

K계열 함침 탄소계 흡착제의 실내 저농도 이산화탄소 흡착성능 강화

정세은 · Shuang Wang · 이유리 · 원유섭 · 김재영 · 장재준 · 김하나 · 조성호 · 박영철 · 남형석^{*,†}

한국에너지기술연구원 온실가스연구단
34101, 대전 유성구 유성대로 1312번길 140
*경북대학교 기계공학부

41566, 대구 북구 대학로 80번길
(2022년 4월 29일 접수, 2022년 6월 13일 수정본 접수, 2022년 6월 27일 채택)

Development of Potassium Impregnated Carbon Absorbents for Indoor CO₂ Adsorption

Se-Eun Jeong, Shuang Wang, Yu-Ri Lee, Yooseob Won, Jae-Young Kim, Jae Jun Jang, Hana Kim, Sung-ho Jo, Young Cheol Park and Hyungseok Nam^{*,†}

Greenhouse Gas Laboratory, Korea Institute of Energy Research, 140, Yuseong-daero 1312 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34101, Korea

^{*}School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea

(Received 29 April 2022; Received in revised form 13 June 2022; accepted 27 June 2022)

요 약

실내 거주 시간이 늘어나면서 발생하는 CO₂를 인체에 무해한 농도인 1,000 ppmCO₂ 이하로 유지하기 위해 연구들이 활발히 진행 중이다. 본 연구에서는 저농도 CO₂흡착제로서 KOH와 K₂CO₃와 같은 알칼리성 첨가제를 상용 활성탄에 함침하여 사용하였다. 흡착된 CO₂ 양은 열중량분석기(TGA)와 chamber(CO₂ IR analyzer)로 평가하였다. 비표면적이 928.5 m²/g인 상용 활성탄(AC)은 KOH가 함침 된 KOH/AC(13.6 m²/g)와 K₂CO₃가 함침 된 K₂CO₃/AC(288.8 m²/g)보다 비표면적이 높았다. 챔버실험결과, AC는 CO₂를 거의 흡착하지 않았지만, KOH/AC와 K₂CO₃/AC는 각각 93.5 mgCO₂/g_{sample} 및 94.5 mgCO₂/g_{sample} 흡착하였다. 이것은 비표면적 및 미세기공의 부피에 의한 물리적인 흡착 영향보다 알칼리성 활성점의 증가가 CO₂ 흡착에 더 유리하게 작용한 것으로 판단된다. KOH/AC와 K₂CO₃/AC의 재생성능은 chamber test 결과 대조군(K₂CO₃/Al+Si supports)과 비교했을 때 안정적으로 흡착 성능을 유지하는 것으로 나타났다(3회 반복 실험). 또한, KOH/AC와 K₂CO₃/AC는 열중량분석기의 절대습도 1%H₂O를 고려한 조건에서 145.7 mgCO₂/g_{sample} 및 150 mgCO₂/g_{sample}로 나타났다. 따라서 KOH 및 K₂CO₃ 등과 같은 알칼리 성분의 함침은 상용 활성탄의 안정적인 흡착 및 재생 후 흡착성능을 나타내어, 실내 이산화탄소 저감을 위한 흡착제 개발에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract – Relatively high indoor CO₂ concentration (>1,000 ppm) has a negative impact on human health. In this work, indoor CO₂ adsorbent was developed by impregnating KOH or K₂CO₃ on commercial activated carbon, named as KOH/AC and K₂CO₃/AC. Commercial activated carbon (AC) showed relatively high BET surface area (929 m²/g) whereas KOH/AC and K₂CO₃/AC presented lower BET surface area of 13.6 m²/g and 289 m²/g. Two experimental methods of TGA (2,000 ppmCO₂, weight basis) and chamber test (initial concentration: 2,000 ppmCO₂, CO₂ IR analyzer) were used to investigate the adsorption capacity. KOH/AC and K₂CO₃/AC exhibited similar adsorption capacities (145~150 mgCO₂/g), higher than K₂CO₃/Al+Si supports adsorbent (84.1 mgCO₂/g_{sample}). Similarly, chamber test also showed similar trend. Both KOH/AC and K₂CO₃/AC represented higher adsorption capacities (KOH/AC: 93.5 mgCO₂/g K₂CO₃/AC: 94.5 mgCO₂/g_{sample}) K₂CO₃/Al+Si supports. This is due to the KOH or K₂CO₃ impregnation increased alkaline active sites (chemical adsorption), which is beneficial for CO₂ adsorption. In addition, the regeneration test results showed both K-based adsorbents pose a good regeneration and reusability. Finally, the current study suggested that both KOH/AC and K₂CO₃/AC have a great potential to be used as CO₂ adsorbent for indoor CO₂ adsorption.

Key words: Adsorption, Carbon dioxide, Active carbon, Adsorption capacity

1. 서 론

COVID-19의 유행으로 사회적 거리두기 등 이동 제한의 조치가 장기화함에 따라 실내에 거주하는 시간이 길어지고 있다. 따라서, 대중교통이나 다수가 밀집한 실내에서 적절한 환기가 이뤄지지 않

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: namhs219@kier.re.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

을 경우 실내공기질 악화로 인해 불쾌감을 느낄 수 있다. 이는 CO_2 의 농도에 따라 1,000~2,000 ppm에서는 피로와 졸림 현상이, 2,000~5,000 ppm에서는 잠이 많아지고 집중력이 떨어지며 심장박동수가 빨라져 구토 및 두통 증상을 유발할 수 있다[1,2]. 이와 같은 실내공기질을 관리하기 위하여 정부는 2021년 4월부터 법률 제 16307호에 실내공기질 관리법을 시행하였다[3]. 또한 산업안전보건법 제27조 제1항의 사무실 공기관리 지침에 따르면 CO_2 는 1,000 ppm이하로 유지하여야 한다. 이처럼 실내 적정 이산화탄소농도 유지의 중요성이 나날이 커지고 있다.

