

## CO<sub>2</sub> 및 N<sub>2</sub>의 흡착평형과 흡착속도에 관한 연구

이화영 · 유용전

순천향대학교 신소재 화학공학부

### A Study on Adsorption Equilibrium and Adsorption Rates for CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>

#### 요 약

본 연구는 지구 온난화 현상의 주원인이 되는 CO<sub>2</sub>를 화력발전소 연도가스로부터 분리 회수하기 위한 PSA 공정 개발용 기초자료를 습득하기 위하여 실시하였다. 연도가스와 유사한 조건하에서 국내에서 제조된 활성탄을 이용하여 이산화탄소 및 벨런스를 이루고 있는 질소 가스의 흡착평형 및 흡착속도 실험을 실시하였으며, 분석을 위하여 자체 제작한 장치(부피측정법) 및 TGA 장치를 각각 사용하였다. 이 연구에서 획득한 흡착등온선으로부터 사용된 흡착제가 이산화탄소의 분리에 적절한지 판단할 수 있었다. 또한, TGA에 의해 측정된 흡착속도 자료는 향후 사용될 흡착탑의 파과곡선 예측에 사용될 수 있다.

연구결과로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있었다. 첫째, 낮은 흡착온도 일수록 흡착량이 많고 빠른 흡착속도를 나타내었다. 둘째, 압력이 높아질수록 흡착량은 증가하였다. 셋째, SGT활성탄이 SGA-100 및 SGP-100활성탄 보다 다소 많은 흡착량과 빠른 흡착속도를 보였다.

#### ABSTRACT :

## 1. 서 론

최근의 엘니뇨현상 등에 의한 이상 고온 현상은 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CFCs 등과 같은 가스들에 의한 것으로 밝혀졌으며, 그 중에서도 이산화탄소가 지구온난화의 주원인 물질의 하나라고 알려져 있다. 화석 연료를 많이 사용하는 화력발전소 및 화학공업 관련 공장에서 배출되는 연도가스에는 이산화탄소가 포함되어 있고 질소, 산소가스 등이 밸런스를 이루고 있으며, 이산화황 및 질소산화물 등도 미량 포함되어 있다. 한편, 지구온난화방지 차원 혹은 이산화탄소의 공업용 이용차원에서 연도가스로부터 이산화탄소를 분리 회수하는 여러 종류의 기술에 대한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다(1,2).

이산화탄소를 공업적으로 분리, 회수하는 방법으로는 화학흡수법, 막분리 기술, PSA(Pressure Swing Adsorption)에 의한 가스 분리 등이 있다. 화학흡수법은 아민 등을 이용하는 방법으로 전통적으로 많이 사용되어 왔으나 장치투자비 및 운영비가 많이 들며 부식 및 폐수처리의 문제가 있다. 막분리 기술은 액막이나 고분자막을 이용하는 기술로서 여러 종류의 가스분리에 사용되고 있다. 한편, PSA에 의한 기체 분리법은 조작이 간편한 저에너지형 기술로서 화력발전소 연도가스처럼 이산화탄소의 농도가 낮고 질소 및 산소 등이 밸런스를 이루고 있는 혼합가스로부터 이산화탄소를 분리 및 회수하기에 적합한 기술이다.

PSA는 압력 및 cycle(가압, 흡착, 감압 및 정화)이 흡착평형과 속도에 미치는 영향을 고려하는데 기초를 둔 현대적 분리 기술이며, 이 공정을 적용대상 가스 혼합물에 응용하기 위해서는 흡착평형, 흡착속도, 고정상에 의한 파과곡선, 공정실험 및 모사 등 여러 분야에 대한 이해가 중요하다. 그 중에서도 PSA를 새로운 공정에 적용하기 위해서는 흡착평형 및 흡착속도에 대한 데이터 획득이 기초가 된다. 공정에 사용되는 적절한 흡착제를 선택하기 위한 과학적 근거가 흡착 평형실험에 의한 흡착등온곡선이며, 사용 대상 흡착제에서의 흡착속도 자료는 사용될 흡착탑의 모형화 및 파과곡선 예측에 필수적으로 포함된다.

