

가스 흡착 및 분리공정용 활성탄소와 탄소분자체의 제조 및 응용

정서경* · 하성민* · 이영석*,**,†

*충남대학교 응용화학공학과, **충남대학교 탄소융복합기술연구소
(2022년 9월 7일 접수, 2022년 9월 26일 수정, 2022년 9월 27일 채택)

Manufacturing and Application of Activated Carbon and Carbon Molecular Sieves in Gas Adsorption and Separation Processes

Seo Gyeong Jeong*, Seongmin Ha* and Young-Seak Lee*,**,†

*Department of Applied Chemistry and Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea
**Institute of Carbon Fusion Technology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea
(Received September 7, 2022; Revised September 26, 2022; Accepted September 27, 2022)

초 록

온실가스의 회수 및 분리를 위한 다공성 물질로 활성탄소와 탄소분자체가 주목을 받아왔다. 균일한 기공을 가지는 탄소분자체는 특정 가스를 선택적으로 흡착할 수 있기 때문에 가스의 포집 및 분리에 사용되고 있다. 탄소분자체의 성능은 세공의 크기 및 균일성에 따라 좌우되는데, 이러한 탄소분자체의 미세 기공 제어를 위하여 표면을 일정한 두께로 코팅할 수 있는 화학기상증착법이 널리 사용되고 있다. 이 화학기상증착법은 탄소분자체 제조 시 기공의 크기를 제어하는데 사용될 수 있으나, 그 실험 변수가 다양하기 때문에 이에 대한 최적화가 필요하다. 따라서, 본 총설에서는 가스 흡착 및 분리공정용 활성탄소와 탄소분자체를 제조하기 위하여 여러 가지 활성화 공정, 화학기상증착법과 표면처리 등에 의한 기공 제어 기술들을 중심으로 다루고자 한다.

Abstract

Activated carbon (AC) and carbon molecular sieve (CMS) have attracted attention as porous materials for recovery and separation of greenhouse gases. The carbon molecular sieve having uniform pores is used for collecting and separating gases because it may selectively adsorb a specific gas. The size and uniformity of pores determine the performance of the CMS, and chemical vapor deposition (CVD) is widely used to coat the surface with a predetermined thickness in order to control the CMS's micropores. This CVD method can be used to control the size of pores in CMS manufacturing, but it must be optimized because of its various experimental variables. Therefore, in order to produce AC and CMS for gas adsorption and separation, this review focuses on various activation processes and pore control technologies by CVD and surface treatment.

Keywords: Carbon molecular sieves, Activated carbon, Gas adsorption, Separation, Chemical vapor deposition

1. 서 론

온실효과로 인한 기상 이변과 지구온난화는 현재 인류가 직면한 가장 큰 환경문제 중 하나이다. 산업혁명 이후 인류의 기술은 급속도로 성장하였고, 그에 따라 증가한 화석연료 사용과 폐기물 배출은 지구 온난화를 가속시키고 있다. 2018년 대한민국의 온실가스 총 배출량은 727.6백만 tCO₂e이며, 이 중 전기 등을 생산하는 에너지 산업에서 285.7백만톤으로 약 39.3%를 차지하고 있다[1]. 온실가스는 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등이 있으며 두터운 온실가스층을 형성하여 지

구 전체의 온도를 상승시킨다. 이로 인하여 해수면이 상승하고 엘니뇨, 라니냐와 같은 많은 기후변화를 야기하고 있다. 따라서, 철강, 화학, 에너지, 환경 사업 등에서 발생하는 온실가스를 분리정제하여 재 활용이 가능하고 경제적으로 사용할 수 있는 처리기술 개발이 요구되고 있어 활발한 연구가 진행되고 있다.

이러한 가스 분리 기술에는 저온 분리법, 화학 흡수법, 막 분리법, 압력 스윙 흡착법 등이 있으며[2], 그 중 압력 스윙 흡착법(pressure swing adsorption, PSA)은 흡착탑 내에 압력 변동을 이용하여 기체 물질을 분리하는 방법으로 고압에서 흡착을 시키고 저압에서 탈착 재생을 시켜 다른 방법에 비하여 유지 및 운전비용이 적게 들고 환경 친화적인 공정이다. 이러한 PSA 공정은 국내에서 널리 사용되고 있으나, 공정에 사용되는 탄소분자체 제조 기술 확보에 어려움이 있어 현재 전량 수입에 의존하고 있다. 압력 스윙 흡착법은 가스 분리뿐만 아니라 환경오염 방지, 에너지 회수 등 여러 분야에서 활용되고 있으며 그

† Corresponding Author: Chungnam National University
Department of Applied Chemistry and Chemical Engineering, Daejeon 34134, Republic of Korea
Tel: +82-42-821-7007 e-mail: youngslee@cnu.ac.kr

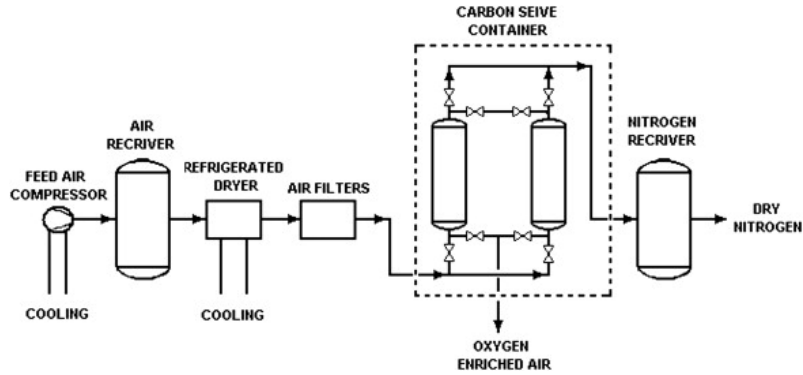


Figure 1. Schematic diagram of pressure swing adsorption system[47].

필요성이 대두되고 있어 고성능의 탄소분자체의 제조 기술 확립이 요구되고 있다.

탄소분자체는 선택적 흡착능을 지닌 미세 다공성 탄소질로, 세공경 분포가 좁아 기체를 선택적으로 분리 가능하다[3]. 탄소분자체는 셀룰로오스와 같은 탄소질 재료, 석탄, 탄소섬유, 수지 등을 원료로 하며 [4], 열분해 및 활성화 공정이 포함되어 있는 것이 활성탄소를 제조하는 법과 동일하다. 활성탄소는 미세공, 중간공, 거대공으로 구성된 넓은 비표면적을 지닌 다공성 물질이다. 이러한 활성탄소는 물리적 또는 화학적 활성화 공정으로 제조된다. 그러나 이러한 활성화 공정을 거쳐 제조된 활성탄소는 기공분포가 넓게 분포되어 분리 효율성이 떨어지고 선택적 분리는 불가능하므로 그대로 사용할 수 없다. 따라서 혼합가스의 선택적 분리 및 높은 효율의 분리를 위해서는 기공 제어, 표면 처리 등이 필요하게 된다. 목표 가스마다 흡착 최적 조건이 다르기 때문에, 목표 가스가 가장 흡착하기 좋은 기공 크기, 표면 특성에 따라 기공을 제어해야 한다. 이산화탄소의 경우 0.55~0.60 nm의 세공 크기가 흡착에 적합하다[5]. 수소의 경우 0.5~0.7 nm의 세공 크기가 가장 흡착하기 좋은 최적 크기이다[6].

