

제올라이트 및 알칼리금속을 이용한 실내용 저농도 CO₂ 흡착제의 성능 평가

임윤희^{†*} · 이주열^{*} · 차유정 · 박병현

(주)에니텍 기술연구소, 경희대학교 환경응용과학과^{*}
(2013년 9월 10일 접수; 2013년 9월 25일 수정; 2013년 9월 25일 채택)

Evaluation for adsorption of low concentration of indoor CO₂ adsorption using zeolite and alkali metal

Yun-Hui Lim^{†*} · Ju-Yeol Lee^{*} · Yu-Joung Cha · Byung-Hyun Park

*Technology Institute, Anytech Co., Ltd, Sin-Do, Yeongtong-gu, Suwon,
Gyeonggi-do, 443-734, Korea*

**Dept. of Applied Environmental Science, Kyung Hee University,
1732 Deokyoung daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 446-407, Korea*

(Received September 10, 2013 ; Revised September 25, 2013 ; Accepted September 25, 2013)

Abstract : In this study, CO₂ adsorbent was produced for minimizing energy loss due to ventilation within the building. For improved selectivity about low concentration of CO₂ in multiple-use facilities, the ball type adsorbent was modified from a commercial zeolite, alumina, alkali metals and activated carbon with mixing LiOH, binder, and H₂O. We measured specific surface area, pore characteristic, and crystal structure of the modified adsorbent. Effects of alkalization on the absorptive properties of the adsorbents were investigated. Continuous column tests (2,000 ppm) and batch chamber tests (4m³, 5,000ppm) showed that the modified adsorbent indicated about the selectivity of CO₂ more than 9.7% (0.613 mmol/g) compared with ordinary adsorbents and CO₂ removal efficiency of 88.8% within 1 hour, respectively. It was estimated that the modified adsorbent was applicable to indoor environments.

Keywords : Carbon dioxide, Adsorption, Selectivity, Alkali metal, zeolite

[†]Corresponding author
(E-mail : grapeman77@hanmail.net)

1. 서론

실내 다중이용 공간을 비롯한 공동주택, 초고층 빌딩 등 건물의 에너지 비용 절감 방안으로 냉난방비 절감을 위한 건물의 기밀성이 강조되고 있으며, 이에 실내공기질 (indoor air quality) 개선을 위해 외부공기를 유입하는 환기시스템을 도입하고 있다. 하지만 주상복합공동주택의 경우 대부분 대도시 지역에 위치함으로써, 외기질 (out air quality)이 좋지 않기 때문에 다량의 외기 도입 시에, 외부 오염물질을 실내로 유입시킬 수 있는 문제점을 가지고 있다. 또한, 건축법상 건물의 창을 15° 이상 열수 없게 되어서 환기 또한 어려운 현실에 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 임의적인 개별 환기설비를 적용하여 적정 실내온도를 유지하면서 실내공기질에 대한 개선을 유도하고 있으나, 여름철 및 겨울철의 냉난방기 가동시 외부온도차에 의해 환기시 에너지 손실 및 일정온도 유지를 위한 추가 비용을 유발시킴으로써 에너지 비용을 최소화할 수 있는 고효율 공조시스템의 개발이 필요하다. 이와 더불어 현대 도시인들은 하루 일과의 90% 이상을 실내에서 생활함으로써 실내공기질에 대한 관리기준이 강화되고 있다 [1,2,3]. 정부는 2006년 2월부터 100세대 이상의 공동주택에서 0.7 회/H 이상의 상시 환기 시스템 설치를 의무화 하고 있다 [4,5].

이산화탄소는 실내 공기질의 오염도 척도의 기준으로 건축기준법 상 1,000 ppm 이하로 유지할 것을 권고하고 있으며, 실내공간의 이산화탄소 농도는 지구온난화 (Global Warming)의 고농도 이산화탄소(10% 이상) 처리와는 달리 5,000 ppm 이하이기 때문에 저농도에 대한 선택도 확보가 매우 중요하다 [6]. 이산화탄소의 분리포집 기술로는 흡수법, 막분리법, 흡착법 등이 있으나, 저농도 이산화탄소에 대한 상온제어 방법으로는 고체의 흡착제를 이용한 건식흡착법이 가장 효과적인 공정으로, 다양한 흡착제 개발 연구가 활발하게 진행되고 있다 [7,8].

