전동차 출입문 개폐에 따른 객실 이산화탄소 농도변화의 실험적 연구

Experimental Study on CO_2 Level Fluctuation by Door-opening of Subway

권순박* 박덕신** 조영민*** 박은영**** 김세영***** 정미영****** 함대주*******

Kwon, Soon-Bark Park, Duckshin Cho, Youngmin Park, Eun-Young Kim, Se-Young Jung, Mi-Young Ham, Dae-Joo

---

ABSTRACT

Indoor air quality (IAQ) of subway becomes a key issue as the IAQ guidelines for public transportation published. There are two major sources regarding IAQ of subway; One is the sources coming from outdoor air and the other is sources of inside. Particulate matters smaller than 10 micrometer (PM10) and carbon dioxide (CO_2) are recognized as the one of the most severe pollutants in Korea. The source of PM10 is mainly coming from outdoor air, however, the source of CO_2 is coming from passengers exhaust. According to the guidelines, the level of CO_2 should be lower than 2500ppm for normal operating time and lower than 3500ppm for rush hour. In order to satisfy these guidelines, the volume of mechanical ventilation should be increase which consumes extra energy for heating or cooling. Therefore, the optimum volume of mechanical ventilation should be calculated for energy saving. In this study, we measured the natural ventilation rate by door-opening which can reduce the load of mechanical ventilation. The CO_2 generator and sensors were used to measure the change of CO_2 by periodic door-opening of subway.

---

1. 서 론

대중교통수단 내의 실내공기질에 대한 관심이 증대되면서 열차, 버스 및 지하철 내에서 CO_2 농도가 크게 주목받고 있으며(Kwon et al., 2008), CO_2 농도와 관련된 지하철 객실의 자연환기효과에 대한 연구가 수행되었다(권순박 등, 2007a, 권순박 등 2007b). CO_2 농도는 환기에 의한 실내공기의 쾌적성을 살펴보는 지표로 사용될 수 있으며 또한 CO2 농도가 높아지면 직접적으로 재실자의 온열환경 쾌적성을 저하시키는 요인을 작용한다. 현재 운행중인 수도권 전동차의 경우 차량에 강제환기설비가 장착된 경우도 있으나, 에너지 효율성의 측면에서 그리고 출입문이 자주 개폐된다는 특성으로 인해 객실 환기는 주로 자연환기에 의존하고 있는 실정이다. 그러나 아직까지 자연환기에 대한 정량적 연구결과는 보고되지 않았다. 이러한 자연환기에 의한 정량적 연구결과는 지하철 냉방장치와 환기장치의 경제적 운영에 중요한 근거로 사용될 수 있다. 권순박 등(2008)은 출입문 개폐에 의한 전동차 객실 CO_2 농도의 저감효과에 대한 예측식과 이를 뒷받침하는 실험결과를 이용하여 출입문 개폐에 의해 객실 CO_2농도의 약 35%가 저감된다고 발표하였다. 본 연구에서는 차고지에 정차중인 전동차 객실에서 CO_2 발생장치와 승객의 체적을 반영할 수 있는 스티로폼 모형을 이용하여 객실 내 이산화탄소 농도변화에 대한 연구를 수행하였다.

---

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
E-mail : sbkwon@krri.re.kr
TEL : (031)460-5375 FAX : (031)460-5279
** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
**** 한국과학기술연합대학원, 학생회원
***** 한국철도기술연구원 연구원, 비회원
****** 한국철도기술연구원 연구원, 비회원
****** 한국철도공사 팀원, 정회원

