

## 저농도 이산화탄소 포집용 흡착제 개발 및 최적조건에 관한 연구

이주열<sup>†</sup> · 박덕신\* · 조영민\* · 권순박\* · 황윤호\*\* · 송형진\*\* · 이상봉\*\*

<sup>†</sup>(주)에니텍 기술연구소 · \*철도기술연구원

(2011년 12월 15일 접수 ; 2012년 2월 16일 수정 ; 2012년 2월 18일 채택)

### A Study on the Low Concentration Carbon Dioxide Adsorbent and Optimal Conditions

<sup>†</sup>Ju-Yeol Lee · \*Duck-Shin Park · \*Young-Min Cho · \*Soon-Park Kwon  
\*\*Yoon-Ho Hwang · \*\*Hyung-Jin Song · \*\*Sang-Bong Lee

<sup>†</sup>Technology Institute, Anytech Co., Ltd, Sin-Dong, Yeongtong-Gu, Suwon, 443-734, Korea

<sup>†</sup>\*\*Korea Railroad Research Institute, Woram-Dong, Uiwang-Si, Gyeonggi-Do, Korea

(Received December 15, 2011 ; Revised February 16, 2012 ; Accepted February 18, 2012)

**요약** : 본 논문은 다양한 시설내에 적은 농도의 CO<sub>2</sub> 제거를 위한 선택적 CO<sub>2</sub> 흡수능력을 향상시킨 흡착제의 효율평가에 관한 것이다. 직경 4mm의 구형 흡착제는 시판용 제올라이트에 첨가제, 물, 바인더, LiOH를 섞어 제조하였다. 칼럼테스트에서 400분 이내에 90% 이상의 CO<sub>2</sub> 흡착효율을 나타내었고, 흡착필터모듈 흡착능력을 평가하기 위해 회분식과 연속식타입의 챔버테스트가 시행되었다. 회분식테스트에서 30분 이내에 약 92%의 CO<sub>2</sub>가 제거되는 것을 확인하였다. 연속식테스트에서 30분 이내 70%의 CO<sub>2</sub>가 제거효율을 보였으며, 2,500ppm 이상의 CO<sub>2</sub>가 제거되는 것을 확인하였다. 재현성테스트를 수차례 수행한 결과 15일동안 1,000ppm 이상의 CO<sub>2</sub>가 연속적으로 제거됨을 보였다. TGA 분석법을 이용한 흡착량 분석에서 흡착제 g당 5.0mmol의 CO<sub>2</sub>를 흡착하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 개발된 흡착제는 상온에서 저농도 CO<sub>2</sub> 실내환경에 적용가능한 것으로 판단된다.

**Abstract** : In this study, CO<sub>2</sub> adsorbent was developed for removing low concentration of CO<sub>2</sub> in multiple-use facilities. The efficiency of the adsorbent which was improved selective CO<sub>2</sub> adsorption capabilities was evaluated. The pellet type adsorbent was modified from a commercial zeolite with mixing LiOH, binder, additives, and H<sub>2</sub>O. Column tests showed over 90 % of CO<sub>2</sub> was adsorbed within 400min. Chamber tests including batch and continuous types were performed for evaluating the adsorbent module. By batch tests, it was evaluated that about 92 % of CO<sub>2</sub> was removed within 30 min. By continuous tests, 70% of CO<sub>2</sub> was removed within 30 min. It was analyzed that over 2,500 ppm of CO<sub>2</sub> was continuously removed as shown chamber tests. The reproducibility tests repeatedly performed for 15 days shows that over 1,000 ppm of CO<sub>2</sub> was continuously removed. Adsorption capacity of the developed adsorbent was 5.0mmol

<sup>†</sup>주저자 (E-mail : tom9341@paran.com)

CO<sub>2</sub>/g adsorbent which was analyzed by TGA. It was estimated that the modified adsorbent was applicable to low CO<sub>2</sub> concentration and low temperature of indoor environment.

*Keywords* : carbon dioxide, adsorption, air cleaning, column test, chamber test.

## 1. 서론

최근 급속한 산업화 및 자연생태를 고려하지 않은 무분별한 도시개발, 인구집중과 교통량의 증가는 대기환경의 오염을 더욱 악화시키고 자연재해의 원인이 되고 있다. 특히, 우리나라의 대도시 지역은 밀집된 도시공간의 이용률을 높이기 위한 지하공간의 이용이 확대되고 에너지 이용효율을 높이기 위한 밀폐된 단열건축구조의 증가 추세에 따라 실내공기질은 더욱 악화되고 있는 실정이다. 미국 EPA (Economic Partnership Agreement)의 연구에 의하면, 성인이 하루의 약 80 % 이상을 실내공간에서 생활하고 있는 것으로 조사되었으며, 국내의 경우 성인이 하루 24시간 중 집, 사무실, 학교 등 건물에서 18.7시간, 차량 실내에서 1.2시간, 외부에서 2.1시간을 보내는 것으로 조사되어 약 83 % 이상의 시간을 실내공간에서 생활하고 있는 것으로 나타났다. 실내환경에서 체류하는 시간은 노인 인구층의 증가추세와 경제적 수준의 향상으로 인해 향후 그 비중이 더욱 커질 것으로 예상되고 있다[1, 2]. 이러한 현대인의 생활양식의 변화에 의해 최근 도시화 지역에서의 실내공기질과 관련된 문제가 새로운 환경 이슈로 부각되고 있으며, 쾌적한 실내환경에 대한 요구 또한 증가함에 따라 실내공기질을 개선하기 위한 모니터링 및 적정관리가 필요한 실정이다.

