

활성탄상에서 벤젠과 톨루엔의 흡착특성

박병배 · 김도수 · 김한수* · 박영성*

충남대학교 화학공학과

*대전대학교 환경공학과

Adsorptive Characteristics of Benzene and Toluene on Activated Carbon

Byung-Bae Park · Do-Su Kim · Han-Su Kim* · Yeong-Seong Park*

Department of Chemical Engineering, Chungnam National University

* Department of Environmental Engineering, Taejon University

요 약

본 연구는 활성탄이 충전된 고정 흡착층에서 흡착특성에 영향을 줄 수 있는 다양한 변수들, 흡착온도, 흐름속도, 흡착질 종류와 농도, 형상비(L/D)에 따른 영향이 조사되었다. 고정층내의 파과시간은 흡착온도, 흐름속도와 흡착질의 농도가 증가함에 따라 감소하였다. 또한 고정 흡착층의 파과곡선으로부터 얻어지는 물질전달영역(mass transfer zone)과 미사용길이(length of unused bed)는 흡착가스 유속, 흡착가스의 농도 및 흡착온도에 영향을 많이 받는 반면 고정 흡착층의 형상비에 대한 영향은 상대적으로 작았으며, 이 중에서 흡착가스의 농도에 대한 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 단일성분에 대한 흡착평형실험 데이터를 가장 잘 예측할 수 있는 모델식을 구하기 위해 Langmuir, Freundlich 및 Langmuir-Freundlich 모델식을 적용하여 실험결과와 비교해 보았을 때 세가지 이론식 모두 benzene과 toluene의 흡착평형을 잘 표현하는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT : The effects of various factors such as adsorption temperature, interstitial velocity, species and concentration of adsorbates(benzene and toluene) and aspect ratio(L/D) on adsorption characteristics were investigated in a fixed bed with activated carbon. The breakthrough time in a fixed bed was decreased with the increasing of adsorption temperature, interstitial velocity and concentration of adsorbates. The interstitial velocity, concentration of adsorbates and adsorption temperature had influenced considerably upon the MTZ(mass transfer zone) and LUB(length of unused bed) obtained through the breakthrough curves, while aspect ratio(L/D) had smaller effect than former factors. Especially, the concentration of adsorbates among factors have the largest effect on MTZ and LUB. From comparison with the model isotherms, such as the Langmuir, Freundlich and Langmuir-Freundlich, the experimental isotherm data of benzene and toluene agreed fairly well to three adsorption isotherm models.

1. 서 론

인위적으로 배출되는 화학물질은 여러 형태로 대기 중으로 배출되고, 대기 중에서의 화학반응성에 따라 환경에 영향을 초래하고 있다. 온실가스(greenhouse gases)의 증가에 의한 지구온난화현상, 프레온가스 등에 의한 오존층파괴와 같은 지구규모의 대기환경 문제들이 범국가적인 차원의 환경문제로 인식되어 왔다. 최근에 대류권내에서 진행되는 광화학적 대기 오염현상과 그에 따른 오존농도의 증가현상에 대해 관심이 집중되고 있다. 그 중에서 자동차 운행의 급증과 유류 및 유기용제의 사용확대로 배출이 증가하고 있는 휘발성유기화합물질(volatile organic compounds, VOCs)은 다양각색의 형태로 대기에 영향을 준다.

VOCs는 자체의 성질로도 유해할 수 있고 대기 중에서 질소산화물(NOx)과 함께 광화학반응에 참여하여 인체 및 동·식물에 유해한 오존, 알데히드, PAN (p-oxyacetylnitrate) 등과 같은 산화성 2차 오염물질인 광화학산화물(photochemical oxidants)을 형성하는 전구물질(precursor)로 작용한다. 그 동안 많은 국가에서 오존오염 해결을 위해 NOx 저감에 주력해 왔으나 오존감축 목표에 따라 VOCs가 같이 고려되어야 광화학산화물의 생성억제에 효과가 있다는 사례가 보고되어 VOCs에 대한 관심이 더욱 커지고 있다[1-2].

VOCs를 처리하는 기술로는 열산화, 촉매산화, 응축, 흡착, 흡수, 막분리, 플라즈마 처리 등을 들 수 있는데, 열산화, 촉매산화, 응축, 흡착을 이용한 기술은 다양한 VOC 배출경로에 폭넓게 적용되어 오늘날 널리 쓰이는 VOC방지기술이다. 이중 흡착을 이용한 기술은 VOC를 회수하여 재이용할 수 있다는 장점을 가지고 있어 가장 널리 사용되고 있는 제어기술이다[3-4].

