

활성탄소섬유상에서 전기변동법을 이용한 CO₂의 흡/탈착

심재운 · 문승현[†]

한국에너지기술연구원
305-343 대전시 유성구 장동 71-2
(2004년 12월 6일 접수, 2005년 3월 7일 채택)

Adsorption/desorption of CO₂ on Activated Carbon Fibers Using Electric Swing Adsorption

JaeWoon Shim and SeungHyun Moon[†]

Korea Institute of Energy Research, 71-2, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea
(Received 6 December 2004; accepted 7 March 2005)

요 약

혼합가스로부터 CO₂를 분리, 회수하기 위하여 활성탄소섬유를 흡착제로 사용한 전기변동흡착(electric swing adsorption, ESA) 공정의 타당성을 검토하였다. 활성탄소 섬유는 상압에서도 CO₂에 대해 빠른 흡착 속도를 보였으며, 비교적 짧은 흡착대와 긴 과과시간, 흡착제의 단위무게당 높은 흡착량을 나타내었다. 포화흡착된 흡착탑의 재생에서 비표면적이 큰 활성탄소섬유일수록 일정한 모양의 과과곡선을 유지하여 흡착-탈착의 재생사이클에 유리하였다. 진공탈착에 의한 흡착탑의 재생률은 64 cmHg의 압력에서도 64% 이상이었고, 전기탈착을 병행한 hybrid 재생단계에서는 17%의 추가적인 재생률을 보이며 7-8 Wh의 낮은 재생에너지에서도 높은 재생률을 보였다.

Abstract – An electric swing adsorption (ESA) process for recovering highly pure CO₂ from the mixed gases was tested. In this study, activated carbon fibers were used as an adsorbent. The activated carbon fibers showed fast adsorption rate and the high adsorption capacity for CO₂ adsorption under the condition of the ambient pressure. Activated carbon fiber with higher specific surface area was suitable to repeated adsorption-desorption cycle process, showing consistent breakthrough curve. Especially, the regeneration method by vacuum combined with ESA improved the performance of desorption process by an additional 17% regeneration efficiency compared to a vacuum only method, and showed the high regeneration efficiency at comparatively low 7-8 Wh energy.

Key words: Electric Swing Adsorption, Carbon Dioxide, Activated Carbon Fiber

1. 서 론

현재, 급속한 경제발전과 인구의 도시 집중화로 인해 발생하는 대량의 쓰레기는 소각과 함께 많은 양이 매립되고 있는데, 이로 인해 발생하는 매립가스(LFG: land fill gas)는 대기오염 유발 및 악취 발생 등의 문제점을 안고 있다. 특히, 매립가스의 주성분인 메탄가스와 이산화탄소는 매립가스 중 95% 이상을 차지하는데 온실효과를 유발하는 대표적인 가스로서 대기에 발산되거나 고온연소 되지 않을 경우 지구온난화의 주범이 된다. 또한, 지구상에서 가장 풍부하고 값싼 에너지인 화석연료의 사용은 필연적으로 이산화탄소를 발생시킨다. 따라서, 교토협약에 의한 온실가스의 저감은 물론, 이를 회수하여 메탄은 화석연료의 대체에너지로, 이산화탄소는 화학공업의 원료 등으로 자원화하려는 방법의 필요성이 대두되고 있다[1, 2].

이산화탄소를 분리, 회수하는 기술로는 흡수법, 증류법 등의 습식법과 막분리법 등의 건식법이 연구되고 있으나, 설비비와 운전비가 많이 소요되고, 제품 순도를 높이는데 한계가 있다는 단점이 있다. 반면, 흡착원리를 이용한 흡착공정은 적은 투자비와 에너지 비용, 적절한 흡착제의 선택에 의해 고순도의 제품을 얻을 수 있다는 장점이 있다[3, 4].

흡착공정의 흡착제로는 일반적으로 활성탄과 제올라이트 등이 사용되고 있는데, 최근에 대두되고 있는 섬유상 활성탄소섬유(ACF: activated carbon fibers)는 높은 비표면적과 표면에 규칙적으로 발달된 미세기공으로 인해 기존의 활성탄보다 빠른 흡착속도와 높은 흡착능을 보인다는 점에서 액상 혹은 기상 흡착공정에 새로운 흡착제로서 연구되고 있다[5-7].

