

VSM 에 의한 단일기체 흡착등온선으로부터 혼합기체 흡착평형 예측

김재우·문제권·이한주

연세대학교 공과대학 화학공학과
(1988년 10월 14일 접수, 1989년 3월 27일 채택)

The Prediction of Binary Gas Mixture Adsorption Equilibria from Single Component Adsorption Isotherms Based on Vacancy Solution Model

Jaiwoh Kim, Jeikwon Moon, and Hanju Lee

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Yonsei University, Seoul 120-749, Korea
(Received 14 October 1988; accepted 27 March 1989)

요 약

본 연구는 VSM 이론을 이용하여 단일기체 흡착등온선으로부터 혼합기체 흡착데이터를 예측하고자 한 것이다. 제올라이트 5A 흡착제에 propane과 butane으로 등온 흡착실험을 하였으며 VSM에 의한 단일기체 흡착등온식에 있는 매개변수들(n_1^{∞} , b_1 , Λ_{13} , Λ_{31})을 실험데이터에 의해서 비선형 회귀법과 최적화방법으로 구하였으며 이 매개변수들을 이용하여 시행착오법으로 혼합기체의 데이터를 예측하였다. 두 흡착질의 조성을 달리하면서 혼합물 흡착실험을 하였으며 실험데이터는 VSM 이론에 잘 부합하였다.

Abstract— This study is to predict adsorption equilibrium data for binary gas mixture systems using the vacancy solution model (VSM).

The single component adsorption isotherms of propane and n-butane on a 5A molecular sieves (Davison C-625) were determined experimentally and from these isotherms the parameters in a single component adsorption isotherm equation by the vacancy solution model (n_1^{∞} , b_1 , Λ_{13} , Λ_{31}) were calculated. A nonlinear regression method and an optimization method were employed in the calculation of the parameters. The parameters were then used in the prediction of the binary gas mixture adsorption equilibrium curve through a trial-and-error method.

The experimental mixed-gas adsorption data for varying composition of propane-n-butane mixture were in good agreement with the predicted equilibrium curve based on the VSM.

1. 서 론

고체-기체의 흡착은 분리공정 중 매우 경제적이며 효율적인 단위조작으로서 혼합물의 분리 및 정제, 공해 물질의 제거, 그리고 불균일 촉매 반응기의 설계 등 많은 분야에 있어서 매우 중요시 되고 있다[1, 2]. 이러

한 설계 응용에 있어서 필요한 흡착데이터는 단일성분 보다는 혼합성분에 관한 것인데 반면에 순수성분에 대한 등온흡착 측정은 비교적 쉽고 정확하나 혼합성분의 흡착측정은 좀 더 복잡하고 많은 시간이 요구된다.

따라서 최소한의 실험데이터로부터 다양한 조건하에서의 흡착데이터를 예측할 수 있는 방법, 특히, 단일기

체 흡착등온선으로부터 실험에 의하지 않고 혼합기체 흡착데이터를 예측할 수 있는 방법의 개발에 상당한 관심을 끌어 왔다[1, 2].

기존의 다성분계 흡착모델들은 세가지 유형으로 대별할 수 있는데 첫째는 흡착표면에서의 2차원 이론이고, 둘째는 흡착용액 이론이며, 셋째는 통계 열역학적 이론으로부터 유도된 것이다[2, 3]. 이들 세가지 유형의 대표적인 모델로서 Hoory와 Prausnitz[3]의 van der Waals 상태방정식을 이용한 2차원 기체모델(Two Dimensional Gas Model), 흡착용액 이론에 근거를 둔 Myers와 Prausnitz[4]의 이상용액모델(Ideal Adsorption Solution Model-IASM)과 최근에 Suwanyuen과 Danner의 빈자리 용액모델(Vacancy Solution Model-VSM)[5, 6], 그리고 Ruthven의 단순 통계열역학적 모델(Simplified Statistical Thermodynamic Model-SSTM)[7, 8] 등을 들 수 있다. 이들 중 2차원 기체모델은 단일기체 흡착등온선으로부터 van der Waals의 매개변수를 전부 구할 수 없기 때문에 IASM 보다 정확하지 못한 것으로 평가되어 왔다[12].

