 변화는 7%, 5.3%, 5.4%로 나타나 흡착평형에 도달하는 시간이 9분임을 알 수 있다. 황토의 충전양이 20 g, 40 g 및 60 g일 때 접촉시간 9분에서 흡착제거율은 각각 43.2%, 48.3% 및 56.2%이고 1 시간을 더 접촉시켰을 때 흡착제거율의 변화는 6.8%, 5.3%, 3.9%를 보임으로써 흡착평형에 도달하는 시간이 9분 임

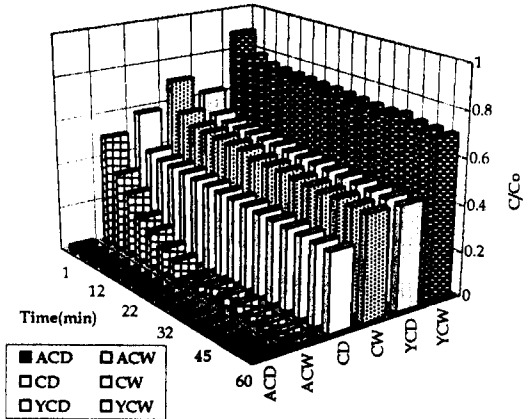


Fig. 4. Effects of moisture content by TCE adsorbents ; AC:Activated Carbon, C:Cast, YC: Yellow Clay, D:Dry, W:Wet

을 알 수 있다. 또한 황토에 비해 분변토의 흡착제거율이 약 10%정도 더 높게 나타났다.

Fig. 4에 각 흡착제별로 수분함량에 따른 흡착특성을 조사한 실험결과를 나타내었다. 흡착제의 충전양은 활성탄 10g, 분변토와 황토 40g이며, 가스 주입 농도는 1300 ppm으로 하였다.

활성탄의 경우 체류시간 6분에서 함수량 43%인 활성탄과 건조활성탄의 흡착제거율은 65.8%와 99.1%로서 건조활성탄이 33.3% 높은 제거율을 나타내었다. 분변토는 체류시간 9분에서 함수량 53%인 분변토와 건조분변토의 흡착제거율이 59.5%와 47.1%로서 건조분변토의 제거율이 5.9% 높게 나타났다. 또한 황토의 경우 체류시간 9분에서 함수량 17%일 때와 건조황토의 흡착제거율이 각각 24%, 48.3%로서 건조황토의 흡착제거율이 24.3% 높게 나타났다. 흡착제가 습한 상태와 건조한 상태에서의 흡착성능을 비교한 결과 분변토, 황토 및 활성탄 세가지 흡착제들이 모두 건조한 상태에서 높은 제거율을 나타내 있음을 알 수 있다.

## 2. 고정층 흡착

### (1) 흡착등온식

흡착제 양에 따른 흡착특성을 고찰하기 위해 분변토와 황토의 충전량 2.1 kg, 온도 25°C, 가스 주입 유량 2 l/min, 가스 주입 농도를 70, 120, 240 ppm으로 변화시켜 실험한 결과를 Freundlich 흡착등온식과 Langmuir 흡착등온식에 적용하여 회귀분석하였다.

Fig. 5과 6은 고정층 흡착실험결과를 Freundlich

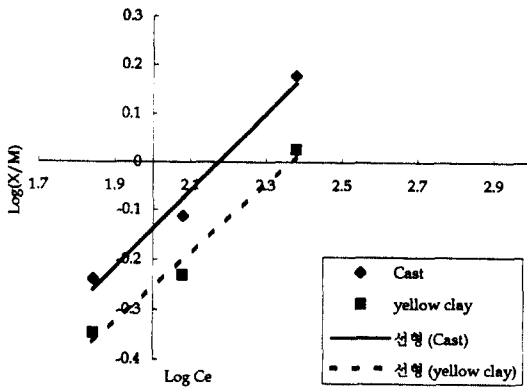


Fig. 5. Freundlich Isotherm for TCE.

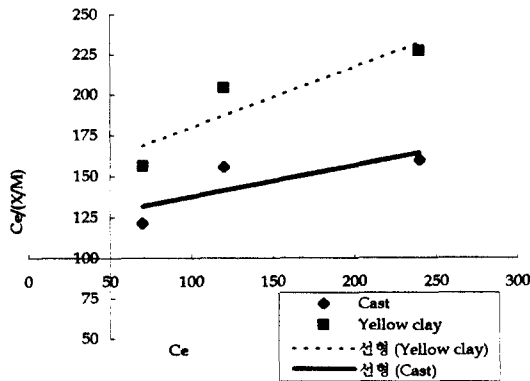


Fig. 6. Langmuir Isotherm for TCE.

