

2성분계 휘발성유기화합물의 동시 흡착특성

박병배 · 김한수* · 박영성*

충남대학교 화학공학과

*대전대학교 환경공학과

Simultaneous Adsorption Characteristics of Binary-Component Volatile Organic Compounds

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

Department of Chemical Engineering, Chungnam National University

* Department of Environmental Engineering, Taejon University

요 약

본 연구는 활성탄으로 충전된 고정층 흡착탑에서 휘발성유기화합물(VOCs), 벤젠과 톨루엔의 흡착특성을 조사하였다. 흡착질인 benzene과 toluene의 흡착강도는 두 흡착질의 평형흡착능 차이에 의한 것이며, 흡착제와의 흡착강도가 비교적 작은 benzene이 non-key component로 작용하여 이성분에 대한 고정 흡착층의 파과특성에서 roll up 현상을 나타냈다. 또한 동일한 농도조건에서 이성분의 각 성분에 대한 파과곡선과 단일성분계에 대한 파과곡선의 특성을 비교해 보았을 때, key component인 toluene의 양론파과시간은 차이가 거의 없지만, non-key component인 benzene의 양론파과시간은 단일성분에서의 200분에서 70분으로 상당히 일찍 나타났다. 이성분 흡착질의 파과특성에서 non-key component인 benzene의 roll up 현상의 정도는 혼합가스의 농도와 고정 흡착층의 형상비에 비례하며, 혼합가스 유속에 반비례함을 알 수 있었다. 특히, key component의 몰분율이 클수록 roll up 현상이 크게 나타남을 알 수 있었다.

ABSTRACT : The adsorption characteristics of binary-component Volatile Organic Compounds(VOCs) with benzene and toluene were studied in a fixed bed backed with activated carbon. The adsorption intensities of benzene and toluene resulted from equilibrium adsorption capacity led to roll up phenomenon in a fixed bed and behaved benzene as non-key component which meant the smaller affinity to the activated carbon of the two. From comparison with breakthrough curves between binary-component and single component systems at the same concentration conditions, the stoichiometric breakthrough time of toluene in both systems had no difference, but that of benzene as non-key component had a tendency to shorten 130min than 200min of single component. In the breakthrough characteristics of binary-component adsorbates, the magnitude of roll-up of the non-key component increased with the increasing of non-key component ratio and aspect ratio(L/D) of fixed bed, while decreased with the increasing of interstitial velocity. Especially, the roll-up phenomenon was more conspicuous with the increasing of mole fraction of key component.

1. 서 론

휘발성 유기화합물(volatile Organic Compounds, VOCs)은 탄소와 수소만으로 구성된 탄화수소류와 할로젠화 탄화수소, 질소나 황함유 탄화수소 등 상온, 상압에서 기체상태로 존재하는 모든 유기성 물질을 통칭하며, 그 자체로도 유해한 물질로 분류되지만 대기중에서 질소산화물과 함께 광화학반응에 의해 오존 등을 생성하는 원인물질로서 심각한 환경문제를 야기하고 있다. VOCs의 배출원은 크게 인위적인 배출원(anthropogenic)과 자연적인 배출원(biogenic)으로 분류한다. 자연적인 배출원 또한 VOCs 배출에 상당량 기여하고 있으나 보통 인위적인 배출원만을 관리대상으로 고려하고 있다. 인위적인 배출원은 종류와 크기가 매우 다양하며 SO_x, NO_x 등의 일반적인 오염물질과는 달리 누출 등의 불특정 배출과 같이 배출구가 산재되어 있는 특징이 있어 시설관리의 어려움이 있다.

