

## 활성탄에 대한 수소와 메탄의 흡착특성

김은철\*, 최대기\*\*, 노경호<sup>†\*</sup>

\*초정밀생물분리기술연구센터, 인하대학교, 화학공학과

\*\*청정기반기술연구센터, 한국과학기술연구원

## Adsorption Characteristic of Hydrogen and Methane on Activated Carbon

Yinzhe Jin\*, Dae-Ki Choi\*\*, Kyung Ho Row<sup>†\*</sup>

\*Center for Advanced Bioseparation Technology, Department of Chemical Engineering, Inha University, 253 Yonghyun-Dong Nam-Ku, Incheon 402-751, Korea

\*\*Clean & Technology Research Center, Korea Institute of Science and Technology, 39-1, Hawolgok-dong, Sungbuk-gu, Seoul 136-791, Korea

### ABSTRACT

In this work, a static volumetric method was experimentally implemented to measure the adsorption isotherm of hydrogen and methane by the activated carbon. The equilibrium data of stationary phase and mobile phase were correlated into the Langmuir, Freundlich, Langmuir-Freundlich, and Toth isotherms, respectively. In addition, the comparison between prediction and experimental data was made. By a nonlinear regression analysis, the experimental parameters in the equilibrium isotherms were estimated and compared. Then, the linear and quadratic equations for pressure and temperature to adsorption amounts were expressed. The adsorption amounts were increased with the pressure increase and the temperature decrease.

**주요기술용어** : Adsorption Isotherm(흡착 등온선), Isosteres(등매), Langmuir model(랑그뮤얼 모델), Activated carbon(활성탄), Hydrogen(수소)

### 1. 서 론

최근, 연료(석탄 등)방면에서 수소 양의 증가를 필요로 하고 있으며 반도체공정과 석유화학공업,

수소는 생태학 청결과 재생 에너지 원료 방면에서 각광 받고 있다. 수소는 화학제품의 원료 및 화학공장의 공정가스로 널리 사용되고 있으며, 현재 인류가 당면하고 있는 환경문제 및 화석연료의 가격상승이나 고갈을 예상할 때 궁극적인 미래의 대체에너지원 또는 에너지 매체(energy carrier)로 생각되고 있다<sup>1)</sup>. 일반적으로 공업용 수소는 경질의 탄화수소를 스텁 개량하거나 중질의

<sup>†</sup> Corresponding author : rowkho@inha.ac.kr

탄화수소를 부분 산화하여 코크 오븐 가스거나 물의 해리에서 얻는다. 장기적으로는 재생에너지 를 사용한 물 전기분해, 원자력을 이용한 수소 제 조가 주목받고 있지만, 안정된 기술이 확보되기까지는 화석연료를 사용한 수소 제조법이 대용량 수소 제조법 중 가장 경제적인 것으로 분석되고 있다<sup>2)</sup>. 그러나 여러 가지 불순물이 포함되어 있기 때문에 고순도의 수소를 분리하기 어려웠다. 압력 순환식 흡착 (PSA, pressure swing adsorption)기술<sup>3-5)</sup>은 적은 에너지를 필요로 하고, 적은 투자 설비비용, 고순도로 분리할 수 있으며(99.999%, H<sub>2</sub>), 흡착제의 포화사이즈와 표면 특성에 사용된다. PSA는 물리적 현상에 의하여 흡착제에 특수 성분의 흡착된 양이 증가하고 부분 압력이 감소한다. 총 압력의 감소와 bed에서 낮은 압력으로의 분사로 하여 흡착제의 간신, 흡착의 순환과정에서 생산품 스트림의 분획으로 쉽게 도달할 수 있다. PSA 공정은 비록 온도와 압력, 두 가지 부동한 흡착평형에서 이루어지지만, 압력이 더 빨리 개변됨에 따라 더 빠르게 순환되는 조작이 가능하다. PSA의 중요한 응용은 공기로부터 산소의 생산, 기체의 제습 그리고 수소의 정제에 기초를 두고 있을 것이다. 다른 응용은 이산화탄소의 제거, 방사성 폐기물의 회수, 불활성기체의 풍부한 회수, 헬륨의 정제, 천연가스의 정제, 이성질체의 분리, 일산화탄소의 분리 등을 포함한다. 노르말 파라핀 으로부터 이소파라핀의 분리는 분자체와 같은 형태 선택 흡착제를 이용하여 성취되었다. 복합흡착 제에 의한 일산화탄소의 분리는 화학흡착을 포함한다.

