

유동층에서 dry sorbent를 이용한 CO₂ 제어에 관한 연구

이상섭¹ · 김민철¹ · 유정석² · 문길호² · 오광중^{1, 2}

¹ 우) 609-735 부산시 금정구 장전동 산 30번지 부산대학교 환경공학과

² 우) 641-792 경남 창원시 귀곡동 555 두산중공업주식회사 기술연구원

(접수일자 : 2003. 10. 21 / 채택일자 : 2003. 11. 21)

Study on Carbon Dioxide Control by Using Dry Sorbent in Fluidized Bed

Sang-Sup Lee¹ · Min-Choul Kim¹ · Jeong-Seok Yoo² · Gil-Ho Moon² · Kwang-Joong Oh¹

¹ Department of Environmental Engineering, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

² Doosan Heavy Industries & Construction Com. Ltd. R&D Center, Changwon, 641-792, Korea

요 약

건식 흡착제를 이용한 유동층 공정에 관한 기술은 이산화탄소 처리 비용을 절감하고 효율적으로 운전될 수 있는 신기술이라고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 유동층 공정에서 건식 흡착제를 사용할 때 조업변수에 따른 이산화탄소 제어에 대해 살펴보고, 이산화탄소 흡착능과 압력강하에 대해서 고정층 공정과 비교하였으며, 활성탄, 활성 알루미나, 분자체 5A, 분자체 13X의 이산화탄소 흡착능을 각각 살펴보았다. 연구 결과, 유동층 공정의 운전을 위한 기초자료를 얻을 수 있었고, 유속이 증가할수록 유동층 공정은 상대적으로 높은 이산화탄소 흡착능과 낮은 압력강하를 지니는 것으로 나타났다. 그리고, 분자체 5A는 다른 건식 흡착제들보다 1.1~3.0배 파과점이 늦게 나타났으며, 1.1~2.7배 높은 흡착능을 보였다.

주제어 : 이산화탄소, 건식 흡착제, 유동층, 흡착

ABSTRACT : The technology of fluidized bed to use dry sorbent can be new technology that reduce the operating cost and make efficient operation. Therefore, this study investigated CO₂ control by dry sorbents with operating variables in a fluidized bed, compared with fixed bed for CO₂ adsorption capacity and pressure drop, and presented the CO₂ adsorption capacity of activated carbon, molecular sieve 5A, molecular sieve 13X, and activated alumina. As the results of this study, the basic data could be achieved for operation of fluidized bed process, and fluidized bed process presented relatively high CO₂ adsorption capacity and low pressure drop with the increase of gas velocity. In addition, molecular sieve 5A showed 1.1~3.0-fold later breakthrough point and 1.1~2.7-fold higher adsorption capacity than the other dry sorbents.

Key Words : CO₂, Adsorption, Dry sorbent, Fluidized bed

1. 서론

기후변화에 따른 지구온난화를 예방하기 위해 1997년에 선진국들을 대상으로 온실가스 배출량을 1990년 대비 평균 5.2% 감축하는 것을 주요내용으로 하는 교토의정서가 채택되었다. 우리나라의 경우 아직 개발도상국의 지위를 유지하고 있으나, 의무감축 부담이 현실화되어 이산화탄소 배출량을 10%를 줄일 경우 GDP의 0.29%인 3조 9천억원의 GDP 감소가 예상된다. 그러나, 이산화탄소 배출량의 10% 감축에 따른 대기오염물질 감소, 농작물 피해감소 등에 의한 환경편익도 이산화탄소 저감비용의 71%에 이를 것으로 예상¹⁾되므로, 경제적 부담을 최소화하고 이산화탄소 감축효과를 높일 수 있는 CO₂ 제어기술에 관한 연구가 시급한 실정이다.

지금까지 CO₂ 제어를 위해 실용화되었거나 연구되어온 방법으로는 흡수법, 고정층 흡착법, 심냉법, 산소부하연소법, 막분리법 등이 있다. 이 중 흡수법은 높은 효율로 단기간에 연소 배가스에 적용시킬 수 있는 방법이나 CO₂ 제어에 사용되는 에너지 소비가 많고 부식문제도 심각하며 장치 투자비가 많이 드는 단점이 있고, 고정층 흡착법은 비교적 장치간단하고 중소규모 플랜트에 적합하나 화력발전소에 적용할 때, 보일러 연소 열량의 약 40%에 상당²⁾하는 에너지가 CO₂ 제어를 위해 필요하며, 대용량화하기가 힘든 방법이다. 이에 비하여 유동층 (fluidized bed) 공정은 CO₂ 회수효율과 dry sorbent의 이용율을 높이고, 대량의 상압 배가스를 처리할 수 있는 공정이고, dry sorbent를 사용하는 공정은 습식 공정에 비하여 커다란 압력강하 없이도 기-고 접촉이 좋기 때문에 에너지소비가 적은 공정이다.³⁾ 따라서, 본 연구에서 사용하는 dry sorbent를 이용한 유동층 공정에 관한 기술은 상대적으로 CO₂ 처리 비용을 절감하고, 효율적으로 운전될 수 있는 가능성이 높은 신기술이라고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 유동층 실험장치를 이용하여 기존 고정층 공정에서 CO₂ 제어에 이용되어 온 활성탄, molecular sieve 5A, molecular sieve 13X, 활성 알루미늄의 최소유동화속도를 결정하고, aspect ratio, 가스 유속, dry sorbent 입자크기 등 조업변수