기존의 PSA(pressure swing adsorption) 및 TSA(thermal swing adsorption) 공정은 가압, 흡착, 감압 및 탈착의 기본 4단계로 구성되는데, 흡착성분의 회수를 목적으로 진공 혹은 고온의 탈착가스를

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: shmoon@kier.re.kr

이용한다. 따라서, 탈착가스의 온도가 높고 진공압력비가 클수록 가스의 회수율과 순도가 증가하지만 에너지 소비가 증가한다는 문제점이 발생하므로, 변형된 여러 단계를 조합하여 이산화탄소의 순도와 회수율을 높여려는 연구도 진행되었다[8]. 한편, 전기를 이용한 ESA(electric swing adsorption) 공정은 전기전도성이며 발열체 특성을 가지는 흡착제를 직접 전기로 가열하므로, 고온의 비활성 가스로 흡착제를 가열하는 비간접방식에 비해 더 빠르고 에너지 소비를 감소시키는 장점을 갖고 있다고 할 수 있다.

본 연구에서는 대표적 온실가스인 이산화탄소를 고순도로 회수하는 흡착 공정에 활성탄소섬유를 흡착제로 이용하였으며, 순도와 회수율을 높이고자 기존의 흡착공정 중 탈착 단계에 전기를 이용한 ESA 방법을 적용하여 에너지 저소비형 흡착 공정으로서의 타당성을 검토하였다. 또한, 운전 조건에 따른 이산화탄소의 흡/탈착 능력과 흡착탑의 재생능 및 순도와 회수율을 높이기 위한 재생 조건도 도출하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. CO₂ 흡착 실험

실험에 사용된 흡착제는 일본 Osaka Gas사에서 제조된 pitch계 섬유상 활성탄(activated carbon fibers, ACF)으로, 비표면적과 기공 부피 등이 다른 네 종류의 것(이하 OG-A7, OG-A10, OG-A15, OG-A20)이다. ACF는 제공된 상태 그대로를 110 °C의 진공 건조 오븐에서 24시간 건조하여 흡착에 사용하였다. 이들 시료에 대한 특성을 Table 1에 나타내었다.

고정층 흡착 및 전기재생 장치는 Fig. 1에 나타내었다. 흡착탑은 내경 4 cm, 길이 18 cm인 유리관을 사용하였으며, 15-20 g의 활성탄소섬유를 충전밀도가 일정하도록 약 10-13.3 cm로 충전하였다. 흡착탑의 입구 및 출구 부분에 다공판을 설치하여 도입 기체가 충분히 분산되도록 하였으며, 흡착탑의 각 지점에서 온도구배를 측정하기 위하여 탑 상단에서부터 2.5 cm 간격으로 5개의 Thermocouple

Table 1. Properties of pitch-based ACFs

Item ACF	Surface area (m ² /g)	Total pore volume (cc/g)	Pore diameter (Å)
OG-A7	690	0.35	10.5
OG-A10	1,210	0.5	16.4
OG-A15	1,462	0.7	19.4
OG-A20	1,914	1.06	20.3

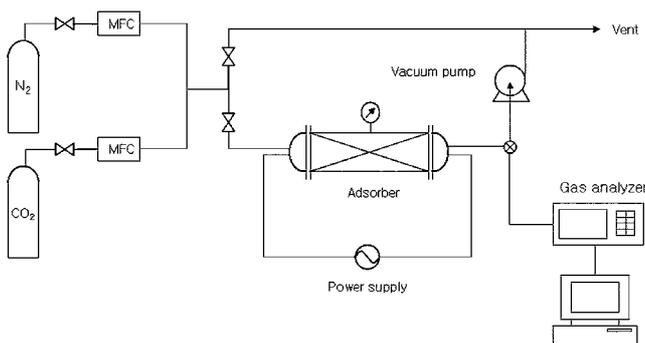


Fig. 1. Schematic diagram of ESA process.

를 설치하였다. 또한, 흡착탑의 입구 및 출구 부분에 활성탄소섬유를 지지하는 다공성 스테인리스 디스크에 전극을 설치하여 전기가 흐를 수 있도록 하였다.

흡착질로 사용된 CO₂ 가스는 순도 99.99%로, 질소를 balance로 하여 반응기에 유입되기 전에 혼합되어 원하는 농도로 조절되었다. 흡착 실험은 매립지 가스의 발생 조건을 고려하여 상온, 1 atm 하에서 0.7-1 lit/min의 유속으로 수행되었고, 입구 및 출구에서의 기체 농도는 가스분석기(Giemens Co. Ltd., ULTRAMAT6, Karlsruhe)에 의해 연속적으로 측정되었다.