Ruthven의 단순 통계열역학 모델은 두개의 변수만을 포함하고 이상적인 기체 혼합물에 대해서는 비교적 정확하게 예측할 수 있는 모델이지만 공비 형성물이나 조성변화에 따라 선택도가 반전되는 혼합물의 경우에는 잘 맞지 않으며 일반화된 통계열역학 모델을 적용하면 이와 같은 현상을 예측할 수 있지만 수학적 표현이 매우 복잡하다.

그 외에 일반적 열역학 관련식인 Dubinin-Polanyi의 potential 이론에 의한 측정방법이 있는데 이론적 근거는 미약하지만 사용이 편리하여 활용이 기대되는 이론 중의 하나이다. 이상의 다른 모델들이 어떤 특정 흡착계에 적용시킨 결과만을 가지고 각자 모델의 정확성과 일반성을 주장하고 있으나 아직까지 확실한 적용범위조차 규명되어 있지 않을 뿐더러 이들의 일반성을 평가하기에 적합한 혼합기체 데이터들도 문헌상에 충분하지 않다. 따라서 본 연구는 불균일 흡착체에 대한 흡착모델 평가의 일환으로 제올라이트 5A 흡착제(Davison C-625)에 대한 propane과 n-butane의 2 성분 흡착실험을 통하여 비교적 최근에 유도된 VSM(Vacancy Solution Model)을 평가하고자 한다.

2. 이 론

2-1. 단일성분 기체의 빈자리 용액모델

여기에서 사용한 빈자리 용액모델의 이론은 Dubinin[13]이 제시하고 Lucassen-Reynders[9-11]가 수정한 이론을 사용한 Suwanyuen과 Danner[5, 6]의 내용과 동일하다. Dubinin[13]은 molecular sieves에 대한 단일성분 흡착을 서로 다른 조성을 갖는 빈자리 용액사이의 평형으로 취급하였다. 빈자리는 흡착질과 크기가 같고 나머지 흡착공간을 채우는 공백 실체물로 정의되었고 흡착평형을 나타내는 모델을 정의하면 다음과 같다[5].

1. 기상과 흡착상은 빈자리(vacancy)라 불리는 가상적 용매내에 있는 흡착질 용액이라 가정한다.
2. 흡착상의 성질은 분할표면(dividing surface)에 관하여 과잉성질(excess property)이다.
3. 고체를 포함한 전체계는 열적 평형상태에 있지만 기체와 흡착용액은 서로 삼투평형 혹은 상평형 상태이다.
4. 계의 평형은 표면의 potential force field에서 일어나는 표면압력, 전개압력, 삼투압력에 의해 유지된다.

이 모델에 따르면 기체 흡착평형은 기상혼합용액과 그의 표면 흡착상과의 평형으로 간주된다. 이 계에 대한 용매는 빈자리가 되며 용질은 흡착질이 되므로 순수 기체 흡착평형은 2성분 빈자리 용액간의 평형이 된다.

Lucassen-Reynders에 의해 제시된 표면 흡착상 성분에 대한 표현은 아래와 같다.

$$\mu_i^s = \mu_i^{os} + RT \ln \gamma_i^s x_i^s + \pi \bar{a}_i \quad (1)$$

위식의 마지막 항 $\pi \bar{a}_i$ 는 표면 포텐셜에 대한 기여도를 나타내고 기상에 대하여 이 항은 없어지고 다음식으로 표현된다.

$$\mu_i^s = \mu_i^{os} + RT \ln \gamma_i^s x_i^s \quad (2)$$

계가 평형을 이루고 있으면 화학 포텐셜이 같아야 하므로 (3)식이 성립한다.

$$\mu_i^s = \mu_i^g \quad (3)$$

순수용매(빈자리)에 대하여 위와 같은 관계를 적용하면 각 상에 대한 표준상태의 화학 포텐셜간의 관계가 얻어진다.