에 따른 CO₂ 흡착곡선과 흡착능을 살펴봄으로써, 유동층 공정운전을 위한 기초자료로 활용하고자 한다. 그리고, 고정층 공정과의 흡착능, 압력강하 비교를 통해 유동층 공정의 장단점을 분석하고, 실공정에서 CO₂ 제어에 적합한 공정을 제시하고자 하며, dry sorbent간의 CO₂ 흡착능을 비교하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

본 실험에서 사용한 dry sorbent는 CO₂ 흡착 분리공정에 일반적으로 사용되고 있는 활성탄, 활성 알루미늄, molecular sieve 5A, molecular sieve 13X이다. 활성탄은 (주) 삼천리에서 30/80mesh 크기로 제조된 것으로 ASTM체를 이용하여 32/40, 40/60, 60/80mesh 크기로 분류하였으며, 이들의 평균입경은 dry sorbent를 구형으로 가정하여 식 (2-1)에 의해 계산한 결과 각각 461.0 μm , 326.0 μm , 212.1 μm 이었다.

$$\text{Geometric mean diameter}(\bar{d}_p) = (d_1 \times d_2)^{1/2} \quad (2-1)$$

d1 = sieve에서 가장 작은 직경,

d2 = sieve에서 가장 큰 직경

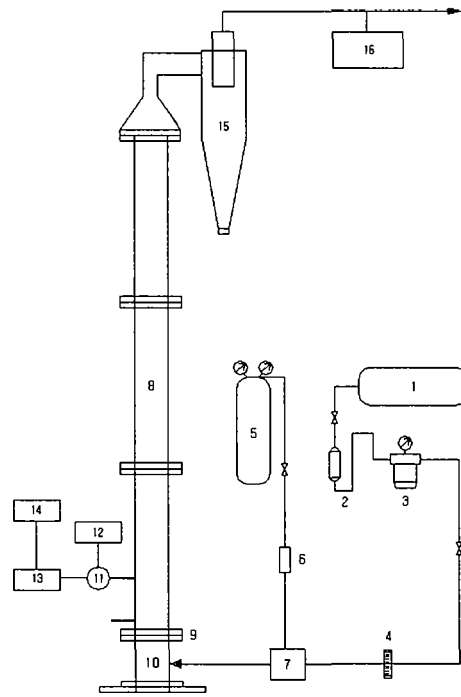
그리고, molecular sieve 5A와 molecular sieve 13X는 Acros사, 활성 알루미늄은 (주)관동화학에서 8/12mesh 크기로 제조된 것으로 이를 볼밀(ball mill)을 이용해 분쇄한 후 체거름하여 40/60mesh 크기로 선별하였으며, 전처리 과정으로는 200°C의 vacuum oven에서 24시간 가열하면서 불순물을 제거하였다. 본 연구에서 사용된 dry sorbent의 물리적인 특성은 Table 1에 나타낸 바와 같으며, 이러한 물성치를 Geldart의 입자분류표에 적용하면 격렬한 bubble의 유동에 의해 bubble이 커지면서 유동화가 잘되는 영역인 B그룹에 속하는 것으로 나타났으므로, 이들은 유동층 공정에서 CO₂ 제어 특성을 살펴보기에 적합한 물리적 특성을 가지는 것으로 판단되었다.