이산화탄소의 농도가 약 15%인 화력발전소 연도가스의 처리에 적합한 흡착제에는 활성탄, 제올라이트, carbon molecular sieve 등이 있으며, 위 흡착제들을 이용하여 많은 연구가 Kim(3), Kikkinides 등(4), Chue 등(5), Pilarczyk 등(6)에 의해 이루어지고 있다. 한편, 본 연구에서는 국내에서 제조된 활성탄을 실험에 이용하였으며, 화력발전소 연도배가스와 유사한 조건에서의 국내 활성탄에 대한 흡착평형 및 흡착속도 자료는 매우 드물다. 본 연구에서는 흡착평형 등온선을 측정하기 위하여 자체 제작한 장치(부피 측정법)를 사용하였으며, 흡착속도자료를 얻기 위하여 TGA(Thermogravimetric Analysis) 장치를 사용하였다.

따라서, 본 연구에서는 국내에서 제조된 활성탄들을 사용하여 이산화탄소 및 질소가스의 부피측정법에 의한 흡착평형 실험 및 TGA에 의한 흡착속도 실험을 실시하였으며, 측정된 데이터로부터 흡착제들의 특성을 비교, 평가하였다. 본 연구의 목적은 화력발전소 연도가스로부터 이산화탄소를 분리 회수하기 위한 PSA공정에 적절한 흡착제의 선정과 공정 설계를 위한 기초자료를 습득하는데 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2-1. 흡착제 및 흡착질

흡착제가 가지는 중요한 특성은 특정 화합물에 대한 선택적 친화성과 표면-부피비이다. 흡착제마다 극성 또는 비극성 증기에 대한 특이한 친화성이 각각 다르며, 활성탄인 경우는 비극성 유기화합물을 선택적으로 흡착하기도 한다. 제올라이트 분자체는 선택성 또는 친화성을 조절 할 수 있으며 그 이유는 결정구조를 바꾸어 특정 분자를 특정양만 흡착하도록 만들 수 있기 때문이다. 흡착제의 표면-부피비도 흡착제 단위 질량당 큰 표면적이 필수적이다. 이 표면적은 고체의 내부 세공에서 생긴다. 가장 많이 사용되는 흡착제인 활성탄은 나무, 과일, 야자껍질 등을 고온에서 탄화하고, 이 들을 수증기로 처리하여 탄소물질의 일부를 태워 없애서 많은 세공구조가 형성되게 한 것이다.

본 실험에서는 국내 기업인 삼천리사의 기상용 활성 탄소 SG-series가 흡착제로 사용되었다. 삼천리사의 활성 탄소는 목재, 갈탄, 무연탄과 야자 껍질들의 무정형 탄소의 집합체가 원료로서 제조되어 미세 가공이 매우 잘 발달되어서 큰 내부의 표면적을 가지며 그 물성은 Table 1.에 나타나 있다. 한편, 흡착질은 순도 99.999%의 CO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>기체를 구입하여 사용하였다.

Table 1. Physical properties of Activated Carbon

	SGP-100	SGA-100	SGT
Raw Material	Coal	Coconut shell	Coconut shell
Type	Pellet	Granular	Granular
Specific Area (m <sup>2</sup> /g)	900	1100	1400
Specific Volume(ml/g)	0.6~0.9	0.5~0.6	0.71

2.2. 실험장치

흡착속도(열중량 분석기) :

본 연구에서는 이산화탄소 및 질소의 흡착속도를 측정하는데 TA Instruments사의 TGA2050을 사용하였으며 이 장치는 고감도 저울, furnace, 기체 주입장치, 실험 데이터의 처리와 분석을 위한 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. TGA2050의 자세한 specifications은 Table 2.에 나타나 있다.