이산화탄소 흡착법에 적용되는 흡착제로는 활성탄, 제올라이트, 활성알루미나 등이 있다. 제올라이트는 결정성 알루미나 실리케이트로서 단일 크기의 미세공극을 가지고 있는 친수성과 극성분자에 대한 우수한 흡착성을 가지고 있어서, 물리적 흡착을 통해 이산화탄소를 포집한다 [9,10]. 활성탄의 경우 제올라이트에 비해 상대적으로 수

분의 영향이 크지 않으며, 비표면적(m^2/g)이 커서 흡착할 수 있는 유효면적이 넓은 편이다. 또한 표면의 산화물 그룹 때문에 약산성인 이산화탄소 보다는 비극성이나 극성이 약한 유기 분자들을 제거하기 위한 VOCs 제거용 흡착제로 널리 사용되고 있다 [11,12,13]. 알루미늄은 무기 다공성 고체로서 활성탄에 비해 비표면적이 작아 흡착효율은 떨어지나 산, 알칼리, 유기용제 등에 거의 영향을 받지 않는 뛰어난 내약품성 및 강도 등 내구성이 우수하여 첨가제로 사용하기 적합하다.

저농도 이산화탄소 (3,000 ppm)를 타겟으로한 흡착제 개발의 경우 이경미 등 (2008) 이온교환법을 이용하여 LiOH를 개질한 제올라이트는 0.39 mmol/g ($p/p_0 = 0.2 \text{ atm}$)으로 비교물질인 상용 제올라이트(0.5 mmol/g) 보다 낮은 흡착량을 보였다. 또한 이경미 등 (2009) 활성탄을 지지체로 LiOH를 함침하여 개질한 경우, 0.25 mmol/g ($p/p_0 = 0.2 \text{ atm}$)으로 비교물질인 상용 활성탄보다 향상되었으나, 전체적으로 낮은 선택도를 보여주는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 앞서 설명한 바와 같이 건물의 에너지 효율 향상을 위한 지능형 환기시스템 (smart ventilation system) 적용하고자 하며, 주요 요소기술인 이산화탄소 흡착제 및 흡착모듈 개발을 통해 실내의 이산화탄소를 저감함으로써 환기횟수를 줄여 에너지 사용량을 최소화하고자 하였다. 즉, 저농도 이산화탄소에 대한 흡착성능 향상을 위하여 알칼리 금속을 선정하였으며, 3종류의 상용 흡착제를 이용하여 제조한 흡착제의 물성 및 흡착능 평가를 통해 비교, 분석하였다.

2. 실험

2.1 시료제조 및 물성분석

본 연구에서 사용된 지지체인 제올라이트 13X (UOP, 2mm)와 흡착제 강도 및 물리적 특성 향상을 위한 첨가제인 산화알루미나 (UOP, 2mm) 및 활성탄 (Cargon, pellet type)은 그라인더를 이용하여 powder 형태로 분쇄하여 사용하였다. 이산화탄소에 대한 흡착선택도 향상을 위한 주요 알칼리 물질인 LiOH ($LiOH \cdot H_2O$, Daejung)는 단계별 (3 step : 50-110-300 °C)로 일정시간 (3h) 건조 및 소성 후 그라인더를 사용하여 powder 형태로 분쇄하였다. 미세한 분말형태의 시료를 일정비율의 바인더와 물을 이용하여 혼합

및 반죽과정을 거친 후, ball (2~4mm) 형태로 빻은 후 2단계 (50-100 °C) 건조 과정을 통해 흡착제를 제조하였다 [9,10]. Fig. 1은 본 연구에 사용된 흡착제의 제조공정을 나타낸 것이다. 제조된 각 흡착제는 첨가제 및 혼합비율에 따라 다

음과 같이 명명하였다. 또한 AEC-11과 12는 제올라이트, 산화알루미늄, 활성탄을 혼합한 것으로 각 물질에 표기된 괄호() 안의 수치는 첨가된 비율을 의미한다.