2. 연구 방법

전동차의 객실 환기는 배기팬을 통한 강제환기 방식과 운행 중 자연적으로 이루어지는 자연환기 방식으로 이루어진다. 전동차 차체기밀도에 따라 실내공기는 외기와 혼합 혹은 환기될 수 있으나, 전동차의 주된 환기는 출입문의 개폐 및 차체의 빈틈에 의해 이루어진다고 볼 수 있다. 객실을 하나의 밀폐공간으로 생각하면, CO_2농도증가는 탑승객의 호흡작용에 의한 토출의 결과이므로, 탑승객수와 1인당 평균 CO_2토출량을 이용하면 객차의 출입문이 닫혀있는 시간, 즉 정거장 출발 후 다음 정거장에 도착하여 출입문이 열리기 직전까지의 CO_2농도를 예측할 수 있다. 수도권 도시철도 6개 노선에 대한 측정결과와 예측식을 이용하여 출입문 개방 및 운행 중 차체를 통해 환기되는 실내공기의 비율은 약 35%에 이르는 것으로 조사되었다(권순박 등, 2008). 본 연구에서는 차고지에서 정차중인 전동차(승객이 탑승하지 않은 조건)에서 CO_2 가스를 객실에 주입하여 실험을 수행하였다. 객실 중앙에서 CO_2가스를 일정농도로 주입한 뒤, 출입문을 개방하지 않은 상태에서 CO_2농도의 자연저감에 따른 농도변화를 측정하고, 동일한 조건에서 출입문을 개방한 상태에서 농도변화를 측정하였다. 이때, 승객이 차지하는 체적을 고려하기 위하여 혼잡도에 따라 승객의 총 체적에 해당하는 부피를 스티로폼 박스를 이용하여 모사하였다. 객실 내 CO_2농도의 자연저감 결과는 아래 식(1)을 이용하여 분석하였다.

$$CO_2 = a \times \exp(-bt) \tag{1}$$

여기에서 CO_2농도는 ppm 단위이며 a와 b는 특정상수로 Sigma Plot을 이용하여 회귀분석 하였으며, t는 시간(sec)이다.

3. 결 과

전동차 객실 출입문이 닫힌 상태에서 CO_2 발생장치를 이용하여 객실의 CO_2농도를 약 4000ppm까지 상승시킨 후, 발생장치를 잠그고 CO_2 농도의 자연저감률을 측정하였다(그림 1). 전동차의 출입문은 닫혀있지만, 차량이 완전 밀폐되어 있지 않기 때문에 초기 4000ppm 이상의 CO_2농도는 시간이 지나면서 자연저감 한다. 이러한 저감률은 초기 농도에 비례하는 지수함수적 감소(exponential decay)를 하게 되는데, 그림1과 같이 a = 4099, b=0.0004의 값에 의하여 거의 정확히(R^2=0.997) 모사된다.

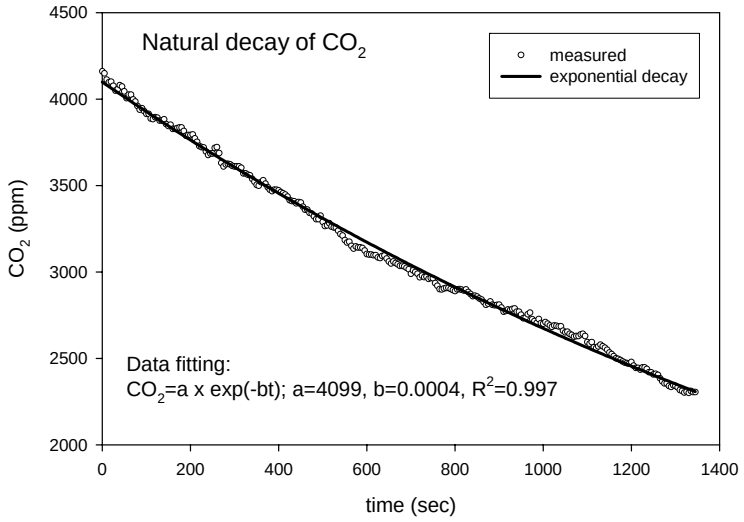
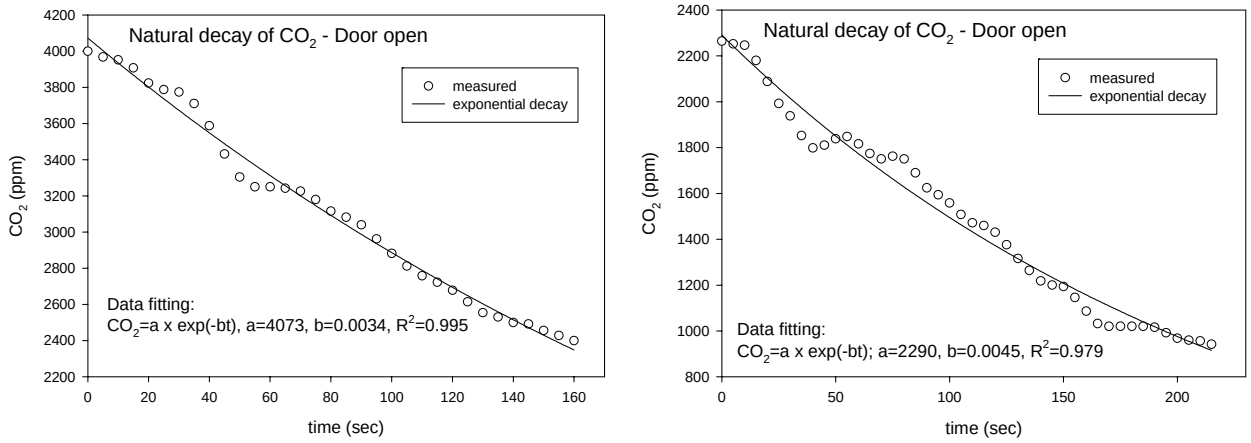


