

다공성 탄소재료를 이용한 CO₂ 포집 및 CO₂/CH₄ 분리 기술

조세호 · 배병철 · 유혜련 · 이영석[†]

충남대학교 공과대학 정밀응용화학과
(2011년 7월 9일 접수)

Carbon Capture and CO₂/CH₄ Separation Technique Using Porous Carbon Materials

Se Ho Cho, Byong Chol Bai, Hye-Ryeon Yu, and Young-Seak Lee[†]

Department of Fine Chemical Engineering and Applied Chemistry, BK21-E²M, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea
(Received July 9, 2011)

온실가스로 인한 지구 온난화는 엘니뇨, 라니냐와 같은 심각한 기상이변을 초래하고 있으며, 매년 그 피해가 심각하게 증가하고 있는 실정이다. 따라서 온실가스의 80% 이상을 차지하고 있는 CO₂ 배출량을 감축하는 것이 매우 시급한 현안으로 부상되고 있다. 다공성 탄소는 고비표면적, 다양한 세공구조, 열 및 화학적 안정성, 재사용성과 같은 높은 유용성으로 인하여 carbon capture and storage (CCS) 기술에서 다른 여러 재료와 함께 중요한 위치를 차지하고 있는 재료이다. 본고에서는 주로 많이 연구되고 있는 CCS 기술 및 연구 동향에 대하여 살펴보았으며, 그 중 경제성과 실용성 흡착제로 각광을 받고 있는 다공성 탄소를 중심으로 배가스 중 CO₂ 흡착과 에너지 활용이 가능한 바이오 가스 분리에 대한 특성을 고찰하였다.

Due to the strong dependence on fossil fuels within the history of human progress, it leads to disaster of the whole world like flood, shortage of water and extinction of the species. In order to curb carbon dioxide emissions, many technologies are being developed. Among them, porous carbon materials have important advantages over other absorbent, such as high surface area, thermal and chemical resistance, low cost, various pore distribution and low energy requirement for their regeneration. Carbon capture and storage (CCS) has attracted the significant research efforts for reducing green house gas emission using several absorbent and process. Moreover, the absorbent are used for the separation of bio mass gas that contains methane which is considered a promising fuel as new green energy resource. In this review, we summarized the recent studies and trend about the porous carbon materials for CCS as well as separation from the biogas.

Keywords: CCS, carbon dioxide, methane, adsorption, gas separation

1. 서 론

인류가 불을 발견한 이래 산업혁명의 초석이 되는 증기기관과 같은 기술이 개발되면서 급속한 인류 역사의 발전을 가져왔다. 그러나 이러한 화석연료를 이용한 인류 중심적이고 편의적인 발전의 대가로 지구 온난화라는 결과가 초래되었다. 지구온난화란 CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆ 가스와 같은 온실가스의 대량 방출이 두터운 온실가스층 형성하여 지구 전체 온도가 상승되는 현상을 말하며, 이러한 온도 상승은 예측 할 수 없는 수많은 기후 변화를 가져오고 있다[1]. 위에서 언급한 6대 온실가스 중 CO₂의 지구온난화지수(Table 1)[2]는 매우 낮지만, 전체 온실가스 배출량 중 80% 이상 차지하고 있기 때문에, CO₂ 발생량을 낮추는 것은 온실가스를 줄이는 것과 같다. 하지만 CO₂는 그 구조적 특징으로 인하여 안정하기 때문에 다른 물질로 전환하기 위해서는 더 많은 에너지를 필요로 하므로 CO₂를 없애기 위하여 CO₂를 더 배출하는 역설적인 현상이 발생된다.

독일 재생가능에너지산업연구소(IWR, Table 2)[3]에 따르면 65개국을 대상으로 2008년 CO₂ 배출량은 총 315억 톤으로 2007년에 비하여 1.94% 증가한 것으로 나타났으며, 한국의 경우 배출량은 1990년 대비 150% 이상 증가한 6억 6350만 톤의 CO₂를 내뿜고 있는 실정이다. 국내외적으로 CO₂ 배출 증가율은 매우 심각한 상황이며, 이러한 세계적인 CO₂ 가스 배출의 증가 추세는 결국 지구 온난화 및 지속적인 이상 기후의 요인으로 작용하여 2030년에는 지구 평균 온도가 3 °C 가량 상승하는 것을 피할 수 없을 것이다. 그렇게 되면 엘니뇨현상에 의한 극단적인 기후는 일상이 되고, 지구의 생물 중 40% 이상 멸종과 40억 명에 달하는 인류가 심각한 물 부족과 기근의 상황에 직면하게 되어 인류 생존이 위협을 받는 처지에 이를 것이라 전망하고 있다.