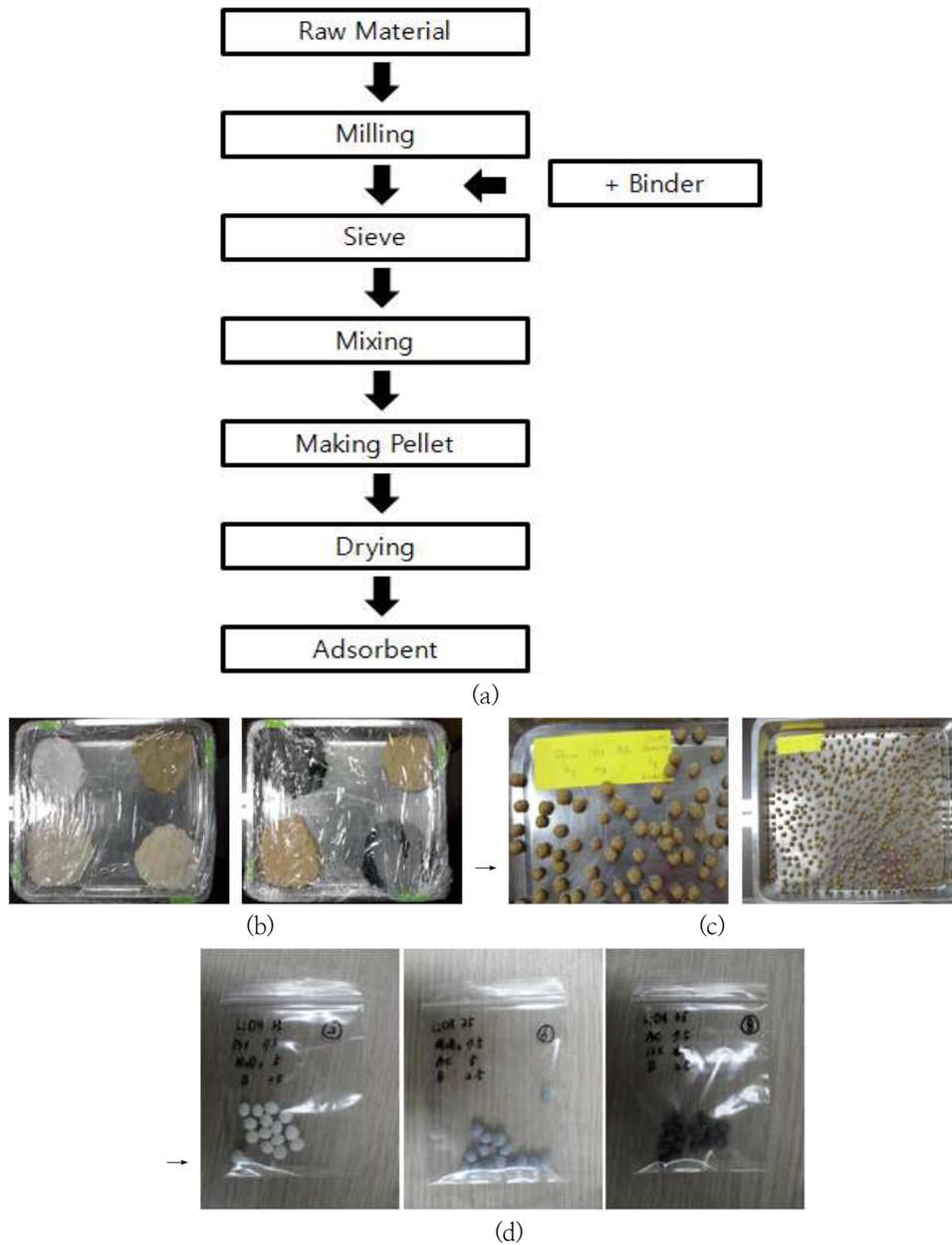


Fig. 1. Preparation process of adsorbent.
 (a) flow chart, (b) dough and low-temp. ripening step, (c) modify of ball type, (d) product.

- AEC-01 : LiOH : Zeolite
- AEC-02 : LiOH : Zeolite : Alumina
- AEC-03 : LiOH : Zeolite : Activated carbon
- AEC-04 : LiOH : Alumina
- AEC-06 : LiOH : Alumina : Activated carbon
- AEC-07 : LiOH : Activated carbon
- AEC-11 : LiOH : Zeolite(2) : Alumina(1) : Activated carbon(2)
- AEC-12 : LiOH : Zeolite(1) : Alumina(2) : Activated carbon(2)