Table 2. Specifications for TGA2050

Temperature range	ambient to 1000°C
Weighing capacity(max)	1.0g
Sensitivity	0.2g
Balance Accuracy	±0.1%
Purge gas rate	furnace 90ml/min balance 10ml/min
Heating rate	0.1 - 50°C/min
Furnace cooling	forced air

흡착평형(부피 측정 장치) :

흡착평형 데이터를 얻기 위해 부피측정법(volumetric method)를 사용하여 흡착등온선을 측정한다. Loading cylinder 와 adsorption cell은 stainless steel로 제작하였으며, loading cylinder 와 adsorption cell의 부피는 600ml와 444.4ml이다. 흡착평형 실험을 위해 사용한 실험 장치의 개요는 Figure 1에 나타내었다. 질량을 측정된 흡착제를 adsorption cell에 충전하여 놓은 후에 실험하였으며, loading cell은 이산화탄소 또는 질소가 adsorption cell로 들어가기 전에 안정화를 위해 사용되었다. 모든 연결 line은 사각용적을 최소화하기 위해 1/8" sus-tube를 사용하였고, valve는 고압에서 견딜 수 있게 설계하였다.

실험장치내의 압력은 loading cylinder 와 adsorption cell에 연결한 digital pressure gauge (VALCOM Co.)를 사용하여 측정하였으며, loading cylinder 와 adsorption cell은 항온조와 교반기를 이용하여 일정한 온도가 유지되도록 하였다.

기체는 loading cylinder를 거쳐 adsorption cell로 유입되어 흡착이 일어나게 된다. 흡착 평형을 판정하는 기준은 adsorption cell내의 온도와 압력의 변화가 없고, 기상의 조성이 변하지 않는 상태를 흡착 평형 상태로 하였다. 또한 일정한 한 온도에서 실험을 행할 경우 loading cylinder에서 adsorption cell로 누적 가압하여 계속적으로 실험을 진행하였다.

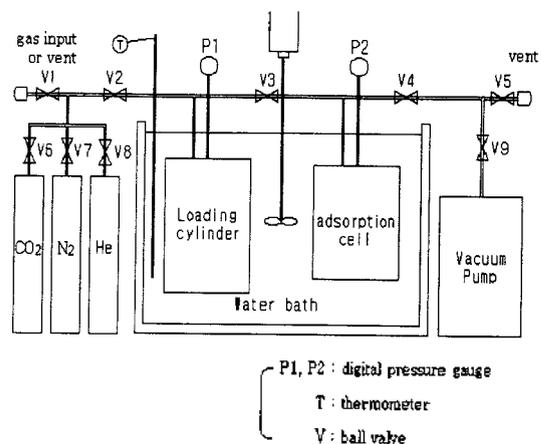


Figure 1. Schematic diagram for adsorption equilibrium.

### 2-3. 실험방법

#### 흡착속도

흡착제를 furnace내의 sample pan에 각각 올려 놓고 불순물을 제거하기 위해서 He가스를 계속 흘려 보내며 90분 동안 소성온도를 100℃ 이상 유지시켰다. 그 후 각각 70, 50, 30℃의 흡착실험 온도까지 냉각시켰다. 실험온도에 도달한 후 항온을 유지하며 CO<sub>2</sub> 나 N<sub>2</sub>기체를 공급하여 20 ~ 30분간 흡착시켰으며, 시간에 따른 무게변화의 측정으로부터 다음의 식을 이용하여 각 흡착제에 대한 uptake curve를 얻었다. N<sub>2</sub>도 같은 식을 이용하였다.

분당 흡착량  
(mgCO<sub>2</sub>/min)

$$= \frac{\text{흡착후의 시료무게 증가량(mgCO}_2\text{)}}{\text{흡착시간(min)}}$$

단위질량당 흡착량  
(mgCO<sub>2</sub>/mg활성탄)

$$= \frac{\text{흡착후의 시료무게 증가량(mgCO}_2\text{)}}{\text{불순물 제거후의 시료무게(mg활성탄)}}$$

위 실험은 module 및 컴퓨터를 이용하여 진행시키며 그 방법은 다음과 같다.