현재 세계 각국은 “지구온난화를 방지할 수 있는 수준으로 온실가스의 농도 안정화”라는 목적으로 기후변화협약(UNFCCC)을 진행하였으며, 교토의정서(Kyoto Protocol), 코펜하겐협약(Copenhagen Accord), Post-2012협상 등과 같은 기후변화 협약을 통하여 지구온난화로 인한 인류 위협에 대한 문제의식을 고취하며 온난화가스 배출을 저감시키기 위하여 다양한 노력을 기울이고 있다. 이러한 국제정세에 발맞추어

[†] 교신저자(e-mail: youngslee@cnu.ac.kr)

Table 1. Global Warming Potential of Green House Gas

구 분	지구온난화 지수 (GWP)	주 발생원
CO ₂	1	산업공정, 자동차 등
CH ₄	23	폐기물, 농업, 축산업 등
N ₂ O	296	비료사용
CFCs	150~11700	각종 에어컨 냉매
PFCs	6500~9200	각종 에어컨 냉매
SF ₆	22200	각종 에어컨 냉매

Table 2. CO₂ Emission Data of Individual Countries (10⁵ ton)

순위	국가	2008년	1990년	증감률% (2008/1990)
1	China	6897	2452	178
2	America	6370	54610	17
3	Russia	1688	23690	-29
4	India	1485	6260	125
5	Japan	1392	11790	18
6	Germany	857	10290	-17
7	Korea	664	2570	158
8	Canada	658	4850	44
9	England	582	6250	-7
10	Iran	514	1990	158
세계 총 배출량	Earth	31500		

우리나라도 온난화가스 특히 CO₂ 저감을 위한 기술개발을 하고 있으나 아직 선진국에 비해 연구개발 예산이나 관련 기술 확보에 있어서 미흡한 실정이다.

CO₂ 저감 기술로는 예측기술, 에너지원 기술, 고효율화 기술, 사후처리 기술, 무공해 산업경제 육성 기술 등으로 분류할 수 있다. 이 중 사후처리기술인 CO₂ 포집 및 저장기술(carbon capture and storage; CCS)은 화석연료를 연소 전, 후 또는 처리하는 과정에서 다양한 분리법을 이용하여 발생하는 CO₂를 배기 전에 포집, 회수하여 전환 및 저장하는 기술로 대량의 CO₂를 저감할 수 있는 가장 경제적이고 효율적인 분리 기술로 최근 인식되고 있다. 이미 선진국에서는 CO₂ 저감 기술 선점을 위해 CCS 기술 개발에 많은 투자와 연구를 정부 기관 주도하에 진행하고 있으며, 최근 연구들은 혁신적인 저비용 CCS 기술 확보를 위해 집중하고 있다. 우리나라에서는 CO₂저감 및 처리기술개발 사업단에서 900백만 톤의 저감 가능한 에너지 이용효율 향상기술개발과 CCS 기술에 대한 핵심원천기술개발이 진행되고 있으나 아직 기술 수준이 낮아 많은 연구가 필요한 실정이다.

본고는 지구 온난화 가스의 85% 이상의 비중을 차지하는 CO₂ 포집을 위한 CCS기술의 전반적인 내용을 요약하고 그 중 경제성, 수급성, 적용성에 있어서 효용성이 큰 다공성 탄소재료를 이용한 연구 및 그 동향에 대하여 설명하였다. 또한 최근 신 재생에너지로서의 이용 가치가 높은 바이오가스 중 CH₄/CO₂ 분리 기술 및 현황에 대하여 다공성 탄소재료 중심으로 기술하였다.

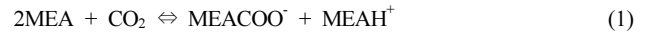
2. CO₂ 포집 및 분리 기술

배가스의 포집 기술은 CO₂를 분리하는 방법에 따라서 대용량 가스를 처리할 수 있는 흡수법(absorption)과 장치가 간단하고 조작이 용이한

막분리법(membrane), 재사용 및 자원회수가 가능한 흡착법(adsorption) 등에 대한 연구가 주를 이루고 있다.

