

마이크로파를 이용한 흡착시스템에서 제올라이트내의 Benzene 흡착특성

도 상 현 · 최 성 우 · 김 정 배 · 박 상 원 · 김 윤 갑*
계명대학교 환경과학과, *계명문화대학 소방환경안전과
(2005년 7월 4일 접수; 2006년 3월 16일 채택)

Adsorption Characteristics of Benzene by Zeolite using Microwave Irradiation

Sang-Hyeun Doh, Sung-Woo Choi, Jung-Bae Kim, Sang-Won Park and Yoon-Kab Kim*

Department of Environmental Science & Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

*Department of Fire & Environmental Safety, Keimyung College, Daegu 704-703, Korea

(Manuscript received 4 July, 2005; accepted 16 March, 2006)

Adsorption characteristics of benzene by zeolite were investigated using irradiating microwave. Experimental apparatus was applied to a U-type fix-bed column equipped with microwave system. Zeolite, itself, seems to be inappropriate to remove benzene because of a hygroscopic property. Microwave irradiation to zeolite, however, brings about decreasing H₂O adsorption and increasing benzene adsorption. This causes that the dipole material such as H₂O was vibrated and heated by irradiation of microwave and desorbed from zeolite. And then, benzene starts to be absorbed by zeolite. In this study, the results showed that the selective adsorption of benzene was occurred by the microwave irradiation and the adsorption capacity of benzene was increased by increasing microwave energy. As a results, it was found that the zeolite could be used to adsorb benzene with microwave and this method make it feasible simultaneously to adsorb and desorb benzene.

Key Words : Benzene, Adsorption, Microwave

1. 서 론

벤젠은 벤젠고리만으로 이루어져 있는 기본적인 방향족탄화수소화합물이며 화학반응의 기본적인 물질로서 화학공업에서 널리 이용되고 있다. 대표적인 유기용제로서 다양하게 사용되었으나, 증기상태로 흡입하거나 피부접촉으로 흡수되며, 그 독성이 알려지면서 그 사용이 줄어들고 있다¹⁾.

벤젠은 VOCs(Volatile Organic Compounds)의 대표적 물질로 주로 유기용제를 사용하는 산업공정에서의 방출과 저장·유통시설에서의 증발로 배출되는데, 이들 배출경로가 일정하지 않고 배출원의 종류도 다양하며 소규모 시설에서 발생하는 경우가

많아 총괄적이고 체계적인 관리가 어려운 실정이다. 최근 국내에서도 벤젠, 톨루엔 등 VOCs의 심각성을 인식하여 법적 규제를 강화하고 있으나 제거기술의 미비로 효과적으로 대응을 하지 못하고 있는 실정이다²⁾.

VOCs의 제어기술은 무해화(분해) 및 분리회수기술로 나눌 수 있으며 열소각(Thermal Oxidation)³⁾, 촉매소각(Catalytic Oxidation)⁴⁾, 생물여과(Bio-filtration)⁵⁾ 등은 VOCs 분해시 이용 가능한 기술이다. 특히 VOCs가 단일배출구에서 비교적 높은 농도로 배출되고 경제성이 있는 경우에는 회수시설을 설치하는 것이 바람직하다. VOCs 회수에 이용되는 방법은 배출되는 VOCs농도와 배출가스의 유량에 따라 흡착, 흡수, 냉각응축, 응축회수 등의 방법이 이용되고 있으며 흡착법이 대표적인 방법이라고 볼 수 있다. 흡착법은 각종 흡착체의 흡착 특성을 이용하므로 흡착하기 쉬운 VOCs에 적용이 한정되고, VOCs

Corresponding Author : Sang-Hyeun Doh, Department of Environmental Science & Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea
Phone: +82-53-580-5553
E-mail: shdoh@kmu.ac.kr

의 흡착성이나 흡착제를 노화시키는 고비점 물질이나 중합성 물질의 유무를 고려하여야 한다⁶⁻⁸⁾.

최근에 식품의 가열, 해동, 건조, 쓰레기 소각, 각종 질환 치료, 우주발전의 송전, 각종 센서류등의 여러 분야에서 마이크로파나 고주파 등을 응용한 다양한 기술이 개발되고 있다⁹⁻¹¹⁾. 마이크로파에 의한 응용기술은 본질적으로는 온도에 의한 제어의 일종이지만 특정물질에 직접 에너지를 줄 수 있기 때문에 효율면과 선택적인 면에서 새로운 효과를 기대할 수 있을 것이다. 마이크로파에 의한 빠른 온도의 상승이나 특정분자의 여기 특성이 서로 잘 조합된다면 새로운 흡착기술로써의 가능성이 있다. 또한 마이크로파를 이용함으로써 흡탈착의 효율적 전환은 장치의 간편화, 가동시간을 단축할 수 있는 등 여러 가지 이점을 가지고 있다¹²⁻¹³⁾.