일반적으로 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)는 실내공기질과 환기상태를 점검하는 기준척도가 되는 기체상 물질로 실내공간에서 이산화탄소의 농도가 증가하면 호흡에 필요한 산소의 농도가 상대적으로 부족하게 되므로 인체에 악영향을 미치게 되어 일산화탄소(CO)와 함께 중요한 실내공기오염물질 중 하나로 분류되고 있으며, 실내오염의 주요 지표로 사용된다[3, 4]. 이산화탄소의 대기분포는 0.03 %이나 산업혁명 이후 급속히 증가하여 1960년 320 ppm에서 2010년 390 ppm을 초과하였으며 실내에서의 환기조건은

미국에서는 2,000 ppm, 우리나라와 일본은 1,000 ppm이하를 권장하고 있다[5, 6]. 실내공기 중의 이산화탄소는 사람의 호흡에 의해 주로 배출되지만 부엌에서 요리 시에도 발생하는 대기배출물로서 대기 중의 이산화탄소는 대기의 자정작용에 의해 희석되거나 제거되지만, 실내공기환경에서는 환기장치를 설치하거나 또는 공기정화기와 같은 별도의 제거장치를 하지 않고는 저절로 없어지지 않는다. 실내 공기 중의 이산화탄소는 농도에 따라 인체에 영향을 미치게 되는데 건강한 사람이 농도 1,500 ppm의 이산화탄소에 폭로되면 가벼운 정도의 대사 장애를 일으키고 3,000 ppm 이상으로 증가하면 호흡량과 호흡수가 증가하며, 4,000 ppm 이상이 되면 폐 내부의 이산화탄소가 증가하기 시작하여 호흡곤란, 두통, 권태, 현기증, 구토, 불쾌감 등의 증상을 일으킨다(Table 1). 짧은 시간이면 공기 중의 이산화탄소 농도가 5,000 ppm이 될 때까지 참을 수 있으나, 그 이상이면 호흡곤란이 초래되어 심하면 치명적인 손상을 입게 된다. 7,000~10,000 ppm에서는 수분 내에 혼절할 수 있으며, 치명적일 수 있다[7].

최근 이산화탄소는 지구온난화의 주요 원인 물질로 주목되고 있는데 이러한 이산화탄소 배출량을 감소시키기 위해 이산화탄소 포집 및 저장기술(carbon capture & storage technology)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 지금까지 연구 보고된 이산화탄소 포집 기술에는 막분리법, 흡수법, 흡착법 등의 기술이 있다. 이중 실내공기 중의 이산화탄소 제어기술로는 최근 흡착법에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 막분리법은 가격이 높고 에너지 소비가 많은 단점이 있고, 아민흡수법은 가격이 높고 폐수가 다량 발생되며, 기기부식 등 단점이 있는 반면 흡착법은 에너지 소비가 적고 회수하여 다시 사용 할 수 있어 경제적인 저감기술이라는 평가를 받고 있으며, 응용이 간편한 장점이 있다[8]. 흡착법은 낮은 농도와 낮은 온도에서 적용이 가능하며, 낮은 에너지비용으로

Table 1. CO<sub>2</sub> Poisoning Symptoms

Concentration (%)	Symptoms	Health care
1	Allowable concentration for public health	Harmless
2	No conscious symptoms for hours breathing Offensive	Harmless
3	Increasing a breathing rate	Undesirable long hours breath Ventilation needs
4	Stimulate mucous membrane of eyes and throat Occur headache, syrigmus, verigo hyperglycaemia	Quick fresh air supply
6	Remarkably increasing a breathing rate	Quick fresh air supply
8	Difficulty in breathing	Quick fresh air supply
10	Visual disturbance, chill, insensibility within 2-3 min Health hazard or death without medical care	Artificial respiration within 30min
20	Death from paralysis of a central nerves	Immediate artificial respiration Fatal condition

효과를 얻을 수 있으므로 저농도의 실내 이산화탄소 제어 방법으로 유리한 조건을 가지고 있다.

흡착공정에서 흡착제의 선정은 흡착성능을 결정하는데 가장 중요한 요소이다. 흡착제는 흡착량 뿐만 아니라 제거하고자 하는 물질에 대한 높은 선택도를 가지고 있어야 하며, 반복시행 후에도 기계적 강도가 유지되어야 한다[9]. 보편적으로 사용되는 있는 흡착제로는 활성탄, 실리카겔, 제올라이트, 활성알루미늄 등이 있으며, 이중 이산화탄소 제거용 흡착제로는 활성탄이나 제올라이트 등을 사용한다. 활성탄은 다공성 탄소질 집합체로 내부표면적이 넓고, 비극성이며, 물리화학적 안정성이 뛰어나 광범위하게 활용되고 있지만, 순수 활성탄으로는 이산화탄소에 대한 흡착성능의 한계가 있으므로 표면 개질에 대한 연구가 진행되고 있다[10].

본 연구에서는 이산화탄소의 선택적 흡착능이 우수한 제올라이트를 기본 흡착제로 개질을 통해 밀폐된 실내 공간에서 배출되는 저농도 이산화탄소를 선택적으로 흡착하는 처리기술을 개발하여 에너지 소비가 적고 유지관리비용이 경제적인 뿐 아니라 쾌적한 실내환경을 유지하

는 것을 목표로 하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 흡착제 제조

제올라이트는 결정성 알루미늄 실리케이트로서 단일 크기의 미세공극을 가지고 있어 친수성, 극성분자에 대한 우수한 흡착성을 나타내는 특성을 가지고 있으며, 물리적 흡착을 통하여 이산화탄소를 제어한다. 제올라이트는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 SiO<sub>2</sub> 사면체로 구성된 삼차원 입체구조이며 내부의 열린 pore와 channel로 구성되어있고, 구형의 시료 크기는 2 mm~5 mm이다[11]. 제올라이트는 3차원의 pore 구조로 인하여 이산화탄소 분리에 매우 효과적이다. 특히 제올라이트의 양이온은 pore를 효과적으로 폐색시킴으로써 흡착과정 중 특정분자를 차단할 수 있으며, 또한 공극 내에서 높은 정전기 구배를 형성함으로써 가스의 선택적 흡착분리를 가능하게 한다. 하지만 실내공기중의 저농도 이산화탄소를 물리적 흡착만으로는 제어하기에는 어려움이 있으므로 화학적 흡착을 하는 알칼리금속 수산화물을 혼합하여 개질하면 제올라이트를 이용

