

제올라이트계 이산화탄소 흡착제를 사용한 지하철 객실 내부의 이산화탄소 제거에 관한 연구

Study on the Removal of Carbon Dioxide in the Subway Cabin Using Zeolite Type Carbon Dioxide Adsorbent

조영민[†] · 박덕신¹ · 권순박¹ · 이주열² · 황윤호²

Youngmin Cho · Duck-Shin Park · Soon-Bark Kwon · Ju Yeol Lee · Yun-Ho Hwang

Abstract High concentration of carbon dioxide at subway cabin is one of the serious environmental concerns because carbon dioxide causes drowsiness, headache, and nervelessness of passengers. Ministry of Environment set a guideline for indoor carbon dioxide levels in train or subway in 2007. In this study, a carbon dioxide removal system for subway cabin was developed and tested using a test subway cabin. Various types of modified zeolites were used as the adsorbent of carbon dioxide. The tested zeolites were applied to the subway cabin, and showed high potential to lower the indoor CO₂ level.

Keywords : Carbon dioxide, Adsorbent, Subway cabin, Indoor air quality, Removal

초 록 지하철 객실은 고농도의 이산화탄소로 오염되기 쉬운데, 이로 인하여 지하철 승객의 졸림, 두통, 무력감 등을 야기하기 쉽다. 이 때문에 환경부에서는 2007년에는 열차와 지하철 객실의 이산화탄소 농도에 대한 가이드라인을 정한 바 있다. 본 연구에서는 지하철 객차용 이산화탄소 저감 시스템을 개발하고 실험용 객차를 이용하여 성능시험을 수행하였다. 다양한 종류의 개질 제올라이트를 이산화탄소 흡착제로 사용하여 지하철 객실 내부의 이산화탄소 농도를 저감할 수 있었다.

주요어 : 이산화탄소, 흡착제, 지하철 객실, 실내공기질, 저감

1. 서 론

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 1,000ppm으로 정하고 있다. 일반적인 실내 환경에서 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 환기시스템

을 이용하여 이산화탄소 농도를 1,000ppm 이하로 유지하는 것은 현실적으로는 거의 불가능하다.

이에 환경부에서는 기존의 '다중이용시설 등의 실내공기질 관리법'에서 정한 일반적인 이산화탄소 농도기준과 별도로 2007년에 표 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 [3-7]. 특히 이산화탄소의 농도는 승객의 수와 비례하기 때문에 승객의 수가 정원을 훨씬 초과하는 출근시간 때에는 전동차 객실의 이산화탄소 농도가 고농도가 되는 경우가 빈번하다.

Table 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

[†]교신저자 : 한국철도기술연구원 철도환경연구실
E-mail : ymcho@krii.re.kr

¹한국철도기술연구원 철도환경연구실

²(주)에니텍

제올라이트계 흡착제에 대한 특성을 파악하였다. 그리고 흡착제를 충전한 이산화탄소 흡착 장치를 개발하고, 이를 실제 객차에 적용하는 실험을 통해 전동차 객실의 공기질을 쾌적하게 유지할 수 있는 방안을 모색하였다.

2. 실험 방법

2.1 이산화탄소 흡착제

본 실험에서는 이산화탄소 흡착제로 상용 13X 제올라이트(UOP사)와 5A 제올라이트(UOP)를 구입하여 그대로 사용하거나, 이를 이온교환 방법으로 개질하여(AK1, AK2) 사용하였다[8]. AK1과 AK2는 상용 제올라이트를 200°C에서 5시간 동안 건조 후, 이산화탄소의 화학적 흡착이 가능하도록 70°C의 NaCl 수용액에 24시간 씩 3회에 걸쳐 총 72시간 동안 담지하였다. 이를 증류수로 세척한 후 다시 120°C에서 건조시키고 pellet 형태로 성형하였다. 이후 각각 500°C 및 700°C의 고온에서 2시간 동안 소성한 후 실험에 사용하였다. 상용 제올라이트인 13X와 5A는 모두 지름 2~3mm의 구형 알갱이 형태였고, AK1과 AK2는 가로, 세로, 높이 각각 5~6mm의 정사각형 형태로 소성하여 사용하였다.