CO_2 제어 기술에는 흡수법, 막 분리법, 흡착법 등이 많이 알려져 있다[4]. 흡수법에는 보통 아민계 용매를 이용해 용매의 pH를 높여 증가시킨 염기성으로 산 염기 반응으로 이산화탄소를 흡수한다. 이는 재생 시 요구되는 많은 에너지와 장치의 부식성 그리고 낮은 열적 안정성으로 인한 2차 오염가능성으로 본 연구에는 적합하지 않고, 막 분리법 또한 멤브레인을 이용해 장치가 간단하지 않으며, 대용량화에 적합하지 않다. 이에 비해 흡착법은 낮은 재생에너지와 흡착한 시료를 다시 회수하여 사용 가능한 재생성과 경제성으로 본 연구에서 사용되었다. 흡착에는 제올라이트[5-8], 활성탄[9,10], 실리카[11] 및 금속 유기체(MOF)[12,13] 등이 널리 연구되고 있다. 위의 흡착제들은 주로 다공성이며, 다량의 메조포러스 구조를 포함하여 흡착이 용이하다는 장점이 있지만[14] 제올라이트와 MOF는 친수성으로 습한 조건에서 흡착 용량이 급격히 감소하는 치명적인 결함이 있다[5]. 다른 고체 흡착제에 비해 활성탄은 저비용에 넓은 표면적 및 잘 발달된 미세 기공, 높은 흡착 용량, 우수한 화학적 및 열적 안정성, 쉬운 재생능력을 가지고 있으나 흡착과정 중 이산화탄소에 대한 선택도가 낮아 첨가제를 이용하여 화학흡착을 통해 선택도를 높여주어야 한다[15]. 화학적 흡착을 위한 첨가제로는 주로 금속염이나 알칼리, 아민 등을 이용하여 산성가스인 이산화탄소와의 선택도를 향상시킨다. 그러나 실내 저농도 이산화탄소 흡착에 적용할 흡착제로 아민 흡착제는 수분과 결합시의 장치의 부식 가능성과 휘발시의 위험성이 있어 적합하지 않다[16]. 따라서 Lee와 Jo[17]는 실내 저농도 이산화탄소 흡착 성능을 증가시키기 위해 1~2족 계열(Li, K, Ca, Mg)의 금속염을 활성탄표면에 함침 하여 이산화탄소와의 친화력을 향상시키고자 하였고, 3,000 ppm CO_2 농도에서 고정층 반응기를 이용하여 흡착용량을 측정하였다. 그 결과 순수 활성탄보다 금속염을 함침한 경우에 흡착 성능이 더 높은 것으로 나타났다. 그러나 위 논문에선 실제 실내의 분위기와 유사하기 위한 습도의 영향이 고려되지 않았다. Cai[18]등의 논문에선 Na와 K_2CO_3 친수성을 이용하여 CO_2 를 흡착하고자 하였고, 이는 K^+

이온의 반경이 Na^+ 이온의 반경보다 더 커 K_2CO_3 가 더 높은 친수성을 나타내어 빠르게 흡착이 가능한 것으로 나타났다. 이는 K^+ 이온의 실내에서의 습도에 의해 이산화탄소 흡착에 대한 빠른 흡착 성능을 기대할 수 있다. 또한 Zhao[19]등의 논문에선 여러 칼륨기반흡착제를 이용하여 5,000 ppm CO_2 에서의 흡착을 진행하였고, AC에 함침된 K_2CO_3 가 가장 낮은 재생온도를 보여 실제 실내공간에서 사용시의 적합성을 나타내었다. 위 연구들을 바탕으로 본 연구에서는 실내 이산화탄소를 줄이기 위하여 실내와 유사한 조건을 가진 실내 습도와 온도의 영향이 반영된 챔버를 이용하였다. K^+ 이온의 함침을 유도하여 선행 연구결과 보다는 낮은 초기 이산화탄소농도 2,000 ppm에서의 흡착 성능과 재생 후 흡착성능을 비교하였고, 열중량분석법(TGA)을 통해 H_2O 의 유무에 따른 흡착성능을 비교하였다.

2. 실험방법

2-1. 흡착제 제조

Fig. 1은 전반적인 흡착제 제조공정을 나타낸 그림이다. CO_2 흡착제는 한일그린에서 증기 공정으로 제조한 상용 AC를 사용하였다. AC는 KOH 및 K_2CO_3 수용액을 wt.% 50:50으로 함침 후, 120 °C의 오븐에서 48시간 건조하였다. 제조된 흡착제는 파우더 형태이며, KOH/AC와 K_2CO_3 /AC로 표기하였다. 기존의 배가스 CO_2 흡착제로 개발된 K_2CO_3 /Al+Si supports 흡착제는 대조군으로 사용되었다. 흡착제를 담을 필터의 앞면은 멜트브론이며, 뒷면은 멜트브론과 부직포를 융착시켜 만들었다. 필터크기는 77 × 77 mm로 제조하였으며, 사용한 흡착제의 양은 3~5 g이다.

2-2. 흡착제의 특성 분석 및 이산화탄소 흡착 성능, 재생 후 흡착성능평가

AC와 흡착제의 기공구조와 비표면적은 질소등온흡착법으로 분석하였다(BELSORP-MINI X). 흡착제의 이산화탄소 흡착 성능과 재생 성능은 각각 TGA (N-1500, SCINCO)와 IR 가스 분석기로 평가하였다. Table 1은 TGA를 사용한 CO_2 흡착 실험 조건을 나타낸다. TGA의 흡착1조건(Adsorption 1)은 2,000 ppm CO_2 (45 ml/min)로 30 °C에서 1시간동안 진행하였고, 흡착2조건(Adsorption 2)은 실제 분위기와 유사한 상대습도(30~50 %RH)로 유지하기 위하여 2,000 ppm CO_2 (45 ml/min)에 절대습도 1 % H_2O 를 주입하여 30 °C에서 1시간동안 진행하였다. 탈착 조건은 N_2 (45 ml/min)에 100 °C에서 1시간동안 진행하였다. 전처리하는 탈착 조건과 동일한 조건하에 진행되고, 이는 이전의 흡착된 CO_2 나 불순물들을 제거하는 과정으