Table 1. Physical properties of dry sorbents

| Dry sorbent | Activated carbon | Molecular sieve 5A | Molecular sieve 13X | Activated alumina |
|-------------------------------------|------------------|--------------------|---------------------|-------------------|
| BET surface area(m ² /g) | 1142 | 394 | 480 | 275 |
| Real density (g/cm ³) | 2.96 | 2.47 | 2.51 | 2.88 |
| Pore volume (cm ³ /g) | 0.58 | 0.31 | 0.34 | 0.34 |
| Pore diameter (Å) | 20.3 | 31.6 | 28.6 | 48.8 |

2.2 실험장치

본 실험에서 사용된 장치는 Fig. 1과 같이 크게 모사가스 제조부, 유동층 반응부, 유출입자 포집부, 가스농도 측정부, 압력 측정부의 5부분으로 구성되어 있다. 모사가스 제조부에서 장치에 유입되는 공기는 콤프레셔 (Hanshin piston)로부터 주입되어 트랩을 통과 하면서 수분, 기름 성분 및 입자상 물질이 제거되며 압력조절기에서 일정한 압력으로 조절된 다음 가스유량계를 통해 일정한 유량으로 조절되도록 하였고, CO₂ (99.99%, 대영특수가스) 실린더로부터 나오는 가스는 mass flow controller (5850E, Brooks Co.)를 이용하여 일정한 유량으로 조절한 다음 이를 혼합조에 서 공기와 혼합되도록 하여 실험하고자 하는 CO₂ 농도를 유지하였다. 유동층 반응부는 직경이 6cm, 높이는 95cm로서 층 내의 유동상태를 관찰하기 위하여 투명한 아크릴 원통으로 제작하였고, 층내 압력강하를 고려하여 3.11% 개공비와 3mm 두께의 기체분산판을 제작하였으며, 분산판 위에는 입자가 밑으로 빠지는 것을 막기 위하여 200mesh의 망을 설치하였다. 그리고, 실험이 진행되는 동안 유출되는 미세입자들은 가로 2cm, 세로 4cm의 주입부와 직경 8cm, 높이 32cm로 제작된 유출입자 포집부의 cyclone을 통하여 회수하였고, 유출가스의 농도는 CO₂ 분석기 (매립가스분석기, CD95)에 의해 측정되었다. 그리고, 압력센서에 의해 측정된 층 내의 압력은 data logger system을 거친 후 computer program에 의해 분석되었다.



- 1. Air compressor
- 2. Trap
- 3. Regulator
- 4. Flowmeter
- 5. CO₂ cylinder
- 6. Mass flow controller
- 7. Mixing chamber
- 8. Fluidized bed
- 9. Distributor
- 10. Air box
- 11. Pressure sensor
- 12. D.C. power supplier
- 13. Data logger system
- 14. Computer program
- 15. Cyclone
- 16. CO₂ analyzer

Fig. 1. Schematic diagram of fluidized bed reactor.

2.3 실험방법

본 실험에서는 dry sorbent를 L/D=0.5, 1, 2에 해당하는 높이로 주입한 다음, 혼합 가스의 유속은 8~36cm/s로 변화시켰을 때, dry sorbent에 의해 CO₂가 제어된 후 배출가스의 농도를 측정하였고, 층내 압력강하 측정을 위하여 Sensys사에서 제조된 압력센서를 사용하였다. 또한, 유동층 공정에서 dry sorbent의 CO₂ 흡착능을 고정층 공정에서의 흡착능과 비교하기 위하여 같은 실험장치에 혼합가스를 위쪽에서 주입하여 200mesh 철망위에 놓여진 dry sorbent를 지나도록 가스 순환을 하향 흐름으로 변경하여 실험하였으며, 이상의 실험 조건은 Table 2에 나타낸 바와 같다.

Table 2. The experimental conditions

| Operation variable | Operation range |
|-----------------------------------|--|
| Dry sorbents | Activated carbon, Molecular sieve 5A Molecular sieve 13X, Activated alumina |
| CO ₂ concentration (%) | 10 |
| Gas velocity (cm/s) | 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36 |
| Aspect ratio (L/D) | 0.5, 1, 2 |
| Mean particle size (μm) | 212.1, 326.0, 461.0 |
| Process | Fixed bed Fluidized bed |

3. 실험결과 및 고찰

3.1 최소유동화속도의 결정

유동층내 고체층에서의 압력강하 측정을 통해 최소유동화속도를 결정하기 위하여 40/60mesh의 dry sorbent를 L/D=2로 주입하고, 분산판으로부터 2.5cm, 9cm의 높이에 두 개의 압력센서를 부착하여, mass flow controller로 주입 유량을 조절함으로써, 유속에 따른 층내 압력강하를 측정하였다. 압력센서로 측정된 압력자료는 data logger system에 의해 컴퓨터에 입력시킨 후 off-line으로 해석하였으며, 각 실험조건에서 측정속도는 100Hz, 측정시간은 30초로 하여 측정개수를 3,000개로 한 후, 각 측정지점에서 측정된 압력값 평균의 차로부터 압력강하를 구하였다. Fig. 2에서와 같이 60/80, 40/60, 32/40mesh 활성탄의 최소유동화속도는 3.5cm/s, 8.0cm/s, 13.6cm/s로서 입경 증가에 따른 최소유동화속도 증가를 보였고, Fig. 3에서 활성탄은 활성알루미나의 8.5cm/s와 molecular sieve 5A의 6.2 cm/s와 서로 비슷한 최소유동화속도 값을 보였다. Table 3에서는 실제 실험을 통해 얻은 값들과 Wen & Yu의 실험식을 이용하여 계산한 U_{mf}값들을 비교하고 있으며, 실측치는 실험식을 이용한 값보다 24%, 17%, 15% 작게 나타났다.

