

## 초임계 이산화탄소에 의한 활성탄소섬유로부터 MEK와 톨루엔의 탈착 특성

류영기 · 노덕수 · 이창하<sup>†</sup>

연세대학교 공과대학 화학공학과  
(1997년 6월 17일 접수, 1997년 10월 28일 채택)

### Desorption Characteristics of MEK and Toluene from Activated Carbon Fiber by Supercritical Carbon Dioxide

Young-Ki Ryu, Duk-Soo Roh and Chang-Ha Lee<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Yonsei University  
(Received 17 June 1997; accepted 28 October 1997)

#### 요 약

톨루엔 및 MEK가 흡착된 활성탄소섬유에 대해 초임계 이산화탄소를 이용하여 재생하였고, 온도(308-333 K), 압력(185-250 atm), 밀도(0.690-0.902 g/cm<sup>3</sup>)의 운전 조건이 재생 효율에 미치는 영향을 살펴보았다. 초임계 유체의 압력이 높을수록 높은 재생 효율을 보였지만, 일정 압력 조건에서는 318 K가 최적의 재생 온도로 관찰되었다. 그러나 같은 밀도를 기준으로 하였을 때, 온도가 높을수록 탈착효율이 향상되었다. 활성탄소섬유에 있어 MEK/톨루엔 혼합물 탈착의 경우 MEK가 톨루엔보다 잘 탈착되었으나, MEK의 극성으로 인해 압력이 증가함에 따라 두 물질간의 탈착 속도와 탈착량의 차이도 감소하였다. 선형 탈착 kinetics 가정하의 단일 매개변수 모델을 사용하여 재생 효율을 예측하였고, 이는 실험결과와 비교적 잘 일치하였다. 활성탄소섬유에서의 톨루엔에 대한 탈착 활성화에너지는 활성탄에 대한 문헌치와 유사하였으며, 밀도가 클수록 작은 값을 보였다.

**Abstract**—The activated carbon fiber loaded with toluene and MEK was regenerated by supercritical carbon dioxide. And, the effects of temperature(308-333 K), pressure(185-250 atm) and density(0.690-0.902 g/cm<sup>3</sup>) on the regeneration efficiency were studied. It was observed that the operations at higher pressure were more favorable for regeneration, but the optimal operating temperature was 318 K at every pressure condition. However, at the same density, the regeneration efficiency was increased with temperature. In case of MEK/toluene mixture, the difference in the desorption rate and amount between both materials was decreased as the pressure was increased. The regeneration efficiency was predicted by using a one-parameter mathematical model assuming linear desorption kinetics. The predicted value was found to match the experimental data well. The desorption activation energies of activated carbon fiber adsorbed by toluene were close to the literature values of an activated carbon. The activation energy showed a smaller value at higher pressure.

**Key words:** Activated Carbon Fiber, Supercritical Carbon Dioxide, MEK/Toluene, One-Parameter Model

#### 1. 서 론

초임계 유체의 용매로서의 응용은 많은 가스들이 초임계점 이상으로 압축되면 용해능이 향상된다는 실험적 관찰에 근거를 두고 있다. 이는 증류같은 기존의 분리 기술에 비해 초임계 유체의 경우 상대적으로 에너지 비용이 낮다. 특히 이산화탄소를 초임계 유체로 사용하는 경우 임계 온도(302.4 K)가 낮기 때문에 열에 민감한 물질의 추출이 용이하고 비인화성, 비독성, 상대적 경제성, 높은 물질전달 속도 및 밀도 등 독특한 물리화학적 특성으로 인해 활성탄의 재생, 카페인 제거, 고압 중합, 생물학적 화합물 추출, 석탄 액화 등 다양한

응용 분야를 가지고 있다[1]. 그러나 설계 계산에 필요한 평형, 선택성 그리고 전달 현상에 대한 데이터의 부족으로 인해 초임계 유체공정은 아직 널리 적용되고 있지 않다.

많은 관심을 받고 있는 초임계 유체의 응용 분야 중 하나가 유기 화합물이 흡착된 활성탄의 재생이다[1,2]. 대기 및 수질 환경처리에 사용된 활성탄은 일반적으로 스팀 재생법, 고온 불활성 기체법, 가열기에 의한 기화법 등이 있으나, 부식 및 흡착제의 손실과 더불어 에너지 과다 소모의 문제점이 있다. 상대적으로 초임계 유체의 경우 기존 방법에 비해 에너지가 절약될 수 있고, 공정조건이 가혹하지 않기 때문에 흡착제의 손실을 최소화할 수 있으며, 밀도를 조절함으로써 추출물의 용해도차이에 따른 분리도 가능하다. DeFilippi 등[3]은 초임계 이산화탄소를 이용하여 살충제가 흡착된 활성탄소의 재