그림 1. 출입문이 닫힌 상태에서 객실 CO_2농도의 자연저감률

전동차 객실내에 CO_2 발생장치를 이용하여 CO_2농도를 각각 4000ppm 수준과 2000ppm 수준으로 상승시킨 후, 출입문을 열어 둔 상태에서 저감되는 CO_2농도를 관찰하였다. 객실 이산화탄소 농도는 출입문이 닫혀 있는 경우에 비하여 급격하게 감소하는데 초기 농도조건에 따라 그림2(a)와 (b)와 같은 결과가 나타났다.



(a) 초기 4073ppm 상태 (b) 초기 2290ppm 상태

그림 2. 출입문이 개방된 상태에서 객실 CO2농도의 자연저감률

앞선 결과와 마찬가지로 CO_2 농도의 저감률은 지수함수적으로 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, 출입문이 닫혀 있는 경우에 비하여 감소기울기라 할 수 있는 b값이 8.5배에서 11.25배 이상 커지는 것을 알 수 있다. a값의 경우, 이론상 초기농도와 근접한 값을 나타나게 된다. 표1에 출입문이 닫혀 있는 경우와 개방되어 있는 경우 앞서 제시된 CO_2 농도의 지수함수적 감소값(b)을 이용하여, 정차시간 혹은 출입문 개방시간에 따른 CO_2 농도 저감률을 예측하였다. 이때 출입문 개방시의 값은 고농도 및 저농도 초기조건의 결과의 평균값을 이용하였다. 통상적인 도시철도 차량의 출입문 개방시간이 약 20초 정도임을 감안하면, 객실 CO_2 농도의 약 7.6%가 출입문 개방에 의해 저감된다고 할 수 있다. 그리고 출입문을 개방하지 않은 상태에서는 30초가 지나도 약 1.2%의 감소만이 발생하였다. 실제 승객이 탑승할 경우 CO_2 농도는 승객의 호흡에 의하여 증가할 수 있다. 앞선 연구에서 출입문 개방과 차량의 빈틈으로 인한 자연환기 효과가 약 35%에 이른다고 보고하였으나, 본 연구에서는 출입문 개방과 차량빈틈으로 인한 자연환기 효과가 출입문 개방시간 20초 기준으로 7.6% 수준인 것으로 나타났다. 이는 차량이 정차해 있는 경우로 차량의 운행에 의한 빈틈을 통한 실외공기 유입효과가 없기 때문인 것으로 보인다. 또한, 시험대상차량이 실외에서 직사광선을 받고 있으며, 외기온도가 32도가 넘는 특수한 조건에 대한 결과로서, 도시철도 차량의 실제 운행조건과 큰 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다.

표1. 전동차 정차시 출입문 개폐에 따른 객실 CO_2농도 저감률(%)

	CO_2 reduction rate (%)	
time(sec)	door-closed	door-open
0	0.0	0.0
5	0.2	2.0
10	0.4	3.9
15	0.6	5.7
20	0.8	7.6
25	1.0	9.4
30	1.2	11.2

그림 3은 240명의 승객(혼잡률 150%, 160명 정원기준)이 객실에 탑승하고 있고, 역사간 운행시간이 2분 30초이며, 출입문이 20초간 개방되는 상황에서 객실 CO_2 농도변화를 모사한 것이다. 실험에서는 정차된 차량의 절반을 이용했으며, CO_2 발생기를 이용하여 약 1.5l/min의 CO_2 가스를 연속적으로 주입하였다. 이는 승객 1인당 약 0.017m^3/hr/person 의 방출량을 기준으로 계산된 값이다. 그리고, 승객의 체적은 신장 160cm, 체중 60kg을 기준으로 1인당 0.06m^3의 부피에 해당하는 스티로폼 블록을 이용하여 모사하였다. 그림에서와 같이 객실 CO_2 농도는 출입문 개방효과에 따라 시간이 지나면서 감소하는 경향을