한 물리적 흡착만으로 제어효율이 낮았던 실내 공기중의 저농도 이산화탄소를 더욱 효과적으로 제거할 수 있다. 알칼리금속과 알칼리토금속은 흡착제 표면에 염기점을 제공하여 이산화탄소와 같은 산성가스 흡착에 대한 선택도를 증가시킬 수 있다. 특히 X-type 제올라이트는 알루미늄 구조를 많이 가지고 있어 금속의 양이온 교환을 증가시킬 수 있어 이산화탄소용 흡착제로 이용되고 있다. 제올라이트의 구조 단위인 (Si, AlO<sub>4</sub> 사면체 내에서 Si<sup>4+</sup>의 일부가 Al<sup>3+</sup>로 치환됨으로써 발생하는 전하결손을 보상하기 위하여 양이온들이 구조 내에 개입된다 [12]. 본 연구에서 금속이온으로 사용한 LiOH는 대기중에 노출이 되면 대기중의 이산화탄소 일부를 분말에 흡착 고정화 시킬 정도로 이산화탄소의 흡착, 고정화로부터 선택성이 매우 우수하다.

본 연구에서는 제올라이트의 선택적 이온교환 특성을 이용하여 제올라이트와 LiOH를 혼합해 개질하여 펠렛형태로 흡착제를 제조하였으며, 제조 방법은 다음 Fig. 1에 나타난 순서로 진행하였다. 상용 제올라이트와 알칼리 금속염인 LiOH는 그라인더를 사용하여 분쇄·혼합하였다.

최초 적용되는 제올라이트는 convection oven에 넣고 180℃까지 승온시킨다. 이와 같은 환경에 3시간 적용 후 대류열에 의해서 발생하는 자연압 및 공기 세정을 통해 내부의 이물질질을 외부로 배출하였다. 건조 후 이물질과 수분이 제거된 제올라이트는 분쇄하여 미세입자의 파우더 형태로 제조한다. LiOH는 적정온도에서 소성하여 이물질을 제거한 후 분쇄하여 미세한 분말상태로 제조한다. 제올라이트와 LiOH는 일정비율의 바인더와 혼합하여 물과 함께 일정시간 교반하여 반죽하고 펠렛형태로 빚은 후 30℃에서 24시간 건조시키는 저온건조 단계를 거쳐서 최종 완성하였으며 최종 흡착제를 사용하여 흡착효율 실험을 진행하였다. 성능평가는

컬럼테스트와 챔버테스트를 수행하여 최적 흡착제를 개발하였다.

## 2.2. 실험장치 및 실험방법

### 2.2.1. 컬럼테스트

본 연구에서 개발한 이산화탄소 흡착제의 성능을 평가하기 위하여 컬럼테스트를 실시하였다. 실험 절차는 Fig. 2와 같으며, Lab scale로 제작되어 실험에 사용된 장치는 Fig. 3에 나타내었다. 실험용 가스는 CO<sub>2</sub>(1)와 N<sub>2</sub>(2)를 혼합하여 사용하였다. 가스의 농도는 MFC(4)로 조절하여 실험농도 5,000 ppm을 유지시킨다. 혼합기(5)에서 혼합된 가스는 흡착제가 충전된 반응기(6)로 연속적으로 유입시켜준다. 유입된 가스는 흡착제가 충전된 컬럼을 통과하게 되고 컬럼 통과 전후의 이산화탄소 농도변화를 측정하여 흡착제 성능을 평가하였다. 이 실험은 비분산적외선법(NDIR)이 적용된 이산화탄소전용 분석기(MultiRae IR)를 사용해 변화를 측정하였으며 초기 유입된 가스의 농도와 유출된 가스의 이산화탄소 농도 변화를 비교하였다.

실험에 사용된 컬럼의 부피는 약 1 L, 실험에 사용된 흡착제는 약 30 g이다. 실험절차는 요약하면 다음과 같다. 첫째, CO<sub>2</sub> gas와 N<sub>2</sub> gas를 유량조절의 방식으로 혼합하여 CO<sub>2</sub> 농도를 5,000 ppm으로 유지한다. 둘째, CO<sub>2</sub> 농도를 5,000 ppm을 유지하도록 하며 CO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>의 혼합가스를 흡착제가 충전된 컬럼을 통과하도록 한다. 셋째, CO<sub>2</sub> analyzer를 사용하여 이산화탄소 농도를 측정한다. 분석방법은 비분산적외선법을 사용하며 기기는 MultiRae IR을 사용하였다. 넷째, 흡착제의 이산화탄소 제거효율을 분석한다.

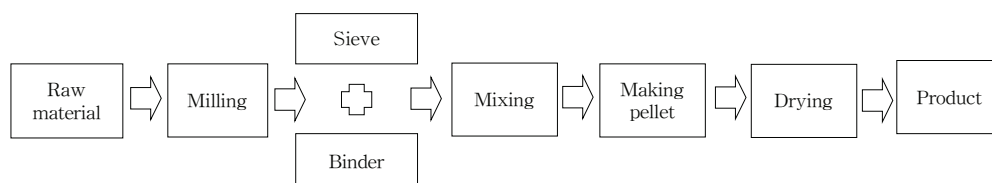


Fig. 1. Schematic diagram of adsorbent manufacturing process.

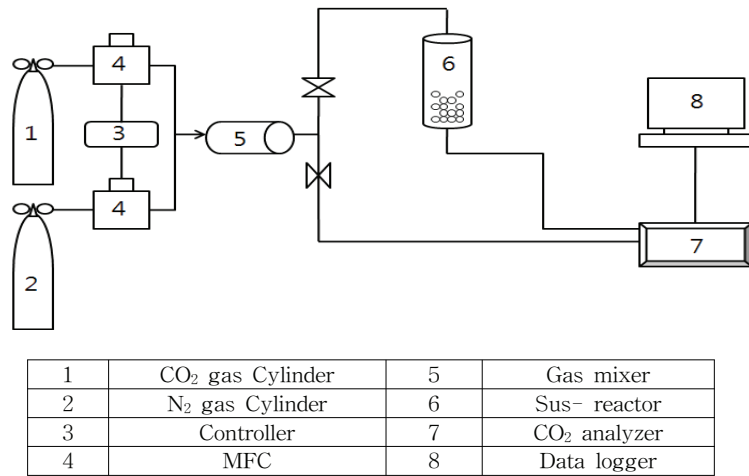


Fig. 2. Schematic diagram of experimental procedure.