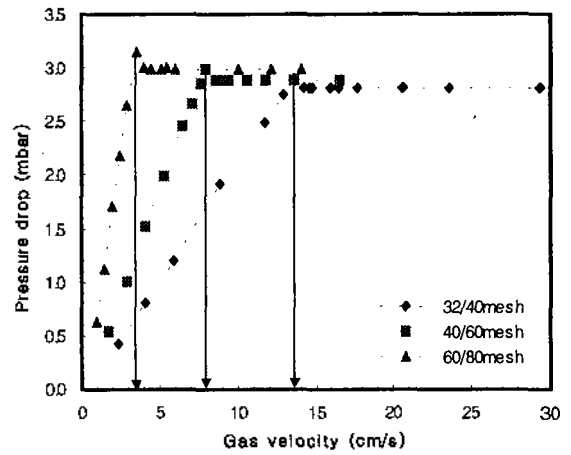


Fig. 2 Minimum fluidization velocity for activated carbon with different particle size.

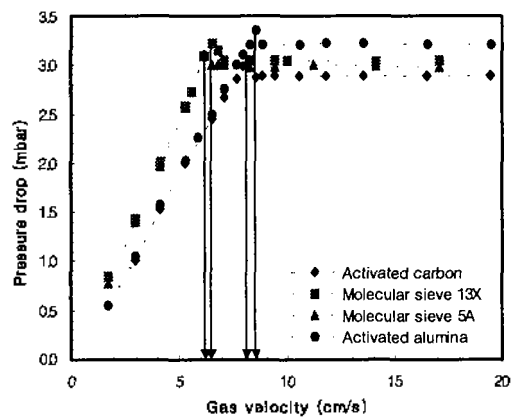


Fig. 3. Minimum fluidization velocity for dry sorbents.

Table 3. The comparison between experimental and calculated values of U_{mf}

| Dry sorbent | Mesh | Mean size(μm) | Density (g/cm ³) | U _{mf} ,cal. (cm/sec) | | U _{mf} ,exp. (cm/s) |
|---------------------|-------|---------------|------------------------------|--------------------------------|------------|------------------------------|
| | | | | Wen&Yu | Richardson | |
| Activated carbon | 32/40 | 461.0 | 2.79 | 17.9 | 20.3 | 13.6 |
| | 40/60 | 326.0 | | 9.4 | 10.9 | 8.0 |
| | 60/80 | 212.1 | | 4.1 | 4.7 | 3.5 |
| Molecular sieve 5A | 40/60 | 326.0 | 2.47 | 8.3 | 9.7 | 6.2 |
| Molecular sieve 13X | 40/60 | 326.0 | 2.51 | 8.5 | 9.8 | 6.5 |
| Activated alumina | 40/60 | 326.0 | 2.88 | 9.7 | 11.2 | 8.5 |

3.2 Dry sorbent 입자크기가 CO₂ 흡착능에 미치는 영향

Dry sorbent의 입자크기 분포는 흡착곡선과 물질전달계수에 영향을 미쳐 흡착능을 변화시키는 것으로 알려져 있다.5,6) 따라서, 본 실험에서는 32/40, 40/60, 60/80mesh 활성탄을 사용하여 12, 18, 24cm/s 가스유속에서 CO₂ 흡착능을 구하여 dry sorbent 입자크기가 CO₂ 흡착능에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 그 결과 Fig. 4에 나타난 바와 같이 세 가지 입경 중 중간 크기에 해당하는 40/60mesh 활성탄은 가장 높은 흡착능을 보인 반면에 입경이 가장 작은 60/80mesh 활성탄은 가장 낮은 CO₂ 흡착능을 보였다. 이는 일반적으로 입자크기가 작을수록 단위 g당 표면적이 크므로 흡착량은 증가하나, 입자크기가 너무 작으면 기공도 아주 작아 오히려 흡착량이 감소하고, 입자크기가 너무 크게 되면 흡착될 수 있는 표면적과 기공이 적어져 전체 흡착능을 감소시키기 때문으로 판단된다. 따라서, 본 실험에서는 40/60mesh 입경을 주로 사용하였으며, 가스유속이 높을수록 입자크기에 따른 흡착량 차이가 감소하는 것으로 보아, 높은 유속에서는 입경에 따른 영향이 감소하는 것으로 판단되므로, 실공정에서 대용량 CO₂ 처리를 위해 높은 가스유속에서 조업되는 고속 순환유동층 반응탑에서는 dry sorbent 입경에 따른 CO₂ 흡착능 변화는 적을 것으로 판단된다.