<sup>†</sup>E-mail: leech@bubble.yonsei.ac.kr

생을 연구하였다. 이들은 운전 온도와 압력이 각각 387 K와 150 atm을 넘을지라도 초임계 유체를 이용한 재생 방법이 경제적임을 보였고 Freundlich 등온선을 사용한 국지적 평형 모델을 제안하여 실험 데이터를 설명하였다. 또한 Kander와 Paulistis[4]는 폐놀에 의하여 오염된 활성탄을 초임계 이산화탄소로 탈착하는 연구에서 폐놀은 활성탄에 강하게 흡착되어 열역학적인 이점이 있는 것으로 볼 수는 없으나 수분과 비산 용매의 분리가 필요한 스팀재생법을 대체할 수 있는 매력적인 방법이라 보고했다. Recasens[5] 등은 초임계 유체에 의한 탈착에 있어 분자내부 확산과 물질전달 저항이 탈착 속도에 영향을 끼친다고 보고하였으나, Erkey와 Akgerman[6]은 매우 낮은 Reynolds수의 영역에서는 물질전달 저항을 무시할 수 있다고 밝혔다. Tan과 Liou[7-9]에 의하면 압력이 일정 값보다 클 때 최적 온도가 존재함이 관찰되었으며, 이 값 이하에서는 온도가 증가함에 따라 재생 효율이 감소하였다. 이들은 활성탄내의 유기 화합물의 흡착 평형 등온선과 유효 확산 계수와 같은 기본적인 정보의 부족으로 인해 선형 탈착 kinetics를 가정한 단일 매개 변수 모델을 제안하였고 이는 실험 데이터와 잘 일치하였다.

활성탄소섬유(ACF, Activated Carbon Fiber)는 활성탄과는 달리 매우 짧은 접촉 시간에 최대 흡착 능력을 보인다. 이는, 활성탄에는 중기공이나 대기공들이 있고 이들이 차지하는 세공 부피의 분율이 꽤 크기 때문에 흡착질의 모세관 응축 현상이나 확산 이동이 흡착 시간을 길게 하지만, 활성탄소섬유에는 거의 미세기공만이 발달하여 있어서 흡착질은 좁은 미세기공에서 이루어지는 미세기공 채움 현상이나 좀더 넓은 미세기공에서 이루어지는 cooperative adsorption이 주 메커니즘이어서 흡착 시간이 대단히 짧기 때문이다. 또한 활성탄소섬유는 활성탄과는 달리 불순물이 거의 없기 때문에 회수 용제의 품질이 매우 우수한 것으로 알려져 있다[10, 14].

본 연구에서는 입상 활성탄에 비해 높은 흡착용량과 빠른 흡착속도의 특성을 가지고 있어 활용도가 점차 증가하고 있는 활성탄소섬유에 대해 초임계 이산화탄소를 이용한 톨루엔과 메틸에틸케톤(MEK)의 탈착특성을 연구하였다. 탈착과 실험을 통하여 온도, 압력 및 밀도의 운전 조건이 초임계 유체에 의한 활성탄소섬유의 재생 특성에 미치는 영향을 파악하고, 선형 탈착 kinetics를 가정한 단일 매개 변수 모델을 통하여 탈착 현상을 해석하고자 하였다.

## 2. 수학적 모델

초임계 유체에 의한 흡착제 재생공정에서 흡착탑의 축확산 효과는 무시할 수 있는 것으로 가정하는 경우 흡착탑에서의 물질 수지는 다음과 같이 표현할 수 있다[12].

$$\epsilon \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial z} = -(1 - \epsilon) \frac{\partial S}{\partial t} \quad (1)$$

초기 및 경계 조건은 다음과 같다.

$$t=0, C=0 \quad (2)$$

$$z=0, C=0 \quad (3)$$

초임계 유체-고체계의 물질전달 계수와 흡착등온선, 초임계 이산화탄소에서의 톨루엔 및 MEK의 유효확산계수에 대한 정보가 부족하기 때문에 활성탄소섬유에서의 물질수지는 다음과 같이 간단화된 선형 탈착 kinetics로 표현한다[6].

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -kS \quad (4)$$

초기 조건은 다음과 같다.

Table 1. Characteristics of activated carbon fiber

|  |           |
|--|-----------|
| Diameter( $\mu\text{m}$ )                      | 17-18     |
| Tensile strength( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )    | 7         |
| Specific surface area( $\text{m}^2/\text{g}$ ) | 1440-1450 |
| Apparent density( $\text{g}/\text{cm}^3$ )     | 0.045     |
| Pore volume( $\text{cc}/\text{g}$ )            | 0.78      |

$$t=0, S=S_0 \quad (5)$$

위의 식들로부터 흡착탑 출구에서의 농도를 구하면 다음과 같다.

$$C_e = \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} S_0 \left[ \exp \left\{ -k \left( t - \frac{\epsilon L}{u} \right) \right\} - \exp(-kt) \right] \quad (6)$$

위의 식은 흡착질의 질량 보존에 기초한 모델로서 단지 흡착제의 재생 과정에만 초점을 두고 있는 단순한 모형이다. 초기농도( $S_0$ )와 시간( $t$ )에 따른 흡착탑 출구농도( $C_e$ )의 측정을 통하여 탈착속도 상수( $k$ )를 구할 수 있으며, 이로부터 탈착 활성화에너지를 얻을 수 있다. 또한 탈착된 흡착질의 총량은 시간에 대해 출구 농도를 적분함으로써 구할 수 있다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3-1. 실험 재료

본 실험의 흡착제로는 활성탄소섬유(Toyobo Co., KF-1500)를 사용하였는데 이의 물성을 Table 1에 나타내었다. 또한 초임계 유체로 사용된 액체 이산화탄소는 순도 99.999%이었으며, 톨루엔과 MEK는 모두 특급 이상을 사용하였다.