따라서, 본 총설에서는 물리·화학적 방법으로 제조된 활성탄소로부터 가스 흡착 및 분리용 탄소분자체의 제조 및 그 응용을 중심으로 고찰하였다.

2. 혼합 가스 흡착 및 분리 공정

PSA는 순환적인 흡착 과정으로, 압력을 가하여 가스혼합물에서 특정 성분을 선택적으로 흡착하여 분리하는데 사용되는 방법이다[7]. 저온 고압의 상태에서 흡착이 이루어지고, 고온 저압에서 탈착이 이루어진다 [8]. PSA는 가열이나 냉각을 하지 않아 경제적이며, 설치와 운전이 간편하다는 장점이 있으나 다른 분리 기술과 다르게 항상 상태가 변화하기 때문에 운전변수들을 예측하기 힘들다[9,10].

Figure 1에는 PSA의 공정 모식도를 나타냈다. 공정에는 두 개 이상의 흡착탑이 이용되는데, PSA 공정은 흡착을 위해 승압시키는 가압, 원료기체가 유입되며 흡착체에 흡착되는 흡착, 흡착된 물질을 회수하는 감압, 탑 안에 남아있는 흡착제를 씻어주는 정화단계로 진행된다. 각 흡착탑이 흡착과 재생을 반복하며 한 흡착탑이 흡착을 진행하는 동안 나머지 흡착탑은 재생을 한다. 각 탑에는 다른 흡착제가 충전되어 있으며 흡착제의 종류, 흡착제 입자의 크기 및 기공의 분포 등도 공정의 주요 변수 중 하나이다[11,12,13]. 위의 공정에서 목표 가스에 따라 공정이 추가되거나 변형된다.

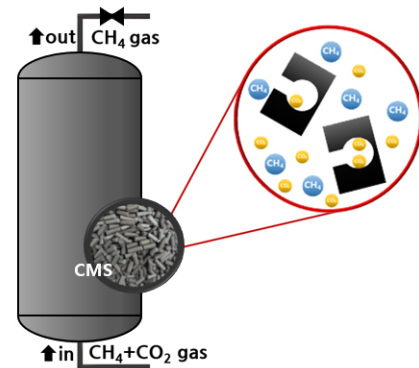


Figure 2. Schematic diagram of gas separation and adsorption of CMS.

PSA 공정에 사용되는 흡착제로는 제올라이트(Zeolite), 활성탄소(activated carbon, AC), 탄소분자체(carbon molecular sieve, CMS) 등이 있다. 그 중 탄소분자체는 기공의 크기가 일정하게 조절된 탄소질의 흡착제로, 기공의 크기보다 작은 분자들만 흡착하여 혼합가스에서 특정 가스를 분리할 수 있다. 이러한 PSA 공정은 국내에서 널리 사용되고 있으나, 탄소분자체 제조 기술 확보에 어려움이 있어 현재 전량 수입에 의존하고 있다. 압력 스윙 흡착법은 가스 분리뿐만 아니라 환경오염 방지, 에너지 회수 등 여러 분야에서 활용되고 있으며 그 필요성이 대두되고 있어 고성능의 탄소분자체의 제조 기술 확립이 요구되고 있다.

3. 활성탄소(AC)

활성탄소는 흡착성이 강하고, 대부분 탄소질로 구성되었으며, 다공성인 물질을 말한다. 갈탄, 무연탄, 목재 등을 원료로 하며 수산화칼륨(KOH), 수산화나트륨(NaOH)와 같은 활성화제로 처리한 뒤 건조시키거나, 수증기, 이산화탄소 등을 사용하여 활성화 공정을 거쳐 제조된다. 활성탄소는 분자 크기 정도의 미세기공이 잘 발달되어 큰 비표면적을 가지고 있으며, 활성탄소 표면의 관능기가 주변의 액체 및 기체 피흡착질에 인력을 가하여 분자를 흡착하는 성질이 있다[14]. 이러한 성질을 가지고 있어, 정화, 가스 분리, 수처리, 촉매 공정, 전기 화학 장치의 전극 재료 등 환경 및 산업 규모의 응용 분야에서 널리 사용되었다[15].

3.1. 활성탄소 제조 및 특성

활성탄소는 전처리 공정, 탄화공정, 활성화공정을 거쳐 제조된다. 전처리 공정은 시료를 분쇄한 뒤 수분과 점결성을 갖추도록 하는 공정이다. 점결제로는 전분, CMC (carboxy methyl cellulose), PVA (polyvinyl alcohol) 등이 있으며, 조립을 용이하게 하고 강도를 높이는 데 쓰인다. 탄화공정은 유기물을 열분해시켜 산소, 수소 등의 비탄소 성분을 줄이고 활성화를 용이하게 하기 위한 공정이다. 이 때 탄화 분위기는 질소, 아르곤과 같은 기체가 흐르는 비활성 상태여야 한다. 활성화공정은 탄화 된 시료에 기공을 형성하여 비표면적을 늘린다. 이러한 제조 공정을 마치고 난 후 세공은 일반적으로 IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) 규정에 의하여 크기별로 분류되는데, 2 nm 미만은 미세공(micropore)으로 활성탄소의 기상흡착용으로 사용되며, 2~50 nm는 중간공(mesopore), 50 nm 이상은 거대공(macropore)으로 중간공 및 거대공이 발달한 활성탄소는 액상 흡착용으로 사용된다. 이러한 활성탄소는 세공크기 별로 흡착특성이 달라 환경, 수처리, 탈취, 탈색, 정제, 촉매 분야에서 활용되고 있으며 최근에는 에너지 저장용 소재로서 연구되고 있다.

3.2. 물리·화학적 활성화

활성화 공정은 탄소 재료의 기공 형성을 위한 공정이며, 활성탄소의 성질을 결정하는 가장 중요한 공정이다. 활성화 온도, 활성화 시간, 활성화제 농도 및 사용량 등에 따라 기공의 형태가 달라질 수 있다.