2-2. 전기 탈착 실험(ESA)

흡착이 수행된 후의 흡착탑은 전기 재생 장치로 탈착되었다. 일반적으로 강흡착질인 CO₂의 회수를 위해서는 가압단계와 흡착 단계를 거쳐 공급물이 유입되고 감압단계를 거쳐 진공단계에서 CO₂가 회수되도록 공정이 구성되므로, 기존의 VSA(vacuum swing adsorption) 공정에 ESA(electric swing adsorption) 공정을 추가하도록 구성하였다. 즉, 포화 흡착된 흡착탑에 5-30V AC의 전기를 일정한 시간 동안 ACF에 흘려보내면서, 탑 출구에 연결된 진공 펌프(6 lit/min)를 이용하여 감압 탈착하여 CO₂를 회수하였다. 또한, 일정한 흡/탈착 주기를 반복하여 흡착탑의 재생 성능과 재생에너지에 대한 재생률도 함께 측정하였다.

3. 결과 및 토론

3-1. CO₂ 흡착

77 K에서 질소 흡착을 통해 측정한 활성탄소섬유의 구조적 특성을 Table 1에 요약하였다. 활성탄소섬유의 미세공의 특성 값들은 t-method에 의해 계산되었다. 활성탄소섬유의 미세공이 차지하는 총 표면적은 87-96%이었으며, 4종류의 활성탄소섬유 중 OG-A20이 가장 컸다. 평균기공지름의 크기도 OG-A20이 가장 컸으나, 네 종류의 활성탄소섬유 모두 14-24 Å 범위의 매우 작은 기공들로 전체 비표면적의 대부분이 미세기공에 의한 것임을 알 수 있다. Fig. 2는 4종류의 제공된 그대로의 활성탄소섬유를 이용하여 CO₂를 흡착시킨 결과로 실온, 1 atm 하에서 수행되었다. 활성탄과 마찬가지로 활성

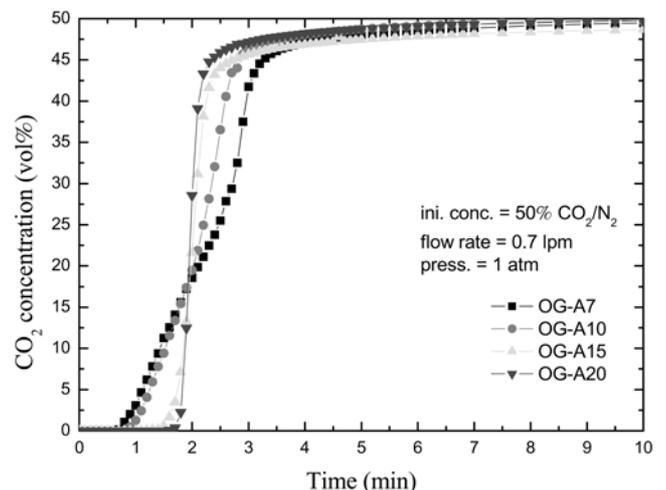


Fig. 2. Breakthrough curves of various as-received ACFs.

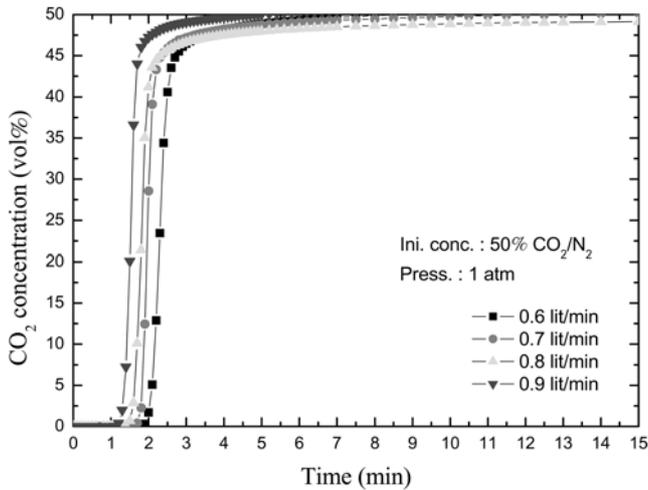


Fig. 3. Breakthrough curves of OG-A20 ACFs obtained with different flow rates.

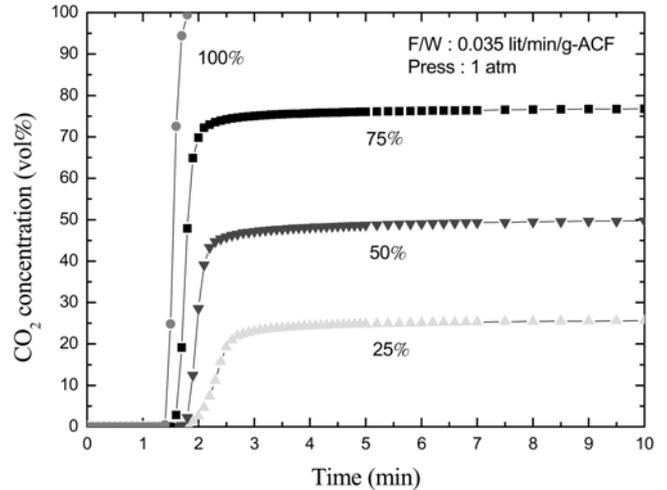


Fig. 4. Breakthrough curves of OG-A20 ACFs for different inlet CO₂ concentrations.

