

2중층 흡착층의 충전방법에 따른 2성분 증기의 흡착특성 변화

이민규 · 이송우 · 감상규¹⁾ · 이석희*

부경대학교 화학공학과, ¹⁾제주대학교 환경공학과
(2011년 11월 8일 접수; 2011년 12월 5일 수정; 2012년 2월 1일 채택)

Variations of Adsorption Characteristics of Binary Vapor According to Packing System of Double-layer Adsorption Bed

Min-Gyu Lee, Song-Woo Lee, Sang-Kyu Kam¹⁾, Seok-Hee Lee*

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

¹⁾Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

(Manuscript received 8 November, 2011; revised 5 December, 2011; accepted 1 February, 2012)

Abstract

This work is to study the variations of adsorption characteristics of binary vapor according to packing system of double-layer bed by fixed bed experiment. Breakthrough curves of single and binary vapor composed of acetone and benzene on single-layer and double-layer adsorption bed composed of activated carbon (AC) and silica-aluminar (SA) were compared. Adsorptions of binary vapor on double-layer bed were influenced by the differences of surface area between adsorbents as well as the polarity difference between adsorbent and adsorbate. The roll-up phenomenon of acetone vapor was happened by replacement with competing adsorption between acetone vapor and benzene vapor on AC bed, but it was not happened on SA bed because acetone vapor and benzene vapor had less difference in affinity with SA bed. The breakthrough times of acetone vapor and benzene vapor on AC/SA double-layer bed were three times and 1.4 times larger respectively than on SA/AC double-layer bed, the differences of breakthrough times were relatively larger than the equilibrium adsorption capacities according to packing system of double-layer bed.

Key Words : Adsorption, Activated carbon, Silica-aluminar, Packing system, Double layer, Acetone, Benzene, Binary vapor

1. 서론

휘발성 유기화합물(Volatile organic compounds, VOCs)은 여러 산업분야에서 매우 광범위하게 사용되고 있으며, 대부분이 건조공정에서 휘발되어 대기 중으로 배출되고 있다. 이렇게 배출된 VOCs는 산업현

장의 작업환경을 오염시킬 뿐만 아니라 화재, 폭발 등의 사고와 인체장애의 심각한 원인이 되고 있다. 작업장에서 기상으로 배출되는 VOCs를 제거하기 위한 많은 연구가 수행되고 있다(Khan 등, 2000)

Lee 등(2005a)은 acetone과 toluene 증기를 흡착질로 사용한 흡착연구에서 활성탄 고정층의 증기 평형 흡착량은 활성탄의 대표적인 특성치인 BET 비표면적과 총 세공부피와는 상관관계가 상대적으로 적고, 총 누적표면적과 상관관계가 크다는 결과를 보고하였다. 그리고 Lim 등(2005c)은 같은 흡착제와 흡착질을 사용한 흡착실험에서 평형 흡착량은 흡착질의 농도가

*Corresponding author : Seok-Hee Lee, Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
Phone: +82-51-629-6434
E-mail: shlee@pknu.ac.kr

증기함에 따라 증가하지만 유속변화에 따라서는 일정하였고, 흡착온도의 증가에 따라서는 감소하는 경향을 가지고 있다고 하였다.

지금까지 흡착에 관한 연구는 활성탄을 흡착제로 주로 사용하고 흡착제의 종류에 따른 흡착용량을 평가하거나 온도변화에 따른 흡착능을 비교 고찰한 것이 대부분을 차지하고 있다. 최근의 연구는 흡착제의 세공크기의 영역별 표면적과 흡착량, 또는 세공크기의 영역별 부피와 흡착량과 이 값들 사이의 상관관계를 고찰하고, 잘 발달한 특정 세공영역에서의 흡착능과 흡착질의 크기와 극성과의 상관관계를 고찰하였다(Lee 등, 2006; Lee 등, 2005a, 2007b, 2008a). 그러나 제올라이트나 실리카-알루미나와 같은 무기계 흡착제의 흡착특성에 관한 연구는 부족한 실정이다(Lee 등, 1999; Lee 등, 2005b, 2008b, 2011a, 2011b). 그리고 단일 및 혼합 성분계에서 유속, 농도 및 활성탄의 세공면적과 부피 등에 따른 파과특성과 흡착능 비교에 관한 연구가 대부분이었고 단일 흡착제에 대한 연구가 대부분이었다(Lee 등, 2007a). 이에 반해 여러 성분으로 구성된 다성분계 증기의 흡착과 회수를 위해 다양한 흡착제를 복합적으로 사용하고 흡착층의 충전방법에 따른 흡착특성을 고찰한 연구는 많지 않았다.

