대한설비공학회 2005동계학술발표대회 논문집 pp. 341~346

05-W-054

흡착식 냉동기의 흡착탑에서 열 및 물질전달에 관한 수치적 연구

주 영 주†, 권 오 경*, 윤 재 호*, 김 종 하*, 김 용 찬**

† 고려대학교 대학원 기계공학과, *한국생산기술연구원 에너지응용팀, **고려대학교 기계공학과

A Numerical Study for the Heat and Mass Transfer in Silica gel/Water Adsorption Chiller's Adsorber

Young-Ju Joo†, Oh-Kyung Kwon*, Jae-Ho Yun*, Joung-Ha Kim*, Yong-Chan Kim**

ABSTRACT : Nowadays, adsorption chillers have been receiving considerable attentions as they are energy-saving and environmentally benign systems. A Fin & tube type heat exchanger in which adsorption/desorption take place is required more compact size. The adsorption chiller is expected to have high energy-efficiency in utilizing the waste heat exhausted from a process. The objectives of this paper are to investigate the effect of fin pitch of fin & tube on the adsorption performance and to develop an optimal design fin & tube heat exchanger in the silica gel/water adsorption chiller. Previous study concluded that optimal particle size selected 0.5mm, type RD silica gel, and fundamental heat transfer & mass transfer experiments carried out. From the numerical results, the adsorption rate for the fin pitch 2.5mm is the highest than that for the fin pitch 5mm, 7.5mm and 10mm. Also cooling water & hot water temperature affect the adsorption rate.

Key words: Adsorption chiller(흡착식 냉동기), Adsorption rate(흡착률), Fin pitch(핀 피치), Silica gel/water(실리카겔/물), Heat transfer(열전달), Mass transfer(물질전달)

기 호 설 명

λ_C : 실리카겔의 유효열전도율 [m^2]
ρ_A : 실리카겔의 충진밀도 [kg/m^3]
C_A : 실리카겔의 비열 [kJ/kg℃]
q^* : 흡착률 [kg/kg]
F_p : 핀 피치 [mm]
w_f : 핀 두께 [mm]
P_S : 흡착제 온도에서의 포화압력 [kg/cm^2]
P_U : 흡착탑 내에서의 압력 [kg/cm^2]
T_A : 실리카겔의 온도 [K]

하 첨 자

m : 구리
a : 실리카겔
w : 물
f : 유체

† Corresponding author
Tel.:041-589-8342 ; fax: 041-589-8330
E-mail address: yjjoo@korea.ac.kr

1. 서 론

HCFC 및 HFC냉매의 규제로 인하여 최근 자연 냉매에 관한 관심이 증가하고 있으며, 그에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 흡착식 냉동기는 흡착탑 내부에서의 흡착 및 탈착 현상을 이용하여, 냉수를 얻는 열시스템으로 흡착제와 냉매의 쌍으로 이루어져 있다. 이는 흡착탑 내부에서 흡착 및 탈착반응을 하며, 흡착반응시 발생하는 흡착열은 흡착률을 저해하는 요인으로 작용한다. 발생열을 제거하기 위해, 흡착탑 내의 열교환기를 이용하여 발생 흡착열을 회수하며, 이 때의 흡착탑 내에서의 열 및 물질전달이 흡착식 냉동시스템의 성능을 높이는 중요한 인자로 작용된다. 흡착식 냉동기는 흡착제와 냉매의 선택에 따라서 시스템의 작동온도가 다르다. 흡착식 냉동시스템에서의 흡착제와 흡착질은 저온폐열(약 60~90℃)이 이용 가능한 실리카겔/물계를 이용하였으며, 이 때의 이용 열원은 산업용 공정, 가스엔진, 연료전지 등에서 발생하는 저온폐열을 이용하여 구동하므로, 에너지의 유용성이 장점으로 부각된다. 또한 흡수식 냉동기와 비교하여, 동력을 사용하지 않아, 소음이 없고, 화학 반응에 의한 기체(불활성 기체)의 발생이 없어, 추가적인 추기작업이 불필요하며, 공급열원의 온도변화에도 냉동능력은 크게 변화하지 않는다.

