

도시생활폐기물 소각장에서 배출되는 이산화탄소 포집용 건식 흡착제 연구

김병순 · 이주열* · 김신도†

†서울시립대학교 환경공학부

* (주)애니텍 기술연구소

(2010년 7월 5일 접수 ; 2010년 9월 17일 채택)

Characterization of dry sorbents for CO₂ separation from MSW incineration flue gas

Byung-Soon Kim · Ju-Yeol Lee* · Shin-Do Kim†

†Department of Environmental Engineering, University of Seoul, Jeonong-Dong,
Dongdaemun-Gu, Seoul, 130-743, Korea

*Technology Institute, Anytech Co., Ltd, Sin-Dong, Yeongtong-Gu,
Suwon, 443-734, Korea

(Received July 5, 2010 ; Accepted September 17, 2010)

Abstract : In this study, commercial pellet type sorbents for the collection of CO₂ from a local municipal waste incinerator were prepared and characterized in terms of adsorption efficiency by varying the operating conditions of a field process. The concentration of CO₂ in the flue gas ranged from 8 to 10%, which entered the test packed bed. As a result of this experiment, the sorbent procured from A-company, which is mainly composed of calcium compounds, showed the highest adsorption efficiency. The regeneration efficiency was fairly low, however. It also was found that based on adsorption breakthrough time, the relatively low flow rate of 10 LPM into the bed allowed higher collection efficiency. The higher flow rate of 40 LPM, on the other hand, tended to decrease the retention of the adsorption.

Keywords : carbon dioxide, incineration, adsorption, zeolite, GHG

1. 서론

세계 평균기온 상승으로 병하가 급격히 줄어들고 있으며 홍수 및 자연재해로 인한 피해가 급속히 증가하고 있다. 기온을 상승시키는 이산화탄소는 무색, 무미, 무취의 기체로 일반 대기 중에

0.03% 정도 존재하며 지구온난화 가스 가운데 55%를 차지하고 있다[1]. 교토의정서가 지정한 6 종류의 감축 대상 온실 가스는 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 과불화탄소, 수소불화탄소, 육불화황이 있다. PCC가 제시한 지구온난화 지수는 이산화탄소를 1로 기준으로 메탄 21, 아산화질소 310, 수소불화탄소 1,300, 과불화탄소 7,000 으로 알려져 있다. 이 중 이산화탄소는 지구온난화 지수는

†교신저자 (E-mail : sdkim@uos.ac.kr)

낮지만, 전체 온실가스에서 이산화탄소가 차지하는 비중은 약 55%로 6종류의 온실가스 중 가장 중요한 가스로 분류되고 있다[2].

이러한 이산화탄소는 폐기물 소각시에 많은 양이 배출되고 있어 폐기물 부문에서도 높은 배출 비중을 차지하고 있다.

국내 폐기물의 소각은 1960~1970년대의 산업의 발달과 인구증가, 생활정도가 향상됨에 따라 발전해 왔으며, 이에 따라 폐기물의 배출량이 증가하게 되었다. 국내의 대형 소각시설들은 2009년 현재 35개소에서 일일 약 13,000 여톤 규모로 운영중에 있다[3].

폐기물 부문에서 현재 매립으로 인한 온실가스 배출량이 큰 비중을 차지하고 있지만(매립 46.7%, 소각 44.4%, 폐수 8.9%)[4], 향후, 정부정책에 의한 폐기물의 소각비율이 점차 증가하는 추세이다. 따라서, 소각처리 공정에서 발생하는 온실가스 처리 방안에 대해서 다각적인 연구가 필요하다.

폐기물 소각에 의해 발생하는 온실가스는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O)로 알려져 있다[5]. 그러나 메탄의 경우 고온에서 일정한 소각시간을 유지하는 현재 소각 조건에서는 발생량이 미미하여 소각에서의 메탄 발생량을 고려하지 않고 있으며, CO₂ 배출이 N₂O보다 더 중요하게 다루지고 있다. 또한, 비생물계 폐기물의 소각으로 인해 발생한 CO₂는 국가 온실가스 배출량에 포함하고, 생물계 폐기물의 소각으로 인해 발생한 CO₂는 자연계에서 순환과정을 통해 동화 재이용되는 것으로 간주하여 국가 온실가스 배출량에서 제외하고 있다[6].