본 연구는 대표적인 유기계 흡착제인 활성탄과 무기계 흡착제인 실리카-알루미나(silica-aluminar)를 흡착제로 사용하고, 대표적인 VOCs 물질이면서 특성이 서로 다른 acetone과 benzene 2성분으로 구성된 흡착질을 사용하여 흡착특성을 고찰하고자 하였다. 이를 위해 연속식 활성탄 고정층 흡착장치를 사용하여 2종류 흡착제의 충전방법을 달리하여 2성분 혼합가스에 대한 파과실험을 수행하고, 포화 흡착량의 변화를 측정하여 흡착특성을 비교 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

흡착제는 미국 Calgon사의 활성탄과 국내 경남기업의 실리카-알루미나를 사용하였다. 활성탄은 8~16 mesh의 일정한 크기로 분쇄한 야자껍질을 원료로 한 입상활성탄이고, 실리카-알루미나는 직경 4 mm인 구형으로 성형된 제품으로 활성탄은 AC, 실리카-알루

미나는 SA로 각각 명명하였다. 흡착제는 사용 전에 250℃에서 5시간 이상 방치하여 내부에 있을 수 있는 분쇄물을 제거하고, 데시케이터에 보관하여 사용하였다. 흡착질은 acetone 증기와 toluene 증기를 사용하였다. 각 증기는 공기를 사용하여 농도를 100~200 ppmv로 조절하여 사용하였다.

2.2. 실험장치 및 방법

Acetone 증기와 toluene 증기의 흡착에 사용한 실험장치는 Fig. 1과와 같은 고정층 연속식 흡착장치이다. 반응기는 내경 16 mm, 외경 20 mm 및 높이 250 mm인 Pyrex 유리관을 사용하였고 2중층일 경우 반응기 2개를 직렬로 연결하여 사용하였다. 흡착온도는 25℃로 일정하게 유지하여 운전하였으며 기상의 흡착질 농도를 조절하기 위해 Air pump(Young Nam Yasunaga Co. Ltd. LP-40A)를 통해 공급되는 공기는 실리카겔 층(drying bottle)을 통과시켜 흡착과정에서 발생할 수 있는 수분의 영향을 최소화하였다. 실린지 펌프(Cole Parmer International, U.S.A. p-74901-10)에서 일정 유량으로 유입되는 액상의 acetone과 benzene은 실리카겔 층을 통해서 공급되는 건조공기로 기화시켜 실험에 필요한 농도의 증기를 제조하였다. 2성분의 증기는 유량계에 의해 일정농도의 2성분 가스로 조절되어 반응기의 하부로 유입된 후 상부로 배출되게 하였다.

Acetone 증기와 toluene 증기의 농도는 FID(Flame Ionization Detector)가 장착된 gas chromatography

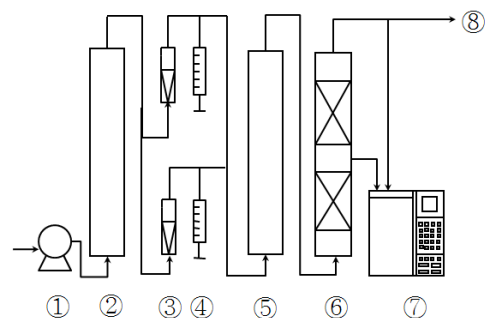


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus (① air pump, ② drying bottle, ③ flow meter, ④ syringe pump, ⑤ mixing chamber, ⑥ adsorption bed, ⑦ GC, ⑧ vent).