따라서, 본 연구에서는 범용으로 가장 많이 사용되고 있는 흡착제인 활성탄을 이용하여 휘발성유기화합물 중 벤젠(benzene)에 대한 흡착평형 데이터를 얻어 흡착특성과 적합한 평형 관계식을 결정하고, 또한 흡착과과곡선(breakthrough curve)에 대한 공정 변수들인 흡착온도, 흡착가스의 유속, 흡착질의 농도 및 형상비(aspect ratio)의 영향을 살펴보았다.

2. 실험

2.1 실험재료

본 실험의 흡착제는 상용화된 입상 활성탄(야자탄 - 8×30 mesh)을 오븐에서 150℃, 12 시간 이상 전처리 한 후 데시케이터에 보관하며 사용하였고 Table 1에 기본 물성을 나타내었다. 또한 흡착질로는 Junsei Chemical Co., Ltd.의 benzene과 toluene을 사용하였으며 모두 Guaranteed Reagent이다. 두 종류의 VOCs의 기본적인 물성값을 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Physical properties of adsorbent and bed characteristics.

| | |
|--|--------|
| Particle size(mesh) | 8 × 30 |
| Specific surface area(m ² /g) | 1050 |
| Total pore volume(cc/g) | 0.8 |
| Average micropore diameter(Å) | 20 |
| Bulk density(g/cc) | 0.45 |
| Porosity | 0.55 |
| Bed diameter(cm) | 2 |

Table 2. Properties of adsorbates used in the experiment.

| | benzene | toluene |
|---------------------------|-------------------------------|---|
| Molecular weight | 78.11 | 92.14 |
| Molecular formula | C ₆ H ₆ | C ₆ H ₅ CH ₃ |
| Specific gravity(20/4℃) | 0.8786 | 0.8669 |
| Melting point(℃) | 5.5 | -95.0 |
| Vapor pressure(mmHg-25℃) | 96 | 30 |
| Boiling point(℃) | 80.1 | 110.8 |
| Ignition point(℃) | | 4.4 |
| Critical point(℃) | 289 | 318.55 |
| Critical pressure(bar) | 48.9 | 41.0 |
| Expansion coefficient(/℃) | | 0.001067 |
| Explosive limits(%) | | 1.27~6.75 |

2.2 실험장치 및 방법

2.2.1. 휘발성 유기화합물질(VOCs) 발생장치

본 실험에 사용된 VOCs 발생장치는 Fig. 1에

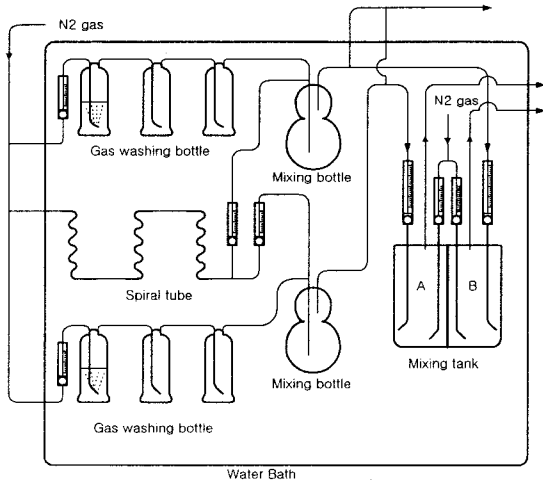


Fig. 1. Schematic diagram of VOCs generation equipment.

나타내었는데, 온도조절이 가능한 수욕조(water bath)에 흡착질인 액체상태의 benzene과 toluene을 기체상태로 발생시키는 가스세척병(gas washing bottle)과 희석용 carrier gas의 체류시간을 증가시켜 주는 spiral tube 및 발생된 VOCs 가스를 희석시킬 수 있는 몇 개의 혼합병으로 구성되어 있다. 5 l 용량의 항온조를 소정의 온도로 조정된 후, 질소가스를 carrier gas로 하여 benzene과 toluene 휘발성 유기화합물을 기체상태로 발생시키고 희석용 질소는 spiral tube를 통과하여 혼합기에서 혼합된 후 흡착층을 통과하게 된다. 흡착층에 주입되는 농도는 질소 흐름속도로 조정하였다.

2.2.2 고정 흡착층 실험장치 및 방법

본 실험에서 이용한 고정 흡착층 실험장치는 내경이 2cm인 pyrex 유리관으로 길이 약 100cm의 이중관 컬럼을 제작하여 중심관에는 흡착제를 충전하고 두 관 사이의 재킷으로 일정온도의 물을 순환시켜 흡착층 온도가 일정하게 유지될 수 있도록 제작하였으며 그 개략도는 Fig. 2에 나타내었다.