이 때

$$x_i^s = x_i^g = 1 \quad (4)$$

$$\gamma_i^s = \gamma_i^g = 1 \quad (5)$$

$$\pi = 0 \text{ 이다.} \quad (6)$$

따라서

$$\mu_i^{os} = \mu_i^{og} \quad (7)$$

이 된다. 여기에서 하첨자 3은 용매 혹은 빈자리를 나타낸다.

식 (1), (2), (7)을 (3)식에 대입하면 흡착상에 대한 상태방정식은 (8)식이 된다.

$$\pi = \frac{-RT}{\bar{a}_3} \ln \gamma_3^s x_3^s \quad (8)$$

여기에서 흡착 2상계 빈자리 용액에서의 비이상성을 정의하는 활동도계수는 Wilson 식에서 계산할 수 있으며 흡착상의 빈자리에 대한 식은 다음과 같다.

$$\ln \gamma_3^s = -\ln(x_3^s + \Lambda_{31}x_1^s) - x_1^s \left(\frac{\Lambda_{13}}{x_1^s + \Lambda_{13}x_3^s} - \frac{\Lambda_{31}}{x_3^s + \Lambda_{31}x_1^s} \right) \quad (9)$$

한편 Lucassen-Reynders의 분할표면 정의에서 흡착상의 각 성분의 과잉물분율과 부분 몰면적은 흡착질의 한계 몰면적과 열역학적 관계로부터 계산할 수 있다.

즉,

$$\bar{a}_3 = \frac{A}{n_1^{s,\infty}} \quad (10)$$

$$x_1^s = \frac{n_1^s}{n_1^{s,\infty}} = \theta \quad (11)$$

$$x_3^s = \frac{n_3^s}{n_1^{s,\infty}} = 1 - \theta \quad (12)$$

의 관계가 성립한다. 여기에서 $n_1^{s,\infty}$ 는 순수성분 1의 한계 흡착량이고 n_1^s 는 성분 1의 흡착량, n_3^s 는 빈자리의 흡착량, \bar{a}_3 는 빈자리의 부분몰면적을 나타낸다. 한편 고체위의 기체 흡착에 대한 Gibbs 흡착식은 (13)식과 같다.

$$RTd \ln P = \frac{A}{n_1^s} d\pi \quad (13)$$

(8)식을 (13)식에 대입하고 적분하면 단일기체 흡착 등온식은 다음의 (14)식으로 표현된다.

$$P = \left(\frac{n_1^{s,\infty}}{b_1} \frac{\theta}{1-\theta} \right) \left[\Lambda_{13} \frac{1 - (1-\Lambda_{31})\theta}{\Lambda_{13} + (1-\Lambda_{13})\theta} \right] \exp \left[- \frac{\Lambda_{31}(1-\Lambda_{31})\theta}{1 - (1-\Lambda_{31})\theta} - \frac{(1-\Lambda_{13})\theta}{\Lambda_{13} + (1-\Lambda_{13})\theta} \right] \quad (14)$$

2-2. 2성분 혼합기체의 빈자리 용액모델

2성분계 흡착평형에 대한 빈자리 용액모델은 앞질의 단일성분 흡착등온선을 확대하여 쉽게 얻을 수 있으며 결과식은 다음과 같다.

$$n_m^{s,\infty} = n_1^s + n_2^s + n_3^s \quad (15)$$

$$n_m^s = n_1^s + n_2^s \quad (16)$$

$$x_i^s = x_i \frac{n_m^s}{n_m^{s,\infty}} = x_i \theta \quad (i=1 \text{ or } 2) \quad (17)$$

$$x_3^s = 1 - x_1^s - x_2^s = 1 - \frac{n_m^s}{n_m^{s,\infty}} = 1 - \theta \quad (18)$$

$$- \frac{\pi \bar{a}_i}{RT} = \left[1 + \frac{n_m^{s,\infty} - n_m^s}{n_m^{s,\infty}} \right] \ln \gamma_3^s x_3^s \quad (19)$$

$$\ln \gamma_k^s = 1 - \ln \left(\sum_{j=1}^n x_j^s \Lambda_{kj} \right) - \sum_{j=1}^n \left[\frac{x_j^s \Lambda_{jk}}{\sum_{l=1}^n x_l^s \Lambda_{lj}} \right] \quad (20)$$