Table 2 Preparation of carbon dioxide adsorbent

Classification	13X	5A	AK1	AK2
Maker	UOP		Anytech	
Synthesis	Synthetic zeolite		Ion-exchanged zeolite	
Cation	sodium	calcium	sodium calcium	sodium calcium lithium
Calcination temperature (°C)	none		500	700
BET surface area (m ² /g)	474	37	108	110
Size (mm)	2	2	5	5
Hardness (kgf/cm ²)	4.0	3.5	3.0	2.5

2.2 이산화탄소 흡착성능 실험

상용 제올라이트 및 개질한 흡착제의 이산화탄소 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 유량을 1~5L/min로 다양하게 변화시키고, 이 때 이산화탄소의 유량을 4~25mL/min 등으로 조절하여 초기 이산화탄소의 농도를 5,000ppm으로 일정하게 하였다. 이산화탄소 흡착제를 단면 지름 3.75cm, 길이 21cm, 부피 232mL의 quartz로 제작된 이산화탄소 흡착 반응기에 충전하였으며, 이 때 충전량은 30g과 70g의 두 가지 경우로 나누어 실험을 수행하였다. 이산화탄소 흡착 반응기를 통과한 후의 이산화탄소 농도는 비분산적외선(Non-dispersive infrared; ND IR) 방식의 이산화

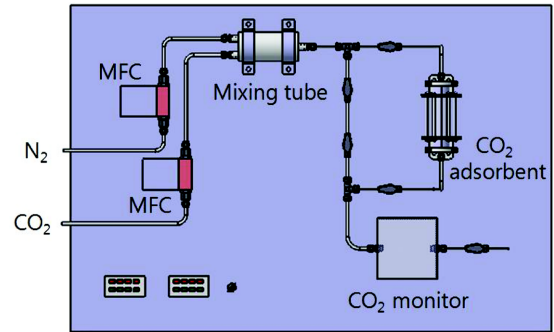


Fig. 1 Experimental set-up for CO₂ adsorption

탄소 센서(SenseAir사, 스웨덴)로 측정하여 흡착제의 이산화탄소 저감성능을 파악하였다. 또한, 흡착제의 충전량과 유량에 따른 영향을 알아보기 위하여 유량을 1~5L/min으로 변화시키고, 충전량도 30g과 70g으로 바꾸면서 시간에 따른 이산화탄소 흡착성능을 알아보았다.

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 2.0m 높이에 설치하여 실험을 수행하였다. 실제 전동차에 적용할 때에는 저감장치 두 대를 진행방향으로 전동차의 앞부분과 뒷부분에 각각 한 대씩 장착할 수 있도록 설계하였다.

이산화탄소 저감장치에 사용된 이산화탄소 흡착제는 AK2였으며, 사용된 양은 4kg이었고, 유량은 3m³/min 이었다. 객실 내 실험공간의 크기는 길이 10.0m, 폭 2.9m, 높이 2.3m로서 총 부피는 66.7m³이었다. 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.

이산화탄소 농도 변화를 모니터링하기 위하여 그림 2와 같이 두 개의 CO₂ monitor를 이산화탄소 저감장치의 공기 유입구 아래 부분과 공기 토출구 아랫부분에 지상에서 1m 높이에 각각 설치하였다. 이렇게 두 개의 CO₂ monitor를 사용한 것은 CO₂ monitor 2의 상부 위치에서 이산화탄소 저감장치로 공기가 유입되고 CO₂ monitor 1의 상부 위치로 처

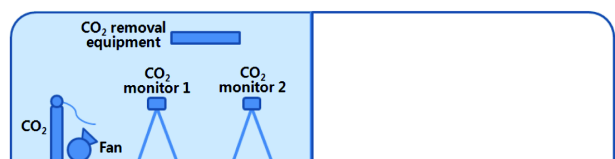


Fig. 2 Schematic diagram of CO₂ removal test in subway cabin

리된 공기가 나오기 때문에 이에 따른 영향을 알아보기 위함이었다.

3. 실험 결과

3.1 이산화탄소 흡착성능

상용 제올라이트계 이산화탄소 흡착제를 대상으로 질소 유량을 1.6L/min으로 고정시키고, 이산화탄소를 일정하게 흘려주어 초기 이산화탄소 농도를 5,000ppm으로 조절한 후에 이산화탄소 흡착제의 충전량을 30g과 70g으로 하였을 때의 흡착성능을 비교 결과를 그림 3에 나타내었다. 실험결과, 30g을 충전한 경우 13X는 132분, 5A는 345분 동안 흡착이 진행되었고, 70g을 충전한 경우 13X는 302분, 5A는 398분 동안 흡착이 진행되어 충전량이 많은 경우 흡착도 더 오랫동안 일어남을 알 수 있었다. 또한, 13X보다는 5A가 흡착 성능이 더욱 우수한 것으로 나타났다.

