지하철 객실의 이산화탄소 제어방안 연구

Study on control of carbon dioxide in subway car

조영민*† 권순박* 박덕신* 박재형* 이주열**

Youngmin Cho Soon-Bark Kwon Duck-Shin Park Jae-Hyung Park Ju-Yeol Lee

ABSTRACT

High concentration of carbon dioxide in subway cabin may cause various adverse effects on the passengers. Because carbon dioxide is produced by breathing of passengers, carbon dioxide concentration at rush-hours is extremely high. In most cases, the ventilation is not that easy for subway cars due to the high concentration of dust in tunnels. In this study, more practical way to control carbon dioxide in subway car was suggested. The decrease of carbon dioxide concentration was observed when the system was applied to a real subway car. The regenerative method for maintenance-free carbon dioxide control system was also suggested.

1. 서론

최근 지하철 공기질에 대한 일반 국민들의 관심이 높아지고 있는데, 특히 이용 승객의 건강보호와 생산성 향상 측면에서 전동차 객실의 고농도 이산화탄소가 문제점으로 많이 지적되고 있다. 환경부의 '다중이용시설 등의 실내공기질 관리법' [1]에서는 지하철 역사 등 다중이용시설의 이산화탄소 농도 기준을 1,000 ppm으로 정하고 있다. 일반적인 실내환경에서 이와 같은 이산화탄소 농도 기준을 맞추기 위해 외부 신선공기 유입을 통한 환기가 이용되지만, 터널 구간을 운행하는 전동차의 경우 터널 내부의 먼지 농도가 높기 때문에 환기구를 통하여 외기가 유입될 경우 객실 내부도 미세먼지로 오염될 우려가 있다. 따라서 현재로서는 주로 정차시 출입문 개폐에 의한 환기 및 출입문의 문틈을 통한 자연환기에 의존하고 있는데, 이를 통한 환기량은 필요 환기량에 비하여 매우 부족한 실정이다. 현재 승객 탑승이 많은 출퇴근 시간에는 이산화탄소 농도가 순간적으로는 4,000 ppm을 초과하는 경우도 많은데, 기존 지하철의 환기시스템을 이용하여 이산화탄소 농도를 1,000 ppm 이하로 유지하는 것은 현실적으로는 거의 불가능하다.

이에 환경부에서는 기존의 '다중이용시설 등의 실내공기질 관리법'에서 정한 일반적인 이산화탄소 농도기준과 별도로 2007년에 도표 1과 같이 '대중교통수단 실내공기질 가이드라인' [2]을 통하여 객실 내의 이산화탄소에 대하여 더 완화된 기준을 적용하고 있다. 그러나, 여전히 객실 내 이산화탄소 농도가 가이드라인 기준을 초과하는 경우가 많아 심각한 문제점으로 지적되고 있다 [3-5]. 특히 이산화탄소의 농도는 승객의 수와 비례하기 때문에 승객의 수가 정원을 훨씬 초과하는 출근시간 대에는 전동차 객실의 이산화탄소 농도가 고농도가 되는 경우가 빈번하다.

† 책임저자 : 정회원
E-mail : ymcho@krri.re.kr
TEL : (031)460-5361 FAX : (031)460-5279
* 정회원, 한국철도기술연구원
** 정회원, (주)애니텍

도표 1. Carbon dioxide guideline for subway and intercity train in Korea

Classification	Level 1* (ppm)	Level 2** (ppm)
Subway	2,500	3,500
Intercity train	2,000	3,000

Guideline values are averaged values during each route.
*Level 1: normal times, **Level 2: rush hours.

이에 본 연구에서는 전동차 객실에서 혼잡시에 농도가 가이드라인 기준치를 초과하는 이산화탄소를 저감할 수 있는 제올라이트계 흡착제에 대한 특성을 파악하였다. 그리고 흡착제를 충진한 이산화탄소 흡착 장치를 개발하고, 이를 실제 객차에 적용하는 실험을 통해 전동차 객실의 공기질을 쾌적하게 유지할 수 있는 방안을 모색하였다.

