

## 세라믹섬유지를 사용한 허니컴 흡착소자 제조 및 VOC 흡착특성

유윤종<sup>†</sup> · 조철희 · 김홍수 · 안영수 · 한문희 · 장건익\*

한국에너지기술연구원 기능소재연구센터

\*충북대학교 재료공학과

(2002년 8월 21일 접수; 2002년 10월 16일 승인)

### Fabrication of Honeycomb Adsorbents by Using the Ceramic Paper and Adsorption Characteristics of VOC

Yoon Jong Yoo<sup>†</sup>, Churl Hee Cho, Hong Soo Kim, Young Soo Ahn, Moon Hee Han and Gun Eik Jang\*

Functional Materials Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

\*Department of Materials Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

(Received August 21, 2002; Accepted October 16, 2002)

#### 초 록

세라믹섬유지에 VOC 흡착특성이 우수한 제올라이트-Y와 ZSM-5를 담지시키기 위하여 바인더로 사용된 실리카 졸의 첨가량 변화에 따른 흡착제의 표면고착특성을 고찰하였다. 세라믹섬유지에 담지된 제올라이트는 입자가 고르게 분산되어 31 wt% 정도가 고착되었으며, X-ray 회절분석결과 담지 후 열처리와 바인더의 사용에도 불구하고 제올라이트는 원래의 결정구조를 유지하였다. 담지된 제올라이트의 비표면적 감소는 메조포어의 감소에 따른 것으로, VOC 흡착에 가장 유효한 20 Å 미만의 마이크로포어에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 세라믹섬유지로 제조한 직경 10 cm, 길이 40 cm의 허니컴에 제올라이트를 담지시켜 톨루엔, MEK, Cyclohexanone에 대한 흡착실험결과 흡착제거효율이 모두 97% 이상으로 나타났으며, 회전식 흡착농축장치에 적용할 경우 VOC 농도 300 ppm,의 오염공기를 42 Nm<sup>3</sup>/h 정도 연속적으로 처리할 수 있는 흡착특성을 나타내었다.

#### ABSTRACT

The adhesion characteristics of adsorbent during impregnation of Y-type and ZSM-5 type zeolites into ceramic paper were analyzed, as the amount of silica sol in slurry for impregnation was varied. 31 wt% of zeolite particle, which is useful for VOC adsorption, was evenly dispersed and adhered on ceramic paper and original crystal structure of the zeolite remained unchanged even after binder application and heat treatment. Surface area of the impregnated ceramic paper was decreased compared with that of zeolite powder. And it was found to be attributed to the reduction of volume of mesopore while the volume of micropore under 20 Å was unchanged. Zeolite-impregnated honeycomb cylinder, whose diameter and length were 10 cm and 40 cm, respectively, was subjected to adsorption/desorption test with respect to toluene, MEK, cyclohexanone. All of the VOC's were removed by adsorption with efficiency higher than 97% and from the static adsorption test, 42 Nm<sup>3</sup>/h of 300 ppm, -VOC-laden air was calculated be treated continuously, when the honeycomb was used in an adsorptive rotor system.

**Key words :** Honeycomb adsorption rotor, VOC concentrator, Ceramic sheets, Honeycomb adsorbents

#### 1. 서 론

유기용매를 사용하는 도장산업, 인쇄공장, 대형세탁시설 등의 작업장에서 대기로 배출되는 1000 ppm, 이하의 휘발성유기화합물(VOC; Volatile Organic Compound)을 흡착 농축하기 위해 사용되는 제올라이트나 활성탄은 압출성형, Disk pelletizing, Oil drop forming 방법에 의하여

구형이나 실린더형의 과립된 상태로 만들어져 흡착탑에 충전하여 사용되어지고 있으나, 이러한 형태의 가스흡착제는 운전시 압력손실이 크게 되어 배기가스의 처리를 위해서는 별도의 가압장치가 필요하게 되므로 최근에는 허니컴 흡착로터를 사용한 회전식 흡착방법<sup>1,5)</sup>이 이용되고 있다.