13X에 흡착된 이산화탄소의 양은 충전량이 30g일 경우 0.63L, 70g일 경우 1.15L이었으며, 이산화탄소의 상온·상압에서의 밀도를 1.98g/L로 가정하였을 경우에 질량은 1.25g, 2.28g이며, 이는 각각 22.72mmol과 51.81mmol에 해당하므로 흡착제 1g 당 0.76mmol과 0.74mmol의 이산화탄소가 흡착된 것을 알 수 있었다. 따라서 충전량이 변화해도 단위 중량당 이산화탄소 흡착량은 큰 변화가 없었다.

5A에 흡착된 이산화탄소의 양은 충전량이 30g일 경우 1.45L, 70g일 경우 1.94L이었으며, 13X와 마찬가지로 계산하면, 각각 2.87g, 3.84g이고, 이는 65.21mmol, 87.25mmol이므로, 흡착제 1g 당 2.17mmol과 1.24mmol의 이산화탄소가 흡착하였다. 따라서 5A가 13X보다 단위 중량당 이산화탄소를 1.6~2.8배가량 더 잘 흡착함을 알 수 있었다. 그러나 5A는 13X와 달리 충전량이 증가하면 단위 중량당 이산화탄소 흡착량이 43% 가량 감소함을 볼 수 있었다. 이는 흡착 반응기의 단면적이 일정한 상태에서 충전량을 증가시키면 충전층의 길이가 증가하는데, 충전층의 길이가 길어지면서 앞 부분에서 흡착이 잘 일어나 뒷 부분에서는 흡착성능이 떨어지면서 전체적인 단위중량당 흡착량은 감소하는 것으로 보인다. 13X에서는 이와 같은 현상이 나타나지 않은 것은 13X는 충전층의 앞 부분에서 흡착이 충분히 일어나지 않으므로, 상대적으로 고농도의 이산화탄소가 흐르면서 뒷 부분에서도 고르게 이산화탄소가 흡착이 일어나기 때문인 것으로 보인다. 따라서, 5A를 이산화탄소 흡착제로 사용하기 위해서는 가능한 한 단면적은 넓게 하고 충전층의 높이는 낮추는 것이 더 효율적일 것으로 판단된다.

제올라이트가 초기에 이산화탄소를 잘 흡착할 수 있는 것은 제올라이트에 잘 발달된 pore와 channel 등으로 인하여 비표면적이 크고, 이산화탄소를 잘 흡착하는 실리카(SiO₂)와 알루미늄(Al₂O₃) 등으로 구성되어 있기 때문이다. 13X에 비하여 5A 제올라이트는 Si/Al 비율이 낮아서 염기성이 더 약하기 때문에 이산화탄소 흡착성능이 약간 낮게 나타난다. 두 제올라이트 모두 흡착가능한 양 이상의 이산화탄소가 유입되면 흡착점이 포화되기 때문에 이산화탄소 흡착량

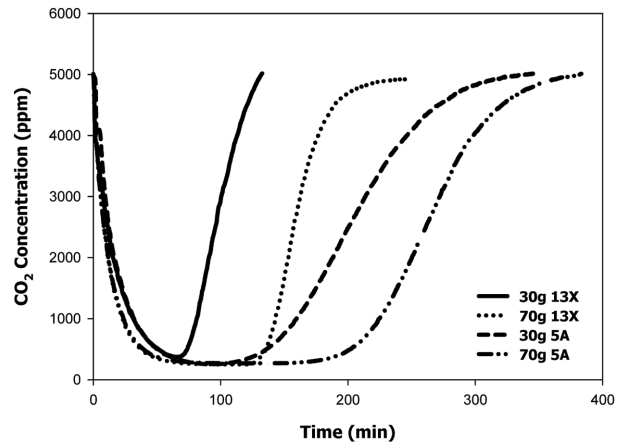


Fig. 3 Outlet CO₂ concentration for conventional zeolites at various loading amounts under 1.6L/min of N₂ flow rate

