

활성탄을 충전한 흡착탑에서 벤젠 회수를 위한 세정공정의 연구

강성원 · 민병훈* · 서성섭

홍익대학교 공과대학 화학공학과

*수원대학교 공과대학 화학공학과

(2002년 3월 19일 접수 ; 2002년 4월 24 채택)

A Study on Cleaning Process for Benzene Recovery in Activated Carbon Bed

Sung-Won Kang · Byong-Hoon Min* · Sung-Sup Suh

Department of Chemical Engineering, Hongik University,
72-1, Sangsu-dong, Mapo-gu, Seoul 121-791, Korea

*Department of Chemical Engineering, Suwon University,
San 2-2, Wau-ri, Bongdam-up, Whasung-shi, Kyunggi-do, 445-743, Korea

(Received March 19, 2002 ; Accepted April 24, 2002)

Abstract : Experimental Study was carried out for benzene desorption by purge gas or evacuation in an activated carbon bed. As purge gas flow rate increased, desorption rate increased due to the higher interstitial linear gas velocity. For various purge gas flow rates, desorption curves almost got together if they were plotted against dimensionless time. At a higher flow rate, mass transfer zone became narrower. Temperature drop in the bed was more fast and severe at higher flow rates and higher outer temperature. It was found out that desorption was almost completed when the temperature in the drop of the bed returned to the initial temperature before temperature drop. Desorption by vacuum purge was completed in shorter time than desorption by purge gas. Countercurrent purge was more effective than cocurrent purge.

Keywords : VOC, adsorption, desorption, benzene, toluene, activated carbon.

1. 서론

과거의 대기오염 문제는 배출되는 지역에서만 문제되는 국지적인 것이었으나 점차 배출되는 오염물질이 미치는 영향권이 넓혀지고 있다. 이러한 대기오염 문제는 여러 가지가 있으나 산업

화의 발달에 의해 가장 큰 문제 중 하나는 광화학 반응에 의한 스모그 현상으로 경제성장이 있었던 국가에서는 한번씩은 겪어야 하는 문제였고 이미 선진국에서는 빈번히 일어났었던 문제였다[1,2]. 현재 우리나라도 이러한 환경 문제를 해결하기 위하여 각 산업체별로 광화학 스모그

를 발생시키는 물질들을 규제하는 법을 통과시킨 상태이다³⁾. 이러한 광화학스모그 현상을 일으키는 물질들은 많으나 대표적인 원인 물질은 VOCs(Volatile Organic Compounds)라 할 수 있다. VOCs는 유기 용제, 페인트 및 도료 등의 사용으로 인한 휘발성이 높은 유기화합물을 지칭하는 말로써, 국가마다 VOCs의 정의는 약간씩 다르지만 우리나라에서는 탄화수소류 중 레이드 증기압이 10.3kPa이상인 것 중에서 광화학반응성, 물질 사용량, 발암성 등의 유해성을 감안하여 선정고시하고 있다[3].

VOCs를 제거하기 위한 여러 적용 기술 개발을 위한 연구는 활발히 진행되고 있으나 경제적 비용 및 장기간의 운전 성능등을 고려하여 볼 때 VOCs를 근본적으로 저감시킬 수 있는 상용화 기술은 미진하다. 현재까지 개발된 저감기술은 크게 두 가지의 방법이 있다. 그 중 하나는 소각 및 분해에 의해 VOCs를 원천적으로 다른 화합물로 분해시키는 방법이며 다른 방법으로는 VOCs를 회수하여 재사용하는 방법이다. 소각 및 분해기술에는 연료를 이용하여 산화시키는 방법과 자외선이나 미생물을 이용한 분해법 등이 있다. 그러나 이러한 방법은 VOCs가 고가일 경우 회수할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 분리 및 회수기술로는 흡착 및 막분리, 냉각을 이용한 응축 등을 예로 들 수 있다. 회수기술은 VOCs를 회수하여 정제한 후 재사용할 수 있다는 장점이 있지만 공정을 연속으로 조업하는데 있어 갖가지 문제점을 안고 있다. 대표적으로 냉각에 의한 응축은 여러 종류의 유기 물질들이 섞여 있을 경우 선택적으로 특정 성분만을 응축시키기 힘든 경우가 있고 서로 다른 성분들을 분리하기가 어렵다. 또한 응축비용을 포함한 운전비용이 상대적으로 높아 VOCs를 소량 회수 할 경우 경제적 비용의 상승이 문제가 되고 있다. 막분리에 의한 방법은 선택적 막을 이용하여야 하나 현재 막의 특성에 따른 효율성이 그다지 높지 않다는 문제를 안고 있다[4]. 흡착 기술에서는 흡착제를 잘 선정하면 서로 다른 성분들을 선택적으로 분리하는 것이 가능하며 회수하는 VOCs가 파괴되지도 않는다. 흡착에 의한 방법을 사용하기 위해서는 흡착제에 대한 흡착량 측정 및 흡착특성의 규명[4,5]이 필요하며 흡착공정을 구성하는 각 단계를 연결하여 전체적으로 연속 공정으로 조업하는 설계능력이 중요하다[5,6].