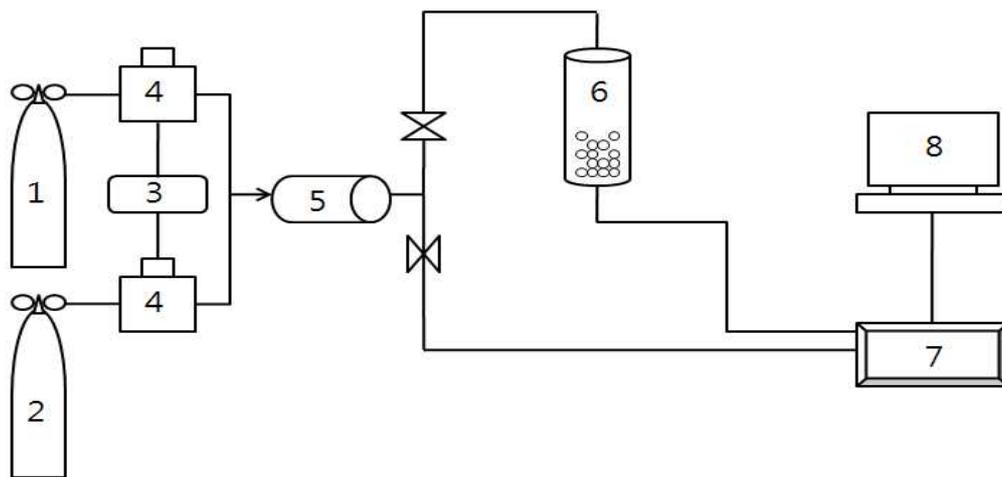
제조된 흡착제의 비표면적 및 기공특성을 분석하기 위하여 질소 흡·탈착법을 이용한 BET 측정기 (BEL SORP-mini II, Japan)를 사용하였다. 또한 화학적 결정 구조는 XRD (Rigaku Inst., JP/MAX-2500H)를 통해 분석하였고, 측정조건은 40 kV, 40 mA 출력으로 2θ 범위 10~60°, 주사속도는 6° /min으로 측정하였다.

2.2 실험장치 및 방법

Fig. 2와 같이 제조된 흡착제의 성능평가를 위하여 부피 1L의 컬럼을 이용하여 이산화탄소의 흡착곡선 및 흡착량을 확인하였다. 이산화탄소 실

내 저농도인 2,000 ppm (혼합가스: N₂)을 기준으로 조절하여 초기 농도를 유지한 다음, 흡착제 (30g)가 충전된 컬럼을 통과함으로써 흡착에 의한 이산화탄소 농도변화를 CO₂ analyzer (SenseAir, NDIR 방식)를 이용하여 실시간으로 측정하였다.

Fig. 3은 풍동장치와 풍동장치 내 장착된 이산화탄소 흡착필터 모듈이다. 흡착성능이 확보된 흡착제의 지능형 스마트환기 요소기술로 300×300 mm의 덕트에 설치하기 위하여 제작된 필터형태 아크릴모듈 내의 흡착층 높이 산정을 위하여 흡착제가 채워진 높이별 차압실험을 진행하였다. 또한 선정된 흡착층 높이로 채워진 흡착제 필터모듈을 부피 4 m³의 챔버에 전열교환기와 연결된 덕트에 장착하여 회분식 실험을 통해 제거율을 확인하였다. 이때 챔버내 이산화탄소 농도는 5,000 ppm으로 유지한 다음 전열교환기를 가동하였으며, 전열교환기 단수별(유속) 이산화탄소 농도 저감 패턴을 비분산적외선법을 적용한 이산화탄소 전용 분석기를 사용하여 측정하였다. Fig. 4는 회분식 실험에 사용된 전열교환기 및 챔버 장비이다.



1	CO ₂ gas cylinder	5	Gas mixer
2	N ₂ gas cylinder	6	Sus-reactor
3	Controller	7	CO ₂ analyzer
4	MFC	8	Data logger

Fig. 2. Schematic diagram of experimental procedure.

Fig. 3. Experimental equipment for wind tunnel and CO₂ filter module.

Fig. 4. Experimental equipment for chamber test.

3. 결과 및 고찰

3.1 흡착제의 특성분석

본 연구에서는 환기에 의한 에너지 비용을 최소화하기 위한 지능형 환기시스템의 요소기술인 이산화탄소 흡착제 성능향상을 위한 흡착제 제조 및 흡착성능 평가와 덕트 내 적용을 위한 필터모듈의 개발에 관한 것이다.

Table 1은 제조된 흡착제의 성질을 나타내었다. 흡착제의 비표면적 및 체적과 기공의 크기를

분석한 결과로, 제조된 흡착제의 경우 비표면적이 매우 낮은 것으로 분석되었다. 저농도 이산화탄소에 대한 선택도 확보를 위한 화학적 흡착점 향상물질로 염기도가 우수한 LiOH를 주요물질로 선정하고, 이에 첨가물질을 혼합, 반죽한 다음 수작업을 통한 ball 타입으로 제조하는 과정에서 외부적인 힘과 첨가제의 비율이 LiOH에 비해 매우 적은 양만 들어감으로써 첨가물질로 사용된 상용 흡착소재(제올라이트, 산화알루미나, 활성탄)보다 낮은 비표면적 값을 나타낸 것으로 사료된다. 또