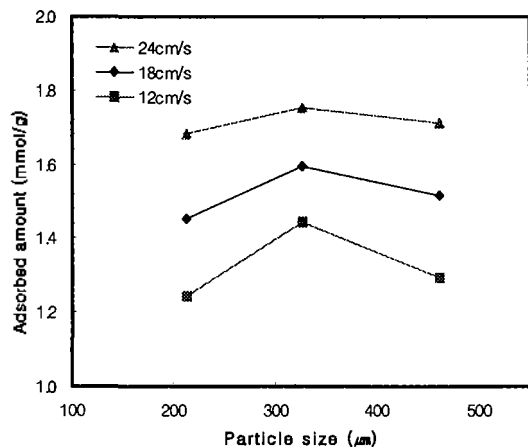


Fig. 4. The adsorbed amount of CO₂ with gas velocity by 32/40, 40/60, 60/80mesh activated carbon.

3.3 Aspect ratio에 따른 CO₂ 흡착능 변화

유동층 공정에서 고체층의 L/D비를 나타내는 aspect ratio는 운전 조건 및 상태를 결정하는 중요한 변수가 될 수 있다. 본 실험에서는 40/60mesh 활성탄의 2.25Umf에 해당하는 18 cm/s 유속으로 10% CO₂ 가스를 주입하고 시간에 따른 CO₂ 배출농도를 측정하여 Fig. 5와 같이 나타내었다. 이 곡선은 전형적인 S자 모양 파과곡선(breakthrough curve) 형태를 보여주며, 파과점(break point)을 유입농도의 5% 지점으로 정의할 때 L/D=0.5일 때의 파과점은 16초, L/D=1일 때는 19초, L/D=2일 때는 31초로서 aspect ratio가 증가함에 따라 파과점은 늦게 나타났다. 그리고, aspect ratio의 증가에 따라 파과곡선의 기울기가 점차 완만해지는 경향을 보이는 것은 aspect ratio 증가에 따른 흡착영역(adsorption zone) 증가에 기인하는 것으로 판단된다.8) 본 실험에서 활성탄의 CO₂에 대한 낮은 흡착력으로 인해 빠른 시간안에 파과점에 도달하는 결과를 얻었으므로, 이후의 실험에서는 파과점이 늦게 나타남으로 인해 조업변수에 따른 결과를 살펴보기에 용이한 aspect ratio가 2일 때를 기준으로 실험하였다.

3.4 유속에 따른 CO₂ 흡착능 변화

유동층 공정은 대용량 가스의 처리에 주로 사용되는 공정이므로 가스 유속은 공정운전에 있어 중요

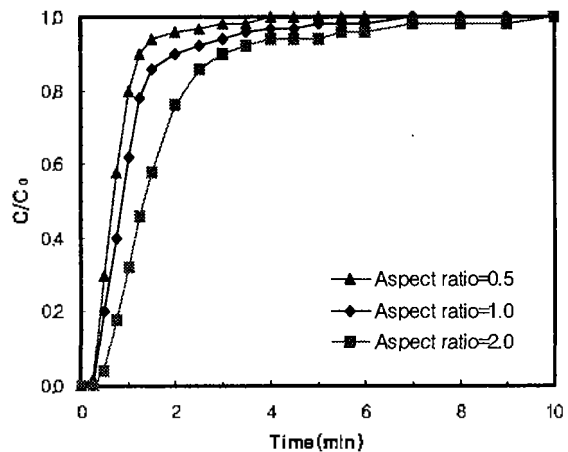


Fig. 5. CO₂ adsorption breakthrough curves by 40/60mesh activated carbon with aspect ratio at 2.25Umf in fluidized bed.

한 조업변수가 된다. 따라서, 본 실험에서는 유동층 내 가스유속의 변화에 따른 CO₂ 흡착특성을 살펴보기 위하여 L/D=2의 조건에서 유속을 1~4.5U_{mf}에 해당되는 8~36 cm/s로 변화시키면서 실험을 수행하였다. Fig. 6은 각 유속에서 시간에 따른 CO₂ 배출 농도를 나타낸 흡착곡선이고, Fig. 7은 이 흡착곡선에서 흡착면적을 계산하여 활성탄 1g당 흡착된 CO₂의 양을 각 유속에 대하여 나타낸 것으로서, 가스유속이 증가함에 따라 CO₂ 흡착능은 증가하지만, Fig. 6에서처럼 파괴점에 도달하는 시간이 단축되어 흡착능의 증가폭은 조금씩 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, 3.5U_{mf}이상의 유속에서 그 증가폭이 오히려 커지는 것은 Fig. 6의 3.5U_{mf}, 4.5U_{mf}에 대한 CO₂ 흡착곡선에서 보여주듯이 이 유속이상에서는 활성탄