본 연구에서는 제올라이트를 이용하며 VOCs를 흡착 분리하고 마이크로파를 이용한 흡탈착특성을 분석하였다. 본 연구에서는 마이크로파의 에너지별 특성, 제올라이트의 이성분계 파과특성 및 마이크로파를 이용시 벤젠의 흡탈착 특성을 분석하였다. 본 연구의 결과는 향후 VOCs의 회수기술의 기초 자료로 활용될 수 있다.

2. 연구방법

본 연구에 사용된 실험 장치는 일반적인 유통식 흡착장치에 마이크로파 조사장치(2,450MHz, 0~

1,200W)를 부착한 형태로, Fig. 1은 흡착장치이며, Fig. 2는 마이크로파 조사장치이다.

흡착장치로 MFC(mass flow controller)로 가스의 유량을 조절하였으며, 총 유량이 400 ml/min이 되도록 하였다. 흡착질 가스인 벤젠의 농도는 530±30 ppm으로 나머지를 헬륨가스로 충전하여 반응기로 흘러 보냈다. 수분의 함량은 일정한 온도를 유지하는 습발생기를 통하여 수증기압에 해당하는 양만큼 유입되도록 하였으며 10,000ppm을 유지하도록 하였다. 각각의 벤젠과 수분은 혼합기에서 잘 혼합된 후 흡착관으로 유입되도록 하였으며, 가스 출구에는 열선을 감아 100℃ 정도를 유지하도록 하여 탈착물이 응축되지 않도록 하였다.

마이크로파 시스템은 Fig. 2 나타내었으며 Fig. 1의 흡착장치를 연결하였다. 흡착장치내 관은 유전손실이 아주 작은 석영체로서 내경 8 mm의 U자관을 사용하였으며, 내부에 흡착제로 NaY형 제올라이트($\text{Na}_{56}\text{Al}_{56}\text{Si}_{136}\text{O}_{384}$)를 약 0.6 g을 충전하였다. 여기에 흡착제로 사용한 제올라이트는 마이크로파에 의한 가열효과가 적고, 비표면적이 768 m²/g이며, 함수율 24%의 특성을 가진 NaY형 제올라이트를 사용하였다. 이 석영흡착관은 테프론으로 제작된 항온조에 넣고 유전손실이 적은 프레온 액체를 냉매로 흘려 흡착층 온도를 제어하였다. 흡착층 중앙부에는 마이크로파의 영향을 받지 않는 일본 Anritsh Meter사의 Amoth FX 8500 광화이버 온도계를 사용하여 흡

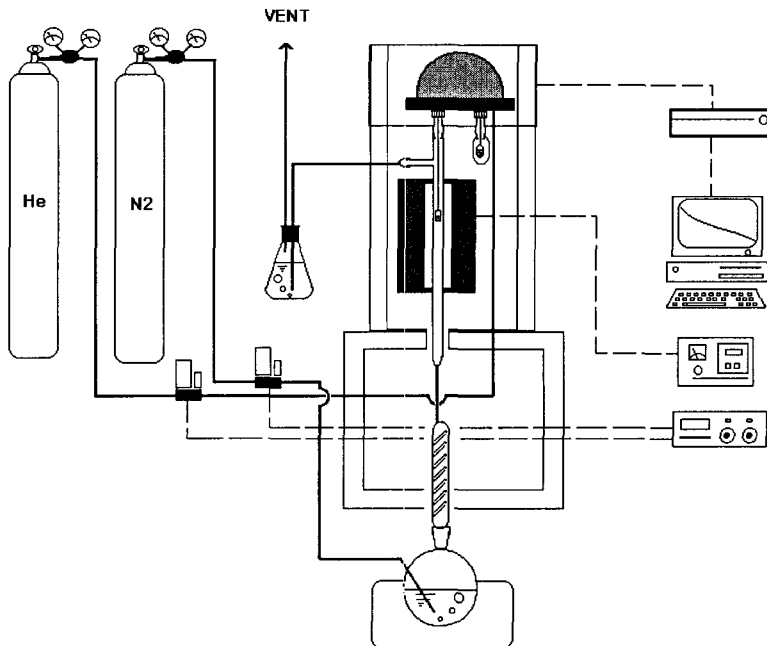


Fig. 1. Schematic of adsorption apparatus.