2.1. 흡수법

흡수법에 있어서 화학흡수법은 가장 많이 사용되는 방법으로 CO₂와 화학반응이 가능한 아민계 흡수제인 monoethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA), methyl-diethanolamine (MDEA) 등을 이용하여 CO₂를 화학적으로 흡수시킨 후, 탈기 과정을 통해 CO₂를 회수하며, CO₂의 부분압이 낮은 경우에 유리하다. 일반적으로 MEA는 10~35% 농도로 물 등에 희석하여 사용하며, MEA와 CO₂의 화학흡수 반응은 식(1)과 같다[4,5].



반면 물리흡수법은 sulfolane, propylene carbonate, methanol 등과 같은 염기성 유기용매에 산성인 CO₂를 물리적으로 용해하여 흡수하는 방법이다. 이 방법은 높은 CO₂ 부분압, 온도, 산성도 등이 높은 조건에서 유리하고 에너지 소모 또한 화학흡수법에 비해 낮다는 장점이 있으나, 유기용매 제조, 공정 설치와 운영, 재생 등에 대한 경제성이 명확하지 않다[6].

2.2. 막분리법

CO₂ 분리 시 상변화가 필요치 않는 처리법으로 에너지 효율이 높고 환경 친화적이며, 공정 및 장치가 복잡하지 않아 초기 설비비 및 유지관리비가 적으며, 여타 분리 공정 및 장치와 함께 사용이 가능하여 처리용량 변동에 유연한 대응이 가능하다. PI, PPO와 같은 유기막이나, 금속 또는 세라믹을 이용한 무기막은 CO₂ 고순도화가 가능하며, 막 투과속도 및 가스선택성 향상과 모듈화에 의한 설비 규모 축소가 가능하고, 설비 조작도 우수한 편이다. 그러나 막분리법은 다른 분리법에 비해서 연구 기간이 짧으며, 일부 화학흡수법이나 흡착법에 비해 그 경제성에 대하여 의문을 제시하고 있다[7,8].

2.3. 흡착법

흡착법은 CO₂ 선별 흡착을 위하여 고 비표면적을 갖는 다공성 탄소나 Metal organic frameworks (MOFs), 제올라이트(Zeolite), 금속산화물 등과 같은 흡착제를 이용한다. 이러한 흡착제를 이용한 공정에는 CO₂ 흡착과 탈착을 압력변화만 이용하여 분리하는 pressure swing adsorption (PSA)과 일정 열을 가하여 흡착된 CO₂를 탈착시키는 thermal swing adsorption (TSA) 공정이 있다[9]. 일반적으로 고농도(30% 이상)의 CO₂를 분리하는 데 있어서 PSA법은 공정 사이클이 수초에서 길게는 수 분 사이로 짧고 에너지 소모도 작아 매우 경제적이기 때문에 잠재력이 매우 크다고 알려져 있다.

그러나 PSA 공정에서 흡착된 CO₂의 탈착 속도가 매우 느려 흡착제의 효율이 낮아지고 추가공정을 요한다. 그러므로 높은 탈착 속도와 공정 사이클을 높일 수 있는 높은 열전도성 및 열안정성을 갖는 고성능 흡착제의 개발이 PSA 공정에 있어서 시급한 문제이다[6].

3. 탄소재료를 이용한 CO₂ 포집

탄소재료는 탄소(carbon)를 주 원소로 하여 구성되어 있는 재료이지만 sp, sp², sp³의 혼성궤도형성에 의해 다양한 결합 형태를 가지며, 이러한 결합형태는 열전도성, 전기전도성, 내화학성, 고강성, 생체친