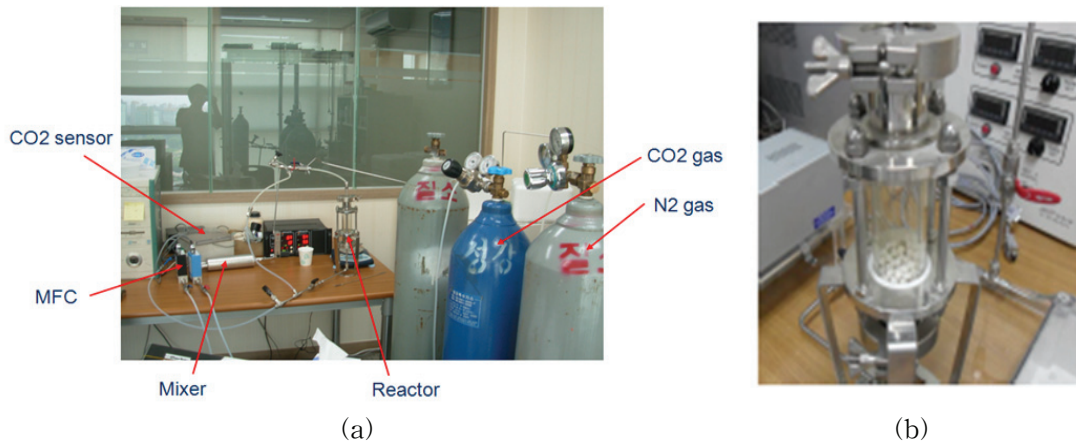


Fig. 3. Lab equipment for column test(a) and the column(b).

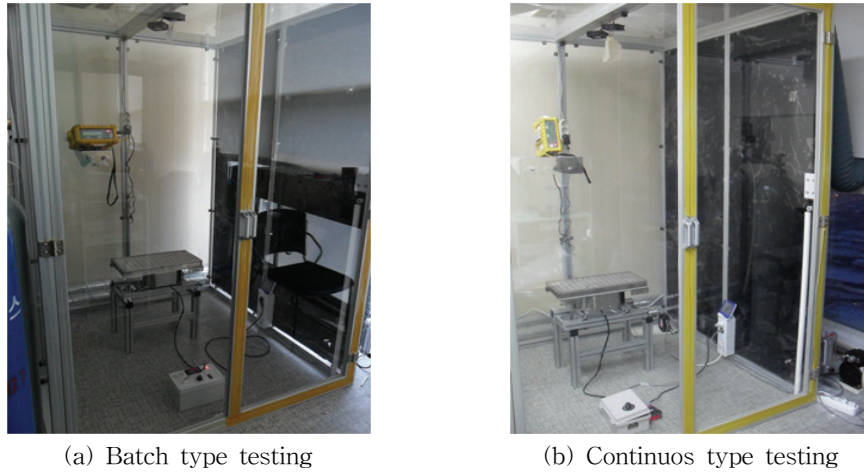
**2.2.2. 챔버테스트 1 (batch type)**

배치형 챔버테스트를 위해 본 연구에서 제작한 실험 장치는 Fig. 4(a)에 나타난 바와 같다. 실험은 다음과 같은 절차로 수행되었다. 첫째, 챔버 내부 이산화탄소 농도를 4,000 ppm으로 유지한다. 컬럼테스트의 농도유지 방법과 동일하게 CO<sub>2</sub> gas와 N<sub>2</sub> gas를 유량조절의 방식으로 혼합하여 CO<sub>2</sub> 농도를 유지한다. 둘째, 챔버 내부에 흡착제 1.5 L가 충전된 필터모듈을 장착하고 챔버를 밀폐한다. 셋째, 일정 풍량을 유지하도록 하며 CO<sub>2</sub> 저감장치의 팬을 1시간동안 작동한다. 넷째, 비분산적외선법을 적용한 이산

화탄소전용분석기를 사용해 초기농도와 1시간 후의 농도를 측정하여 비교분석하여 CO<sub>2</sub> 저감 효율을 산정한다.

**2.2.3. 챔버테스트 2 (continuous type)**

이 실험 장치는 위의 배치형 챔버테스트와 동일한 실험장치를 사용하였다. 배치형 챔버테스트의 실험조건은 밀폐된 공간인 반면, Fig. 4(b)와 같이 이 실험방법은 이산화탄소 4,000 ppm을 실험하는 동안 연속적으로 주입해주고 펌프를 사용하여 가스를 배출시키면서 실험을 수행하였다. 이 실험 방법 역시 비분산적외선법



(a) Batch type testing

(b) Continuous type testing

Fig. 4. Experimental equipment for chamber test.

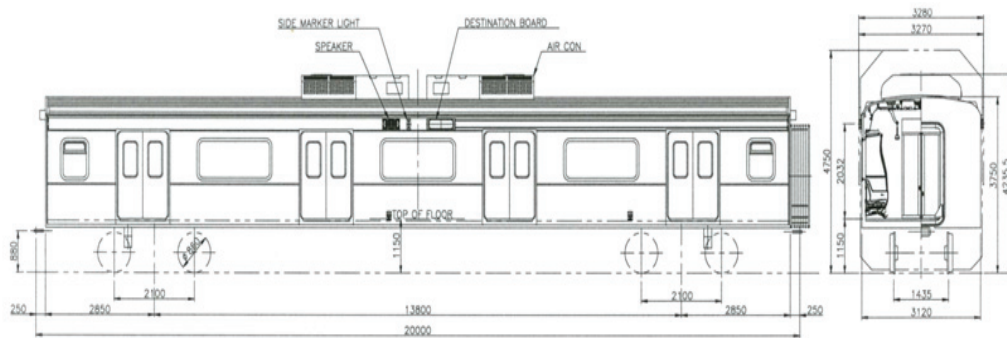


Fig. 5. Inner space simulation of urban railway passenger car.