회전식 흡착장치에 사용되는 허니컴 흡착소자는 세라믹화이버가 주원료인 다공성 세라믹섬유지를 편파성형 한 후 말아서 원통형 허니컴을 만들고 여기에 제거 대상 가스의 흡착특성이 우수한 분말상 흡착제를 바인더와 함께 담지시켜 제조하는 방법과 세라믹섬유지의 제조원료에 흡

<sup>†</sup>Corresponding author : Yoon Jong Yoo

E-mail : yjyou@kier.re.kr

Tel : +82-42-860-3118 Fax : +82-42-860-3133

작제를 분산시켜 흡착제가 함유된 세라믹섬유지를 사용하여 제조하는 방법<sup>3)</sup>이 있으나, 후자의 경우에는 공정의 단순화 장점이 있으나 세라믹섬유지의 강도가 약하여 허니컴의 제조가 곤란하고 흡착제의 많은 손실이 따른다.

본 논문에서는 VOC 흡착특성이 우수한 제올라이트-Y와 ZSM-5 두 종류의 분말상 제올라이트를 세라믹섬유지 표면에 고착시키기 위해 콜로이드상 실리카를 바인더로 사용하고, 담지 용액의 조성변화에 따른 흡착제 표면고착량, 미세기공 분포 및 비표면적의 변화를 분석하였으며, 톨루엔에 대한 평형흡착량을 측정하여 최적 담지조건을 파악하고자 하였다. 또한 세라믹섬유지로 제조한 지름 10 cm, 길이 40 cm의 허니컴에 제올라이트를 담지한 후 톨루엔, Methyl Ethyle Ketone(MEK), Cyclohexanone(CYC)의 흡착 및 농축특성을 분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 세라믹섬유지의 제올라이트 담지 및 톨루엔 흡착 특성

두께 0.2 mm, 평량 100 g/m<sup>2</sup> 정도인 세라믹섬유지를 가로 5 cm \* 세로 5 cm 크기로 절단하여 실리카 고형분 15 wt%인 실리카졸에 10분간 담지한 후 120°C에서 1시간 건조하였고, 이를 600°C에서 3시간 열처리하여 세라믹섬유지 내의 유기물을 burn-out시켰다. 열처리 후 세라믹섬유지의 표면은 Fig. 1과 같이 흡착제를 담지하기 적당한



Fig. 1. SEM image of ceramic paper before impregnation adsorbents.

3차원적 표면구조를 형성하고 있으며, 표면제타전위는 -42.12 mV를 나타내었다. 흡착제는 Si/Al 값이 100 이상인 제올라이트-Y(Hisiv-1000, UOP)와 ZSM-5(Hisiv-3000, UOP) 두 종류의 하이실리카 제올라이트를 선정하여 사용하였으며, 그 사양을 Table 1에 나타내었다.

흡착제 담지용액의 조성은 두 종류의 제올라이트를 각각 30 wt%로 고정하고 바인더인 실리카 고형분의 함량을 3, 5, 7 wt%로 변화시켰다. 제조방법은 비이커에 수도수를 적정량 취하여 상온에서 1200 rpm 이상으로 교반하면서 바인더 및 흡착제를 투입하였고, 2시간 교반하여 담지용액을 제조하였다. 그 후 열처리가 완료된 세라믹섬유지를 담지용액에 10분간 함침하여 표면에 흡착제를 담지시키고, 담지가 완료된 시편을 꺼내어 120°C에서 건조 후 600°C에서 5시간 소성하여 흡착제의 표면고착을 완료하였다. 흡착제 담지를 완료한 시편에 대하여 담지량 및 표면특성을 분석하였으며, 비표면적과 기공분포를 측정하였다. 톨루엔 흡착실험은 중량법 평형흡착량 측정장치(Magnetic Suspension Balance, Rubotherm-30G500P)를 이용하였으며, 측정 전에 시편을 200°C에서 진공상태로 1시간 유지하여 시편내의 수분 및 흡착물질을 완전히 탈기하였다. 그후 30°C로 흡착온도를 유지시키고 톨루엔을 일정압력으로 공급하여 무게변화가 없을 때까지 유지시켜 평형흡착량을 측정한 후 단계적으로 톨루엔 분압을 증가시켰다.