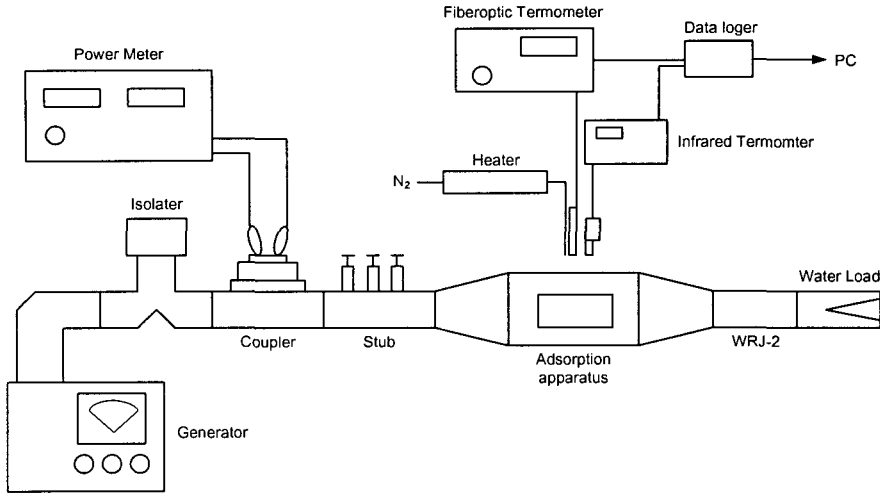


Fig. 2. Schematic of microwave radiation for adsorption agent.

착층 내부온도를 측정하였다. 마이크로파 발전관은 2,450 MHz, 최대출력 1.2 kW의 마그네트론관을 사용하였고, 마이크로파는 발전관으로부터 도파관을 통하여 도입되었으며 도파관 중간에 흡착관을 설치하였다. 출구가스는 Gas Chromatography - Mass Selective Detector(GC-MSD)로 연속적으로 농도를 측정하였다.

본 실험의 조작방법은 다음의 순서로 실시하였다. 흡착제가 충전된 흡착관에 He를 흐르게 하면서 가열을 행하여 흡착해 있던 수분과 불순물을 탈착시켰다. 흡착관에 벤젠가스를 유입시켜 파파에 도달할 때까지 흡착을 시켰다. 이때 흡착층 외측에 냉매를 흘려 흡착층의 온도를 조절 후 파파에 도달한 시점에서 마이크로파를 조사하였다. 마이크로파를 적당한 시간으로 조사한 후 정지시키고, 수분의 출구농도가 입구농도와 같아질 때까지 계속 가스를 유입시킨 후 출구농도를 연속적으로 분석하고 온도변화를 기록하였다.

제 1단계는 마이크로파를 조사하기 전으로 흡착층 전체가 수분으로 채워져 있는 상태이다. 제 2단계는 마이크로파 조사에 의해 수분이 탈착되고 빈 자리에 입구로부터 벤젠이 흡착(제 1흡착)하는 단계이다. 마이크로파가 조사되면 계 전체가 여기되어 있기 때문에 Fig. 3과 같이 입구농도 부분에도 빈자리가 완전히 채워지지 않는다. 마이크로파의 조사시간이 짧은 경우는 수분의 탈착량이 적어지고 벤젠이 흡착할 수 있는 자리도 감소하게 된다. 제 3단계는 마이크로파의 조사를 중지함으로써 계 전체의 여기가 없어지게 되고 입구로부터 수분의 흡착이 시작된다. 이러한 실험결과를 미루어 볼 때 마이크로파 조사에서 유전율이 높은 수분은 온도 상승을

일으킬 수 있는 좋은 인자가 될 수 있다. 즉 포화된 흡착질의 탈착에 순간 온도를 높여 순간탈착을 용이하도록 할 수 있고 유출농도를 높일 수 있어 회수에 용이하리라 판단된다.

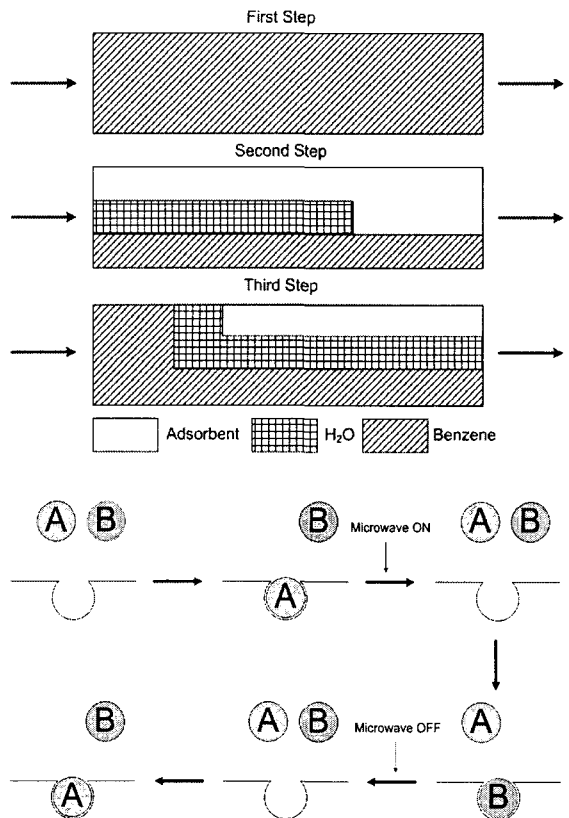


Fig. 3. Conception illustrations for adsorption step under microwave irradiation.