흡착에 의해 가스를 분리하기 위해서는 흡착제 가 반복적으로 사용되어져야만 한다. 탈착단계가 열탈착이라면 짧은 시간을 가지며 흡착제 충진충에서 낮은 열전도를 하는 동안 상대적으로 큰 열전달시간 상수 때문에 도입되어 진다. 이 문제는 흡착제 입자에서의 세공확산일 때 속도결정단계이고, 때문에 흡착 혹은 보다 작은 것으로서 크기가 같은 순서로서 입자 내에서의 탈착의 시간상 수는 저압력 탈착의 도입에 의해 보류되고 있고,

유효확산계수는 조작압력에서 역으로 비례한다. 흡착제로는 활성탄을 많이 사용하지만 제올라이트나 실리카겔을 사용하기도 한다. 연구자들은 제올라이트를 흡착제로 프레온-12의 흡착등온선을 구했으며, 또한 실리카겔을 흡착제로 프레온-11의 흡착등온선을 구하였고, 2종류의 활성탄을 이용하여 프레온-113의 흡착등온선을 측정하였다<sup>6)</sup>. 혼합가스의 대량 분리는 높은 압력에서의 흡착과 낮은 압력에서의 탈착의 반복에 의해 이루어질 수 있다. 실제로, 흡착단계에서 많은 흡착이 가능한 조성들이 컬럼에 남아있는 동안 적은 흡착이 가능한 조성은 생성되고 탈착에 의해 회수된다.

일반적으로 흡착능은 도입된 흡착제에 의한 각 성분의 흡착평형의 비교에 의해 결정되어 진다. 그러나 PSA법에 있어서는 PSA조작의 효율적인 분리에 있어서 중요한 역할은 흡착속도의 일시적 조작이다. 마찬가지로 흡착속도는 두 가지 기체의 분리의 경우에 중요한 역할을 하며 흡착평형에 있어서도 같으며, 사실상 흡착속도는 두 기체의 분리의 경우에 있어 중요한 역할을 하며 흡착평형 역시 마찬가지지만 속도는 상당히 다르다. 평형이론은 비평형이론을 기준으로 둔 수치해석 그리고 순환정상상태 측면을 얻기 위한 간단화 되어진 방법을 재평가했다. PSA와 같은 순환식 조작에서 총팔물질전달계수는 파과곡선의 계산에 통상적으로 도입되어진 것으로 대단한 차이일 것이다. 내부입자 확산에서 총팔물질전달계수 그리고 조작조건의 관계에 대한 방법을 보여준다.

흡착 평형식은 가스분리에서 탑내의 흡착제에 흡착된 농도와 이동상에서의 시료의 농도에 대한 관계식으로 시료 주입량이 많아지고 탑의 크기가 커짐에 따른 분리도와 분리조건의 최적화에 필요하다. 오래 전부터 흡착 평형식을 구하기 위한 방법으로 정적방법(static method)<sup>7)</sup>이 사용되어 왔다. 이 방법은 한 시료와 흡착제간의 흡착관계를 알아내기 위한 가장 단순한 방법으로 이미 알고 있는 농도의 용액을 측정된 양의 흡착제에 담고 평형에 도달할 때까지 충분한 시간이 경과한 후 용액의 농도를 측정하는 방법이다. 평형에 도달하

는데 걸리는 시간은 용기의 크기, 투입된 시료의 양, 흡착제의 입자크기에 영향을 받으며 보통 수 시간에서 수 일이 걸린다. 평형에 도달하게 되면 그 용기에 들어있는 용액과 표준농도의 용액의 크로마토그램의 면적을 비교함으로써 흡착된 시료의 농도를 알아내는 방법이다. 정확한 흡착 평형식을 구하기 위해서는 여러 개의 농도가 필요하며 이 때 많은 양의 흡착제와 시료를 필요로하게 된다. 많은 시간과 시료 및 흡착제가 많이 소모되는 실험이기는 하지만 동적 방법(dynamic method)보다 직접적인 방법으로 흡착 평형식을 측정하는 점에 있어서 좀 더 신뢰성이 있는 평형 데이터를 구할 수 있다<sup>8,9)</sup>.

본문에서는 활성탄에 대한 수소와 메탄의 흡착 특성을 관찰하고 여러 가지 흡착동온식에 적용하였으며 흡착동온식의 매개변수를 구하고 상관계수를 측정하였다. 온도와 압력에 대한 흡착량을 식으로 표시하고 평형에 도달하였을 때 온도와 압력이 흡착량에 대한 영향을 관찰하는 것이 본문의 목적이다.