### 3-2. 실험방법

활성탄소섬유의 불순물을 제거하기 위하여 3차 증류수에서 약 15 분간 끓인 후 393 K에서 약 4시간 동안 건조시켰다. 이를 100 mg 평량하여 Fig. 1에 나타나 있는 초임계 추출 시스템(Dionex, SFE-703)의 stainless steel cell에 넣은 후 톨루엔 또는 MEK를 디지털 실린지로 30  $\mu\text{l}$  취하여 활성탄소섬유에 흡착시킨 다음 밀봉하여 48시간 이상 방치한다. 활성탄소섬유 100mg에 대한 톨루엔 및 MEK의 최대 흡착량을 실험한 결과 30  $\mu\text{l}$ 의 톨루엔 또는 MEK는 완전히 흡착되며, 이는 CS<sub>2</sub>를 사용하여 확인하였다[13]. 사용된 cell의 내경 및 부피는 각각 9.3 mm, 3.5 ml였다.

탈착 실험은 먼저 펌프를 작동시킨 후 온도, 압력, 탈착 시간 등 추출 시스템의 조작 조건을 설정하고, 흡착된 시료가 들어 있는 cell을 restrictor내에 장착한다. 장치가 조작 조건에 도달하면 작동시켜 초임계 이산화탄소에 의해 탈착되는 톨루엔 및 MEK를 에틸 알코올을 채운 collection vial로 회수한다. Collection vial은 중발 방지를 위해 초임계 추출 장치의 냉각 collection vial tray에 장착되었다. 초임계 유체의 속도는 각 실험조건에서 약 1.0  $\text{cm}^3/\text{min}$ 으로 고정하였다. 회수된 톨루엔 및 MEK의 농도는 Innovax capillary column이 장착된 G.C.(HP 5890 II)를 사용하여 분석하였다. 탈착 실험 후 활성탄소섬유에 남아 있을 수도 있는 톨루엔 및 MEK의 양은 CS<sub>2</sub>를 사용하여 확인하였다. 실험조건 및 해당 조건에 대한 초임계 이산화탄소의 밀도를 Table 2에 나타내었다[10].

## 4. 결과 및 고찰

흡착제에 유기화합물이 흡착될 때 처음에는 가장 활성이 강한 site

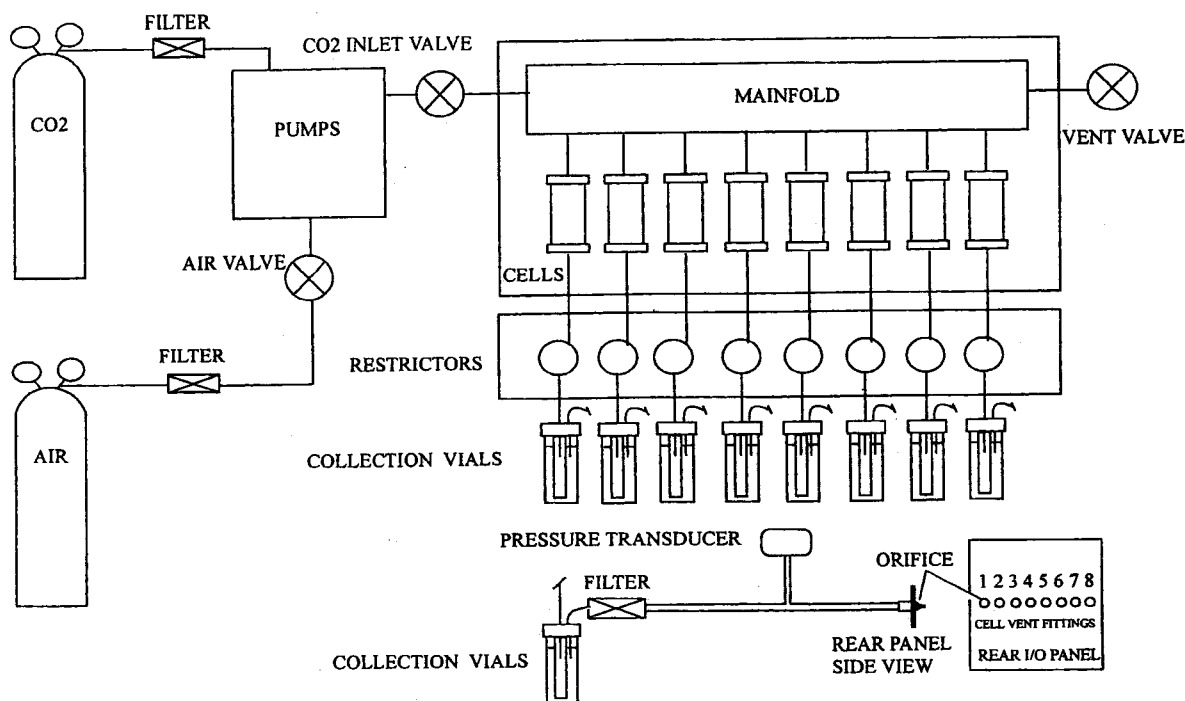


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 2. Densities of supercritical carbon dioxide at experimental temperature and pressure[11]

