

수도권 전동차 객실 CO₂농도관측을 통한 자연환기효과 해석

Analysis of Natural Ventilation Effect of Seoul Metropolitan Subway by Monitoring Indoor CO₂ Concentrations

권순박* 조영민** 박덕신*** 박은영**** 김세영***** 정미영*****
Kwon, Soon-Bark Cho, Youngmin Park, Duckshin Park, Eun-Young Kim, Se-Young Jung, Mi-Young

ABSTRACT

Two major parameters, i.e. carbon dioxide (CO₂) and particulate matters smaller than 10 μ m (PM₁₀), were selected as the index pollutants in managing indoor air quality. The former pollutant, CO₂, is the index that shows the ventilation status and is exhaled by passengers when they breathe in train or subway. It is generally known that high CO₂ concentration in the vehicle may be decreased by insufficient air-tightening vehicle bodies and the air is ventilated when vehicles stop at the station and doors open. However, there is no established proof or quantitatively identified data on how much the CO₂ concentration is reduced when ventilation is done while doors are opened. In this study, CO₂ concentrations were measured in 6 lines of Korail and one line of Seoul Metro subway lines and a theoretical approach was taken to predict the changing trend of CO₂ concentrations during the operation of vehicle by using CO₂ dilution factor through natural ventilation. As a result, the change could be quantified and it was found that app. 35% of indoor CO₂ was removed through natural ventilation.

1. 서론

최근 대중교통수단 내의 실내공기질에 대한 관심이 증대되면서 열차, 버스 및 지하철 내에서 CO₂ 농도가 크게 주목받고 있다(권순박 등, 2007). CO₂ 농도는 환기에 의한 실내공기의 쾌적성을 살펴보는 지표로 사용될 수 있다. 현재 운행 중인 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. 본 연구에서는 자연환기효과를 정량적으로 분석하기 위하여, 객실 CO₂농도 변화에 주목하였다. 즉, CO₂농도가 탑승객수에 비례하여 증가하고, 차체의 빈틈과 출입문의 개폐 등에 따른 자연환기효과에 의하여 감소한다는 기본적 사실을 바탕으로 객실 CO₂농도 변화 예측식을 개발하였다.

2. 연구방법

현재 운행 중인 코레일(Korail) 수도권 전동차 노선 중 경부선(서울-천안), 경인선(구로-인천), 분당선(선릉-보정) 구간과 Seoul Metro 2, 3, 4호선의 출퇴근 시간대 객실 CO₂농도 및 CO농도를 연속 측정하

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

E-mail : sbkwon@krii.re.kr

TEL : (031)460-5375 FAX : (031)460-5319

** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

**** 한국과학기술연합대학원 대학교, 정회원

***** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

***** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

고, 탑승객수를 각 정차역마다 기록하였다. CO₂농도의 측정에는 비분산적외선(non-dispersive infrared) 방식의 센서가 사용되었으며, 측정센서는 실내환경종합측정기(IES3000, Sibata)에 내장되어 매1초 단위로 농도를 측정한다. 측정은 객실 중앙지점 높이 0.85m에서 이루어졌으며, 탑승객수는 전동차를 임의의 구역으로 나누어 몇몇 대표구역에서 승객수를 세어 전체 승객수를 산정하는 방식으로 기록하였으며, 탑승객수가 적은 구간에서는 승객전원을 세어 기록하였다. 측정기간은 Korail의 경우 2007년 3월 20일~23일, Seoul Metro의 경우 2007년 6월26~29일이며 상세한 측정일정은 표 1과 같다.

Table 1. Monitoring schedule for Korail and Seoul Metro lines.