2. 실험방법

2.1 이산화탄소 흡착제

본 실험에서는 이산화탄소 흡착제로 13X 제올라이트 (UOP사)와 5A 제올라이트를 구입하여 그대로 사용하거나, 이를 이온교환 방법으로 개질하여 이산화탄소 흡착제 (AK1과 AK2)로 사용하였다 [8]. 흡착제의 개질은 먼저 상용 제올라이트를 200 ℃에서 5 시간 동안 건조 한 후, 이산화탄소의 화학적 흡착이 가능하도록 70 ℃의 NaCl 수용액에 24 시간 씩 3 회에 걸쳐 총 72 시간 동안 담지하였다. 그리고 제올라이트를 증류수로 세척한 후 다시 120 ℃에서 건조시키고 binder를 첨가하여 pellet 형태로 성형하였다. 이후 700 ℃의 고온에서 2시간 동안 소성한 후 실험에 사용하였다. 상용 제올라이트인 13X와 5A는 모두 지름 2~3 mm의 구형 알갱이 형태였고, 개질한 AK1과 AK2는 가로, 세로, 높이 각각 5~6mm의 정사각형 형태로 소성하여 사용하였다.

2.2 이산화탄소 흡착성능 실험

개질하여 제조한 이산화탄소의 흡착성능을 알아보기 위하여 그림 1과 같은 실험 장치를 구성하였다. 실험 장치에는 순도 99.99 %의 질소와 순도 99 %의 이산화탄소가 유입되도록 하였으며, 이 때 질소의 유량은 1.6 L/min, 이산화탄소의 유량은 8.4 mL/min으로 하여 초기 이산화탄소의 농도를 5,000 ppm으로 조절하였다. 이산화탄소 흡착제는 70 g을 반응기에 충진하였으며, 반응기를 통과한 후의 이산화탄소 농도를 비분산적외선 (Non-dispersive infrared; ND IR) 방식의 이산화탄소 센서 (SenseAir사, 스웨덴)로 측정하여 흡착제의 이산화탄소 저감성능을 파악하였다.

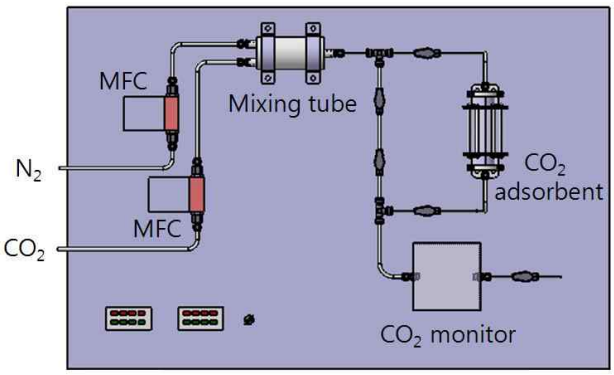

그림 1. Experimental setup for performance test of CO_2 adsorbent

2.3 지하철 객차의 이산화탄소 저감 실험

그림 2와 같이 이산화탄소 농도 측정기를 실험용 전동차에 설치하여 이산화탄소 저감장치 가동에 따른 객실에서의 이산화탄소 저감성능을 파악하였다. 실험용 전동차는 수도권 지하철 구간 운행에 사용되었던 전동차로 하였다. 객실은 좌우 대칭 형태이므로 객실 내부의 절반을 비닐로 차단하여 객실의 1/2 공간을 대상으로 이산화탄소 저감장치 한 대를 객차의 바닥 면으로부터 2.0 m 높이에 설치하여 실험을 수행하였다. 실제 전동차에 적용할 때에는 저감장치 두 대를 진행방향으로 전동차의 앞부분에 한 대, 뒷부분에 한 대 등 총 두 대를 장착하도록 저감장치의 용량을 설계하였다.