- 1) sample platform에 pan을 올려 놓은 후 load key를 누른다.
- 2) furnace key를 눌러 닫은 후 pan을 taring시킨다.
- 3) pan을 꺼내어 시료를 약 20mg 올려놓은 후 다시 load시킨다.
- 4) 시료의 무게가 적절하다고 판단되면 컴퓨터의 instrument control을 선택한다.
- 5) 시료 정보난을 선택하여 필요사항을 기록한 후 다시 instrument control screen으로 돌아간다.
- 6) edit method를 선택하여 실험절차에 대한 프로그래밍을 작성한다.
- 7) instrument control screen으로 가서 실험을 시작하며 완료되면 데이터 분석을 실시한다.  
다른 조건의 흡착실험도 위 방법을 따른다.

흡착평형 :

200℃에서 소성시킨 활성탄에 30, 50, 70℃의 3

가지 흡착 온도변화를 주어서 각각의 압력변화에 따른 CO<sub>2</sub> 및 N<sub>2</sub>의 흡착평형량을 측정하였다. 본 연구의 흡착평형실험 방법은 다음과 같다.

- 1) 진공펌프를 이용하여 실험장치내를 진공으로 유지한다.
- 2) He가스를 loading cylinder 및 adsorption cell에 주입하고 일정시간이 지난 후에 각각에 대한 압력을 측정한다.
- 3) 실험장치내의 He가스를 뽑아낸 후 다시 진공펌프를 이용하여 진공으로 유지한다.
- 4) CO<sub>2</sub> 및 N<sub>2</sub>가스를 loading cylinder에 주입하고, 일정시간 후 온도와 압력을 측정한다.
- 5) 밸브를 열어 일정량의 가스를 adsorption cell로 주입시키고, 다시 밸브를 닫고 흡착평형이 일어날 때까지 기다린 후 온도와 압력을 측정한다.
- 6) 다른 압력과 온도조건하에서 반복 실험을 한다.

이산화탄소 또는 질소가스의 활성탄에 흡착되는 정도는 물질 수지식으로부터 구할 수 있다. 즉, loading cylinder에 유입된 양과 adsorption cell로 전달된 질량의 차이는 adsorption cell의 활성탄에 흡착된 질량과 흡착되지 않고 가스상태로 남아있는 질량의 합과 같다. 아래 식에서, 아래첨자 L은 loading cylinder, A는 adsorption cell, i는 초기상태, o는 조작 후 상태를 각각 나타낸다. 또한, n은 가스의 몰수, M은 분자량을 나타낸다.

$$n_i - n_o = n_A + M \cdot n$$

이것을 기체 상태 방정식으로 바꾸어 주면

$$\left(\frac{P_L V_L}{RT_L}\right)_i - \left(\frac{P_L V_L}{RT_L}\right)_o = \left(\frac{P_A V_A}{RT_A}\right) + M \cdot n$$

$$\frac{(P_{Li} V_L - P_{Lo} V_L)}{RT} = \left(\frac{P_A V_A}{RT}\right) + M \cdot n$$

따라서, 활성탄에 흡착된 양은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$n = \frac{\Delta P_L V_L - \Delta P_A V_A}{M \cdot R \cdot T}$$

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 열 중량 분석에 의한 CO<sub>2</sub> 흡착속도

25℃, 50℃ 및 75℃의 흡착온도에서 활성탄에 흡착된 CO<sub>2</sub>의 양을 측정하고 이를 기준으로 단위 질량당 흡착량을 계산하였으며, 흡착 시작시간과 흡착 완료시간을 측정하여 분당 흡착량을 계산하였다. 각 흡착제에 대한 흡착속도를 비교하여 그 결과인 uptake curves를 Figure 2 ~ 3에 나타내었다. 또한 흡착온도에 따른 SGT활성탄의 uptake curves를 Figure 4에 나타내었다.

