

톨루엔 흡착제거를 위한 회전식 흡착제거장치 설계

김홍수, 유윤중, 주국택<sup>†</sup>, 설용건<sup>\*</sup>, 한문희

한국에너지기술연구소 기능재료연구팀, 한국에너지기술연구소 분리공정연구센터<sup>†</sup>,  
연세대학교 화학공학과<sup>\*</sup>

System Design Using Honeycomb Ceramic Rotor  
for Toluene Removal by Adsorption Method

Hong-Soo Kim, Yoon-Jong Yoo, Kuck-Tack Chue<sup>†</sup>,  
Yong-Gun Shul<sup>\*</sup> and Moon-Hee Han

Korea Institute of Energy Research, Functional Materials Research Team

Korea Institute of Energy Research, Separation Process Research Center<sup>†</sup>

Yonsei University, Department of Chemical Engineering<sup>\*</sup>

1. 서론

VOC는 volatile organic compound의 약자로서 toluene, benzene, MEK, MIBK 등 자동차 운행, 도장산업, 인쇄업, 대형 세탁시설, 유류저장 및 출하시설에서 주로 배출되는 유기성 배기배출물을 총칭하는 개념이다. VOC는 작업현장에서 악취를 발생시켜 작업현장에서의 쾌적성을 해치기도 하지만, 태양에너지를 받아 오존을 형성하기 때문에 인체에 크게 해로운 역할을 한다. 정부에서는 대기환경보전법을 제정하여 휘발성유기화합물질 배출억제 정책을 실시하고 있으며, 배출업소에 대하여 휘발성유기화합물질 방지시설 설치를 의무화하고 있다.

휘발성유기화합물질 처리 방법인 열소각, 촉매소각, 흡착, 저온응축, 흡수, 생물학적 처리 방법 가운데 흡착법이 저농도의 휘발성유기화합물질의 제거방법으로 가장 탁월한 성능을 발휘하는 것으로 알려져 있으며, 최근에는 다수의 고정층 또는 유동층 흡착탑을 사용하는 대신 세라믹슈트에 활성탄 또는 소수성 제올라이트를 함침한 회전식 벌집상 흡착제를 사용하는 흡착공정이 각광을 받고 있다.

본 연구에서는 VOC 흡착 rotor를 제조하기 위한 전단계로서 인장강도가 크고, 밀도는 작은 세라믹 슈트를 제조하였으며, 이 세라믹슈트를 이용하여 회전식 벌집상으로 성형한 후, 흡착제를 함침시켜 VOC 흡착 rotor를 제작하였다. 제작된 흡착 rotor는 흡착 탈착 거동 실험장치를 이용하여 측정장치를 도장산업과 인쇄업종에서 많이 발생하는 톨루엔에 대한 흡착 탈착 실험을 수행하였다. 최종적으로 톨루엔의 흡·탈착 성능 측정 결과로부터 실제로 사용할 수 있는 크기인 직경 35cm, 폭 40cm인 rotor를 사용하여 300 ppmv인 오염공기를 처리하는 경우를 가정하여 시스템 설계자료를 계산하였다.

2. 실험 장치 및 방법

1) 세라믹 슈트의 특성 개선

세라믹 슈트를 편파성형체로 성형할 때 세라믹 슈트가 골 롤러를 통과하게 되는데 이 때 세라믹 슈트에 가해지는 인장응력을 세라믹 슈트가 견뎌야 한다. 세라믹 슈트의 인장강도가 약하면 골 롤러를 통과하는 동안 세라믹 슈트가 파열됨으로써 세라믹 슈트가 파형을 유지하지 못하고 허니컴으로 성형될 수 없다.

본 연구에서는 세라믹 슈트의 인장강도를 증가시키기 위하여 세라믹 슈트의 골격을 이루는 세라믹 화이버 이외에 무기질 섬유로 글라스 화이버를 첨가하였다. 글라스 화이버의 첨가한

세라믹 슈트의 인장강도는  $41.5 \text{ kg/cm}^2$ 로 글라스 화이버를 첨가하지 않은 세라믹 슈트<sup>1)</sup>의 인장강도인  $8.5 \text{ kg/cm}^2$ 에 비해 5배 증가하였다. 또한, 무기질 접착제로 첨가한 실리카 졸의 용집을 촉진하기 위하여 황산알루미늄을 첨가함으로써 세라믹 슈트의 인장강도를  $60 \text{ kg/cm}^2$ 까지 증가시켰다.