흡착식 냉동기의 냉동능력은 물을 냉매로 하여, 흡착제인 실리카겔의 흡착 및 탈착능력과 흡착탑에서의 열전달, 사이클에서의 사이클 시간 단축이 중요한 변수이다. 흡착탑내에서의 빠른 열전달은 사이클 시간을 단축할 수 있으며, 흡착 및 탈착능력을 높일 수 있다.

종래연구로 B.B.Saha et al.[2]은 Freundlich 방정식의 계수를 실험데이터에 맞추어 최소자승법에 의해 결정하였다. 그리고, 작동조건, 온도, 유량, 사이클시간의 영향을 시뮬레이션 프로그램을 통하여 분석하였으며, Chiahara and Suziki[3]는 일본 Fuji사의 A형 실리카겔(5~10mesh)을 중량측정법을 이용하여, 120℃이하에서의 흡착률 상관식을 제시하였다. Cho.S.H. et al.[4]은 RD형 실리카겔을 사용하였으며, 1.2RT급의 4~7℃의 냉수를 생산할 때의, 각 요소에 열전달률의 영향을 결정하기 위해 해석모델을 개발하여 수치해석을 수행하였다. Eri Tamamoto et al.[5]은 비교적 사이즈가 큰 B, ID형 실리카겔에 대해서 실리카겔 입자 내부에서의 온도분포와 수치해석을 수행하였다.

본 연구에서는 실험적으로 규명하기 힘든 흡착탑내에서의 시간에 따른 흡착 및 탈착능력을 해석하고, 그 결과를 통하여, 흡착식 냉동기를 최적설계하는데 그 목적이 있다. 이를 위해, 핀튜브 모듈의 하나의 단위 핀과 핀사이에서의 열 및 물질전달에 관한 영향을 해석하여, 흡착탑 내부에서의 흡착률과 온도변화를 알아보고, 핀피치 따른 흡착률의 영향과 흡착과 탈착시의 온도를 개별적으로 변화시켜 흡착률의 영향을 알아보았다. 수치해석은 상용 프로그램인 FLUENT를 사용하였다.

2. 수치해석

2.1 해석 방법

실리카겔-물계의 흡착식 냉동기는 저온폐열을 이용한 흡착식 시스템으로서, 다른 흡착계와는 달리 비교적 낮은 온도에서 구동을 시킬 수 있는 장점이 있다. 흡착식 냉동 사이클에서 두개의 흡착탑은 흡착시에는 약30℃의 냉각수, 탈착시에는 엔진배열이나 공정에서 버려지는 저온 폐열(약80℃)이 구동 열에너지로 이용된다. 서로 연속적인 냉열을 얻기위해 두 개의 흡착탑이 냉수, 온수가 반복적으로 바뀌어 지게 되는데, 이 때의 흡착과정과 탈착과정이 바뀌게 되는 준비단계와 흡착탑내 흡착과정에서의 흡착열 제거와 탈착시의 흡착탑으로의 열전달 성능이 우수 할수록 시스템의 효율은 증가하는 경향을 보인다.

흡착식 냉동기의 흡착탑에서의 열유동으로 해석에 사용된 핀튜브 타입의 열교환기에서의 열 및 물질전달을 평가하기 위하여. 열교환기의 핀과 핀사이의 해석 모델 형상은 Fig.1에 나타내었으며, 관 내부로 유동하는 냉각수 온도는 30℃, 80℃로서, 450초 간격으로 간헐적으로 유입되는 조건으로 정상상태 1차원 열전달 방정식을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. RD형 실리카겔과 수증기와의 열전달은 무시되었으며, 냉각수와 구리관과의 열전달 계수는 Dittus-boelters 방정식을 이용하여 계산하였다. 입구유동조건은 레이놀즈 수에 따라 완전발달 난류유동의 속도분포를 적용하였다. 해석에 이용된 핀 튜브 타입 열교환기의 사이즈는 Table.2에 나타내었으며, 해석형상

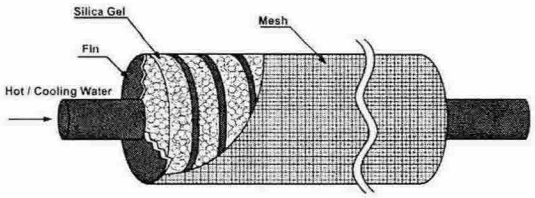

Fig. 1 Schematic diagram of heat exchanger of adsorber.