Figure 2에서, 흡착온도가 25℃일 때, 흡착량이 0.05mg/mg활성탄이 되기까지 SGT활성탄은 0.22분, SGA-100활성탄은 0.45분, SGP-100활성탄은 0.6분으로 SGT활성탄의 흡착속도가 가장 빨랐다. 또한 Figure 3에서, 흡착온도가 75℃일때, 0.02mg/mg활성탄이 되기까지의 시간은 SGT활성탄이 0.2분, SGA-100활성탄이 0.3분, SGP-100활성탄 0.35분으로 미세한 차이가 있었다.

Figure 4는 흡착온도에 따른 SGT활성탄의 시간 변화에 따른 무게변화를 나타낸 uptake curves이다.

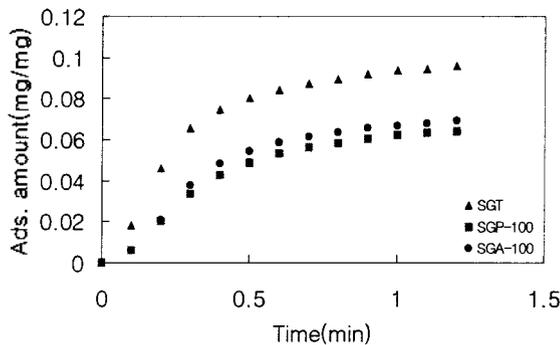


Figure 2. Uptake curves of CO<sub>2</sub> at 25℃

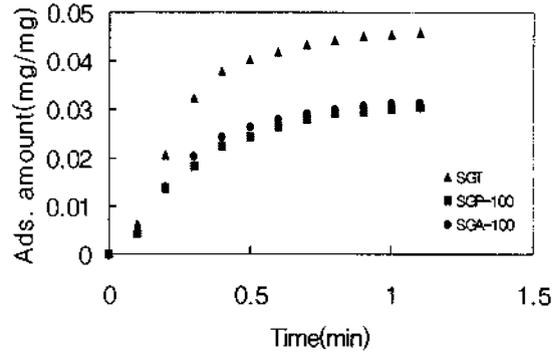


Figure 3. Uptake curves of CO<sub>2</sub> at 75℃

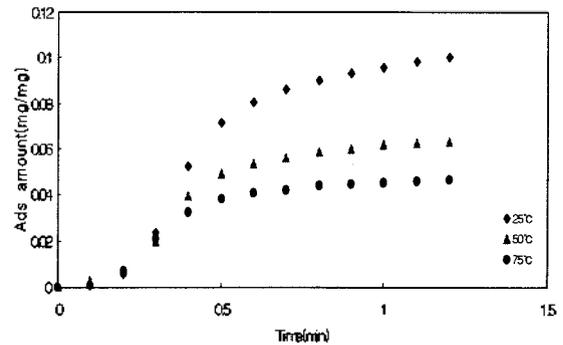


Figure 4. SGT uptake curves of CO<sub>2</sub> at different temperatures

흡착량이 0.04mg CO<sub>2</sub>/mgSGT가 되기까지 걸린시간은 25℃에서 0.35분, 50℃에서 0.3분 그리고 75℃에서 0.6분이었다. 따라서 흡착온도가 낮을수록 흡착속도가 빠름을 알 수 있었다.

#### 3-2. 열 중량 분석에 의한 N<sub>2</sub> 흡착속도

CO<sub>2</sub> 흡착 실험과 같은 방법으로 흡착량을 측정하고 이를 통해 단위 질량당 흡착량과 분당 흡착량을 계산하였다. Figure 5는 SGA-100을 200℃에서 소성후, 각각의 흡착온도에서 흡착 실험을 한 결과이다.