본 연구에서는 VOCs 중 발생빈도가 가장 높은 벤젠을 흡착에 의해 회수하는 공정 개발에 필요한 탑의 거동에 대하여 조사하였다. 각 단계가 유기적으로 결합하는 흡착 공정에서 가장 중요한 공정은 흡착탑을 재생하여야 하는 탈착 공정이라 할 수 있다[7]. 따라서 탈착시 효율을 높일 수 있는 방법을 연구하고 조사하는데 본 연구의 초점이 맞추어졌다. 탈착은 여러 방법이 있으나 본 연구에서는 상용화 가능성[8]이 높은 세정기체에 의한 방법과 진공을 이용한 진공탈착 방법에 의한 탈착 실험을 수행하였다. 또한 흡착 단계에서 생기는 탑의 입구와 출구에서의 농도 분포의 차이로 인해 세정 기체나 진공 탈착을 할 때 탑안에서 유체흐름의 방향성도 고려하였다. 또한 탈착은 흡열반응이므로 탑 내 온도변화를 측정하여 상용화 공정으로 발전시키기 위해 필요한 정보를 조사하였다.

2. 실험

VOCs 제거를 위한 탈착실험은 흡착탑을 이용한 동적방법(dynamic method)[9]을 사용하였으며, 본 실험의 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다.

고체흡착제 표면의 성질과 기공분포 및 표면적을 고려할 때 벤젠과 톨루엔과 같은 물질의 흡착에는 활성탄이 적합하다고 알려져 있으며 [10,11], 본 연구에서는 Norit 社에서 제조한 활성탄 12-20 mesh를 흡착제로서 사용하였다. 사용된 활성탄은 ASAP-2000 Chemi-system (Micromeritics Co.)을 사용하여 BET법으로 측정된 비표면적이 1000~1100m²/g이고 입자의 밀도는 약 700kg/m³이었다. 또한 활성탄은 강도가 작기 때문에 여러번 반복되는 실험 과정에서 분쇄되어 유출되는 것을 방지하기 위하여 흡착탑내에 200mesh의 망을 사용하여 지지하였다.

실험장치는 Fig. 1에서와 같이 크게 원료 공급 장치 부분, 흡착탑 부분, 제어 부분, 분석 부분으로 네 부분으로 구성되어 있다. 첫 번째의 원료 공급 장치 부분은 탈착실험을 하기전에 흡착을 수행하기 위하여 흡착탑으로 VOCs가 포함된 기체를 공급하기 위한 것이다. Gas washing bottle로 carrier gas인 질소가 통과하면서 액상의 VOC 속에서 bubbling되어진다. Bubbling 되는 질소는 MFC(Mass Flow