| Temperature | Pressure                |                         |                         |
|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|             | 185 atm                 | 200 atm                 | 250 atm                 |
| 308 K       | 0.852 g/cm <sup>3</sup> | 0.867 g/cm <sup>3</sup> | 0.902 g/cm <sup>3</sup> |
| 318 K       | 0.793 g/cm <sup>3</sup> | 0.814 g/cm <sup>3</sup> | 0.858 g/cm <sup>3</sup> |
| 333 K       | 0.690 g/cm <sup>3</sup> | 0.725 g/cm <sup>3</sup> | 0.788 g/cm <sup>3</sup> |

가 사용되어 화학 흡착 세기에 접근하고 이들이 계속 흡착됨에 따라 흡착은 전형적인 물리 흡착 세기까지 감소한다. 이를 재생하면 활성이 강한 site에 흡착된 유기화합물은 거의 탈착이 안되고 상대적으로 약한 site에 흡착된 유기화합물이 흡착된다. 본 연구에서도 이러한 현상이 나타났으며 185 atm, 318 K에서 1차 탈착 과정을 거친 활성탄소섬유에 다시 흡착시킨 후 2차 탈착을 행한 결과 탈착능의 차이에 거의 변화가 없었다.

#### 4-1. 온도의 영향

Fig. 2는 압력을 250 atm으로 고정하였을 때 톨루엔이 흡착된 활성탄소섬유의 재생에 대한 온도의 영향을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 초기 1-6분간에 급격한 탈착이 이루어지며, 10분 후에는 탈착 정도가 완만하였다.

본 연구의 압력 조건인 185, 200, 250 atm에서 모두 318 K가 최적의 재생 온도로 나타났다. 그러나 압력이 증가함에 따라 온도 조건에 의한 탈착률의 차이는 감소하였다. 일반적으로 임계 밀도 이하의 조건에서는 온도가 감소함에 따라 유체의 밀도가 증가하므로 용질의 용해도 증가로 인해 재생 효율이 증가하는 것으로 알려져 있다. 그러나 고압의 초임계 조건에서는 초임계 유체의 밀도와 점도가 모두 재생에 중요한 인자로 작용하는데 높은 밀도는 초임계 유체에 대한 용질의 용해도를 상승시킬 수 있지만 높은 점도는 확산 속도에 역효과를 나타낼 수 있다. 따라서 최적 온도의 존재는 온도가 감소함에 따라 유체의 밀도와 점도가 모두 상승하고 이 두 가지 인자의 재생 효

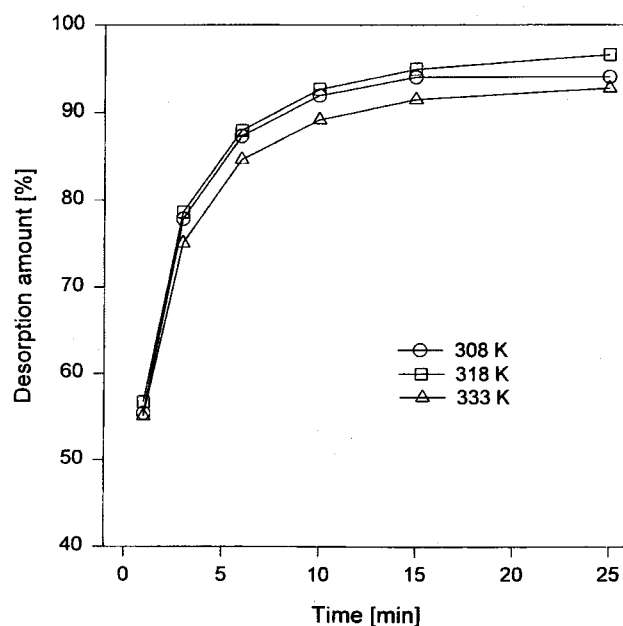


Fig. 2. Temperature effect on desorption rates of toluene at 250 atm.

율에 미치는 효과가 서로 상쇄적으로 이루어져 온도의 변화가 재생 효율에 미치는 영향이 일관적이지 않고 초임계 영역에서 최적 값을 존재하기 때문이다.