한편 낮은 압력하에서 기상에 대하여 이상성을 가정하면 기상과 흡착상의 평형관계식은 (21)과 같다.

$$y_i P = \gamma_i^s x_i n_m^s \frac{n_1^{s,\infty} \Lambda_{1i}}{n_m^{s,\infty} b_i} \exp(\Lambda_{3i} - 1) \exp \left(\frac{\pi \bar{a}_i}{RT} \right) \quad (21)$$

비슷한 흡착질을 가진 계에 대하여 두 흡착질간의 상호작용력은 $\Lambda_{12} = \Lambda_{21} = 1$ 로 할 수 있고 상호작용력을 무시할 수 없는 경우에는 실험데이터로부터 산출해야 한다. 본 연구에서는 분자간의 상호작용력을 무시하였고 Λ_{13} , Λ_{31} , Λ_{23} , Λ_{32} 는 순수성분 흡착데이터에 의해서 Nonlinear Regression Method로 구하였다.

3. 실험

3-1. 흡착제 및 흡착질

본 실험에서 사용한 흡착제는 W. R. Grace 사(Da-
vison Chemical Division)의 성형품 Binderless
5A인 C-625이다. 흡착질로 사용한 노말 파라핀계 저
급 탄화수소 시료들은 순도 99.7% 이상의 Matheson
사 C. P. 급 propane과 n-butane이다.

3-2. 흡착실험장치

본 실험에서 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같다. 흡착
제의 중량변화는 Cahn 2000 electro-micro-balance
(Cahn-Instruments Inc.)를 이용하여 측정하였고 혼
합물의 조성변화는 BET 장치에 시료 채취구[21]를 통
하여 분석할 수 있도록 하였다. 장치내의 진공은 ro-
tary vacuum pump[14]와 diffusion pump[13]를
사용하였고 McLeod gauge[15]를 통하여 진공도를
측정하였다.

또한 장치내로 주입되는 흡착질의 압력을 측정하기
위하여 수은 마노메타[11]를 설치하였고 흡착과정 중에
등온조건을 유지하기 위하여 직경이 작고 열전도성이
좋은 금속제 hangdown tube[2]를 항온조내에 설치하
였다.

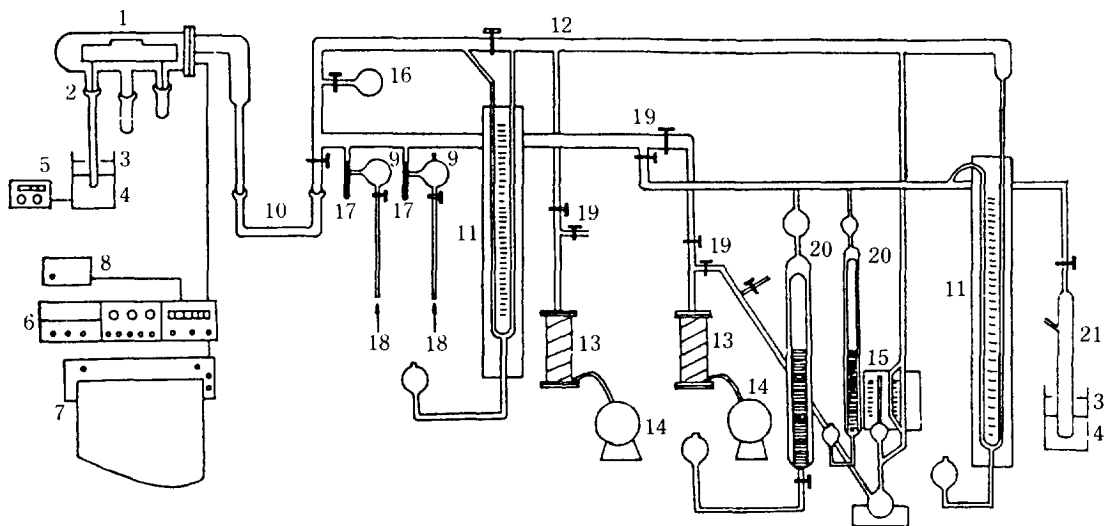


Fig. 1. Schematic diagram of adsorption experiment system.