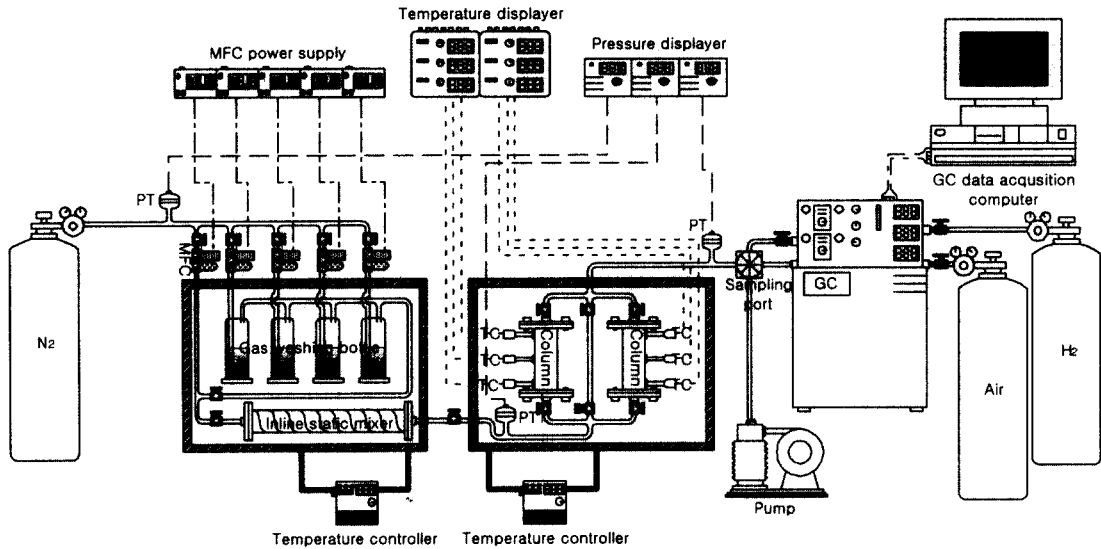


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Controller)에 의하여 유량이 조절되어지며, 기포에 VOCs 물질인 벤젠 증기를 포함하면서 기상으로 빠져 나와 흡착탑으로 이동하게 된다. 그러나 기포 속에 동반되어지는 VOC의 양은 다소 불규칙하게 변화하므로 이를 일정한 농도로 유지하기 위하여 buffer tank의 역할을 할 수 있는 inline static mixer를 사용하여 carrier gas와 혼합[12]시켰다. 또한 외부에 항온조를 설치하여 원료가스가 공급되는 부분이 일정한 온도가 되도록 하였다. 두 번째의 흡착탑 부분은 물질전달 영향하에 나타나는 VOCs의 파과 시간이 너무 길지 않도록 탑의 길이를 100mm, 내경을 17.5mm로 설계하였다. 탑의 상부, 중부, 하부에 온도 변화를 측정하기 위하여 원료 기체가 들어오고 나가는 입구 10mm와 출구 10mm 되는 지점, 그리고 탑 중간 지점에 K-type 열전대를 삽입하였다. 또한 실험시작 전 도입농도 측정하기 위하여 bypass line을 만들었다. 세 번째의 제어부분은 기체 유량을 조절하기 위하여 설치한 MFC controller 및 흡착탑 안에서의 온도 변화와 장치 각 부분에서의 압력변화를 측정하기 위한 기기들로 이루어져 있다. 측정되는 데이터는 Advantech社 4000 Series를 이용한 data acquisition system에 의하여 저장 및 기록되었다. 네 번째 분석부분에서는 탑 출구에서의 흡착질 파과곡선을 측정하기 위하여 감도가 높

은 F.I.D.(Flame Ionization Detector)가 탑재된 GC를 사용[13]하였으며 분리능을 높이기 위하여 capillary column(15m×0.53mm, ID: 12 μ m fused silica, BP20)을 사용하였다[14,15].

탈착실험에서는 흡착질로 미리 흡착시킨 흡착탑의 입구로 MFC에 의해 유량을 조절한 세정기체인 질소를 불어넣어 주었다. 이 때 탑 출구에서 빠져 나오는 기체속의 VOCs 농도를 GC로 일정시간 간격으로 측정하였다. 이 탈착 방법으로는 두 가지를 사용하였는데, 탑 입구로 세정 기체를 불어넣는 방법과 진공으로 탈착시키는 방법을 사용하였다. 세정 기체에 의해 흡착제를 재생시키는 경우에는 흡착탑에서 빠져 나오는 기체 속의 VOCs의 농도를 직접 측정하였다. 진공 탈착에 의해 재생시키는 경우에는 흡착탑에 진공펌프를 연결하고 진공펌프와 흡착탑 사이에 sampling port를 연결, 시료를 채취한 후 GC를 이용하여 분석하였다. 진공 탈착실험 수행시 진공펌프를 흡착탑 입구쪽으로 연결한 방법을 countercurrent라고 하고 출구쪽으로 연결한 방법을 cocurrent라고 정의하였다. 이 때 cocurrent와 countercurrent의 방향을 정하게 된 이유는 탈착시의 VOCs흐름방향과 흡착시의 VOCs흐름방향이 같은 경우를 cocurrent라 하고 반대가 되는 경우를 countercurrent라고 정의하였고 Fig. 2에 도시하였다. 또한 흡착탑의 상부,

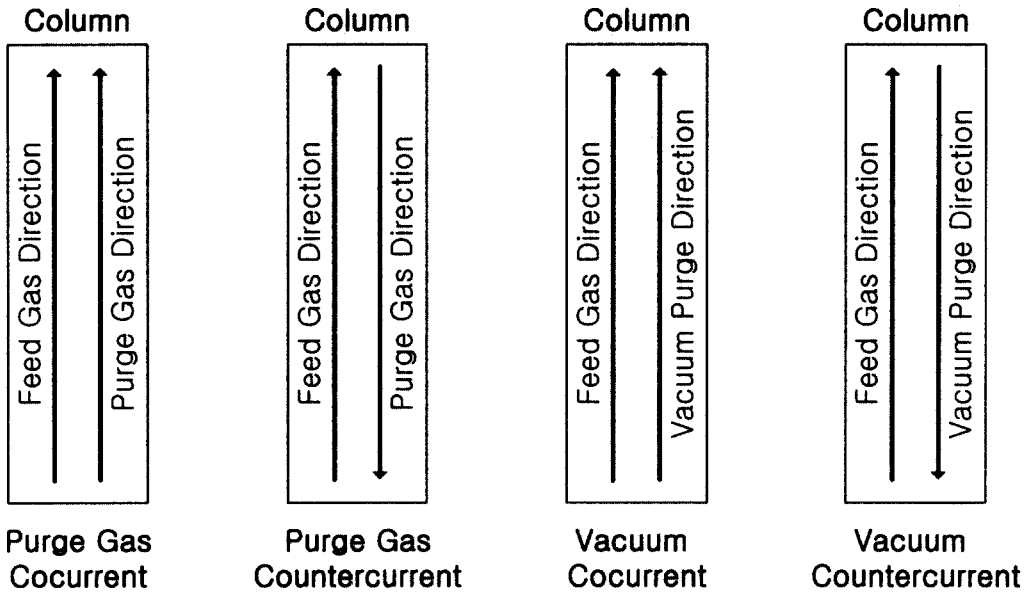


Fig. 2. Schematic diagram of desorption case.

중부, 하부에 삽입한 K-type thermocouple을 이용하여 탈착이 진행되는 과정에서의 온도변화를 data acquisition system에 기록하였다.