나타낸다. 출입문이 개방되는 20초와 출입문이 닫힌 직후 CO_2 농도가 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 기존의 수치해석적 연구와 비교하기 위해서는 CO_2가스의 발생유량에 대한 정확한 보완실험이 필요한 것으로 보인다. 이는 압축된 CO_2가스 봄베에서 실내에 직접 분무하기 때문에 급격한 온도변화에 이에 따른 정확한 유량산정의 어려움 때문이다. 또한, 출입문 개방시 직접적인 영향을 미치게 되는 외기조건에 대한 제어가 필요하다.

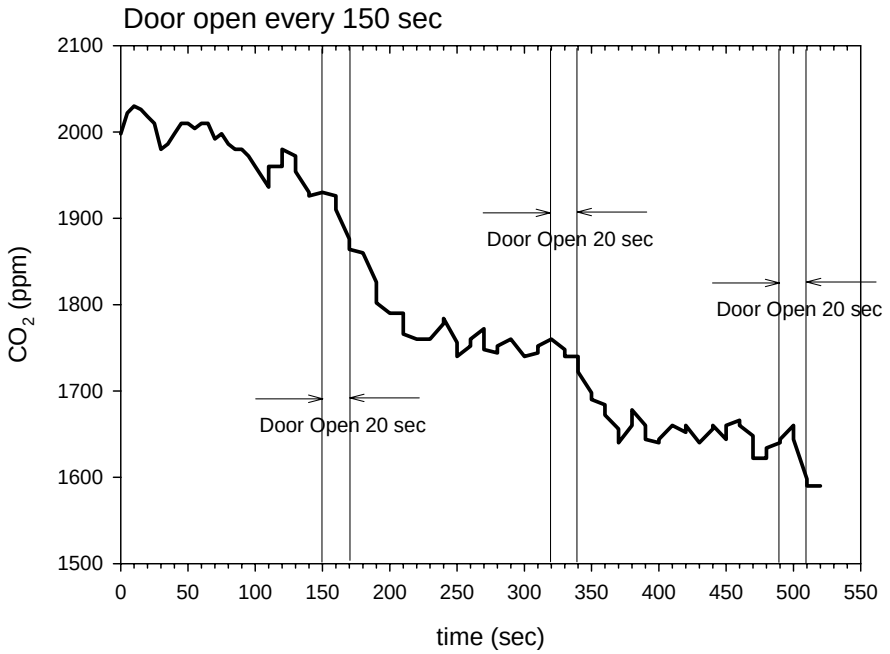


그림 3. 일정주기 출입문 개폐에 따른 객실 CO_2 농도변화

4. 결　론

정차하고 있는 도시철도 전동차 객실에서 CO_2 농도의 자연저감률을 출입문이 닫혀 있는 상태와 개방된 상태에서 각각 측정하였다. 두 경우 모두에서 객실 CO_2 농도는 지수함수적으로 감소하는 것으로 나타났으며, 개방된 상태에서 약 8.5~11.5배 더 빠른 감소특성을 나타내었다. 승객의 체적과 전동차의 평균적 운행시간을 고려한 CO_2 농도 변화시험에서는 출입문 개방에 따른 CO_2 농도변화 특성을 파악할 수 있었다. 그러나, CO_2 발생장치의 정확한 유량제어와 외기조건의 영향을 객관화 시키는데 어려움이 있었으며, 향후 추가연구가 필요한 것으로 판단된다.

5. 참고 문헌

1 권순박, 조영민, 박덕신, 박은영 (2007) 전동차 객실의 실내공기질 평가-CO_2농도와 승객 수, 한국철도학회 춘계학술대회.

2) 권순박, 조영민, 박덕신, 박은영, 김세영, 정미영 (2007) 수도권 전동차 객실 CO_2농도관측을 통한 자연환기효과 해석, 한국철도학회 추계학술대회

3) 권순박, 조영민, 박덕신, 박은영 (2008) 출입문 개폐에 의한 전동차 객실 CO_2 저감효과 분석, 한국대기한경학회지 24(2), 153~161.

4) Kwon S.B., Cho, Y., Park, D., Park E.Y.(2008) Study on the indoor air quality of Seoul metropolitan subway during the rush hour. Indoor and Built Environment, 17(4), 361~369.