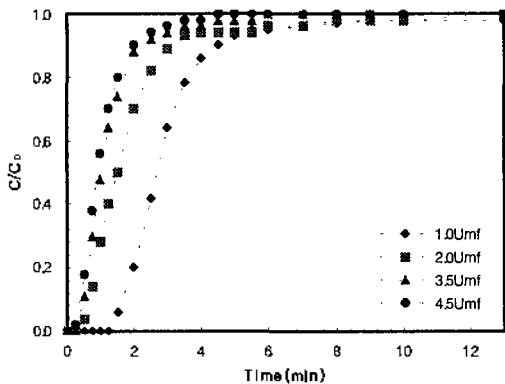


Fig. 6. CO₂ adsorption breakthrough curves by 40/60mesh activated carbon with gas velocity in fluidized bed.

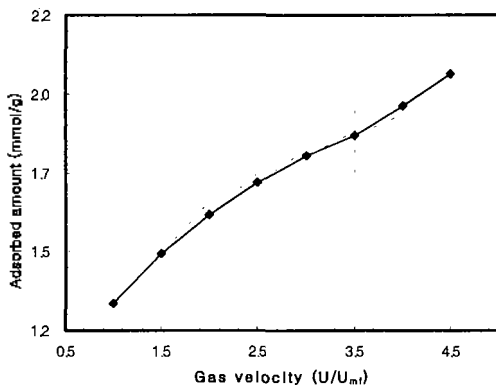


Fig. 7. The adsorbed amount of CO₂ by 40/60mesh activated carbon with gas velocity in fluidized bed.

의 파파가 모두 빨리 일어나 파파곡선의 면적에 있어서 큰 차이를 보이지 않으면서, 공급량에 있어서의 증가만 있기 때문이다.

3.5 유동층과 고정층 공정의 비교

유동층 공정에서 살펴본 이상의 결과를 CO₂ 흡착 공정으로 이용되어 오던 고정층 공정과 비교하기 위하여, 가스 순환을 하향 흐름으로 변경하여 dry sorbent의 CO₂ 흡착능을 살펴보았다. 이 때 dry sorbent로는 가장 높은 흡착능을 보여준 입경인 40/60mesh 크기의 활성탄을 사용하고, 가스 유속은 이전 실험에서 활성탄의 CO₂ 흡착능 유지가 가능한 유속으로 판단되었던 8~28 cm/s 범위로 정하여, 실험한 결과를 Fig. 8과 같이 나타내었다. 12, 18, 24(cm/s)의 가스 유속에서 고정층 공정의 CO₂ 흡착능은 각각 1.67, 1.74, 1.79(mmol/g)으로서 유동층 공정의 1.44, 1.59, 1.75(mmol/g)보다 각각 16.0%, 9.4%, 2.3% 높게 나타났으나, CO₂ 흡착능의 차이는 급격히 감소하다 28 cm/s의 유속에서는 두 공정의 흡착능이 거의 일치하였으며, 이는 유속 증가에 따른 유동층에서의 기-고 접촉 효율 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

유동층과 고정층 공정내의 압력강하 측정을 위하여, L/D=2로 주입된 40/60mesh 활성탄층에 두 개의 압력센서를 부착한 후, 압력강하를 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. 앞에서 살펴본 바와 같이 유동층 공정에서는 최소유동화속도에 해당하는 8cm/s의 유속에서 최대의 압력강하를 나타내었고, 그 이후에는 일

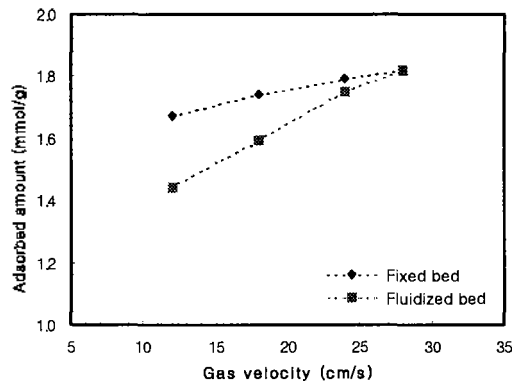


Fig. 8. The comparison of CO₂ adsorption amount with gas velocity between fixed and fluidized bed.

정한 값을 보였으며, 최소유동화속도 이전인 6cm/s에서는 고정층 공정과 비슷한 압력강하를 가졌다. 그러나, 고정층 공정에서는 유속의 증가에 비례하여 압력강하가 증가하는 경향을 나타내어, 28cm/s의 유속에 이르러서는 유동층 공정에 비해 5.2배 높은 압력강하가 발생하였다.