이 적용을 한 이산화탄소전용분석기를 사용해 초기농도와 30분 후의 농도를 측정하여 비교 분석 하였다.

#### 2.2.4. 재현성 테스트

흡착제의 재현성을 평가하기 위한 실험절차는 다음과 같이 요약될 수 있다. 첫째, CO<sub>2</sub> 유입농도를 4,000 ppm을 유지하도록 유량을 조절하여 챔버 내부로 주입한다. 방법은 챔버테스트 1과 동일하다. 둘째, 흡착제 1.5 L가 충전된 필터모듈을 일정 풍량으로 1시간 동안 작동한다. 셋째, 1시간 후 CO<sub>2</sub> 필터모듈을 정지시킨 후 챔버의 문을 열고 자연 상태에서 5시간 동안 방치한다. 넷째, 1일 2회 반복테스트를 수행하여 측정결과에 대한 신뢰성을 확보한다. 챔버테

스트 흡착효율 실험은 용량 4m<sup>3</sup>인 챔버에서 수행되었으며, 실험조건인 챔버 용적은 다중이용시설 중 철도차량에 대한 적용성을 가정하였으며, Fig. 5와 같이 도시철도차량 내부용적을 시뮬레이션하여 재산정한 값을 따른 것이다. 풍량은 0.9 CMM 조건이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 혼합비율에 따른 흡착성능

흡착제 재료의 혼합비율에 따른 흡착성능을 평가하기 위하여 컬럼테스트를 실시하였다. 실험을 위해 제조된 흡착제는 제올라이트에 이온교환법을 적용하여 개질해 펠렛 형태로 제조된

Table 2. Experimental Condition of Mixing Ratio and Calcination Temperature

Sample ID	Mixing ratio(%)			Calcination temperature		
	LiOH	Zeolite	Binder	1st(3hr)	2st(3hr)	3st(3hr)
S-1	11(55)	8(40)	1(5)	300°C	300°C	300°C
S-2	14(70)	5(25)	1(5)	300°C	300°C	300°C
S-3	16(80)	3(15)	1(5)	300°C	300°C	300°C

것이며, 펠렛의 크기는 직경은 약 4 mm 정도이다. LiOH는 300°C에서 소성하였으며 LiOH, 제올라이트, 바인더의 혼합 비율은 Table 2에 제시된 바와 같다. 제올라이트와 LiOH는 분쇄하여 바인더와 혼합하여 반죽하고 펠렛 형태로 빚은 후 30°C에서 24시간 건조시키는 저온건조 단계를 거쳐서 최종 완성하였다.

컬럼테스트용 반응기에 유입된 CO<sub>2</sub> 농도는 5,000 ppm 조건에서 24시간 동안 진행되었다. 실험은 수차례 반복 수행되었으며 Fig. 6과 같이 일정한 패턴임을 확인하였다.

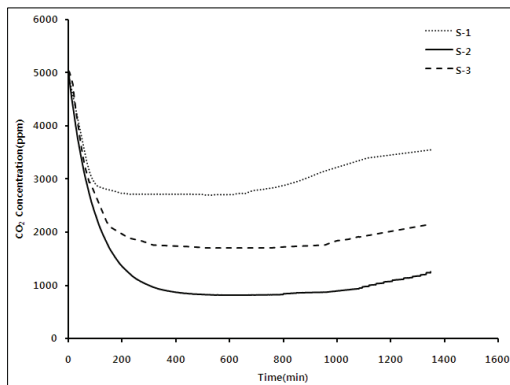


Fig. 6. Adsorption efficiency of the adsorbents with various mixing ratio at 300°C.

S-1은 흡착 시작 후 100여분이 지나면서 40%의 흡착효율을 보였으며 이후 700분 까지

흡착효율이 유지되었다. S-2는 200분 내에 70%의 흡착효율을 보였으며 400분 이후 80%의 흡착효율을 유지하였다. S-3은 200분 이후 약 60%의 흡착효율을 지속적으로 유지하는 형태를 나타내었다. 상기 컬럼테스트에서 흡착비율 LiOH:zeolite:binder=70:25:5일 때 흡착효율이 가장 높은 것을 확인하였다.

### 3.1.1. 소성온도에 따른 흡착성능

LiOH의 소성온도를 저온에서 고온으로 3단계 소성한 후 흡착제를 제조하여 소성온도에 따른 흡착성능을 평가하였다. 흡착비율은 Table 3에 제시한 바와 같이 소성온도는 다양한 조건으로 구성하였으며, 혼합비는 LiOH:zeolite:binder=70:25:5 조건으로 실험을 수행하였다. 제올라이트, LiOH는 일정비율의 바인더를 주입한 후 물과 함께 일정시간 교반하여 혼합 반죽하고 펠렛 형태로 빚은 후 30°C에서 24시간 건조시키는 저온건조 단계를 거쳐서 최종 완성하였다.

소성온도에 따른 흡착효율은 Fig. 7과 같다. S-4는 200분 이내 82% 흡착효율을 보였으며, 400분 이내 90% 흡착효율을 보인 후 유지되는 경향을 보였다. S-5는 200분 이내 72%의 흡착효율을 보였으며, 이후 흡착효율은 다소 저하되는 경향을 보였다. S-6는 200분 까지 S-5와 유사한 흡착효율을 보였으나 400분 이내 82% 효율을 보인 후 유지되는 경향을 보였다. 3단계 소성온도에 따른 흡착효율 시험에서는 50°C-110°C-300°C 소성한 LiOH로 제조한 흡

Table 3. Experimental Condition of Mixing Ratio and Calcination Temperature

Sample ID	Mixing ratio(%)			Calcination temperature		
	LiOH	Zeolite	Binder	1st(3hr)	2st(3hr)	3st(3hr)
S-4	14(70)	5(25)	1(5)	50°C	110°C	300°C
S-5	14(70)	5(25)	1(5)	100°C	200°C	300°C
S-6	14(70)	5(25)	1(5)	200°C	250°C	300°C

착제 S-4의 흡착성능이 가장 우수함을 확인하였다.