와 Langmuir 흡착등온식에 적용시킨 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 Freundlich 흡착등온식의 경우 결정계수  $R^2$ 값은 0.978~0.981로서 각 흡착제들이 선형 관계식에 대한 상당한 신뢰도를 보였고, Langmuir 흡착등온식의  $R^2$ 값은 0.626~0.819의 경향을 보임으로서 낮은 신뢰도를 나타냈다. 이는 분변토와 황토에 있어서 TCE 흡착은 물리적이며 화학적 흡착이 일어나지 않기 때문인 것으로 사료된다. Table 2에 Freundlich와 Langmuir 흡착등온식으로 해석한 결과를 나타내었다. Freundlich 흡착등온식에서 흡착량인  $1/n$ 값은 분변토 0.786, 황토 0.704로서 분변토의 TCE 흡착능이 황토에 비해 약간 우세함을 알 수 있다. 이는 분변토와 황토입자의 흡착표면이 불균일하여 흡착표면의 각 site에서 균일한 흡착이 이루어지지 않으므로 Langmuir 흡착등온식보다 Freundlich 흡착등온식에 적합한 때문인 것으로 생각된다.

Table 2. Parameters for Freundlich and Langmuir isotherm

	Freundlich isotherm		Langmuir isotherm		
	Correlation Coeff. ( $R^2$ )	1/n	Log K	Correlation Coeff. ( $R^2$ )	1/b 1/Kb
Cast	0.978	0.786	-1.665	0.626	0.190 118.2
Yellow clay	0.981	0.704	-1.710	0.819	0.374 141.9

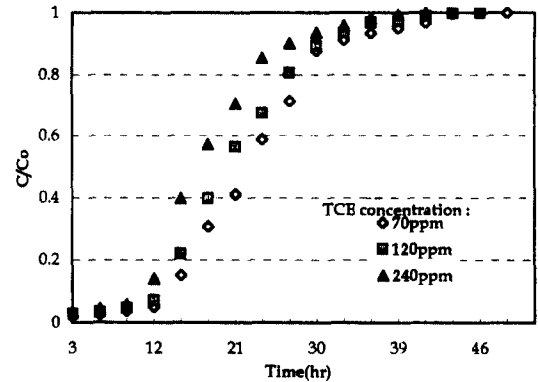


Fig. 7. Effect of gas concentration on TCE breakthrough curve of cast.

(2) TCE 가스 주입농도에 따른 흡착특성

가스 주입 농도를 70, 120, 240 ppm으로 변화시키고 분변토와 황토의 충전량은 2.1 kg, 가스 주입 유량을 2 l/min으로 실험하였으며, 그 결과를 Fig. 7와 8에 나타내었다. Fig. 7는 분변토에 대한 것으로 농도를 70, 120, 240 ppm으로 변화시키기에 따라 5% breakthrough time은 12시간, 10시간, 9시간으로서 농도가 높을수록 breakthrough time이 감소하는 경향을 나타내었다. Fig. 8은 황토에 대한 결과로서 5% breakthrough time은 9시간, 6시간 및 6시간이었다. 따라서 분변토, 황토 모두 농도가 높을수록 breakthrough time은 감소하였으며 이는 고정 흡착층에서의 흡착특성인 동일한 유속일 때 흡착가스의 농도가 높을수록 흡착질의 유출점이 빨라지는 것과 유사한 결과를 나타내었다

(3) 온도변화에 따른 흡착특성

온도에 따른 흡착특성을 조사하기 위해 가스 주입 농도를 70 ppm, 가스 유량을 2 l/min, 흡착제 충전량을 2.1 kg으로 조절하고 흡착온도를 25°C와 40°C로 유지하며 흡착실험을 수행한 결과를 Fig. 9와 10에 나타내

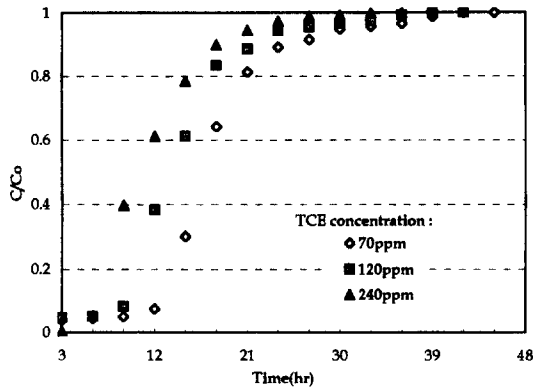


Fig. 8. Effect of gas concentration on TCE breakthrough curve of yellow clay.