탈착 특성을 알아보기 위하여 실험 조건을 다음과 같은 방법으로 실험하였다. 먼저 흡착탑 주위를 일정한 온도를 유지한 상태로 세정 가스의 유량에 따른 탈착 변화를 실험하였다. 다음은 세정 가스의 유량이 동일할 때 흡착탑 주위의 온도 변화에 따른 변화를 관찰하였다. 이와 같은 실험을 수행하면서 탈착시 세정 가스의 주입 방향에 따라 탈착 능력을 조사하였다. 마지막으로 진공 펌프로 감압하면서 탈착성능도 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 온도에 대한 탈착 특성

유량에 따른 탈착 특성을 알아보기 위하여 탑 주위의 온도를 30, 45, 60℃로 변화시켰다. 온도가 30℃로 일정하게 유지될 때 유량에 따른 탈착곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 본 실험의 결과를 도시한 Fig. 3에서 보는 바와 같이 탈착을 일으키는 질소 가스의 유량이 커짐에 따라 탑 출구의 농도가 급격히 떨어지는 것을 관찰할 수

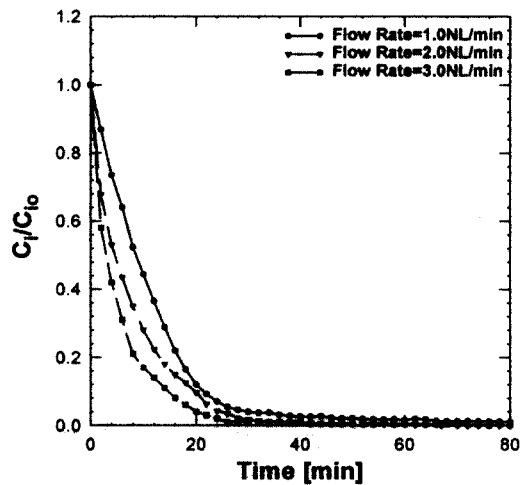


Fig. 3. Comparison of desorption curves for purge by nitrogen at 30℃.

있다. 이러한 현상으로부터 세정가스인 질소의 유량이 증가함에 따라 탑안의 압력이 증가하여 흡착질이 탈착하여 빠져나오는데 불리해지지만 세정기체의 선속도가 증가하여 VOCs가 탑출구로 빨리 빠져나옴을 알 수 있다. 또한 흡착탑 주위의 온도를 45, 60℃로 각각 유지시키면서

각 세정 가스의 유량에 대해서 시간에 따른 탈착기체의 농도 변화를 Fig. 4~5에 나타내었다.

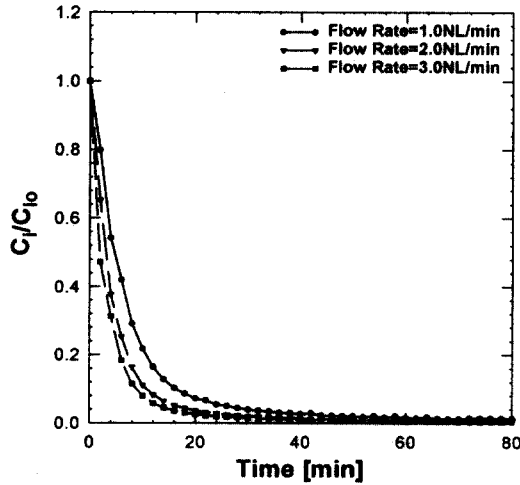


Fig. 4. Comparison of desorption curves for purge by nitrogen at 45°C.

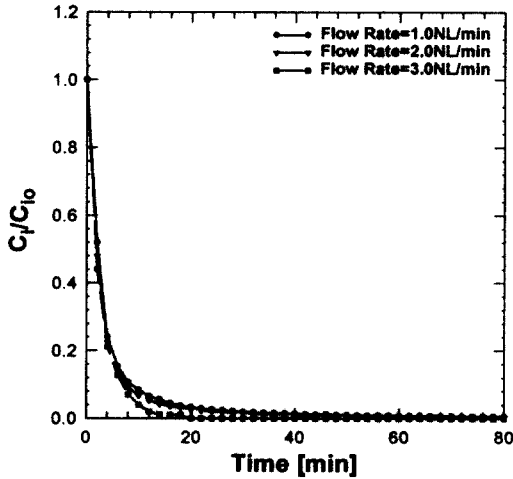


Fig. 5. Comparison of desorption curves for purge by nitrogen at 60°C.

Fig. 3에서 Fig. 5까지를 살펴보면 세정 가스의 양이 동일할 경우 탑 주위의 온도가 올라갈수록 탈착 속도가 증가하였다. 온도가 증가함에 따라 흡착량의 감소 및 분자운동의 증가로 인하여 나타난 결과이다. 이러한 두 가지 영향을 탈착이 완료되는 시간을 고려하여 볼 때 유량에 대한

영향보다는 흡착탑 주위의 온도에 대한 영향이 더 크게 미침을 알 수 있었다.