Table 1. Analysis conditions for acetone vapor and benzene vapor by gas chromatography

| GC | Donam, DS-6200 |
|--|---------------------------|
| Detector | FID |
| Column | J&W Scientific, Capillary |
| Carrier gas | N ₂ |
| Oven temp. | 130 °C |
| Inject temp. | 250 °C |
| Detector temp. | 200 °C |
| Flow rate(N ₂ : H ₂ : Air) | 30 : 30 : 300 |

(Donam, DS-6200)를 사용하여 일정 간격으로 분석하였다. Gas chromatography의 분석조건은 Table 1과 같다. 흡착관의 출구에서 유출 증기의 농도(C)가 유입 증기의 농도(C₀)와 거의 같은 수준(C/C₀≒1)이 되었을 때를 흡착평형으로 간주하고 흡착실험을 종료하였다.

2.3. 분석

흡착제의 기공특성은 BET 비표면적측정기(Micromeritics, ASAP 2010)를 이용하여 비표면적(BET specific surface area), 총 세공부피(total pore volume), 평균 세공직경(average pore diameter), 그리고 t-plot method에 의한 external surface area와 micro area를 측정하여 Table 2에 비교하였다(Allen, 1990; Micromeritics, 1997). 실리카-알루미나(silica-alumina)는 실리카(SiO₂)와 알루미나(Al₂O₃)를 혼합하여 합성한 비결정질 실리카-알루미나이며, external surface area(S_{EXT})가 micro area(S_{MIC})에 비해 상대적으로 매우 많은 것은 합성과정에서 실리카와 알루미나가 인접하여 형성된 기공에 의한 표면적으로 판단되었다(Lee 등, 2011a). 증기의 포화흡착량은 파과곡선의 면적값으로 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 단일 흡착층에서 단일성분 증기와 2성분 증기의 파과 특성 비교

흡착층의 충전방법에 따른 파과특성을 고찰하기 위해 실리카-알루미나(SA)와 활성탄(AC)으로 각각 구성된 단일층 흡착층에서 acetone과 benzene 단일성분 증기와 acetone과 benzene으로 구성된 2성분 증기의 파과실험을 각각 실행하여 흡착특성을 비교하였다. 파과실험은 온도 25 °C에서 단일성분일 증기인 경우 농도를 200 ppmv로 일정하게 조절하고, 2성분 증기인 경우는 각성분의 농도를 각각 100 ppmv로 조절하여 2성분 증기의 총 농도가 200 ppmv이 되게 조절하였다. 유량은 4 l/min으로 하고 단일 흡착층의 양은 2 g으로 하였다.

SA 단일 흡착층에서 acetone 증기와 benzene 증기의 흡착에 의한 파과곡선은 Fig. 2에 비교하였고 AC 단일 흡착층에서 acetone 증기와 benzene 증기의 흡착에 의한 파과곡선은 Fig. 3에 각각 비교하였다. Fig. 2에서와 같이 본 실험조건에서 SA 단일층에서 acetone과 benzene 단일성분 증기의 파과는 비교적 빨리 일어났다. Acetone 증기는 benzene 증기에 비해 실리카-알루미나 층에 비교적 잘 흡착되는 것으로 나타났다. Fig. 3에서와 같이 AC 단일층에서 acetone과 benzene 단일성분 증기의 파과는 실리카-알루미나 단일층에 비해 천천히 일어났다. 그리고 benzene 증기는 acetone 증기에 비해 활성탄 층에 비교적 잘 흡착되는 것을 알 수 있었고 acetone 증기도 실리카-알루미나층에서 보다 활성탄 층에서 흡착이 더 잘되는 것을 알 수 있었다. 이것은 Lee 등(2007b; 2008b)이 1종류의 흡착제에 acetone과 toluene을 흡착질로 사용한 실험에서 흡착제와 흡착질의 극성이 같을 경우 서로 극성이 다른

Table 2. Characteristics of adsorbents

| Adsorbent | Maker | Surface area | | | Total pore volume | Average pore diameter |
|-----------|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| | | S _{BET} , m ² /g | S _{MIC} , m ² /g | S _{EXT} , m ² /g | V _T , cm ³ /g | D _p , Å |
| AC | Calgon, U.S.A. | 1,242 | 273 | 968 | 0.613 | 19.75 |
| SA | Kyungnam, Korea | 641 | 56 | 585 | 0.434 | 27.0 |

경우에 비해 흡착능이 높다고 했다. 그러나 Table 2에서 보는 바와 같이 활성탄은 실리카-알루미나에 비해 약 2배의 비표면적을 가지고 있기 때문에 흡착은 극성 차이에 의한 영향보다 표면적 차이에 의한 영향이 더 크다는 것을 알 수 있었다.