탄소섬유도 활성온도, 활성가스, 원료물질에 따라 다양한 세공구조와 비표면적을 갖게 되므로, CO₂의 흡착에 대한 흡착제의 구조적 성질이 미치는 영향을 보려고 한 것이다. Table 1의 결과를 보면 OG-A7에서 OG-A20로 갈수록 비표면적과 평균세공크기가 증가하고 있다는 것을 알 수 있는데, CO₂의 흡착결과도 ACF의 비표면적이 클수록 과과시간이 길어지고 기울기가 급격해져 흡착대가 짧아짐을 보여주고 있다. 비표면적이 상대적으로 작은 OG-A7, OG-A10의 경우에 과과곡선의 늘어짐 현상과 단위 흡착제에 대한 흡착량이 각각 42, 40 cc/g으로 OG-A15와 OG-A20의 39, 37 cc/g 보다 상대적으로 약간 높았다. 그러나 실제 흡착 공정상에서는 흡착상의 처리 시간이 늘어나게 되고, 같은 시간에서의 CO₂ 회수율과 회수된 CO₂의 순도가 낮아지기 때문에 비교적 과과시간이 길고 흡착대가 짧은 흡착제를 사용하는 것이 타당하다고 생각된다.

Fig. 3은 유속에 따른 과과시간을 조사하고자 50% CO₂/N₂를 유속을 달리하여 OG-A20에 흡착시킨 결과이다. 일반적으로 흡착질의 유입 유량이 높을수록 단위 시간당 처리량이 증가하므로 과과점은 빨리 나타나게 된다. OG-A20의 경우 ACF 중 가장 과과시간이 길고 흡착대가 짧은 것으로 나타났었는데, 유량에 따라 과과시간은 짧아지지만 과과곡선의 기울기는 거의 일정함을 볼 수 있다. 이때의 과과곡선을 정형농도분포를 가정하여 상대농도비가 유입농도의 95%가 되는 점에서의 시간을 취하여 계산된 흡착량은 약 37 cc/g으로 유속에 관계없이 거의 같았으며, 유입농도의 5%에서 구한 과과시간은 각 유속에 대해 78, 92, 106, 120초로 유속에 비례하였다. 흡착되는 분자가 대기공에서 미세기공으로 이어지는 2원적(bidispersion) 흡착경로를 갖는 흡착제의 경우, 경막과 확산 저항에 의해 탑내의 유속이 낮아질수록 흡착탑을 포화시키기 어렵기 때문에 과과곡선의 늘어짐 현상이 발생할 수 있는데[4], 본 실험의 결과는 이러한 현상이 나타나지 않았고, 탑내의 물질전달 저항이 매우 작다는 것을 재확인할 수 있었다. 또한, 활성탄소 섬유 미세공들이 외부에 직접 노출되어 있어 흡착질이 빨리 흡착될 수 있다는 조건 때문으로도 판단된다.

Fig. 4는 유입되는 CO₂ 농도에 따른 흡착 효과를 조사하고자 일정한 유속에서 CO₂의 농도를 달리하여 흡착시킨 결과이다. 흡착공 회학공학 제43권 제3호 2005년 6월

정은 흡착질의 농도차를 추진력으로 하는 확산현상이기 때문에, 흡착질의 유입농도가 높을수록 과과시간이 빨리 나타나게 된다. 즉, 일정한 온도에서 기체의 농도는 압력과 몰분율에 의해 결정되는데, 본 실험에서는 압력이 일정하므로 흡착탑의 과과시간은 CO₂의 몰분율에 의존하리라 예측된다. Fig. 4는 상압에서 CO₂의 유입농도를 25%, 50%, 75%, 100%로 달리하였을 때의 실험 결과를 나타낸 것이다. 예상한 대로 공급류의 농도가 증가할수록 기울기가 급격하고 과과점이 빨리 나타났다. 그러나 이때의 흡착량은 단위 흡착제에 대해 각각 70, 46, 37, 20 cc/g으로 CO₂의 농도가 감소할수록 감소하였다. 본 실험에서는 유속과 압력이 일정하므로 이 흡착량의 감소는 농도를 조절하기 위해 사용된 질소의 흡착에 의한 것으로 생각된다. 활성탄에 대한 압력에 따른 연소가스의 흡착등온 결과[8]를 보면, 질소의 흡착량이 고압보다는 상대적으로 낮은 압력에서 크기 때문이다.