흡착량이 0.004mg N<sub>2</sub>/mgSGA-100가 되기까지 걸린시간은 25℃에서 0.32분, 50℃에서 0.4분 그리고 75℃에서 0.6분이었다. 이산화탄소와 같이 흡착온도가 낮을수록 흡착속도가 빠름을 알 수 있었다.

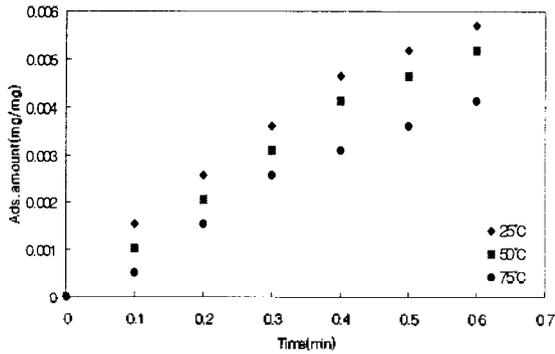


Figure 5. SGA-100 uptake curves of N<sub>2</sub> at different temperatures

3-3. 부피 측정법에 의한 CO<sub>2</sub>의 흡착평형

200℃에서 소성한 활성탄을 3가지의 온도 변화를 주어서 각각의 상태에 대한 흡착의 정도를 측정하였다. 30, 50, 70℃의 온도에서 실험을 하였다. Figure 6 ~ 7은 그 결과값을 흡착등온선으로 나타낸 것이다.

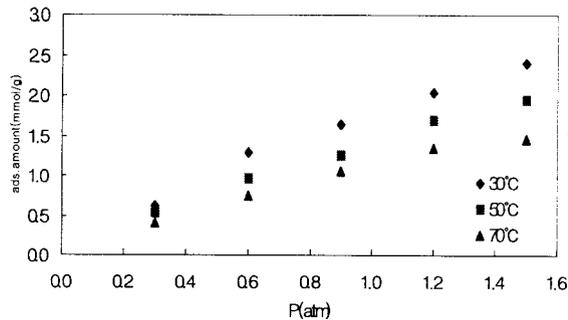


Figure 6. SGA-100 adsorption isotherms of CO<sub>2</sub> at different temperatures

Figure 6은 SGA-100활성탄을 사용하여 이산화탄소 흡착평형 실험을 한 결과이다. 압력이 0.6atm일 때 흡착량은 30℃에서 1.4mmol/g이고, 50℃에서는 0.98mmol/g, 그리고 70℃에서는 0.75mmol/g이었다. 흡착온도가 낮을수록 흡착량이 증가하였으며, 압력이 높을수록 흡착량이 증가함을 알 수 있었다.

Figure 7은 SGP-100활성탄을 사용하여 이산화탄소 흡착평형 실험을 한 결과이며, 압력이 0.6atm일 때 흡착량은 30℃에서 1mmol/g이고, 50℃에서는 0.95mmol/g, 그리고 70℃에서는 0.69mmol/g이었다.

SGA-100활성탄과 같이 흡착온도가 낮을수록 흡착량이 증가하였으며, 압력이 높을수록 흡착량이 증가함을 보여주고 있다.

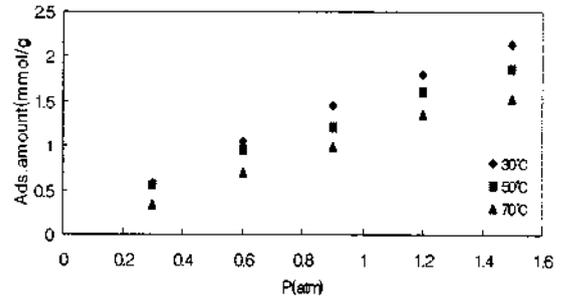


Figure 7. SGP-100 adsorption isotherms of CO<sub>2</sub> at different temperatures

3-4. 부피 측정법에 의한 N<sub>2</sub>의 흡착평형

CO<sub>2</sub>와 동일한 방법으로 N<sub>2</sub>가스를 사용하여 30℃, 50℃, 70℃에서 실험하였다. Figure 8 ~ 9는 그 결과를 흡착등온선으로 나타낸 것이다.

