

# 흡착열뿔프에서 흡탈착과정의 온도 및 흡착량분포모의해석

장철수, 리명선, 조학철

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《...에너지를 효과적으로 리용하고 절약하기 위한 과학기술적문제들을 풀어야 하며 태양에너지, 풍력에너지를 비롯한 새로운 에너지를 개발하기 위한 연구에 힘을 넣어 그 리용전망을 확고히 열어놓아야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제15권 487페이지)

최근 세계적으로 화학열뿔프(CHP; Chemical Heat Pump)를 리용하여 폐열과 태양열을 비롯한 열에너지들을 효과적으로 리용하기 위한 연구[1, 2]가 활발히 진행되고있다.

특히 흡착열뿔프(AHP; Adsorption Heat Pump)는 안정성이 높고 구조가 간단하며 비용이 적게 드는것으로 하여 이것에 대한 연구[3, 4]가 심화되고있는데 여기서 중요한것은 흡착열뿔프에 대한 모의해석에 기초하여 최량설계조건과 최량운전조건을 확립하는것이다.

현재 화학공정모의설계프로그램들이 많이 개발되어 리용되고있지만 이러한 대상들에 대한 파라메터자료가 부족한것으로 하여 모의해석을 진행할수 없다.

우리는 흡착열뿔프의 합리적인 설계지표를 확정하기 위하여 선차적으로 제기되는 흡착열뿔프의 흡탈착과정에서 온도 및 흡착량분포를 모의해석하였다.

## 1. 흡착열뿔프의 흡탈착과정에 대한 모의해석모형

흡착열뿔프에서 흡착층의 기하학적구조는 그림 1과 같다.

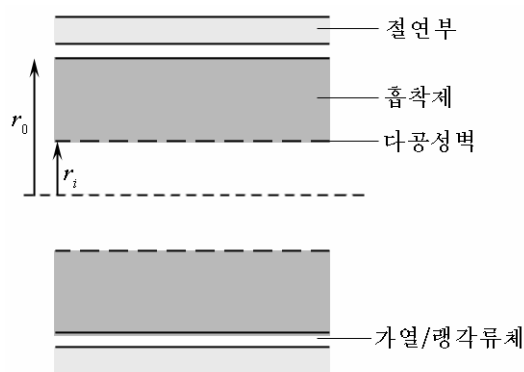


그림 1. 흡착층의 기하학적구조

흡착열뿔프에서 흡탈착과정 모의해석을 쉽게 하기 위하여 다음과 같이 가정하였다.

첫째; 물질 및 에너지의 이동은 반경방향으로만 일어난다.

둘째; 반응기벽은 충분히 절연되어 반응기 내부와 외부사이의 열이동은 없다.

셋째; 반응기의 임의의 부분에서 압력은 같으며 흡착제의 기체부분과 고체부분사이의 열교환은 충분하다.

이러한 가정밑에서 흡착열뿔프의 흡탈착시 열전도과정과 흡탈착열을 고려하면 에너지바

란스방정식은 다음과 같다.

$$[C_{Ps}\rho_s(1-\varepsilon) + C_{Pv}\rho_v\varepsilon]\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_e}{r}\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)\right] + R_{ads}\Delta H_{ads} \quad (1)$$

여기서  $C_{Ps}$ ,  $\rho_s$ 는 각각 흡착제의 비열과 밀도,  $C_{Pv}$ ,  $\rho_v$ 는 각각 증기의 비열과 밀도,  $\varepsilon$ 은 기공률,  $k_e$ 는 열전도도,  $R_{ads}$ 는 흡착속도,  $\Delta H_{ads}$ 는 흡착열이다.

이때 열전도도  $k_e$ 는 다음과 같이 주어진다.[3]

$$k_e = \varepsilon \left[ 4 \frac{\sigma}{2 - \sigma} d_p \frac{T^3}{100^4} \right] + (1 - \varepsilon) \left[ \frac{hk_s d_p}{2k_s + hd_p} \right] \quad (2)$$

여기서  $\sigma$ 는 복사능,  $d_p$ 는 구형활성탄립자의 직경,  $h$ 는 흡착제립자들사이의 열이동결수,  $k_s$ 는 흡착제의 열전도도이다.

한편 식 (1)에서 흡착속도  $R_{ads}$ 는 선형추진력(LDF; Linear Driving Force)방정식에 의하여 다음과 같이 주어진다.[3]

$$R_{ads} = \partial w / \partial t = k_s \alpha_v (W - w) \quad (3)$$

여기서  $W$ 는 평형흡착량,  $w$ 는 흡착량,  $k_s \alpha_v$ 는 질량이동결수로서 다음과 같다.

$$k_s \alpha_v = \frac{F_0 D_{s0}}{R_p^2} \exp \left( - \frac{E_a}{RT} \right) \quad (4)$$

여기서  $(F_0 \cdot D_{s0})/R_p^2$ ,  $E_a$ 는 각각 실험적으로 결정되는 상수들이며  $R$ 는 기체상수이다.