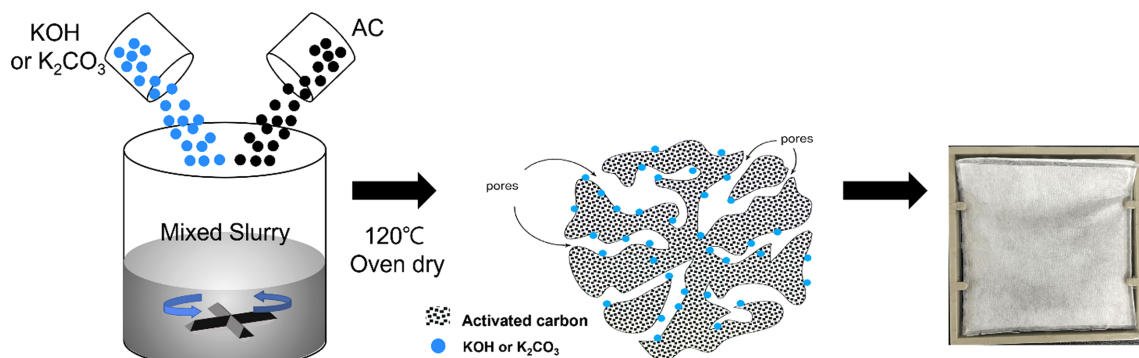
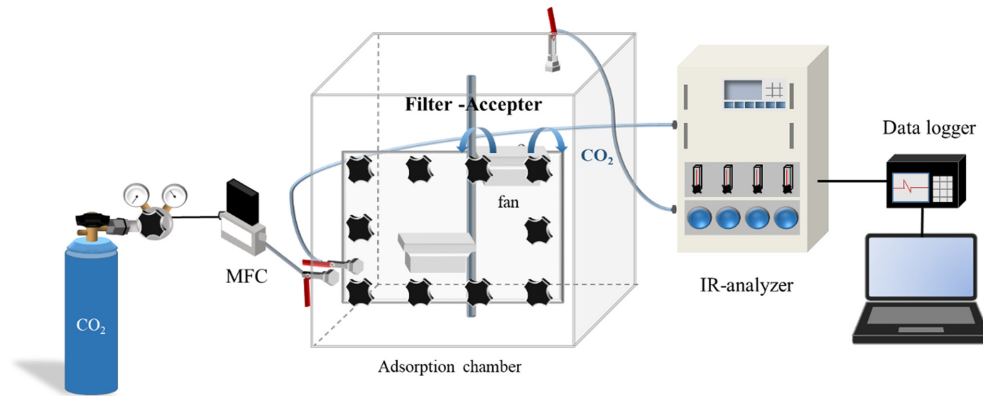


Fig. 1. The manufacturing process of KOH/AC and K_2CO_3 /AC.

Table 1. Experimental conditions for CO₂ adsorption test using TGA

TGA Condition	Flow gas	Time	Temperature
Adsorption 1	2000 ppmCO ₂ (N ₂ balance)	60 min	30 °C
Adsorption 2	2000 ppmCO ₂ (N ₂ balance), 1% H ₂ O	60 min	30 °C
Desorption	N ₂	60 min	100 °C

**Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.**

로 TGA 그래프상 무게가 안정화될 때까지 진행하였다. TGA Cycle test를 위해 흡착과 탈착 조건을 3회의 반복하여 흡착 성능을 비교하였고, 식 (1)을 통해 산출되었다.

$$q_t = w_c \cdot w_i \times \frac{10^3}{w_i \cdot w_w} \quad (1)$$

여기서

q_t : TGA를 통해 산출된 이산화탄소 흡착 성능(mmol/g)
 w_c : TGA weight change %
 w_i : Initial sample weight(g)
 M_w : CO₂ 몰 질량(44 g/mol)이다.

챔버 반응기는 저농도 2,000 ppm CO₂ 분위기에서 CO₂ 흡착 성능을 측정하기 위해 아크릴재질로(0.1 m³) 제작되었고 Fig. 2에 나타났다. 챔버 반응기 내의 초기가스농도는 2,000 ppm CO₂로 하였으며 내부의 팬에 의해 순환되었다. 필터를 통과한 CO₂는 IR 가스 분석기로 실시간 측정하였으며, 이를 통해 얻은 흡착 성능은 식 (2)를 통해 산출하였고, 흡착 전후의 무게차이를 이용하여 구한 흡착 성능을 식 (3)과 같이 산출하였다.

$$q = \frac{V_c}{W} \cdot \frac{M_w}{V_m} \cdot (C_i - C_f) \quad (2)$$

여기서

q : 이산화탄소 흡착 성능(mgCO₂/g_{sample})
 V_c : chamber의 부피(0.1 m³)
 W : 흡착 필터의 무게(g)
 M_w : CO₂ 몰질량(44 g/mol)
 V_m : 가스의 몰 부피(24.465 L/mol at 25 °C)
 $C_{i \text{ or } f}$: 초기와 마지막 CO₂ 농도이다.
 실험 전후의 무게 변화를 통한 흡착 성능은 식 (3)으로 평가하였다.

$$q_m = \frac{m_f - m_b}{10^3 \cdot m_s} \quad (3)$$

여기서

q : 이산화탄소 흡착 성능(mgCO₂/g_{sample})
 m_f : 실험 후 filter의 무게(g)
 m_b : 실험 전 filter의 무게(g)
 m_s : 필터 내 시료의 무게(g)이다.

흡착 후 재생 성능은 챔버 반응기에 실험이 완료된 흡착제를 150 °C 진공분위기에서 60분 전처리 후 다시 흡착하는 과정을 3회 반복하여 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 흡착제의 특성분석

Fig. 3는 CO₂ 흡착을 위해 만들어진 흡착제 표면을 SEM을 통해 관찰한 것을 보여준다. 전체적으로 AC에 KOH와 K₂CO₃가 함침됨에 따라 기공의 변화가 관찰되며, Fig. 3(a)AC는 기공이 균일하고 부드러운 표면을 가진 반면, Fig. 3(b)KOH/AC는 불균일한 기공에 거친 표면이 보인다. 이는 KOH의 높은 염기성에서 기인하는 것으로 보인다. Fig. 3(c) K₂CO₃/AC는 AC에 K₂CO₃가 함침되어 기공이 줄어든 것으로 보인다.