최근 국내에서도 오존오염도가 매년 증가하고 도시지역에서는 단기환경기준치를 초과하는 사례가 빈번히 발생함에 따라 VOCs에 대한 규제관리가 요망되고 있다. 이에 따라 정부는 1995년부터 오존경보체제의 조기시행으로 7월에는 처음으로 서울 강북지역에서 오존경보가 발령된 바 있으며, 오존경보지역이 수도권 지역 등으로 확대되고 있다. 특히 1995년 12월 29일 공포된 대기환경보전법 중 개정법률에는 VOCs 배출저감을 위해 1999년 1월 1일부터 VOCs 배출시설에 대한 규제를 규정하고 있어 이에 따른 시행령, 시행규칙을 제정하여 VOCs에 대한 관리 및 규제를 주요 배출원별로 단계적으로 시행할 예정이다[1-3].

따라서 보다 효과적이고 경제적인 VOCs 처리 기술개발이 요구되고 있는 실정이다. VOCs의 처리 기술로는 현재 소각(단순가열소각인 thermal oxidation, 촉매를 이용한 catalytic oxidation)을 이용한 방법이 가장 널리 사용되고 있으나 산업 유기용제의 회수, 에너지 절약 및 순환의 관점에서 흡착기술이 가장 유리한 기술이라 할 수 있다. 증기상 흡착은 배출가스에서 많은 화합물을 회수하거나 감축시킬 수 있는 효율적인 수단으로 용매회수를 할 때 주로 사용되며,

또한 배출가스 오염물질의 농도가 극히 낮을 때와 오염물질이 비가역성일 때도 사용할 수 있으며 각종 유기화합물에 95~99% 이상의 높은 제거 효율을 보인다[4-5].

이를 위해 본 연구에서는 흡착기술을 이용한 VOCs의 제거특성을 조사하기 위해 벤젠(benzene)과 톨루엔(toluene)에 대한 이성분(binary component) 흡착질의 동시 흡착을 통해 흡착과과곡선(breakthrough curve)에 대한 흡착온도, 흡착가스의 유속, 흡착질의 농도 및 형상비(aspect ratio)의 영향을 살펴보았다.

2. 실험

2.1 흡착제 및 흡착질

본 실험의 흡착제는 (주)동양탄소에서 제조한 입상 활성탄(야자탄 - 8×30 mesh)을 이용하였으며, forced convection drying oven(Chang Shin Scientific,

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 pore 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°C) | 0.8786 | 0.8669 |
| Melting point(°C) | 5.5 | -95.0 |
| Vapor pressure(mmHg-25°C) | 96 | 30 |
| Boiling point(°C) | 80.1 | 110.8 |
| Ignition point(°C) | | 4.4 |
| Critical point(°C) | 289 | 318.55 |
| Critical pressure(bar) | 48.9 | 41.0 |
| Expansion coefficient(/°C) | | 0.001067 |
| Explosive limits(%) | | 1.27~6.75 |

C-DF)에서 150℃, 12시간 이상 전처리 한 후 사용하였다. Table 1은 흡착제인 활성탄의 물성을 나타내었다.

또한 흡착질로는 Junsei Chemical Co., Ltd.의 benzene과 toluene을 사용하였으며 모두 Guaranteed Reagent이다. 두 종류의 VOCs의 기본적인 물성값을 Table 2에 나타내었다.

2.2 실험장치

2.2.1 휘발성 유기화합물질(VOCs) 발생장치

본 실험에 사용된 VOCs 발생장치는 온도조절이 가능한 수욕조(water bath)에 흡착질인 액체상태의 benzene과 toluene을 기체상태로 발생시키는 가스세척병(gas washing bottle)과 회석용 carrier gas의 체류시간을 증가시켜 주는 spiral tube 및 발생된 VOCs 가스를 회석시킬 수 있는 몇 개의 혼합병으로 구성되어 있다. Fig. 1은 VOCs를 발생하는 장치를 개략적으로 나타낸 것이다. 5ℓ 용량의 항온조를 소정의 온도로 조정하면, 질소가스를 carrier gas로 하여 각각 benzene과 toluene 휘발성 유기화합물을 기체상태로 발생시키고 회석용 질소는 spiral tube를 통과하여 각 혼합기에서 혼합되어 혼합탱크로 이동 후 일정유속의 질소가스에 의해 흡착층을 통과하게 된다. 흡착층에 주입되는 농도는 질소 유속에 의해 조정되어 진다.