Table 1. Properties of Adsorbents

	R13X	RAO	RAC	AEC-01	AEC-02	AEC-03	AEC-04	AEC-06	AEC-07	AEC-11	AEC-12
S_{BET} (m^2/g)	392.67	149.81	1353	8.13	24.4	14.46	37.93	32.12	12.55	57.84	63.33
V_{PQRE} (cm^3/g)	0.317	0.390	0.621	0.048	0.092	0.114	0.131	0.196	0.200	0.216	0.266
D_p (nm)	3.23	10.43	1.84	23.85	15.01	31.63	13.79	24.38	63.76	14.97	16.79

한 제올라이트만 첨가된 흡착제 (AEC-01)의 경우 낮은 비표면적 ($8.13 m^2/g$) 및 기공부피 ($0.048 cm^3/g$)를 보인 반면 기공직경의 경우 $23.85 nm$ 로 분석되었다. 활성탄만 첨가된 흡착제 또는 제올라이트와 활성탄이 첨가된 흡착제 (AEC-03, 06, 07)의 경우, 제올라이트만 첨가한 AEC-01보다 비표면적, 기공부피 및 기공직경크

기가 증가된 것을 확인할 수 있다. 이는 활성탄이 가진 넓은 비표면적으로 인한 물성 향상을 가져온 것으로 사료된다 [11,12]. 반면 알루미늄이 첨가된 흡착제 (AEC-02, 04, 11, 12)의 경우 비표면적과 기공부피는 향상되었으나, 기공직경크기는 감소한 것을 확인할 수 있었다. 전반적으로, 제조된 흡착제는 상용흡착제에 비해 비표면적은

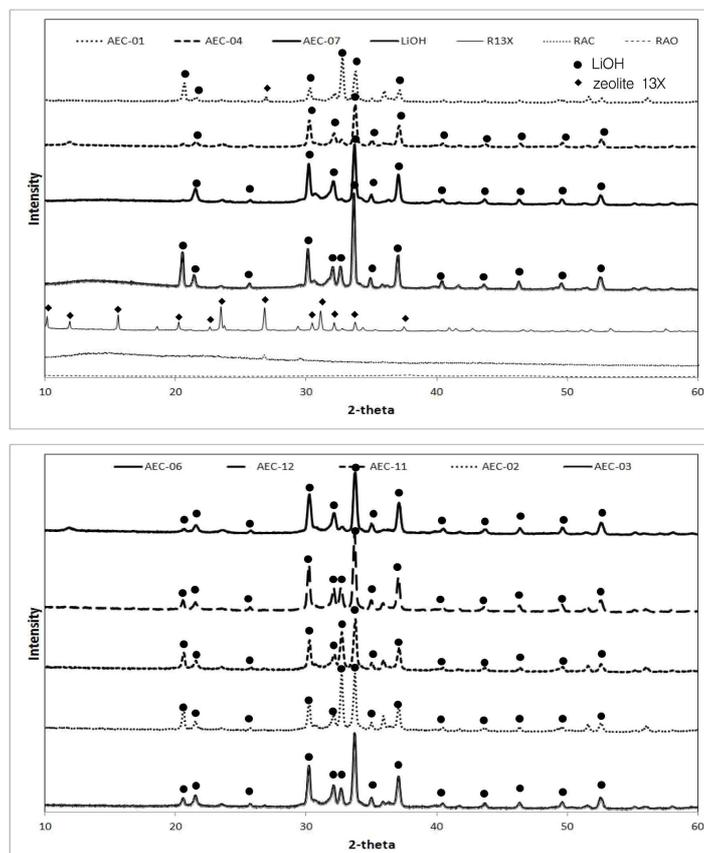


Fig. 5. XRD patterns of adsorbents (●: LiOH, ◆: zeolite 13X).

낮고 기공직경이 10~100 nm로 물리적 흡착점보다 화학적 흡착점이 차지하는 비율이 더 높은 것으로 분석되었다.

Fig. 5는 상용흡착제와 이를 이용하여 제조한 흡착제의 XRD 측정 결과이다. 상용 산화알루미늄과 활성탄은 비결정구조로 피크가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 첨가제 종류 및 혼합비율에 따라 피크의 강도 및 형태의 차이가 미세하게 나타나나 전체적으로 주요성분인 LiOH의 결정구조를 유지하는 것으로 분석되었다.