흡착제가 충전되는 중심관 하부로부터 25cm는 유리구슬(직경 : 5mm)을 충전하여 유입가스의 분산성을 향상시키고 동시에 충전되는 흡착제의 지지체로 활용하였다. 컬럼의 상·하부는 다듬은 유리 이음쇠로 연결하고 흡착층 중심부의 온도를 측정하기 위해 K-형의 열전대를 흡착층 상부에 삽입하였으며 흡

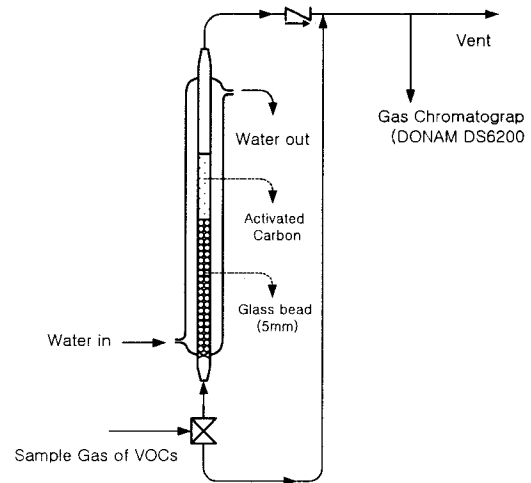


Fig. 2. Schematic diagram of adsorption column at fixed bed.

착 컬럼의 온도를 일정하게 유지시키기 위해 순환펌프가 장착된 Immersion Circulator(Jeio Tech : WBC-18-Excel)를 사용하였다.

일정한 농도로 VOCs의 발생이 일어나는 지를 확인하기 위해 GC를 이용해 농도를 연속적으로 측정하여 안정된 조건이 유지됐는지를 확인한 후, 건조된 흡착제(건조기 150°C에서 2시간이상 건조) 일정량을 고정 흡착층에 충전하고 three way valve를 이용 VOCs 가스 시료의 방향을 직접 GC로 연결된 흐름에서 흡착제가 충전된 고정 흡착층으로 공급하고 흡착층을 통과한 가스를 GC를 이용하여 농도를 측정한다. 흡착제는 각 공정변수에 따라 새로 충전한 후 위의 방법에 따라 실험을 반복하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 파과특성 및 MTZ와 LUB

3.1.1 형상비(aspect ratio)의 영향

유입되는 흡착가스의 유속과 흡착온도를 일정하게 유지시킨 상태에서 static bed 높이의 변화에 따른 각 높이에서의 파과곡선(breakthrough curve)을 Fig. 3에 나타내었다. 모두 S자 모양의 곡선을 나타내고 있으며, 파과점(breakthrough point)을 흡착층에서의 출구농도(C_i)가 유입농도(C_0)의 5%가 되는 시간

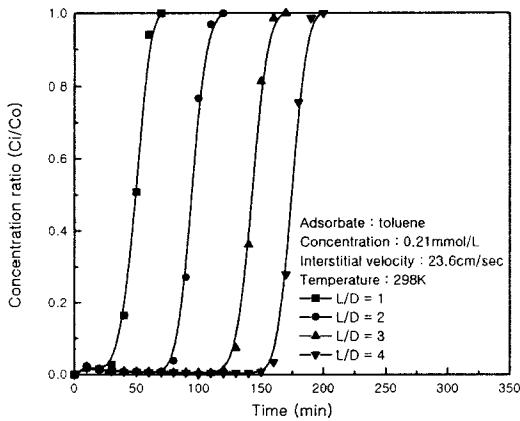


Fig. 3. The effect of aspect ratio for toluene at fixed bed.

을 기준으로 할 때, static bed의 높이에 따른 각각의 파과점은 30, 78, 124, 158 min으로 static bed의 높이가 증가할수록 파과점만 수평이동하고 있다. 이는 static bed의 높이에 비례하여 흡착할 수 있는 영역의 길이가 증가하기 때문이며 이는 발표된 기존의 결과와 일치한다[5-8].

또한 static bed의 높이에 따른 MTZ(mass transfer zone)와 LUB(length of unused bed)의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 물질전달구간, 즉 MTZ는 다음의 이론식으로 나타낼 수 있다.

$$MTZ = \left(\frac{V_z}{V_T - 0.5 V_z} \right) L = \left(\frac{t_z}{t_T - 0.5 t_z} \right) L \quad (1)$$

여기서 t_T 는 고정 흡착층의 흡착제가 유입된 흡착질을 더 이상 흡착하지 않고 출구에서 배출되는 시간(min)이며, t_z 는 t_T 와 파과시간(breakthrough time, t_b)의 차이를 의미한다.