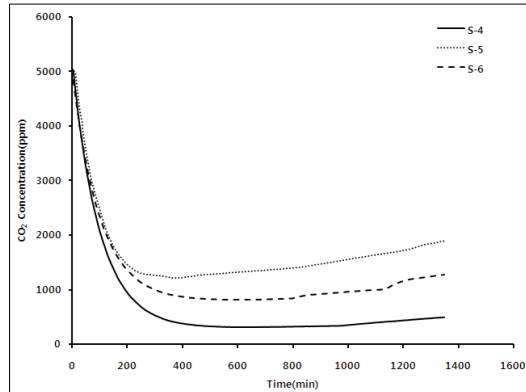


Fig. 7. Adsorption efficiency of the adsorbents with various Calcination temperature.

### 3.2. 챔버테스트

본 연구에서는 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 330×260×30 mm 규격의 알루미늄 케이싱의 모듈을 제작하여 챔버테스트를 수행하였다. 컬럼 테스트에서 최고의 CO<sub>2</sub> 흡착능력을 보인 S-4 흡착제의 흡착효율을 평가하였다.

실험용 챔버 내 환경조건에 대한 모니터링 결과는 Table 4에 정리된 바와 같다. 측정은 25

일간 실시되었으며 데이터 분석결과 오전 평균 온도 13.8℃, 습도 20.8 %, 오후 평균 온도 23.2℃, 습도 18.6 %이다. 이 결과는 겨울철 다중 이용시설의 실내공기 수준을 구현한 것으로서, 본 연구에서 개발한 흡착제의 실제 환경에 대한 적용 가능성을 평가하기 위한 것이다.

챔버테스트는 배치형과 연속형으로 나누어 수행하였다. 본 실험에 사용된 챔버의 부피는 4 m<sup>3</sup>이며, 실험에 사용된 흡착제는 1.5L이다. 밀폐된 챔버 안에서 이산화탄소 초기농도를 4,000ppm에 맞춘 후 120분간 배치 테스트를 수행하였다. 실험결과는 Fig. 9(a)에 제시된 바와 같이 30분 이내 4,068ppm의 CO<sub>2</sub> 농도가 312ppm으로 저감되어 92%의 효율을 보였으며, 60분 이내 270ppm으로 저감되어 93%의 효율을 보였다. 이후 120분까지 93%의 효율을 유지하였다.

동일 챔버 (4 m<sup>3</sup>)에서 이산화탄소의 유입과 유출이 연속적으로 이루어지는 환경을 조성하여 연속시험을 30분 동안 수행한 결과는 Fig. 9(b)에 나타내었다. 초기농도 4,042ppm에서 10분 후 농도는 1,986ppm으로 측정되어 51%의 저감효율을 보였으며, 30분 이내 1,218ppm으로 저감되어 2,824ppm 회수되어 70% 저감되었음을 확인하였다. 실험에 사용된 흡착제의 용량은 1.5 L이다.

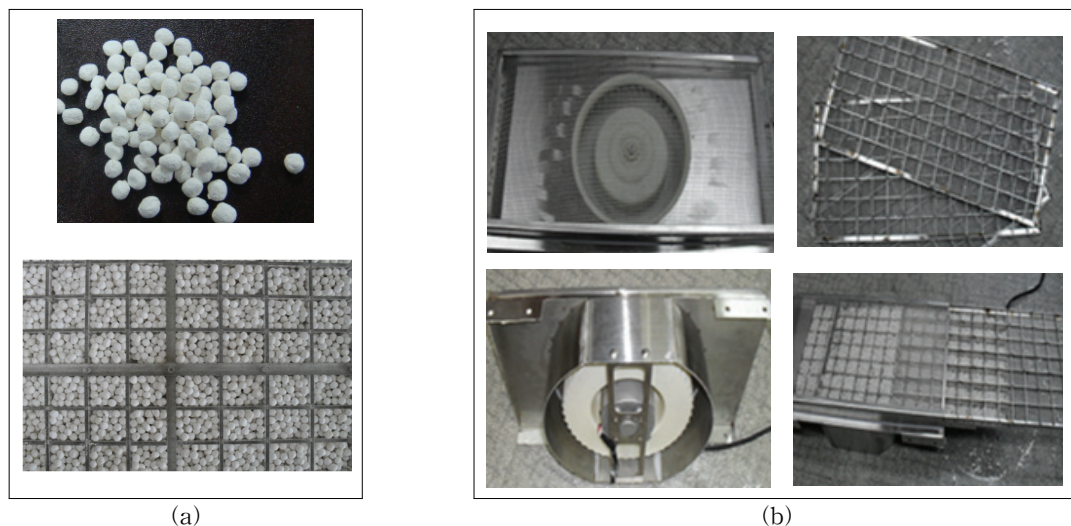


Fig. 8. Pellet type CO<sub>2</sub> adsorbent(a) and developed module filled adsorbent(b).