유량이 다를 때 탈착특성이 일반화 될 수 있는지 여부를 판단하기 위하여 차원을 갖는 시간 (t :time)에 선속도(v :linear velocity)를 곱하여 흡착탑 길이(L :bed length)로 나눈 무차원 변수 ($\bar{t} = vt/L$:dimensionless parameter)를 무차원 시간으로 정의하여 Fig. 6에 나타내었다. 탈착분자의 이동이 오로지 벌크 유체의 흐름에만 의존된다면, 세정기체의 속도가 증가하더라도 무차원화된 시간에 따른 탈착곡선의 모양은 달라지지 않게 된다. 실제로 Fig. 6에서 살펴보면 탑 주위의 온도가 30, 45, 60°C일 때 각 온도에서 유량에 따른 탈착곡선이 모여 있는 것을 알 수 있다. 그러나 온도가 일정할 때 유량에 따라 탈착곡선이 약간 차이가 나는 이유는 물질전달 속도가 빨라지게 되는 영향이 Fig. 6에서 실제로 관찰이 된다. 또한 온도가 높아짐에 따라 유량에 따른 곡선의 차이가 적은 것으로 보아 온도가 낮은 경우는 세정기체의 유량이 탈착 특성에 어느 정도 영향을 미칠 수 있으나 온도가 상승하면서 유량의 영향은 큰 차이를 주지 못함을 알 수 있다. 온도 증가에 따라 부피 팽창 효과로 탑안에서 기체의 선속도가 증가하여 물질 전달이 빠르게 되는 동시에, 온도 증가에 따라 분자운동이 활발해지면서 확산속도가 증가하고 흡·탈착 평형에 더욱 빠르게 도달하여 물질전

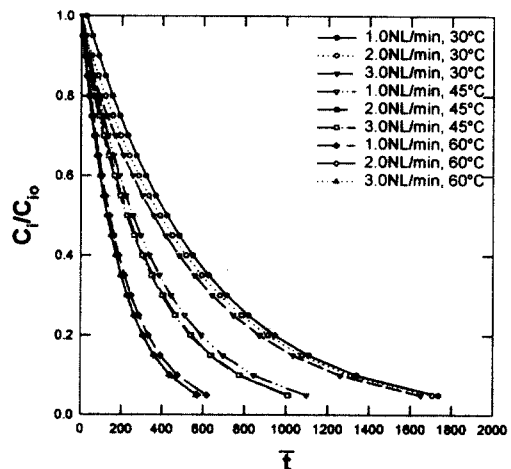


Fig. 6. Desorption curves as a function of dimensionless time for purge by nitrogen.

달 영역이 좁아지기 때문에 나타난 결과이다. 세정기체의 유량을 증가시키면 세정기체 비용이 증가하게 되는데 탑 주위의 온도를 상승시켜 탈착을 시키면 효과적인 방법이 되리라 여겨진다.

3.2. 유량 변화에 대한 탈착 특성

Fig. 7은 주위의 온도를 45℃로 고정시켰을 경우 세정 기체의 유량을 달리하면서 주입하였을 때의 흡착탑내의 온도변화를 상부·중부·하부에 따라 도시한 것이다. 세정 기체의 유량이 증가함에 따라 탈착속도가 증가한다는 것을 흡착탑 내 온도변화를 통하여 알 수 있다. 세정 기체의 유량이 증가할수록 탈착에 의해 나타나

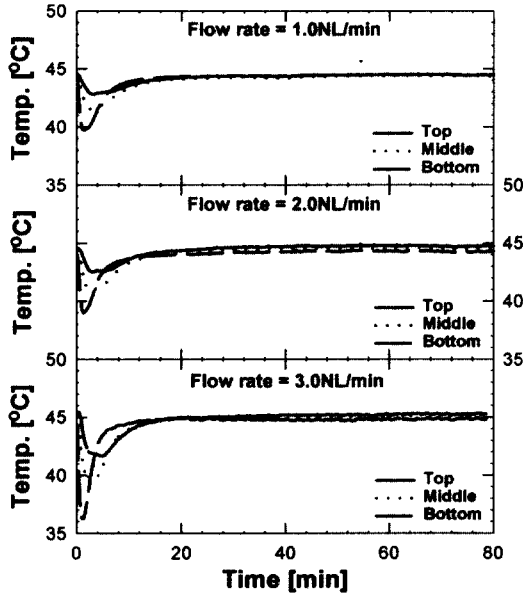


Fig. 7. Temperature change in column for various purge gas flow rates at 45℃.

는 최저온도가 낮아지는 이유는 탈착이 상대적으로 짧은 시간에 많이 일어나므로 흡열량이 단위시간 동안에 심하게 발생했기 때문이다. 세정기체의 유량이 일정할 때 흡착탑 주위의 온도를 변화시키면서 측정된 흡착탑 내 온도 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 흡착탑 주위의 온도가 상승함에 따라 흡열 과정인 탈착이 급격히 일어남을 알 수 있고 이러한 결과는 온도가 변하는 곡선이 급격히 하강한 후 상승하는 것으로 나타나

있다. 주위의 온도가 낮아지면 내부 온도 변화가 완만하게 일어나므로 탑의 mass transfer zone도 넓어짐을 유추할 수 있고 앞에서 살펴본 시간에 따른 탈착 곡선의 경향과 일치함을 알 수 있다. Fig. 8의 30℃ 실험결과를 보면 흡착질의 탈착에 의해 내려갔던 탑의 상부 온도가 다시 원래의 온도로 회복되는 시간이 Fig. 3에 보이는 똑같은 실험조건에서의 탈착 곡선에서 탈착이 완료되어가는 시간과 거의 일치함을 알 수