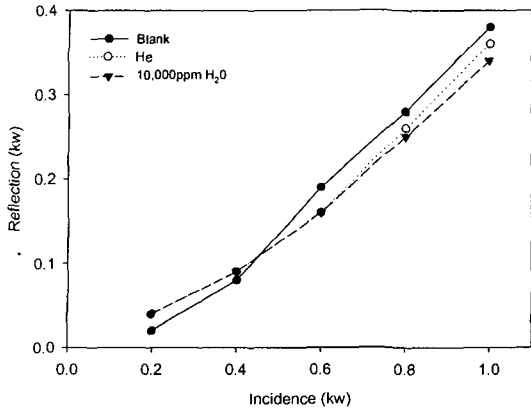


Fig. 4. Efficiency of microwave energy.

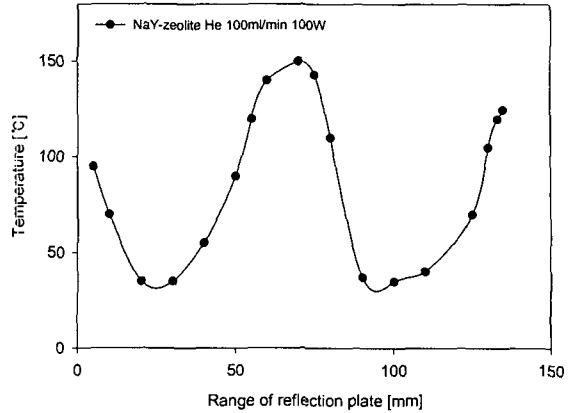


Fig. 5. The effect of temperature according to the distance of reflection plate.

3. 연구결과

3.1. 마이크로파 조사의 효율평가

마이크로파 시스템내 흡착관의 순수 마이크로파 조사효율을 평가하였으며 이를 Fig. 3에 나타내었다. 흡착관에 제올라이트를 충전하고 He만 흘렸을 때, He과 수분 10,000 ppm정도를 흘렸을 경우의 입사전력 및 반사전력을 비교하였으며, 더불어 blank 상태도 함께 비교하였다. Blank 상태가 약 60%의 로스가 있는데 이는 장치 내부에서 에너지 소비가 있거나 흡착관의 위치가 마이크로파가 집중되는 부분이 아닌 이유로 판단된다. He 단독이나 He과 수분의 혼합가스의 경우에도 차이가 별로 없는 것으로 나타나 수분의 탈착에 소비되는 에너지는 상당히 작은 것으로 판단되며, 냉매를 흘린 상태에서도 거의 일치하는 것으로 보아 냉매에 의한 에너지 소비는 없는 것으로 판단된다.

본 장치에서 에너지 효율을 높이기 위하여 마이크로파가 집중되는 위치를 도파관의 끝 부분의 반사판의 위치를 조절하여 온도 변화를 조사하여 Fig. 5에 나타내었다. 도파관과 반사판 사이의 이격거리를 7 cm정도로 이격하였을 때 가장 높은 온도를 나타내는 것으로 보아 마이크로파 효율이 가장 높은 상태를 나타내었다. 이는 반사판에 의하여 마이크로파가 반사되어 반응관에 집중이 되는 7 cm이격거리를 두었을 때 가장 높은 효율을 보였으며, 약 2.5, 10.0 cm에서는 마이크로파의 상쇄에 의해 가장 낮은 효율을 나타내었다.

가장 높은 효율을 나타내는 도파관 끝부분과 반사판 사이의 거리를 7 cm로 하여 반사판을 고정시키고 출력을 변화에 따른 온도 변화를 조사하여 Fig. 6에 나타내었다. 이 경우에 출력이 90 W 정도에 온도가 상승하였으나 200 W 부터는 온도가 일정한

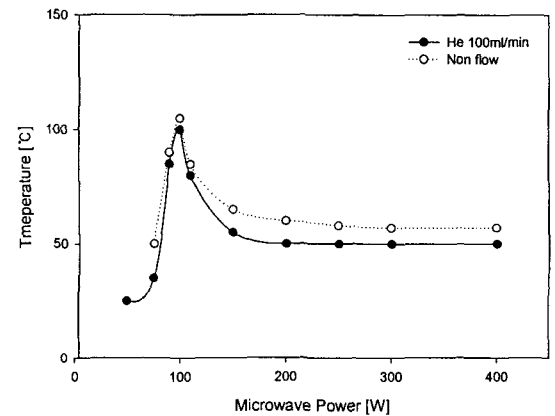


Fig. 6. Relationship between microwave power and temperature on the NaY-zeolite.