또한 LUB(length of unused bed)는 파과시간(t_b)과 파과곡선의 흡착질 농도가 초기농도의 절반이 되는 점까지의 시간인 양론파과시간(stoichiometric breakthrough time, t_{stoi})에 의하여 계산되는 것으로 계산식은 다음과 같이 표현된다.

$$LUB = \left(1 - \frac{t_b}{t_{stoi}} \right) L \quad (2)$$

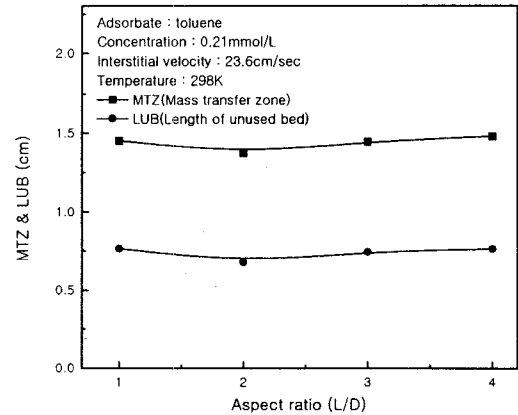


Fig. 4. The effect of aspect ratio on MTZ & LUB at fixed bed.

Static bed의 높이 변화에 따라 MTZ와 LUB는 각각 약 1.5, 0.75cm를 유지하고 있음을 보여주고 있다. 이것은 물질전달영역인 MTZ와 LUB는 static bed 높이의 영향을 거의 받지 않고 일정하게 유지된다는 것과 이미 층의 높이에 관계없이 constant pattern이 형성되었음을 의미하며, 이러한 경향은 흡착특성이 비슷한 benzene에서도 나타나고 있어 MTZ와 LUB는 static bed의 높이 변화에 따른 영향이 작음을 알 수 있다.

본 실험에서의 층내 최적 흡착제 충전량을 알아보기 위하여 Fig. 5와 같이 가로축을 형상비(aspect ratio)로 하고 세로축을 파과곡선상에서 흡착질의 농도가 허용한계(95%) 이상이 되는 시간까지 고정 흡착층에 흡착된 흡착질의 양을 의미하는 평형흡착능

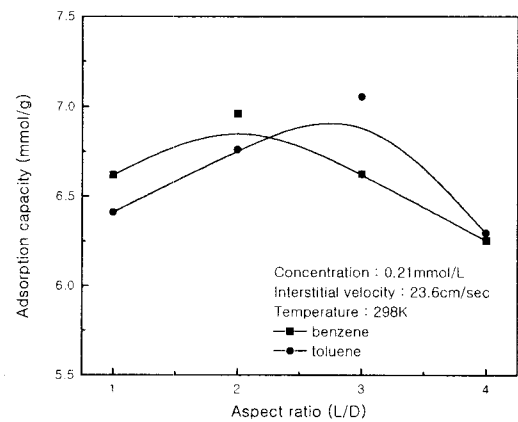


Fig. 5. The effect of aspect ratio on adsorption capacity at fixed bed.

(adsorption capacity)으로 하여 표시하였을 경우, benzene과 toluene 각각 형상비가 2, 3일 때 최대흡착능을 보이나 그 이상 증가하면 오히려 평형흡착능이 감소하므로 형상비가 각각 2, 3일 경우에 층내 최적 충전량을 알 수 있다[9]. 하지만, 이 결과들은 흡착층의 높아짐에 따른 유입농도가 탑의 압력강하를 받게 됨을 감안하여야 하며 그림 4에서 본 것처럼 평형흡착능에 대한 형상비는 큰 영향을 보이지는 않는 것으로 사료된다.

3.1.2 흡착가스 유속(interstitial velocity)의 영향

고정 흡착층내에서의 유체 흐름특성은 흡착가스의 유속에 의해 영향을 받게 된다. 유속이 증가함에 따라 흡착제 외부에 형성된 가스막에서의 물질전달 계수는 증가되어 흡착질이 흡착제에 흡착되어 흡착 평형에 도달하는 시간을 단축시킴으로 흡착질의 유출점은 흡착가스의 유속이 증가할수록 빨라지게 된다.

benzene에 대한 고정 흡착층에서의 흡착가스 유속에 따른 실험 결과를 Fig. 6에 나타내었는데, benzene의 유출점은 앞에서 언급한 것과 같은 특성에 의하여 흡착가스의 유속이 증가할수록 조기에 형

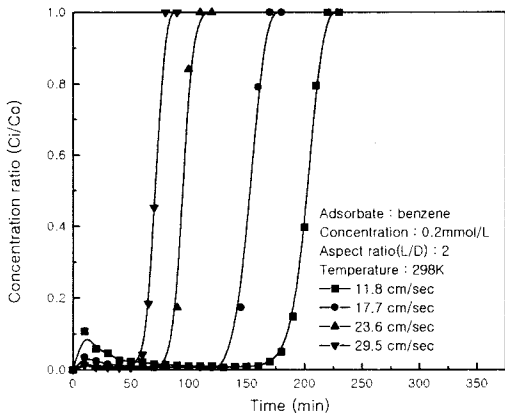


Fig. 6. The effect of interstitial velocity for benzene at fixed bed.