- | | | |
|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 1. Cahn electro-micro-balance | 8. Sample positioner | 15. McLeod vacuum gauge |
| 2. Hangdown tube | 9. Gas storage cell | 16. Adsorbate storage cell |
| 3. Electric furnace | 10. Ball joint | 17. Needle valve |
| 4. Constant temperature bath | 11. Mercury manometer | 18. Gas from adsorbate gas cylinders |
| 5. Temperature controller | 12. Vacuum header | 19. Vacuum valve |
| 6. Cahn balance console | 13. Oil diffusion pump | 20. Gas buret |
| 7. Automatic recorder | 14. Mechanical vacuum pump | 21. Sample cell with gas sample port |

3-3. 흡착실험 방법

3-3-1. 단일기체

흡착제 제올라이트 5A 시료는 10^{-3} mmHg의 진공도와 350°C 에서 20시간 정도 가열하여 활성화시켰으며 매번 흡착실험할 때마다 10^{-3} mmHg 이하 300°C 에서 약 4시간 동안 재활성화시켜 반복 사용하였다. 흡착실험은 25°C 에서 흡착질인 노말 파라핀계 탄화수소를 0.5 mmHg-750 mmHg 사이의 압력으로 needle valve를 통하여 흡착장치내로 주입시켜 흡착제의 중량변화를 기록하였다. 이때 흡착장치의 부피에 비하여 흡착되는 기체의 부피는 매우 미소하기 때문에 흡착과정의 압력 변화에 따른 영향은 무시할 수 있었다. 흡착과정에 등온조건을 유지하기 위하여 흡착제의 양은 19-23 mg 정도의 적은 양을 사용하였다.

3-3-2. 혼합기체

활성화과정과 재활성화과정은 단일기체의 경우와 동일하다. n-butane과 propane의 성분비율을 달리하여 여러 개의 조성을 갖는 혼합기체를 얻은 다음 25°C 와 80 mmHg에서 Cahn-electro-micro-balance를 이용하여 흡착량을 측정하고 흡착 후의 조성변화는 동일한 주입농도로 BET 장치를 이용하여 재 실험하여

측정하였다. BET 장치에서는 좀 더 많은 양의 흡착제를 사용하여 흡착 후 조성변화를 크게 하였고 흡착이 평형에 도달하면 시료 채취구에서 일정량을 채취하여 GC(Shimadzu-7A)를 통하여 분석하였다. 이때 사용한 GC는 integrator(c-RIB)가 부착된 FID(Flame Ionization Detector)이며 분석에 사용한 column은 길이가 3m, 내경이 3mm로 충전물질은 10% Squalane/Chromosorb W 이었다.

4. 실험결과 및 고찰

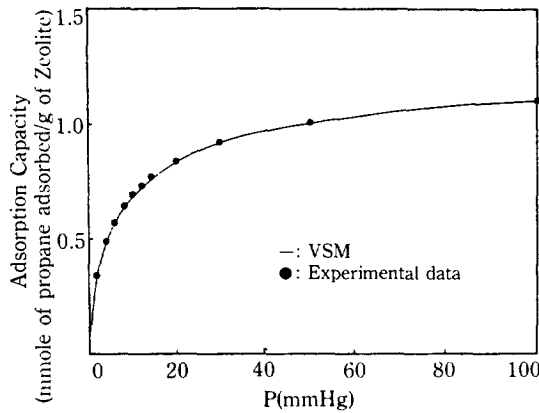
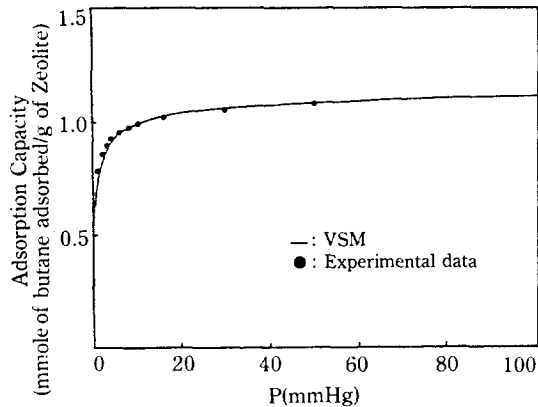
4-1. 단일기체 흡착평형