국내 분야별 온실가스 비중을 살펴보면 폐기물 부문에서의 온실가스 배출량은 2005년도 통계에 의하면 국내 배출량의 2.2%를 차지하고 있으나 [7], 향후, 폐기물 소각처리 비중확대로 인하여 이산화탄소 배출량이 지속적으로 증가하여 폐기물 부문에서 이산화탄소 배출 비중은 2005년의 42.8%에서 2020년에 70.1%로 크게 높아질 전망이다[8]. 이러한 점은 폐기물 소각에 의한 온실가스 배출이 국내에서 점차 중요한 배출원으로 자리매김 할 것으로 판단된다.

이산화탄소의 분리포집 기술로는 막분리법, 흡수법, 흡착법 등이 있으며, 막분리법은 막에 대한 가스의 투과속도 차이를 이용하여 분리하는 것으로 장치는 간단하지만 분리막 장비의 비용으로 인하여 대용량화의 어려움과 배가스의 청정화를 위한 고성능 전처리가 필요하다. 흡수법은 용해도

차를 이용한 것으로 현재 아민 계열의 흡수제를 이용한 흡수법이 가장 많이 이용되고 있으나 재생시 많은 에너지가 필요하고 기기 부식 등의 문제점이 있다. 반면 에너지 소비가 적고 재사용이 가능한 흡착법은 경제성이 우수하고 관리가 편리한 장점을 가지고 있다. 그러나 흡착반응기로 유입될 때 수분을 비롯한 미세 에어로졸이 동시에 혼합되어 있을 수 있으므로 흡착제의 성능과 수명에 직접적인 영향을 준다. 대표적인 흡착제로 활성탄, 실리카겔 그리고 제올라이트를 많이 이용하고 있으며, 이 중 제올라이트는 3차원의 세공구조로 인하여 선택적인 분리에 매우 효과적이다[9].

본 연구에서는 소각장에서 배출되고 있는 이산화탄소의 처리를 위하여 고체입상상 상용 흡착제를 이용하여 현장배출조건에서의 흡착 성능을 평가하고, 최적 흡, 탈착 조건을 도출하고자 하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 소각시설에서 배출되는 현장가스를 대상으로 고체입상형태의 X-type 제올라이트(13X(직경 : 2 mm, 4 mm)), 직경이 2 mm인 A-type 제올라이트(5A)와 국내 A사 흡착제를 이용하여 CO₂ 흡착성능을 평가하였다. A사 흡착제(Sorbent-A)는 X-type 제올라이트에 소석회를 첨가하여 재제조한 것으로 제올라이트가 Si와 Al 화합물의 골격에 Na가 함유된 화학적 구성인 반면, Sorbent-A는 Ca 성분이 다량 분포하고 있다. 시험대상 소각로는 경기도내 P시의 생활쓰레기 소각장으로서 하루 200 ton을 처리하는 규모이고, 스톡카식 소각로 후단부에 폐열 보일러-반건식반응탑-활성탄흡착-여과집진기-SCR 반응탑 등이 설치되어 폐열회수 및 유해물질을 포집한다. 최종 stack으로 배출되는 배기가스는 약 185~190°C 정도였으며, 16~18%의 수분을 함유하고 있었다. 본 연구는 통상적인 폐기물 소각운전조건에서 발생하는 배가스가 상기와 같은 후처리공정을 거쳐 stack으로 흐르는 최종 배출가스로부터 bypass관을 연결하여 시험가스로 활용하였다.