## 2) 편파성형체의 제조

[그림 1]은 편파성형체 제조에 사용된 편파성형체 제조장치를 보인 것이다. 편파성형체는 세라믹 슈트 공급 롤 (6a)에 감겨 있는 세라믹 슈트를 접착제의 특성에 맞는 온도로 가열된 성형 롤 (1a, 1b)에 공급함으로써 성형된다. 성형이 이루어진 슈트는 접착제 도포 롤 (3)에 의하여 파형 슈트의 정점에 접착제가 도포된다. 반대쪽에서는 세라믹 슈트 공급 롤 (6b)에 감겨 있는 세라믹 슈트가 성형 롤 (2)과 압착 롤 (2) 사이로 공급되며, 접착제가 도포된 파형화 슈트와 만나며, 이 두 종류의 슈트는 압착 롤 (2)에 의해 접착 및 건조가 완료되고 편파성형체 (13)가 만들어진다.

## 3) 허니컴 rotor의 제조 및 흡착제의 함침

허니컴 rotor는 편파형 성형체를 둥글게 말아 접착함으로써 제조한다. 정적흡탈착 측정장치의 시편크기인 직경 9.7cm, 길이 20cm의 허니컴형 흡착 rotor를 제작하였으며, 오염공기와 허니컴 rotor와의 접촉면적을 넓히기 위해서 끝높이 2mm, 피치 4mm의 크기로 제작하였다. VOC 흡착용 rotor는 세라믹 허니컴 rotor에 흡착제인 제올라이트를 함침함으로써 완성되는데, 흡착제인 제올라이트는 독일의 Degussa-Huels에서 제조한 Y-type의 제올라이트 (DAY-P)를 선정하였다. 제올라이트는 자체적으로 접착력을 가지고 있지 않기 때문에 접착제로서 실리카 졸을 사용하였다. 실리카 졸과 제올라이트를 혼합한 용액은 15시간 이상 교반한 후 허니컴 rotor에 함침시켰다.

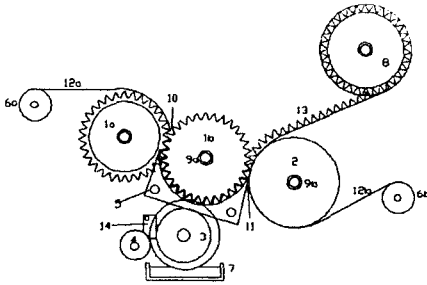
## 4) 흡착 탈착 기초 실험

개발된 흡착 rotor의 효율을 측정하고 회전식 흡착 장치의 설계자료를 도출하기 위하여 [그림 2]와 같은 고정식 흡탈착 기초실험장치를 설치하였다.<sup>2)</sup> 실험장치는 흡착탑 1기, 송풍기 1기, 오염공기 발포조 1기, 가열기 1기, 가스분석기 (HORIBA-THC) 1기로 구성하였다. 액체 톨루엔이 담긴 직경 10cm, 높이 30cm의 용기에 압축공기를 일정한 유속으로 발포시켜 얻어지는 가스를 송풍기에서 배출되는 외기와 혼합한 후 line mixer를 경유시켜 원료가스로 사용하였다. 원료가스의 농도는 발포조에 공급되는 압축공기의 속도로 조절하였으며, 균일한 농도를 얻기 위하여 발포조를 항온조와 연결시켜 발포조의 온도를 일정하게 유지시켰다. 재생가스는 외기를 일정한 온도로 가열한 후 흡착탑에 공급하였다.