평형흡착량은 두비닌-라두쉬게비치(Dubinin-Radushkevich)방정식에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$W = W_0 \cdot \exp \{ -D [T \ln(P_s / P)]^2 \} \quad (5)$$

여기서  $W_0$ ,  $D$ 는 실험적으로 결정되는 상수들이며  $P$ 는 계의 압력,  $P_s$ 는 포화증기압으로서 안토니(Antoine)식에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$\lg P_s = A - B / (T + C) \quad (6)$$

여기서  $A$ ,  $B$ ,  $C$ 는 흡착물질에 관계되는 물질상수들이다.

식 (1), (3)을 고려하면 흡착층에서 시간에 따르는 온도 및 흡착량분포를 얻을수 있는 편립편미분방정식형태의 수학적모형이 구성된다.

$$\begin{cases} [C_{Ps} \rho_s (1 - \varepsilon) + C_{Pv} \rho_v \varepsilon] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_e}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + k_s \alpha_v (W - w) \Delta H_{ads} \\ \partial w / \partial t = k_s \alpha_v (W - w) \end{cases} \quad (7)$$

이때 식 (7)의 초기 및 경계조건들은 다음과 같다.

$$\begin{cases} T(r, t)|_{t=0} = T_0(r) \\ \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_i} = 0 \\ -k_e \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} = h_f (T - T_f) \end{cases} \quad (8)$$

여기서  $r_i$ 는 반응기중심에서 흡착층시작점까지의 거리,  $r_0$ 은 반응기중심에서 흡착층끝점까지의 거리,  $T_f$ 는 가열/랭각류체의 평균온도이다.

흡착초기의 온도분포는 반응기전체에 대하여 초기온도로, 흡착량분포는 반응기전체에 대하여 0으로 설정하고 흡착 및 탈착과정이 연속적으로 진행되는 과정의 온도분포와 흡착량분포는 탈착과정의 마지막상태가 흡착과정의 초기분포로, 흡착과정의 마지막상태가 탈착과정의 초기분포로 되게 설정하였다. 식 (7), (8)로 묘사되는 흡착열뿔프에서의 흡탈착과정모의해석모형은 1차원문제이고 단순한 초기 및 경계조건을 가진 비정상비선형편미분방

정식이므로 제차풀이법에 의하여 수값풀이할수 있다.

## 2. 흡착열뿔프의 흡탈착과정에 대한 모의해석

우리가 제기한 흡착열뿔프에 대한 흡탈착과정모의해석모형의 정확성을 확인하기 위하여 활성탄/에타놀로 된 흡착열뿔프의 흡탈착과정을 모의해석하였다.

주어진 흡착열뿔프에 대한 기하학적 및 물성파라미터들은 다음과 같다.

$\varepsilon=0.25$ ,  $\sigma=0.8$ ,  $d_p=0.002\text{m}$ ,  $h=9.07\text{J}/(\text{s}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,  $k_s=69.6\text{J}/(\text{s}\cdot\text{m}\cdot\text{K})$ ,  $C_{ps}=700\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,  $C_{pv}=78\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ,  $\rho_s=1\ 000\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $h_f=150\text{J}/(\text{s}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,  $T_f=300\text{K}$ (랭각),  $T_f=400\text{K}$ (가열),  $r_i=0.015\text{m}$ ,  $r_0=0.03\text{m}$ ,  $P=5\text{kPa}$ ,  $(F_0\cdot D_{s0})/R_p^2=5.013$ ,  $E_a=11\ 276\text{J}/\text{mol}$ ,  $W_0=0.395\ 5$ ,  $D=0.000\ 604\ 9$ ,  $n=1.156$ ,  $A=8.650\ 44$ ,  $B=1\ 892.02$ ,  $C=249.472$ ,  $\rho_v=P/(RT)$ ,  $\Delta H_{ads}=30+0.057T$ .

초기자료에 근거하여 순환시간이 1 200s인 경우 5번째 순환에서 런립편미분방정식을 풀어 시간에 따르는 층에서의 온도 및 흡착량분포를 결정하였다.

흡착층에서 흡탈착과정의 온도 및 흡착량분포곡선들은 그림 2-5와 같다.