각 흡착제에 대한 이산화탄소 흡착성능 및 재생 효율을 관찰하기 위한 장치 모식도를 Fig. 1.에 나타내었다. 실험 장치는 소각로에서 배출되는 현장가스를 반응기 내로 유입시켜 flow meter를 이용하여 유량을 조절할 수 있도록 구성하였다. 유입가스 내 CO₂ 농도는 NDIR(NDIR : Non-

Dispersive Infrared) 방식의 분석기를 사용하여 입, 출구에서 측정하여 농도 변화량을 산출하였다. stack에서 반응기로 유입되는 gas line은 실제 온도와 유사한 조건으로 유지할 수 있도록 heating tape를 이송관(1) 겉표면에 감싸주었고, 반응기(2) 또한 내부 보온을 유지할 수 있는 단열자켓을 덧입혔다. 입자충전층 반응기(2)는 내경 100 mm, 길이 300 mm의 원통형으로 열전달율이 높은 구리 소재로 제작하였다. 흡착시험장치 중간에 배출가스가 급격히 냉각되면서 발생하는 다량의 수분을 분리포집할 수 있는 water trap을 흡착반응기 전단부에 설치하였으며, 최종 유량계(3)는 시험 흡착반응기를 통과하는 기체유량을 측정할 수 있도록 200 LPM 눈금형 rotameter (Dywer)를 선정하였다.

시험용 흡착제 입자는 반응기 내부에 약 2.5 L 충전하였다. 흡착체별로 3가지 조건(10, 20, 40 LPM)의 유량 변화에 따른 농도를 측정하였으며, 포화흡착이 이루어질 때까지의 CO₂ 흡착 지속시간과 흡착 용량을 평가하였다.

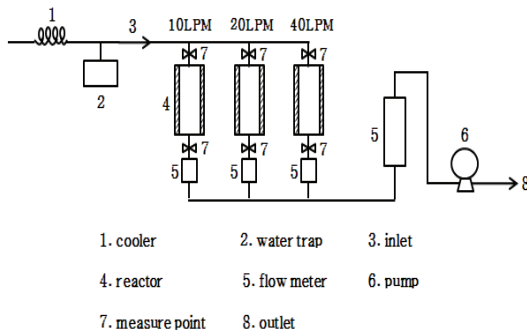


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set up.

3. 결과 및 고찰

3.1. 시험용 흡착제의 CO₂ 흡착성능 비교

Fig. 2는 반응기 유입 가스 유량을 20 LPM으로 일정하게 유지시키면서 제올라이트 13X 형태 2 mm (13X-2) 입상 흡착제와 4 mm (13X-4), 그리고 5A 형태 제올라이트 (5A), 국내 A사의 산화칼슘계 흡착제(Sorbent-A)의 성능을 상대적으로 비교한 결과이다. 반응기에 각각의 시험용 흡착제를

충진하고, 배출가스를 공급시키면서 최대 200분 동안 고찰하였다. 흡착반응기로 유입되는 가스의 CO₂ 농도는 실시간 TMS 결과와 고농도 검지관 (Gastec)으로 상호 검증하였을 때, 8~10 %로 비교적 일정한 수준을 유지하였다.

결과에서 볼 수 있듯이 각 흡착제 시료에 대하여 CO₂ 유출 한계 농도는 최저 1,000 ppm 정도로 나타났으며, 포화흡착이 이루어지는 파과시간 (breakthrough time)이 다르게 관찰되었다. 즉, 1,000 ppm을 최대흡착에 대한 최저 배출농도로 설정하였을 때, Sorbent-A의 파과시간이 108분으로 가장 길었고, 13X-2가 27분, 13X-4는 24분으로 나타났다. 5A는 3분으로 파과시간이 가장 짧게 나타났다. 가스흡착에 있어서 파과시간은 흡착제의 표면이나 내부 세공의 화학적 특성에 따라 가스 분자의 결합강도 및 부차 확률이 영향을 받을 수 있다. 화학적 성분이 유사한 13X-2와 13X-4는 크기에 따라 비표면적이 559 m²/g 과 474 m²/g으로 약간의 차이가 있으며, 이러한 표면적 차이가 잠재적인 흡착점의 크기를 결정하는 요소로 작용할 수 있다. 따라서 Fig. 2에서 볼 수 있는 약간의 흡착총량 차이는 이러한 물리적 변수에 의한 것으로 판단된다. 아울러 유사한 제올라이트 계열의 5A 시료는 Table 1.에서와 같이 37 m²/g에 불과하여 상대적 흡착 가능면적이 매우 낮으므로 궁극적으로 이산화탄소에 대한 흡착량이 적을 수 밖에 없다. 또한, X형에 비해 A형 제올라이트는 Si/Al 비율이 낮기 때문에 염기성이 약하고, 흡착점이 줄어드는 경향이 나타나므로 산성가스인 CO₂의 흡착능이 감소할 수 밖에 없다. 한편, Sorbent-A의 경우, 비표면적은 X형 제올라이트 흡착제에 비하여 낮게 나타나지만, 알칼리 물질로 구성되어 산성가스인 이산화탄소와의 산-알칼리 반응이 유도된다. 따라서 배출가스 내에 포함되어 있는 타 가스 상 물질에 비하여 이산화탄소에 대한 선택도가 높다.