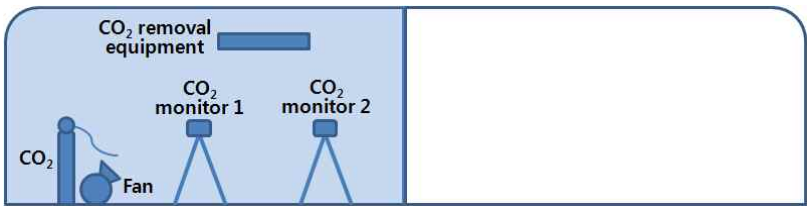

그림 2. Experimental setup for performance test of CO_2 removal system for subway car

이산화탄소 저감장치에 사용된 이산화탄소 흡착제는 AK2였으며, 사용된 양은 4 kg이었고, 유량은 3 m^3/min 이었다. 객실 내 실험공간의 크기는 길이 10.0 m, 폭 2.9 m, 높이 2.3 m로서 총 부피는 66.7 m^3이었다. 여기에 이산화탄소를 인위적으로 넣어주고, 혼합 팬을 이용하여 객실 내에 이산화탄소가 고르게 분포하도록 하였다. 이후 이산화탄소 저감장치를 가동시키는 경우와 가동시키지 않는 경우의 이산화탄소 농도 감소 경향을 파악하였다. CO_2 monitor 2의 상부 위치에서 이산화탄소 저감장치로 공기가 유입되고 CO_2 monitor 1의 상부 위치로 처리된 공기가 나오기 때문에 이에 따른 영향을 알아보고자 CO_2 monitor를 두 지점에 설치하였다.

3. 실험결과

3.1 이산화탄소 흡착성능

상용 제올라이트계 이산화탄소 흡착제의 흡착성능을 비교한 결과를 그림 2에 나타내었다. 실험결과, 13X는 초기 약 100분간, 5A는 초기 약 120분간은 반응기로 유입되는 모든 이산화탄소를 흡착하는 것을 볼 수 있었다. 그러나 이후에는 흡착성능이 급격히 감소하기 시작하여, 13X는 3시간, 5A는 5시간 후에는 더 이상 이산화탄소를 흡착하지 못 하는 것으로 나타났다. 흡착된 이산화탄소의 양은 13X의 경우 1.00 L, 5A의 경우 1.52 L로 나타났으며, 이를 질량으로 환산하면 각각 1.98 g, 3.01 g (상온·상압에서의 밀도를 1.98 g/ℓ로 가정)이고, 이는 각각 45.0 mmol과 68.4 mmol에 해당하므로 흡착제 1g 당 각각 0.64 mmol과 0.98 mmol의 이산화탄소가 흡착된 것을 알 수 있었다. 이처럼 제올라이트가 초기에 이산화탄소를 잘 흡착할 수 있는 것은 제올라이트에 잘 발달된 pore와 channel 등으로 인하여 비표면적이 크고, 이산화탄소를 잘 흡착하는 실리카 (SiO_2)와 알루미나 (Al_2O_3) 등으로 구성되어 있기 때문이다. 그러나 흡착가능한 양 이상의 이산화탄소가 유입되면 흡착점이 포화되기 때문에 이산화탄소 흡착량이 급격히 떨어지게 된다.