## 2. 실험

### 2.1 흡착제

실험에 사용한 흡착제는 활성탄으로서 Calgon Co.에서 생산된 PCB type(6~16 mesh)의 제품을 사용하였으며, 그에 대한 주요 특성은 Table 1에 나타내었다. 활성탄은 423.15 K에서 12시간 이상 drying vacuum oven에서 불순물을 제거한 후 사용하였고, 고순도의 수소(99.99%)와 메탄(99.95%) 가스를 흡착실험에 사용하였다.

### 2.2 실험장비

흡착장비는 Fig. 1로 나타내었으며 흡착셀과 로딩셀에서 정직 부피법을 적용하였다. 1/8인치의 배관과 1/8인치의 벨브가 최적의 dead volume을 가질 수 있다. 시스템의 증기의 총 양은 적합한 압력, 온도와 볼륨에서 수집하고 재생하여 계산하

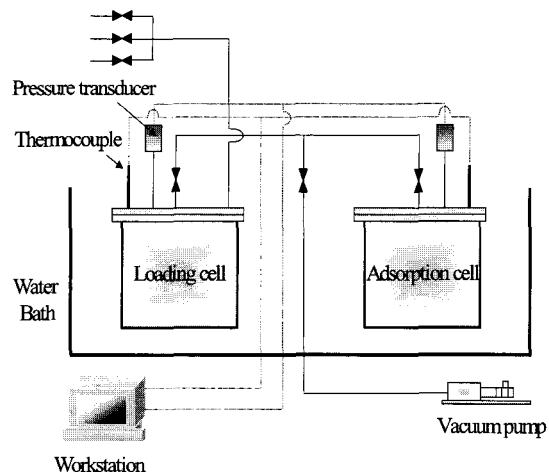


Fig. 1 Adsorption isotherm measuring apparatus.

였다. 반응기 볼륨은 521.61 ml이고 로딩셀 볼륨은 522.73 ml이다. Dead volume은 헬륨가스로 측정하였다. 매개 셀에서의 온도는 K-type 온도계로 측정하였고 압력은 압력계로 측정하였다. 온도와 압력은 일정한 시간간격에서 이동 레코드(MV100, Yokogawa Co.)로 기록하였다. 흡착과정에서 로딩셀, 흡착셀과 모든 라인들은 수조(SWB-20, Jeio tech.)에 넣어  $\pm 0.02K$  의 온도변화를 가지게 순환장치(RBC-11, Jeio tech.)로 온도조절을 하였다.

Table 1 Characteristics of activated carbon adsorbent used.

Type	Granular
Nominal pellet size (mesh)	6~16
Average pellet size (mm)	1.15
Pellet density ( $g/cm^3$ )	0.85
Heat capacity (cal/g K)	0.25
Particle porosity	0.61
Bulk density ( $g/cm^3$ )	0.746
Bed porosity	0.357
Total void fraction	0.77

## 2.2 흡착 실험 과정

흡착실험 장치는 주로 흡착셀과 로딩셀로 구성되었으며 수조안에 담겨져 있어 일정한 온도를 유지할 수 있다(Fig. 1). 활성화된 흡착제를 흡착셀에 넣은 다음 흡착셀과 로딩셀에 진공을 걸어 불순물을 제거한다. 흡착제는 불순물을 제거한 후 10 mg 정도의 질량으로 흡착셀에 넣고 일정한 시간간격으로 423.15 K와 고진공으로 12시간 이상 불순물을 제거한다. 흡착셀에 흡착제를 넣은 후, 불순물의 출처를 찾아 3시간 이상의 진공을 걸어 준다. 이상의 과정은 로딩셀에서도 마찬가지이다. 로딩과 흡착셀에서 온도가 요구에 도달하면 실험은 시작된다. 처음, 일정한 온도와 압력에서 로딩셀이 온정된 다음, 로딩셀에서 흡착이 시작된다. 이때, 로딩셀과 흡착셀사이의 벨브는 오픈되어 있다. 흡착평형상태에 이르면 온도와 매개 셀에 대한 압력은 일정하다. 흡착평형에 도달하기 전과 한 후의 온도와 압력을 기록한다. 로딩셀에 일정한 압력을 걸어 준 다음 온도와 압력이 일정하게 유지될 때까지 기다린 후 로딩셀과 흡착셀의 밸브를 열어 평형에 도달할 때까지 기다린다. 흡착평형은 각 셀의 온도와 압력이 일정할 때를 평형에 도달하였다고 가정한다. 실험이 계속되는 정황 하에서 압력은 15 bar로 증가시킨다. 흡착량은 흡착평형상태 전후의 온도와 압력을 물질수지식에 대입하여 구할 수 있다.