Table 3. Relationships of gas flow rate ratio and stoichiometric breakthrough time.

| benzene | |
|--|-------------------------------------|
| Flow rate(cm/sec) | 11.8(1) 17.7(1.5) 23.6(2) 29.5(2.5) |
| Stoichiometric breakthrough time (min) | 202(2.8) 153(2.1) 95(1.3) 71(1) |

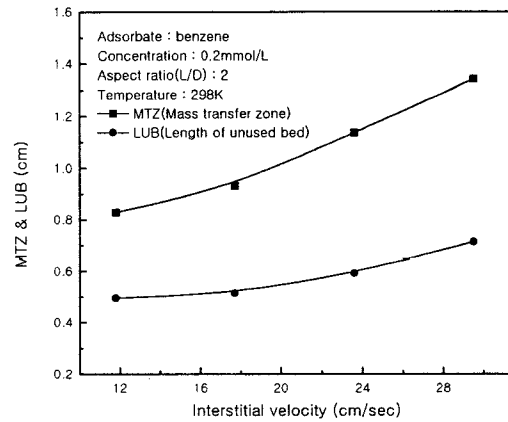


Fig. 7. The effect of interstitial velocity on MTZ & LUB at fixed bed.

성되고 있는 것을 볼 수 있다. 즉, benzene의 흡착가스 유속을 약 11.8~29.5cm/sec로 변화시켰을 때 파과곡선의 흡착질 농도가 초기농도의 절반이 되는 점까지의 시간인 각각의 양론파과시간(stoichiometric breakthrough time)은 약 200min에서 70min으로 빨라지고 있다. 보다 정량적으로 검토하면 Table 3과 같이 양론파과시간은 흡착가스의 유속비에 일정한 관계를 나타내고 있다. 하지만, 유속에 따라 파과개형이 짧아지고 있는 것은 포화에 이르는 시간의 단축보다는 낮은 유속에서 물질전달저항으로 인해 포화에 도달하는데 시간이 걸리기 때문이라 생각된다. 이는 박[10-11] 등의 연구결과에서도 알 수 있는데, 유량크기에 따라 나타나는 축방향확산과 외부필름에 의한 저항은 확산저항에 비하여 총괄 물질전달계수에 큰 영향을 미치지 않는다고 한 것이다.

흡착가스의 유속에 따른 MTZ와 LUB의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 흡착가스의 유속이 11.8cm/sec 일 때 MTZ는 0.83cm로 전체 충전층(4cm)의 약 21%에 해당하지만 유속이 23.6cm/sec일 경우에는 1.34cm로 약 1.6배 증가됨을 보이고 있으며, LUB도 흡착가스의 유속이 증가할수록 0.5cm에서 0.7cm로 약 1.4배 증가하고 있다. 이는 흡착가스의 유속이 증가하게 되면 물질전달 저항의 감소로 인해 포화에 이르는 시간이 단축되므로 흡착질이 일정하게 충전되어진 흡착제를 통과할 때 물질전달영역인 MTZ가 유속에 비례하여 넓게 유지하며 이동하기 때문이다[7-9].

Fig. 8은 흡착가스 유속의 변화에 따른 평형흡

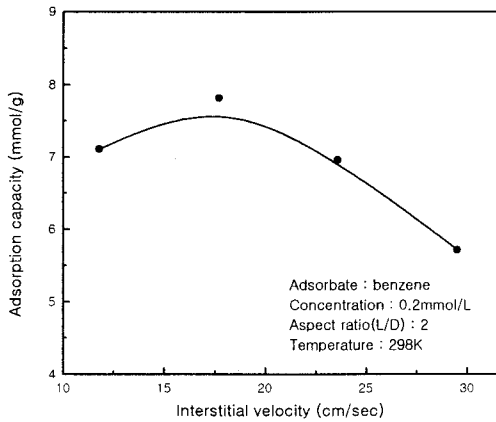


Fig. 8. The effect of interstitial velocity on adsorption capacity at fixed bed.