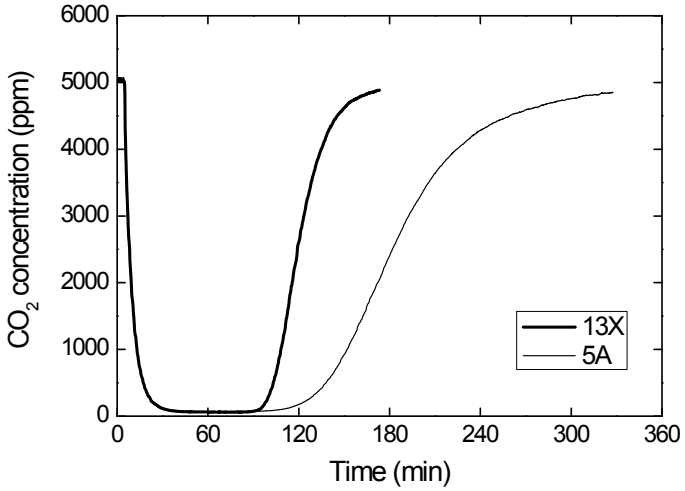

그림 3. CO_2 removal performance of conventional zeolite

본 실험에서 개질하여 제조한 두 가지 타입의 제올라이트계 이산화탄소 흡착제의 흡착성능을 비교한 결과를 그림 3에 나타내었다. AK1과 AK2는 13X 및 5A와 달리 초기에 이산화탄소를 완전히 흡착하지 못 하였으나, 반면에 흡착 지속시간은 오히려 크게 증가한 것으로 나타났다. 흡착한 이산화탄소의 양은 AK1과 AK2가 각각 1.92 L, 2.06 L이었으며, 이를 질량으로 환산하면 3.80 g, 4.08 g이고 이는 각각 89.0 mmol과 92.7 mmol에 해당하므로, 흡착제 1 g 당 각각 1.27 mmol과 1.32 mmol을 흡착함을 알 수 있었다. 이는 13X에 비하여 약 2배, 5A에 비하여 약 1.3배가량 이산화탄소 흡착량이 증가한 것으로 개질한 제올라이트의 흡착성능이 더욱 우수함을 확인할 수 있었다.

그러나, AK1과 AK2의 초기 이산화탄소 흡착성능이 13X 및 5A에 비하여 낮은 이유는 물을 사용한 전처리 과정에서 제올라이트의 이산화탄소 흡착점인 실리카와 알루미나 등이 물과 반응하면서 흡착성능이 크게 감소하고, 또한 pellet 형태로 성형을 하면서 제올라이트 내부의 기공 및 channel 등이 파괴되어 이산화탄소를 흡착할 수 있는 비표면적이 많이 감소하기 때문이다. 그러나 13X 및 5A에 비하여 장시간 동안 흡착성능을 갖고, 또 전체 이산화탄소 흡착량이 더 크게 나타난 것은 이산화탄소와 화학적 흡착을 형성할 수 있는 Na^+로 이온 교환을 해주었기 때문이다.

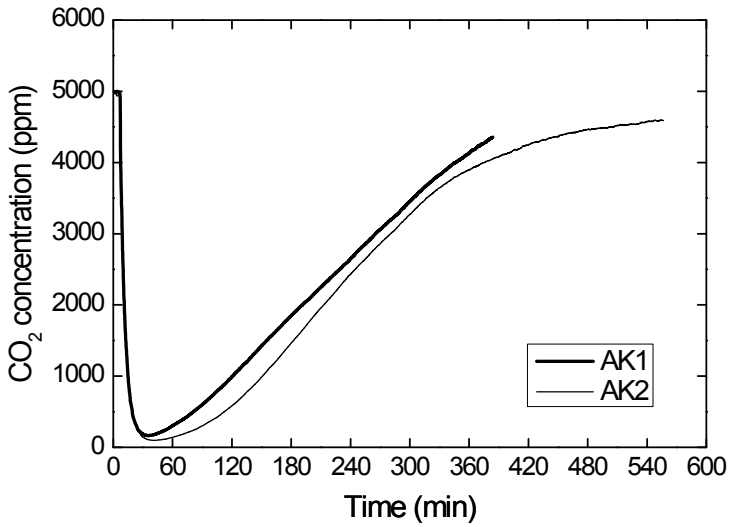

그림 4. CO_2 removal performance of modified zeolite

3.2 지하철 객실의 이산화탄소 저감

본 실험에서는 전동차 객실용 이산화탄소 저감장치를 제작하여 실제 차량에 설치하고 초기 농도를 약 5,000 ppm으로 설정한 후 장치를 가동하였을 때와 가동하지 않았을 때의 이산화탄소 농도 변화를 그림 4 (CO_2 monitor 1)와 그림 5 (CO_2 monitor 2)에 나타내었다.

실험결과 이산화탄소 저감장치를 가동하지 않은 경우에도 이산화탄소 농도가 자연적으로 감소하는 것을 볼 수 있었는데, 초기 이산화탄소 농도가 4,988 ppm이었던 CO_2 monitor 1에서는 2,500 ppm에 도달하기까지 103분이 소요되어 이산화탄소 농도 저감속도는 24.2 ppm/min이었고, 초기 이산화탄소 농도가 4,690 ppm이었던 CO_2 monitor 2에서는 2,500 ppm에 도달하기까지 101분이 소요되어 이산화탄소 농도 저감속도는 21.7 ppm/min이었다. 이처럼 이산화탄소 농도가 자연적으로 감소하는 것은 전동차 객차의 특성상 출입문, 연결막 등의 틈을 통하여 외기가 유입되어 객실의 이산화탄소 농도가 희석되어 저감되기 때문이다.