3.2. 이산화탄소 흡착시험

3.2.1. 연속식 흡착시험 (column test)

Fig. 6은 흡착제의 반응시간에 따른 흡착능을 나타내었다. 흡착제 별 이산화탄소 흡착에 따른 파과곡선(breakthrough curve)으로 첨가물질인 상용 제올라이트 (R13X), 산화알루미늄 (RAO), 활성탄 (RAC)을 시험한 결과 활성탄의 경우 저농도 이산화탄소에 대한 선택도가 거의 없으며, 빠른 시간내 포화되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 활성탄 표면의 산화물 그룹으로 약산성인 이산화탄소와의 산-염기 결합을 유도할 수 있는 흡착점이 극히 적음으로써 이산화탄소에 대한 선택도가 매우 낮은 것으로 판단된다 [14,15]. 이산화탄소 초기 농도 변화, 즉 파과점(breakthrough point)에서의 농도는 제올라이트는 1200 ppm, 산화알루미늄의 경우 700 ppm까지 저감되는 것을 확인할 수 있었다. 저농도 이산화탄소를 선택적으로 포집하기 위한 주요물질인 LiOH와 제올라이트 13X, 바인더를 일정비율로 혼합하여 제조한 기존 흡착제(AEC-01)의 경우 초기 907 ppm까지 떨어졌다. 새롭게 제조된 흡착제(AEC-02,03,04,06,07,11,12)는 기존 흡착제인 AEC-01의 흡착 성능개선을 위하여 산화알루미늄과 활성탄을 일정비율로 첨가하여 제조한 흡착제로, 02와 12를 제외하고는 이산화탄소 포집에 의한 초기 농도가 900 ppm이하로 흡착능이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 이는 XRD 결과에서도 나타났듯이, 결정구조가 주요물질인 LiOH 구조를 유지함으로써 저농도 이산화탄소에 대한 화학적 흡착을 유도함으로써 흡착효율을 향상시킨 것으로 사료된다. 즉, 이산화탄소는 약산성 가스로 약한 루이스산으로 전자쌍 수용체의 역할을 하며, 제조된 흡착제의 경우 LiOH에 의해 표면 염기도 향상 즉, LiOH로 인해 화학적 흡착점의

비율 증대로 인한 이산화탄소와의 산-염기 결합을 유도함으로써 저농도 이산화탄소에 대한 선택도가 향상된 것으로 사료된다 [11,13,16]. 즉, 식 (1)과 같이 LiOH와 CO₂가 화학반응을 유도하게 된다.

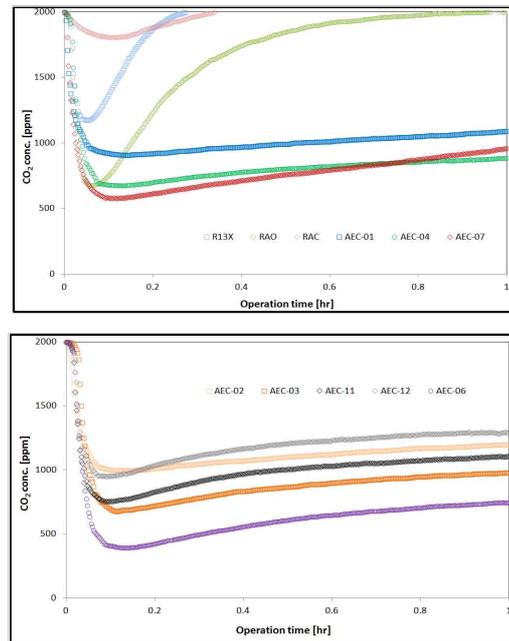
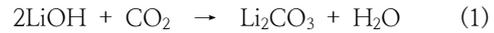


Fig. 6. Adsorption efficiency according to operation time of adsorbents.

Table 2는 첨가물질인 상용 흡착제와 제조된 흡착제의 흡착량을 산정한 것으로 파과곡선 그래프에서도 확인한 바, 상용 흡착제의 경우 1시간 내로 포화되는 것을 확인할 수 있다. 또한 활성탄의 경우 문헌연구와 같이 이산화탄소에 대한 선택도가 매우 낮으며, 산화알루미늄이 0.057 mmol/g으로 세 흡착제 중 가장 우수한 흡착량을 보여주었다. 또한 기존 흡착제(AEC-01)의 경우 5.5 시간 내 포화가 되었으며, 0.613 mmol/g으로 상용흡착제의 대비 9.7%이상 향상된 것을 확인할 수 있었다. 또한 흡착제의 내구성 및 수명 향상을 위해 첨가한 첨가제의 추가 및 혼합비율 조건에 따라 1시간 기준 흡착량을 산정한 결과 AEC-06의 경우 AEC-01 대비 약 0.4% 향상된 것을 확인할 수 있었다.