것으로 나타났다. 90 W에서는 제올라이트가 함유하고 있는 수분에 의해서 약 100 °C까지 승온하여 최고의 온도를 나타냈으며, 150 W이후 보다 높은 출력에서는 급격한 승온에 따라 제올라이트 내의 수분이 증발함에 따라 약 50 °C에서 유지되는 현상이 나타났다. 본 실험에 사용한 출력 범위에서는 위치에 의한 변화는 없는 것으로 판단된다.

3.2. 제올라이트의 파과특성

벤젠과 수분 2성분계의 혼합가스가 흡착온도 25°C, 유량 400 ml/min의 조건에서 나타난 제올라이트의 파과곡선을 Fig. 7에 나타내었다. 본 실험에서 벤젠은 15분 정도에서 파과가 시작되었으며, 수분은 50분 정도에서 파과가 일어나기 시작하였다. 2성분계가 완전히 포화되는데는 약 90분 정도가 소요되었다. 제올라이트의 경우 고정층 흡착공정에서 다성분계에 대한 파과곡선의 형태는 많은 연구자들에 의해 rollup현상으로 알려져 있다. 이러한 현상은 약

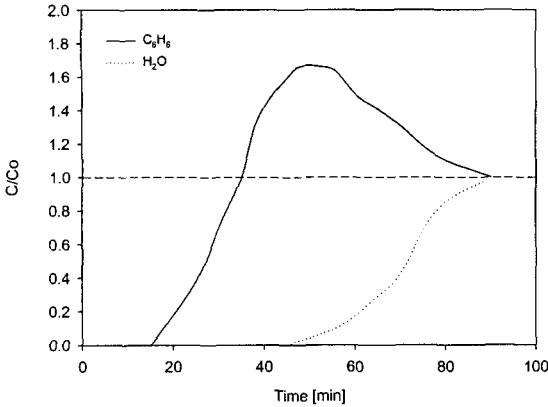


Fig. 7. Breakthrough curve for benzene/H₂O on NaY-zeolite.

흡착성 성분이 흡착된 자리에 강흡착성 성분으로 치환되는 것이다. 벤젠과 수분의 2성분계가 입구로부터 유입되면서 흡착층의 입구부분부터 소수성인 벤젠과 친수성인 수분이 함께 흡착하며 흡착대가 형성된다. 흡착대가 파파가 되는 시점에서 소수성 약흡착성인 벤젠은 친수성 강흡착성인 수분으로 치환되어 흡착이 이루어진 벤젠의 탈착이 진행됨에 따라 벤젠의 파파곡선이 먼저 선행되며 강흡착성인 수분이 벤젠이 탈착된 흡착대에 흡착하며 진행된다.

3.3. 마이크로파 조사에 의한 벤젠 및 수분의 흡착거동

마이크로파를 조사하여 2성분계의 흡착거동을 검토하였다. Fig. 8은 마이크로파를 조사하지 않은 일반적인 흡착조작에서 마이크로파를 조사한 결과 벤젠과 수분의 출구농도 변화를 나타내었다. 마이크로파의 출력은 0.8 kW로 하였으며, Fig. 8 (a)는 벤젠의 출구농도, Fig. 8 (b)는 수분의 출구 농도를 나타내었다. 벤젠 530 ppm과 수분 10,000 ppm의 혼합가스가 파파에 도달한 후, Fig.8 (a)에 표시된 S 시점에서 마이크로파를 조사하였다. 이때 흡착층의 온도를 25℃로 유지하도록 하였다.

2성분계가 포화된 후 마이크로파를 조사시키면 수분의 출구농도가 급격하게 증가하였으며, 이는 마이크로파에 의해 제올라이트에 흡착된 수분이 여기되어 탈착되고 있음을 나타내고 있다. 마이크로파를 조사하자마자 벤젠이 순간적으로 탈착이 이루어지며 또한, 이때 벤젠의 경우 수분의 공존 하에서도 벤젠의 일부가 흡착하는 것으로 사료된다.