## 3. 결과 및 토론

수소와 메탄에 대하여 활성탄을 흡착제로 하여 293.15 K, 303.15 K, 313.15 K의 온도, 16 bar이하의 압력에서 흡착실험을 수행하였다. 활성탄의 밀도는 0.85 g/cm<sup>3</sup>이고 열용량은 0.25 cal/g·K이다. 활성탄의 기타 특성과 함께 Table 1에 나타내었다. 수소 등온선은 선형을 나타내고 메탄 등온선은 비선형을 나타낸다. 흡착등온선이 선형 혹은 비선형의 주요한 원인은 흡착제 크기와 흡착제 표면의 활성 사이트에 근거한다. 일반적으로 표면

적이 크거나 흡착제 표면에 활성 사이트가 많으면 많을수록 많이 흡착된다. 활성탄에 메탄이 많이 흡착되고 수소는 적게 흡착되며 3bar이상에서 메탄의 흡착량은 급격히 증가하는 반면에 수소의 흡착량은 압력의 영향을 적게 받았다. 흡착 등온식은 Langmuir, Freundlich, langmuir-Freundlich, Toth를 사용하였다. 이러한 흡착등온식의 수학적 식은

$$q = \frac{bp}{1+ap} \quad (1)$$

$$q = ap^b \quad (2)$$

$$q = \frac{abp^c}{1+bp^c} \quad (3)$$

$$q = \frac{ap}{(b+p^c)^{\frac{1}{c}}} \quad (4)$$

식 (1), (2), (3), (4)는 각각 Langmuir, Freundlich, Langmuir-Freundlich, Toth 흡착등온식이다. 또한, 수소와 메탄의 흡착량을 압력에 대한 1차, 2차식으로 각각 제시하였다.

$$q = ap + c \quad (5)$$

$$q = ap + bp^2 + c \quad (6)$$

위의 식 (1)~(6)에서 q는 흡착량이고, P는 평형 압력, a, b, c는 각각 등온식의 매개 변수이다. 상 관계수( $r^2$ )는 아래와 같은 식으로 계산하였다.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \langle y_i \rangle)^2}, \langle y_i \rangle = \frac{\sum y_i}{N} \quad (7)$$

L-F, Toth 등온식과 2차 실험식은 3개의 변수를 채택함으로써 2개의 변수만 포함되어 있는 Langmuir, Fruendlich 등온식과 1차 실험식보다 더 정확히 나타낼 수 있다. 일반적으로, L-F 등온

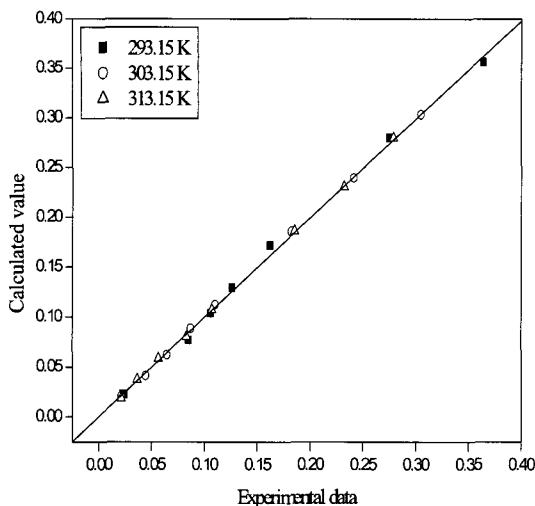


Fig. 2 Comparison of experimental data and calculated values on hydrogen.

식은 흡착탑의 디자인과 모델링에 넓게 사용되고 주기적인 가스 분리공정의 시간을 계산하고 절약하는데 적용된다.