착능의 영향을 나타낸 것으로, 유속이 23.6cm/sec에서 7.8mmol/g의 최대 평형흡착능을 보이는데, 포화농도 95%를 기준으로 한 경우 본 실험의 평형흡착능 수치는 김[12]의 benzene에 대한 2.7mmol/g과 김[13]의 3.2mmol/g에 비해 큰 평형흡착능 값을 나타내었는데, 이는 실험변수 및 사용 흡착제의 특성에 따라 달라진다. 그 이상의 유속에서는 오히려 평형흡착능이 크게 감소하는 경향을 보이는 것은 흡착가스 유속의 동적현상에 의한 흡착탑의 흡착능 차이로 인한 결과로 생각된다.

3.1.3 흡착가스 농도의 영향

고정 흡착층의 파과특성은 동일한 흡착가스의 유속일 때 흡착질의 유출점은 흡착가스의 농도가 높을수록 빨라진다. 본 실험에서도 이와 같은 현상이

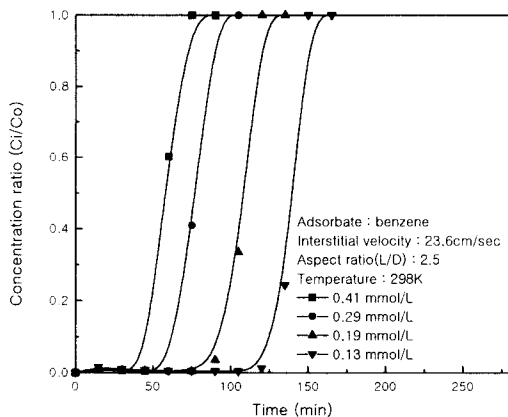


Fig. 9. The effect of adsorbate concentrations for benzene at fixed bed.

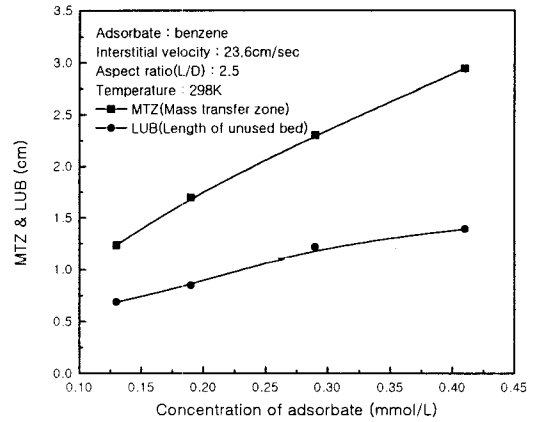


Fig. 10. The effect of adsorbate concentrations on MTZ & LUB at fixed bed.

측정되었으며 다음의 Fig. 9에 나타내고 있다. 유출가스의 흡착질 농도가 유입가스 흡착질 농도의 절반이 되는 양론과과시간은 흡착질의 농도가 0.13mmol/ℓ에서는 약 138min에 형성되는 반면, 0.29mmol/ℓ에선 약 77min에 형성하는 것으로 나타나고 있다. 즉 흡착가스의 농도가 약 2.2배 증가할 때 그에 따른 양론과과시간은 약 1.8배 빨라지고 있다. 이는 흡착가스의 농도가 증가할수록 흡착평형량의 증가를 의미하지만, 흡착평형량에 비해 농도도 크게 증가하기 때문에 흡착이 포화상태에 빨리 이르게 되어 파과시간이 단축되는 것으로 볼 수 있다[5-6].

Fig. 10은 흡착가스 농도에 따른 MTZ와 LUB의 변화를 나타낸 것으로 흡착가스의 농도가 0.13mmol/ℓ일 때 MTZ와 LUB는 각각 1.2, 0.6cm이나 농도를 0.41mmol/ℓ로 증가시키면 각각 2.9, 1.4cm로 증가한다. 이는 흡착가스 농도가 약 3배 증가함에 따라 MTZ와 LUB가 약 2.4배 증가한 것으로 흡착가스 유속의 영향보다 훨씬 큰 것으로 나타나고 있다.