Fig. 4는 흡착제의 질소등온흡착선을 나타낸다. 비표면적은 입자의 공극률이나 기공 크기에 따라 결정되며, 흡착성과 밀접한 관련이 있다. Table 2는 4종류의 흡착제 특성을 나타낸다. 본 연구에 사용한 AC의 비표면적은 928.5 m²/g이고, 기공 부피는 0.584 cm³/g이다. SEM의 결과에서도 보았듯이, KOH와 K₂CO₃가 함침된 AC를 함침 전의 AC와 비교했을 때 비표면적은 각각 98.5%, 68.9% 감소하였고, 기공 부피는 각각 93.3%, 70.5% 감소하였다. 비표면적은 전체 흡착사이트의 수와 연관이 있어 전체 흡착사이트 수의 감소를 야기한다. 반면에 기공 부피의 감소는 효과적인 확산에 요구되는 pore channel이 좁아져 mass transfer resistance가 증가하여 확산 속도를 감소시킨다[20]. 따라서 KOH/AC와 K₂CO₃/AC는 AC에 비해 물리적 흡착량이 감소된 것으로 판단된다.

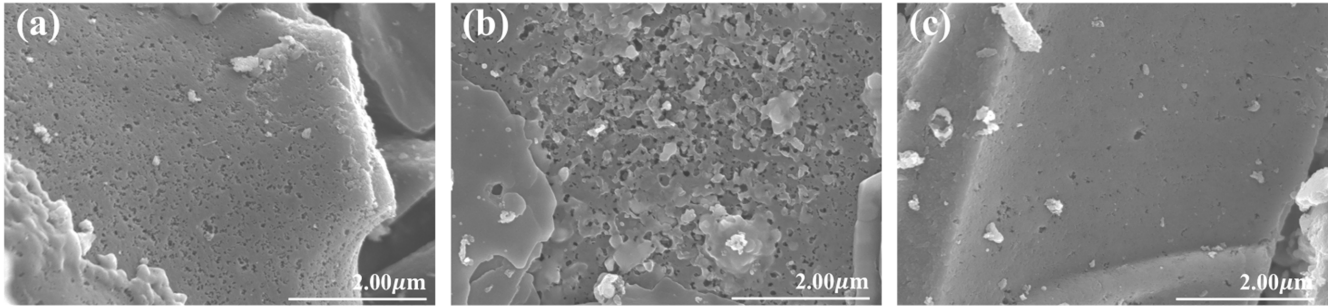


Fig. 3. SEM images of the adsorbents. (a) AC, (b) KOH/AC, (c) K_2CO_3/AC .

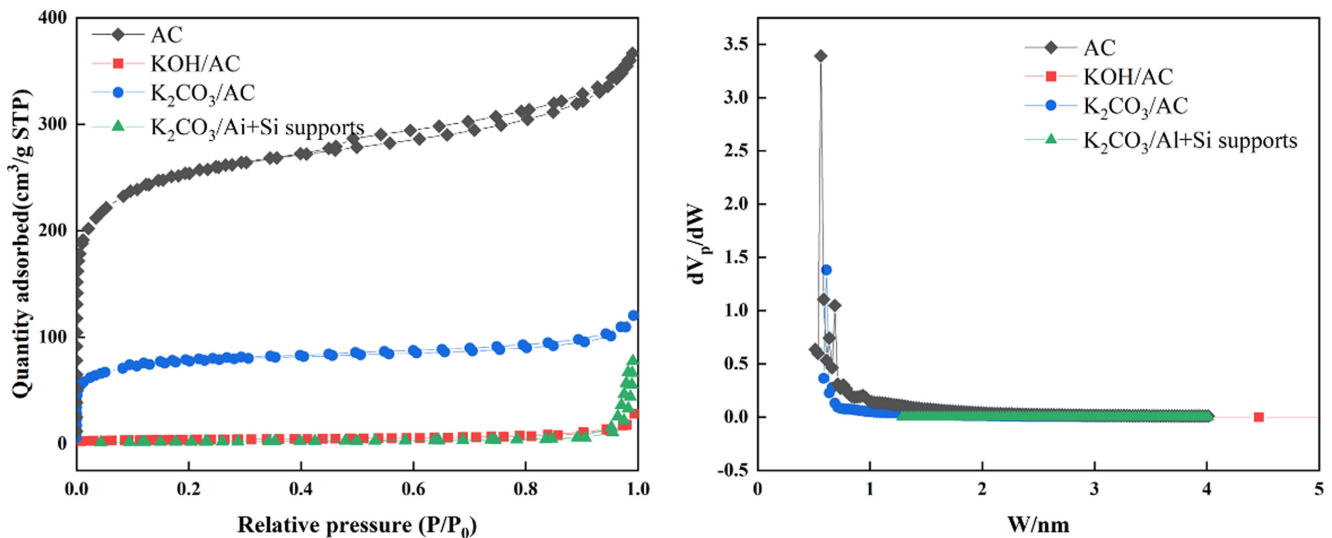


Fig. 4. N_2 adsorption-desorption isotherm at 77 K.