Table 2에서는 이상의 6개 등온식에 대한 매개 변수를 나타내었다. 비록 2개의 변수를 사용한 Langmuir, Freundlich 등온식이지만 상관계수가 0.97이상으로서 실험데이터와 잘 일치하다는 것을 알 수 있다. 수소의 흡착량은 선형에 가깝기 때문에 1차식으로 제시하였다. 압력에 대한 1차식으로 나타낸 수소의 흡착량은 실험에서 측정한 흡착량과 0.99이상의 상관계수를 나타내었다. 3개의 변수를 사용한 L-F, Toth 등온식과 2차 실험식의 상관계수는 모두 0.99이상이므로 실험결과와 잘 일치하였으며 2개의 변수를 사용한 기타 식보다 실험결과와의 오차가 적었지만 변수가 많음으로 하여 식이 복잡하였다. 이러한 등온식 중에서 Langmuir 등온식은 2개의 변수를 사용하였지만 활성탄에 대한 수소와 메탄의 흡착량이 모두 등온식과 0.99이상의 상관계수를 가지기에 적은 변수를 사용하면서도 압력에 따른 흡착량을 잘 나타낼 수 있었다.

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 제시한 수소와 메탄의 1차, 2차식을 실험데이터와 비교하였을 때의 결과

를 나타낸 것이다. 활성탄에 대한 수소와 메탄의 흡착량을 압력의 1차, 2차식으로 표시하였는데 이런 제시한 식의 상관계수는 모두 0.99이상이었으며 Fig. 2와 Fig. 3에서 보다시피 실험데이터와 잘 일치하였다.

Langmuir 모델은 상온에서 정확히 활성탄에 대한 수소의 흡착관계를 나타낼 수 있지만 과량의 흡착에 대한 등온식으로 나타내기에는 어렵다. Langmuir 등온선은 압력에 따라 일정하게 증가하며 포화값인  $q_m$ 에 도달하면 아래와 같은 식으로 표시할 수 있다.

$$P/q = 1/Bq_m + P/q_m \quad (9)$$

여기서  $q_m$ 은 포화 흡착량이고  $B$ 는 계수이다. Fig. 4과 Fig. 5은 각각 일정한 압력범위에서 (16 bar 이하) 압력에 따른 수소와 메탄의 흡착량에 대한 Langmuir 구조를 나타내었다. Fig. 4에서는  $P/q$ 의 값이 압력이 증가함에 따라 감소하였다. 활성탄에 대한 수소의 흡착량이 최대에 도달하자 못하였다는 것을 알 수 있다.

반면에 Fig. 5에서는  $P/q$ 의 값이 압력이 증가

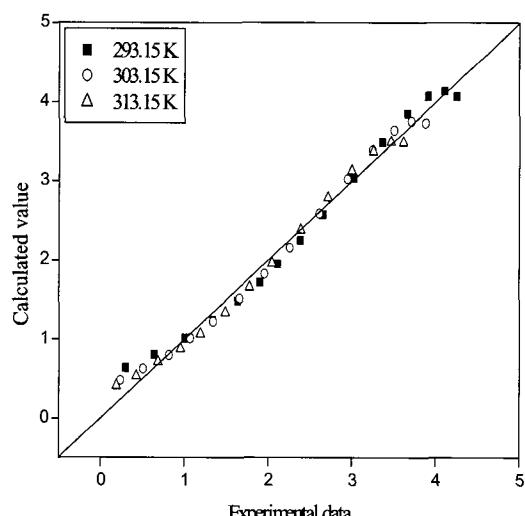


Fig. 3 Comparison of experimental data and calculated values on methane.

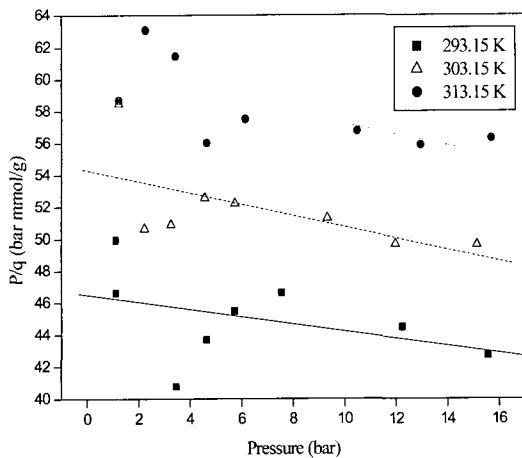


Fig. 4 Plot of  $P/q$  vs. pressure with temperatures on hydrogen.