본 연구에서는 배출가스에 함유되어 있는 수분이 흡착반응기에 유입되는 것을 최대한 억제하였으나, 실험장치의 유출부 (Fig.1. 8)는 여전히 50% 이상의 상대습도를 유지하고 있는 바, 수분에 대한 면밀한 고찰이 추후 진행될 필요가 있다. 혼합가스상에 존재하는 수분은 이산화탄소와 경쟁적으로 고체흡착제의 표면을 점유하기 때문에 실질적인 CO₂ 흡착량을 저감시키는 작용을 하는 것으로 알려져있고, 칼슘계 물질의 경우 수분에 의한 용융성 및 흡수반응은 훨씬 크게 발생한다[10]. 이

러한 수분과의 반응은 상온에서 수산화칼슘을 형성하는 비가역적인 공정이기 때문에 안정된 화합물로 변화되면서 흡착제의 재활용을 어렵게 하고, 경제성을 감소시키는 요인이 된다.

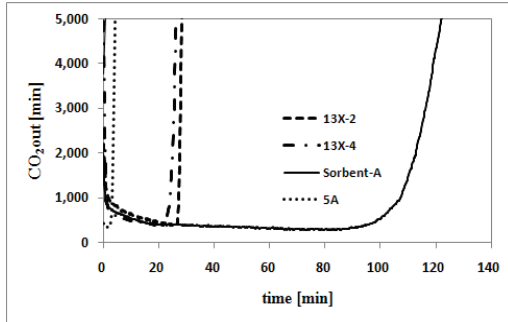


Fig. 2. CO₂ capture by test sorbents.

Table 1. BET Specific surface area

Adsorbents	Surface area (m ² /g)
13X-2	474
13X-4	559
5A	37
Sorbent-A	108

3.2. 가스 유량에 따른 CO₂ 흡착성능 고찰

Fig. 3에서 5는 유입가스 유량에 따른 13X-2와 13X-4, 그리고 Sorbent-A의 CO₂ 흡착과과시간을 고찰한 결과이다. 시험시료 5A는 흡착 시작 후, 수 분 이내에 포화되고, 특히 40 LPM의 높은 유량에서는 순간적으로 포화되는 현상이 목격되어 그래프로 표기하지 않았다. 13X-2 시료에 대한 시험결과, 최종 CO₂ 유출 농도 1,000 ppm을 기준으로 유량이 10 LPM일 때 과과시간은 72분이었으나, 20 LPM에서는 27분, 40 LPM으로 증가하면 13분으로 감소하는 경향을 나타내었다.

흡착량의 변화 경향은 매우 이상적인 곡선 형태를 보여주고 있다. 흡착 시작 초기에 흡착반응기를 통과하는 순간적인 배출 CO₂ 농도 값의 감소는 흡착제와 유입가스의 원활한 혼합에 의한 효과적인 접촉이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 그 이후, 일정한 농도가 유지된 후, 일정한 시점에 이르면 수직으로 배출농도 값이 상승하는 것은 흡착이 가능한 유효 표면에서의 가스분자 흡착이 매우 효율적으로 발생하였음을 시사한다. 따라서 본 그래

프로부터 포화 흡착량과 과과시간을 결정하여 시험 흡착제를 상대평가함에 있어서 발생하는 오차는 매우 낮을 것으로 사료된다.