Table 2. Textural properties of the adsorbents

Sample Name	S_{BET} (m^2/g)	Total pore volume (cm^3/g)	Average pore diameter (nm)
AC	928.5	0.584	0.778
KOH/AC	13.57	0.039	10.24
K_2CO_3/AC	288.8	0.172	1.106
$K_2CO_3/Al+Si$ supports	6.659	0.108	66.91

Table 3. CO_2 adsorption capacity of regenerated adsorbent using TGA

Adsorption condition / Adsorbents	Adsorption 1 + Desorption		Adsorption 2 + Desorption	
	Weight percent (wt.%)	CO_2 capacity (mmol/g)	Weight percent (wt.%)	CO_2 capacity (mmol/g)
KOH/AC	2.55	0.45	14.6	3.31
K_2CO_3/AC	3.14	0.66	15.0	3.41
$K_2CO_3/Al+Si$ supports	0.87	0.20	8.41	1.91

3-2. TGA분석에 의한 이산화탄소 흡착성능비교 및 재생 후 흡착성능평가

Fig. 5는 Table 1의 조건으로 흡착과 탈착하여 TGA로 분석한 CO_2 무게 비(wt.%)이다. CO_2 흡착 성능은 식 (1)로 평가하여, Table 3에 나타냈다. 흡착1, 흡착2 조건의 차이는 흡착 시에 H_2O 투입의 유무이며, 흡착 조건으로 1 wt% H_2O 투입은 실내공기 상대습도를 (30-70 %RH) 맞춰 주기 위함이다. 결과적으로 H_2O 가 투입된 흡착 2조건에서 KOH/AC, K_2CO_3/AC , $K_2CO_3/Al+Si$ supports는 각각 86.4%, 80.6%, 89.5% 더 높은 흡착 성능을 보였다. 이는

support로 존재하는 다공성 활성탄과 이산화탄소 간의 van der Waals 결합에 의한 흡착 외에 H_2O 의 흡착이 무게를 가중시켜 나타난 현상이다. H_2O 과 활성탄 사이의 흡착은 (1) 강한 H_2O-H_2O 사이 상호작용, (2) 약한 H_2O -탄소의 상호작용, (3) 활성탄표면에 산소 그룹과 H_2O 의 수소결합 형성 등으로 인해 발생한다[21].

또한 흡착 성능의 증가는 활성탄에 KOH와 K_2CO_3 가 함침 됨에 따라 발생하는 화학반응으로 흡착 성능이 높아진 것으로 볼 수 있다. 즉, $H_2O(g)$ 가 -OH기와 -H기로 해리되면서 본 연구에서 만든 흡착제표면에서 CO_2 와 결합하여 $KHCO_3$ 를 만들게 된다[22].

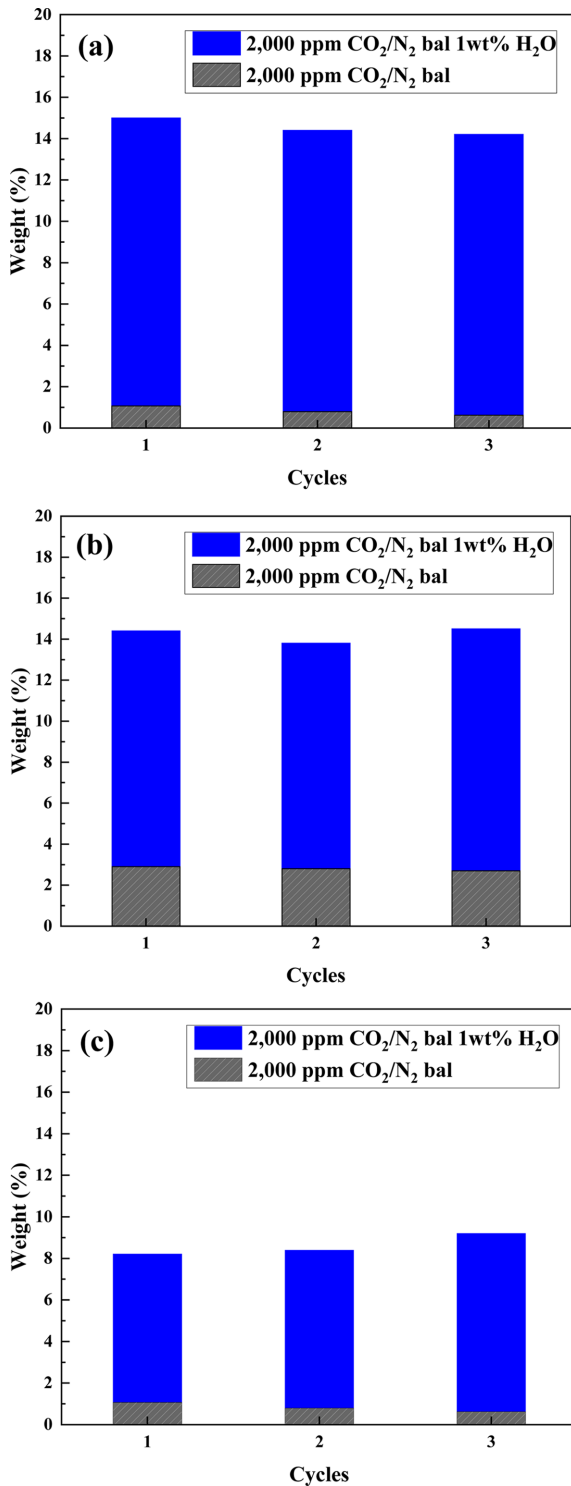
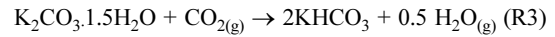
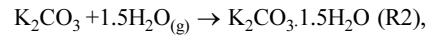
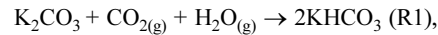
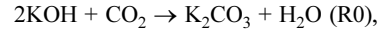


Fig. 5. CO₂ adsorption capacity on TGA. (a) KOH/AC, (b) K₂CO₃/AC, (c) K₂CO₃/Al+Si supports.

H₂O(g)가 있는 조건에서 활성탄에 함침 된 KOH는 R0부터 R1까지의 반응 메커니즘을 K₂CO₃는 R1과 R2~R3의 반응 메커니즘을 가진다[23]. 또한 Gomez 등[24]에 따르면 R1반응과 R2~R3의 반응은 병렬적으로 이루어져 빠른 흡착속도를 기대할 수 있다.