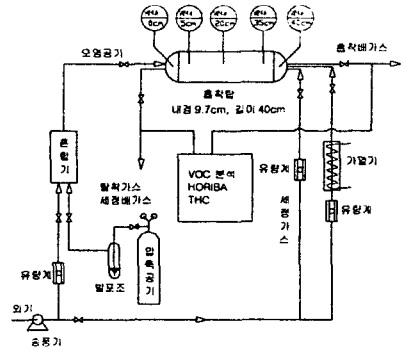
흡착제의 성능측정은 톨루엔의 흡착제거, 가열재생 및 세정냉각의 순으로 실시하였다. 흡착제거 이전에 세라믹 흡착 rotor를 흡착탑에 충전한 후,  $170^\circ\text{C}$ 로 가열된 외기를 공급하여 흡착제를 완전히 재생시키고, 외기를 공급하여 상온까지 냉각시켰다. 발포조에 압축공기를 흘려보낸 후 톨루엔 농도가 일정한 값에 도달하면 흡착탑에 공급하기 시작하고 이 때부터 출구에서 배출되는 톨루엔 농도를 시간에 따라 측정하였다.

흡착이 완료된 흡착탑은 고온으로 가열된 외기를 counter-current 방식으로 흡착탑에 공급하여 톨루엔을 탈착하였다. 이 때 흡착탑에서 온도의 변화를 시간과 위치에 따라 측정하였다. 탈착가스를 통해 배출되는 농축된 톨루엔 농도 역시 시간에 따라 측정하였다. 재생과정은 톨루엔 농도가 수 ppm<sub>v</sub>으로 떨어질 때까지 지속하였다.

세정과정은 가열재생이 끝난 흡착탑에 상온의 외기를 counter-current 방식으로 공급하여 상온으로 냉각시키고 동시에 흡착제에 잔류한 톨루엔 성분을 배출시켰다.



[그림 1] 세라믹 스위치 편파성형체  
제조장치의 수직 단면도



[그림 2] 흡착·탈착 거동 시험장치

### 3. 결과 및 고찰

#### 1) 오염공기의 톨루엔 농도가 300 ppm<sub>v</sub>일 때의 흡탈착 특성

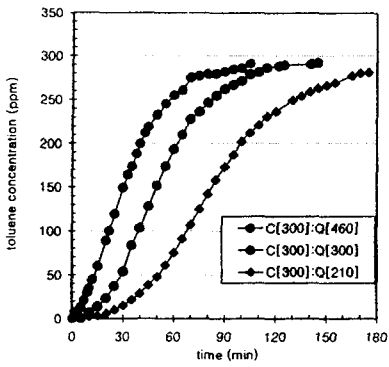
톨루엔의 농도변화에 따른 흡착량과 오염공기의 유속에 따른 파과곡선의 형태를 검토하기 위하여, 톨루엔의 농도를 300 ppm<sub>v</sub>와 600 ppm<sub>v</sub>로 변화시켰고, 각각의 농도에 대하여 오염공기의 유속을 210, 300, 460 N l/min과 170, 300, 450 N l/min으로 변화시켜서 흡착과파과실험을 하였다.

[그림 3]은 톨루엔 농도가 300 ppm<sub>v</sub>인 오염공기에 대하여 유속에 따른 흡착과파과곡선을 보여준다. 파과곡선으로부터 계산한 허니컴 rotor의 톨루엔 흡착량은 3.5~3.9 wt%로 높은 값을 보인다. 원료 가스의 공급유속이 210, 300, 460 N l/min을 증가되었을 때 톨루엔 농도가 40 ppm<sub>v</sub>이 되는 파과시간은 각각 46, 26, 11분으로 측정되었으며, 이것은 원료가스의 공급이 빨라짐에 따라서 톨루엔의 파과시간도 비례하여 증가하는 것을 보여준다.