### 2.2. 허니컴 흡착소자의 제조 및 VOC 흡착특성

회전식 VOC 흡착농축장치에 사용되는 원통형 허니컴 흡착소자의 제조공정을 Fig. 2에 나타내었다. 약 0.2 mm 정도의 일정한 두께를 갖는 세라믹섬유지를 편파성형기를 이용하여 핏치 4.0 mm \* 높이 1.8 mm로 편파성형 한 후 원통형으로 말아서 Fig. 9와 같이 직경 10 cm, 길이 40 cm의 허니컴을 제조하였고, 이를 구조강화시키기 위해 실리카 고형분 15 wt%인 용액에 담지한 후 600°C에서 3시간 열처리하여 허니컴 내의 유기물을 burn-out시켰다. 그 후 실리카 고형분 5 wt%, 흡착제 30 wt%(제올라이트-Y : ZSM-5=7 : 3)의 조성으로 담지용액을 제조하여 10분간 함침 시킨 후 600°C에서 5시간 소성하였다.

제조된 흡착소자에 대한 톨루엔 및 MEK, CYC의 흡착 및 농축 특성실험을 실시하였다. 실험방법은 제조된 허니컴 흡착소자를 지름 10 cm, 길이 40 cm인 원통형의 흡착

Table 1. Specifications of Adsorbents and Binder

Adsorbents	Specification	Type	Particle Size	BET Surface Area, m <sup>2</sup> /g	Pore Size, Å
	Zeolite-Y	Powder	1~2 μm	585	> 8.0
	ZSM-5	Powder	1~2 μm	419	> 6.3
	Silica Sol(30 wt%)	Colloid	10~20 nm	pH 9.5	-

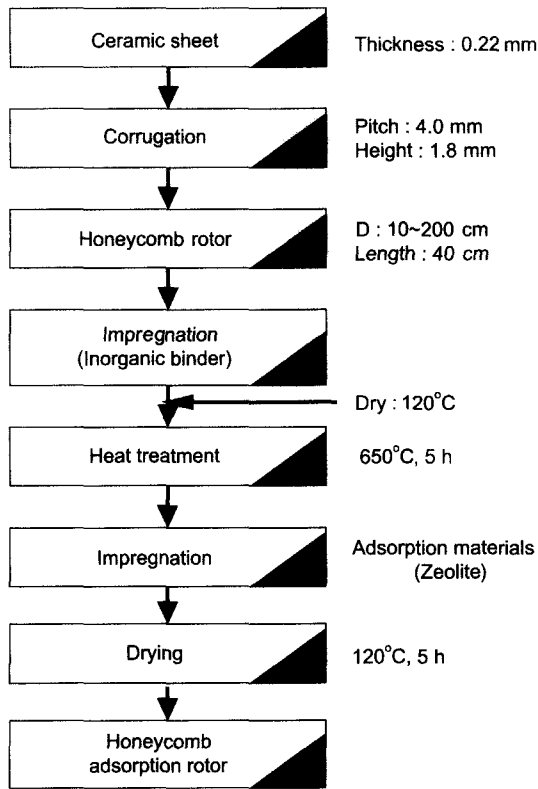


Fig. 2. Fabrication process of honeycomb adsorbents.

탑에 딱 채워 충전시키고, 외부공기를 170°C로 가열하여 3시간 공급하여 흡착제 내의 수분 및 오염가스를 완전히 제거하였다. 그 후 흡착탑의 온도를 30°C로 유지시키고 송풍기 및 VOC 발포조를 사용하여 오염공기 농도를 300 ± 10 ppm<sub>v</sub>로 제조하여 공급유량 420 NI/min로 연속적으로 흡착탑에 공급하면서 출구측 오염공기 농도가 40 ppm<sub>v</sub>일 때까지 흡착실험을 실시하였다. 흡착을 완료한 후 흡착제의 재생은 외부공기를 170°C로 가열하여 72 NI/min으로 공급하면서 흡착탑 출구에서 배출되는 농축 VOC의 농도를 Total Hydrocarbon Analyzer(HORIBA, THC-5100)를 이용하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 세라믹 섬유지의 제올라이트 담지 및 톨루엔 흡착특성

세라믹섬유지 표면에 담지된 제올라이트 흡착제의 고착상태를 보여주기 위한 SEM 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 사진에서 보는 바와 같이 담지된 흡착제는 세라믹화이버에 의해 다공성 구조를 형성하고 있는 세라믹섬유지의 표면에 입자들이 고르게 분산되어 고착되어 있음을 알 수 있다. Fig. 4에 두 종류의 제올라이트와 이를 세라믹 섬유지에 담지시켜 열처리한 후의 X-ray 회절패턴을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 실리카를 사용하여 세



Fig. 3. SEM image of impregnated zeolite into ceramic paper.