이 과정에서 얻어진 KHCO₃(중 탄산염)가 이산화탄소의 흡착 성능을 향상시키는 것으로 밝혀졌다. 또한 Wang[25]등의 연구에서도 K₂CO₃가 함침 된 활성탄은 H₂O가 있을 때 탄산화 반응을 통해 K₂CO₃·1.5H₂O과 같은 중간체가 만들어지며 이는 빠른 속도로 이산화탄소와 반응하며 이산화탄소의 흡착 성능을 향상시킨다는 것을 in-situFTIR 분석 결과를 통해 증명하였다. 따라서 습도가 존재하는 실내공간에서의 흡착제로 사용 시에 화학 흡착의 시너지 효과를 기대할 수 있다.

3번의 흡착사이클을 통해 흡착 후 재생성능을 평가해보았을 때 K₂CO₃/Al+Si supports는 약 17.9%의 차이가 존재했으나 KOH/AC와 K₂CO₃/AC는 약 5%미만의 차이를 보여 안정적인 사이클을 확보하였다.

3-3. Chamber에 의한 이산화탄소 흡착성능 및 재생 후 흡착 성능평가

Fig. 6는 챔버 반응기 내의 필터를 통과한 2,000 ppm CO₂ 농도를 IR 가스 분석기로 측정한 것이다. 이 그림에서 비표면적이 가장 큰 AC는 8시간동안 저농도 CO₂분위기에서 흡착성능이 거의 없는 반면

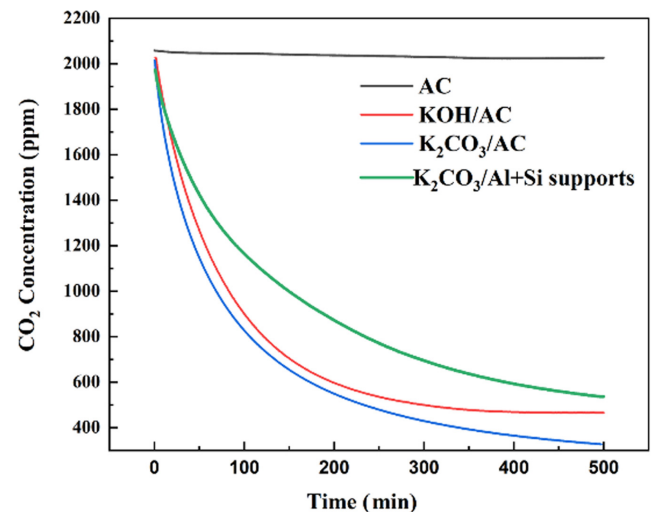


Fig. 6. CO₂ adsorption capacity on chamber.

Table 4. CO₂ adsorption capacity of regenerated adsorbent using IR gas analyzer

Sample Name	Sample mass (g)	Eq. (2) (mg _{CO2} /g _{sample}) IR gas based	Eq. (3) (mg _{CO2} /g _{sample}) mass based	Adsorption CO ₂ mass (mg)	1000 ppm reach time (min)
AC	2.54	2.4	29.6	6.02	-
KOH/AC	3.00	93.5	158	281	83
K ₂ CO ₃ /AC	3.10	94.5	142	294	71
K ₂ CO ₃ /Al+Si supports	5.06	51.1	160	259	150

KOH/AC, K_2CO_3 /AC 및 K_2CO_3 /Al+Si supports는 각각 93.5, 94.5, 그리고 $51.1 \text{ mg}_{CO_2}/\text{g}_{\text{sample}}$ 흡착하였다. 이는 van der Waals에 의한 물리적인 흡착만을 주로 하는 AC와 달리 다른 3가지 시료는 물리적 흡착 외에 화학적 흡착이 병합되어 나타난 결과이다. 이산화탄소 분자는 산소부분에 많은 전자 구름의 밀도가 분포되어 탄소 분자는 친전자성을 나타낸다. 즉 이산화탄소 분자는 루이스 산성을 띄게 되므로 활성탄에 알칼리성 물질을 함침 시키게 되면 염기성이 증가하여 산-염기 반응으로 AC와 비교해 더 높아진 흡착성능을 확인할 수 있다[26]. 이는 TGA 결과와 비교했을 때에도 유사한 경향을 보이며 흡착성능(Mass based)을 비교했을 때 값의 차이는 흡착 시 mass transfer와 반응기 내 가스 환경의 차이 때문인 것으로 판단된다.

KOH/AC, K_2CO_3 /AC 및 K_2CO_3 /Al+Si supports가 1,000 ppm CO_2 농도에 도달하는 시간이 각각 83분, 71분 및 150분 걸렸다. AC에 함침 한 소재는 대조군으로 사용된 K_2CO_3 /Al+Si supports 흡착제에 비해 충분히 빠른 속도로 흡착하였으며, 이중 K_2CO_3 /AC가 가장 빠른 속도를 보였다. 이는 위 반응식을 보면 알 수 있듯이 KOH/AC는 K_2CO_3 /AC와 달리 식(R0)의 반응을 거치기 때문에 K_2CO_3 /AC 비해 다소 느린 반응속도를 나타내는 것으로 판단된다[25].

IR based인 식 (2)보다 Mass based인 식 (3)은 각각 40.8%(KOH/AC), 33.5%(K_2CO_3 /AC) 그리고 68.1%(K_2CO_3 /Al+Si supports) 흡착 성능이 감소했다. 이는 Mass based의 결과가 이산화탄소의 흡착 외에 H_2O 와 O_2 같은 물질 등이 흡착되었기 때문이다[27]. H_2O 는 활성탄의 표면에 대표적인 3가지 메커니즘에 의해 흡착되는데 이는 다음과 같다. (1) H_2O 와 활성탄 표면의 물리적 흡착, (2) 흡착된 H_2O 와 H_2O 의 상호작용, (3) 활성탄 표면의 산소그룹과 H_2O 가 수소결합으로 흡착된다[23]. 따라서 본 연구에서는 IR-based의 결과를 순수 이산화탄소 흡착성능의 평가지표로 삼았다. 또한 이산화탄소 외에 산소, 질소, H_2O 와 같은 물질을 불순물이라 표현했을 때 Mass based의 결과와 비교하여 이산화탄소 흡착대비 불순물 흡착의 진행도를 확인할 수 있었다.