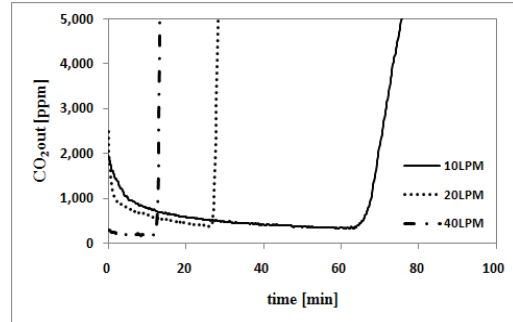


Fig. 3. CO₂ capture by 13X-2 with flow rate.

Fig. 4와 5에서 나타나는 흡착곡선 또한 Fig. 3과 매우 유사한 형태를 띄고 있다. 유량이 높을수록 CO₂ 가스의 절대 혼합량은 증가하게 되고, 이에 따른 과과시간은 단축되게 된다. 위에서 이미 고찰한 바와 같이 본 실험에 사용된 흡착반응기는 가스 고체 흡착제의 접촉이 충분히 이루어질 수 있는 구성이므로 가스 유속 증가로 인한 반응기 내 체류시간 감소가 흡착효율이나 절대 흡착능에 미치는 영향이 매우 적을 것으로 판단된다.

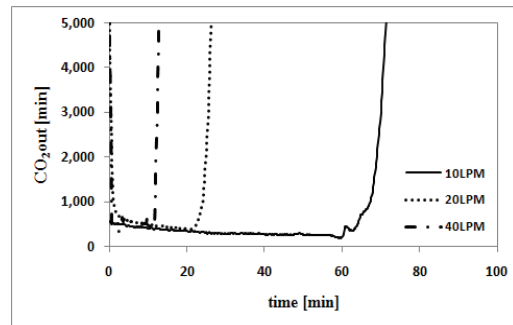


Fig. 4. CO₂ capture by 13X-4 with flow rate.

본 곡선으로부터 각 흡착제 시료의 과과시간을 측정할 수 있고, 이로부터 개별 흡착제의 CO₂ 흡착능을 산출할 수 있다. Fig. 6에 각 흡착제의 과과시간 변화량을 유입유량에 따라 도시하였다. 과과시간은 유량이 증가함에 따라 감소하는 추세를 보여주지만 본 연구의 실험범위에서 20 LPM에 이르면 그 감소율이 급격히 낮아지고, 이후 거의 일정하게 유지될 것으로 보이는 바, 실제 현장 적

용 시 충전층에서 발생하는 압력손실과 공간적 여건, 재생을 위한 작업성 등을 고려하여 최적 조건의 유량 및 흡착제 투입량을 결정할 필요가 있다.

포집한다고 가정할 때 200℃에서 2시간 처리해주는 것을 흡착제의 재생효율로서는 충분하지 않다고 볼 수 있다.

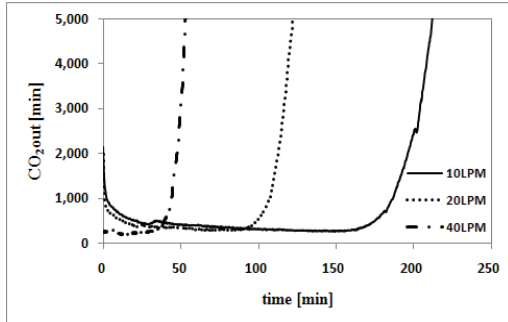


Fig. 5. Sorbent-A test with flow rate.

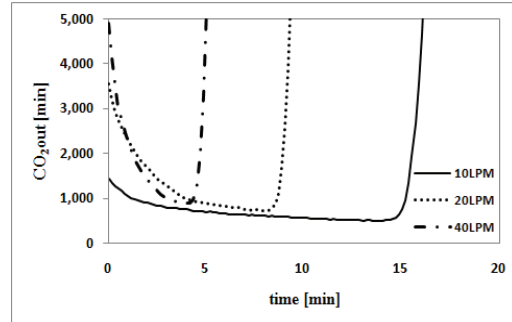


Fig. 7. CO₂ capture by refreshed sorbent of 13X-4 with flow rate. (1st regeneration(200℃, 2 hrs)).