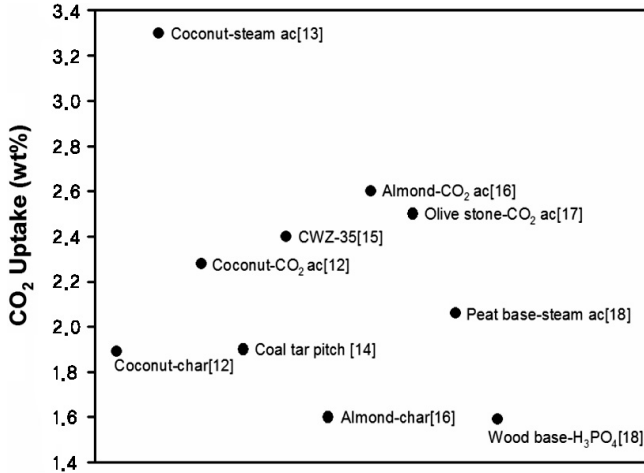
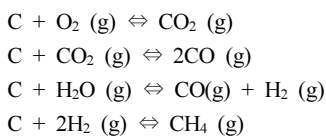


Figure 1. Comparison of adsorption capacity of the ACs with those of various adsorbents.

화성, 경량성과 같은 다양한 물리 화학적 특성을 보인다. 따라서 CCS 기술 분야를 비롯하여 에너지저장, 우주항공, 전기·전자, 원자력, 제철 및 제강, 환경 등의 광범한 분야에 연구 응용되고 있다. 또한 탄소재료를 이용한 기술 개발에 있어 활용 자원 종류와 그 양이 무한정이라 할 수 있다[10].

탄소재료 흡착제는 다공성의 탄소질 구조체로 다양한 크기의 세공 구조와 비표면적을 가지며, 분말상, 입상, 섬유상 등 여러 형태로도 제조된다. 이러한 구조체의 특성 및 형상은 흡착특성과 기계적 강도, 재사용을 위한 공정 등에 관계하기 때문에 이용에 따라 그 활용처가 구분된다.

CO₂ 포집에 유리한 세공구조를 위해 탄소재료는 500~1000 °C의 온도범위에서 CO₂, H₂O, KOH, ZnCl₂ 등과 같은 활성화제를 이용하여 미세공(micropore) 구조를 갖는 활성탄소로 제조되며, 가스 활성화 반응의 예는 아래와 같다.



이와 같은 반응은 탄소를 구성하고 있는 탄소기질-비결정성 혹은 비결정성과 결정성의 혼재의 발달 정도에 따라 가스화 반응성이 다르므로 그 기공 구조의 다양성을 초래한다[11].

3.1. 활성탄소

전술한 활성탄소는 흡착성, 경제성 등의 여러 장점으로 인하여 CO₂ 흡착을 위해 매우 적합한 흡착제로 받아들여 지고 있으며 관련된 연구가 오래 전부터 진행되어 왔다. Figure 1에 탄소재료 및 활성화에 따라 제조된 활성탄소의 CO₂ 흡착 연구 결과를 나타내었다. 293~303 K, 100 kPa의 조건에서 CO₂ 흡착을 측정 결과 1.6~3.3 mmol/g의 흡착량 보이는데 이는 탄소재료의 전구체에 따른 다양한 조직 구성과 활성화 방법 및 공정 조건의 차이로 인하여 각기 다른 기공특성과 기공부피를 갖기 때문이다. 아자각과 아몬드 경우 활성화를 하지 않고 600~1000 °C 범위의 탄소화 공정만 진행 하여도 1.8~2.4 mmol/g의 흡착량을 보인다. 이는 재료 내의 휘발성 물질이 특정온도에서 분해되어

Table 3. Effect of Burn Off Degree for CO₂ Adsorption on Almond Based AC[16]

종 류	CO ₂ 흡착량(wt%)	측정 조건
Almond burn-off	7	298 K, 100 kPa
Almond burn-off 20%	9	
Almond burn-off 40%	11	
Almond burn-off 50%	11.7	

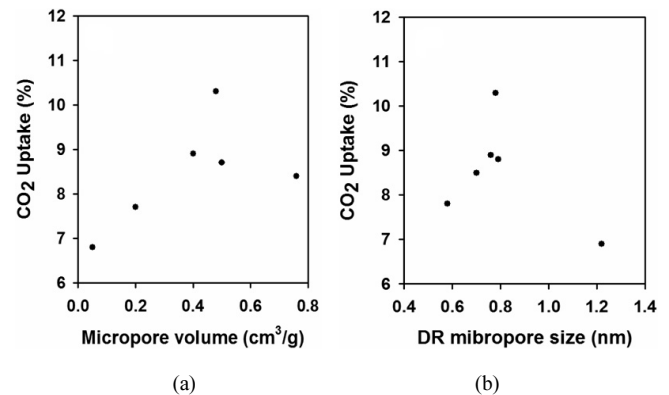


Figure 2. The relationships between CO₂ uptake and micro pore volume (a) and DR mean micro pore size (b) for carbon fiber composite molecular sieve[19].