함에 따라 증가하였다. 선형과 약간의 차이를 가지는 것을 알 수 있으며 기울기의 변화로부터 최대 흡착량이 존재한다는 것을 알 수 있다. Langmuir 모델은 낮은 압력에서 잘 적용되기에 B가 작을 때 최대의 기울기를 가진다. 기울기를 변화시키고 교정함으로써 B와  $q_m$ 를 분석할 수 있다<sup>10)</sup>.

Fig. 6과 Fig. 7는 각각 일정한 압력하에서 온도에 따른 흡착량을 그림으로 표시하였다. Fig. 6

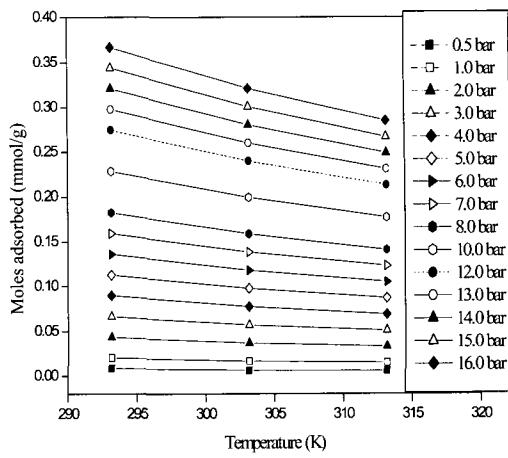


Fig. 6 Effect of temperature on moles adsorbed on hydrogen.

에서 보다시피 활성탄에 대한 수소의 흡착량은 온도가 증가함에 따라 감소하였다. 이러한 경향은 압력이 높아짐에 따라 더 급격히 나타났다. Fig. 7에서 보다시피 동일한 압력에서 활성탄에 대한 메탄의 흡착량은 293.15k에서부터 303.15k로 변할 때 급격히 감소하였지만 303.15k에서 313.15k로 변할 때에는 흡착량의 변화가 거의 없었다. 그리고 12 bar 이상에서부터 압력이 증가하여도 일정한 온도에서는 일정한 흡착량을 가지는 것을 알

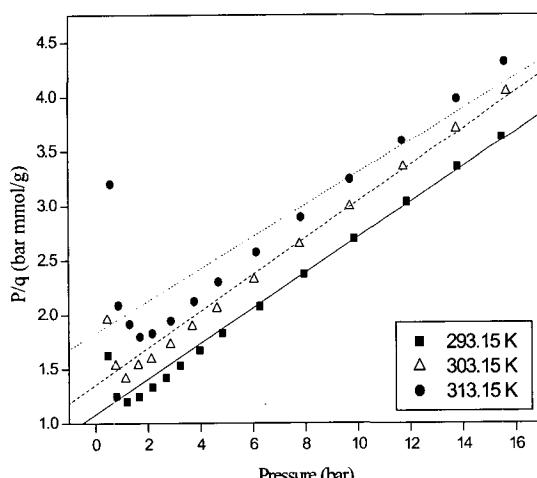


Fig. 5 Plot of  $P/q$  vs. pressure with temperatures on methane.

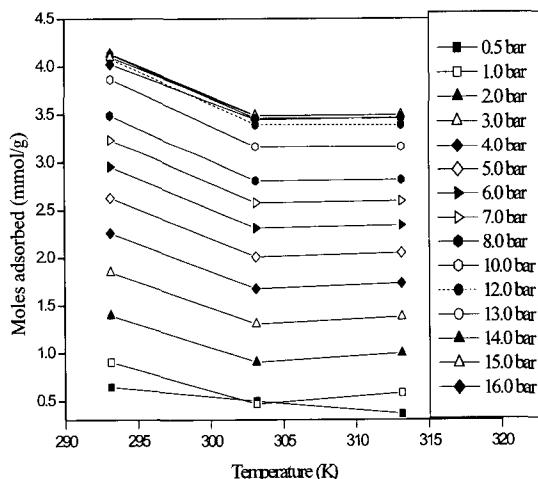


Fig. 7 Effect of temperature on moles adsorbed on methane.

## 활성탄에 대한 수소와 메탄의 흡착특성

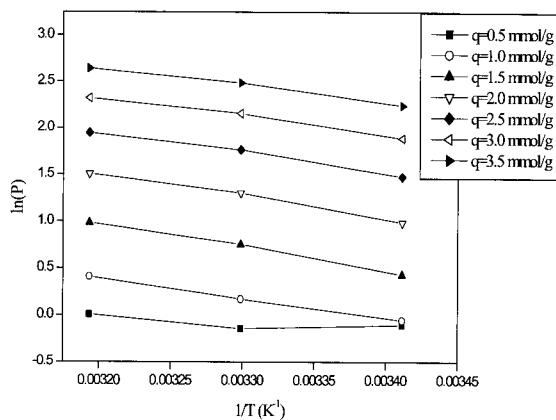


Fig. 8 Excess adsorption isosteres for  $q$  on hydrogen.