은 핀피치 사이의 한 부분과 냉각수 유로의 중앙을 대칭조건으로 해석을 수행하였다. 구리표면에서 실리카겔로의 열전달로 인한 실리카겔의 내부 온도 분포는 에너지방정식에 의해 계산되어지며, 때, 실리카겔의 흡착률은 실험상관식을 적용하여, 실리카겔의 각 지점에서의 온도 변화와 각 온도의 포화 압력으로 계산하여, 시간에 따른 흡착률의 분포를 계산하였다.

2.2 가정

흡착제는 균일한 구형입자로 이루어졌다.

2.3 지배방정식

$$C_A\rho_A\frac{\partial T_A}{\partial t}=\lambda_e\left(\frac{\partial^2 T_A}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_A}{\partial R^2}+\frac{1}{R}\frac{\partial T_A}{\partial R}\right)+H\cdot\rho_A\frac{\partial q}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{dq}{dt}=K_{sap}(q^*-q) \quad (2)$$

$$\rho_A=769.07-15.326\times10^{-3}r_c \quad (3)$$

$$\lambda_c=0.5876\times10^{-1}+0.12695\times10^{-3}\rho_A \quad (4)$$

$$D_s=D_{s0}\exp\left(-\frac{E_a}{RT_w}\right) \quad (5)$$

$$K_{sap}=15\frac{D_s}{r_c^2} \quad (6)$$

$$q^*=0.524\left(\frac{P_s(T_V)}{P_s(T_A)}\right) \quad (7)$$

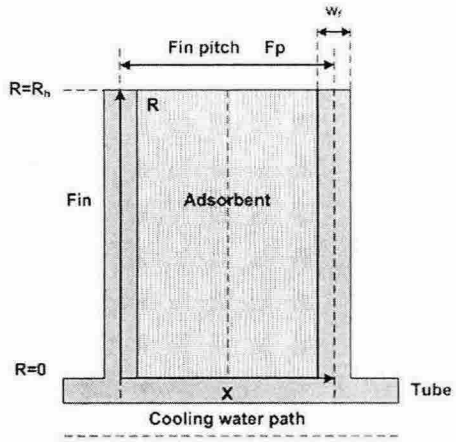

Fig. 2 Boundary condition of numerical study.

$$P_s(T)=0.133exp\left(18.3-\frac{3.82\times10^3}{T-46.1}\right) \quad (8)$$

냉각수와 구리와의 열전달과 충진된 실리카겔 내에서의 열전달은 (1)식을 이용하여, 계산되었으며, 흡착제로의 물질전달은 (2)식을 이용하였다. 해석에 이용된 각 물성치는 Table.1 에 나타내었다.

2.4 경계조건 및 수치해법

$$\text{at } X=0,\quad \frac{\partial T_a}{\partial x}=\frac{\partial T_m}{\partial x}=0 \quad (9)$$

$$\text{at } X=X_e,\quad \frac{\partial T_a}{\partial x}=\frac{\partial T_m}{\partial x}=0 \quad (10)$$

$$\text{at } R=R_h,\quad \frac{\partial T_a}{\partial R}=0 \quad (11)$$

$$\text{at } R=0,\quad \lambda_e\frac{\partial T_m}{\partial R}=h_0(T_a-T_f) \quad (12)$$

해석모델의 조건에서와 같이 본 해석은 2차원 열전달 해석으로서, 1개의 핀과 핀사이, 냉각수 유입 반경을 대칭조건으로 해석하였으며, 각 외면의 경계조건은 단열조건으로 설정하였다. 해석에 이용된 개략적인 형상을 Fig.2에 나타내었으며, 경계조건은 (9)~(12)와 같다.