수분의 탈착농도가 계속 증가하다가 감소하여 입구농도에 가까워 지는데 이는 마이크로파 조사에 기인하여 흡착된 수분의 탈착이 종료된 것을 나타내고 있다. 한편 벤젠에서는 S시점에서부터 출구농

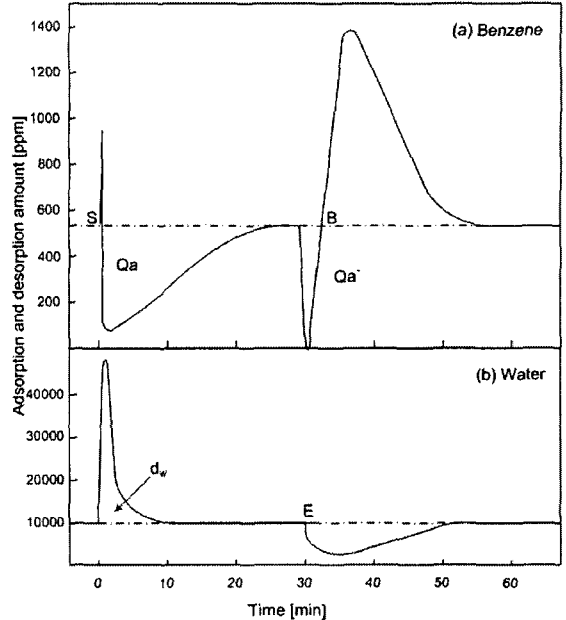


Fig. 8. A typical adsorption-desorption curve under microwave irradiation.

도가 감소하기 시작하였다. 이는 수분의 탈착에 의해 제올라이트내의 빈 흡착자리에 벤젠이 흡착된 것이다(제 1흡착; Qa). 이후 벤젠 농도의 감소경향이 적어지면서 마이크로파 조사 상태하에서의 흡착은 종료되었다. 수분과 벤젠이 입구농도에 가까워지는 E시점에서 마이크로파의 조사를 정지하면 수분의 농도는 입구농도보다 작아졌으며, 이는 마이크로파에 의한 여기가 없어지기 때문에 제올라이트에 대한 일반적인 흡착이 시작되는 것으로 생각된다. 같은 E시점에서의 벤젠의 출구농도는 다시 감소하는 것으로 보아, 흡착이 종료한 벤젠이 다시 흡착하였다(제 2흡착; Qa'). 이 상태에서 마이크로파를 조사하지 않은 상태에서 혼합가스를 계속 흘리면 흡착력이 강한 수분이 계속 흡착하기 때문에 B시점 이후, 2성분계의 파파곡선과 같이 수분의 치환흡착에 의해 벤젠은 탈착되었다.

이상의 결과로부터 마이크로파의 조사에 의한 흡탈착 현상에서 흡습성이 강한 제올라이트에서는 수분의 흡착이 억제되고, 반면에 벤젠의 흡착이 증진되는 효과를 나타내는 것을 알 수 있었다. 마이크로파를 조사하면 유전율이 높은 수분이 먼저 유출되고 흡착제의 빈 공간을 벤젠이 흡착하였으며 온도 상승도 일어났다. 출구가스의 정성분석 결과 벤젠의 분해로 인해 발생하는 CO₂ 와 H₂의 가스가 나타나지 않았으며, 마이크로파 조사로 인해 제올라이트의 온도가 약 50 ℃로 상승하여 벤젠의 분해로 인한 출

구농도의 저하보다는 흡착에 의한 결과로 사료된다.

3.4. 마이크로파의 출력에 따른 benzene 흡착 특성
 마이크로파의 출력에 따른 영향을 알아보기 위하여 조사시간을 15분, 흡착층 온도를 25℃로 하고 마이크로파 출력을 0.2 kW에서 0.8 kW로 변화시켰을 때 벤젠의 제 1흡착량(Qa)과 제 2흡착량(Qa'), 전흡착량을 Fig. 9에 나타내었다. 마이크로파의 출력을 증가할수록 제 1흡착량과 제 2흡착량이 함께 증가하였다. 마이크로파의 출력이 증가하면 벤젠의 전흡착량의 증가가 크게 나타났는데 이로부터 마이크로파가 흡착에 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있었다.

마이크로파의 출력이 증가하면 벤젠의 전흡착량의 증가가 크게 나타났는데 이로부터 마이크로파가 흡착에 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 수분의 탈착량과 벤젠의 흡착량에 대한 상대흡착량을 나타내었다. 마이크로파의 출력이 증가할수록 상대흡착량이 증가하지만 출력 증가에 따라

증가폭이 감소하였다. 즉 출력의 증가에 따라 벤젠의 흡착량이 증가하지만 0.6 kW이상에서는 수분의 탈착능보다 벤젠의 흡착능이 감소하였다.