3-2. ESA에 의한 CO₂ 탈착 및 재생

ACF에 대한 CO₂의 흡착은 발열반응이므로, 탈착은 흡착탑을 가열(TSA) 시킴으로써 이루어질 수 있다. ACF는 전구물질의 종류, 탄화 및 활성화 과정에 따라 일정한 범위의 전기전도도(electrical conductivity)를 갖게 되므로, 전력에 따른 흡착대의 승온속도를 조사함으로써 탈착시의 조업 시간과 최적 온도를 파악하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다. Fig. 5는 OG-A10 15 g을 18 cm의 길이로 채운 직경 4 cm의 흡착탑에 5-30 V AC의 전류를 흘렸을 때의 온도 변화를 측정된 결과이다. 30초에서의 각 전력에 대한 온도는 각각 27, 37, 55, 71, 137 °C로 전력이 높아질수록 ACFs의 온도가 증가하였으나, 승온속도는 전력에 비례하지 않았다. 또한, 일정한 전력에서의 온도 변화도 시간이 길어질수록 비선형적임을 알 수 있다. 이는 본 연구에서는 제시하지 않았으나 ACF의 저항이 온도에 따라 감소하기 때문이다[9]. 따라서, 이후의 탈착 조건은 흡착대의 온도가 80 °C를 넘지 않는 범위에서 수행되었다.

흡착탑을 CO₂로 포화 흡착시킨 후 진공, 혹은 진공과 전기를 병행(hybrid)하여 탈착시킨 결과를 Fig. 6에 보였다. 전기탈착시 전력은 15 V를 사용하여 탑내 온도가 80 °C가 넘지 않도록 하였고, 진

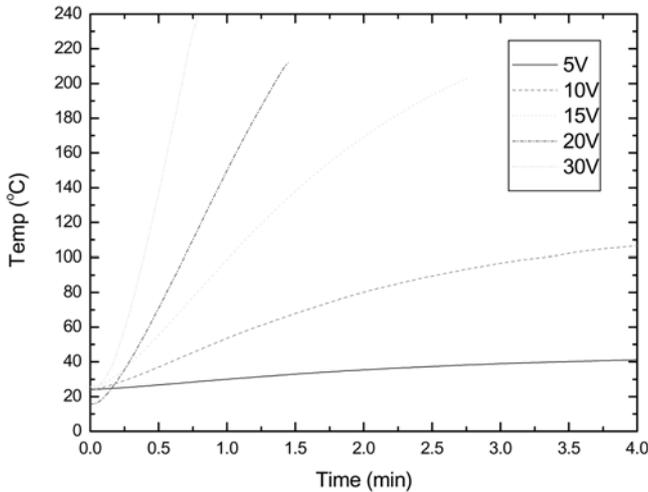


Fig. 5. Temperature profiles of ACFs as a function of applied voltages.

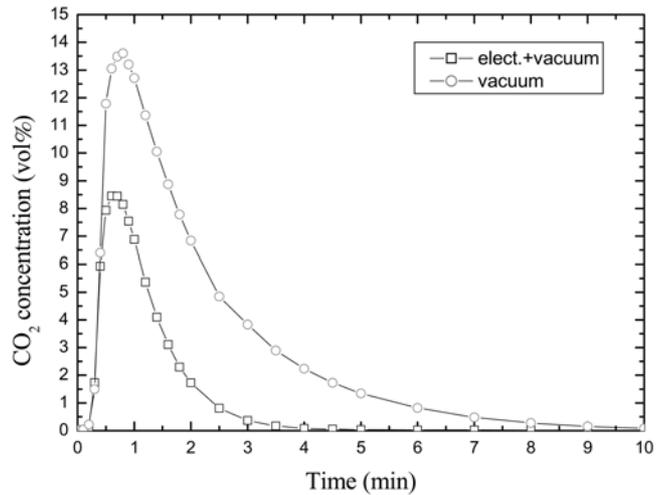


Fig. 7. Desorption profiles of residual CO₂ on ACFs after regeneration.