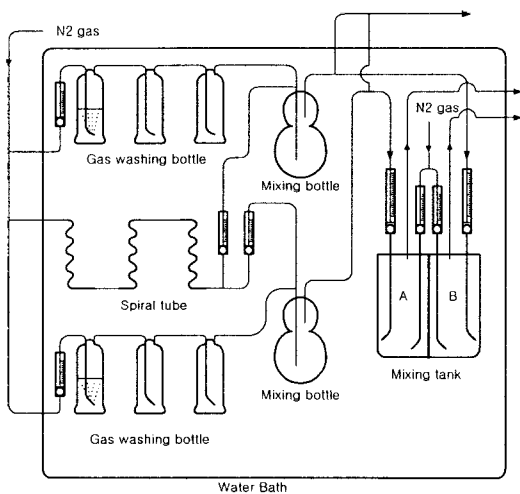


Fig. 1. Schematic diagram of VOCs generation equipment.

2.2.2 고정 흡착층 실험장치

본 실험에서 이용한 고정 흡착층 실험장치는 내경이 2cm 및 5.5cm인 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.

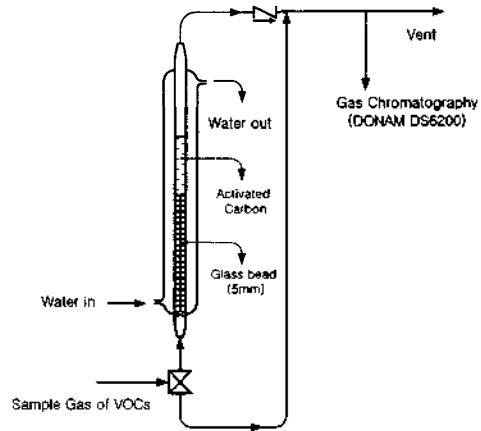


Fig. 2. Schematic diagram of adsorption column at fixed bed.

흡착제가 충전되는 중심관 하부로부터 25cm는 유리구슬(직경 : 5mm)을 충전하여 유입가스의 분산성을 향상시킴과 동시에 충전되는 흡착제의 지지체로 활용하였으며 컬럼의 상·하부는 다듬은 유리 이음쇠(ground joint)로 연결하였다. 또한 흡착층의 온도를 정확히 측정하기 위하여 K-형의 열전대를 흡착층 상부에 삽입하였다. 흡착층 및 유리구슬 충전부의 온도유지를 위해 중심관을 충분히 감싸는 이중관을 만들고 이를 통해 일정온도의 물을 Immersion Circulator(Jeio Tech : WBC-18-Excel)를 사용하여 순환시켜 온도를 유지하였다. 온도변차를 줄이기 위해 순환속도를 크게 하였고, 이중관 및 선들은 보온재로서 열손실을 최소화하였으며 순환 후 Immersion Circulator로 유입되는 온도를 측정하여 보정하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 고정 흡착층 실험방법

일정한 농도로 VOCs의 발생이 일어나는 동안

Table 3. Analysis condition of gas chromatography.

| GC | DONAM DS 6200 |
|--|--------------------------------|
| Detector | FID(Flame ionization detector) |
| Column | GS-Alumina Capillary |
| Carrier gas | N ₂ |
| Oven temperature(°C) | 165 |
| Injector temperature(°C) | 200 |
| Detector temperature(°C) | 200 |
| Range(10 ⁿ) | n = 2 |
| Flow rate(N ₂ :H ₂ :Air, ml/min) | 30 : 30 : 300 |

Table 4. Adsorption experimental parameters.

| Parameter | Application |
|-------------------------------|---|
| Adsorbent | Activated carbon(AC) |
| Adsorbates | C ₆ H ₆ , C ₆ H ₅ CH ₃ |
| Temperature range(K) | 298 ~ 318 |
| Concentration(mmol/ℓ) | 0.2 ~ 0.5 |
| Interstitial Velocity(cm/sec) | 11.8 ~ 29.5 |
| Aspect ratio(L/D) | 0.5 ~ 4.0 |