빠져 나옴으로 인해 기공이 형성되었기 때문이며, 이때 고온에 의한 재료의 수축으로 적정 크기의 기공이 발달하기도 한다. 이런 특성은 식물 재료에서 주로 관찰되지만, 무연탄과 역청탄에서도 이와 같은 기공형성 특성을 보인다. 하지만 일반적으로 탄화과정만으로는 많은 기공을 만드는데 적합하지 않으므로 활성화제를 이용한 활성화가 필요하다.

활성화 단계는 기공크기 분포를 결정하는 중요한 단계이고 Figure 1, Table 3에 나타난 CO₂ 흡착량에서도 볼 수 있듯이 활성화 조건에 따른 흡착량이 다른 것을 확인 할 수 있는데, 이는 활성화에 따른 세공 발달의 정도가 상이하기 때문이다. 특히 활성화 시간과 온도에 의한 burn off 비율이 높을수록 탄소 재료에 있어서 active surface area (ASA)와 기공 발달에 영향을 끼친다. Burn off의 비율이 높을수록 CO₂ 흡수율이 높아지는 경향이 있지만, 흡착제의 경제적인 측면에서 볼 때 낮은 회수율은 비용의 증가를 야기하므로 적정 수율을 유지하는 선에서 CO₂ 흡착량을 증가시키는 연구가 필요하다. 기공구조에 따른 CO₂ 흡착량을 보면 Figure 2에서 알 수 있듯이 0.48 cc/g의 micropore volume을 가지는 재료에서 높은 흡착을 나타낸다. 또한 micropore size가 4~8 Å일 때 많은 흡착량을 보이는데 이는 CO₂의 kinetic diameter가 3.3 Å이기 때문에 표면에너지의 영향력을 많이 미치는 크기의 기공에 더 안정적으로 흡착되기 때문인 것으로 보인다. 결국 전체 pore volume 크기에 비례하는 것이 아니라 특정 micropore size에 대한 volume이 높을수록 흡착량이 증가되는 것임을 알 수 있다.

3.2. 탄소재료 기능기 부여에 따른 CO₂ 흡착량

CO₂ 흡착에 있어서 많은 연구들이 제올라이트나 MOFs와 같은 흡착제의 표면 관능기에 따른 CO₂ 흡착특성에 대한 보고를 내고 있다. 활성탄소 역시 그 자체로는 흡착능에 대한 한계성이 존재하기 때문에, 유효 흡착점을 증가시켜 NO_x, SO_x, 등의 유해 가스 흡착성능을 증가

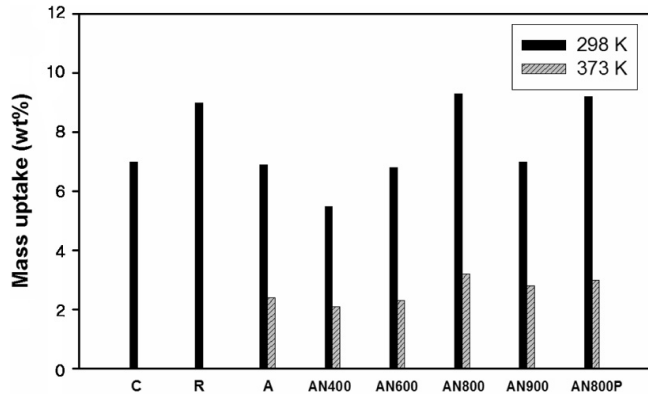


Figure 3. CO₂ capture capacity evaluated in a thermogravimetric analyzer at 1 bar.

시키고자 활성탄표면에 주로 산 및 염기의 수용액을 사용하여 표면 개질 하였다[20,21].