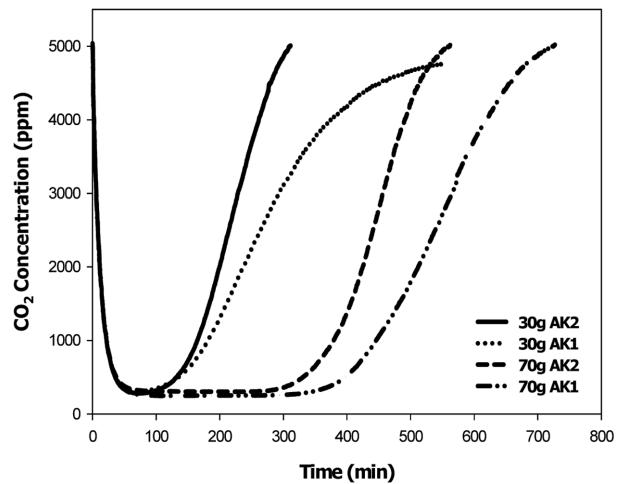


Fig. 4 Outlet CO₂ concentration for modified zeolites at various loading amounts under 1.6L/min of N₂ flow rate

이 급격히 떨어졌다.

본 실험에서 개질하여 제조한 두 가지 타입의 제올라이트계 이산화탄소 흡착제의 흡착성능을 비교한 결과를 그림 4에 나타내었다. AK1과 AK2는 상용 제올라이트인 13X 및 5A와 초기에는 유사한 이산화탄소 흡착특성을 나타냈으나, 흡착 지속시간은 크게 증가하여 흡착성능이 훨씬 우수한 것으로 나타났다. 흡착한 이산화탄소의 양은 충전량이 30g인 경우 AK1과 AK2가 각각 3.10L, 1.55L이었으며, 이를 질량으로 환산하면 6.14g, 3.07g이고, 이는 각각 139.5mmol과 69.8mmol에 해당하므로, 흡착제 1g 당 각각 4.65mmol과 2.33mmol을 흡착함을 알 수 있었다. 특히 AK1은 5A에 비해 2.1배 이상 흡착량이 커서 개질한 제올라이트의 흡착성능이 더욱 우수함을 확인할 수 있었다. 이처럼 AK1과 AK2의 초기 이산화탄소 흡착성능이 13X 및 5A에 비하여 우수한 이유는 이들 흡착제가 알칼리 물질로 구성되어 산성가스인 이산화탄소와의 산-알칼리 중화 반응을 유도할 수 있으며, 또한 양이온 교환을 통해 이산화탄소와 화학적 흡착 형

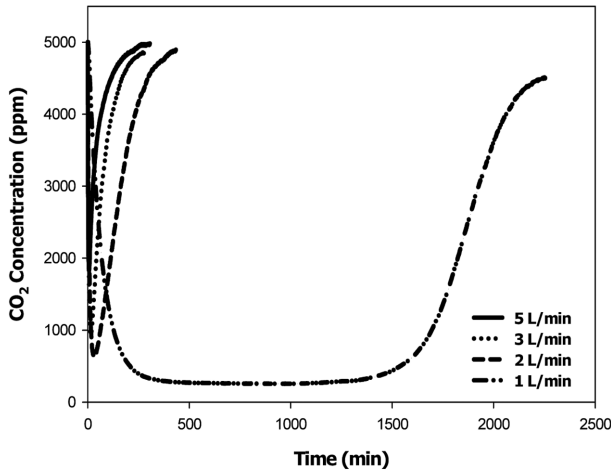


Fig. 5 Outlet CO₂ concentration for 30g of AK1 under various flow rates condition

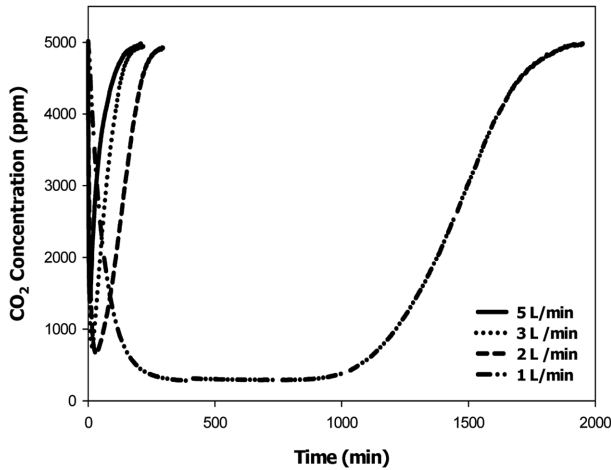


Fig. 6 Outlet CO₂ concentration for 30g of AK2 under various flow rates condition

성을 더 용이하게 하였기 때문이다.