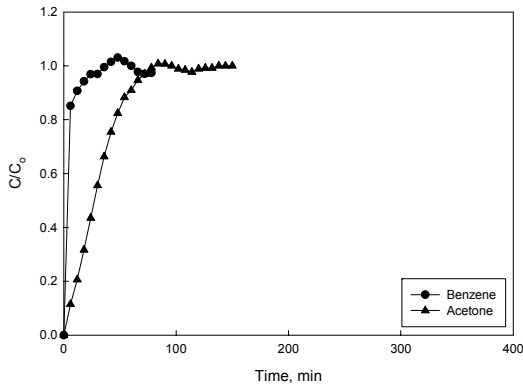


Fig. 2. Comparison of breakthrough curves of single vapor of acetone and benzene on single-layer bed of silica-alumina (inlet concentration 200 ppmv, flow rate 4 ℓ/min, silica-alumina bed 2 g, temperature 25°C).

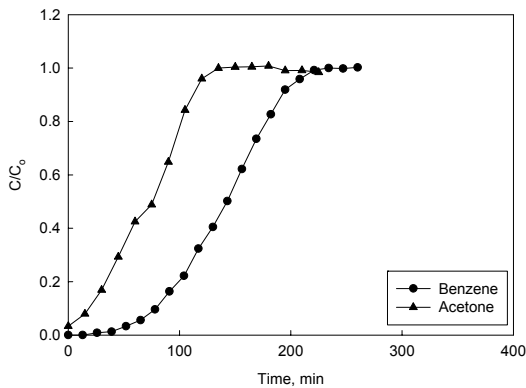


Fig. 3. Comparison of breakthrough curves of single vapor of acetone and benzene on single-layer bed of activated carbon (inlet concentration 200 ppmv, flow rate 4 ℓ/min, activated carbon bed 2 g, temperature 25°C).

단일 흡착층에서 2성분 증기의 흡착특성을 고찰하기 위하여 SA 단일 흡착층에서 acetone 과 benzene으로 구성된 2성분 증기의 흡착에 의한 파과곡선은 Fig.

4에 비교하였고 AC 단일 흡착층에서 acetone 과 benzene으로 구성된 2성분 증기의 흡착에 의한 파과곡선은 Fig. 5에 비교하였다.

Fig. 4와 같이 2성분 증의 benzene 증기는 단일성분에서와 마찬가지로 실리카-알루미나 층에서 흡착이 잘되지 않는 것을 볼 수 있었고, 2성분계에서 흡착제와 흡착질의 극성과 흡착세기의 차이에 따른 roll-up 현상(Lee 등, 2007b; Lee 등, 2008a)은 거의 볼 수 없었다. 반면에 Fig. 5와 같이 활성탄 층에서 acetone 과

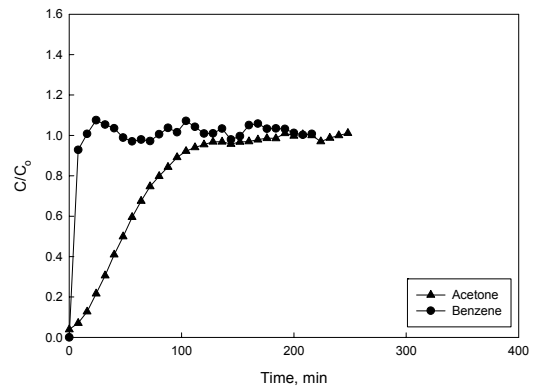


Fig. 4. Comparison of breakthrough curves of binary vapor on single-layer bed of silica-alumina (acetone concentration 100 ppmv, benzene concentration 100 ppmv, flow rate 4 ℓ/min, silica-alumina bed 2 g, temperature 25°C).