물리적 활성화(physical activation)는 전구체를 탄화한 뒤 이산화탄소, 수증기, 산소 등을 이용하여 활성화를 2단계로 진행된다. 물리적 활성화법은 화학적 활성화법에 비하여 간단하며, 일반적으로 약 800~1100 °C 사이의 온도에서 진행되며 주로 고깔모양의 기공이 주로 형성된다. 또한, 별도의 환경 처리비용이 발생되지 않아 친환경적이고 비용적인 부분에서 유리하다. 다만 표면에서 불균일한 반응을 보이며 기공을 발달시키기 때문에, 화학적 활성화보다 수율이 낮은 단점을 가지고 있다[16]. 이산화탄소로 활성화를 진행하면, 이산화탄소 분자 크기의 좁은 미세공을 형성하며, 증기로 활성화를 진행하면 중간공을 형성한다[14].

화학적 활성화(chemical activation)는 탄소 전구체를 활성화제에 함침시킨 후 고온의 활성화로에서 열을 가한 뒤 이후 활성화제를 회수하는 방법으로 진행된다. 활성화제로는 인산(H₃PO₄), 수산화칼륨(KOH), 수산화나트륨(NaOH), 염화아연(ZnCl₂) 등의 산성 및 염기성 약품 등을 사용된다. 이러한 활성화제들은 메탄, 아세트산, 타르의 형성을 억제시키고 탄소의 수율을 증가시키는 탈수제 역할을 한다[17]. 일반적으로 400~800 °C 사이에서 진행되며 주로 병모양의 기공이 형성된다. 또한, 물리적 활성화보다 낮은 온도에서 공정을 진행할 수 있으며 균일한 기공을 형성하며 수율이 높은 장점이 있으나 활성화제를 회수하기 위한 공정이 추가적으로 필요하여 환경 처리 비용이 발생한다는 단점을 가지고 있다[18, 19]. 활성화제로 수산화칼륨을 사용하면 기공 직경이 2.0 nm 미만인 초미세기공을 개발한다[20].

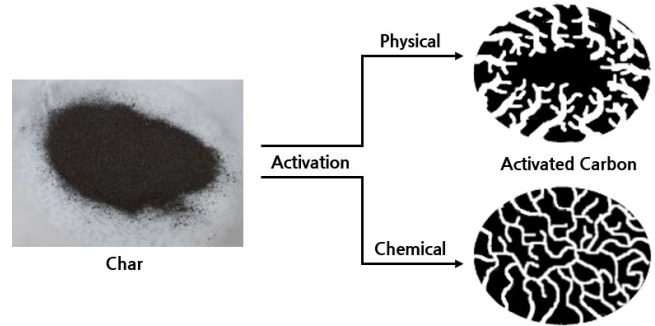


Figure 3. Schematic diagram of physical activation and chemical activation.

4. 탄소분자체(CMS)

탄소분자체는 높은 기체 흡착 및 선택성을 가진 다공성 흡착제 중 열적 안정성이 높고 산, 알칼리 반응에 안전하며, 높은 소수성을 가지고 있으며, 작고 미세한 기공을 지닌 활성탄소이다. 탄소분자체는 일반 활성탄소와 다르게 세공의 크기가 균일하며[21] 흡착 속도의 차이를 이용하여 특정 크기의 분자를 통과시켜 기체를 분리시킨다. 활용 분야로는 주로 가스 분리 및 회수, 제습, 제거 및 폐수 정화 등에 사용되며, 최근에는 연료전지, 리튬이온 2차 전지의 전극, 가스 센서의 재료로 활용하는 연구가 진행되고 있다.

4.1. 탄소분자체 제조 및 특성

현재 사용되고 있는 가스 흡착 및 분리 공정은 주로 고분자 분리막, 제올라이트 분자체, 탄소분자체를 이용한 분리 정제 공정이 많이 연구되고 있다. 고분자 분리막의 경우 온도에 영향을 많이 받으며 낮은 가스 투과속도로 인하여 실용화에 많은 문제점이 나타나고 있다. 또한, 제올라이트 분자체의 경우, 수분 흡착으로 인하여 가스 흡착능이 저하되며, 평형흡착에 의해서만 분리가 가능한 단점을 가지고 있다. 하지만, 탄소분자체는 주로 석유계 및 석탄계 피치, 바이오매스 등을 통하여 제조되며 선택적 흡착이 가능하고, 소수성 표면, 내열성, 내약품성 등 많은 장점을 가지고 있다. 탄소분자체 제조 기술은 크게 성형 기술, 탄화기술, 변형기술로 구분된다. 이 중 가장 중요한 기술은 일정한 세공경부피를 만드는 기술로서 탄소분자체의 성능은 세공의 크기 및 균일성에 따라 좌우된다. 이 때문에 활성화와 열분해만을 거쳐 탄소분자체를 제조한 연구 결과가 있으나[22], 대부분 탄소분자체 제조 시 기공 제어 공정이 추가로 진행된다. 이렇게 제조된 탄소분자체는 밀집한 세공경부피, 일정한 기공크기 및 작은 비표면적을 가지고 있어 활성탄소, 고분자 분리막, 제올라이트 등에 비하여 특정 분자를 선택적으로 흡착할 수 있다는 특징이 있으며 이를 Table 1에 비교하였다[23].

Table 1. Comparison of Adsorbents Used in PSA Process

	Particle density (g/cm ³)	Packed density (g/cm ³)	Pore volume (cc/g)	Surface area (m ² /g)	Surface diameter (Å)
CMS	0.9~1.1	0.55~0.65	0.5	100~500	4~7
AC	0.6~1.0	0.35~0.6	0.5~1.1	750~2000	12~20
Zeolite	0.9~1.3	0.6~0.75	0.4~0.6	400~750	4~10

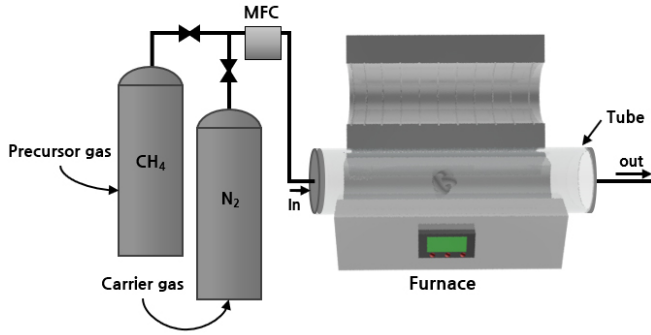


Figure 4. Schematic diagram of thermal CVD.