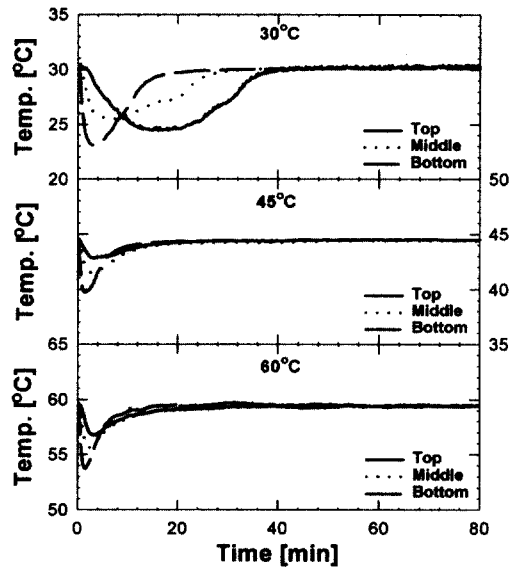


Fig. 8. Temperature change in column for purge by nitrogen at various outer temperatures[Flow rate=1.0NL/min].

있다. 온도와 유량이 달라진 탈착 실험에서도 마찬가지로의 현상이 관찰된다. 따라서 이러한 결과를 실제 공정에서 세정에 의한 탈착 단계의 탑으로부터 나오는 기체의 흡착질 농도를 on-line 상태에서 계속 측정을 하지 않더라도 탈착이 완료되는 시점을 탑안의 온도변화만을 측정함으로써 예측하는데 활용될 수 있다. 즉 조업단계의 시간을 조절하는 공정제어를 쉽게 이루어지게 하는데 도움이 될 수 있을 것이다.

벤젠이 전혀 흡착되어 있지 않은 탑으로 벤젠을 포함하는 기체를 통과시키다가 탑 출구의 농도가 도입농도의 5%가 되는 시점에서 흡착 단계를 중지한 후 세정기체를 일정한 방향으로 주입하였다. 이 때 주입방향을 cocurrent와

countercurrent로 나누어 실험한 탈착곡선을 Fig. 9에서 비교하였다. Fig. 8에서는 세정기체의 유량을 0.5NL/min으로 하였을 때의 경향이 보이는데 countercurrent 세정인 경우에 출구 쪽 농도변화가 더 급격히 나타나 있다. 이러한 이유는 원료가스 흡착시에 탑의 입구 쪽은 흡착질이 흡착평형상태에 가깝게 포화되어 있는 반면, 출구 쪽은 물질전달영역이 존재하여 흡착이 평형상태로 이루어져 있지 못하기 때문이다. 즉, countercurrent 세정인 경우에는 입구 쪽의 가스가 먼저 빠져 나와서 탈착 초기에 cocurrent 세정인 경우보다 더 높은 농도를 보이게 된다. 한편 세정기체의 유량이 1.0NL/min 이상으로 클 때에는 두 가지 세정 결과의 차이가 현저히 줄어들었다.

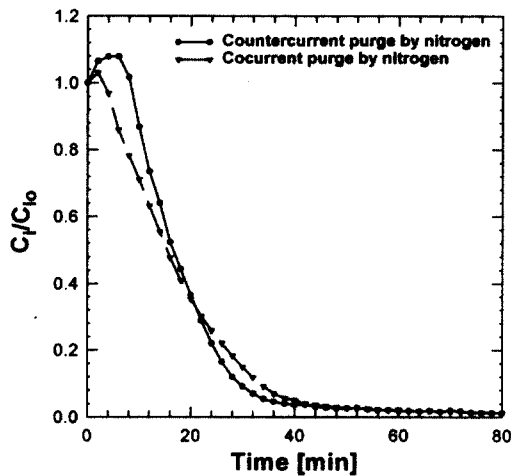


Fig. 9. Comparison of desorption curves for different purge gas flow directions at 30°C [Flow rate = 0.5NL/min].

이러한 현상을 검증하기 위하여 탑 내 온도변화를 살펴본 것을 Fig. 10에 나타내었다. Countercurrent 방향으로 세정기체를 주입하는 경우에는 탑의 하부 쪽에서 흡착제로부터 흡착질의 탈착이 먼저 진행되며 점차 상부 쪽으로 탈착이 진행되어간다. 따라서 탑의 하부온도가 먼저 떨어지기 시작하고 탑의 상부온도가 가장 나중에 떨어지게 된다. 한편 cocurrent 세정에서는 countercurrent 세정과는 반대로 온도 변화가 나타남을 알 수 있다.

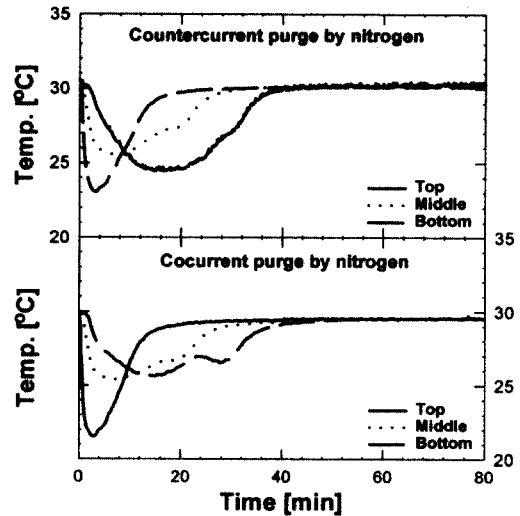


Fig. 10. Temperature change in column for different purge gas flow directions at 30°C [Flow rate = 1.0NL/min].