GC를 이용해 발생된 VOCs의 농도를 주기적으로 측정하여 안정된 조건이 유지되도록 한후, 건조기 150°C에서 2시간이상 건조한 일정량을 고정 흡착층에 충전한 후 VOCs 가스 시료를 three way valve로 방향 바꾸어 흡착제가 충전된 고정 흡착층으로 공급한다. 흡착이 진행되는 동안 약 10분 간격으로 GC를 이용해 가스농도를 측정하였고 분석조건은 Table 3에 나타내었다. 위와 같은 방법으로 흡착온도, 흡착가스의 유속, 흡착가스의 농도 및 형상비에 대한 흡착특성을 실험하였으며 실험조건은 Table 4와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1 흡착강도(adsorption intensity)

탈착·재생방법의 하나인 치환법(displacement method)을 이용하여 이성분계 실험에서의 흡착질인 benzene과 toluene의 흡착강도를 비교하여 보았다. 먼저 0.20mmol/ℓ의 benzene으로 흡착시킨 고정 흡착층에 0.25mmol/ℓ의 toluene 흡착가스를 주입할 경우 Fig. 3에서 보는 바와 같이 실선으로 표시된 결과

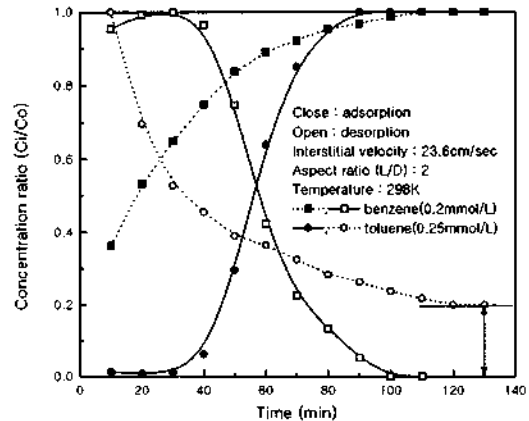


Fig. 3. Comparison of adsorption intensity on benzene & toluene at fixed bed.

를 얻을 수 있다. 초기에 고정 흡착층의 흡착제에는 benzene이 3.5mmol/g이 흡착되어 있었으나 toluene이 유입되면서 benzene의 탈착이 일어나 실험 시작 약 100min 후 benzene이 거의 탈착되어 고정 흡착층 출구에서는 toluene만이 검출되고 있다. 김[6]은 같은 계에서 200분 후부터 이런 현상이 나타남을 보고 하였다. 반대로 점선으로 표시된 것은 toluene이 6.1mmol/g 흡착된 고정 흡착층에 0.20mmol/ℓ의 benzene을 주입시킨 경우로 toluene이 완전히 탈착되지 않고 비교적 완만한 탈착속도로 고정 흡착층 출구에서 농도가 검출되고 있음을 볼 수 있다. 여기서 toluene의 농도가 완만한 농도 기울기를 나타내며 검출되고 있는 것은 benzene으로 인한 탈착현상으로 생각된다.

이상의 결과로부터 흡착특성이 비슷한 두 흡착질의 흡착강도는 toluene이 benzene보다 우수함을 알 수 있었다. 이는 두 흡착질의 흡착강도 차이에 의한 것으로 흡착강도는 각 흡착결과 흡착제와의 친화력, 흡착제 내부의 확산속도의 차이, 입체적(steric) 효과로 나타날 수 있는데, 흡착질이 두 성분 이상으로 혼합된 경우 경쟁흡착에 의해 흡착강도가 떨어지는 흡착질의 파과곡선에서 초기 농도보다 높게 되는 roll up 현상을 나타내게 된다[7-8].