| Operator | Date | Lines | Length (km) | #of Stations | Avg. Distance* | Rush Hour | Time table |
|-------------|----------|----------|-------------|--------------|----------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Korail | 20 March | Bundang | 27.7 | 19 | 1.47 | p.m. | Seolleung 19:00 ~ Bojeong 19:46 |
| | 21 March | Bundang | 27.7 | 19 | 1.47 | a.m. | Bojeong 07:35 ~ Seolleung 08:23 |
| | | Gyeongbu | 96.9 | 36 | 2.69 | p.m. | Seoul St. 18:19 ~ Cheonan 20:18 |
| | 22 March | Gyeongbu | 96.9 | 36 | 2.69 | a.m. | Cheonan 06:54 ~ Seoul St. 09:01 |
| | | Gyeongin | 27.0 | 21 | 1.29 | p.m. | Guro 18:58 ~ Incheon 19:42 |
| 23 March | Gyeongin | 27.0 | 21 | 1.29 | a.m. | Incheon 07:31 ~ Guro 08:19 | |
| Seoul Metro | 26 June | Line 2 | 48.8 | 43 | 1.13 | p.m. | Seongsu 18:02 ~ Seongsu 19:28 |
| | 27 June | Line 2 | 48.8 | 43 | 1.13 | a.m. | Seongsu 07:14 ~ Seongsu 08:40 |
| | | Line 3 | 54.4 | 40 | 1.36 | p.m. | Suseo 18:50 ~ Daehwa 20:20 |
| | 28 June | Line 3 | 54.4 | 40 | 1.36 | a.m. | Daehwa 07:44 ~ Suseo 09:14 |
| | | Line 4 | 71.5 | 48 | 1.49 | p.m. | Oido 19:09 ~ Danggyogye 20:59 |
| 29 June | Line 4 | 71.5 | 48 | 1.49 | a.m. | Danggyogye 07:21 ~ Oido 09:13 | |

*Avg. Distance: average distance between stations (=length/number of stations)

3. 객실 CO₂농도 예측식개발 및 검증

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, CO₂농도증가는 탑승객의 호흡작용에 의한 토출의 결과이므로, 탑승객수와 1인당 평균 CO₂토출량을 이용하면 객차의 출입문이 닫혀있는 시간, 즉 정거장 출발 후 다음 정거장에 도착하여 출입문이 열리기 직전까지의 CO₂농도를 예측할 수 있다. 차체의 빈틈으로 인한 자연환기효과는 주로 운행 중에 나타나며, 출입문이 열리면 외부공기와외 회석을 통해 객실 CO₂농도는 낮아지게 된다. 객실의 강제환기가 이루어질 경우 실내 CO₂농도는 외기 CO₂농도와 환기유량에 따라 결정된다. 객실내의 국부적 CO₂농도차가 존재하지 않고, 승객의 객차 간 이동에 따른 탑승인원 변화는 탑승객수 산정에서 제외하였으며, 외기의 CO₂농도는 일정하다고 가정하였다. 강제환기가 이루어지지 않는 객실에서 차체빈틈에 의한 자연환기 효과와 출입문 개폐를 통한 환기효과에 의한 CO₂농도 저감률 변수(dilution factor; D)를 도입하면, 다음과 같이 i번째 정차역에서 CO_{2,i} 농도에 관한 식을 유도할 수 있다.

$$CO_{2,i} = \left[\frac{M \times N_i \times t_i}{V_c - N_i \times V_b} \times 10^6 + \Delta CO_{2,i-1} \right] \times (1 - D) + CO_{2,bg} \quad (1)$$

여기서, M은 1인당 CO₂ 토출량(m³/h), N_i, t_i 는 각각 i번째 정차역에서 다음 정차역까지 승객수와 소요 시간(s), V_c는 객차의 실내 유효부피(m³), V_b는 승객의 평균 신체 부피(m³), ΔCO_{2,i-1}는 i번째 정차역의 전 역(i-1번째역)에서 객실 CO₂농도(ppm)의 배경농도(CO_{2,bg}) 대비 증가분(=CO_{2,i-1}-CO_{2,bg}), D는 자연환