단일기체 흡착등온식[14]은 실험데이터에 의해서 결정될 수 있는 매개변수들(n^{∞} , b_1 , Δ_{13} , Δ_{31})을 포함하고 있는데 이들은 흡착평형 데이터를 흡착등온식에 의하여 비선형 회귀법과 최적화방법을 이용하여 구할 수 있다. 식 (14)를 평가하고 흡착데이터를 예측하기 위한 매개변수들은 실험데이터를 IMSL(International Mathematical and Statistical Library)에 수록된 ZXSSQ 방법에 의한 비선형 회귀법을 사용하여 구했을 때 실험데이터와 가장 잘 일치되는 값으로

Table 1. The parameters of the Vacancy Solution Model for pure gases on zeolite 5A molecular sieves (C-625)

Adsorbate Gas	Temperature (K)	n_1^{∞} (mmole/g)	b_1 (mmole/g·mmHg)	A_{13}	A_{31}
C ₃ H ₈	298	1.288	0.238	4.290	0.087
n-C ₄ H ₁₀	298	1.253	5.330	9.669	0.276

취하였다. 이렇게 구한 매개변수 값들은 Table 1에 수록하였고 이들 매개변수 값과 식 (14)를 이용하여 도식한 결과 Fig. 2와 3에 나타난 바와 같이 실험데이터와 잘 일치함을 알 수 있다. 또 단일기체 흡착상에서의 전개압력(spreading pressure)은 앞에서 결정된 변수들

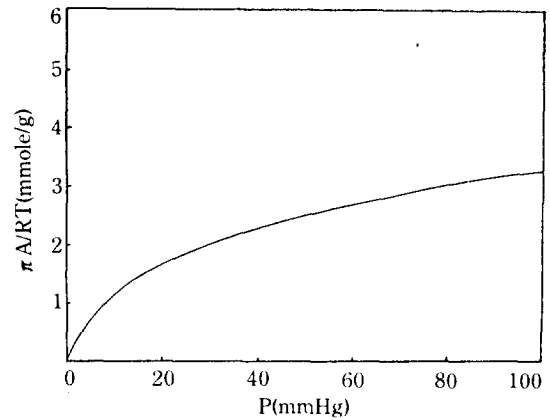
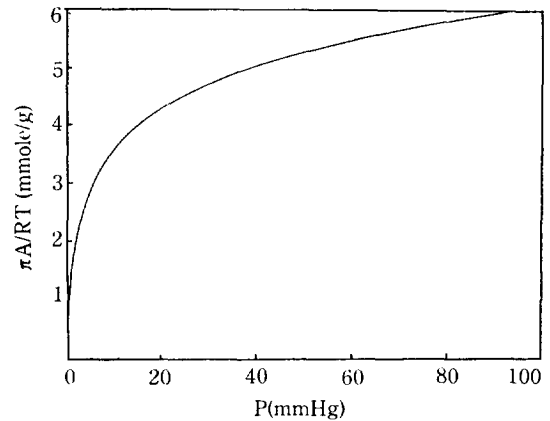
**Fig. 2. Prediction of propane adsorption isotherm on 5A molecular sieves (C-625).****Fig. 3. Prediction of butane adsorption isotherm on 5A molecular sieves (C-625).**

과 식 (8), (9), (11), (12)를 이용하여 구할 수 있다.

C₃H₈과 n-C₄H₁₀의 전개압력과 압력과의 관계는 Fig. 4와 5에 나타내었다. 여기에서 볼 때 압력이 0-80 mmHg의 범위에 있을 때 n-C₄H₁₀의 전개압력이 C₃H₈보다 높게 나타나는데 이것은 n-C₄H₁₀이 낮은 압력범위에서 흡착등온선이 포화 한계점에 도달된다는 사실과 일치한다.