3.2 혼합가스의 파과특성

앞에서 언급한 바와 같이 혼합성분에 대한 고정 흡착층의 파과특성은 단일성분의 파과특성에 비하여

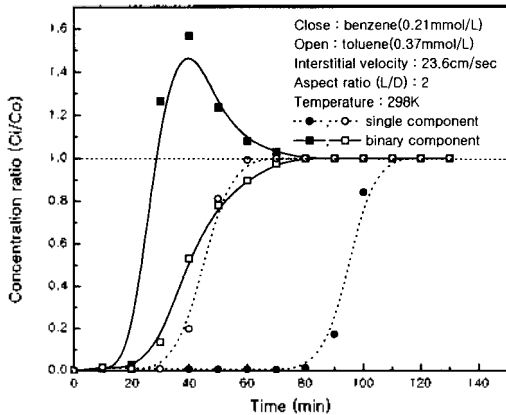


Fig. 4. Comparison of breakthrough curve type with adsorbate component.

혼합성분 중에서 흡착제와 흡착력이 큰 성분(key component)과 흡착력이 보다 작은 성분(non-key component)의 흡착특성에 의하여 non-key component의 파과곡선이 roll up 현상을 나타나게 되며, 혼합성분이 동시에 흡착함에 따른 파과곡선 형성시간은 각각의 단일성분 파과곡선이 형성되는 시간과는 다를 것이다.

Fig. 4에서 혼합성분의 각 성분에 대한 파과곡선과 동일한 농도의 단일성분 파과곡선에 대하여 파과곡선의 형성시간을 비교하여 보았다. 그림에서 보는 바와 같이 혼합성분과 단일성분에서 benzene의 양론파과시간, 즉 파과곡선의 흡착질 농도가 초기농도의 절반이 되는 점까지의 시간을 비교하면 각각 약 23min과 95min으로 상당한 차이를 보이는 반면 toluene인 경우는 약 40min과 45min으로 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 혼합성분에 대한 파과곡선에서 두 흡착질의 평형흡착능 차이에 의해 non-key component인 benzene의 농도가 고정 흡착층의 출구에서 초기 유입된 농도의 약 1.5배 되는 roll up 현상이 나타나고 있다.

이와 같이 한 성분이 다른 성분에 비해 선택적으로 흡착이 되는 경우는 크게 두 가지로 설명될 수 있는데, 첫째는 평형흡착의 차이, 둘째는 속도론적 차이이다. 평형흡착의 차이로 선택적 흡착이 일어나는 경우는 강하게 흡착되는 흡착질이 먼저 흡착되어 있던 약하게 흡착되는 흡착질을 치환하여 파과곡선에서 유입농도 이상의 배출농도 상승이 일어나며, 속도론적 차이는 각 흡착질들의 흡착제 입자내부에서의

확산속도 차이로 선택적 흡착이 일어나게 된다.[9] 또한, SenGuta[10]는 다성분 흐름에서 저분자량, 끓는점이 낮은 화합물이 일반적으로 흡착층을 통해 제일 먼저 파과곡선이 나타난다고 보고하기도 하였다.

3.2.1 형상비(aspect ratio)의 영향

고정 흡착층의 높이 변화에 대한 혼합가스의 흡착특성을 비교하기 위하여 흡착층의 형상비(L/D)를 1, 2, 3으로 다양하게 적용한 실험결과를 Fig. 5에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 고정 흡착층의 형상비가 1에서 3으로 증가할 때 파과곡선의 흡착질 농도가 초기 농도의 절반이 되는 점까지의 시간을 나타내는 혼합가스의 양론파과시간은 benzene 및 toluene 이 각각 13, 26min에서 52, 84min으로 나타나 이들 양론파과시간의 비는 약 0.31로 흡착층의 높이 비인 0.33과 약간의 차이를 나타내고 있으나 비교적 일정한 관계를 보이고 있다. 이런 차이는 이중관으로 제작된 고정 흡착층의 높이를 측정함에 있어 발생한 오차에 의한 것으로 판단된다.