4. 결 론

마이크로파에 의한 흡탈착 현상은 흡착제와 특정 분자의 여기에 의해 일어난다고 볼 수 있다. 흡착제의 마이크로파 가열은 흡착제의 유전손실계수가 매우 클 경우 쉽게 흡착제 자체가 발열하게 된다. 이러한 발열은 식 (1)과 같이 표현된다¹⁵⁾.

$$P = 0.556 \cdot f \cdot E^2 \cdot \epsilon \cdot \tan\delta \times 10^{-10} [W/m^2] \quad (1)$$

여기서, f는 마이크로파의 주파수, E는 전해강도, ε는 유전율, 그리고 tanδ는 유전손실각이다. 특히 ε tanδ는 유전손실계수이며 물질고유의 수치이다. 또한 마이크로파의 가열에는 흡착제의 발열 외에 흡착분자들이 직접 여기하는 경우가 있다. 흡착분자도 흡착제와 같이 유전손실에 의한 발열현상을 생각할 수 있다. 분자는 기체상태에는 손실계수가 현저히 낮고 발열되는 여기상태까지는 달하지 않는다. 흡착 분자의 경우는 액체상태에 가까운 것이므로 마이크로파 가열이 생기는 것으로 여겨진다. 특히 H₂O, H₂S 등과 같은 쌍극자 모멘트를 가지는 물질의 경우에는 유전손실이 상당히 크다.

본 연구에서 흡착제로 사용한 제올라이트의 경우 유전율이 상당히 낮고, 실제로 수분이 완전히 제거된 상태에서 마이크로파를 조사하면 온도상승이 거의 나타나지 않았다. 이로부터 흡착제의 마이크로파 가열에 의한 현상은 아니고 흡착분자인 수분에 의한 가열현상으로 판단된다. 이러한 흡착분자의 유전손실 차이가 있다면 같은 여기의 원리로 해석할 수 있다.

특히 수분은 쌍극자 모멘트를 가지고 있어서 유전손실이 큰 물질은 발열강도가 다른 물질보다 크므로 탈리 정도가 각각 다를 것으로 예상된다. 유전계수가 각각 다를 것으로 예상된다. 유전계수가 각각 다를 경우 유전계수가 큰 물질은 작은 물질보다 탈착이 빨리 일어나고 탈착된 공간에 유전계수가 작은 물질이 흡착하리라 여겨진다. 그러므로 흡착과 탈착이 동시에 진행되는 새로운 개념의 분리공정으로 마이크로파에 의한 흡착실험을 행할 수 있었다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

첫째, 마이크로파의 조사효율을 평가하였을 때 blank 상태에서 약 60%의 손실이 있었는데 이는 장치 내부에서 에너지 소비가 있거나 흡착관의 위치가 마이크로파가 집중되는 부분이 아닌 이유로 판단이 되며, 도파관과 반사판 사이의 이격거리를 7

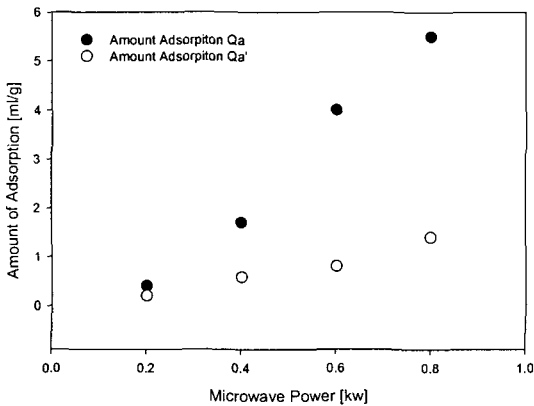


Fig. 9. Relationship between adsorption amount of benzene(Qa+Qa') and microwave power.

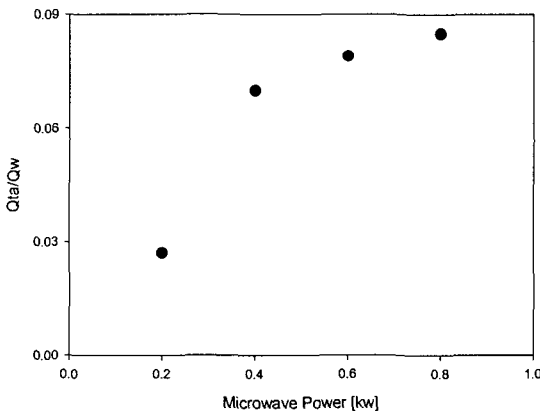


Fig. 10. Relationship between relation amount of adsorption and microwave power.

cm정도로 이격하였을 때 가장 높은 효율을 나타내었다.