#### 4-2. 압력의 영향

Fig. 3과 4는 각각 온도를 318 K로 고정하였을 때 톨루엔과 MEK가 흡착된 활성탄소섬유의 재생에 대한 압력의 영향을 나타낸 것이다. 두 가지 경우 모두 압력이 증가함에 따라 재생 효율이 증가함을 보여주고 있는데 이는 압력이 증가할수록 밀도가 증가하여 용질에 대한 초임계 유체의 용해도가 상승하기 때문이다.

MEK의 경우 톨루엔에 비해 탈착 속도가 빠르지만 압력에 대한

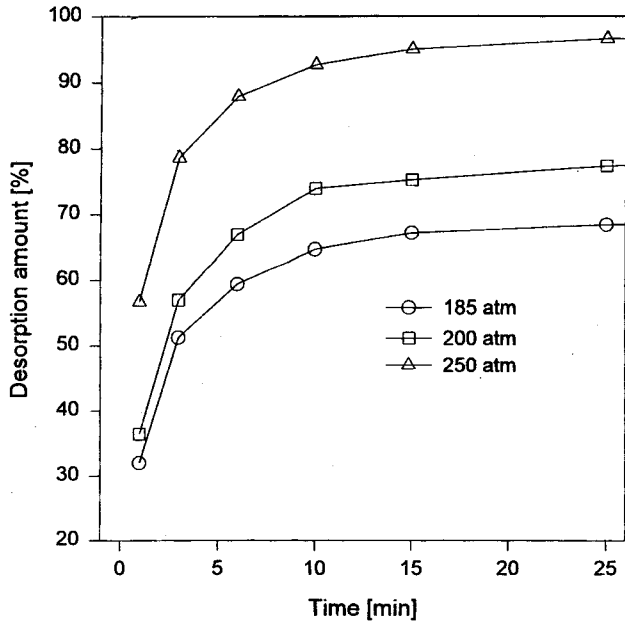


Fig. 3. Pressure effect on desorption rates of toluene at 318 K.

영향은 상대적으로 작음을 알 수 있다. 이는 MEK가 톨루엔에 비해 끓는점이 낮고 분자량이 작아 탈착 속도는 빠르나 상대적으로 높은 극성을 띠고 있기 때문에 거의 비극성인 초임계 이산화탄소의 압력 변화에 영향을 덜 받고 있다. MEK의 경우 charcoal과 ACF에 흡착 후 CS<sub>2</sub>를 사용하여 탈착하여도 탈착효율이 각각 77%와 83%로 보고되고 있으며, ACF가 불순물이 적기 때문에 보다 높은 탈착효율을 나타내고 있다[13]. 그러나 톨루엔이 CS<sub>2</sub>에 의해 거의 100% 회수되는 것에 비하여, 극성의 MEK는 흡착제 표면에서 화학흡착에 가까운 강한 흡착이 이루어진 것으로 사료된다. 이는 본 연구에서 사용된 ACF에 대해 FTIR(ATI Mattson, Genesis Series)를 사용하여 분석한 결과 phenol기(-OH), carboxyl기(-COOH), lactone기(C=O, C-O-C)로 판단되는 작용기가 존재하고 있으며, 이들의 영향으로 인하여 ACF에 대한 극성물질의 탈착에 있어 압력 영향이 상대적으로 작은 것으

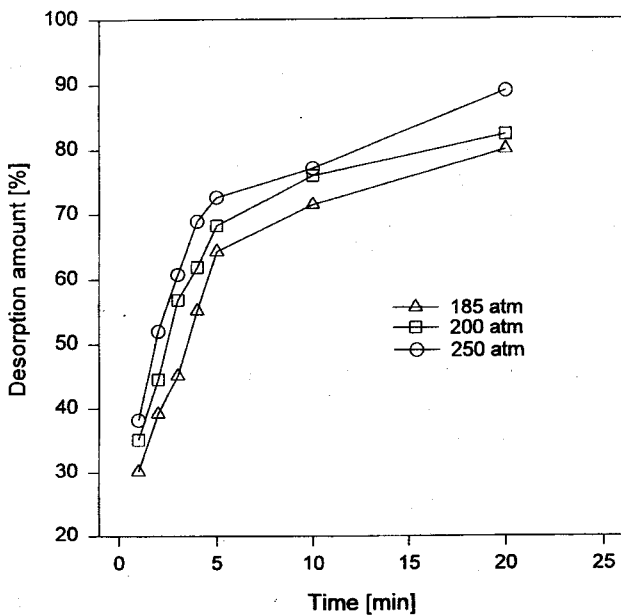


Fig. 4. Pressure effect on desorption rates of MEK at 318 K.