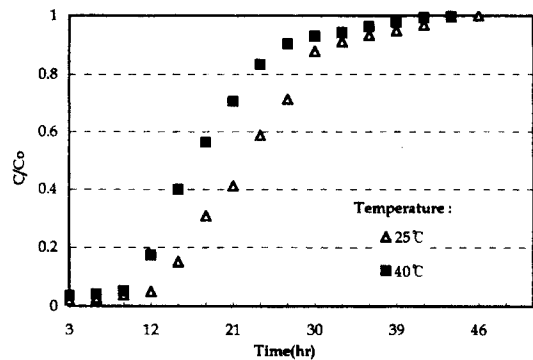


Fig. 9. Effect of temperature on TCE breakthrough curve of cast.

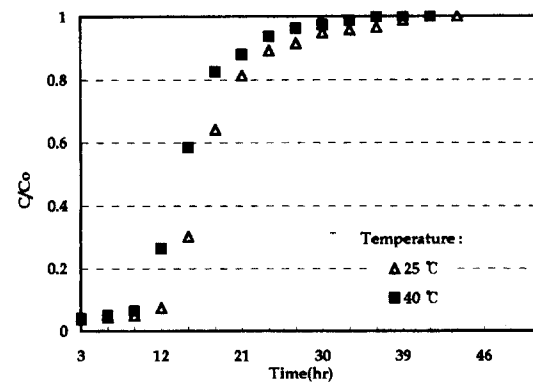


Fig. 10. Effect of temperature on TCE breakthrough curve of yellow clay.

었다

Fig. 9은 흡착제로 분변토를 이용하였을 때의 결과로 흡착온도가 25°C일 때의 5% breakthrough time

은 12시간이었으며, 40°C일 때의 5% breakthrough time은 9시간으로 나타났다.

Fig. 10은 황토를 충전하였을 때 흡착실험을 수행한 결과이며 흡착온도 25°C일 때 5% breakthrough time은 9시간이었고, 40°C일 때 5% breakthrough time은 6시간으로 나타났다.

이상의 결과에서 흡착온도가 상승함에 따라 TCE 가스의 유출시간이 빨라지고 있으며 이는 흡착질의 흡착평형량이 온도에 반비례하기 때문인 것으로 사료된다.<sup>9)</sup> 또한 Kampbell<sup>14)</sup> 등이 12~25°C의 온도범위에서 soil bed를 운전한 결과 가스상 오염물의 처리효율이 비슷한 것으로 보고한 바 있으며 본 실험에서도 이와 유사한 경향을 나타내었으므로 실험 전반에 걸쳐 상온의 조건에서 실험하였다.

(4) 수분함량에 따른 흡착특성

수분함량에 따른 흡착특성을 파악하기 위해 유입 TCE 가스의 농도는 70 ppm, 유량을 2 l/min, 충전량 2100 g으로 하였으며 흡착제의 수분함량을 변화시켜 흡착실험을 수행하였다.

Fig. 11은 분변토를 흡착제로 이용하였을 경우로 수분함량 0%와 53%으로 변화시켰을 때 분변토의 단위 g당 TCE 가스의 흡착량은 수분함량 0%일 때는 0.577 mg/g, 수분함량 53%일 때는 0.495 mg/g으로 나타났다.

Fig. 12는 흡착제로 황토를 충전하여 실험한 결과로 수분함량 0%와 11%일 때 TCE 가스 흡착량은 각각 0.449 mg/g, 0.383 mg/g이었다.

이상으로 분변토와 황토 모두 수분함량이 증가함에 따라 TCE 가스의 흡착량이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Pennal 등<sup>19)</sup>이 불포화대에서

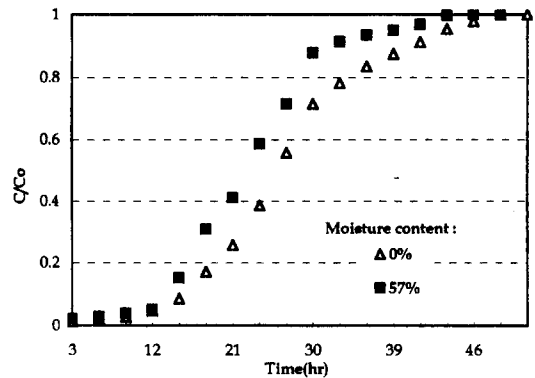


Fig. 11. Effect of moisture content on TCE breakthrough curve of cast.

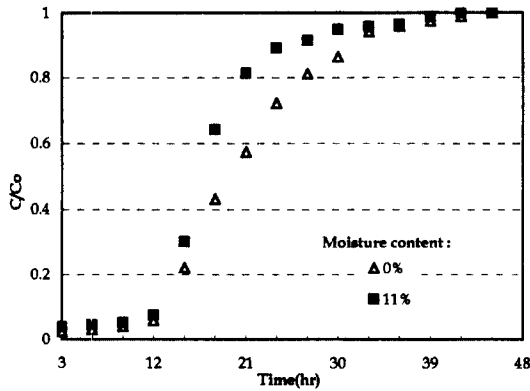


Fig. 12. Effect of moisture content on TCE breakthrough curve of yellow clay.