3.1.4 흡착온도의 영향

흡착온도에 대한 단일성분의 파과특성을 고찰하기 위하여 흡착온도를 298~318K의 범위에서 실험을 수행한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 흡착온도가 상승함에 따라 흡착질인 benzene의 양론과과시간이 94min에서 74min으로 조기에 형성되고 있는데, 이는 흡착질의 평형흡착량이 흡착온도에 반비례하고 있기 때문이며, 이에 대한 실험의 결과

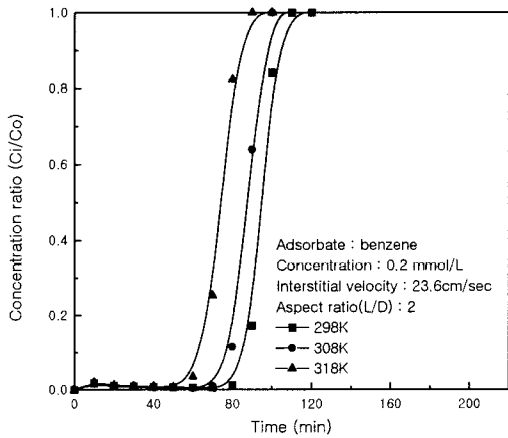


Fig. 11. The effect of temperature conditions for benzene at fixed bed.

로 흡착온도가 298K일 때의 평형흡착량이 6.96mmol/g 이며 308K에서 6.19mmol/g, 318K에서 4.71mmol/g 으로 감소하고 있다. Benzene의 온도에 따른 Langmuir 와 Freundlich등온식의 상수들과의 관계를 표현하여 보면,

$$q_m = -2.88E2 + 10.66/T \quad b = 5.2E-5 \cdot \exp(3.2E2/T)$$

$$k = \exp(-10.9 + 1.77E3/T) \quad n = 12.9 - 7.43E2/T$$

또한 흡착온도가 증가할수록 MTZ와 LUB는 각각 1.14cm에서 1.64cm로 약 1.4배, 0.55cm에서 0.86cm 로 약 1.5배 증가하고 있어 흡착효율이 감소하게 된다. 이를 Fig. 12에 나타내었다.

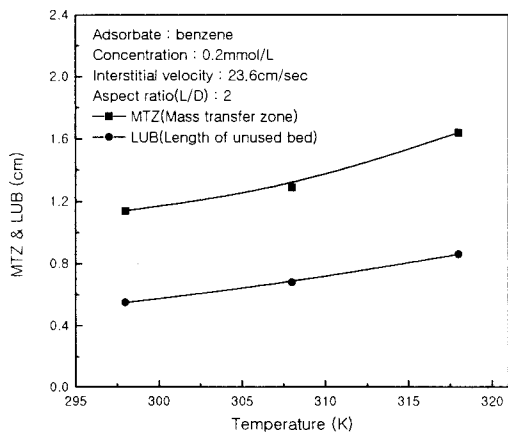


Fig. 12. The effect of temperature conditions on MTZ & LUB at fixed bed.

3.2 흡착평형 예측

흡착평형실험 데이터를 가장 잘 예측하는 모델 식을 구하기 위해 Langmuir, Freundlich 및 Langmuir-Freundlich 모델식을 적용하여 실험결과와 비교하였다. Fig. 13은 298K에서 세 가지 모델식에 의한 값과 실험결과와의 오차가 최소가 되도록 parameter를 정한 최적의 흡착평형등온식에 의해 그려진 것이다. 세 가지 이론식 모두 benzene과 toluene의 흡착평형을 잘 예측하는 것으로 관찰되었다.

각 모델식의 parameter 값을 Table 4에 나타내었다. Langmuir 모델의 b와 Freundlich 모델의 1/n 은 흡착친화도(affinity)를 나타내는 parameter로 이 값이 클수록 흡착친화도가 크게 되는데 여기서는 benzene이 toluene보다 약간 크다는 것을 알 수 있으며, 다른 연구자들과의 결과치 비교를 보면, 김[12]의 benzene에 대한 상수값은 k=0.00122, n=0.1913와 김[13]의 308K에서 Langmuir상수 k=0.0167, Freundlich 상수 n=12.82, k=0.0018, 또한 윤[5]의 toluene의 k=0.0052, b=57.366 등을 보고한 바 있는데, 본 결과와 큰 차이를 보이지는 않았다. benzene 과 toluene에 대하여 다음의 식 3과 같이 정의되는 백분율 평균편차(APD : average percent deviation) 를 각 흡착평형계에 적용하여 그 값을 구하면 1~2% 로 비교적 양호한 결과를 나타내고 있다.[6,14]

$$APD (\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \left[\frac{q_{i,cal} - q_{i,exp}}{q_{i,exp}} \right] \right| \times 100 \quad (3)$$

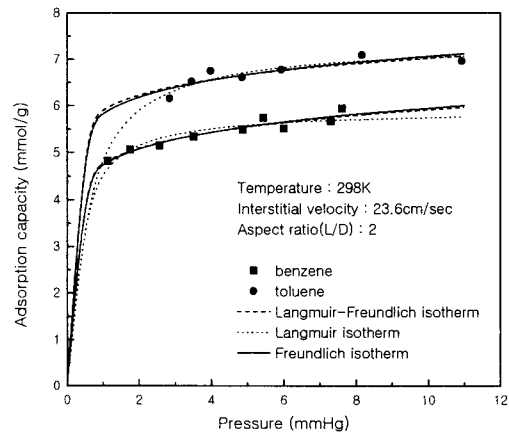


Fig. 13. Comparison of the variation models with experimental data.