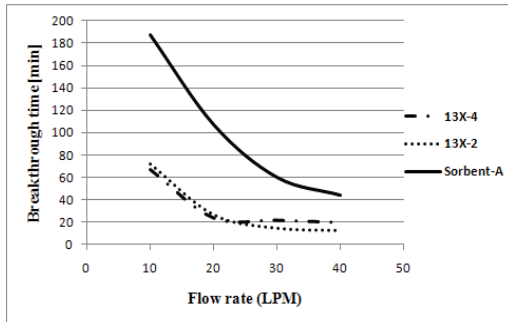


Fig. 6. Breakthrough time of test sorbents.

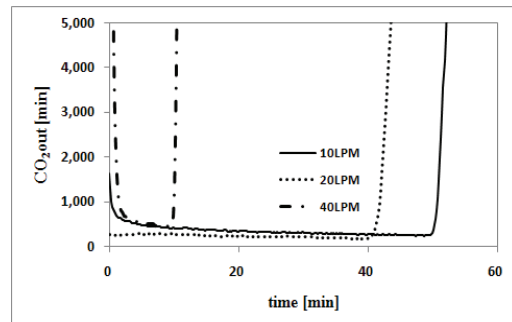


Fig. 8. CO₂ capture by refreshed sorbent of 13X-4 with flow rate. (2nd regeneration(400℃, 2hrs)).

3.3. 시험 흡착제의 재생연구

건식흡착공정의 가장 큰 장점 가운데 하나가 운전의 간편성과 우수한 재생성이다. 따라서 사용한 흡착제 입자의 재생성능을 평가하기 위하여 각 흡착제별로 세 가지 조건(1차-200℃, 2차-400℃, 3차-300℃)에서 각각 2시간동안 가열하며 재생시킨 후, 흡착시험을 반복하였다.

Fig. 7에서 9는 동일시료 13X-2 mm에 대하여 열 탈착법을 적용하여 반복적으로 재생시켜 배출가스 흡착 시험에 적용한 결과이다. 1차 재생은 200℃에서 수행하였으며, 유량에 따른 흡착유효시간 변화 형태는 신규 제품과 유사하였다. 결과에서 보듯이, 재생하기 전의 흡착제(Fig. 3 참조)와 마찬가지로 유량이 10 LPM일 때 과과시간이 가장 길었으며 40 LPM일 때 가장 짧았다. 그러나 신규 흡착제와 비교해보면, 과과시간이 3분의 1 이하로 감소되는 것을 알 수 있다. 결국 13X형태 제올라이트가 물리적 흡착을 위주로 CO₂ 분자를

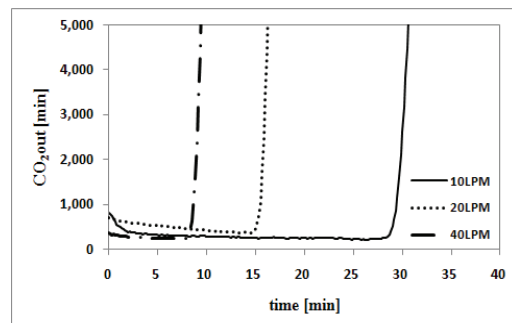


Fig. 9. CO₂ capture by refreshed sorbent of 13X-4 with flow rate. (3rd regeneration(300℃, 2hrs)).

흡착이 포화된 후, 다시 400℃에서 2 시간동안 가열하여 재생시켰으며, 흡착 시험한 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 이때 10 LPM의 경우 최고 50분 이상 흡착이 진행되는 것으로 미루어보아 200℃ 분위기에서의 재생보다 탈착효과가 우수한 것으로 나타났다. 다시 반복적인 재생을 300℃에 시행한 결과, 약 30분의 파과시간이 얻어졌다. 따라서 본 시료의 열 탈착 재생은 온도와 밀접한 관계가 있는 것으로 판명되었으며, 반복 가열에 의한 재생이 일정 부분 가능한 것을 사료된다.