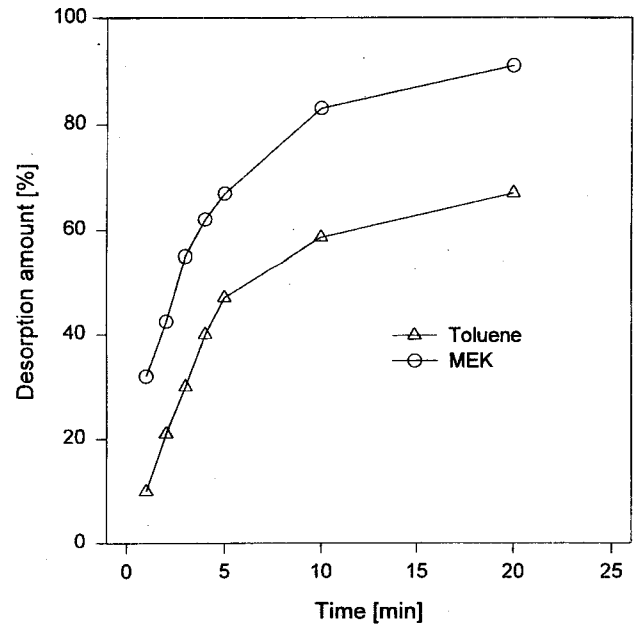


Fig. 5. Desorption rates of MEK/toluene mixture at 185 atm and 318 K.

로 사료된다. 이러한 극성물질이나 또는 탈착이 어려운 물질의 경우는 co-solvent를 첨가하여 초임계 유체의 극성을 향상시킴으로서 탈착효율을 증가시킨다[15, 16]. 따라서 MEK와 같이 극성을 띠고 있는 물질의 탈착을 위해서는 초임계 이산화탄소의 압력을 높이는 것만으로는 비효율적이며, 극성을 띠고 있는 co-solvent를 첨가하는 것이 바람직하다.

#### 4-3. MEK/톨루엔 혼합물의 탈착

같은 양의 톨루엔과 MEK가 흡착된 활성탄소섬유의 재생에 대해 Fig. 5와 6에 나타냈었다. 그림에서 볼 수 있듯이 순수 물질 탈착의 경우와 같이 혼합물에서도 MEK가 톨루엔에 비해 빠른 탈착 속도를 보이고 있다. MEK의 경우 순수 물질에 대한 탈착 실험의 결과와 비슷한 탈착 속도를 보이고 있으나, 톨루엔은 MEK 탈착의 영향으로

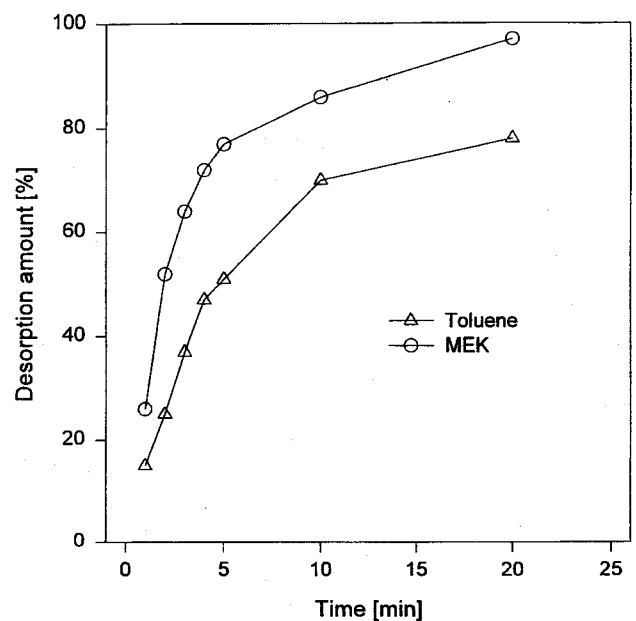


Fig. 6. Desorption rates of MEK/toluene mixture at 200 atm and 318 K.

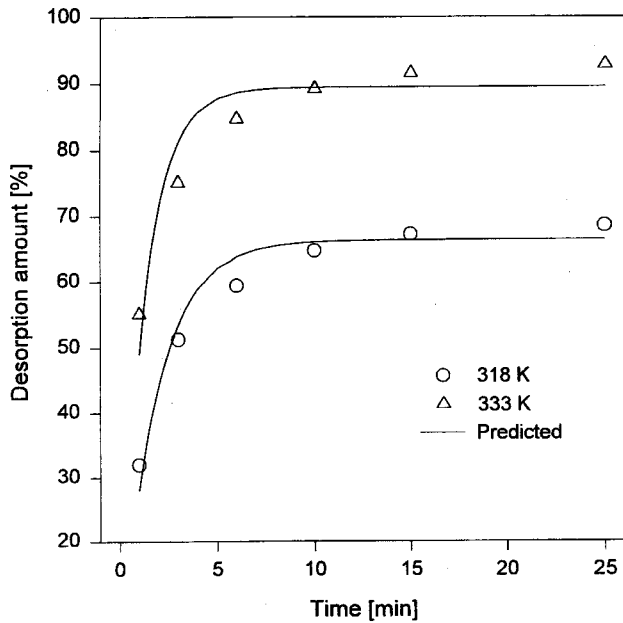


Fig. 7. Experimental and predicted desorption rates of toluene under supercritical operations,  $\rho_{CO_2}=0.79 \text{ g/cm}^3$ .