Table 4. Experimental Condition

Items	1		2		3		4		5	
	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM
Temp(°C)	19.2	20.6	14.8	17.8	12.4	12.6	10.7	17.7	14.6	12.6
Humidity(%)	16	16	21	16	24	21	23	16	21	23
Items	6		7		8		9		10	
	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM
Temp(°C)	13.8	17.1	16.4	19.1	16.8	21.1	14.1	13.5	9.3	13.9
Humidity(%)	29	23	21	16	21	16	21	21	23	21
Items	11		12		13		14		15	
	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM
Temp(°C)	10.4	13.9	13.6	16.2	14.2	17.6	12.4	15.8	10.2	14.1
Humidity(%)	23	21	21	16	23	21	16	16	21	23
Items	16		17		18		19		20	
	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM
Temp(°C)	14.3	15.1	12.5	11.4	14.5	20.0	17.3	20.3	13.7	17.1
Humidity(%)	21	21	23	23	16	16	19	16	21	19
Items	21		22		23		24		25	
	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM
Temp(°C)	18.4	18.3	12.4	20.8	13.5	18.8	12.3	17.3	14.8	16.2
Humidity(%)	16	16	24	16	19	16	21	16	16	21

AM: ante meridiem, PM: post meridiem

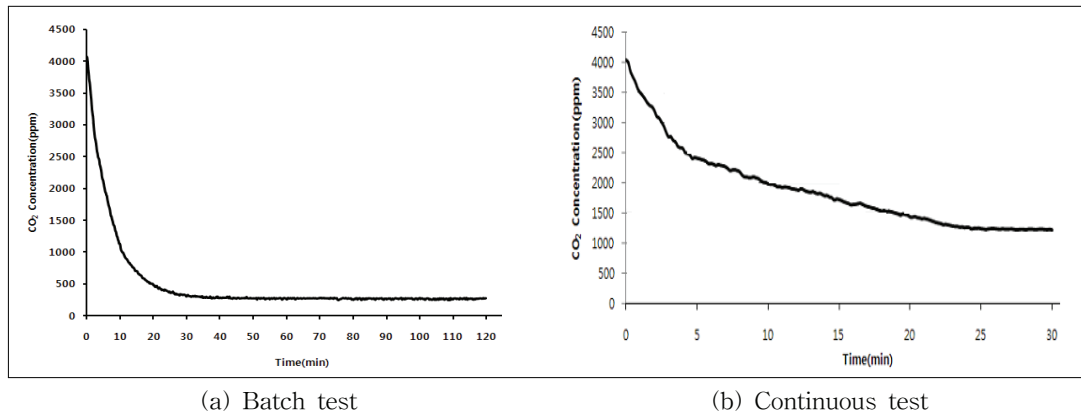


Fig. 9. Adsorbent efficiency by chamber test.

### 3.3.재현성 테스트

본 연구에서 개발한 흡착제의 장기간 지속성에 대한 신뢰도를 확인하기 위해 15일간 재현성실험을 실시하였다. 실험방법은 배치식 챔버 테스트와 동일하며 1시간동안 실험을 한 뒤 CO<sub>2</sub> filter module를 정지시킨 후 챔버문을 열고 자연상태에서 5시간동안 방치시키면서 1일 2회 반복실험을 하였다. 상기 실험방법은 도시철도차량 또는 광역버스와 같은 차량의 출퇴근 시간대의 이용객이 많은 혼잡 상황에서 발생하

는 일시적인 이산화탄소 고농도 환경에서 흡착 효율을 평가하기 위한 것이다.

재현성실험 결과는 Fig. 10에서 보는 바와 같다. 초기 CO<sub>2</sub> 농도 4,000 ppm은 5일까지 약 2,500 ~ 3,000ppm까지 감소하였고 6일 이후 15일까지 약 3,000 ppm 전후로 측정되어 15일간 실험을 수행한 결과 지속적으로 1,000 ppm 저감능력이 있는 것을 보여준다. 이 때 챔버 내 실험조건은 Table 4에 제시한 바와 같이 겨울철의 실내 환경에 적합한 수준으로서 실제 환

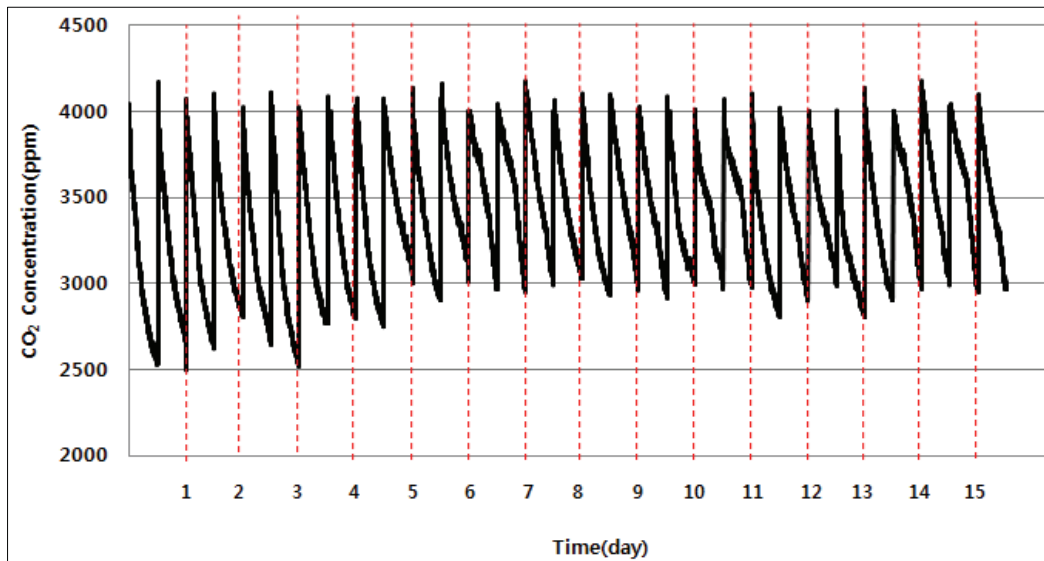


Fig. 10. Adsorbent efficiency test for reproducibility.

Table 5. Specification of Adsorbent

	Specification		unit	note
Adsorbent filter	Components	Zeolite, etc.		
	Diameter	3	mm	Average
	Mass	0.1±5 %	g	Each
	Chamber test efficiency	> 90	%	4m <sup>3</sup>
Module	Size	330×260×30	mm	1.5L criteria at 300 CMH
	Case material	Aluminium		
	Adsorbent mass	580~810	g	
	Adsorbent volume	1~1.5	L	
	Specific gravity	0.54		
	Flow rate	300	CMH	
	Differential pressure ( $\Delta P$ )	8.5	mmH <sub>2</sub> O	

경에 적용성이 우수한 것으로 판단되었다.

본 연구에서 개발하여 사용된 필터 및 모듈의 물리·화학적 특성은 Table 5에 나타난 바와 같다.