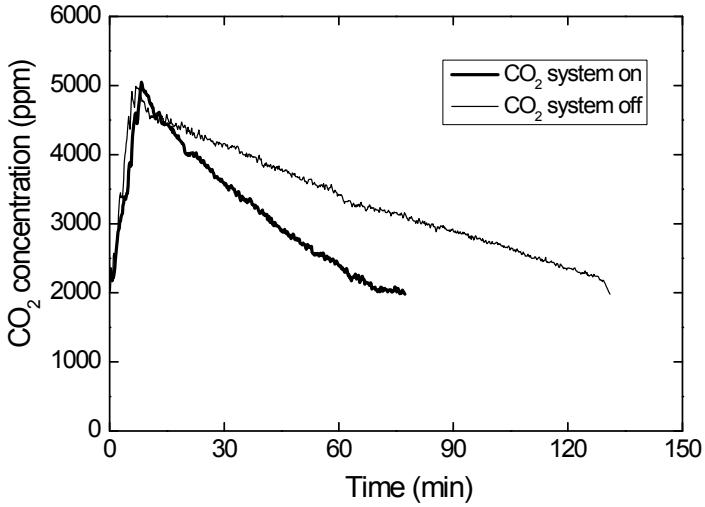

그림 5. CO_2 concentration change monitored by CO_2 monitor 1 with CO_2 removal system on and off

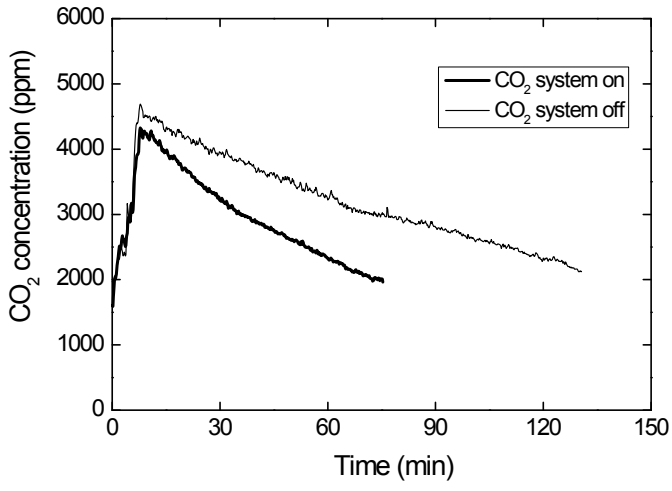

그림 6. CO_2 concentration change monitored by CO_2 monitor 2 with CO_2 removal system on and off

이산화탄소 저감장치를 가동한 경우, 초기 이산화탄소 농도가 5,048 ppm이었던 CO_2 monitor 1에서는 2,500 ppm에 도달하기까지 44분이 소요되어 이산화탄소 농도 저감속도는 57.9 ppm/min이었고, 초기 이산화탄소 농도가 4,326 ppm이었던 CO_2 monitor 2에서는 46분이 소요되어 이산화탄소 농도 저감속도는 39.7

ppm/min이었다. 따라서 전동차에서 이산화탄소 저감장치를 가동할 경우 이산화탄소 농도를 짧은 시간에 낮출 수 있으며, 외기의 유입으로 인한 이산화탄소의 자연감소를 감안할 경우 저감장치에 의한 이산화탄소 저감효과는 52.9 %인 것으로 나타났다. 또한, CO_2 monitor 2보다는 CO_2 monitor 1에서 저감속도가 더 크게 나타났는데, 이는 CO_2 monitor 2의 상부 위치에서 이산화탄소 저감장치로 공기가 유입되고 CO_2 monitor 1의 상부 위치로 이산화탄소가 제거된 공기가 나오기 때문이며, 향후 본 저감장치를 전동차 내에 적용할 경우 처리된 공기가 더욱 고르게 객실 내부로 퍼질 수 있도록 하는 시스템이 필요할 것으로 보인다.