인해 초기의 탈착이 순수 물질의 경우보다 느린 탈착 속도를 보이고 있다. 또한 MEK의 극성으로 인해 압력이 증가함에 따라 두 물질간의 탈착 속도와 탈착량의 차이도 감소하고 있다. 따라서 탈착을 통한 물질의 분리 회수에 있어서는 항상 고압이 최적 조건은 아니며 물질간의 탈착 속도 차이가 크게 일어날 수 있는 조건을 구하는 것이 필요하다.

#### 4.4. 밀도의 영향 및 모델의 적용

Fig. 7과 8은 각각 초임계 이산화탄소의 밀도를 0.79, 0.85  $\text{g/cm}^3$ 으로 고정하였을 때 재생 효율에 미치는 온도의 영향을 나타낸 것이다. 압력을 고정하였을 때 318 K가 최적 재생 온도였던 Fig. 2의 경우와는 달리 온도가 증가함에 따라 재생 효율이 증가함을 보이고 있다. 이는 고정된 밀도의 조건하에서는 온도가 높을수록 점도가 낮아져 확산 속도가 향상되기 때문이다.

일정 시간동안 흡착된 양에 대한 탈착되는 양의 비율로 정의되는 재생 효율은 일반적으로 재생 온도와 압력에 의존한다. 그러나 초임계 조건에서는 밀도가 보다 중요한 역할을 하므로 고정된 압력보다는 고정된 밀도에서의 영향을 관찰하는 것이 좀더 타당하다고 할 수 있다. 압력 대신에 밀도가 변수로 사용될 때 재생 효율은 고정된 밀도에 대해 온도가 증가함에 따라 증가하였고, 온도에 대한 역의존성은 관찰되지 않았다.

탈착 속도 상수  $k$ 는 Fig. 7과 8의 실험 데이터로부터 식 (6)을 이용하여 구하였다. 계산된  $k$  값으로 예측된 결과는 모든 운전 조건에서 실험 데이터와 대체로 잘 일치하였다. 이는 초임계 조건에서의 열역학적 또는 속도론적 자료가 부족한 상태에서 단순화된 단일 매개변수 모델로 재생 단계의 물질전달 과정을 설명할 수 있음을 의미한다.

만약 탈착 속도 상수  $k$ 가 Arrhenius 법칙을 따른다면 다음과 같은 선형 관계가 존재해야 한다.

$$\ln k = \ln k_0 - E/RT \quad (7)$$

따라서  $\ln k$ 와  $1/T$  그래프의 기울기로부터 탈착 활성화에너지가 계산될 수 있다.

Table 3에서 볼 수 있듯이 탈착 활성화에너지는 0.79, 0.85  $\text{g/cm}^3$ 의

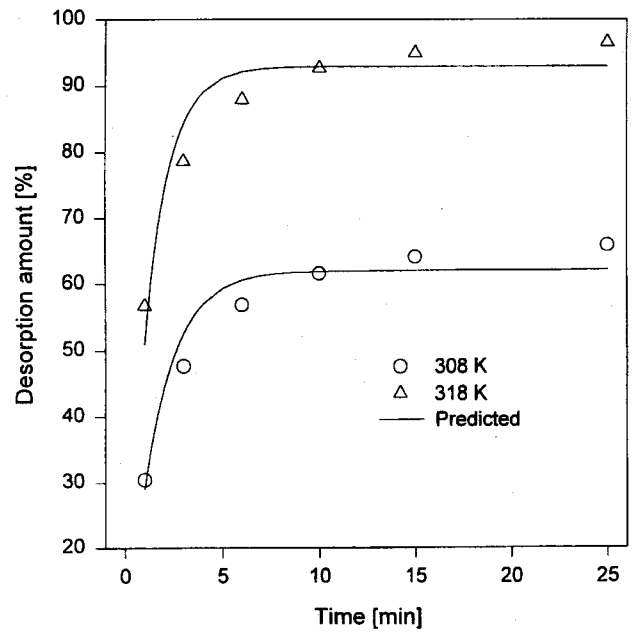


Fig. 8. Experimental and predicted desorption rates of toluene under supercritical operations,  $\rho_{CO_2}=0.85 \text{ g/cm}^3$ .

Table 3. Estimated  $k_0$  and  $E$  from experimental data at fixed densities

|                      | Density              |                      |
|----------------------|----------------------|----------------------|
|                      | 0.79 $\text{g/cm}^3$ | 0.85 $\text{g/cm}^3$ |
| $\ln k_0$            | 7.63                 | 6.96                 |
| $E \text{ [J/kmol]}$ | $2.18 \times 10^7$   | $1.90 \times 10^7$   |

밀도 조건에서 각각  $2.18 \times 10^7$ ,  $1.90 \times 10^7 \text{ J/kmol}$ 이었다. 비록 적은 실험 데이터로부터 계산되었으나 전체적인 경향은 파악될 수 있으며, 활성탄에 대한 문헌치와 유사하였다[8]. 높은 밀도일수록 탈착 활성화에너지의 값이 작아지는 높은 밀도 조건에서의 운전이 재생에 더 적합하다는 것을 증명하는 것이다.