이상의 실험결과로부터 유동층 공정은 높은 유속에서 상대적으로 높은 CO₂ 흡착능을 보이면서, 적은 압력강하를 가지는 반면에, 고정층 공정은 높은 압력강하로 인해 Fan 동력비 증가와 대용량 가스처리가 어려운 것으로 판단되었다. 따라서, 대용량의 CO₂를 처리해야 하는 실공정에서는 유동층 공정이 적합한 것으로 판단된다.

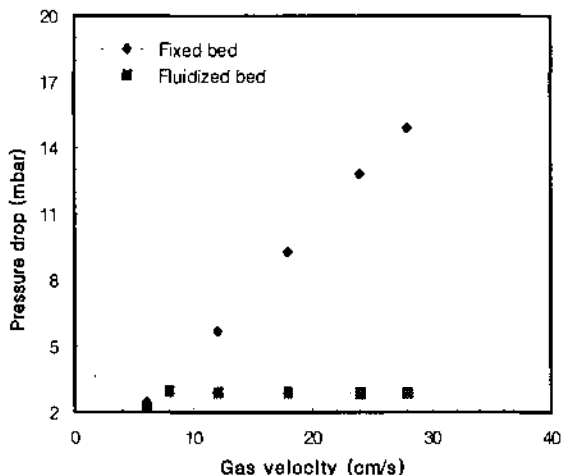


Fig. 9. The comparison of fixed bed with fluidized bed for pressure drop with gas velocity.

3.6 Dry sorbent 종류에 따른 CO₂ 흡착능 비교

이상의 실험 결과를 통해 유동층 공정에서 높은 CO₂ 흡착능을 가지면서, dry sorbent의 흡착곡선 비교에 가장 적합한 운전조건으로 판단되는 L/D=2, 12 cm/s의 가스유속에서 40/60mesh 크기 dry sorbent의 CO₂ 흡착곡선 및 흡착능을 살펴보았다. Dry sorbent로는 기존의 고정층 흡착공정에서 CO₂ 흡착제로서 사용되어온 활성탄, 활성 알루미나, molecular sieve 5A, molecular sieve 13X를 사용하였으며, 실험을 수행한 결과를 Fig. 10, Fig. 11에 나타내었다. Fig. 10은 dry sorbent의 CO₂ 흡착곡선을 나타낸 것으로 활성탄은

활성 알루미나와, molecular sieve 5A는 molecular sieve 13X와 비슷한 형태의 파과곡선을 보였다. 그리고, 파과점은 molecular sieve 5A의 경우 1.65분으로서 molecular sieve 13X의 1.46분, 활성탄의 0.59분, 활성 알루미나의 0.55분보다 뒤에 나타났다. 또한, dry sorbent간의 CO₂ 흡착능을 비교해 놓은 Fig. 11을 보면, molecular sieve 5A의 흡착능은 2.35mmol/g으로서 molecular sieve 13X의 2.23mmol/g과는 서로 비슷한 흡착능을 보였고, 활성탄의 1.44mmol/g보다는 1.6배, 활성 알루미나의 0.87mmol/g보다는 2.7배 높은 흡착능을 나타내어, 기존에 사용되어온 dry sorbent 중에서는 가장 높은 흡착능을 보였다. 그리고, 본 결과 그래프에서 활성 알루미나와 활성탄의 흡착 곡선은

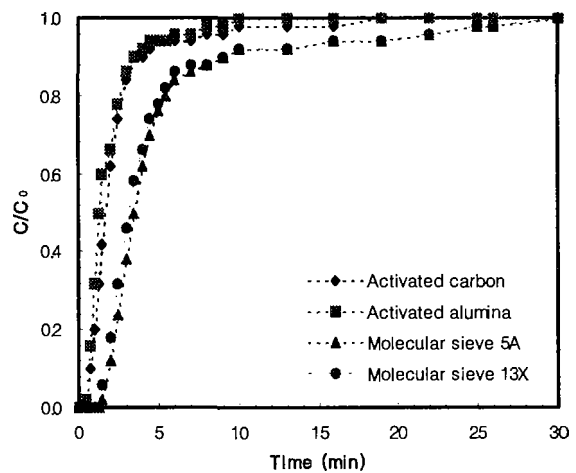


Fig. 10. CO₂ adsorption breakthrough curves with dry sorbents in fluidized bed.