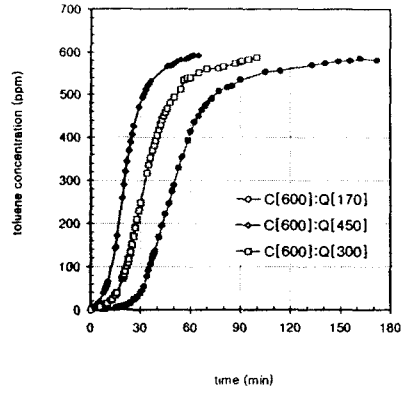
[그림 4]는 300 ppm<sub>v</sub>로 포화된 흡착탑의 탈착특성을 나타낸 것으로 흡착탑에 170℃의 외기를 가열하여 공급하면 입구부터 가열되기 시작하고, 톨루엔의 탈착이 일어난다. 재생가스를 공급한 후 약 4분이 지나면서 톨루엔의 농도는 급격하게 상승하여 8분에 최고 10,000~11,000 ppm<sub>v</sub>까지 농축된다. 출구온도가 100℃에 도달하면 흡착제는 거의 완전히 재생되고 탈착가스의 톨루엔 농도는 0으로 떨어진다.

#### 2) 오염공기의 톨루엔 농도가 600 ppm<sub>v</sub>일 때의 흡탈착 특성

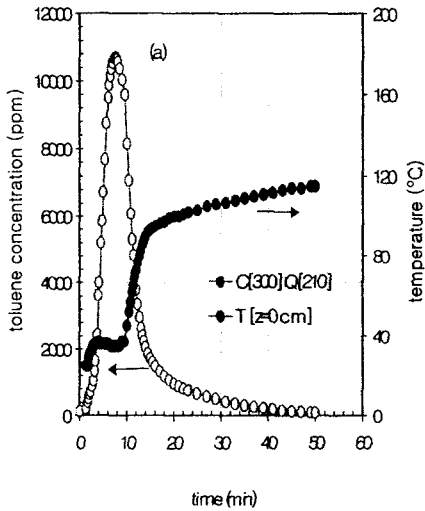
[그림 5]와 [그림 6]은 톨루엔 농도가 600 ppm<sub>v</sub>인 오염공기에 대하여 유속에 따른 흡착거동과 가열재생거동을 보여준다. 톨루엔의 흡착량은 농도가 300 ppm<sub>v</sub>인 경우보다 높은 4.17~4.59 wt%로서 높은 흡착효율을 나타낸다. 170℃의 재생가스를 67 N l/min으로 공급했을 때 재생거동은 300 ppm<sub>v</sub>일 때와 유사하였으며, 톨루엔은 최고 10,000~12,000 ppm<sub>v</sub>까지 농축되었다.



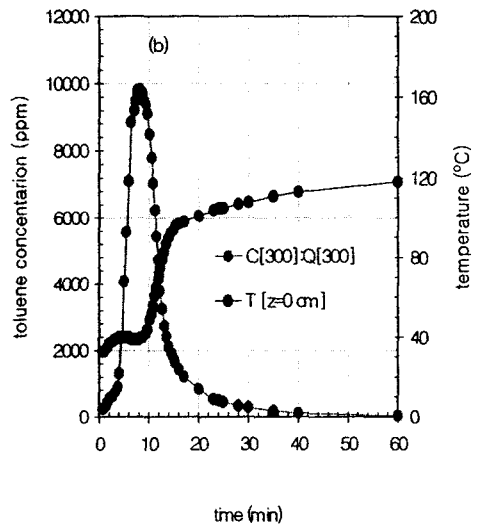
[그림 3] 톨루엔 농도가 300ppmv일 때 유속에 따른 흡착과과곡선



[그림 5] 톨루엔 농도가 600ppmv일 때 유속에 따른 흡착과과곡선

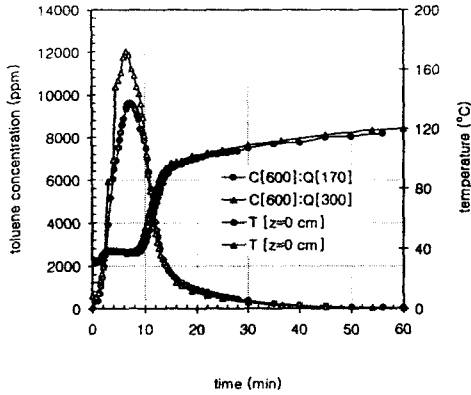


(a)