4.2. 탄소분자체의 기공 제어 및 기공 제어 후 표면 처리를 통한 흡착

탄소분자체의 균일한 기공 제어를 위해서는 대표적으로 높은 에너지를 가하여 벤젠, 메탄, 프로필렌 등의 증기 상태의 용액을 분해하여 표면에 증착시키는 화학기상증착법(chemical vapor deposition, CVD)이 있다. CVD는 기체 및 증기 상태의 화합물을 공급한 뒤 에너지를 가하여 기관과의 화학적 반응을 일으켜 기관 위에 박막층을 형성하는 공정이다. CVD는 비교적 간단하게 진행할 수 있는 공정이지만, 먼저 증착하고자 하는 재료가 증기화가 가능해야 하며, 증착시킬 원료 표면과 화학반응이 잘 일어나야 한다[24,25]. 증착 원료는 벤젠, 메탄과 같은 탄화수소를 이용하는데, 이 중 메탄은 낮은 독성과 낮은 가격으로 원료로 사용하기 적합하다[26]. 이 공정을 통하여 화합물이 탄소분자체 표면에 증착 할 때 기공의 입구 혹은 기공 내부 벽면에 침적하여 기공의 크기를 조절할 수 있다. Figure 5에는 CVD 공정을 통하여 어떻게 기공 크기 제어가 가능한지 나타내었다. 증기 상태의 탄화수소가 활성탄소가 있는 반응기 안으로 들어와 에너지를 받은 뒤, 분해되어 활성탄소 표면에 증착된다. 이때 표면에 증착되는 화합물은 Figure 5과 같이 기공 입구에 침적되는 것이 이상적이나, 기공 내부 벽면에 침적하여 기공의 비표면적이 줄어들어 흡착량이 감소하기도 한다. 기공의 입구의 크기를 줄이거나 내부 기공 사이즈를 줄여 특정한 크기의 분자만 통과할 수 있도록 하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이

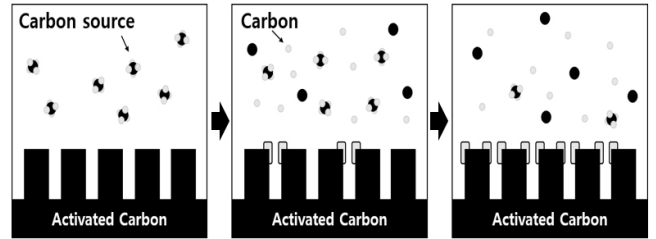


Figure 5. Pore size control Schematic by CVD treatment.

를 Table 2에 정리하였다. 분석란에 기입된 분석 결과는 원료보다 성능이 향상된 결과만 기입하였다.

P. J. M. Carrott 등[27]은 CVD 시간에 따른 CO₂, CH₄, O₂, N₂의 흡착량 변화 및 CO₂/CH₄, O₂/N₂ 선택비 변화를 확인하기 위하여 PET를 이용하여 만든 활성탄소섬유에 벤젠을 탄소전구체로 이용하여 800 °C에서 화학기상증착을 진행하였다. 증착 시간은 10분, 60분 두 조건으로 진행되었다. CVD를 진행한 탄소분자체의 흡착량은 전체적으로 감소하였으나, 10분간 CVD를 진행한 탄소분자체의 CO₂/CH₄ 선택도는 11, O₂/N₂의 선택도는 26으로, 제조한 활성탄소의 선택도 값보다 각각 18배, 7배 이상 높았다. 상용 CMS Takeda 3A와 비교하였을 때, 흡착 용량과 확산속도는 유사하였으나, 선택도가 떨어지는 것을 확인하였다.

H. Demiral 등[26]은 밤나무 껍질을 원료로 하여 활성탄소를 제조한 뒤, 메탄을 이용한 CVD를 진행하여, 메탄의 증착 온도와 시간, 주입 유속에 따른 N₂, CO₂ 와 CH₄의 흡착량을 확인하였다. 850°C에서 30분간 100 sccm의 유속으로 주입하였을 때, CO₂의 흡착량이 가장 컸다. 또한, 증착 전과 후의 탄소분자체의 표면을 분석하여 CVD를 진행할수록 탄소 함량이 증가하는 결과를 확인하였고, 탄소표면에 탄소가 축적된다고 판단하였다.

온실가스의 발생지 중 하나인 매립지에서 배출되는 가스 대부분은 CH₄와 CO₂로 이루어져 있어, 이 두 가스의 분리능이 뛰어난 탄소분자체를 개발하기 위한 연구들이 선행되고 있다. S. Moon 등[28]은 상용 활성탄에 CVD를 진행하여 세공경 조절 가능성과 영향을 분석하였다.

Table 2. Comparison of Deposition Conditions and Surface Properties of CMS

Pore control material	Deposition condition	V _t (cm ³ /g)	Analysis content (Increased)	Separation coefficient	Ref.
benzene	727 °C, 60 min	-	-	2.2 (CO ₂ /CH ₄)	[43]
methane	850 °C, 30 min	0.608	CO ₂ adsorption	-	[43]
toluene	800 °C, 2~60 min	-	CH ₄ adsorption	-	[44]
benzene	800 °C, 2 min	-	CO ₂ adsorption, CO ₂ /CH ₄ adsorption ratio	-	[44]
benzene	700 °C, 150 min	-	CO ₂ adsorption, CO ₂ /CH ₄ selectivity	CO ₂ /CH ₄ Selectivity 919.6	[30]
benzene	800 °C, 10 min	-	CO ₂ /CH ₄ , O ₂ /N ₂ Kinetic selectivity	CO ₂ /CH ₄ Kinetic selectivity 26 O ₂ /N ₂ Kinetic selectivity 11	[27]
methane	800 °C, 30 min	0.4607	Total pore volume	-	[46]
methane	800 °C, 70 min	0.2815	-	CO ₂ /H ₄ selectivity	[31]
methane	800 °C, 70 min	0.1186	CO ₂ /CH ₄ selectivity	CO ₂ /CH ₄ selectivity 20.8	[31]
methane	800 °C, 70 min	0.00885	CO ₂ /CH ₄ selectivity	-	[31]
methane	800 °C, 70min	0.00043	CO ₂ /CH ₄ selectivity	-	[31]
benzene	800 °C, 20 min	-	-	0.92(CO ₂ /CH ₄)	[32]
benzene	800 °C, 30 min	0.412	Micropore volume, CO ₂ /CH ₄ adsorption ratio	CO ₂ /CH ₄ Kinetic selectivity 16 O ₂ /N ₂ Kinetic selectivity 7.06	[33]

Table 3. Surface Characteristics of CMS according to CVD Deposition Temperature and Amount of C₆H₆ Injection