충진량이 70g인 경우 흡착한 이산화탄소의 양은 AK1과 AK2가 각각 4.03L, 3.23L이었으며, 이를 질량으로 환산하면 7.98g, 6.40g이고, 이는 각각 181.3mmol과 145.4mmol이며, 흡착제 1g 당 각각 2.59mmol과 2.08mmol의 이산화탄소가 흡착되었음을 알 수 있었다. 충진량이 증가하면 AK1과 AK2 모두 5A와 마찬가지로 단위 증량당 이산화탄소 흡착량이 감소하는 것을 볼 수 있었는데, 특히 AK1의 흡착량이 크게 감소하였다. 이는 5A의 경우와 마찬가지로 흡착 반응기의 단면적이 일정한 상태에서 충진량이 증가함에 따라 충진층의 길이가 길어지면서 앞부분에서 흡착이 잘 일어나 뒷부분에서는 흡착능이 떨어지면서 전체적인 단위증량당 흡착량은 감소하는 것으로 보인다.

위의 실험에 사용된 개질한 제올라이트계 이산화탄소 흡착제 AK1과 AK2를 대상으로 이산화탄소 농도를 동일하게 한 조건에서 질소와 이산화탄소 혼합가스의 유량을 다양하게 변화시킨 경우에 대한 각 흡착제의 이산화탄소 흡착특성

을 그림 5~6에 나타내었다. 실험결과 AK1과 AK2 모두 유량이 1L/min으로 낮을 때는 흡착이 오랫동안 지속됨을 볼 수 있었으나, 2L/min 이상 증가시 흡착 지속시간이 급격하게 감소함을 볼 수 있었다. 이는 이산화탄소가 흡착하기 위해서는 이산화탄소의 흡착 반응기 내 체류시간이 길어야 함을 의미한다.

3.2 지하철 객실의 이산화탄소 저감

본 실험에서는 전동차 객실용 이산화탄소 저감장치를 제작하여 실제 차량에 설치하고 초기 농도를 약 5,000ppm으로 설정한 후 장치를 가동하였을 때와 가동하지 않았을 때의 이산화탄소 농도 변화를 그림 7 (CO₂ monitor 1)과 그림 8 (CO₂ monitor 2)에 나타내었다.

실험결과 이산화탄소 저감장치를 가동하지 않은 경우에도 이산화탄소 농도가 자연적으로 감소하는 것을 볼 수 있었는데, 초기 이산화탄소 농도가 4,988ppm이었던 CO₂ monitor 1에서는 2,500ppm에 도달하기까지 103분이 소요되어 이산화탄소 농도 저감속도는 24.2ppm/min이었고, 초기 이산화탄소 농도가 4,690ppm이었던 CO₂ monitor 2에서는 2,500ppm에 도달하기까지 101분이 소요되어 이산화탄소 농도 저감속도는 21.7ppm/min이었다. 이처럼 이산화탄소 농도가 자연적으로 감소하는 것은 전동차 객차의 특성상 출입문, 연결막 등의 틈을 통하여 외기가 유입되어 객실의 이산화탄소 농도가 희석되어 저감되기 때문이다.

이산화탄소 저감장치를 가동한 경우, 초기 이산화탄소 농도가 5,048ppm이었던 CO₂ monitor 1에서는 2,500ppm에 도달하기까지 44분이 소요되어 이산화탄소 농도 저감속도는 57.9ppm/min이었고, 초기 이산화탄소 농도가 4,326ppm이었던 CO₂ monitor 2에서는 46분이 소요되어 이산화탄소 농도 저감속도는 39.7ppm/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.