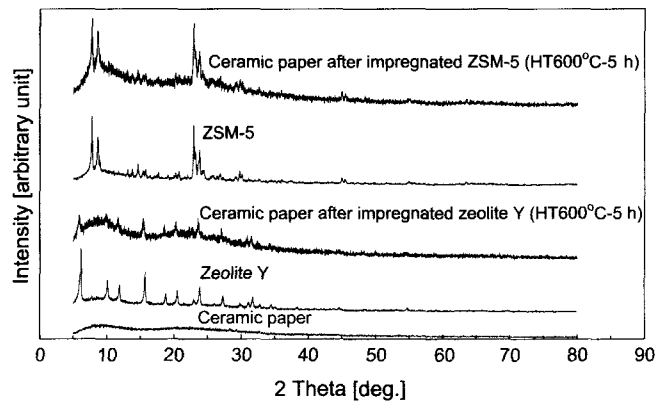


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of impregnated zeolite into ceramic paper.

라믹섬유지에 제올라이트를 담지시키고 이를 600°C에서 열처리한 경우에도 고유의 제올라이트 회절각과 일치하고 있으며, 이러한 결과는 세라믹섬유지에 담지된 제올라이트가 열처리와 바인더의 사용에 따른 영향 없이 원래의 구조를 유지하고 있음을 보여주고 있다.

Table 2에 두 종류의 제올라이트에 대하여 바인더 첨가량 변화에 따른 고착특성을 비교하여 나타내었으며, 제올라이트의 담지량( $W_{adsorbents}$ )은 아래의 식(1)을 이용하여 산출하였다.

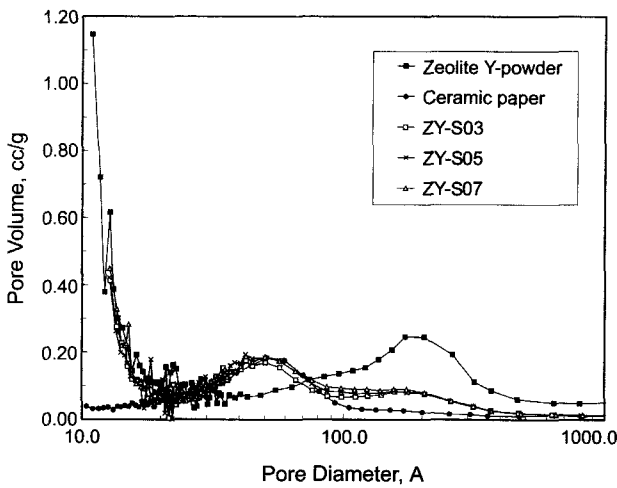
$$W_{adsorbents} = (W_{S1} - W_{S0}) / W_{S0} \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $W_{S0}$  = 흡착제 담지전 시트무게,  $W_{S1}$  = 흡착제 담지후 시트무게

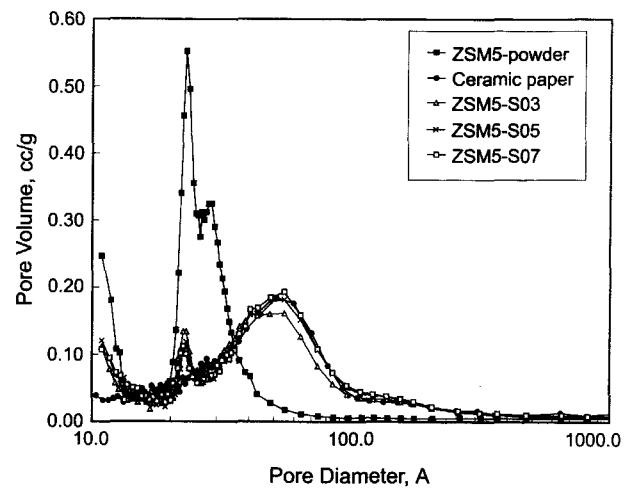
두 종류의 제올라이트 담지에 있어서 바인더 첨가량이 증가함에 따라서 흡착제 담지량 및 비표면적은 증가하고 있으나, 세라믹 섬유지에 담지된 순수한 제올라이트 흡착