수분이 증가함에 따라 토양표면으로의 가스상태 VOCs 흡착은 점차 줄어드는 것으로 보고한 것과 유사한 결과이었다.

#### IV. 결 론

본 연구는 황토와 분변토를 흡착제로 이용하여 TCE gas를 처리한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 분변토와 황토의 TCE에 대한 흡착평형시간은 충전량 변화에 관계없이 9 min 이내로 비교적 빠르게 진행하였고 TCE 70 ppm에 대하여 제거효율은 분변토 66.3%, 황토 56.2%로서 분변토가 황토에 비해 양호한 흡착제로 보인다.

2. Freundlich 등온흡착식으로 해석한 결과  $1/n$ 값이 분변토의 경우 0.786, 황토의 경우 0.704값을 얻었으므로 분변토와 황토를 TCE흡착제로 사용 가능한 것으로 보인다.

3. 분변토와 황토에 대한 TCE gas의 흡착특성을 온도 및 수분함량을 변화시켜 실험한 결과 온도, 수분함량이 낮을수록 흡착효율이 높았고, 주입농도 70 ppm, 수분함량 0%, 흡착온도 25°C일 때 최고의 흡착능을 보였고 이 때 흡착량은 분변토가 0.577 mg/g, 황토가 0.449 mg/g이었다.

#### 參考文獻

1) 한화진: 국내 VOC현황 및 배출원별 관리방향. 첨단 환경기술, 4(6), 1~7, 1996.

- 2) 홍채환: 축매를 이용한 Trichloroethylene 분해에 관한 연구. 포항공과대학 공학석사학위논문, 1995.
- 3) 이시훈, 손응권: 휘발성 유기물질의 처리기술. 화학공업과 기술, 12(2), 128~138, 1994.
- 4) 환경부: 환경백서. 1996.
- 5) 고재경: 지렁이를 이용한 환경문제의 농업적 해결. 서원출판사, 1992.
- 6) 이길철 외 7명: 지렁이 糞便土의 脫臭效果. 국립환경연구원보, 15, 395~401, 1993.
- 7) 김일배: 土壤床 脫臭法에 관한 研究. 인하대학교 환경공학과 석사학위논문, 1988.
- 8) 박상진 외 6명: 曝氣槽 및 土壤脫臭床을 이용한 下水處理場 惡臭除去. 한국건설기술연구원 보고서, 1993.
- 9) 오광중 외 3명: Soil bed를 이용한 SO<sub>2</sub>의 흡착특성에 관한 연구, 18(2), 171~179, 1996.
- 10) Pomeroy, R.D.: Deodorizing Gas Streams by the Use of Microbiological Growths. U.S. Patent 2, 793~796, 1957.
- 11) Malo, B.A. and E.R.Purvis: Soil Absorption of Atmospheric Ammonia. Soil Sci., 97, 242~247, 1964.
- 12) Smith, K.A. and J.M. Bremner, et al.: Sorption of Gaseous Atmospheric Pollutants by Soils. Soil Sci., 116(4), 313~319, 1973.
- 13) Kay, B.D. and Elrick, D.E.: Adsorption and movement of lindane in soils. Soil Sci., 104(5), 314, 1967.
- 14) Kampbell, D.H. and Wilson, J.J.: Removal of volatile aliphatic hydrocarbons in a soil bioreactor. JAPCA, 37(10), 1236~1241, 1987.
- 15) Dennis E. Miller and Larry W. Canter: Control of aromatic waste air streams by soil bioreactors. Environmental Progress, 10(4), 300~306, 1991.
- 16) Means, J.C. and Wood, S.G., et al.: Sorption of polynuclear aromatic hydrocarbons by sediments and soils. Environ. Sci. Tech., 14(12), 1524~1531, 1980.
- 17) Bohn, H.L. and S. Miyamoto: Soil as a Sorbent and Filter of Waste Gases. in Symposium on Land for Waste Management, J. Tomlinson(Ed.), Natl. Research Council Canada, Ottawa, 1973.
- 18) Carlson, D.A., and C.P. Leiser: Soil Beds for the Control of Sewage Odors. Jour. Water Poll. Control Fed., 38(5), 829~840, 1966.
- 19) Pennal, R.K. and Rhue, R.D., et al.: Vapor-Phase Sorption of p-Xylene and Water on Soils and Clay Minerals. Environ. Sci. Tech., 26(4), 756~763, 1992.