진공에 의한 탈착 특성을 살펴보기 위하여 탑 외부의 온도변화에 따른 countercurrent 방향으로의 진공 탈착 곡선을 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 진공 탈착은 순식간에 탈착이 일어나므로 온도에 따른 큰 차이를

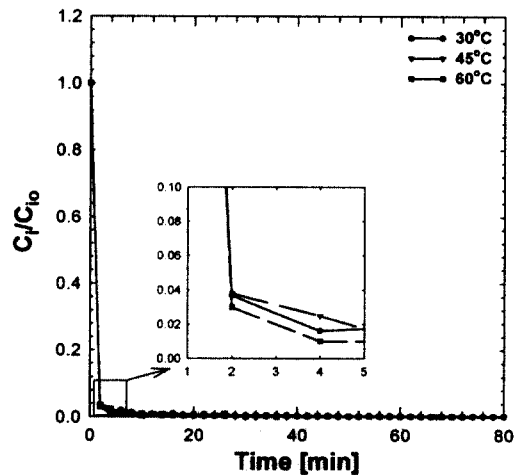


Fig. 11. Desorption curves for countercurrent vacuum purge at various outer temperatures.

측정할 수 없었다. 탑 안에서 온도 변화는 Fig. 12에 나타내었다. 진공 탈착의 방향에 대해서는 Fig. 13에 나타냈는데, cocurrent 및 countercurrent 방향에 따른 큰 차이를 측정하

긴 힘들었으나 countercurrent 방향이 약간 더 유리함을 알 수 있었다. 온도변화는 Fig. 14에 나타냈는데, 탈착이 수직초 안에서 이루어지므로 탈착 기체 흐름 방향에 따른 차이는 아주 작음을 알 수 있었다.

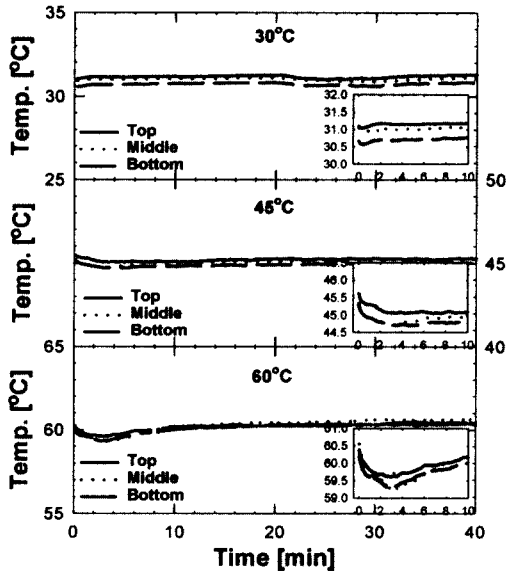


Fig. 12. Temperature change in column for countercurrent vacuum purge at various outer temperatures.

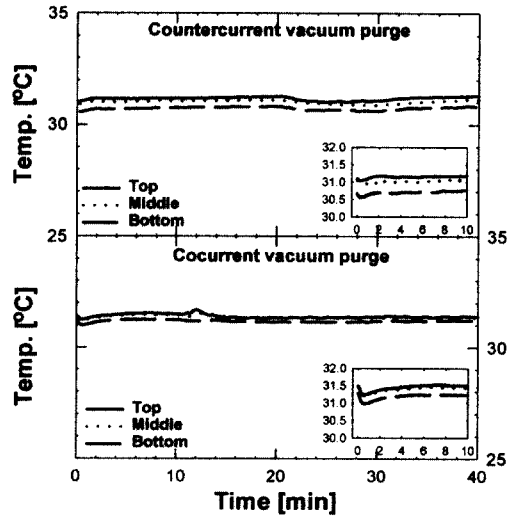


Fig. 14. Temperature change in column for different vacuum purge directions at 30°C.

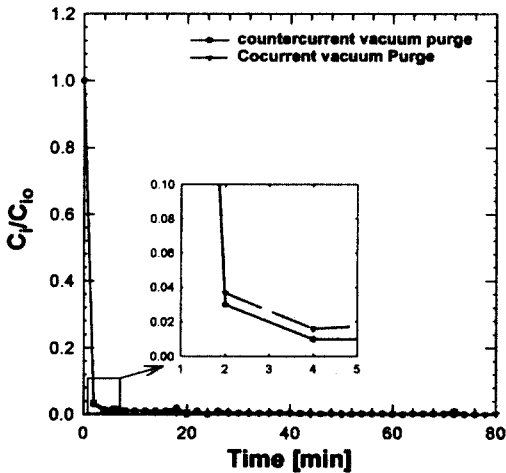


Fig. 13. Desorption curves for different vacuum purge directions at 30°C.