본 실험에서는 전동차의 대칭을 감안하여 전체 체적의 절반을 실험공간으로 사용하였다. 공간의 체적은 66.7 m^3이며, 이산화탄소 저감장치의 성능실험에 사용된 저감장치의 처리유량은 3 m^3/min이므로 환기율은 2.7 회/h이었다. 즉, 약 22분마다 한 번 씩 전동차 내부의 공기가 이산화탄소 저감장치를 통과하는 것이 된다. 실제 실험에서는 초기 이산화탄소 농도인 5,000 ppm을 2,500 ppm으로 낮추는데 44~46분이 소요되므로 본 처리장치를 약 2회 통과해야 함을 의미한다.

4. 결론

최근 전동차, 객차, 버스 등 대중교통수단을 새로운 실내공간으로 인식하는 분위기가 확산되면서 다중이용시설에서의 공기질에 대한 관심이 점차 고조되고 있다. 환경부에서는 2007년부터 대중교통수단을 이용하는 승객의 건강영향을 고려하여 '대중교통수단 실내공기질 가이드라인'을 제정한 바 있다. 출퇴근 시간에 전동차에서의 이산화탄소 농도가 가이드라인을 초과하는 경우가 빈번하며, 이를 해결할 수 있는 방안에 대한 연구가 시급한 것으로 나타났다. 현재 기술로는 객차의 환기량을 늘려서 희석에 의해 이산화탄소 농도를 저감할 수 있지만 이것은 객실의 설정 온도와 설계 전력량 등 고려해야 할 사항이 많은 것으로 사료된다. 그러므로 보다 효과적인 이산화탄소 저감방안의 개발이 요구되는 실정이다.

본 연구에서는 기존의 상용 제올라이트계 이산화탄소를 개질하여 보다 이산화탄소 흡착성능이 우수한 이산화탄소 흡착제를 개발하였다. 이렇게 개발한 이산화탄소 흡착제를 충진한 소형 이산화탄소 흡착장치에 적용하여 초기 이산화탄소 농도가 5,000 ppm인 전동차 객실의 이산화탄소 농도를 약 45분 만에 2,500 ppm까지 낮출 수 있었다. 따라서 전동차에서 이산화탄소 저감장치를 가동할 경우 이산화탄소 농도를 짧은 시간에 낮출 수 있으며, 외기의 유입으로 인한 이산화탄소의 자연감소를 감안할 경우 저감장치에 의한 이산화탄소 저감효과는 52.9 %인 것으로 나타났다.

향후 흡착제의 성능개선 및 유동해석을 통한 저감장치의 개량으로 실제 운행되는 전동차의 이산화탄소 농도를 '대중교통수단 실내공기질 가이드라인'에서 정한 비첨두시간의 3,500 ppm, 첨두시간의 2,500 ppm 이하로 유지할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 '도시철도 터널 및 차량의 공기질 개선 기술 개발' 사업 및 교육과학기술부의 '실내공간 에코청정화 원천기술개발' 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 환경부(2005), "다중이용시설 등의 실내공기질 관리법".
2. 환경부(2007), "대중교통수단 실내공기질 가이드라인".
3. Soon-Bark Kwon, Youngmin Cho, Duck-Shin Park, Eun-Young Park(2008), "Study on the indoor air quality of Seoul metropolitan subway during the rush hour", Indoor and Built Environment, Vol. 17, No. 4, pp.361-369.
4. 권순박, 조영민, 박덕신, 박은영(2008), "출입문 개폐에 의한 전동차 객실 CO_2 저감효과 분석", 한국대기환경학회지,

제24권, 제2호, pp.153-161.
5. 권순박, 조영민, 박덕신, 박은영(2007), “전동차 객실의 실내공기질 평가 - CO_2 농도와 승객 수”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집.
6. 김기홍, 조영민, 황윤호, 이주열(2009), “복합무기혼합체에 의한 CO_2 PSA공정 연구”, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, pp.192-193.