Fig. 10은 각 재생 시료의 파과곡선으로부터 얻어진 유입유량별 파과시간 값을 비교한 결과이다. 400℃에서 재생시킨 시료의 경우 신규 흡착제 대비 80% 까지 근접하는 흡착성능을 보여주고 있다. 그러나 300℃에서 재생시킨 3차 시료는 각 유량에 따라 약간의 차이는 있지만 신규 흡착제 대비 약 50%정도의 흡착 성능을 유지하고 있음을 알 수 있다.

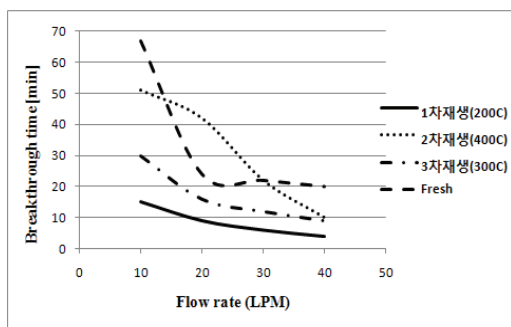


Fig. 10. Breakthrough time of CO₂ adsorption for regenerated sorbents.

본 연구는 현장적용을 가정한 실용화 연구결과로서 400℃ 이상의 온도는 경제성이 급격히 낮아질 것으로 판단되어 400℃를 최대 탈착·재생조건으로 선정하였다. 그러나 400℃ 이상의 고온에서 2시간 이내의 순간 탈착·재생조건이 가능하다면 추후 연구고찰의 의미가 있다고 사료된다. 또한, 400℃ 이상의 고온 처리에 따른 지속적인 열 충격에 의해 흡착제의 강도가 낮아지고, 현장 적용 시 마모 등에 의해 칼슘성분이 유실될 수 있지만, 본 연구에서 수행한 4회 반복시험 시 외관상의 특이한 결함이나 강도약화 등의 현상은 발견되지 않았다[11].

Fig. 11은 흡착능이 가장 우수한 Sorbent-A 시료에 대하여 유량이 20 LPM일 때 재생전의 흡

착제와 1차 재생한 시료제의 흡착 지속시간을 측정한 결과이다. 결과를 살펴보면, 재생하기 전 A사 흡착제는 CO₂ 유출 농도 1,000 ppm을 기준으로 CO₂ 파과시간이 107분으로 길었지만 1차재생 후 CO₂ 파과시간은 1분 미만으로 거의 재생효과가 없었다. 즉, A사 흡착제의 경우 CO₂에 대한 흡착효과의 성능은 우수하였지만 흡착제 표면 흡착점과 피흡착 가스분자의 화학적 상호인력으로 인하여 본 연구에서 제시한 TSA 탈착온도는 충분한 재생효과를 거둘 수 없음을 입증하였다[12].

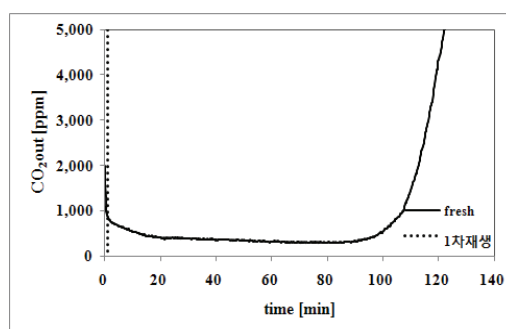


Fig. 11. Regeneration of Sorbent-A. (1st regeneration(200℃, 2 hrs)).