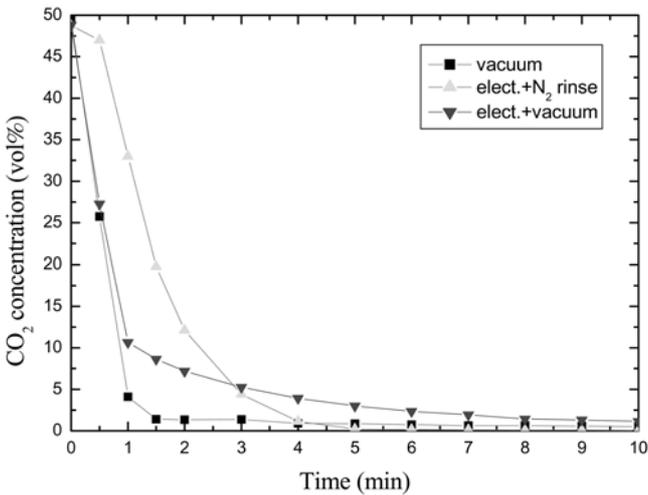


Fig. 6. Desorption profiles of CO₂ on ACFs.

공탈착시 진공펌프에 의해 감압되는 최대 압력은 60 cmHg이다. 또한, 전기 탈착시 TSA에 의한 탈착과 비교하기 위해 전기탈착에 1 lit/min의 질소를 세정기체로 사용한 결과도 보였다. 진공을 단독으로 사용하였을 경우의 탈착곡선은 급격한 농도 감소를 보이다가 시간이 경과해도 농도가 거의 일정한 결과를 보이므로, 진공탈착의 경우는 90초 정도에서 탈착이 완결되는 것으로 생각된다. 반면, 진공과 전기를 병행하였을 경우의 탈착곡선은 10% 농도까지 급격한 감소를 보인 후 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 경우 전기탈착에 의한 영향은 30초 정도에서 나타나는 것으로 보이며, 진공탈착과 비교해 탈착량이 크게 증가하였다는 것을 알 수 있다. 본 실험의 탈착공정 구성 중 탈착량이 가장 큰 경우는 전기와 질소를 세정기체로 사용하였을 때로, 상대적으로 완만한 탈착곡선을 보이며 5분 이내에 99% 이상 탈착이 이루어지는 것으로 보인다. 그러나 이 공정은 탈착률이 높은 반면 탈착으로 얻어진 생산물의 순도가 재생기체인 질소의 양에 따라 10% 이하로 낮아지는 문제점이 발생하므로, 본 연구 목적과 부합되지 않는다고 할 수 있다.

Fig. 7은 15분간 포화 흡착된 흡착탑을 진공 혹은 전기와 진공을 병행하여 재생한(Fig. 6의 경우) 후 고온의 질소(1 lit/min)로 세정하

면서 탑내에 잔존하는 CO₂의 농도를 측정된 결과이다. Fig. 6의 다양한 재생 방법에 따른 재생시간과 더불어 탈착량을 계산하여 재생 효율을 알아보려고 수행한 것이다. 결과에서 볼 수 있듯이 흡착탑을 재생한 후에도 탑내에 탈착되지 않은 일정량의 CO₂가 존재함을 확인할 수 있었다. 탈착곡선의 구간적분을 통해 계산된 재생 후 탑내에 잔존하는 CO₂의 양은 진공을 이용하였을 경우가 전기를 병행한 경우보다 3배 이상 높은 것으로 나타났다. 이 결과로부터 전기탈착을 병행함으로써 흡착탑의 탈착시간을 단축시키고 탈착량을 높여줄 수 있음을 확인할 수 있었다.

흡착탑의 주기적 재생능을 알아보려고 ACF에 CO₂를 15분간 포화 흡착시킨 후, 전기(15 V)와 진공탈착을 병행하여 흡착탑을 재생한 후 CO₂를 재흡착한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 재생을 거친 후의 과과곡선은 재생전과 마찬가지로 일정한 모양의 농도곡선을 유지하여 재생 후에도 비슷한 길이의 흡착대가 이용되고 있음을 보여주었다. 1차 재생된 흡착탑의 과과시간은 84초로 재생전 흡착탑

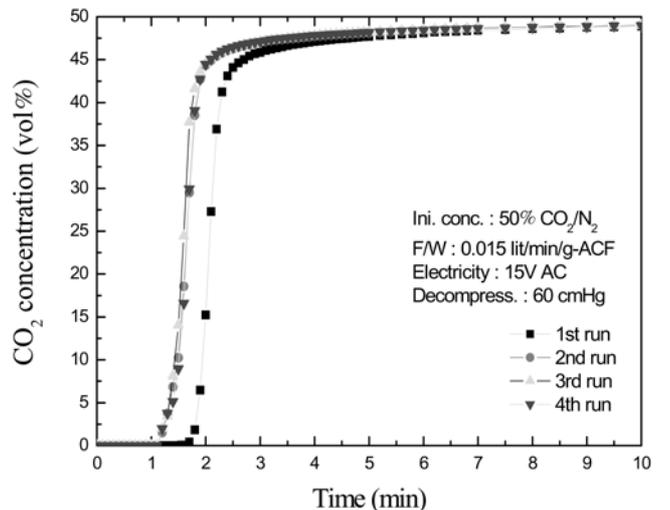


Fig. 8. Breakthrough curves of OG-A20 ACFs after regeneration by the combination of vacuum and electric process.