둘째, 제올라이트의 파과특성을 살펴보기 위하여 벤젠과 수분 2성분계 혼합가스를 제올라이트를 통과시켜 본 결과 벤젠은 약 15분, 수분은 약 50분 정도에서 파과가 일어나기 시작했다. 벤젠은 전형적인 roll-up현상이 일어났으며 강흡착성 성분인 수분이 벤젠과 치환되어 벤젠을 탈착시키면서 진행되기 때문으로 사료된다.

셋째, 마이크로파를 이용한 수분과 벤젠의 2성분계 흡착에 관하여 검토한 결과, 마이크로파의 조사에 의해 수분과 벤젠의 분리가 가능하였고, 제올라이트에서 벤젠의 흡착을 증진시키는 것을 알 수 있었다.

넷째, 마이크로파의 출력에 따른 벤젠의 흡착 특성을 알아보기 위해 0.2 kw에서 0.8 kw로 변화시켰을 때 벤젠의 제 1흡착량과 제 2흡착량이 함께 증가하였으며, 전흡착량의 증가가 크게 나타나 마이크로파가 흡착에 큰 영향을 끼친다는 것으로 판단된다.

제올라이트는 흡습성이 강하기 때문에 수분을 함유한 벤젠의 경우, 벤젠의 흡착에는 적절하지 못한 것으로 알려져 있다. 하지만 본 연구결과에서는 마이크로파를 이용함으로써 수분의 흡착을 어느 정도 막고, 벤젠의 흡착이 일어나는 결과로부터 제올라이트의 용도를 확대시킬 수 있을 것이며 흡착 탈착공정을 하나의 시스템내에서 제어할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RT104-03-02) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- 1) 오현철, 김치년, 원종욱, 김현수, 김형렬, 노재훈, 2004, 저농도 벤젠노출평가를 위한 요중 trans, trans-muonic acid의 유용성, 한국산업위생학회지, 14(2), 155-164.
- 2) 신창섭, 김기환, 원정일, 2001, PCB 제조공정에서 발생하는 VOCs를 처리하기 위한 흡착제의 흡착특성, 한국대기환경학회지, 17(1), 67-74.
- 3) Dellinger, B. et al., 1990, Development of Thermal Stability Ranking of Hazardous Organic Compound Incinerability, Environmental Science and Technology, 24,

- 4) Guisnet, M. et al., 1999, Catalytic Oxidation of Volatile Organic Compounds 1. Oxidation of Xylene over a 0.2 wt% Pd/HFAU(17) catalyst, Applied Catalysis b: Environmental, 20, 1-13.
- 5) 이석희, 이동환, 이민규, 2003, 스코리아를 담체로 한 Biofilter에서 Benzene 제거 특성, 화학공학회, 41(6), 781-787.
- 6) 김한수, 박영성, 2003, 활성탄으로 충전된 고정흡착층에서 벤젠과 톨루엔의 이성분 흡착특성, 대한환경공학회, 25(8), 977-983.
- 7) Chang, Y. C. and C. T. Carlisle, 2001, Microwave process for volatile organic compound abatement, J. Air Waste Manage. Assoc., 51, 1628-1641.
- 8) 안희관, 김윤갑, 2002, 마이크로파를 이용한 VOC 제거기술의 상용화연구, 대구지역환경기술개발센터, 36.
- 9) 권영주, 김공환, 김현구, 2002, 마이크로웨이브 추출조건에 따른 곰취 추출물의 총 폴리페놀 함량 및 항산화작용의 변화, 한국식품저장유통학회지, 9(3), 332-337.
- 10) 강호영, 2001, 단척 통나무와 선반가공목의 마이크로웨이브-진공 건조, 목재공학, 29(4), 25-32.
- 11) 배성문, 김정환, 조철우, 정태준, 김정목, 이승철, 2001, 맥강의 항산화능에 대한 Microwave의 영향, 한국농화학학회지, 44(4), 235-239.
- 12) Tai, H. S. and C. H. G. Jou, 1999, Application of granular activated carbon packed-bed reactor in microwave radiation field to treat phenol, Chemosphere, 38(11), 2667-2680.
- 13) Pilter, Z., S. Szabo, M. Hasznos-Nezdei and E. Pallai-Varsanyi, 2000, X-ray diffraction study of the effect of microwave treatment of zeolite Na-A, Microporous and Mesoporous Materials, 40, 257-262.
- 14) Valente Nabais, J. M., P. J. M. Carrotte, M. M. L. Ribeiro Carrott and J. A. Menendez, 2004, Preparation and modification of activated carbon fibers by microwave heating, Carbon, 42, 1315-1320.
- 15) 越島 哲夫, 1994, 마이크로파加熱技術集成, (株) オフイス東和, p.144.