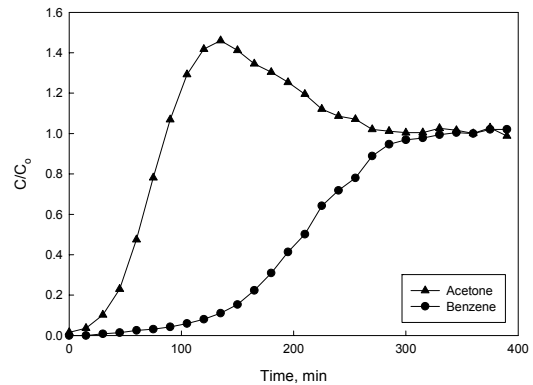


Fig. 5. Comparison of breakthrough curves of binary vapor on single-layer bed of activated carbon (acetone concentration 100 ppmv, benzene concentration 100 ppmv, flow rate 4 ℓ/min, activated carbon bed 2 g, temperature 25°C).

benzene으로 구성된 2성분 증기의 흡착에 의한 파과곡선을 비교에서는 acetone 증기의 roll-up 현상을 뚜렷이 볼 수 있었다. 이것은 활성탄이 실리카-알루미나에 비해 acetone과 benzene 2성분 모두 흡착능이 우수하다는 결과이며, 흡착제와 흡착질과의 극성에 따른 상호간의 흡착강도 차이(Lee 등, 2007b) 뿐만 아니라 실리카-알루미나와 활성탄의 표면적의 차이에 의한 결과로도 판단되었다.

3.2. 2중층 흡착층에서 흡착층의 충전방법에 따른 2성분 증기의 파과특성 비교

흡착층의 충전방법에 따른 파과특성을 고찰하기 위해 SA와 AC로 구성된 2중층 흡착층에서 acetone과 benzene으로 구성된 2성분 증기의 파과실험을 하였다.

파과실험은 온도 25°C에서 2성분 증기의 농도는 각각 100 ppmv로 하여 증기의 총 농도가 200 ppmv로 조절하였다. 유량은 4 l/min으로 하고, 2중층을 구성하는 각각의 단일 흡착층의 양을 1 g으로 하여 2중층 흡착층의 총량이 2 g이 되게 조절하였다. 2중층의 각 층에서 배출되는 2성분 증기의 흡착시간에 다른 증기의 농도변화를 측정하였다. 2중층의 각 층의 상부로 배출되는 2성분 증기의 농도는 Fig. 1에서와 같이 GC를 사용하여 분석하였다.

상층(upper layer)이 AC층이고 하층(lower layer)이 SA층으로 구성된 2중층 흡착층(AC/SA)에서 acetone과 benzene으로 구성된 2성분 증기의 흡착에 의한 파과곡선을 Fig. 6에 도시하였다. 그리고 상층이 SA층이고 하층이 AC층으로 구성된 2중층 흡착층(SA/AC)에서 acetone과 benzene으로 구성된 2성분 증기의 흡착에 의한 파과곡선을 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 6에 도시한 바와 같이 acetone과 benzene으로 구성된 2성분 증기는 AC/SA 2중층의 하층(SA, lower layer)에서는 비교적 흡착이 잘되지 않은 것을 볼 수 있었지만, 상층(AC, upper layer)에서는 비교적 흡착이 잘 일어나는 것을 알 수 있었다. 상층에서는 80분 이후부터 acetone 증기의 roll-up 현상을 일부 볼 수 있었다. 이것은 acetone 증기가 80분 이전까지는 하층(SA)에서 흡착이 주로 일어났으나 이 시간 이후부터는 포화되어 상층(AC)으로 계속 유입된 acetone 증기가 상층인

활성탄 층에서 benzene 증기와의 경쟁흡착에 의해 치환된 acetone 증기의 양인 것으로 판단되었다. Benzene 증기는 하층(SA)에서는 거의 흡착이 이루어지지 않았지만 상층(AC)에서 대부분의 흡착이 일어난 것을 하층과 상층의 유출부분에서 분석한 파과곡선에서 확인할 수 있었다.

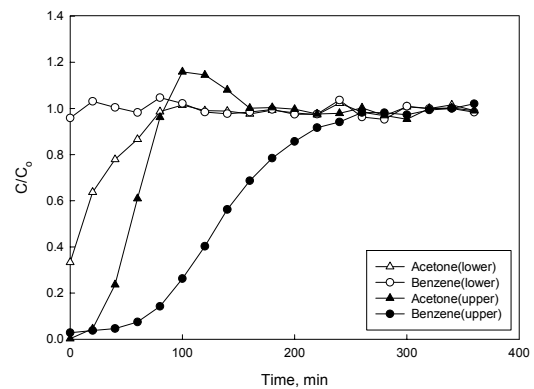


Fig. 6. Comparison of breakthrough curves of binary vapor on double-layer bed composed of silica-aluminar (lower layer 1 g) and activated carbon (upper layer 1 g) (acetone concentration 100 ppmv, benzene concentration 100 ppmv, flow rate 4 l/min, total bed 2 g, temperature 25°C).