4. 결론

본 실험은 VOCs 물질 중 큰 비중을 차지하는 벤젠에 대하여 탈착시에 탈착곡선의 변화와 이에 따른 흡착탑 내부의 온도 변화를 통하여 탈착 특성을 알아보는데 그 목표를 두었다. 세정 기체 유량의 변화, 흡착탑 주위의 온도 변화, 세정 기체를 사용했을 때와 진공 탈착의 차이, 탈착 기체 흐름 방향이 cocurrent와 countercurrent 일 때를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

세정 기체 유량이 증가할수록 탑 안의 압력이 증가함에도 불구하고, 탑 안에서의 기체 선속도의 증가에 따라 탈착이 빨리 일어났다. 일정한 온도에서 유량이 다를 때 서로 다르게 나타나는 시간에 따른 탈착 곡선들이 시간을 무차원화 하면 비슷하게 모이는 것으로 나타났으며, 유량이 증가함에 따라 물질 전달 영향이 작아지면서 탈

착이 좀 더 빨리 진행되었다. 또한 온도가 올라갈수록 유량이 달라지는 효과가 상대적으로 줄어들었다. 흡열과정인 탈착이 진행되면서 탑 안의 온도 강하가 관찰되었는데 세정 기체 유량이 증가할수록 온도 강하가 짧은 시간안에 더 급격히 일어났다. 탑 주위의 온도가 올라가도 높은 온도에서의 흡착량 감소로 탈착이 빨리 진행되어 온도 변화가 급격히 일어났다. 탈착에 의해 내려갔던 탑의 상부 온도가 다시 원래의 온도로 회복되는 시간이 농도곡선에서 나타나는 탈착 완료 시간과 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 현상이 조업단계의 시간을 조절하는 공정 제어에 활용될 수 있을 것이다.

질소를 이용한 세정 기체에 의한 방법과 진공 탈착의 경우를 비교해 보면, 진공 탈착에 의한 방법이 탈착성능이 월등한 것으로 나타났고, 두 가지 경우 모두 세정 방향을 고려한 결과 cocurrent 세정보다는 countercurrent 세정의 경우에 더 빨리 탈착되었다. 세정 단계에 앞서는 흡착 단계에서 파과가 일어나는 순간에 탑 출구 쪽에 물질전달 영역(mass transfer zone)이 존재하기 때문에 이러한 현상이 측정되었다.

감사의 글

본 연구는 2000년도 환경청정기술연구센터의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한화진, "선진국의 VOC 규제 및 관리동향", *첨단환경기술*, 7, June, 2 (1997).
2. 한화진, "국내 VOC현황 및 배출원별 관리방향", *첨단환경기술*, 6, July, 1 (1996).
3. 박철진, "VOC의 발생 현황 및 안전보건환경에 미치는 영향", *한국산업안전공단, 안전* 98-17-248, 33-85 (1998).
4. S. W. Kang, B. H. Min, and S. S. Suh, "Breakthrough Behavior of Benzene and Toluene in Adsorption Bed", *J. Kor. Oil Chem. Soc.*, 17, June, 83 (2000).
5. H. S. Kim and Y. S. Park, "Adsorption Characteristics of Volatile Organic Compounds - BTX on Activated Carbon Fiber", *J. Kor. Soc. Atmospheric Environment*, 15, 805 (1999).
6. J. D. Seader and E. J. Henley, "Separation Process Principles", 820-823, *Wiley*, New York (1998).
7. J. H. Yun and D. K. Choi, "Equilibria and Dynamics for Mixed Vapors of BTX in an Activated Carbon Bed", *AIChE J.*, 45, 751 (1999).
8. J. H. Kim, C. W. Seong, H. Y. Park, C. H. Lee, and W. S. Kim, "Adsorption of Volatile Organic Compounds in Fixed Bed Packed with Activated Carbon Fibers", *Theories Appl. Chem. Eng.*, 3, 373 (1997).
9. J. H. Yun and D. K. Choi, "Adsorption Equilibria of Chlorinated Organic Solvents onto Activated Carbon", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 37, 142 (1998).
10. R. T. Yang, "Gas Separation by Adsorption Processes", p.93, *Butterworth*, New York (1987).
11. 이규성 외, "대기오염 제어공학", p. 415, 형설출판사, 서울 (2000).
12. H. S. Shin, Y. S. Kim, and K. S. Huh, "Measurements of Indoor and Outdoor Volatile Organic Compounds(VOCs) Concentrations in Ambient Air", *J. Kor. Soc. Atmospheric Environment*, 9, 310 (1993).
13. K. S. Hwang, D. K. Choi, and S. Y. Gong, "The Thermal Regeneration Characteristics of Volatile Organic Compounds on an Activated Carbon Bed(I):Adsorption Step", *J. of KIChE*, 36, April, 159 (1998).
14. D. J. Kim, W. G. Shim, and H. A. Moon, "Adsorption Equilibrium of Solvent Vapors on Activated Carbons", *Kor. J. Chem. Eng.*, 18, 518 (2001).
15. K. S. Na, Y. P. Kim, K. J. Moon, S. O. Baek, S. M. Hwang, and S. R. Kim, "Comparison of Sampling and Analysis Methods for Volatile Organic Compounds in Ambient Air", *J. Kor. Soc. Atmospheric Environment*, 14, 507 (1998).