Table 2. Adsorption Amount of Adsorbents

	Total adsorption amount		Adsorption amount / 1 hr (mmol/g)
	Adsorption amount (mmol/g)	Operation time (hr)	
RAC	0.002	0.34	
R13X	0.017	0.27	
RAO	0.057	0.8	
AEC-01	0.613	5.5	0.173
AEC-04	0.774	7	0.191
AEC-07	0.529	5	0.213
AEC-02			0.153
AEC-03			0.192
AEC-11			0.175
AEC-12			0.141
AEC-06			0.238

3.2.1. 차압 및 회분식 흡착시험 (chamber test)

Fig. 7은 흡착층 변화로 유속에 따른 차압(압력강화)을 나타내었다. 회분식 성능평가에 앞서 적용대상인 덕트 (300×300 mm) 내에 장착하기 위한 흡착층 높이 선정에 위한 유속별 (0.5~3.5 m/s) 차압시험 결과이다. 아크릴 필터에 10 mm에서 최대 60 mm의 흡착제를 채운 후 유속에 따른 차압시험 결과 2 m/s에서 20 mmH₂O의 압력손실 유지를 목표로 하기 때문에 흡착층 높이는 30 mm로 선정하였다.

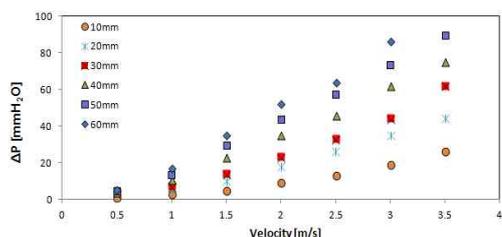


Fig. 7. Differential pressure according to the flow velocity with a variation of adsorbent layer.

Fig. 8은 총 열교환기력에 따른 유속을 나타내었다. 챔버 시험에 적용한 전열교환기의 단수별 (5~35단) 유속을 측정하는 것으로 2 m/s에서 7.2

m/s의 유속을 확인할 수 있었다.

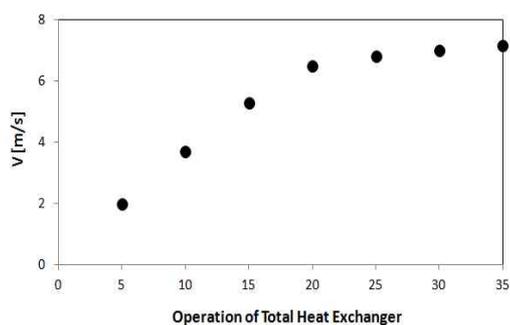


Fig. 8. The flow velocity according to the strength of total heat exchanger.

Fig. 9는 각 흡착층에서 시간변화에 따른 흡착능이다. 선정된 최적의 흡착제 및 이를 충전한 흡착필터 모듈의 성능평가를 위하여 회분식 즉, 4 m³의 챔버내 덕트 및 전열교환기를 설치한 후 전열교환기 유속에 따른 이산화탄소 제거정도를 확인한 것이다. 유속 (단수 강도)이 증가할수록 파과점에 도달하는 시간이 단축되는 것을 확인할 수 있었으며, 각 단수별 1시간 내로 이산화탄소 농도가 560 ppm까지 저감되었다. 즉, 초기 5,000 ppm의 이산화탄소의 회분식 시험 결과 88.8%의 제거율을 확보하였다.

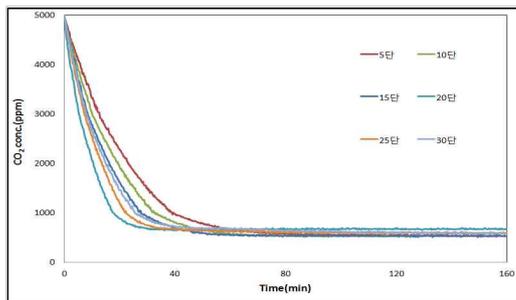


Fig. 9. Adsorption efficiency according to reaction time with a variation adsorbent layers.

4. 결론

본 연구는 건물의 환기에 의해 발생하는 에너지 비용을 최소화하기 위하여 실내공기질의 오염도 척도 기준이 되는 이산화탄소 농도를 제어할 수 있는 지능형 환기시스템을 개발하고자 한다. 이에 주요 요소기술인 저농도 이산화탄소 (2,000 & 5,000 ppm)를 제거하기 위해 개발한 흡착제의 흡착성능을 비교, 평가하였다.