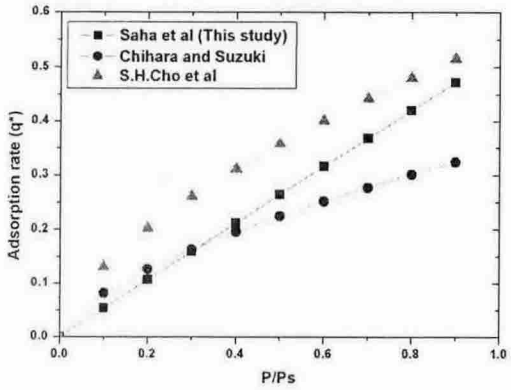

Fig. 3 Comparing this study with other correlations

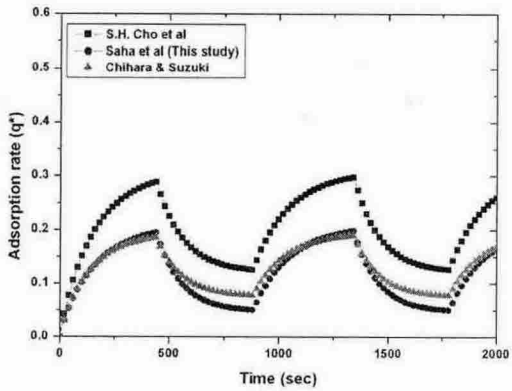

Fig. 4. Variation adsorption rate for other correlations with time.

Table 1 Physical properties of type RD silica gel

Properties	Values
Silica gel particle size (γ_C)	0.5 (mm)
Apparents density (ρ_A)	761 (kg/m^3)
Effective conductivity (λ_C)	0.155 (W/mK)
Surface diffusivity (D_S)	1.58525 × 10^{-10}(m^2/s)
Overall mass transfer coefficient (K_{sap})	0.0095 (1/sec)
Specific Heat (C_A)	920 (J/kgK)
Latent heat of adsorption (H)	2.43 × 10^3 (kJ/kg)

Table 2. Numerical conditions.

Parameters	Conditions
Temp. of hot water (℃)	75, 80, 85, 90
Temp. of cooling water (℃)	25, 30, 35
Adsorption/Desorption cycle time (sec)	450
Inner diameter of tube (mm)	17
Outter diameter of tube (mm)	19.05
Fin height (mm)	12
Fin pitch (mm)	2.5, 5, 7.5, 10

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 흡착률 변화에 따른 실험값과의 비교

흡착탑 내에서의 흡착과정에 관한 해석을 하기 위하여 기존 흡착량 실험 상관식을 이용하여 계산하였다. 기존 흡착 해석에 관한 연구를 조사하여 흡착률에 대한 Freundlich의 식을 크게 3가지로 나눌 수 있었다. 본 연구에서는 Saha et al. 상관식을 수치해석에 적용하였으며, 상관식들과의 상대압에 따른 흡착등온선을 Fig.3에 나타내었다. 그래프에서와 같이 S.H.Cho et al. 상관식은 실리카겔 입자의 물성치의 값과 비교하여 높은 흡착률을 보이며, Chihara and Suzuki는 흡착률이 조금 낮은 A형 실리카겔에 관한 상관식을 제시하였다. 본 해석에서는 RD형 실리카겔을 선택하여 수행하였으며 실험 데이터를 이용하여 그 값을 비교하였다.

흡착 및 탈착 사이클을 기본 실험조건에 대해서 기존 상관식을 해석한 결과를 Fig.4에 나타내었다. 흡착등온선의 경향과 같이 S.H.Cho et al.의 식이 높은 흡착률을 보이나, 반면에 최대 탈착률은 다른 식들과 달리 높게 나타난다.

$$q^* = k\left(\frac{P_s(T_v)}{P_s(T_A)}\right)^{1/n} \quad \text{Freundlich equation} \quad (13)$$

$$q^* = 0.524\left(\frac{P_s(T_v)}{P_s(T_A)}\right)^{0.99} \quad \text{Saha et al.} \quad (14)$$

$$q^* = 0.346\left(\frac{P_s(T_v)}{P_s(T_A)}\right)^{0.625} \quad \text{Chihara and Suzuki} \quad (15)$$

$$q^* = 0.552\left(\frac{P_s(T_v)}{P_s(T_A)}\right)^{0.625} \quad \text{S.H.Cho et al.} \quad (16)$$

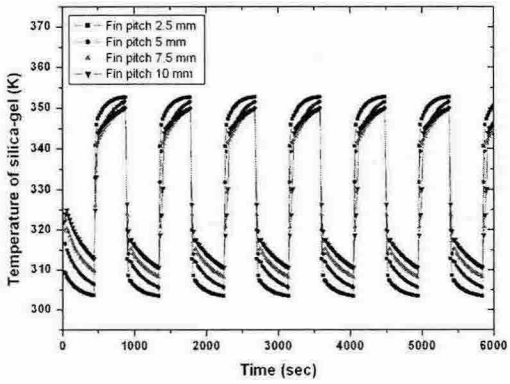

Fig 5. Variation temperature of silica gel for fin pitch with time.