**Table 2.** Zeolites Impregnation Characteristics of Ceramic Paper

Sample No.	Binder (Si wt%)	Impregnation Amount (zeolite+binder-wt%)	BET Surface Area (m <sup>2</sup> /g)	BET Surface Area (m <sup>2</sup> /zeolite+binder-g)
ZY-S03	3.0	25.20	146.71	582 (99.5%)
ZY-S05	5.0	30.20	158.50	525 (89.7%)
ZY-S07	7.0	33.90	165.10	487 (83.2%)
ZSM5-S03	3.0	36.86	137.93	374 (89.3%)
ZSM5-S05	5.0	37.26	136.77	367 (87.6%)
ZSM5-S07	7.0	39.95	138.95	348 (83.1%)



**Fig. 5.** Variation pores of impregnated zeolite-Y into ceramic paper.



**Fig. 6.** Variation pores of impregnated ZSM-5 into ceramic paper.

제만을 고려할 때 비표면적은 크게 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 10~20 nm 정도의 입자경을 가지고 있는 콜로이드상 실리카에 의해 1~2 μm 크기의 제올라이트 결정 표면이 덮여지고, 제올라이트 결정과 결정사이에 형성된 메조포화가 감소하기 때문이며, 이러한 결과를 Figs. 5와 6의 제올라이트 담지전후 기공분포 변화에서 확인할 수 있다. 세라믹 섬유지에 담지하기 전의 분말상 제올라이트-Y는 결정과 결정사이에 100 Å 이상의 메조포어가 형성되어 있으며, ZSM-5의 경우에는 20~30 Å 정도의 메조포어가 형성되어 있음을 알 수 있다. 이와 같이 제올라이트 결정사이에 형성된 메조포어는 바인더를 사용하여 세라믹 섬유지에 담지시킨 후에는 급격한 감소를 보이고 있으며, 이러한 영향으로 단위무게당 비표면적은 제올라이트 원료 분말의 비표면적과 비교했을 때 바인더량을 3 wt%에서 7 wt%로 증가시키기에 따라 제올라이트-Y는 원료분말의 99.5%에서 83%로 감소되었으며, ZSM-5의 경우에는 원료분말의 89%에서 83%로 많은 감소를 보였다. 그러나 일반적으로 흡착에 유효한 미세기공의 크기는 흡착질분자의 2~4배<sup>15)</sup>이므로 제거대상 가스인 톨루엔과 MEK, CYC의 Kinetic diameter가 각각 5.9 Å, 4.3 Å, 5.4 Å인 점

을 고려하면 이들을 Van der waals 인력에 의해 물리적으로 흡착하는데 유효한 20 Å 미만의 마이크로포어는 바인더에 의한 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

Figs. 7과 8에 두 종류의 제올라이트가 각각 담지된 세라믹 섬유지를 사용하여 톨루엔 분압을 증가시키며 평형 흡착량을 측정된 결과를 나타내었다. Fig. 7은 제올라이트-Y에 대한 측정결과인데 바인더 첨가량이 많아짐에 따라 담지량은 증가하지만 톨루엔 흡착량에 있어서는 5 wt%와 7 wt%일 때 동일하게 나타나고 있으며, 3 wt%일 때 가장 적은 양의 톨루엔을 흡착하였다. 이것은 바인더 양의 증가에 따라서 세라믹 섬유지 표면에 담지되는 양은 증가하고 있으나, 담지된 물질은 흡착제와 바인더가 함께 고착되어 있으므로 바인더 사용량이 5 wt% 이상에서는 실질적으로 가스흡착에 기여하는 제올라이트의 담지량은 전체 담지량에 비례하여 증가하지 않기 때문으로 사료된다. 또한 3 wt%의 바인더로 고착시킬 경우에는 제올라이트 입자표면에 덮여진 바인더 양이 적어 담지량이 적고, 고착강도 또한 미흡하므로 제올라이트-Y를 세라믹 섬유지 표면에 담지하고자 할 경우에는 5 wt%의 바인더를 사용하는 것이 가장 유리할 것으로 판단된다.