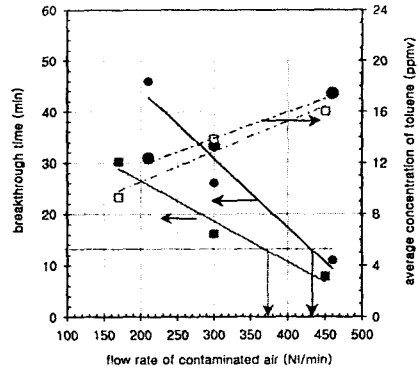


(b)

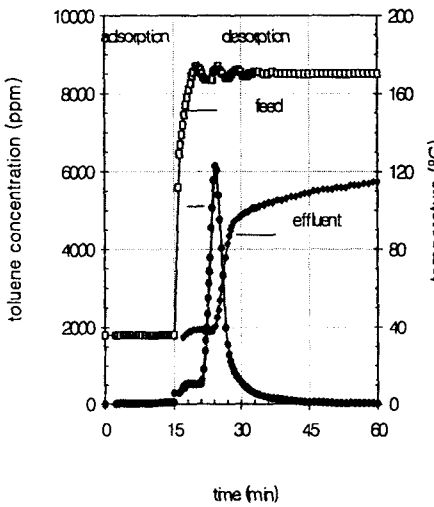
[그림 4] 톨루엔 농도가 300 ppmv으로 포화된 Sample No. V 흡착탑의 가열 재생 거동  
 (a)흡착: 오염공기유속 210 N l/min, 재생: 온도 170°C, 유속 65 N l/min  
 (b)흡착: 오염공기유속 300 N l/min, 재생: 온도 170°C, 유속 65 N l/min



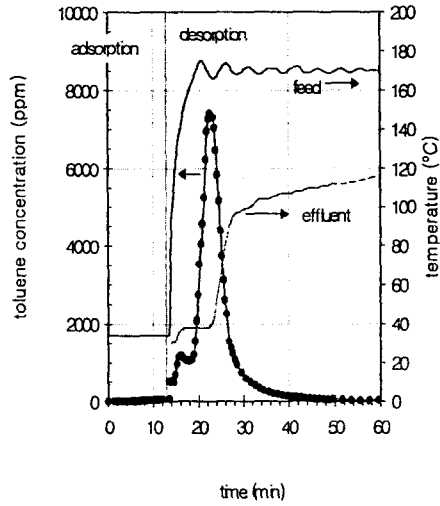
[그림 6] 톨루엔 농도가 600 ppm<sub>v</sub>로 포화된 흡착탑의 가열재생거동



[그림 7] 톨루엔 배출농도가 40 ppm<sub>v</sub>인 파과시간과 평균배출농도



(a)



(b)

[그림 8] 흡·탈착 연속실험에서 톨루엔 배출농도와 흡착탑의 온도

(a) 오염공기 톨루엔농도 300ppm<sub>v</sub>, 유속: 420N l/min

(b) 오염공기 톨루엔농도 600ppm<sub>v</sub>, 유속: 390N l/min

### 3) 공정설계를 위한 연속실험

회전식 흡착공정에서는 rotor의 회전속도와 오염공기 공급유속을 조절하여 흡착 rotor 출구의 톨루엔 농도가 40 ppm<sub>v</sub>인 시점까지 만 오염공기를 공급하고, 바로 가열재생부로 회전시켜서 흡착된 톨루엔이 탈착되도록 운전하여야 한다. 흡착과파과선으로부터 배출농도가 40 ppm<sub>v</sub>이 되는 파과시간과 이 때까지 배출되는 톨루엔의 평균농도를 [그림 7]에 보였다.

직경 9.7cm, 길이 40cm인 허니컴 흡착 rotor를 회전식 흡착공정에 활용하였다고 가정하고 흡착제거부의 흡착시간을 13.5분으로 한 경우에, 처리가능한 오염공기의 유속을 도출하였다. 톨루엔의 농도가 300, 600 ppmv인 오염공기를 각각 430, 375 N l/min (또는 흡착탑 단위부피당으로는 7600, 8700 Nm<sup>3</sup>/hr/m<sup>3</sup>-bed volume)의 유속으로 처리했을 때 평균 배출농도는 17~29 ppmv이고, 제거효율은 94.3~95.5%였다.