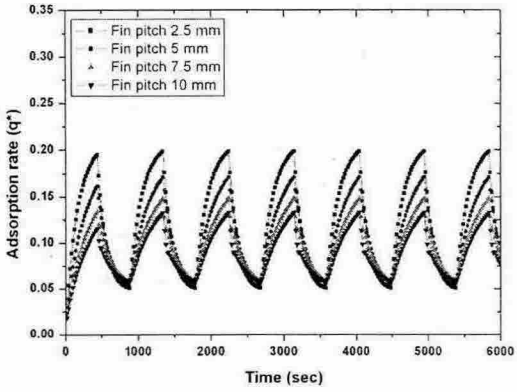

Fig 6. Variation adsorption rate for fin pitch with time.

3.2 핀피치 변화에 따른 흡착률

시간에 따른 흡착률 값을 핀피치의 변화에 따라 Fig.6에 나타내었다. 이 그래프는 흡착/탈착을 반복하여 총 6000초 까지 계산하였으며 시간에 따라, 흡착률이 일정하게 나타나고 있으나 흡착이 시작되는 첫번째 사이클 에서는 나머지 사이클에 비교하여 조금 작은 흡착평형점을 가지고 있다. 이는 처음 시작할 때의 실리카겔의 온도가 두 번째 사이클이 시작할 때의 탈착온도와의 차이(Fig.5) 때문에 나타나는 현상으로 생각되며, 약 두 번째의 사이클이 계산되는 시점에서 흡착평형률이 안정적으로 진행되는 것으로 추정된다. 핀 피치가 2.5 mm일 때, 최대 0.1947(kg/kg), 최소 0.05(kg/kg)의 흡착률이 나타났으며, 피치가 작아질수록 최대 흡착률이 증가함을 보였다. 이는 흡착탑내의 냉매증기량은 일정하나, 충진되는 흡착제의 중량 및 부피가 감소하므로써, 그에 따른 유효전열면적이 증가하기 때문에 흡착온도와 탈착온도에 빨리 도달한다고 판단된다. 따라서 핀피치가 작을수록 보다 높은 열 및 물질전달률을 갖는다고 할 수 있으며, 이는 흡착식 냉동 시스템에서 짧은 흡착완료 시간을 나타내므로, 보다 높은 시스템의 성능을 얻을 수 있다.

3.3 냉각수 온도 변화에 따른 흡착률

흡착식 냉동기에서의 구동원으로 쓰이는 저온폐열(약80~90℃)의 온도와 냉각수의 온도(약25~35℃)를 변화시키며, 흡착탑 내에서의 흡착, 탈착 과정에서의 흡착률 변화를 Fig.7에 나타내었다.

흡착탑의 흡착과정에서의 이용되는 냉각수의 온도를 25~35℃까지 5℃간격으로, 열교환기 형상은 기준조건으로 흡착률의 해석을 수행하였다. 흡착과정에서 흡착열을 제거하기 위해 유입되는 냉각수의 온도가 낮아질수록 흡착탑 내의 압력의 감소하므로 흡착률의 변화가 뚜렷하게 나타났으며, 탈착과정에서의 영향은 저온폐열의 유입온도가 80℃로서 흡착시에 냉각수의 온도와 무관하게 작용하며 변화하지 않았다. 이는 흡착시 더 낮은 온도에서 흡착탑을 냉각하게 되어도 온수의 온도가 충분한 열전달을 하기 때문에 그 영향이 없는 것으로 판단된다. 각 냉각수의 온도의 변화에 따른 최대흡착률의 값을 비교하였을 때 냉각수온도 25℃에서 최대 흡착량 0.267(kg/kg)을 보이며, 30℃, 35℃로 냉각수의 온도가 증가할수록 흡착률이 감소한다.