*Sample	S _{BET} (m ² /g)	V _{mic} (cm ³ /g)	Uptake value (cm ³ /g) at 60 s				S ₆₀	
			O ₂	N ₂	CO ₂	CH ₄	O ₂ /N ₂	CO ₂ /CH ₄
A250	1104	0.4067	12.43	11.74	29.8	9.11	1.06	3.27
C600	932	0.381	11.42	5.1	27.13	4.07	2.24	6.66
C700	847	0.394	11.42	2.46	24.03	2.04	4.52	11.8
C800	704	0.412	9.17	1.3	20.52	1.28	7.06	16
C900	621	0.294	3.82	1.13	11.69	1.01	3.39	11.55
C800/10	752	0.408	10.32	1.62	22.73	1.51	6.37	15.03
C800/20	734	0.41	9.75	1.44	21.32	1.38	6.77	15.42
C800/30	704	0.412	9.17	1.3	20.52	1.28	7.06	16
C800/40	681	0.412	8.84	1.26	19.36	1.21	7.02	16

*S₆₀: Selectivities at 60s *C_{ttt}/v_v : t = Deposition temperature (°C), v = %vol. C₆H₆ in N₂

700 °C에서 제조된 시료의 CO₂, CH₄ 흡착량은 CVD를 진행하지 않은 시료와 큰 차이가 없으며, 800 °C에서는 흡착량이 크게 감소하였다. 벤젠의 확산 및 증착 속도가 온도에 크게 의존한다고 판단하였다.

활성탄소섬유는 가스 흡착에 적합한 직경 2 nm 이하인 미세 기공을 가지고 있는데[29], 이것을 이용하여 CMS를 제조하려는 연구도 발표되었다. S. V. Rodil 등[30]은 활성탄소섬유의 기공 크기가 균일한 것을 이용하여 탄소분자체를 제조하고자 하였다. 원료는 폴리아라미드이며, 화학기상증착에 사용한 탄소전구체는 벤젠이다. 화학기상증착을 진행하지 않은 활성탄소 섬유의 CO₂/CH₄ 선택비는 2.2로, 벤젠 CVD를 750 °C에서 30분간 진행한 것의 CO₂/CH₄ 선택비는 2.4, 150분간 진행한 것의 CO₂/CH₄ 선택비는 919.6으로 가장 높았다. T. Orfanoudaki 등[22]은 활성탄소섬유에 플라즈마를 이용한 CVD를 진행하여 하여 기공의 크기를 제어하고자 하였다. C₂H₄/N₂, C₃H₆/N₂ 플라즈마를 80, 120 W에서 15분간 진행하였고, 아무 처리도 하지 않은 활성탄소섬유보다 CO₂/CH₄ 선택도가 크게 증가함을 확인하였다.

Y. Xu 등[31]은 콩 짚을 이용하여 제조한 활성탄소에 메탄을 탄소전구체로 하여 CVD를 진행하였다. 증착 온도는 800 °C, 증착 시간은 70분으로 주입 유량은 10, 20, 30, 40 mL/min 으로 진행하였다. 이 중 유량이 30 mL/min 으로 진행된 탄소분자체의 CO₂/CH₄ 분리능은 20.8로 가장 높은 값을 가졌다. 증착 온도, 증착 시간, 메탄 유량이 증가할수록 기공 부피와 평균 세공경 넓이를 감소시키는 것을 확인하였다.

U. Morali 등[5]은 해바라기 씨앗으로 제조한 활성탄소에 메탄을 탄소전구체로 하여 화학기상증착을 진행하였다. 실험 변수는 온도, 증착 시간, 메탄의 주입 유량으로 진행하였으며, 850 °C에서 45분간 100 mL/min의 속도로 메탄을 주입한 것의 CO₂ 흡착량이 화학기상증착처리를 한 활성탄소 중 가장 높았다. 그 중 두 탄소분자체의 세공경분포를 비교하였을 때 0.55–0.60 nm 크기의 기공이 273 K/1bar에서 CO₂ 흡착에 이상적임을 확인하였다.

D. Adinata 등[32]은 팜껍질로 활성탄소를 제조한 뒤, 화학기상증착을 진행하였다. 탄소전구체인 벤젠의 속도 유량을 각각 3, 10, 15 mL/min, 벤젠 주입 시간을 각각 10, 40, 60분, 증착 온도를 각각 600, 700, 800, 900, 1000 °C에서 진행하였고, 벤젠 주입 유량 6 mL/min, 벤젠 입 시간 20분, 증착 온도 800 °C의 조건에서 CO₂/CH₄ 와 O₂/N₂ 선택비가 가장 높은 값을 가졌다. M. A. Ahmad 등[33]은 팜껍질을 이용하여 만든 활성탄소에 온도 별 및 질소 대비 벤젠 주입유량 비율을 조절하여 CVD를 진행한 뒤, O₂, N₂, CO₂, CH₄의 흡착 부피와 흡착비

를 확인하였다. 활성탄소의 비표면적은 1104 m²/g, 미세기공부피가 0.4067 cm³/g이었으며, 25 °C, 360 mmHg에서 60초간 흡착한 CO₂의 흡착량은 29.8 cm³/g, CH₄의 흡착량은 9.11 cm³/g으로 CO₂/CH₄ 흡착비는 3.27이었다. 증착 온도가 높을수록, 벤젠 주입비가 높을수록 흡착능이 감소하였으나, 증착 온도가 800 °C 일 때, CO₂/CH₄ 흡착비는 16으로, 600 °C에서 CVD를 진행한 탄소분자체의 CO₂/CH₄ 흡착비는 6.66으로 약 두 배 높았다. 벤젠 주입량이 많을수록 O₂/N₂, CO₂/CH₄ 흡착비가 상승했으나, 값의 큰 변화가 없어 그 영향이 그리 크지 않음을 확인하였다. 이 연구의 결과를 Table 3에 정리하였다.

J. Zhang 등[34]은 무연탄을 원료로 하여 제조한 활성탄소에 벤젠을 탄소전구체를 이용하여 CVD를 진행하였다. CVD는 벤젠 주입 속도, 증착 시간, 증착 온도 중 하나를 독립 변인으로, 나머지 둘을 통제 변인으로 하여 진행하였다. 이 중 벤젠 주입 속도가 4 mL/min, 증착 시간 60분, 증착 온도 750 °C의 조건에서 CVD를 진행한 탄소분자체의 N₂ 흡착량이 0.56 mmol/g, CH₄의 흡착량이 1.41 mmol/g, CH₄/N₂ 흡착비는 4.74로 가장 높은 값을 얻었다. 실험 결과, CH₄/N₂ 흡착비는 벤젠 주입 속도, 증착 시간, 증착 온도에 크게 영향을 받는 것을 확인하였다.