재생 후 흡착성능은 Fig. 7에 나타냈다. 흡착성능은 위에서 언급한 것과 같이 IR based결과로 평가하였다. AC는 타 시료와 비교했을 때 낮은 흡착성능을 나타내어 재생 후 흡착실험을 진행하지 않았다. 대조군인 K_2CO_3 /Al+Si supports는 재생 후 흡착성능이 타 시료에

비해 불안정한 반면 본 연구를 위해 만들어진 두 흡착제는 다소 안정적인 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 비표면적이 큰 AC를 이용하여 화학적으로 표면을 개질하고, 챔버(0.1 m^3)에서 저농도 CO_2 흡착 성능 및 재생 후 흡착 성능을 평가하여 실내에서의 이산화탄소 저감을 위한 탄소계 흡착제를 평가하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 흡착제의 BET 분석 결과 비표면적은 KOH/AC가 $13.57 \text{ m}^2/\text{g}$, K_2CO_3 /AC가 $288.8 \text{ m}^2/\text{g}$ 으로 상용 AC($928.5 \text{ m}^2/\text{g}$)에 비해 작았다. 이것은 함침 화합물이 AC 표면 기공을 막아 비표면적과 부피가 작아진 것으로 판단된다.

(2) TGA를 통한 결과에서 CO_2 흡착 성능과 재생 후 흡착 성능은 절대습도 1% H_2O 를 고려한 조건에서 KOH/AC, K_2CO_3 /AC 각각 3.31 mmol/g , 3.41 mmol/g 으로 KOH/AC와 K_2CO_3 /AC는 K_2CO_3 /Al+Si supports에 비해 우수한 흡착 성능과 재생 후 흡착 성능을 보였다. 또한 흡착제들은 H_2O 주입 시 흡착능이 80%이상 증가하는 경향을 보였다. 이는 흡착제 표면의 K이온이 H_2O 와 반응하여 $KHCO_3$ 가 만들어져 흡착성능에 긍정적인 영향을 주기 때문이다.

(3) CO_2 IR gas analyzer에 의한 CO_2 흡착 성능은 K_2CO_3 /AC과 KOH/AC가 각각 $94.5 \text{ mg}_{CO_2}/\text{g}_{\text{sample}}$, $93.5 \text{ mg}_{CO_2}/\text{g}_{\text{sample}}$ 이며, 1,000 ppm CO_2 농도에 도달하는 시간은 각각 83분 및 71분으로 흡착제들 중 우수한 흡착 성능과 속도를 나타내었다. 재생 후 흡착성능은 Fig. 5를 참고했을 때 KOH/AC와 K_2CO_3 /AC가 비교된 시료 중 안정성이 우수한 것으로 나타났다.

이러한 결과를 토대로 상용 활성탄에 KOH나 K_2CO_3 를 함침 하는 간단한 방법으로 저농도의 이산화탄소 흡착제 제조에 도움이 될 것으로 기대한다.

감 사

본 연구는 한국에너지기술연구원 주요사업(C2-2440-01)을 재원으로 수행한 연구결과입니다.

References

- Lee, D. H. and Choi, Y. B., "Measurements and CFD Analysis for Release Rate of CO_2 and Characteristics of Natural Ventilation in Lecture Room," *Journal of the Korean Society of Safety*, **36**(1), 86-94(2021).
- http://www.phiko.kr/bbs/board.php?bo_table=z3_01&wr_id=452(2013).
- Korean Law Information Center – Indoor Air Quality Control Act (Enforcement Date: Oct. 18, 2018 (<https://www.law.go.kr/>)).
- Kang, H. R., Lee, Y. H., Eom, H. K. and Kim, S. S., "Trends and Prospects of Adsorption Technology for Indoor Carbon Dioxide," *KIC News*, **23**(4), 1-12(2020).
- Díaz, E., Muñoz, E., Vega, A. and Ordóñez, S., "Enhancement of the CO_2 Retention Capacity of Y Zeolites by Na and Cs Treatments: Effect of Adsorption Temperature and Water Treatment," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **47**(2), 412-418(2007).

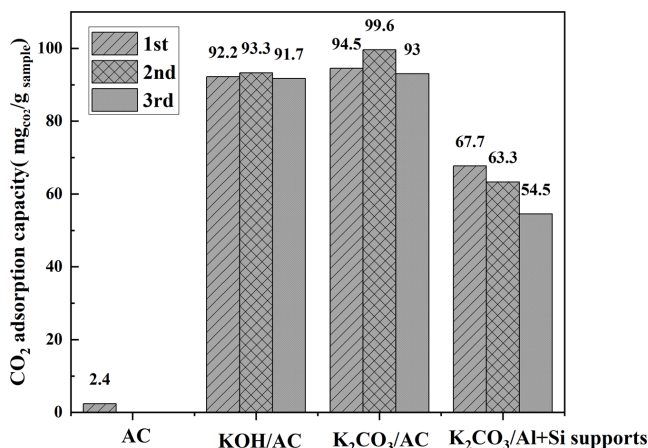


Fig. 7. Observation of adsorbents regeneration.