또한 고정 흡착층의 형상비를 1에서 3으로 변화시키면 그에 따른 roll up 현상의 크기가 1.26에서 1.84으로 약 3배 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉 non-key component인 benzene의 roll up 현상은 고정 흡착층의 형상비가 클수록 비례하고 있음을 알 수 있다. 이는 고정 흡착층의 형상비가 커지면 그에 따라 흡착점(adsorption site)이 증가하여 혼합가스의 경쟁흡착에 의해 non-key component인 benzene이

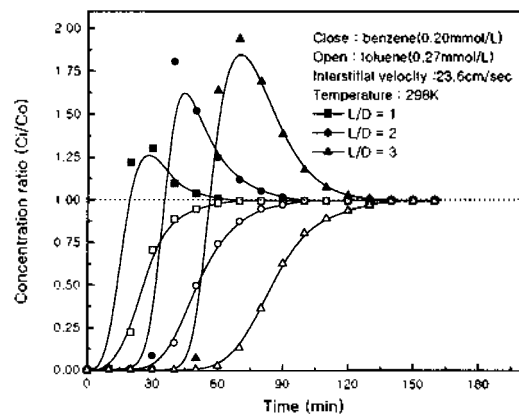


Fig. 5. The effect of aspect ratio on breakthrough curves of binary component.

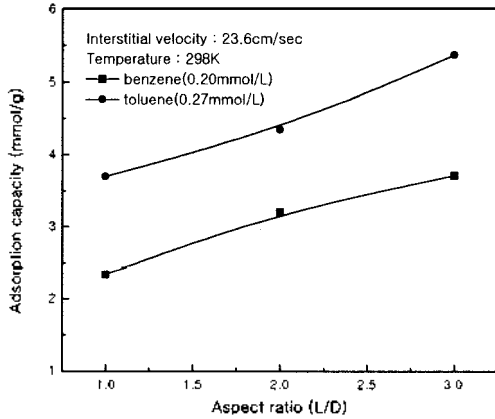


Fig. 6. The effect of aspect ratio on adsorption capacity of binary component.

탈착될 수 있는 흡착점 또한 증가하기 때문으로 생각되며 또한 탑내의 물질전달구간이 초기 평형상태를 보이다가 압축효과를 보이는데 있어서 아직 constant pattern을 형성하지 못하여 일어나는 현상으로도 사료된다[11].

혼합가스의 파과곡선으로부터 고정 흡착층의 형상비에 따른 파과곡선상에서 흡착질의 농도가 허용한계(95%) 이상이 되는 시간까지 고정흡착층에 흡착된 흡착질의 양을 의미하는 평형흡착능을 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 고정 흡착층의 높이가 증가할수록 평형흡착능도 증가하는 경향을 나타내고 있다.

3.2.2 혼합가스 농도의 영향

혼합가스에 대한 흡착가스의 농도 영향에 따른 고정 흡착층에서의 파과특성을 측정하기 위하여 benzene의 농도를 0.11mmol/L로 일정하게 유지시킨 상태에서 toluene 농도를 변화시켰을 때 파과곡선의 결과는 다음의 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 혼합가스의 파과특성도 단일성분의 파과특성과 같이 흡착가스의 농도가 증가할수록 파과곡선이 조기에 형성되고 있으며 toluene의 몰분율(mole fraction)이 0.70, 0.60, 0.46일 때 roll up 현상으로 나타나는 고정 흡착층 출구에서의 benzene 농도비는 각각 2.25, 2.01 및 1.55인 것으로 나타나고 있어, non-key component인 benzene의 roll up 현상은 key component인 toluene의 몰분율이 클수록 비례하고 있음을 알 수 있다. 즉 roll up

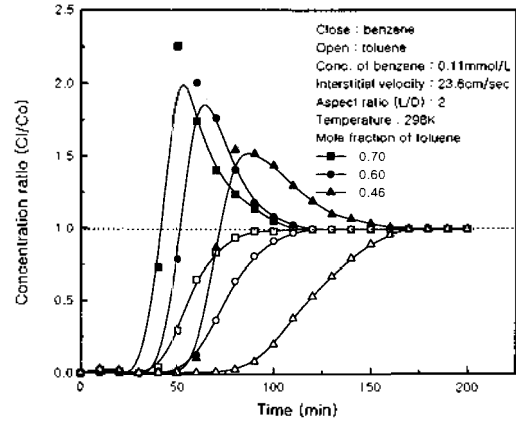


Fig. 7. The effect of concentration on breakthrough curves of binary component.