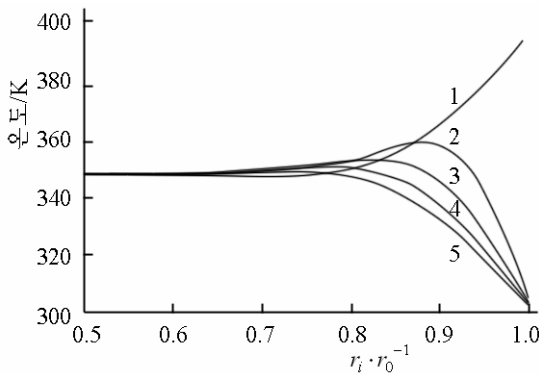


그림 2. 흡착과정의 온도분포  
1-5는 순환시간이 각각 4 800, 4 950, 5 100, 5 250, 5 400s인 경우

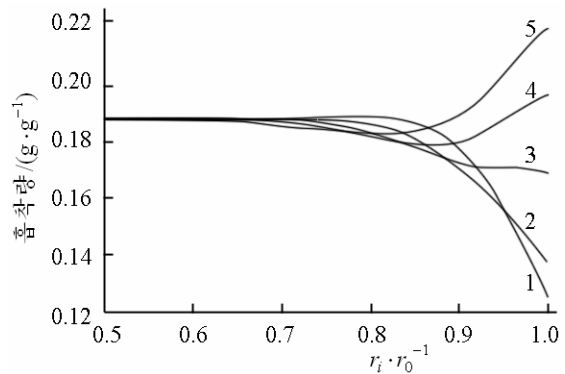


그림 3. 흡착과정의 흡착량분포  
1-5는 순환시간이 각각 4 800, 4 950, 5 100, 5 250, 5 400s인 경우

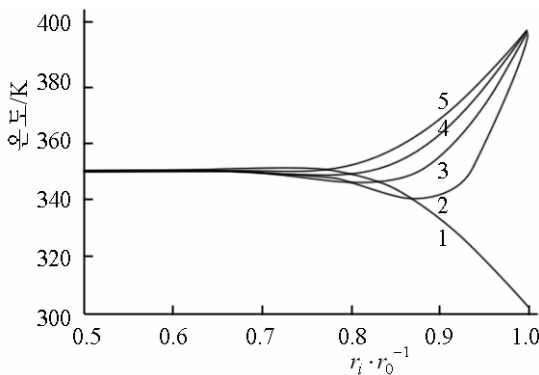


그림 4. 탈착과정의 온도분포  
1-5는 순환시간이 각각 4 800, 4 950, 5 100, 5 250, 5 400s인 경우

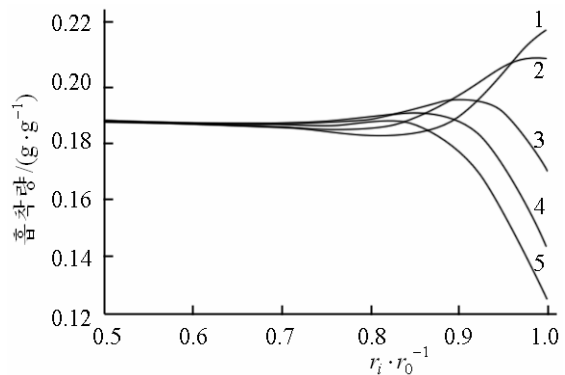


그림 5. 탈착과정의 흡착량분포  
1-5는 순환시간이 각각 4 800, 4 950, 5 100, 5 250, 5 400s인 경우

그림 2-5에서 보는바와 같이 바깥층의 랭각/가열에 의하여 층의 바깥부분에서는 온도 및 흡착량변화가 크다. 즉 흡착 및 탈착이 잘 일어난다. 이것은 층의 바깥부분에서는 외부

결면을 통한 열이동속도가 흡착열발생속도와 균형을 이루기때문이다. 그러나 안쪽 부분에서는 층의 열이동저항으로 하여 시간이 지남에 따라 흡탈착과정이 동시에 일어나게 된다. 또한 흡착제의 바깥부분만 흡착 및 탈착에 리용되며 이러한 현상들은 흡착층의 외경이 클수록 순환시간이 짧을수록 더 크게 나타난다. 이것은 흡착층의 두께와 순환시간 등 기하학적 및 운전지표들을 합리적으로 선정하여야 흡착열뿔프를 효율적으로 리용할수 있다는것을 알 수 있다.

모의해석결과는 활성탄/에타놀계의 흡착특성실험자료[4]와 잘 일치한다.

## 맺 는 말

흡착열뿔프에서 흡탈착과정을 모의해석하기 위한 수학적모형을 구성하고 모의해석실험을 통하여 흡착열뿔프의 흡탈착과정에서 온도 및 흡착량분포를 정확히 해석할수 있다는것을 확정하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] Chan Chan et al.; Applied Thermal Engineering, **48**, 160, 2012.
- [2] I. Mustafa et al.; International Conference on Food and Agricultural Sciences, **77**, 39, 2014.
- [3] Ahmet Onur Yurtsever et al.; Applied Thermal Engineering, **50**, 401, 2013.
- [4] A. Elsayed et al.; Energy Procedia, **61**, 2327, 2014.

주체106(2017)년 5월 5일 원고접수

## Simulation Analysis of Temperature and Adsorption Quantity Distribution during Adsorption and Desorption Process in Adsorption Heat Pump

*Jang Chol Su, Ri Myong Son and Jo Hak Chol*

We formed mathematical model for simulation analysis of adsorption, desorption process in the adsorption heat pump, confirmed that temperature and adsorption quantity distribution could be analyzed correctly during adsorption and desorption process of adsorption heat pump through the simulation analysis example.

Key words: adsorption heat pump, mathematical model, adsorption quantity distribution