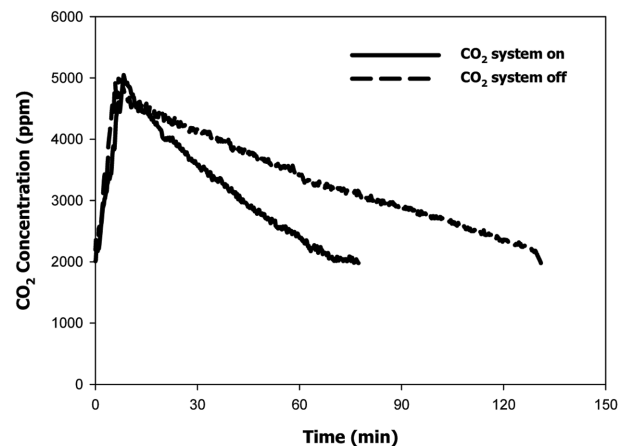


Fig. 7 CO₂ concentration change monitored by CO₂ monitor 1 with CO₂ removal system on and off

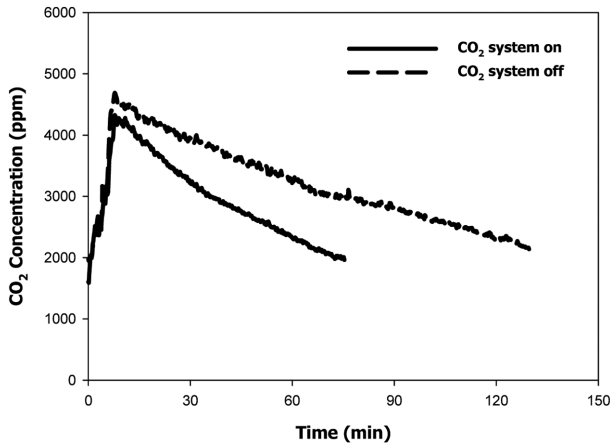


Fig. 8 CO₂ concentration change monitored by CO₂ monitor 2 with CO₂ removal system on and off

또한, CO₂ monitor 2보다는 CO₂ monitor 1에서 저감속도가 더 크게 나타났는데, 이는 CO₂ monitor 2의 상부 위치에서 이산화탄소 저감장치로 공기가 유입되고 CO₂ 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 66.7m³이며, 이산화탄소 저감장치의 성능실험에 사용된 저감장치의 처리 유량은 3m³/min이므로 환기율은 2.7회/h이었다. 즉, 약 22분마다 한 번 씩 전동차 내부의 공기가 이산화탄소 저감장치를 통과하는 것이 된다. 실제 실험에서는 초기 이산화탄소 농도인 5,000ppm을 2,500ppm으로 낮추는데 44~46분이 소요되므로 본 처리장치를 약 2회 통과해야 함을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 상용 제올라이트계 이산화탄소를 개질하여 보다 이산화탄소 흡착성능이 우수한 이산화탄소 흡착제를 개발하였다. 이렇게 개발한 이산화탄소 흡착제를 충전한 소형 이산화탄소 흡착장치에 적용하여 초기 이산화탄소 농도가 5,000ppm인 전동차 객실의 이산화탄소 농도를 약 45분 만에 2,500ppm까지 낮출 수 있었다. 따라서 전동차에

서 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 3,500ppm, 첨두시간의 2,500ppm 이하로 유지할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래도시철도기술개발사업(도시철도 터널 및 차량의 공기질 개선기술개발 연구단)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Korean Ministry of Environment (2005) Indoor air quality management act for public spaces.
- [2] Korean Ministry of Environment (2007) Indoor air quality management guideline for public transportation.
- [3] S.-B. Kwon, Y. Cho, D.-S. Park, E.-Y. Park (2008) Study on the indoor air quality of Seoul metropolitan subway during the rush hour, *Indoor and Built Environment*, 17(4), pp. 361-369.
- [4] S.-B. Kwon, Y. Cho, D.-S. Park, E.-Y. Park (2008) Effect of door opening on the removal of indoor CO₂ in subway cabin, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(2), pp. 153-161.
- [5] S.-B. Kwon, D.-S. Park, Y. Cho, E.-Y. Park (2010) Measurement of natural ventilation rate in Seoul metropolitan subway cabin, *Indoor and Built Environment*, 19(3), pp. 366-374.
- [6] J.-S. So, S.-Y. Yoo (2007) A Study on CO₂ and PM10 Changes by Operation of KTX HVAC-Pressurization Equipment in Tunnel Sections, *Journal of the Korean Society for Railway*, 10(6), pp. 723-729.
- [7] J.-S. So, S.-Y. Yoo (2008) A Prediction of CO₂ Concentration and Measurement of Indoor Air Quality in the EMU, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(4), pp. 378-383.

접수일(2010년 2월 17일), 수정일(2010년 12월 24일),
 게재확정일(2010년 12월 31일)