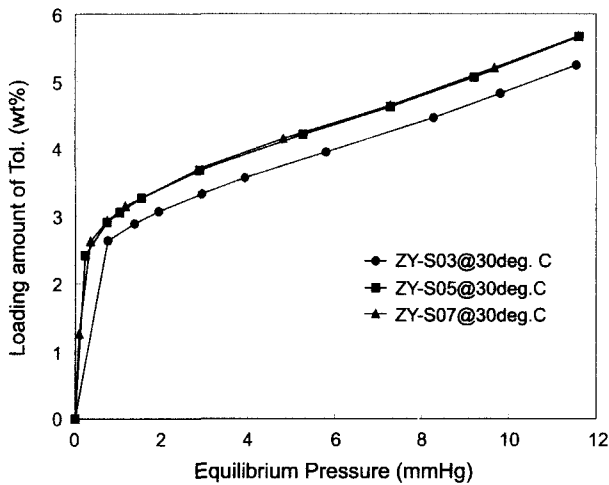


Fig. 7. Toluene adsorption isotherms of impregnated zeolite-Y into ceramic paper.

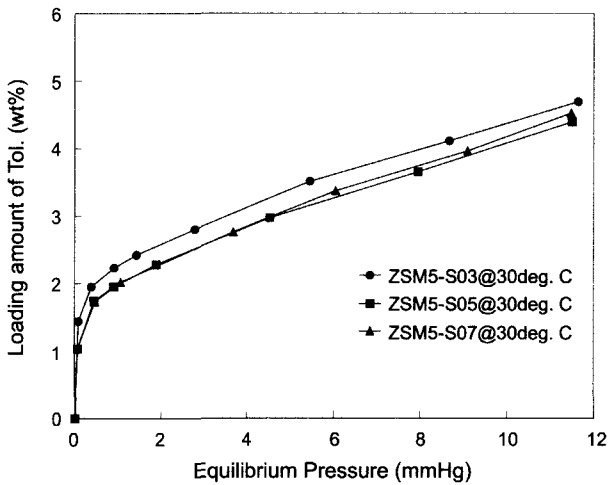


Fig. 8. Toluene adsorption isotherms of impregnated ZSM-5 into ceramic paper.

Fig. 8은 ZSM-5를 세라믹섬유지에 담지시킨 후 톨루엔 흡착실험결과를 나타내었다. ZSM-5의 경우에는 3 wt%의 바인더를 사용한 경우에도 제올라이트의 고착강도가 우수하였으며, 그 이상의 바인더를 사용할 경우에는 톨루엔 흡착량이 저하하였다. 이는 앞에서와 마찬가지로 3 wt% 이상의 바인더를 사용하였을 경우 실질적으로 제올라이트의 고착에 기여하기 보다는 바인더가 과잉으로 제올라



Fig. 9. Honeycomb adsorbent using the ceramic paper.

이트 표면에 덮여져서 나타난 결과로 사료되며, 제올라이트-Y와 ZSM-5의 담지특성이 다른 것은 제올라이트 결정의 구조적 요인과 함께 합성인자인 Si/Al 값이 다르기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.2. 허니컴 흡착소자의 VOC 흡착 및 농축 특성

Fig. 9에 보인 바와 같이 세라믹섬유지를 사용하여 제조한 지름 10 cm, 길이 40 cm의 원통형 허니컴 흡착소자의 제올라이트 흡착제 담지량은 163 g(31.2 wt%)을 나타내었다. Table 3과 Fig. 10은 허니컴 흡착소자가 충전된 흡착탑에 톨루엔, MEK, CYC를 각각 300 ppm<sub>v</sub>의 농도로 420 NI/min의 조건으로 공급하여 흡착탑 출구에서의 VOC 농도가 40 ppm이 될 때까지 흡착시킨 결과를 보여주고 있는데, 3종의 VOC에 대한 흡착제거효율이 97% 이상으로 매우 높게 나타났다. 이는 회전식 흡착농축장치에 적용하여 사용할 때 허니컴 흡착모타의 회전속도를 4 rph로 하면 VOC 농도 300 ppm<sub>v</sub>의 오염공기를 42 Nm<sup>3</sup>/h 정도 연속적으로 처리할 수 있는 흡착특성을 보여주고 있다. 또한 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 흡착된 VOC를 재생 농축