3.4 온수온도 변화에 따른 흡착률

냉각수 온도는 30℃로 고정하고, 온수 온도를 75~90℃까지 5℃의 간격으로 변화하며, 흡착률을 시간에 따라 계산한 값을 Fig.8에 나타내었

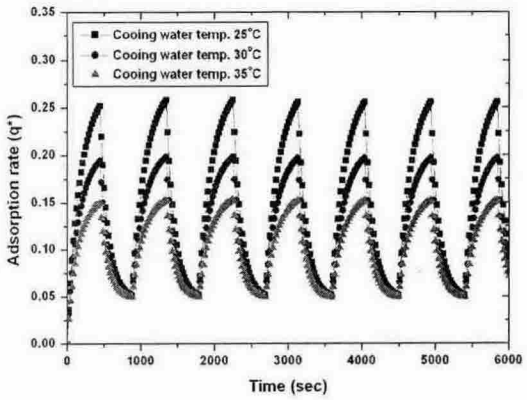

Fig 7. Variation adsorption rate for temperature of cooling water with time.

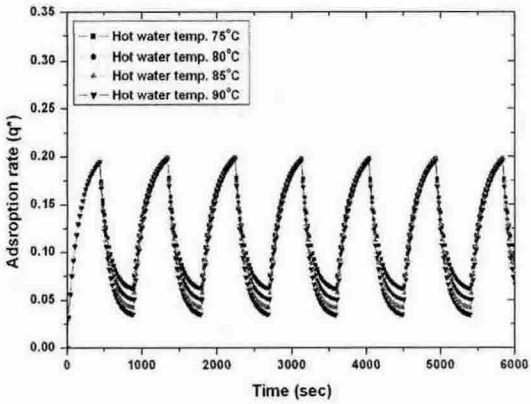

Fig 8. Variation adsorption rate for temperature of heat source with time.

다. 온수는 탈착과정시의 흡착제의 탈착과정을 발생하기 위한 열원으로서, 냉수온도에서와의 경향과 같이 최대 탈착량에 영향이 있는 것으로 보인다. 온수온도가 높아짐에 따라 최대 탈착량이 감소하였고, 이 때 최대탈착량은 0.0348(kg/kg)로 나타났다. 이는 냉각수의 온도변화 경향과 유사하며 또한 흡착량에 영향을 미치지 않았다.

4. 결론

흡착식 냉동기의 작동매체로서 RD형 실리카겔/물계를 사용하고, 흡착과정에서의 흡착특성을 알아보기 위해, 수치해석을 수행하였으며, 해석을 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 핀피치가 작을수록(2.5mm>5mm>7.5mm>10 mm)흡착률이 증가하였다.

(2) 냉각수 온도가 낮을수록(25℃>30℃>35℃)흡착률이 증가하였으며, 냉각수 온도 25℃, 온수온도 80℃에서 최대 0.267(kg/kg)의 흡착률을 보였다.

(3) 온수 온도가 높을수록(90℃>85℃>80℃>75℃)탈착률이 증가하였으며, 냉각수 온도 30℃ 온수온도 90℃에서 최대 0.0348 (kg/kg)의 탈착률을 보인다.

후 기

본 연구는 국가과학기술위원회 산하 산업기술연구회가 지원하는 협동연구사업인 "차세대 냉각시스템 기술 개발"의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Kwon, O.K, et al. 2005, An Experimental Study on the Heat and Mass Transfer of Adsorption Chiller., Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 8, pp. 746-753.
2. B.B.Saha, et al. 1995, Computational analysis of an Advanced Adsorption-Refreigeration Cycle., Energy, Vol. 20, No. 10, pp. 983-994.
3. Chihara, K., Suzuki, M., 1983, Air Drying by Pressure Swing Adsorption Cooling System. Journal of Chemical Engineering Japan, Vol. 16, pp. 293-298.
4. Cho.S.H & J.N.Kim., 1992, Modeing of a Silica gel/Water Adsorption Cooling System, Energy Vol.17, No. 9, pp 829-839.
5. Eri Yamamoto et al. 2002, Intra Particle Heat and Mass Transfer Chracteristics of Water Vapor Adsorption. Journal of Chemical Engineering of Japan. Vol. 35 No. 1, pp. 1-8.