이 외에 탄소물질의 표면특성은 흡착용량 및 흡착 속도에 영향을 끼치는 중요한 요인 중 하나로, 수용액의 무기화합물 흡착의 경우 흡착제의 표면적이나 기공 형태뿐만 아니라 표면 작용기의 특성에 더 큰 영향을 미치기도 한다[35]. 이러한 표면 특성의 변화에 따른 가스 흡착능 증가에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 탄소물질의 표면에 산소작용기가 많을수록 표면 극성이 높아지고 흡착대상과 더 많은 수소결합이 발생하여 흡착용량이 향상되며[36], 표면의 Ni, Cu 원소는 CO₂의 흡착능이 향상되는 연구 결과들이 존재한다[37]. 이러한 표면처리 방법에는 액상산화, 금속 도금, 기상 불소화 및 플라즈마 표면 처리 등이 있으며 이를 통하여 표면의 원소 조성과 산도, 결정 구조를 변화시키며, 젖음성을 개선할 수 있다. 이처럼 다양한 표면처리 방법을 이용하여 관능기를 도입하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

E. Moradi 등[38]은 활성탄소를 5 mM 질산 니켈 용액에 1~5 시간 동안 진공 함침시켜 니켈 원소를 도핑하였다. 도핑 전 활성탄소의 비표면적이 가장 크고 함침 시간이 길수록 비표면적이 감소하였으나, 5 시간 함침을 진행한 활성탄소의 수소 흡착량이 아무 처리도 하지 않은 시료보다 높음을 확인하였다. S. J. Son 등[39]은 금속 원소를 도핑하여 금속 원소가 벤젠 분해 촉매로서 어떻게 작용하는지 확인하고자

Table 4. Gas Adsorption and Separation Capacity of Element-doped CMS

Method	Element	Analysis content		Ref.
		Increase	Decrease	
Impregnation	Ni	H ₂ adsorption	BET SSA	[38]
Impregnation	Ca	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ , O ₂ gas adsorption, CO ₂ /CH ₄ uptake ratio	CO ₂ /N ₂ uptake ratio	[39]
Impregnation	Mg	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ , O ₂ gas adsorption, CO ₂ /CH ₄ uptake ratio	CO ₂ /N ₂ uptake ratio	[39]
Impregnation	Cu	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ , O ₂ gas adsorption, CO ₂ /CH ₄ , CO ₂ /N ₂ uptake ratio	-	[39]
Impregnation	Co	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ , O ₂ gas adsorption, CO ₂ /CH ₄ uptake ratio	CO ₂ /N ₂ uptake ratio	[39]
Impregnation	Ni	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ , O ₂ gas adsorption, CO ₂ /CH ₄ uptake ratio	CO ₂ /N ₂ uptake ratio	[39]
Plasma	CH ₄	CH ₄ , N ₂ gas adsorption, BET SSA	Pore volume	[41]
Plasma	N ₂	CH ₄ , N ₂ gas adsorption, BET SSA	Pore volume	[41]
Oxyfluorination	F ₂ , O ₂	CO ₂ adsorption	-	[40]

하였다. 칼슘, 마그네슘, 구리, 코발트, 니켈을 도핑하기 위해 1%수용액을 만들어 아자각 숯을 함침시킨 뒤, 탄화한 뒤 벤젠을 탄소전구체로 하는 화학기상증착을 진행하였다. 코발트 도핑 후 60분간 화학기상증착을 진행한 탄소분자체를 제외한 금속 원소를 도입한 탄소분자체들은 CO₂ 흡착량이 증가하였으나, 코발트를 도핑한 후 60분간 화학기상증착을 진행한 탄소분자체의 CO₂/CH₄ 흡착비는 400 이상, O₂/N₂의 흡착비는 22로 가장 큰 흡착비를 가졌다.

M. Hemmat 등[40]은 복숭아씨와 콜타르 피치를 혼합하여 원료로 하여 탄소분자체를 제조하고자 하였다. 먼저 복숭아씨앗 숯과 콜타르 피치 혼합물을 코발트와 니켈 1 wt% 수용액에 72시간 함침 후 800 °C에서 이산화탄소로 활성화를 진행하였다. 이후 벤젠을 이용하여 700 °C에서 60분간 화학기상증착을 진행하였다. 금속 원소 도입을 하지 않은 탄소분자체의 CO₂의 흡착량은 80.46 mg/g, CO₂/N₂ 흡착비는 18.1이며, 코발트 원소 함침을 진행한 탄소분자체의 CO₂의 흡착량은 54.79 mg/g, CO₂/N₂ 흡착비는 28.9, 니켈 원소 함침을 진행한 탄소분자체의 CO₂의 흡착량은 79.5 mg/g, CO₂/N₂ 흡착비는 22.3로 CO₂의 흡착량은 감소하였으나 흡착능이 증가하였다.

Z. Yang 등[41]은 함침법을 이용하여 석탄계 탄소분자체에 테트라코세인과, 도데실 황산나트륨과, 폴리에틸렌아민을 100 ml당 1 g의 비율로 각각 함침시켰고, CH₄와 N₂ 플라즈마 표면처리를 1분씩 다섯 번 반복 진행하여 CH₄와 N₂를 도핑한 뒤 표면 특성을 분석하였다. N₂ 플라즈마를 진행한 탄소분자체의 비표면적 값과 미세기공의 값이 가장 컸으며, 도데실 황산나트륨으로 함침을 진행한 것의 CH₄/N₂의 분리능이 가장 좋았다.

S. Cho 등[42]은 상용 탄소분자체에 함산소불소화를 진행하여 불소 및 산소 원자의 도입에 의한 이산화탄소의 흡착량 변화를 확인하고자 하였다. 불소 가스의 부분 압력이 증가할 수록 불소 함량이 증가하였다. 불소와 산소를 7:3으로 하여 함산소불소화 처리를 진행한 시료와 아무 처리도 하지 않은 시료의 이산화탄소 흡착량을 온도별로 비교하였다. 불소 처리한 탄소분자체의 이산화탄소 흡착량은 80 °C에서 측정하였을 때 아무 처리도 하지 않은 시료의 흡착량과 큰 차이가 없으며, 25 °C에서 측정하였을 때는 아무 처리도 하지 않은 시료보다 더 높은 흡착 성능을 보였다. 즉 불소 원소는 온도가 높을 경우 흡착 성능에 큰 영향을 끼치지 못함을 보여주고 있다. 위 연구들을 Table 4에 정리하여 나타내었다.

5. 결 론

온실가스로 인한 지구온난화가 가장 큰 환경문제로 주목받고 있는 가운데 다양한 온실가스를 분리하고 포집하는 공정에 사용되는 흡착제인 탄소분자체의 개발에 대한 필요성이 증가하고 있다. 그러나 탄소분자체의 제조 공정의 변수가 다양하여 제조 공정의 확립이 어려워 현재 외국 몇 나라만 탄소분자체를 상용화된 정도이다.