[그림 8]은 실제 흡착제거 공정과 동일한 조건으로 톨루엔을 흡탈착시키기 위하여 처리 가능한 최대 유속으로 오염공기를 흡착탑에 공급한 후 출구의 농도가 40 ppmv에 도달하면 흡착과정을 멈추고 가열재생하는 방법으로 연속실험한 결과이다. 오염공기의 톨루엔 농도가 300, 600 ppmv일 때 각각 15분, 13.5분 동안 흡착을 실시하면 출구농도가 40 ppmv에 도달하며, 이 동안에 배출된 톨루엔의 평균농도는 각각 17, 28 ppmv이고, 톨루엔의 평균흡착량은 각각 1.23, 2.11 wt%로 포화흡착량의 35, 45%가 된다. 출구의 농도가 40 ppmv에 도달했을 때 흡착탑에 170℃의 고온가스를 67N l/min로 공급하면 톨루엔이 최고 6000, 7500 ppmv로 농축되어 배출되며, 이 농도는 촉매연소 또는 직접연소로 처리하기 충분한 수준이다.

#### 4) 회전식 흡착공정 설계

직경 35cm, 폭 40cm인 rotor를 사용하여 톨루엔이 300 ppmv 포함된 오염공기를 처리하는 경우의 오염공기처리량, 재생가스유속 및 가열기 용량, 세정가스 유속, 농축가스의 톨루엔 평균농도를 계산하였다.

기초실험결과 scale-up될 회전식 흡착농축장치는 흡착제 충전량이 7.7 kg인 회전식 흡착 rotor를 4회/시간의 속도로 회전시키면서 오염공기를 345Nm<sup>3</sup>/hr로 공급하고, 재생조건으로는 오염공기 유속의 19%인 65.5Nm<sup>3</sup>/hr의 유속으로 외기를 170℃까지 가열하여 흡착탑에 공급한다. 가열기의 용량은 최대 3.5kW이고, 탈착가스를 통하여 배출되는 톨루엔은 6.1g/Nm<sup>3</sup> 또는 423g/hr로 농축되어 배출된다.

#### 4. 결론

편파형 성형체를 만들기 위하여 세라믹 화이버를 주성분으로 하는 조성에 글라스 화이버를 첨가함으로써 편파형 성형장치의 인장응력을 견딜 수 있는 세라믹 슈트를 제조하였다. 편파형 슈트를 감아서 직경 9.7 cm, 길이 40cm의 세라믹 허니컴 rotor를 제작하였으며, 허니컴 rotor에 제올라이트를 함침시켜 VOC 제거용 허니컴 rotor를 제조하였다.

이 허니컴 rotor에 톨루엔이 300, 600 ppmv 포함된 오염공기를 공급하여 흡착 탈착 실험을 하여 출구에서의 톨루엔 농도가 40 ppmv에 도달하는 시간, 포화흡착농도, 재생시간, 재생시 최대 톨루엔 농도를 측정하였다.

톨루엔 농도가 40 ppmv에 도달했을 때 재생을 시작하는 공정설계를 위한 연속실험을 통하여 직경 35cm, 폭 40cm로 허니컴형 흡착 rotor의 크기를 증가시켰을 때의 운전조건을 도출하였다.

#### 참고문헌

1. 김홍수, 주국택, 유윤중, 배준수, 설용건, 한문희, "VOC 제거용 세라믹슈트의 인장강도에 미치는 slurry 조성의 영향", 한국에너지공학회 1999년도 추계학술발표논문집, p.197-204.
2. 유윤중, 김홍수, 한문희, 배준수, 주국택, "실리카제올라이트를 함유한 벌집상 흡착제에 대한 톨루엔의 흡탈착 거동", 한국에너지공학회 2000년도 춘계학술발표논문집, pp.307-312