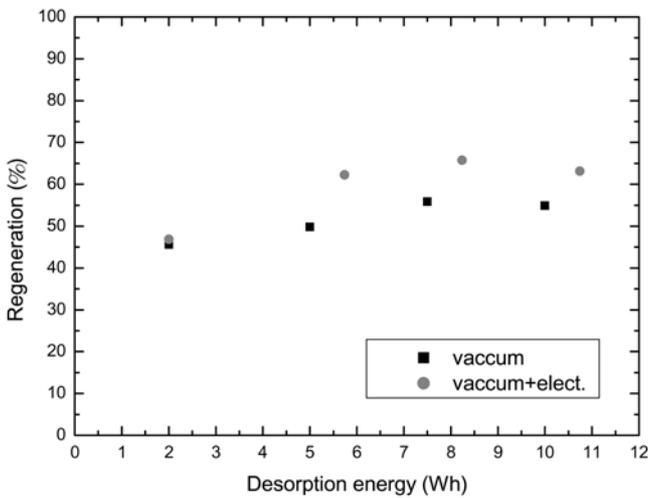


Fig. 9. Regeneration efficiency of ACFs as a function of the regeneration energy.

과 비교해 16% 정도 감소하였으나, 2차 및 3차의 반복적인 재생 후에도 흡착탑은 1차 재생시의 흡착능과 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 미세기공만으로 이루어진 ACF의 빠른 흡·탈착 속도에 의한 것으로 생각되며, 1차 재생 후 흡착효율의 감소는 활성탄소섬유 표면의 흡착점과 CO₂ 간의 흡착 친화력이 다르기 때문에 나타난 결과라 생각된다. 즉, 흡착 친화력이 강할수록 흡착된 가스를 탈착시키기 어렵기 때문에 본 실험의 탈착조건에서도 탈착되지 않는 CO₂에 대한 강흡착점이 활성탄소섬유에 일부 존재하는 것으로 사료된다.

흡착공정의 단계 중 탈착 단계에서 가장 에너지가 많이 소모되므로 동일한 조건하에서 에너지를 가장 적게 소모하면서 최대의 재생률을 갖는 최적 조건을 찾는 것이 매우 중요한데, Fig. 9는 진공 혹은 전기재생 방법에 의해 소모되는 재생 에너지를 변화시켜가면서 흡착탑의 재생률을 측정한 결과이다. 진공탈착의 경우 재생에너지가 증가할수록 재생률도 증가하였는데, 약 7.4 Wh 이상의 재생에너지에서는 최대 10% 정도의 재생률 상승효과가 있었으나 더 이상 재생률의 증가는 보이지 않았다. 따라서, 본 실험 조건에서의 최적 조건은 7.4 Wh로 보여지는데, 이는 동일한 펌프 용량에서 약 15분 정도 탈착 시간을 갖게 되므로 15분 이상의 진공탈착은 의미가 없다는 것을 의미한다. 진공과 전기(15 V) 탈착을 병행한 hybrid 공정의 경우도 진공 탈착의 경향과 마찬가지로 재생에너지가 증가할수록 재생률도 증가하였으나 약 8.4 Wh를 정점으로 재생률이 오히려 감소하는 경향을 보였고, 진공탈착 단독으로 사용하였을 경우보다는 15% 정도의 재생률 향상을 보였다. 이는 진공으로 10분 탈착과 2분의 전기 탈착 시간을 갖게 된다. Fig. 9의 결과는 진공 시간을 조절하여 얻은 결과로서 진공펌프가 가지는 최대 성능을 보여준 것이라 할 수 있다. 따라서, 진공펌프에 의해 도달되는 최대압력과 진공과정시 탈착의 시간차를 조정한다면 70% 이상의 재생률을 얻을 수 있을 것이라 생각된다.