Zhang 등은 상업화된 활성탄소 표면에 존재하는 -OH, =O, -N group에 대한 CO₂ 흡착특성을 실험한 결과, 염기도가 증가할수록 CO₂ 흡착량이 증가하며, 암모니아수 처리에 의한 염기도 증가보다는 열처리에 의한 산소관능기 탈리로 인한 산성도 감소가 염기도 증가에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 H₂, N₂ 분위기하 열처리는 활성탄소에 존재하고 있던 산소 관능기가 주로 CO₂, CO, H₂O 형태로 제거되었음을 보여 주고 있다[22].

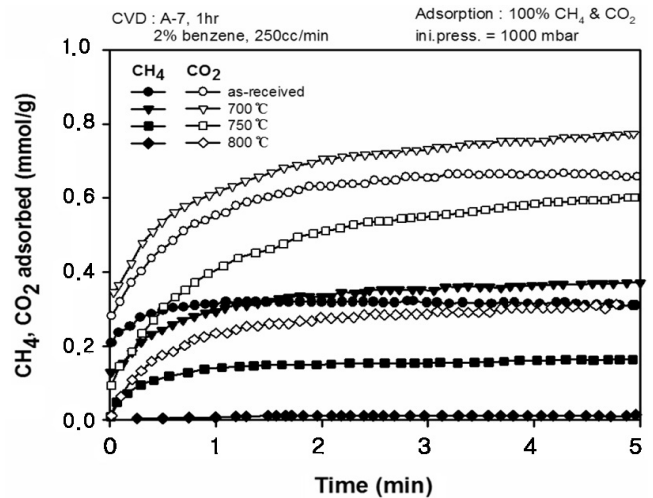
Figure 3에 아민기 도입에 따른 CO₂ 흡착특성을 나타내었다[16]. 암모니아 가스의 반응 온도가 증가할수록 N 함량과 염기도가 증가되었으며, 800 °C에서 처리한 경우 CO₂ 흡착량이 미처리 시료 대비 2 wt% 이상 증가하였다. 이는 N 증가에 따른 화학적 흡착특성과 열처리에 따른 기공 변화 등의 요인에 기인한다. 하지만 활성탄소재료에 있어서 CO₂ 흡착은 세공크기, 관능기 등에 대한 영향이 복합적으로 작용하므로 이와 관련된 연구가 더 필요한 실정이다.

4. 탄소재료를 이용한 바이오가스의 분리

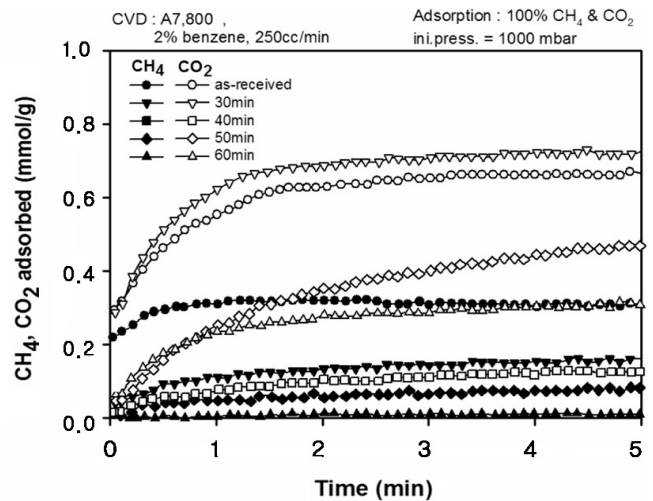
유기성 폐기물은 인간 사회에서 부득이하게 발생될 수밖에 없는 폐기물로서, 다른 폐기물보다 에너지화 가능성이 크고 추가적인 이산화탄소를 배출하지 않아 이를 자원화 할 경우 폐기물 처리와 대체 에너지의 생산이라는 두 가지 효과를 기대할 수 있어 최근 많은 관심을 받고 있다. 세계 여러 나라에서 유기성 폐기물의 자원화를 정책적으로 추진하고 있으며, 바이오가스 생산 효율 및 이용성 증대에 초점을 맞추고 있다. 최근 런던협약에 의해 2012년부터 유기성 폐기물의 해양투기를 전면 금지하는 법안이 시행 예정됨에 따라 유기성 폐기물의 에너지화에 대한 관심은 더욱 증대되고 있다. 따라서 생산된 바이오가스의 효율적인 활용방안을 모색하고 이를 극대화 할 수 있는 바이오가스 연료화에 대한 연구 개발이 필요한 상황이다.