Fig. 7에 도시한 바와 같이 acetone과 benzene으로 구성된 2성분 증기는 SA/AC 2중층의 하층(AC, lower layer)과 상층(AC, upper layer)에서의 흡착현상이 비슷한 형태를 보이고 있고, 특히 benzene 증기는 하층(AC)과 상층(AC)에서 거의 유사한 파과곡선의 형태를 보여 주었다. Acetone 증기는 하층(AC)에서는 50분 이후부터 roll-up 현상이 일어남을 볼 수 있었고, 상층(SA)에서는 80분 이후부터 roll-up 현상이 일부 일어남을 볼 수 있었다.

일반적으로 활성탄과 같은 유기계 흡착제는 비극성의 흡착질을 잘 흡착하고, 실리카-알루미나와 같은 무기계 흡착제는 극성의 흡착질을 잘 흡착한다고 알려져 있으며, 활성탄 단일층에서 극성(acetone)과 비극성(toluene)으로 구성된 2성분 흡착질일 경우 파과실험에서 극성의 흡착질은 극성차이에 따른 흡착 친화력 차이에 의해 친화력이 큰 흡착질로 치환되면서

roll-up 현상을 발생시키는 것을 볼 수 있었다(Lee 등, 2006; Lee 등, 2007b, 2008a). 흡착제와 흡착질과의 극성차이에 따른 현상으로 분석해 볼 때 상층(SA)에서는 acetone 증기의 roll-up 현상이 없고 benzene 증기의 roll-up 현상을 예측해볼 수 있으나, acetone 증기의 roll-up 현상을 확인할 수 있었다. 이 현상은 실리카-알루미나 층(SA)이 acetone 증기보다 benzene 증기와 친화력이 크다는 것으로 사료되었다.

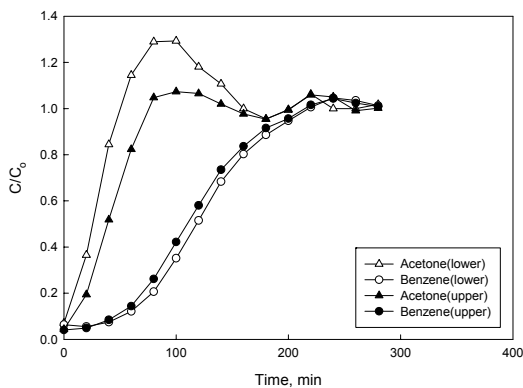


Fig. 7. Comparison of breakthrough curves of binary vapor on double-layer bed composed of activated carbon (lower layer 1 g) and silica-aluminar (upper layer 1 g) (acetone concentration 100 ppmv, benzene concentration 100 ppmv, flow rate 4 ℓ/min, total bed 2 g, temperature 25°C).

3.3. 흡착층의 충전방법에 따른 2성분 증기의 평형흡착량과 파과시간 비교

2중층 흡착층의 충전방법에 따른 2성분 증기의 포화흡착량의 변화를 파과실험에 의한 평형흡착량을 Fig. 8에 비교하였다. AC/SA로 구성된 2중층이 SA/AC로 구성된 2중층보다 acetone 증기의 평형흡착량은 16.6% 많고, benzene 증기의 평형흡착량은 3.8% 많은 것으로 나타났다. 2중층의 충전방법에 따라 benzene 증기의 평형흡착량은 비슷한데 반해 acetone 증기의 평형흡착량이 상대적으로 많은 것은 Fig. 6에서와 같이 AC/SA로 구성된 2중층의 상층(AC)에서 acetone 증기의 roll-up 현상이 SA/AC로 구성된 2중층에 비해 상대적으로 작기 때문으로 사료되었다.