함침법, CVD 등의 방법을 사용하여 기공의 크기를 제어하기 위한 연구가 계속 진행되고 있으며 선행 연구들을 분석해본 결과 현재 대부분의 탄소분자체 제조와 관련된 논문에는 CVD 공정이 포함되어 있으며, 목표 가스의 흡착량 또는 선택도가 증가하는 결과를 얻었다. 그러나 CVD 공정은 표면을 일정한 두께로 코팅할 수 있어 탄소분자체 제조 시 기공의 크기를 제어하는데 사용될 수 있으나, 변수가 다양하여 이를 최적화하기 위한 연구들이 선행되고 있다. 따라서 기공 제어 전 활성화를 진행할 때 최대한 균일한 크기의 기공과 큰 비표면적을 형성하는 것이 중요하다고 사료된다. 또한, 표면처리를 통하여 도입된 작용기들이 흡착에 미치는 영향 또한 고려해야 할 것이다. 국내외로 고성능의 탄소분자체를 제조하는 연구가 꾸준히 진행되고 있으며, 이러한 기술 개발을 통하여 국내에도 고성능의 탄소분자체를 제조할 수 있을 것으로 기대된다.

감 사

본 연구는 한국산업기술평가관리원의 탄소산업기반조성사업(고순도 가스 분리용 탄소분자체 및 시스템 제조기술 개발: 20016789)의 지원에 의하여 수행하였으며 이에 감사드립니다.

References

1. E. Gil, S-K. Lee, and M. Rim, The impact of greenhouse gas abatement policy on manufacturing industries in south korea, *The Korean Journal of Economic Studies*, **69**, 55-95 (2021).
2. H. Kim, J. Lee, S. Lee, J. Han, and I. Lee, Operating optimization and economic evaluation of multicomponent gas separation process using pressure swing adsorption and membrane process, *Korean Chem. Eng. Res.*, **53**, 31-38 (2015).
3. C. G. De Salazar, A. Sepulveda-Escribano and F. Rodriguez-

- Reinoso, Preparation of carbon molecular sieves by pyrolytic carbon deposition, *Adsorption*, **11**, 663-667 (2005).
4. Z. Mousavi and H. R. Bozorgzadeh, Preparation of carbon molecular sieves from pistachio shell and walnut shell for kinetic separation of carbon monoxide, hydrogen and methane, *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, **36**, 71-80 (2017).
 5. U. Morali, H. Demiral, and S. Sensoz, Synthesis of carbon molecular sieve for carbon dioxide adsorption: Chemical vapor deposition combined with Taguchi design of experiment method, *Powder Technol.*, **355**, 716-726 (2019).
 6. Y. Gogotsi, C. Portet, S. Osswald, J. M. Simmons, T. Yildirim, G. Laudisio, and J. E. Fischer, Importance of pore size in high-pressure hydrogen storage by porous carbons, *Int. J. Hydrogen Energy*, **34**, 6314-6319 (2009).
 7. A. I. Shirley and A. I. LaCava, PSA performance of densely packed adsorbent beds, *AIChE Journal*, **41**, 1389-1394 (1995).
 8. Y. J. Kim, J. G. Lee, J. Y. Lee, and Y. T. Kang, Experimental study on PSA process for high purity CH₄ recovery from biogas, *Korean J. Air Cond. Refrig. Eng.*, **23**, 281-286 (2011).
 9. S-J. Lee, H. Ahn, J-G. Jee, M-B. Kim, J-H. Moon, Y-S. Bae, and C-H. Lee, Comparison of PSA and VSA processes for air separation, *Clean Technol.*, **6**, 101-109 (2004).
 10. S. Cho, Current status and prospects of PSA gas separation technology, *Chemical Industry And Technology*, **15**, 195 (1997).
 11. M. R. Rahimpour, M. Ghaemi, S. M. Jokar, O. Dehghani, M. Jafari, S. Amiri, and S. Raeissi, The enhancement of hydrogen recovery in PSA unit of domestic petrochemical plant, *Chem. Eng. J.*, **226**, 444-459 (2013).
 12. G. Jee, S. J. Lee, H. M. Moon, S. H. Lee, and C. H. Lee, Development of O₂ Purifier by Pressure Swing Adsorption Process, *KIGAS*, **8**, 37-47 (2004).
 13. J. K. Jeon, Y. K. Park, and K. Chue, Study of PSA process for carbon dioxide recovery over zeolite adsorbent: Effect of rinse rate on process performance, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **20**, 99-110 (2004).
 14. A. A. Abd, S. Z. Naji, A. S. Hashim, and M. R. Othman, Carbon dioxide removal through physical adsorption using carbonaceous and non-carbonaceous adsorbents: A review, *J. Environ. Chem. Eng.*, **8**, 104142 (2020).
 15. A. A. Ahmad, M. Al-Raggad, and N. Shareef, Production of activated carbon derived from agricultural by-products via microwave-induced chemical activation: A review, *Carbon Lett.*, **31**, 957-971 (2021).
 16. L. Wang, Y. Yao, Z. Zhang, L. Sun, W. Lu, W. Chen, and H. Chen, Activated carbon fibers as an excellent partner of Fenton catalyst for dyes decolorization by combination of adsorption and oxidation, *Chem. Eng. J.*, **251**, 348-354 (2014).
 17. R. C. Bansal, J. B. Donnet, and H. F. Stoeckli, *Active Carbon*, Marcel Dekker, New York (1988).
 18. A. Swiatkowski, Industrial carbon adsorbents, *Stud. Surf. Sci. Catal.*, **120**, 69-92 (2008).
 19. W. Thongpat, J. Taweekun, and K. Maliwan, Synthesis and characterization of microporous activated carbon from rubberwood by chemical activation with KOH, *Carbon Lett.*, **31**, 1079-1088 (2021).
 20. J. Wang, Y. K. Park, and Y. M. Jo, Sequential improvement of activated carbon fiber properties for enhanced removal efficiency of indoor CO₂, *J. Ind. Eng. Chem.*, **89**, 400-408 (2020).
 21. A. Syakdani, Y. Bow, Rusdianasari, and M. Taufik, Analysis of Cooler Performance in Air Supply Feed for Nitrogen Production Process using Pressure Swing Adsorption (PSA) Method. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1167**, 012055 (2019).
 22. T. Orfanoudaki, G. Skodras, I. Dolios, and G. Sakellariopoulos, Production of carbon molecular sieves by plasma treated activated carbon fibers, *Fuel*, **82**, 2045-2049 (2003).
 23. B. Lee, *Preparation and Characterization of Carbon Molecular Sieve for Separating Landfill gases*, PhD Dissertation, Paichai University, Daejeon, Korea (2001).
 24. W. S. Hong, Thin film vacuum process technology via chemical vapor deposition methods, *Vacuum Magazine*, **1**, 9-13 (2014).
 25. M. B. Tahir, M. Rafique, M. S. Rafique, T. Nawaz, M. Rizwan, and M. Tanveer, *Nanotechnology and Photocatalysis for Environmental Applications*, M. B. Tahir, M. Rafique, M. S. Rafique (eds.), 119-138, Elsevier, UK (2020).
 26. H. Demiral and İ. Demiral, Preparation and characterization of carbon molecular sieves from chestnut shell by chemical vapor deposition, *Adv. Powder Technol.*, **29**, 3033-3039 (2018).
 27. P. J. M. Carrott, I. P. P. Cansado, and M. M. L. R. Carrott, Carbon molecular sieves from PET for separations involving CH₄, CO₂, O₂ and N₂, *Appl. Surf. Sci.*, **252**, 5948-5952 (2005).
 28. S. H. Moon and J. W. Shim, Molecular sieve properties for CH₄/CO₂ of activated carbon fibers prepared by benzene deposition, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **27**, 614-619 (2005).
 29. M. J. Kim, K. H. Kim, Y. Kim, B. Yoo, and Y. S. Lee, Volatile organic compounds (VOCs) removal using ACFs with electroless plating CuO as catalysts, *Carbon Lett.*, **30**, 675-682 (2020).
 30. X. Qi, C. Qin, W. Zhong, C. Au, X. Ye, and Y. Du, Large-scale synthesis of carbon nanomaterials by catalytic chemical vapor deposition: a review of the effects of synthesis parameters and magnetic properties, *Materials*, **3**, 4142-4174 (2010).
 31. Y. Xu, X. Chen, D. Wu, Y. Luo, X. Liu, Q. Qian, L. Xiao, and Q. Chen, Carbon molecular sieves from soybean straw-based activated carbon for CO₂/CH₄ separation, *Carbon Lett.*, **25**, 68-77 (2018).
 32. D. Adinata, W. M. A. W. Daud, and M. K. Aroua, Production of carbon molecular sieves from palm shell based activated carbon by pore sizes modification with benzene for methane selective separation, *Fuel Process Technol.*, **88**, 599-605 (2007).
 33. M. Ahmad, W. W. Daud, and M. Aroua, Adsorption kinetics of various gases in carbon molecular sieves (CMS) produced from palm shell, *Coll. Surf. A: Physicoche. Eng. Asp.*, **312**, 131-135 (2008).
 34. J. Zhang, S. Qu, L. Li, P. Wang, X. Li, Y. Che, and X. Li, Preparation of carbon molecular sieves used for CH₄/N₂ separation, *J. Chem. Eng. Data*, **23**, 1737-1744 (2018).
 35. S. J. Kang, G. J. Kim, M-S. Kim, B-J. Kim, S. Kim, J-S. Roh, D-H. Riu, S-J. Park, M-K. Seo, Y. Shul, K. H. An, K. S. Yang, S. K. Ryu, G. W. Lee, Y-S. Lee, J-M. Lee, C-H. Lee, S. Lim, Y-S. Lim, D-H. Jeong, K. Y. Cho, D. Cho, S. H. Chi, and I-P. Hong, *Application Handbook of Carbon Materials*, **1**, 613, Daeyeongsa, Seoul, Korea (2008).
 36. C. Y. Yang, C. L. Kao and P. Y. Hung, Preparation of activated carbon from waste cation exchange resin and its application in wastewater treatment, *Carbon Lett.*, **32**, 461-474 (2022).
 37. S. Kwon, Y. You, H. Lim, J. Lee, T.-S. Chang, Y. Kim, H. Lee, and B.-S. Kim, Selective CO adsorption using sulfur-doped Ni