Fig. 10은 진공과 전기를 병행한 hybrid 형태의 탈착에서 일정한 재생 온도를 유지하며, 다양한 전원을 공급하였을 때 흡착탑의 재생율에 관한 결과이다. 앞서 Fig. 5의 결과에서 언급하였듯이 공급된 전원이 높을수록 ACF의 승온속도가 빨라지므로, 재생 공정의 시간을 단축시킬 수 있기 때문이다. 결과는 흡착탑에 공급되는 전력

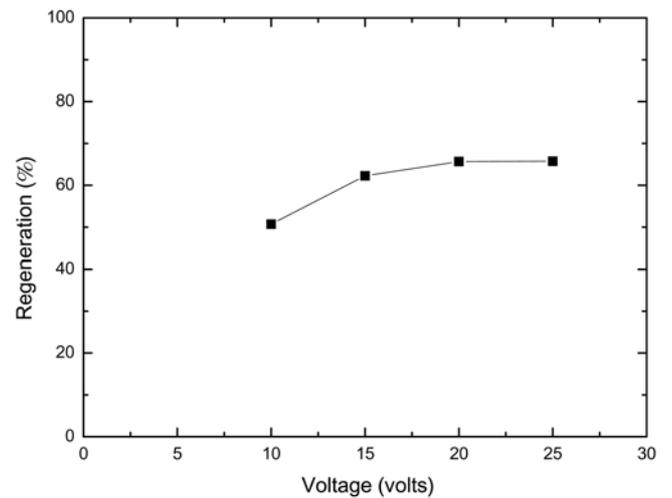


Fig. 10. Regeneration efficiency of ACFs as a function of the applied voltage.

이 높을수록 흡착탑의 재생률도 증가하다가 서서히 증가폭이 감소하는 것으로 나타났다. 즉 20 V 이상에서는 재생률의 증가폭도 거의 일정하므로 본 실험 조건에서는 20 V에서 최대의 재생 효과도 도출할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

대표적 온실가스인 CO₂를 분리, 회수하기 위하여 섬유상 활성탄을 이용한 PSA 공정에 ESA 공정을 추가 구성하고 각 공정을 비교, 분석하였다. 대상공정으로 삼은 공정들은 활성탄소섬유와 ESA 공정을 이용하므로써 흡착 및 재생 공정에서 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

활성탄소 섬유는 비교적 낮은 압력하에서도 CO₂에 대해 빠른 흡착 속도를 보였으며, 비교적 비표면적이 큰 흡착제일수록 짧은 흡착대와 긴 파과시간을 나타내었다. 흡착량과 파과시간은 공급 기체의 유속에 비례하였으며, 공급 기체의 농도가 높을수록 흡착량이 증가하였다.

활성탄소섬유에 다양한 전원을 통전시킨 결과, 공급된 전력이 높을수록 흡착탑 내의 온도가 급격히 상승하였으나, 탑내 온도가 증가할수록 승온속도가 직선성에서 벗어나 일정한 온도로 수렴하였다. 포화흡착된 흡착탑의 재생은 비표면적이 큰 활성탄소섬유 일수록 일정한 모양의 파과곡선을 유지하여 재생 후의 파과시간을 정확히 예측할 수 있었다.

진공탈착에 의해 재생된 흡착탑의 재생률은 64 cmHg의 압력에서도 64% 이상이었으며, 전기탈착을 병행한 hybrid 재생단계에서는 17%의 추가적인 재생률을 보였다. 또한, 흡착탑의 재생률은 진공탈착을 통해 흡착탑에서 최대로 얻을 수 있는 유량의 한계 때문에 재생에너지가 7-8 Wh일 때 최대값을 보였다.

감 사

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발사업인 이산화탄소저감 및 처리기술개발사업단의 연구비지원(M102KP010001-02K1601-03110)으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kim, M. S., "The Study on Applying Method for Developing Resources by Converting Land Fill Gas," *Environmental Technology*, **3**(2), 47-52(2003).
2. Lee, S. W., "The Trend of Developing Resources by Converting Land Fill Gas at inside and outside of the country," *Environmental Technology Information*, 15, KONETIC(2002).
3. Ruthven, D. M., Farooq, S. and Knaebel, K. S., *Pressure Swing Adsorption*, VCH, New York(1994).
4. Yang, R. T., *Gas Separation by Adsorption Process*, Butterworths, Boston(1987).
5. Ryu, S. K., "Porosity of Activated Carbon Fibers," *High Temperature-High Pressure*, **22**, 345-354(1990).
6. Quinn, D. F. and Macdonald, J. A., "Natural Gas Storage," *Carbon*, **30**(7), 1097-1103(1992).
7. Fung, AWP., "Raman Scattering and Electrical Conductivity in Highly Disordered Activated Carbon Fibres by Air Oxidation," *J. Mat. Res.*, **31**(7), 489-500(1993).
8. Kim, Y. C., Yeo, Y. K., Lee, H. U. and Song, H. K., "Simulation of PSA Process for CO₂ Recovery from Flue Gas," *HWAHAK KONGHAK*, **36**(4), 562-570(1998).
9. Nakayama, A., "Electronic and Magnetic Properties of Activated Carbon Fibers," *Bull. Chem. Jpn. Soc.*, **69**, 333-339(1996).