4-2. 혼합성분 흡착평형

단일성분 흡착데이터로부터 얻은 매개변수들만을 사용하여 2성분계 혼합기체의 흡착평형 예측은 식 (15)-(21)에 의해 계산되어 진다. 식 (21)에서 임의의 조성 x_i 에 대한 y_i 값을 구하기 위해서는 시행착오법을 사용해야 한다. 식 (20)에서 흡착된 서로 다른 분자들끼리

**Fig. 4. Spreading pressure of propane on 5A molecular sieves at 298K.****Fig. 5. Spreading pressure of butane on 5A molecular sieves at 298K.**

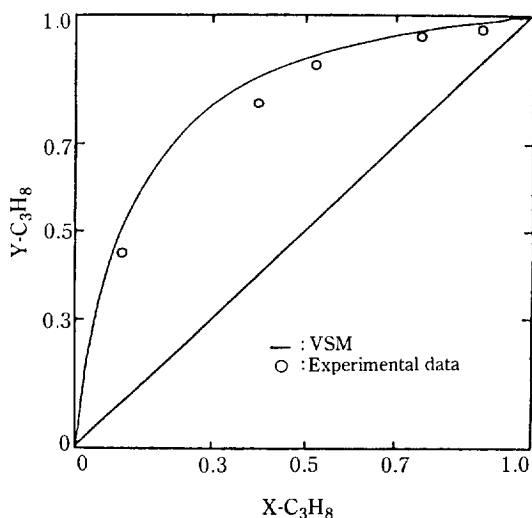


Fig. 6. Prediction of the adsorption equilibrium phase diagram for C_3H_8 - $n-C_4H_{10}$ mixtures on 5A molecular* sieves at 298K and 80 mmHg.

*Davison C-625

의 상호작용을 나타내는 변수 Λ_{21} 과 Λ_{12} 는 1이라 가정하고 계산했을 때 x_1 과 y_1 의 관계 및 x_1 과 n_m^∞ 의 관계는 Fig. 6과 7에 각각 나타내었다. 실험치와 이론치가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

이론값의 그래프가 왼쪽으로 볼록한 면을 나타내고 있고 x_1 의 값의 범위가 작을수록 y_1 값의 변화가 크고 x_1 값이 클수록 y_1 값의 변화가 작는데 이것은 낮은 압력 범위에서 부탄이 포화 한계점에 도달하기 때문이라 사료된다.

Fig. 7에 나타난 C_3H_8 조성에 따른 흡착량이 거의 일정한 값을 나타내고 있는데 80 mmHg에서 propane과 n-butane의 순수성분 흡착량이 거의 같기 때문에 조성변화에 따른 흡착량의 변화가 일정해진 것으로 보이며 실험치와 이론치는 서로 잘 부합하였다.

5. 결 론

VSM을 이용하여 단일기체 흡착등온선으로부터 혼합기체 흡착데이터의 예측평가에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. Propane과 n-butane의 단일기체 흡착의 경우, 본 실험에서 얻은 흡착데이터는 VSM 이론에 의한 흡착등온선과 잘 일치하였다.

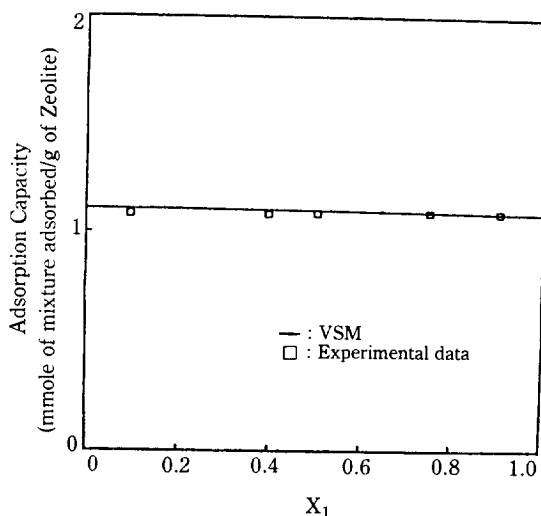


Fig. 7. Prediction of the total amount adsorbed from binary mixtures on 5A molecular sieves* at 298K and 80 mmHg: H_3H_8 - $n-C_4H_{10}$.