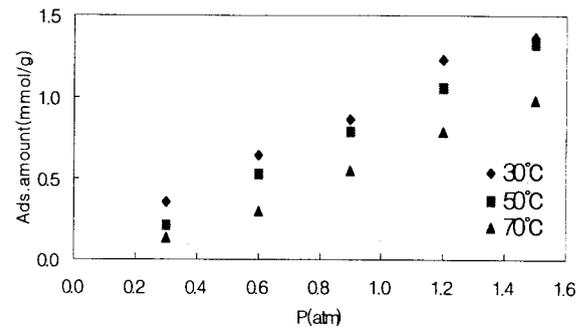


Figure 8. SGA-100 adsorption isotherms of N<sub>2</sub> at different temperatures.

Figure 8은 SGA-100활성탄을 사용하여 질소 흡착평형 실험을 한 결과이다. 압력이 0.6atm일 때 흡착량은 30℃에서 0.7mmol/g이고, 50℃에서는 0.56mmol/g, 그리고 70℃에서는 0.3mmol/g이었다. 흡착온도가 낮을수록 흡착량이 증가하였으며, 압력이 높을수록 흡착량이 증가함을 보여주고 있다. 한편, 같은 활성탄 및 흡착온도의 경우, N<sub>2</sub>의 평형 흡착량이 CO<sub>2</sub>에 비하여 저조함을 알 수 있었다(Figure 6 참조).

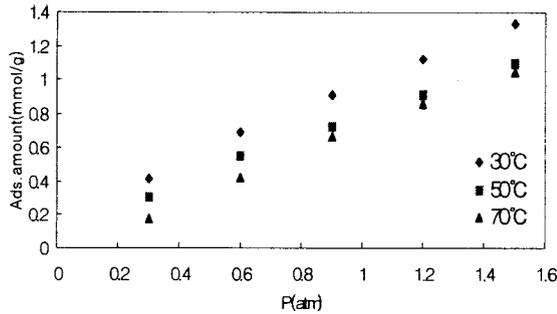


Figure 9. SGP-100 adsorption isotherms of N<sub>2</sub> at different temperatures.

Figure 9는 SGP-100활성탄에 대한 흡착등온선이며, 압력이 0.6atm일 때 흡착량은 30℃에서 0.65 mmol/g이고, 50℃에서는 0.55mmol/g, 그리고 70℃에서는 0.42mmol/g이었다. 흡착온도가 낮을수록 흡착량이 증가하였으며, 압력이 높을수록 흡착량이 증가함을 보여주고 있다. 또한, 이 활성탄에서도 이산화탄소의 흡착량보다 질소의 흡착량이 저조함을 알 수 있었다.

본 연구에서는 TGA를 이용한 열 중량 분석법과 부피 측정법을 사용하여 활성탄의 종류, 흡착온도를 변화시키면서 각각의 조건에 따른 CO<sub>2</sub> 및 N<sub>2</sub>가스의 흡착량을 측정하였으며, 그 결과로부터 사용된 흡착제들의 흡착속도의 차이를 알아보았고 흡착 등온곡선을 이해하는데 중점을 두었다. 실험결과를 요약하면 첫째, 흡착온도가 낮을수록 흡착량이 늘어나고 이에 따라 흡착속도가 빠르다는 것을 알 수 있었다. 이것은 TGA를 이용한 실험에서 흡착속도를 비교하기 위해 흡착 시작시간과 흡착 완료시간을 측정하고 이 흡착 시간동안 CO<sub>2</sub> 및 N<sub>2</sub>에 의한 시료의 무게 변화량을 측정하여 단위 질량당 흡착량과 분당 흡착량을 계산하여 나온 결과로 거의 모든 실험 결과값을 통해서 공통된 사항이다. 이것은 흡착 온도가 증가할수록 활성탄에 흡착된 기체분자들의 움직임이 활발해져 탈착도 진행됨에 따라 전체적인 흡착량이 감소하는 것으로 사료된다.