Table 3. VOC Adsorption Characteristics of Honeycomb Adsorbent

Honeycomb Adsorbent	VOC's	Breakthrough Time (min.), 40 ppm <sub>v</sub>	Adsorption Amount (g)	Removal Efficiency (%)
ZY7+3ZSM5-S05	Toluene	21.6	9.72	98.2
	MEK	31.2	11.0	97.7
	Cyclo-Hexanone	26.5	13.0	96.7

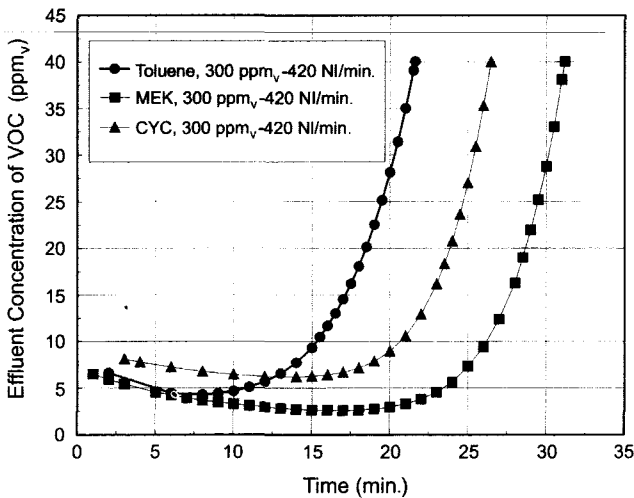


Fig. 10. VOC adsorption characteristics of honeycomb ZY7+3ZSM5-S05.

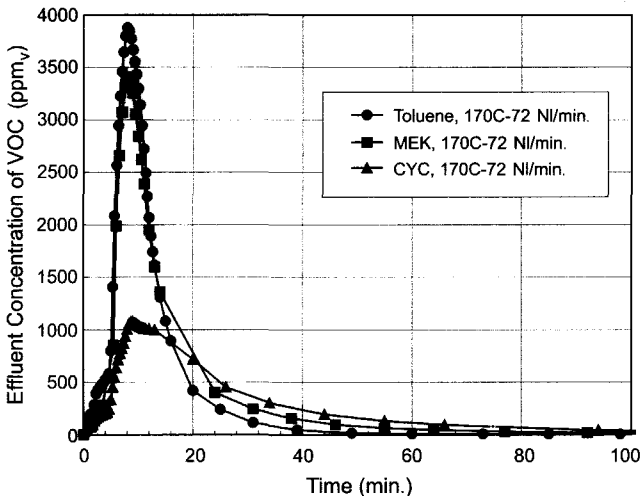


Fig. 11. Concentration characteristics of honeycomb ZY7+3ZSM5-S05.

시켰을 때 톨루엔과 MEK는 3500 ppm<sub>v</sub> 이상으로 10배 이상 농축되었고, CYC의 경우에는 최고 농도가 1200 ppm<sub>v</sub> 정도로서 촉매연소가 가능한 농축비를 보여주었다.

#### 4. 결 론

세라믹섬유지에 제올라이트 흡착제를 담지시켜 표면을 관찰한 결과 제올라이트 입자가 고르게 분산되어 고착되었으며, X-ray 회절패턴은 고유의 제올라이트와 회절각이 일치하고 있어, 제올라이트 담지시 사용된 바인더와 열처리에 의한 영향 없이 원래의 구조를 유지하고 있음을 알 수 있었다. 또한 비표면적의 감소는 제올라이트 결정사이에 분포된 100 Å 이상의 메조포어의 감소에 따른 것이며 VOC 분자를 흡착하는데 가장 유효한 20 Å 미만의 마이

크로포어에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 톨루엔에 대한 평형흡착량을 측정한 결과 제올라이트-Y는 바인더 첨가량이 5 wt%일 때와 7 wt% 동일한 흡착특성을 나타내었고, ZSM-5의 경우에는 바인더 첨가량이 3 wt%일 때 우수한 흡착특성을 나타내었다. 따라서 세라믹 섬유지 표면에 제올라이트를 담지 시키기 위해서는 담지량과 고착강도, 비표면적 변화 등을 고려했을 때 제올라이트-Y의 경우에는 바인더량을 5 wt%, ZSM-5의 경우에는 바인더량을 3 wt% 정도로 사용하는 것이 효과적이었다.