Table 4. Adsorption equilibrium isotherm parameter.

| Isotherm | Adsorbate | q_{\max} or k | b | n | APD(%) |
|---------------------|-----------|-------------------|---------|---------|--------|
| Langmuir | benzene | 0.00605 | 2.58021 | . | 2.5821 |
| | toluene | 0.00730 | 2.30568 | . | 1.5584 |
| Freundlich | benzene | 0.00476 | . | 10.4067 | 1.3455 |
| | toluene | 0.00582 | . | 11.8886 | 1.7691 |
| Langmuir-Freundlich | benzene | 26.4356 | 0.00180 | 10.4066 | 1.3435 |
| | toluene | 1.4558 | 0.00402 | 11.8880 | 1.7708 |

4. 결 론

고정 흡착층에서 방향족계통의 휘발성유기화합물인 benzene과 Toluene에 대한 흡착·파괴특성 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 실험영역 내에서 고정 흡착층의 파괴곡선으로부터 얻어지는 물질전달영역(mass transfer zone)과 미사용길이(length of unused bed)는 흡착가스 유속, 흡착가스의 농도 및 흡착온도에 영향을 많이 받는 반면 고정 흡착층의 형상비에 대한 영향은 상대적으로 작았으며, 이 중에서 흡착가스의 농도에 대한 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.
- 2) 단일성분에 대한 흡착평형실험 데이터를 가장 잘 예측할 수 있는 모델식을 구하기 위해 Langmuir, Freundlich 및 Langmuir-Freundlich 모델식을 적용하여 실험결과와 비교해 보았을 때 세가지 이론식 모두 백분율평균편차(average percent deviation, APD)가 1~2%로 benzene과 toluene의 흡착평형을 잘 표현하는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 한국화학연구소, "VOLATILE ORGANIC COMPOUND ADSORPTION (I)", 한국화학연구소(1997)
2. 한국대기보전학회 측정분석분과위원회, "대기환경과 휘발성유기화합물질", 한국대기보전학회 (1998)
3. Macchi, G., Pagano, M., Santori, M. and Tiravanti, G., "Battery industrial wastewater: Pb removal and produced sludge," Wat. Res., 27(10), 151

1~1518 (1993)

4. Prakash, J., Nirmalakhandan, N. and Speece, R.E., "Prediction of activated carbon adsorption isotherms for organic vapors," Environ. Sci. Technol., 28(8), 1403~1409 (1994)
5. 윤정호, "고정층 흡착탑내에서 용매증기혼합물의 비이상거동", 전남대학교 화학공학과, 석사학위논문 (1996)
6. 민병무, "염화제1구리를 함침시킨 활성탄 흡착제의 CO 및 CO₂ 흡착특성", 서강대학교 화학공학과, 박사학위논문 (1993)
7. 전영화, "유동층흡착 반응기에서 황화합물의 흡착특성", 부산대학교 환경공학과, 박사학위논문 (1996)
8. Brasquet, C. and Cloirec, P.L., "Adsorption onto activated carbon fiber : application to water and air treatments", Carbon, 35(9), 1307~1313 (1997)
9. 전영화, 정종현, 손병현, 조상원, 오광중, "고정층 흡착반응기를 이용한 SO₂ 가스처리에 관한 연구", 대한환경공학회, 18(8), 961~969 (1996)
10. Jong Ho Park, "Adsorption-Desorption Characteristics of CFC-113 and Recovery by Thermal Swing Adsorption Process", Korea Advanced Institute of Science and Technology - Department of Chemical Engineering, the degree of Master of Philosophy (1993)
11. 박종호, 전재호, 황계순, 이원국, "활성탄에 대한 CFC-113의 흡착, 탈착특성", 화학공학회, 33(3), 301~309 (1995)
12. 김영환, "활성탄에 대한 혼합증기의 흡착평형에

- 관한 연구”, 부산대학교 화학공학과, 석사학위논문 (1991)
13. 김명숙, “활성탄 고정층 반응기에서 BTX의 기상 흡착특성”, 울산대학교 화학공학과, 석사학위논문 (1998)
14. Linders, M. J. G. et al, "Effect of the adsorption isotherm on one-and two-component diffusion in activated carbon", *Carbon*, 35(9), 1415~1425 (1997)