### 3.4. 흡착량 분석

개발된 S-4 흡착제의 CO<sub>2</sub> 흡착량을 측정하기 위해 열중량 분석(TGA)를 실시하였다. 5°C/min로 온도를 상승시키도록 설정하고, 300°C까지 100분 동안 S-4를 가온시켜 탈착을 위한 전처리를 시행하였다. 초기 공기중에 방치된 흡착제 시료의 중량을 구하고 탈착처리 후의 흡착

제 중량을 구한 후 탈착된 상태의 흡착제를 필터모듈에 장착하여 챔버테스트의 배치실험과 동일한 조건으로 60분간 CO<sub>2</sub> 흡착실험을 시행하였다. 분석에 사용된 TGA(thermogravimetry analyzer)는 SCINCO사의 TGA S-1000이다. TGA는 시료의 질량변화를 시간이나 온도의 함수로 측정하는 방법으로 질량의 감소를 가져오는 증발과 같은 분해/산화반응과 시료에 대한 탈착 등과 같은 물리적인 값을 측정하기 위한 장비이다. 매우 감도있는 전자저울에 의해 질량변화를 연속 측정한다. 상기 기술을 적용한 흡착량은 다음과 같이 분석되었다. 흡착제 10.015

mg을 300℃에서 소성 후 질량은 최저 0.7212 mg으로 측정되었고, 이산화탄소를 흘려준 후 질량은 점차 증가하여 최대 질량은 0.88 mg으로 측정되었다. TGA를 적용한 흡착량은 이산화탄소 g 당 5.0 mmol로 산정되었다. TGA 분석은 2010년 10월 20일 한서대학교 화학공학과 분석실험실에서 수행되었다.

$$m_g = \frac{m_1(\eta_t - \eta_0)}{m_1 \times \eta_0} \times \frac{1000 \text{mg sorbent}}{1 \text{g sorbent}} \times \frac{1 \text{mmol CO}_2}{44 \text{mg CO}_2}$$

$m_g$ : CO<sub>2</sub> 흡착량

$m_1$ : 공기중 흡착제 질량

$\eta_0$ : 전처리 후 흡착제 질량/ $m_1$

$\eta_t$ : CO<sub>2</sub> 흡착 후 흡착제 질량/ $m_1$

#### 4. 결론

본 연구는 실내환경에 노출된 저농도 이산화탄소를 제거하기 위한 방안으로서 이산화탄소의 선택적 흡착물을 향상시킨 흡착제를 개발하고 컬럼테스트와 챔버테스트에 의해 성능을 평가하였다. 흡착제는 제올라이트, LiOH, 바인더 및 물을 혼합하여 펠렛형태로 제조하였다. 흡착제의 컬럼테스트 결과 400분 이내 90% 이상의 흡착율을 나타내어 본 연구에서 개발한 흡착제의 최적 제조인자를 찾을 수 있었다. 흡착제 모듈의 성능테스트는 배치형과 연속형 챔버테스트 방법으로 실험하였다. 배치테스트 결과 30분 후 약 92%의 제거효율을 보였으며 2시간 이내 93%의 효율을 유지하였다. 연속실험의 결과 30분 이내 70% 이상의 흡착효율을 평가할 수 있었다. 본 연구에서 개발한 흡착제의 지속성에 관한 신뢰도를 확인하기 위하여 15일 동안 재현성 테스트를 실시한 결과 지속적으로 1,000 ppm 이상 제거효율이 있는 것으로 분석되었으며, TGA 분석법을 이용한 흡착량 분석에서 5.0mmol/g으로 평가되어 상온 실내 다중이용시설의 저농도 이산화탄소 저감을 목적으로 적용성이 있는 것으로 판단되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래도시철도기술개발사업(09 미래도시철도 A-01) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] H. C. Yoo and K. H. Noh, Natural Ventilation System of Express Bus for Indoor Air Quality and Energy Saving, *J. Kor. Soc. Living Environ. Sys.*, **17(1)**, 21 (2010).
- [2] S. O. Baek and Y. S. Kim, Characterization of Air Quality in Various types of Indoor Environments in Urban areas-Focusing on Homes, Offices, and Restaurants, *J. KAPRA*, **14(4)**, 343 (1998).
- [3] K. H. Kim, Preparation of Solid Sorbents and Isotherm Adsorption Modeling for Low Level CO<sub>2</sub>, Master thesis, *Kyung-Hee University* (2010).
- [4] Ministry of Environment, Guideline of Indoor Air Quality (<http://www.me.go.kr/>).
- [5] C. S. Sim, Sink Analysis with Satellite Sensing for Exploring Global Atmospheric CO<sub>2</sub> Distributions, *Kor. Environ. Institute* (2010).
- [6] Environmental Report, *Ministry of Environment*, Korea, 245 (2010).
- [7] D. W. Cha, "Indoor Air Pollution", 1st ed., 100, *Kimoondang* (2007).
- [8] B. S. Kim, J. Y. Lee, and S. D. Kim, Characterization of Dry Sorbents for CO<sub>2</sub> Separation from MSW Incineration Flue Gas, *J. Kor. Oil Chem. Soc.*, **27(3)**, 318 (2010).
- [9] Y. Zou, M. Vera, and A. E. Rodrigues, Adsorption of Carbon Dioxide at High Temperature—a Review, *Separation and Purification Technology*, **26**, 195 (2002).

- [10] K. M. Lee and Y. M. Jo, Ambient Adsorption of Low-level Carbon Dioxide by Metal Treated Activated Carbon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 4, 316 (2009).
- [11] K. M. Lee and Y. M. Jo, Adsorption Characteristics of Chemically Modified Sorbents Carbon Dioxide. *KSIEC*, **19(5)**, 533 (2008).
- [12] J. M. Goo, The Study on Adsorption/Desorption Characteristics and the Development of Optimized Adsorbent Manufacturing Process for CO<sub>2</sub> Selective Adsorption in Waste Synthesis Gas Ingredient, Master Thesis, *A-Jou University* (2011).