- supported by petroleum-based activated carbon, *J. Ind. Eng. Chem.*, **83**, 289-296 (2020).
38. S. E. Moradi, S. Amirmahmoodi, and M. J. Baniamerian, Hydrogen adsorption in metal-doped highly ordered mesoporous carbon molecular sieve, *J. Alloys Compd.*, **498**, 168-171 (2010).
39. S-J. Son, J-S. Choi, K-Y. Choo, S-D. Song, S. Vijayalakshmi, and T-H. Kim, Development of carbon dioxide adsorbents using carbon materials prepared from coconut shell, *Korean J. Chem. Eng.*, **22**, 291-297 (2005).
40. M. Hemmat, A. Rahbar-Kelishami, and M. H. Vakili, Preparation of carbon molecular sieves and its impregnation with Co and Ni for CO₂/N₂ separation, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, **15**, 2213-2228 (2018).
41. Z. Y. Yang, D. C. Wang, Z. Y. Meng, and Y. Y. Li, Adsorption separation of CH₄/N₂ on modified coal-based carbon molecular sieve, *Sep. Purif. Technol.*, **218**, 130-137 (2019).
42. S. Cho, H. R. Yu, K. D. Kim, K. B. Yi, and Y. S. Lee, Surface characteristics and carbon dioxide capture characteristics of oxygen-fluorinated carbon molecular sieves, *Chem. Eng. J.*, **211**, 89-96 (2012).
43. Y. Kawabuchi, S. Kawano, and I. Mochida, Molecular sieving selectivity of active carbons and active carbon fibers improved by chemical vapour deposition of benzene, *Carbon*, **34**, 711-717 (1996).
44. T. Horikawa, J. i. Hayashi, and K. Muroyama, Preparation of molecular sieving carbon from waste resin by chemical vapor deposition, *Carbon*, **40**, 709-714 (2002).
45. P. Carrott, I. Cansado, and M. R. Carrott, Carbon molecular sieves from PET for separations involving CH₄, CO₂, O₂ and N₂, *Appl. Surf. Sci.*, **252**, 5948-5952 (2006).
46. M. Mohammadi, G. N. Ghasem, and A. R. Mohamed, Production of carbon molecular sieves from palm shell through carbon deposition from methane, *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.*, **17**, 525-533 (2011).
47. D. A. Bell, B. F. Towler, and M. Fan, *Coal Gasification and Its Applications*, 1st ed., William Andrew, Elsevier, UK (2011).

Authors

- Seo Gyeong Jeong; B.Sc., Master Course, Department of Applied Chemistry and Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea; ninpia7407@cnu.ac.kr
- Seongmin Ha; M.Sc., Ph.D. candidate, Department of Applied Chemistry and Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea; haseongmin93@cnu.ac.kr
- Young-Seak Lee; Ph.D., Professor, Department of Applied Chemistry and Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea; youngslee@cnu.ac.kr