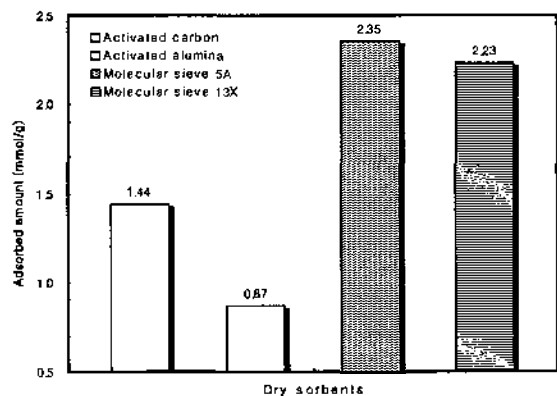


Fig. 11. The adsorbed amount of CO₂ with dry sorbents in fluidized bed.

유사하면서 흡착능에 차이가 나는 것은 활성 알루미나가 활성탄보다 겔보기 밀도가 커서 L/D=2의 부피만큼 충전된 질량이 더 많았기 때문이다.

4. 결론

유동층 공정에서 dry sorbent를 이용하여 CO₂ 제어에 관하여 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 조업 변수에 따른 CO₂ 흡착능 변화를 살펴본 결과, aspect ratio가 증가함에 따라 파과점은 늦게 나타나고, 유속이 증가함에 따라 흡착능은 증가하면서도 3.5U_{mf} 이상에서는 활성탄이 CO₂ 흡착력을 잃었으며, 입자 크기의 영향은 감소하였다. 따라서, 유동층 실공정에서 유입가스 유량증가시 흡착능 향상이 예상되나, CO₂ 흡착력 유지를 위해 aspect ratio를 증가시키거나, dry sorbent를 지속적으로 공급 또는 재생시켜야 할 것이다.
2. 유동층 공정은 상대적으로 높은 유속에서 높은 CO₂ 흡착능과 낮은 압력강하를 나타내었다. 따라서, 대용량의 CO₂ 가스 제어를 위해 높은 유속으로 운전되는 실공정에서는 압력강하가 적은 유동층 공정이 적합한 것으로 판단된다.
3. Dry sorbent의 CO₂ 흡착능은 molecular sieve 5A > molecular sieve 13X > 활성탄 > 활성 알루미나 순으로 높게 나타나, molecular sieve 5A의 파과점은 다른 dry sorbent보다 1.1~3.0배 늦었고, 흡착능은 1.1~2.7배 높았다. 따라서, 기존의 고정층 흡착공정에서 CO₂ 제어를 위해 사용되었던 dry sorbent 중에서는 molecular sieve 5A가 유동층 공정에서 가장 높은 효율로 CO₂를 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 연구 개발사업인 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발 사업단의 연구비 지원(DA1-202)으로 수행되었습니다.

Nomenclature

- D Diameter of bed, [m]
 d_p Particle diameter, [m]
 \bar{d}_p Geometric mean particle diameter, [m]
 L Length of cylinder, [m]
 t Time, [sec]
 U_{mf} Superficial gas velocity at minimum fluidizing condition, [m/s]

참고문헌

- [1] 정금희, "기후변화협약 제 7차 총회 결과 및 향후 전망," 환경부
- [2] 임희문 외, "화력발전소에서 CO₂의 분리회수 및 전환기술의 Demo Plant 적용 연구," 산업자원부 (2003).
- [3] Hoffman, J. S., and Pennline, H. W., "Study of regenerable sorbents for CO₂ capture," J. Energ. & Environ. Res., 1(1), 90~100 (2001).
- [4] Mathews, A. P., Member, ASCE and Zayas, I., "Particle size effects on adsorption rate parameters," J. Environmental Engineering, 115 (1), 41~55 (1989).
- [5] Oh, K. J., Cho, S. W., "A study on the characteristics of limestone calcination and sulfation in fluidized bed," Clean Technology, 3(1), 106(1997).
- [6] 오광중, 심언봉, 최원준, 조기철, "알카리금속염을 침착시킨 활성탄을 이용한 CO₂ 제어에 관한 흡착특성," 환경연구보, 19, 15~24 (2001).
- [7] McCabe, W. L., Smith, J. C., and Harriott, P., "Unit operations of chemical engineering," McGraw-Hill (1993).
- [8] Cooper, C. D., and Alley, F. C., "Air pollution control: A design approach," Waveland Press, Inc. (1994).
- [9] Geldart, D., and Baeyens, J., "The design of distributors for gas-fluidized beds," Powder

- Technology, 42, 67~78 (1985).
- [10] 김상돈 외, "순환 유동층 석탄 연소기술 개발," 과학기술처 (1989).
- [11] Kunii, D., and Levenspiel, O., "Fluidization engineering," Butterworth-Heinemann (1991).
- [12] Qureshi, A. E., and Creasy, D. E., "Fluidised bed gas distributors," Powder Technology, 22 (1), 113~119 (1979).