4.1. 분리 원리 및 제조 방법

CMS (carbon molecular sieves)는 앞서 기술한 활성탄소와 유사하나 세공의 분포가 흡착하는 가스의 kinetic 직경에 가까운 수 Å 크기의 기공들이 균일하게 존재하는 특징이 있으며, 조절된 기공크기는 여타 MOFs, 제올라이트와 비교해 CO₂와 같은 판상분자 선택도가 높으며, 내흡수성과 열 및 화학반응에 대한 안전성이 높은 장점을 가진다[23].



(a)



(b)

Figure 4. Effect of CVD temperature (a) and time (b) for CH₄/CO₂ separation on porous carbon.

CMS 제조 방법은 일반적으로 탄소 전구체 분말에 유기 또는 무기질의 바인더를 이용하여 적정크기와 형태의 pellet으로 제조한 후 물리화학적 활성화를 통하여 기공을 형성한다. CO₂의 선택 흡착성을 향상시키기 위하여 전술한 활성화법을 비롯하여, 열분해법, 열팽창 및 수축법, 탄화수소(CxHy) 가스를 이용한 화학증착법(CVD) 등을 수행하여 CMS가 제조되며, 경우에 따라 공정의 순서가 바뀔 수 있다 [24,25]

4.2. 다공성 탄소 재료의 CO₂/CH₄ 분리 성능

바이오가스의 주성분인 CO₂, CH₄의 분리 효율을 높이기 위해서는 동역학적 분자 크기가 3.6 Å인 CH₄보다 더 작은 CO₂ (3.3 Å)의 흡착성을 높이는 것이 중요하다. 또한 CO₂ 흡착에 유리한 기공 직경분포를 가지면서도 해당 기공의 부피가 상대적으로 큰 기공 구조를 가지는 흡착제가 유리하다. 따라서 기공의 직경제어는 바이오가스의 분리에 있어 무엇보다도 중요하다[26]. CVD법은 탄화수소가스를 600 ~ 1000 °C 범위에서 단독 혹은 불활성 운반 가스와 함께 반응로에 주입시켜 열분해 된 탄소를 다공성 재료의 기공 벽에 증착함으로써 기공

의 직경을 제어하는 방법이다[24,25].

Figure 4는 CVD법으로 다공성 탄소재료의 기공을 제어하기 위하여 증착제인 벤젠의 열분해 온도 및 증착 시간에 따른 CO₂/CH₄가스분리 특성 결과를 나타낸 것이다[27]. 700~750 °C에 비해 800 °C에서 1 h 동안 증착된 시료는 CH₄ 흡착량이 0.3에서 0.05 mmol/g 수준으로 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 열 분해된 탄소가 온도가 증가할수록 확산 및 증착 속도가 상승하기 때문에 상대적인 세공크기가 좁혀지기 때문이다. 또한 800 °C에서 반응 시간이 증가할수록 CO₂/CH₄ 분리도가 증가함을 보이는데, 이는 반응 시간의 증가로 기공벽에 열분해 탄소의 증착이 상대적으로 증가하여 세공의 직경이 좁아졌기 때문이다. 상기 두 결과로 CMS의 기공 직경은 증착 온도와 시간의 변수로 제어가 가능하다는 것을 알 수 있으며, CMS와 같은 흡착제의 기공 직경 크기를 제어함으로써 서로 다른 kinetic 직경을 가지는 CH₄, CO₂ 분자의 분리성능이 효과적으로 작용하는지를 보여준다.

5. 결 론

본고에서는 최근 많이 연구되고 있는 CCS 기술 및 연구 동향에 대하여 살펴보았으며, 그 중 경제성과 실용성 측면에서 많은 각광을 받고 있는 다공성 흡착제를 중심으로 CO₂ 흡착을 비롯하여 신재생에너지 확보 및 활용을 위한 바이오가스 분리까지 다루었다. CO₂ 흡착을 위해서는 8 Å 수준의 직경이 발달된 기공과 기공형성을 위한 가스 활성화법에 대해 고찰하였으며, 흡착능 향상을 위한 N 관능기 도입이 CO₂ 흡착량 증가에 기인한다는 연구 등을 소개 하였다. 또한 최근 CO₂/CH₄ 분리용 흡착제 개발을 위한 연구들은 세공구조 조절에 대하여 주를 이루고 있다. 혼합가스에서 CO₂ 분별 흡착을 위해서는 8 Å 이하 바람직하게는 CO₂ 분자는 잘 흡착되고 다른 가스는 흡착되지 않는 4 Å 이하의 세공을 가지는 다공성 탄소재료를 저비용으로 개발해야 하는 것이 과제이며, 기존 상용화 혹은 개발 되고 있는 다공성 재료의 효율극대화(고부가 가치 창출, 기술력확보)에 대한 연구가 에너지 분야의 국가 경쟁력 향상을 위하여 시급하다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