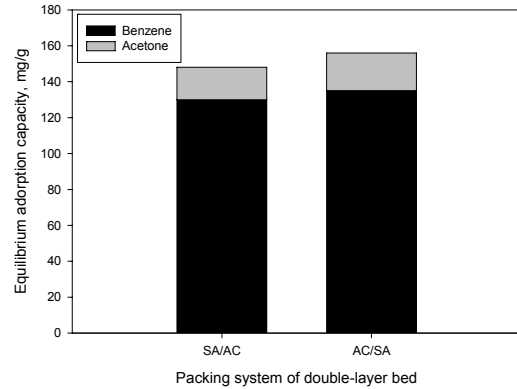


Fig. 8. Comparison of equilibrium adsorption capacities of acetone and benzene vapors adsorbed on the lower and upper layer according to packing system.

2중층 흡착층의 충전방법에 따른 2성분 증기의 파과시간의 변화를 고찰하기 위하여 2중층 흡착탑의 출구에서 2성분 증기의 농도를 측정하여 파과시간을 Fig. 9에 비교하였다. 2성분 증기의 각각의 파과시간은 출구에서 초기농도(C_0)의 $0.1 \cdot C_0$ 이 되는 시간을 기준으로 측정하였다. SA/AC로 구성된 2중층에서 acetone 증기의 파과시간은 10분이었고 benzene 증기의 파과시간은 50분인 반면, AC/SA로 구성된 2중층에서 acetone 증기의 파과시간은 30분이었고 benzene 증기의 파과시간은 70분으로 나타났다. 평형흡착량과는 다르게 흡착층의 충전방법에 따른 파과시간의 차이는 비교적 크게 나타났다. 여러 가지 공정에서 방출되는 휘발성 유기화합물이 대기 중으로 배출되는 것을 방지하기 위해 증기를 회수하여 재사용하기 위한 방법으로 회수장치가 사용되고 있다. 다양한 증기를 회수하기 위해서는 이에 적합한 다양한 흡착제의 검토가 필요하며 흡착층의 충전방법의 변화에 따른 특성의 고찰이 필요하다. 같은 조건에서 충전방법의 변화에 의해 파과시간을 길게 연장시킬 수 있다면 흡착탑의 재생을 위한 횟수도 감소할 수 있을 것으로 사료되며 회수비용의 절감도 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 2중층 흡착층의 충전방법에 따라 acetone 증기의 평형흡착량은 1.16배, benzene 증기의 평형흡착량은 1.038배 많아졌고 충전방법에 따른 평형흡착량의 차이는 미미하였다. 그리고 acetone 증기의 파과시간

은 3배, benzene 증기의 파과시간은 1.4배 길어졌으며 평형흡착량 차이에 비해 비교적 차이가 크게 나타났다.

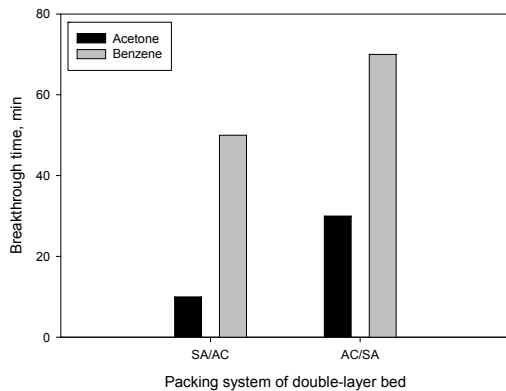


Fig. 9. Comparison of breakthrough time of acetone and benzene vapors according to packing system of double-layer bed.

4. 결론

단일 흡착층에서 단일성분 증기의 흡착제와 흡착질의 종류에 따른 흡착특성을 결과 benzene 증기와 acetone 증기는 SA층보다 AC층에 잘 흡착되었다. 흡착제와 흡착질의 극성이 같을 경우 서로 극성이 다른 경우에 비해 흡착능이 높다고 했지만 AC는 SA에 비해 약 2배의 비표면적을 가지고 있기 때문에 흡착은 흡착제와 흡착질의 극성에 따른 상호간의 흡착강도 차이뿐만 아니라 표면적의 차이에 의한 영향이 크다는 것을 알 수 있었다.