4. 결론

본 연구는 도시생활폐기물 소각장의 배출가스 중 이산화탄소(CO₂) 처리용 흡착제의 종류와 크기, 유량, 재생조건에 따른 CO₂ 포집성능을 시험 평가한 결과이다. 흡착제의 종류별 관찰 결과, A사의 CO₂ 흡착제가 흡착효율 면에서 우수한 성능을 보였다. 재생조건은 2차 재생조건(400℃, 2 hrs)에서 탈착이 효과적으로 이루어지고, 재흡착 효율이 높은 것으로 나타났다. 한편, 유량에 따른 흡착제의 효율은 상대적으로 유속이 낮은 10 LPM에서 가장 높게 나타났으며, 흡착파과시간 관찰로부터도 확인할 수 있었다. 이는 배출가스 유량에 따라 흡착반응기로 유입되는 CO₂의 절대량이 정해지며, 흡착제의 충전층 반응기 내에서의 기-고 접촉이 효과적으로 이루어지고 있다고 추정할 수 있다. 따라서, 이산화탄소(CO₂) 흡착제의 화학적 성분 개선 등의 지속적인 연구를 통하여 흡착 및 재생성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래도시철도기술개발사업(09 미래도시철도 A-01) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. R. Siriwardane, M. Shen, E. Fisher and J. Shamsi, Adsorption and Desorption on Solid Sorbents. *US Department of Energy*, (2001).
2. J. C. Kim, J. M. Kim, J. W. Park, S. G. Wang, G. Y. Lee, Y. M. Lee, C. H. Lee, S. H. Jeong and W. H. Hong, Carbon capture and storage. *Cheong moon gak*, 9, (2008).
3. Ministry of Environment, Management Condition of MSW Resource Recovery Facility. 1, (2010).
4. J. G. Yim, D. W. No, D. H. Yu, S. E. Kim and Y. H. Ahn, 3rd Korea Government Report Research by The Climatic Change. Korea Energy Economics Institute, 33, (2007).
5. IPCC, Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, p.5.25, (2000).
6. IPCC, 2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, p.5.5, (2006).
7. J. G. Yim, D. W. No, D. H. Yu, S. E. Kim and Y. H. Ahn, 3rd Korea Government Report Research by The Climatic Change. Korea Energy Economics Institute, p.31, (2007).
8. J. G. Yim, D. W. No, D. H. Yu, S. E. Kim and Y. H. Ahn, 3rd Korea Government Report Research by The Climatic Change. Korea Energy Economics Institute, p.83, (2007).
9. K. M. Lee and Y. M. Jo, Adsorption Characteristics of Chemically Modified Sorbents Carbon dioxide. *KSIEC*, **19(5)**, p.533 (2008).
10. K. M. Lee, Adsorption of indoor CO₂ by zeolitic sorbents. PhD dissertation, Kyung Hee university, (2010).
11. G. Bronitsky and R. Hamer, *American Autiguity*, **51(1)**, 89, (1986).
12. Y. H. Lim, K. M. Lee, H. S. Lee and Y. M. Jo, *KOSAE*, **26(3)**, 286, (2010).
13. S. S. Jo, Open Symposium in 2006, <http://www.cjs.or.kr/>. Accessed (2006).
14. Ministry of Environment, Guideline of Indoor Air Quality, <http://www.me.go.kr/>. Accessed (2003).
15. J. T. Kim, J. S. Lee, J. S. Hong, J. K. Suh, C. H. Lee, and J. M. Lee, *J. Kor. Ind. & Eng. Chem*, **13(4)**, 345 (2002).
16. K. Cheu, J. Nam, Y. Yun, and C. Soon, Fundamentals of adsorption, Proc. Int. Conf., D. LeVan (ed.) Kluwer Academic Pub., Boston, Massachusetts, p.203 (1996).
17. G. Calleja, A. Jimenez, J. Pau, L. Dominguez, and P. Perez, *Gas Separation & Purification*, **8(4)**, 247 (1994).
18. K. S. Walton, M. B. Abney, and M. Douglas LeVan, *Official Journal of the International Zeolite Association*, **91(1/3)**, 78 (2006).
19. M. Kubota, H. Yoshida, C. Kyaw, F. Watanabe, H. Matsuda, M. Hasatani, and A. Saji, *JICHE, Japan*, **31(3)**, 204 (2005).
20. K. Kamiuto, P. Ermalina, and K. Ihara, *Applied Energy*, **69(4)**, 285 (2001).