- CO₂ emission from fuel combustion, IEA (2010).
- J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson, Climate change 2001 : The scientific basis, UK : Cambridge University Press, Cambridge (2001).
- Report of German Renewable Energy Research Institute (2009).
- J. Klemes, I. Bulatov, and Y. Cockerill, *Comput. Chem. Eng.*, **31**, 445 (2004).
- K. J. Oh, W. J. Choi, J. J. Lee, S. W. Cho, and B. H. Shon, *J. Korean Soc. Environ. Engrs.*, **23**, 1337 (2001).
- J. H. Wee, J. I. Kim, and K. S. Cho, *J. of KSEE*, **30**, 961 (2008).
- O. Yamamoto, T. Takkuma, and M. Kinouchi, *IEEE Electr. Insul. M.*, **18**, 32 (2002).
- M. T. Ho, G. Allinson, and D. E. Wiley, *Desalination*, **192**, 288 (2006).
- A. Arenillas, K. M. Smith, T. C. Drage, and C. E. Snape, *Fuel*, **84**, 2204 (2005).
- K. H. Kang, S. K. Kam, S. W. Lee, and M. G. Lee, *J. Environ. Sci.*, **16**, 1279 (2007).
- C. G. von Frederdorff and M. A. Elliott, Chemistry of Coal Utilization, Supplementary volume (H. H. Lowery, Ed.), 896, John Wiley & Sons, New York (1963).
- T. Burchell and R. R. Judkins, *Energ. Convers. Manage.*, **37**, 947 (1996).
- X. Dong, Z. Jun, L. Gang, P. Xiao, P. Webley, and Z. Yu-chun, *J. Fuel Chem. Technol.*, **39**, 169 (2011).
- C. Shen, C. A. Grande, P. Li, J. Yu, and A. E. Rodrigues, *Chem. Eng. J.*, **160**, 398 (2010).
- J. Przepiórski, M. Skrodzewicz, and A. W. Morawski, *App. Surf. Sci.*, **225**, 235 (2004).
- M. G. Plaza, C. Pevida, C. F. Martín, J. Feroso, J. J. Pis, and F. Rubiera, *Sep. Purif. Technol.*, **71**, 102 (2010).
- M. G. Plaza, S. Garcia, F. Rubiera, J. J. Pis, and C. Pevida, *Sep. Purif. Technol.*, **80**, 96 (2011).
- C. Pevida, M. G. Plaza, B. Arias, J. Feroso, F. Rubiera, and J. J. Pis, *Appl. Surf. Sci.*, **254**, 7165 (2008).
- H. An, B. Feng, and S. Su, *Int. J. Greenh. Gas Con.*, **5**, 16 (2011).
- T. Garcia, R. Murillo, D. Cazorla-Amoros, A. M. Mastral, and N. S. Li, *Carbon*, **42**, 1683 (2004).
- S. W. Lee, M. G. Lee, and S. B. Park, *J. Environ. Sci.*, **17**, 65 (2008).
- Z. Zhang, M. Xu, H. Wang, and Z. Li, *Chem. Eng. J.*, **160**, 571 (2010).
- P. L. Walker Jr., Chemistry and Physics of Carbon, Marcel Dekker, 2, 257, New York (1966).
- K. Miura, *Catal. Soc. Jpn.*, **41**, 25 (1999).
- S. K. Verma and P. L. Walker Jr., *Carbon*, **28**, 175 (1990).
- S. Villar Rodil, R. Navarrete, R. Denoyel, A. Albinia, J. I. Parades, A. Martinez Alonso, and J. M. D. Tascon, *Micropor. Mesopor. Mater.*, **77**, 109 (2005).
- S. H. Moom and J. W. Shin, *J. of KSEE*, **27**, 614 (2005).