*Davison C-625

2. Propane과 n-butane 혼합기체 흡착의 경우 흡착데이터는 흡착질 사이의 상호작용 에너지를 무시하고 VSM 이론에 의해 예측한 흡착곡선과 비교적 잘 부합하였다.

NOMENCLATURE

- \bar{a}_i : partial molar surface area of i ($cm^2/mmole$)
- A : surface area of adsorbent (cm^2/g)
- b_i : Henry's law constant of i ($mmole/g\cdot mmHg$)
- n_i^s : number of moles of i in surface phase ($mmole/g$)
- $n_i^{s,\infty}$: maximum number of moles of i in surface phase ($mmole/g$)
- n_m^s : total number of moles of mixture in surface phase ($mmole/g$)
- $n_m^{s,\infty}$: maximum total number of moles of mixture in surface phase ($mmole/g$)
- P : pressure of gas phase ($mmHg$)
- T : temperature of adsorption system (K)
- x_i : mole fraction of i in vacancy-free adsorbed phase
- x_i^s : mole fraction of i in adsorbed phase vacancy solution
- y_i^s : mole fraction of i in vacancy-free vapor phase
- γ_i^s : activity coefficient of i in adsorbed phase vacancy solution

- γ_i^g : activity coefficient of i in bulk gas mixture
 θ : fractional coverage
 A_{ij}, A_{ji} : Wilson's parameter for interaction between i and j
 π : surface spreading or osmotic pressure (N/cm)
 μ_i^g : chemical potential of i in bulk phase (J/mole)
 μ_i^{og} : standard state chemical potential of pure gas i at 1 bar (J/mole)
 μ_i^s : chemical potential of i in adsorbed phase vacancy solution (J/mole)
 μ_i^{us} : standard state chemical potential of pure gas i in adsorbed phase vacancy solution (J/mole)

REFERENCES

1. Bal, K.K.: *Ind. Eng. Chem. Process Res. Dev.*, **23**, 711 (1984).
2. 현상훈, 이강호 : 연세대학교 산업기술연구소 논문집, 제 16집, 제 1권, 107 (1984).
3. Hoory, S.E. and Prausnitz, J.M.: *Chem. Eng. Sci.*, **22**, 1025 (1967).
4. Myers, A.L. and Prausnitz, J.M.: *AIChE J.*, **11**, 121 (1975).
5. Suwanayuen, S. and Danner, R.P.: *AIChE J.*, **26**, 68 (1980).
6. Suwanayuen, S. and Danner, R.P.: *AIChE J.*, **26**, 76 (1980).
7. Ruthven, D.M., Loughlin, K.F., and Holbrow, K.A.: *Chem. Eng. Sci.*, **28**, 7016 (1973).
8. Ruthven, D.M.: *AIChE J.*, **22**, 753 (1976).
9. Lucassen-Reynders, E.H.: *J. of Colloid Interface Sci.*, **41**, 156 (1972).
10. Lucassen-Reynders, E.H.: *J. of Colloid Interface Sci.*, **42**, 554 (1973).
11. Lucassen-Reynders, E.H.: *Prog. Surface Membrane Sci.*, **10**, 253 (1976).
12. Danner, R.P. and Choi, E.C.F.: *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **17**, 248 (1978).
13. Dubinin, M.M.: "New Results in Investigation of Equilibria and Kinetics of Adsorption of Gases of Zeolites", Presented at the Fourth International Conference on Molecular Sieves, University of Chicago, Chicago Ill. April, 1822 (1977).
14. Ruthven, D.M.: "Principles of Adsorption and Adsorption Process", 72, John Wiley and Sons, New York (1984).
15. McNair, H.M. and Bonelli, E.J.: "Basic Gas Chromatography", John Wiley and Sons (1979).