수 있었다. 활성탄에 대한 수소의 흡착량은 최대에 도달하지 못하였지만 메탄의 흡착량은 최대를 가진다는 것을 알 수 있다.

흡착 등전자는 흡착량이 일정할 때 온도를 변수로 하는 압력의 그림으로 나타내었다. Fig. 8와 Fig. 9는 각각 활성탄에 대한 수소와 메탄의 흡착량이 일정할 때 온도에 따른 압력의 변화를 나타내었다. 수소의 흡착량은 0.2 mmol/g으로부터 3.5 mmol/g까지 8개의 데이터를 상수로 사용하였고 메탄의 흡착량은 0.5 mmol/g으로부터 3.5 mmol/g까지 7개의 데이터를 상수로 사용하였다. 횡좌표는 온도의 역수로 나타내었고 종좌표는 로그압력으로 나타내었다. 온도와 독립변수인 흡착량  $q$  사이에는 아래와 같은 식이 성립된다.

$$\ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = \frac{q}{RT} \quad (8)$$

여기서  $P_0$ 는 특성압력이다.

Fig. 8과 Fig. 9에서 보다시피 흡착 등전자열과 온도는 서로 연관된다는 것을 알 수 있다.  $q$ 와  $P_0$ 는 흡착량의 변수로서 양에 따라 추론할 수 있다. Fig. 8에서 수소의 흡착열이 증가함에 따라 압력은 증가하였으며 적은 흡착량일 때 압력의 영향은 커지만 흡착량이 늘어남에 따라 압력의 영향은 감소하고 있었다. Fig. 9에서 보다시피 메탄

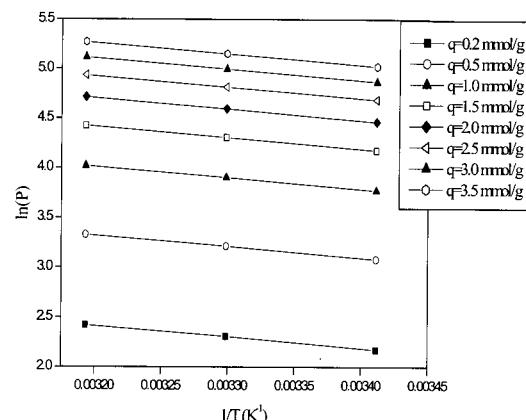


Fig. 9 Excess adsorption isosteres for  $q$  on methane.

의 흡착열이 증가함에 따라 압력은 증가하였으며 흡착량에 대한 압력의 영향은 일정하였다.

## 4. 결 론

활성탄을 흡착제로 하여 메탄과 수소의 단일성분의 흡착평형을 구하였다. 실험 데이터는 Langmuir, Freundlich, Langmuir-Freundlich, Toth 흡착 등온선에 적용하였다. 또한 수소와 메

Table 2 Parameters in the adsorption isotherm of hydrogen and methane on activated carbon

model	gas	293.15K				303.15K				313.15K			
		a	b	c	R <sup>2</sup>	a	b	c	R <sup>2</sup>	a	b	c	R <sup>2</sup>
Langmuir	H <sub>2</sub>	0.92	0.15	0.00	0.99	0.74	0.12	0.00	0.99	0.55	0.08	0.00	0.99
	CH <sub>4</sub>	0.17	1.01	0.00	0.99	0.15	0.81	0.00	0.99	0.12	0.67	0.00	0.99
Freundlich	H <sub>2</sub>	0.02	1.04	0.00	0.99	0.02	1.04	0.00	0.99	0.02	1.03	0.00	0.99
	CH <sub>4</sub>	1.08	0.52	0.00	0.97	0.88	0.55	0.00	0.98	0.74	0.60	0.00	0.98
Langmuir-Freundlich	H <sub>2</sub>	75.9	0.000	1.04	0.99	10.1	0.00	1.06	0.99	2.38	0.01	1.10	0.99
	CH <sub>4</sub>	5.54	0.18	1.06	0.99	5.27	0.15	1.05	0.99	4.72	0.13	1.16	0.99
Toth	H <sub>2</sub>	81.8	266.8	0.68	0.99	100	350	0.69	0.99	175	654	0.71	0.99
	CH <sub>4</sub>	5.57	6.58	1.08	0.99	5.27	804	1.09	0.99	4.59	15.7	1.34	0.99
Empirical Equations	H <sub>2</sub>	0.02	0.00	-	0.99	0.02	0.00	-	0.99	0.02	0.00	-	0.99
	CH <sub>4</sub>	0.55	-0.02	0.38	0.99	0.49	-	0.26	0.99	0.46	-	0.14	0.99