AC(상층)/SA(하층), SA/AC로 구성된 2중층 흡착층에서 acetone과 benzene으로 구성된 2성분 증기를 흡착제로 사용하여 서로 다른 흡착제로 구성된 2중층 흡착층의 충전방법에 따른 2성분 증기의 파과실험으로 흡착특성을 고찰하였다. 흡착제와 흡착질의 극성차이에 따라 흡착층과 친화력이 작은 흡착질은 친화력이 큰 흡착질로 치환되면서 roll-up 현상이 생기는 것을 볼 수 있다. AC층에서는 acetone 증기가 benzene 증기와의 경쟁흡착에 의해 치환되어 acetone 증기의 roll-up 현상이 있었으나, SA층은 acetone 증기와 benzene 증기와의 친화력의 차이가 적어 증기의 roll-up 현상이

미미하였다.

2중층 흡착층의 충전방법에 따라 acetone 증기의 평형흡착량은 1.16배, benzene 증기의 평형흡착량은 1.038배 많아졌고 충전방법에 따른 평형흡착량의 차이는 미미하였다. 그리고 acetone 증기의 파과시간은 3배, benzene 증기의 파과시간은 1.4배 길어졌으며 평형흡착량 차이에 비해 비교적 차이가 크게 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2010학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구입니다(PK-2010-099).

참고 문헌

- Allen, T., 1990, Particle Size Measurement, 4th ed., Chapman & Hall, London, 547-628.
- Khan, F. I., Ghoshal, A. K., 2000, Removal of volatile organic compound from polluted air, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13, 527-545.
- Kim, H. W., Lee, S. W., Lee, M. G., Cheon, J. K., 2007a, Variations of equilibrium adsorption capacities according to type and mixing fraction of binary mixed gas on activated carbon fixed-bed, J. Environ. Sci., 16(10), 1197-1202.
- Lee, H. J., Lee, H. K., Park, G. I., Ro, S. G., Choi, H. S., Lee, Y. T., 1999, Adsorption property of water vapor on the modified natural zeolite, J. Korean Soc. Environ. Engrs, 21(4), 643-651.
- Lee, M. G., Lee, S. W., Lee, S. H., 2006, Comparison of vapor adsorption characteristics of acetone and toluene based on polarity in activated carbon fixed-bed reactor, Korean J. Chem. Eng., 23(5), 773-778.
- Lee, S. W., Bae, S. K., Kwon, J. H., Na, Y. S., An, C. D., Yoon, Y. S., Song, S. K., 2005a, Correlations between pore structure of activated carbon and adsorption characteristics of acetone vapor, J. Korean Soc. Environ. Engrs, 27(6), 620-625.
- Lee, S. W., Bae, S. K., Kwon, J. H., Na, Y. S., An, C. D., Yoon, Y. S., Song, S. K., 2005b, Adsorption characteristics of toluene vapor according to pore structure of zeolite 5A modified with hydrochloric

- acid, *J. Korean Soc. Environ. Engrs*, 27(8), 807-812.
- Lee, S. W., Cheon, J. K., Park, H. J., Lee, M. G., 2008a, Adsorption characteristics of binary vapors among acetone, MEK, benzene, and toluene, *Korean J. Chem. Eng.*, 25(5), 1154-1159.
- Lee, S. W., Kam, S. K., Lee, M. G., 2007b, Comparison of breakthrough characteristics for binary vapors composed of acetone and toluene based on adsorption intensity in activated carbon fixed-bed reactor, *J. Ind. Eng. Chem.*, 13(6), 911-916.
- Lee, S. W., Park, H. J., Lee, S. H., Lee, M. G., 2008b, Comparison of adsorption characteristics according to polarity difference of acetone vapor and toluene vapor on silica-aluminar fixed-bed reactor, *J. Ind. Eng. Chem.*, 13, 10-17.
- Lee, S. W., Na, Y. S., An, C. D., Lee, M. G., 2011a, Comparison of adsorption characteristics on zeolite 13X and silica-aluminar, *J. Environ. Sci.*, 20(6), 729-736.
- Lee, S. W., Na, Y. S., An, C. D., Lee, M. G., 2011b, Adsorption Characteristics of water vapor on zeolite, *J. Environ. Sci.*, 20(5), 667-672.
- Lim, J. K., Lee, S. W., Kam, S. K., Lee, D. W., Lee, M. G., 2005c, Adsorption characteristics of toluene vapor in fixed-bed activated carbon column, *J. Environ. Sci.*, 14(1), 61-69.
- Micromeritics, 1997, ASAP 2010 Manual.