의 정도는 key component의 농도 변화에 좌우된다. 이러한 현상은 김[4]이 도입류중 강흡착질의 농도가 고농도이고 약흡착질의 농도가 저농도일수록 roll up 현상이 크게 나타난다고 한 결과와 일치하며 Fig. 8에서도 확연히 볼 수 있다.

혼합가스 중 toluene의 몰수비에 따른 평형흡착능 변화를 Fig. 8에 나타내었다. benzene의 농도가 일정함에도 불구하고 toluene의 몰분율이 증가할수록 benzene의 평형흡착능이 감소하고 있다. 이는 toluene의 평형흡착능이 상대적으로 증가하고 있기 때문에 흡착력이 비교적 약한 benzene이 탈착되면서 평형흡착능이 감소하는 것이라 생각된다. 이러한 결과로부터 흡착특성이 비슷한 두 흡착질 이상이 혼합되어 있는 기체를 분리할 경우에는 몰분율이 차이가 클수

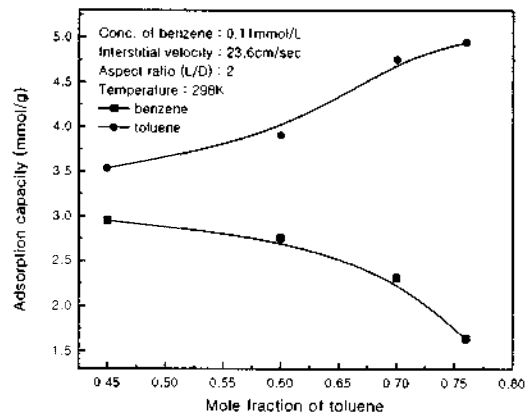


Fig. 8. The effect of concentration on adsorption capacity of binary component.

록 흡착평형량의 차이가 증가하는 것을 의미하며, 이에 대한 비교는 용질의 분압차이를 의미하므로 흡착을 이용한 분리가 용이할 것으로 생각된다[11-12].

3.2.3 혼합가스 유속(interstitial velocity)의 영향

혼합가스에 대한 흡착가스의 유속을 23.6, 29.5cm/sec으로 변화시켰을 때 측정된 고정 흡착층의 파과곡선 특성은 다음의 Fig. 9와 같다. 이 그림에서 보는 것과 같이 흡착가스의 유속이 1.25배 증가할 경우에 benzene과 toluene의 양론파과시간이 각각 31min에서 22min, 50min에서 38min으로 파과점이 단축됨을 볼 수 있는데, 이는 시간의 단축보다는 유속의 증가에 따른 물질전달저항의 감소로 인한 결과로 생각된다. 그리고 roll up 현상으로 나타나는 benzene의 농도비 또한 흡착가스 유속의 증가에 따라 1.6에서 1.42로 감소하는 경향을 볼 수 있었는데 이는 전 [13-14]등의 결과와 같은 경향을 나타내었다.

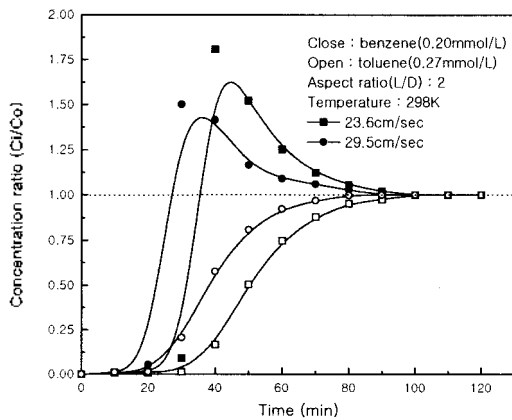


Fig. 9. The effect of interstitial velocity on break-through curves of binary component.