첨가물질로 사용한 상용 흡착제 (R13X, RAO, RAC) 및 제조된 흡착제의 성능평가를 위한 컬럼 시험 결과, 상용 흡착제의 경우, 1시간 내 포화되었으며, 0.002 (RAC), 0.017 (R13X), 0.057 (RAO) mmol/g으로 매우 낮은 흡착량을 보여주었다. 반면 제조된 흡착제의 경우 1시간의 운전 시간을 기준으로 흡착량을 산정한 결과, 기존 흡착제 제조 비율을 이용하여 제조한 흡착제 (AEC-01, 0.173 mmol/g)에 비해, AEC-02와 12를 제외하고는 최대 1.4% (AEC-06, 0.238 mmol/g)의 흡착량 향상을 확인할 수 있었다.

선정된 최적의 흡착제를 지능형 환기시스템에 적용하기 위해 300×300 mm의 덕트 내 장착하기 위하여 풍동시험 장치를 이용하여 2 m/s의 유속에서 20 mmH₂O의 압력손실을 유지하는 흡착제 충전층 높이를 산정한 결과, 30 mm가 가장 적합하였다. 이를 통해 제조된 흡착제가 충전된 필터 모듈의 회분식의 챔버 실험을 통해 이산화탄소 제거효율을 확인한 결과 전열교환기 단수측, 유속에 상관없이 1시간 이내로 88.8 %의 제거효율을 확보하였다.

감사의 글

이 연구는 지식경제부 에너지기술개발사업의 “에너지효율 15% 개선을 위한 CO₂ 저감용 흡착 모듈 및 연계 환기시스템 개발” 연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다(과제번호 : 20122020100210).

REFERENCES

1. J. M. Kim, Status and prospect of carbon dioxide storage technologies, KIC News, 12(2), 31(2009).
2. Y. H. Lim, K. M. Lee, H. S. Lee and Y. M. Jo, Adsorption Capacity of CO₂ Adsorbent with the Pretreatment Temperature, KOSAE, 26(3), 286(2010).
3. P. E. Jr. McNall, Indoor air quality: a status report, ASHRAE Journal, 33(1986).
4. J. M. Choi and S. W. Cho, A Study on the Indoor Airflow Pattern by Changing the Location of Mechanical Terminal Unit, SAREK, 21(3), 193(2009).
5. H. S. Han, C. Y. Jang and J. S. Lee, Evaluation of Building Energy Rating System according to the change of ventilation rating, SAREK, 588(2010).
6. G. S. Oh, G. J. Jung and Y. B. Im, Experiment on Reduction Effect of CO₂ Concentration with Indoor Plants under Illuminance Condition in Office, AURIC, 11(4), 233(2009).
7. K. H. Kim, Y. H. Lim and Y. M. Jo, Adsorption Isotherm of Low Level Carbon Dioxide in Indoor Air, J. Korean Soc. Indoor Environ., 7, 113 (2010).
8. J. U. Han, D. J. Kim, M. Kang, J. W. Kim, J. M. Kim and J. E. Yie, Study of CO₂ Adsorption Characteristics on Acid Treated and LiOH Impregnated Activated Carbons, J. Korean Ind. Eng. Chem., 16(3), 312 (2005).
9. J. Y. Lee, D. S. Park, Y. M. Cho, S. P. Kwon, Y. H. Hwang, H. J. Song and S. B. Lee, A Study on the Low Concentration

- Carbon Dioxide Adsorbent and Optimal Conditions, J. of Korean Oil Chemists' Soc., 29(1), 1(2012).
10. K. M. Lee and Y. M. Jo, Adsorption Characteristics of Chemically Modified Sorbents Carbon Dioxide, KSIEC, 19(5), 533(2008).
 11. K. M. Lee and Y. M. Jo, Ambient Adsorbent of low-level Carbon Dioxide by Metal treated Activated Carbon, KOSAE, 4, 316(2009).
 12. C. Pevida, M. G. Plaza, B. Arias, J. Feroso, F. Rubiera and J. J. Pis, Surface modification of activated carbons for CO₂ capture, Applied Surface Science, 254(22), 7165(2008)
 13. H. H. Lim, Y. H. Lim and Y. M. Jo, Characterization of AC-based adsorbents for CO₂ capture, Journal of Korean Society for Indoor Environment, 9(1), 9(2012).
 14. M. G. Plaza, C. Pevida, A. Arenillas, F. Rubiera, J. J. Pis, CO₂ Capture by Adsorption with nitrogen enriched carbon, 86(14), 2204(2007).
 15. K. M. Lee, Y. H. Lim and Y. M. Jo, Comparison of modified zeolite and activated carbon for CO₂ adsorption, Industrial & Engineering Chemistry Research, 51(3), 1355(2012).
 16. K. M. Lee, Y. H. Lim and Y. M. Jo, Evaluation of moisture effect on low level CO₂ Adsorption by ion-exchanged zeolite, Environmental Technology, 33(1), 77(2012).