6. Lee, K. M., Lim, H. Y. and Jo, Y. M., "Evaluation of Moisture Effect on Low-Level CO₂ Adsorption by Ion-Exchanged Zeolite," *Environmental Technology*, **33**(1), 77-84(2012).
7. Lee, J. Y., Park, D. S., Cho, Y. M., Kwon, S. P., Hwang, Y. H., Song, H. J. and Lee, S. B., "A Study on the Low Concentration Carbon Dioxide Adsorbent and Optimal Conditions," **29**(1), 1-12 (2012).
8. Kusumastuti, R., Sriyono, Pancoko, M., Butar-Butar, S. L., Putra, G. E. and Tjahjono, H., "Study On The Mechanism of CO₂ Adsorption Process on Zeolite 5A as a Molecular Sieve In RDE System: An Infrared Investigation," *Journal of Physics: Conference Series*, **1198**(3), 032009(2019).
9. Brennan, J. K., Thomson, K. T. and Gubbins, K. E., "Adsorption of Water in Activated Carbons: Effects of Pore Blocking and Connectivity," *Langmuir*, **18**(14), 5438-5447(2002).
10. Adinata, D., Daud, W. M. A. W. and Aroua, M. K., "Preparation and Characterization of Activated Carbon from Palm Shell by Chemical Activation with K₂CO₃," *Bioresource Technology*, **98**(1), 145-149(2007).
11. Zhao, G., Aziz, B. and Hedin, N., "Carbon Dioxide Adsorption on Mesoporous Silica Surfaces Containing Amine-like Motifs," *Applied Energy*, **87**(9), 2907-2913(2010).
12. Moellmer, J., Celer, E. B., Luebke, R., Cairns, A. J., Staudt, R., Eddaoudi, M. and Thommes, M., "Insights on Adsorption Characterization of Metal-Organic Frameworks: A Benchmark Study on the Novel Soc-MOF," *Microporous and Mesoporous Materials*, **129**(3), 345-353(2010).
13. Armstrong, M. R., Shan, B., Cheng, Z., Wang, D., Liu, J. and Mu, B., "Adsorption and Diffusion of Carbon Dioxide on the Metal-Organic Framework CuBTC," *Chemical Engineering Science*, **167**, 10-17(2017).
14. Querejeta, N., Gil, M. V., Pevida, C. and Centeno, A. C., "Standing out the Key Role of Ultramicroporosity to Tailor Biomass-Derived Carbons for CO₂ Capture," *Journal of CO₂ Utilization*, **26**, 1-7(2018).
15. Jo, D. H., Cho, K. S., Park, C. G. and Kim, S. H., "Effects of Inorganic-Organic Additives on CO₂ Adsorption of Activated Carbon," *Korean Chemical Engineering Research*, **50**(5), 885-89(2012).
16. Bates, E. D., Mayton, R. D., Ntai, I. and Davis, J. H., "CO₂ Capture by a Task-Specific Ionic Liquid," *Journal of the American Chemical Society*, **124**(6), 926-927(2002).
17. Lee, K. M. and Jo, Y. M., "Ambient Adsorption of Low-Level Carbon Dioxide by Metal Treated Activated Carbon," *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **25**(4), 316-24(2009).
18. Cai, T., Chen, X., Tang, H., Zhou, W., Wu, Y. and Zhao, C., "Unraveling the Disparity of CO₂ Sorption on Alkali Carbonates Under High Humidity," *Journal of CO₂ Utilization*, **53**, 101737(2021).
19. Zhao, C., Guo, Y., Li, C. and Lu, S., "Removal of Low Concentration CO₂ at Ambient Temperature Using Several Potassium-based Sorbents," *Applied Energy*, **124**, 241-247(2014).
20. Jin, H. K., "The Relationships Between the Porosity of Activated Carbon and Hydrogen Adsorption Capacity," *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, **14**(4), 305-312(2003).
21. Brennan, J. K., Thomson, K. T. and Gubbins, K. E., "Adsorption of Water in Activated Carbons: Effects of Pore Blocking and Connectivity," *Langmuir*, **18**(14), 5438-5447(2002).
22. Qin, Q., Liu, H., Zhang, R., Ling, L., Fan, M. and Wang, B., "Application of Density Functional Theory in Studying CO₂ Capture with TiO₂-supported K₂CO₃ Being an Example," *Applied Energy*, **231**, 167-178(2018).
23. Jayakumar, A., Gomez, A. and Mahinpey, N., "Post-Combustion CO₂ Capture Using Solid K₂CO₃: Discovering the Carbonation Reaction Mechanism," *Applied Energy*, **179**, 531-543(2016).
24. Gomez, A., Jayakumar, A. and Mahinpey, N., "Experimental Verification of the Reaction Mechanism of Solid K₂CO₃ During Postcombustion CO₂ Capture," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **55**(41), 11022-11028(2016).
25. Wang, S., Lee, Y. R., Won, Y. Kim, H., Jeong, S. E., Hwang, B. W., Cho, A. R., Kim J. Y., Park, Y. C., Nam, H., Lee, D. H., Kim, H. and Jo, S. H., "Development of High-Performance Adsorbent Using KOH-Impregnated Rice Husk-Based Activated Carbon for Indoor CO₂ Adsorption," *Chemical Engineering Journal*, **437**(1), 135378(2022).
26. Lee, K. M. and Jo, Y. M. "Adsorption Characteristics of Chemically Modified Sorbents for Carbon Dioxide," *Journal of the Korean Industrial and Engineering Chemistry*, **19**(5), 533-538 (2008).
27. Suh, S. S. and Lee, H. J., "Adsorption Characteristics of Flue Gas Components on Zeolite 13X and Effects of Impurity," *Korean Chemical Engineering Research*, **54**(6), 838-846(2016).

Authors

Se-Eun Jeong: Student, Greenhouse Gas Research Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Deajeon, 34101, Korea; jse717@kier.re.kr

Shuang Wang: Postdoctoral Researcher, Greenhouse Gas Research Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Deajeon, 34101, Korea; wangshuang@kier.re.kr

Yu-Ri Lee: Senior Engineer, Greenhouse Gas Research Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Deajeon, 34101, Korea; yrlee@kier.re.kr

Yooseob Won: Research Engineer, Greenhouse Gas Research Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Deajeon, 34101, Korea; yswon@kier.re.kr

Jae-Young Kim: Research Engineer, Greenhouse Gas Research Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Deajeon, 34101, Korea; jy_kim@kier.re.kr

Jae Jun Jang: Student, Greenhouse Gas Research Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Deajeon, 34101, Korea; j_jun0703@kier.re.kr

Hana Kim: Research Engineer, Greenhouse Gas Research Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Deajeon, 34101, Korea; hnkim@kier.re.kr

Sung-ho Jo: Principal Engineer, Greenhouse Gas Research Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Deajeon, 34101, Korea; shjo@kier.re.kr

Young Cheol Park: Principal Researcher, Greenhouse Gas Research Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Deajeon, 34101, Korea; youngchp@kier.re.kr

Hyungseok Nam: Assistant Professor, School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Deagu, 41566, Korea; namhs219@knu.ac.kr