## 5. 결 론

초임계 이산화탄소를 이용한 톨루엔과 MEK가 흡착된 활성탄소 섬유의 재생을 실험적으로 연구하였고 이를 수학적 모델로 분석하였다. 또한 재생 효율에 미치는 초임계 이산화탄소의 온도, 압력, 밀도의 영향을 살펴보았다.

압력이 높을수록 높은 재생 효율을 보였지만 온도는 압력에 의존하여 모든 압력 조건에 대해 318 K가 최적의 재생 온도로 관찰되었다. 이는 초임계 조건에서는 유체의 밀도뿐만 아니라 점도도 중요한 역할을 하는데 그 효과가 상쇄적으로 일어난 결과로 사료된다.

MEK/톨루엔 혼합물 탈착의 경우 MEK의 극성으로 인해 압력이 증가함에 따라 두 물질간의 탈착 속도와 탈착량의 차이도 감소하였다. 따라서 탈착을 통한 혼합물의 분리 회수를 위해서는 항상 고압의 조건이 바람직한 것은 아니며 물질간의 탈착 속도 차이를 크게 할 수 있는 조건을 구하는 것이 필요하다.

고정된 밀도의 조건하에서는 최적 온도가 존재하였던 고정된 압력 조건의 경우와는 달리 온도가 증가함에 따라 확산 속도의 향상으로 재생효율이 증가하였다. 따라서 고정된 압력보다는 고정된 밀도에서 탈착 활성화에너지를 구하는 것이 타당하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 선형 탈착 kinetics 가정하의 단일 매개변수 모델을 사용하여 재생 효율을 예측하였고 이는 실험결과와 대체로 잘 일치하였

다. 탈착 속도 상수와 온도의 역수 즉, Arrhenius 표현식을 통하여 구한 고정된 밀도에서의 탈착 활성화에너지는 활성탄에 대한 문헌치와 유사하였다. 밀도가 클수록 탈착 활성화에너지의 값이 작았는데 이로써 높은 밀도 조건에서의 운전이 재생에 더 적합하다는 사실을 확인할 수 있었다.

## 감 사

본 연구를 지원해주신 한국과학재단(95-0502-01-3)에 감사드립니다.

## 사용기호

- C : concentration of toluene in CO<sub>2</sub> [mol/cm<sup>3</sup>]  
 C<sub>e</sub> : exit concentration of toluene [mol/cm<sup>3</sup>]  
 E : activation energy [J/kmol]  
 k : desorption rate constant [-]  
 k<sub>o</sub> : desorption rate constant at reference state [-]  
 R : gas constant [=8314.3 J/kmol · K]  
 S : loaded toluene on activated carbon fiber [mol/cm<sup>3</sup>]  
 S<sub>o</sub> : initially loaded toluene on activated carbon fiber [mol/cm<sup>3</sup>]  
 T : temperature [K]  
 u : superficial velocity [cm/min]  
 t : time [min]  
 z : axial position in column [cm]

## 그리스 문자

- ε : void fraction in column [-]  
 ρ : density [g/cm<sup>3</sup>]

## 참고문헌

1. McHugh, M. A. and Krukonis, V. J.: "Supercritical Fluid Extraction, Principles and Practice", Butterworths, Stoneham(1986).
2. Paulaitis, M. E., Krukonis, V. J. and Reid, R. C.: *Rev. Chem. Eng.*, **1**, 179(1983).
3. DeFilippi, R. P., Krukonis, V. J., Robey, R. J. and Modell, M.: "Supercritical Fluid Regeneration of Activated Carbon for Adsorption of Pesticides", EPA Report, Washington D.C.(1980).
4. Kander, R. G. and Paulaitis M. E.: "Chemical Engineering and Supercritical Conditions", Stuetf, I. H. and McGuire, M. J., eds., Ann Arbor, Michigan(1983).
5. Recasens, F., McCoy, B. J. and Smith, J. M.: *AIChE J.*, **35**, 951 (1989).
6. Erkey, C. and Akgerman, A.: *AIChE J.*, **36**, 1715(1990).
7. Tan, C. S. and Liou, D. C.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **27**, 988(1988).
8. Tan, C. S. and Liou, D. C.: *AIChE J.*, **35**, 1029(1989).
9. Tan, C. S. and Liou, D. C.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **29**, 1412(1990).
10. 유승곤: 화학공업과 기술, **12**, 6(1994).
11. Angus, S., Armstrong, B. and De Reuck, K. M.: "International Thermodynamic Tables of the Fluid State Carbon Dioxide: IUPAC", Pergamon Press, NY(1976).
12. Ruthven, D. M.: "Principles of Adsorption & Adsorption Processes", Wiley, New York(1984).
13. Byeon, S.-H., Oh, S.-M., Kim, W.-S. and Lee, C.-H.: *Industrial Health*, **35**, 404(1997).
14. Suzuki, M.: *Carbon*, **32**(4), 577(1994).
15. 구본식, 김진철, 전정호, 배효광: 화학공학, **30**, 491(1992).
16. 구본식, 서정태, 배효광: 화학공학, **31**, 229(1993).