탄의 흡착량에 대한 압력의 식으로 각각 1차, 2차 식을 제시하였으며 상관계수는 모두 0.99이상으로서 잘 일치하였다. Langmuir 등온식은 2개의 변수를 사용하였지만 활성탄에 대한 수소와 메탄의 흡착량이 모두 등온식과 0.99이상의 상관계수를 가지기에 적은 변수를 가지면서도 압력에 따른 흡착량을 잘 나타낼 수 있었다. 수소와 메탄의 순수한 성분에 대하여 각종 흡착 평형식이 잘 일치하다는 것을 알 수 있으며 Langmuir 흡착 등온선은 가장 간단하면서도 실험 데이터와 잘 일치하였다. 수소의 흡착열이 증가함에 따라 압력은 증가하였으며 적은 흡착량일 때 압력의 영향은 커지만 흡착량이 늘어남에 따라 압력의 영향은 감소하고 있었다. 메탄의 흡착열이 증가함에 따라 압력은 증가하였으며 흡착량에 대한 압력의 영향은 일정하였다. 압력이 증가할수록 흡착량은 증가하였으며 온도가 증가할수록 흡착량이 감소하였다. 16bar에서 수소는 포화상태에 도달하지 못하였지만 메탄은 12bar에서 포화상태에 도달하였다.

## 후 기

본 연구는 인하대학교 고순도분리연구실에서 수행하였으며, 초정밀생물분리기술연구센터의 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 현

- 1) B. G. Lee, T. H. Lim, D. K. Choi, and J. W. Kim, "Status of hydrogen energy technology", *Prospectives of Industrial Chemistry*, Vol. 5, No. 1, 2002, pp. 47-55.
- 2) Y. C. Bak and K. Choi, "Status for the Technology of Hydrogen Production from Natural Gas", *Korean Chem. Eng. Res.*, Vol. 43, No. 3, 2005, pp. 344-351.
- 3) G. M. Nam, B. M. Jeong, S. H. Kang, C. H. Lee, B. K. Lee and D. K. Choi, "Experiment and Simulation of 2-bed PSA for Hydrogen Separation from H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> Gas Mixture", *Korean Chem. Eng. Res.*, Vol. 43, No. 2, 2005, pp. 249-258.
- 4) Y. J. Choi, U. J. Lee, M. Oh and S. T. Chung, "Process Simulation for Hybrid System Consisting of Membrane Steam Reformers and a Layered PSA", *HWAHAK KONGHAK*, Vol. 40, No. 5, 2002, pp. 550-557.
- 5) A. Jayaraman, R. T. Yang, "Stable oxygen-selective sorbents for air separation", *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, 2005, pp. 625-634.
- 6) J. G. Lim, W. C. Chang, T. J. Lee, J. J. Shim, D. K. Choi and Y. Y. Lee, "Adsorption Equilibria of Freon-113 on Activated Carbons", *HWAHAK KONGHAK*, Vol. 32, No. 3, 1994, pp. 341-347.
- 7) G. Guiochon, S. Golshan-Shirazi, and A. Katti, "Fundamentals of preparative and nonlinear chromatography", *Analytica Chimica Acta*, Vol. 302, 1995, pp. 127-130.
- 8) Y. S. Choi and K. H. Row, "Adsorption isotherms of phenol and o-cresol by static method", *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, Vol. 11, No. 3, 2000, pp. 344-346.
- 9) S. P. Hong, D. Y. Choi, and K. H. Row, "Determination of Adsorption Isotherm of Caffeine By Using molecular Imprinted Polymer", *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, Vol. 15, No. 4, 2004, pp. 478-481.
- 10) P. Be'nard and R. Chahine, "Determination of the Adsorption Isotherms of Hydrogen on Activated Carbons above the Critical Temperature of the Adsorbate over Wide Temperature and Pressure Ranges", *Langmuir*, Vol. 17, 2001, 1950-1955.