둘째, 압력이 높을수록 흡착량이 증가한다는 것이다. 이것은 압력이 증가하면 기체 분자들에 가해지는 힘이 증가해 흡착량이 증가하지만 저압일 경우 흡착력이 약하기 때문이라 생각된다.

셋째, SGT가 SGA-100및 SGP-100에 비해 같은 조건에 있어서 적은 양이지만 흡착량이 많고 흡착속도도 다소 빠르다는 것이다. 이는 SGT의 표면적이 SGA-100 및 SGP-100보다 넓기 때문에 더 많은 흡착이 일어남을 알 수 있었다(Table 1의 SGT, SGA-100, SGP-100의 물성 및 특성 비교 참고).

#### 4. 결 론

본 연구는 지구 온난화 현상의 주원인이 되는 CO<sub>2</sub>를 화력발전소 연도가스로부터 분리 회수하기 위한 PSA 공정 개발용 기초자료를 습득하기 위하여 실시하였다. 연도가스와 유사한 조건하에서 국내에서 제조된 활성탄(SG series)을 이용하여 이산화탄소 및 밸런스를 이루고 있는 질소 가스의 흡착평형 및 흡착속도 실험을 실시하였으며, 자체 제작한 장치(부피 측정법) 및 TGA 장치를 각각 사용하였다.

흡착 온도, 흡착제의 종류, 가스를 변화시키면서 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 모든 활성탄의 경우, 낮은 흡착온도에서 CO<sub>2</sub> 및 N<sub>2</sub>의 흡착속도가 더 빠름을 알 수 있었다.
2. 흡착온도가 낮을수록 CO<sub>2</sub> 및 N<sub>2</sub>의 흡착평형량이 증가하였으며, 높은 압력 하에서 더 많은 흡착이 일어남을 알 수 있었다.
3. SGT가 SGA-100, SGP-100보다 더 많은 흡착량과 빠른 흡착속도를 보였으며, 이산화탄소 분리를 위한 활성탄으로 사용될 수 있는 가능성을 나타내었다.

#### 감사의 글

본 연구는 순천향대학교 교내 자체연구비의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 조순행, 김종남, 주국택, 박교식, "연소배기가스에서 탄산가스의 분리 회수기술," 화학 공업과 기술,

- Vol. 13, No. 4, 1995.
2. 한상섭, 양재영, 문계권, 이창하, "수소 회수를 위한 PSA 공정," 화학 공업과 기술, Vol. 14, No. 2, 1996.
  3. Kim, J. N., Chue, K. T., Kim, K. I., Cho, S. H., and Kim, J. D., "Non-Isothermal Adsorption of Nitrogen-Carbon Dioxide Mixture In a Fixed-Bed of Zeolite-X," J. of Chem. Eng. of Japan, vol. 27, No. 1, 1994.
  4. Kikkinides, E. S., and Yang, R. T., "Concentration and Recovery of CO<sub>2</sub> from Flue Gas by Pressure Swing Adsorption," Ind. Eng. Chem. Res., 32, 2714, 1993.
  5. Chue, K. T., Kim, J. N., Yoo, Y. J., and Cho, S. H., "Comparision of Activated Carbon and Zeolite 13X for CO<sub>2</sub> Recovery from Flue Gas by PSA," Ind. Eng. Chem. Res., 34, 591, 1995.
  6. Pilarczyk, E., Schroter, H. J., New-PSA processes with carbon molecular sieves for recovery of carbon dioxide and methane, In Gas Separation Technology; Varsant, E. F., Dewolfs, R., Eds.,; Elsvier, Amsterdam, 1990.