세라믹섬유지로 제조한 직경 10 cm, 길이 40 cm의 허니컴흡착소자에 두 종류의 흡착제를 7:3으로 조합하여 담지 시킨 결과 흡착제 담지량이 세라믹섬유지 상태로 담지 시킨 경우와 비슷한 31.2 wt%가 담지 되었으며, 톨루엔, MEK, CYC에 대한 흡착제거효율이 모두 97% 이상으로 매우 높게 나타났다. 이 허니컴을 회전식 흡착농축장치에 적용할 경우 허니컴 흡착소자의 회전속도를 3 rph로 할 때 VOC 농도 300 ppm<sub>v</sub>의 오염공기를 35 Nm<sup>3</sup>/h 정도 연속적으로 처리할 수 있는 흡착특성을 보여주었으며, 재생시 톨루엔과 MEK는 10배 이상으로 농축되었고, CYC는 4배 정도의 농축특성을 보여 주었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2001년도 과학기술부에서 지원한 국가지정 연구사업의 수행 결과이며, 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. Y. Mitsuma, "Performance of Thermal Swing Honeycomb VOC Concentrators(in Jpn.)," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **31** [3] 482-84 (1998).
2. T. Kuma, "Removal Efficiency of Volatile Organic Compounds, VOCs, by Ceramic Honeycomb Rotor Adsorbents, Fundamentals of Adsorption," M. D. LeVan, Kliwer Academic Publishers, Boston, Massachusetts (1966).
3. A. Kodama, "Experimental Study of Optimal Operation for a Honeycomb Adsorber Operated with Thermal Swing," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **26** [5] 530-35 (1993).
4. Y. Mitsuma, "Analysis of VOC Reversing Adsorption and Desorption Characteristics for Actual Efficiency Prediction for Ceramic Honeycomb Adsorbent(in Jpn.)," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **31** [2] 253-57 (1998).
5. Y. Mitsuma, "Practice of the VOC Abatement by Thermal Swing Ceramic Monolith Adsorbents(in Jpn.)," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **16** [8] 441-45 (1997).
6. A. Kodama, "Temperature Profile and Optimal Rotation Speed of a Honeycomb Rotor Adsorber Operated with Thermal Swing(in Jpn.)," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **27** [5] 644-49 (1994).
7. H. Ichiura, "Preparation of Zeolite Sheet Using a Paper-making Technique," *J. Mater. Sci.*, **36** 4921-26 (2001).

8. T. Kuma, "A Gas Adsorption Element, its Manufacture Method and Usage," European Patent Application, 91-3, 114, 468.
9. T. Kuma, "Method of Manufacturing a Gas Adsorption Element or a Catalyst Carrier Having a Honeycomb Structure," *US Patent*, 5,194,414.
10. Y. J. Yoo, "Adsorption and Desorption Dynamics of Toluene on High Silica Zeolite Honeycomb Adsorbent," *Kor. Soc. Energy Eng.*, 307-12 (2000).
11. Y. J. Yoo, "Adsorption and Desorption Dynamics of VOC on High Silica-zeolite Honeycomb Adsorbent," *J. Chem. Eng. Kor.*, **6** [2] 4361-64 (2000).
12. K. Nakamura, "Ceramic Sheet with Catalyst and its Manufacturing Method," *US Patent*, 5504051.
13. T. Kuma, "Reformation of Honeycomb Adsorbent and Scale-up Technology for Thermal Swing Type VOC Concentrator," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **24** [2] 248-53 (1998).
14. IUPAC, "Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units," Butterworths, London (1972).
15. J. W. Kim, "Development of Operation Technology and Design of TSA," *KIER Report*, KIER-963323 (1997).