4. 결 론

고정 흡착층에서 방향족계통의 휘발성유기화합물질인 benzene과 toluene의 이성분에 대한 동시 흡착·파과특성 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 실험에 사용된 흡착질인 benzene과 toluene의

흡착강도는 두 흡착질의 평형흡착능 차이에 의한 것으로 benzene이 흡착제와 흡착강도가 비교적 작은 성분, 즉 non-key component로 작용하여 이성분에 대한 고정 흡착층의 파과특성에서 roll up 현상을 나타냄을 확인할 수 있었다.

- 2) 동일한 흡착가스의 농도조건에서 혼합성분의 각 성분에 대한 파과곡선과 단일성분에 대한 파과곡선의 특성을 비교해 보았을 때 key component인 toluene의 양론파과시간은 차이가 거의 없지만, non-key component인 benzene의 양론파과시간은 200분에서 70분으로 상당한 시간적 간격을 형성하고 있음을 알 수 있었다.
- 3) 혼합가스의 파과특성에서 non-key component인 benzene의 roll up 현상의 정도는 혼합가스의 농도와 고정 흡착층의 형상비에 비례하며, 혼합가스 유속에 반비례함을 알 수 있었다. 또한 다른 실험 조건이 일정한 상태에서 key component의 물분율이 클수록 roll up 현상이 크게 나타남을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 한국화학연구소, "VOLATILE ORGANIC COMPOUND ADSORPTION (1)", 한국화학연구소 (1997)
2. 한국에너지기술연구소, "휘발성유기화합물(VOC) 저감대책 기술의 국제동향 조사보고서", 한국에너지기술연구소 촉매연소연구팀 (1997)
3. 한국대기보전학회 측정분석분과위원회, "대기환경과 휘발성유기화합물질", 한국대기보전학회 (1998)
4. 김종화, "활성탄소섬유 충전층에서 휘발성유기물질의 흡착 및 탈착 특성", 연세대학교 화학공학과, 석사학위논문 (1998)
5. 성창우, "활성탄소섬유에 의한 휘발성 유기물질의 흡착특성", 연세대학교 화학공학과, 석사학위논문 (1997)
6. 김명숙, "활성탄 고정층 반응기에서 BTX의 기상 흡착특성", 울산대학교 화학공학과, 석사학위논문 (1998)

7. 민병무, "염화제1구리를 함침시킨 활성탄 흡착제의 CO 및 CO₂ 흡착특성", 서강대학교 화학공학과, 박사학위논문 (1993)
8. 윤정호, 최대기, 김성현, "활성탄에 대한 BTX증기의 이성분 및 삼성분흡착", 화학공학의 이론과 응용, 4(1), 557~560 (1998)
9. M. J. G. Linders et al., "Effect of the adsorption isotherm on one-and two-component diffusion in activated carbon", Carbon, 35(9), 1415~1425 (1997)
10. U. SenGupta, "Granular activated carbon-thermal regeneration process for control of VOC emission from surface coating operation", Proc.-APCA Annu. Meet., 84.4, 20~26 (1988)
11. C. Brasquet and P. Le Cloirec, "Adsorption onto activated carbon fiber : application to water and air treatments", Carbon, 35(9), 1307~1313 (1997)
12. K. Laszlo, A. Bota and L. G. Nagy, "Characterization of activated carbons from waste materials by adsorption from aqueous solutions", Carbon, 35(5), 593~598 (1997)
13. 전영화, "유동층흡착 반응기에서 황화합물의 흡착특성", 부산대학교 환경공학과, 박사학위논문 (1996)
14. 전영화, 정종현, 손병현, 조상원, 오광중, "고정층 흡착반응기를 이용한 SO₂ 가스처리에 관한 연구", 대한환경공학회, 18(8), 961~969 (1996)