기에 의한 CO₂농도 저감률(0~1)이다. CO_{2,bg}는 객실 및 외기의 배경농도이다. 식(1)에서 우변은 탑승객에 의한 객실 CO₂농도증가와 전 역에서의 배경농도대비 객실 CO₂농도 증가분의 합으로 나타나 있으며, 차체 빈틈과 출입문 개방을 통한 자연환기 효과인 CO₂농도 저감률을 포함하는 수식과의 곱으로 이루어져 있다. 식(1)에 적용된 자연환기에 의한 CO₂농도 저감률(D)은 실제 측정결과를 이용하여 예측해야 하는 값으로, 0에서 1사이의 값을 가지고 있다고 가정한다. D의 값이 0인 경우 객실 CO₂농도는 저감되지 않으며 정차역을 지나면서 누적증가되고, D의 값이 1인 경우 각 정차역에서 객실 CO₂농도는 배경농도와 동일하게 된다. 본 연구에서 전동차 객실 CO₂농도 측정이 이루어진 기간에 각 노선에서 운행된 전동차는 강제환기가 이루어지지 않았으며(Q_{vent}=0 m³/s), 식(1)을 이용하여 각 정차역별 CO₂농도를 예측하여 측정결과와 비교함으로써, 자연환기에 의한 CO₂ 저감률(D)을 예측하였다. 식(1)을 검증하기 위하여 아래의 특정조건(표 2)에 대하여 D값을 변화시키면서 객실 CO₂농도변화를 예측해 보았다. 탑승객수(N)는 전동차의 설계정원인 100명을 기준으로 하였다. 1인당 평균 CO₂ 토출량(M)은 기립상태의 0.017m³/h으로 설정하였으며 이는 Chow (2002)의 0.018m³/h과 유사한 수준이다. 정차역간 평균 이동시간(t)은 150초로 가정하였으며, 객실의 유효부피는 100m³으로 설정하였다. 이는 통상적 도시철도 차량의 재원인 길이 19m, 폭 3m, 높이 2.5m의 객실(부피 142.5m³)에서 좌석 등의 내장재 부피를 제외한 대략적 수치이다. 승객의 평균 부피는 인체의 밀도를 1000kg/m³으로 가정하여 평균체중 60kg을 이용하여 산정하였으며, 배경 CO₂농도 실내외에서 모두 500ppm으로 가정하였다. 강제환기가 이루어지지 않는 전동차가 150초 정차간격으로 운행하는 것으로 가정하였으며, 이때 전동차에 100명의 승객이 탑승하고 있는 경우 그림 1과 같은 결과를 예측할 수 있다. 출입문이 열렸을 때, 객실 내 CO₂가 저감되지 않는 경우 즉 D=0인 경우 CO₂의 농도는 1000초가 지나면서 5,000ppm을 초과하게 된다. 그리고 출입문 개폐에 의한 CO₂저감효과가 있는 경우(D=0.1,0.3,0.5) CO₂농도는 초기에 급격히 증가하지만 시간이 지나면서 증가율이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 특히, D=0.3인 경우, 즉 객실의 CO₂농도의 30%가 각 정차역마다 감소하는 경우 20분이 경과했을 때 약 2,000ppm 정도인 것으로 예측되었다.

Table 2. Parameters for simulating CO₂ concentration inside the cabin

| Parameters | Unit | Values | Remarks |
|--|-------------------|--------|---|
| Number of passengers, N | [-] | 100 | |
| CO ₂ exhaust per person, M | m ³ /h | 0.017 | At standing condition |
| Journey time between stations, t _i | sec | 150 | |
| Effective volume of cabin, V _c | m ³ | 100 | Approximated volume |
| Average volume of human body, V _b | m ³ | 0.06 | Density of human body: 1000 kg/m ³ |
| Background CO ₂ concentration, CO _{2,bg} | ppm | 500 | |

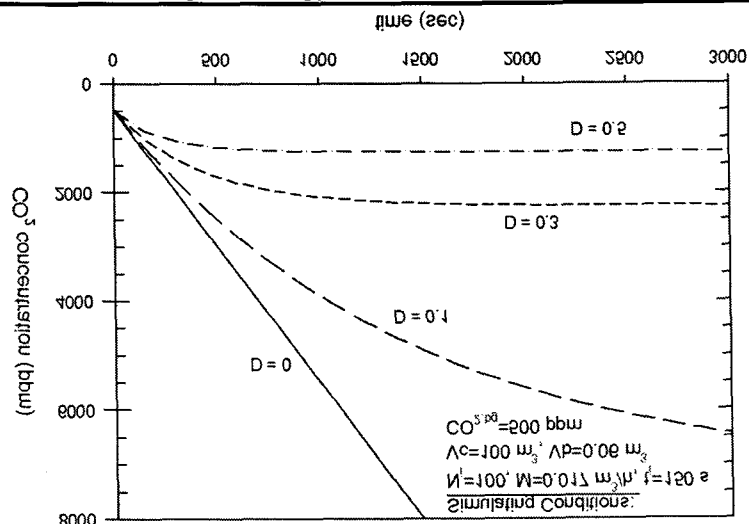


Fig.1. Estimated CO₂ levels by adopting dilution factor (D).

식(1)을 실제 측정결과와 비교하기 위하여, 정차역별로 측정된 탑승객수와 소요시간을 적용하고 1인당 CO₂토출량, 객차의 실내유효부피, 승객의 신체부피는 표 2의 값을 사용하였다. 자연환기에 의한 CO₂저감률(D)은 각 노선에 따라 약간씩 차이가 있지만, 전체적으로 0.28~0.38사이에서 측정결과와 예측결과가 가장 잘 일치하였다. 경부선의 경우 경인선 퇴근시간에서 D=0.28로 가장 낮은 자연환기률을 나타내었으며 나머지 노선에서는 모두 0.32이상의 자연환기률을 보였다(그림 2).

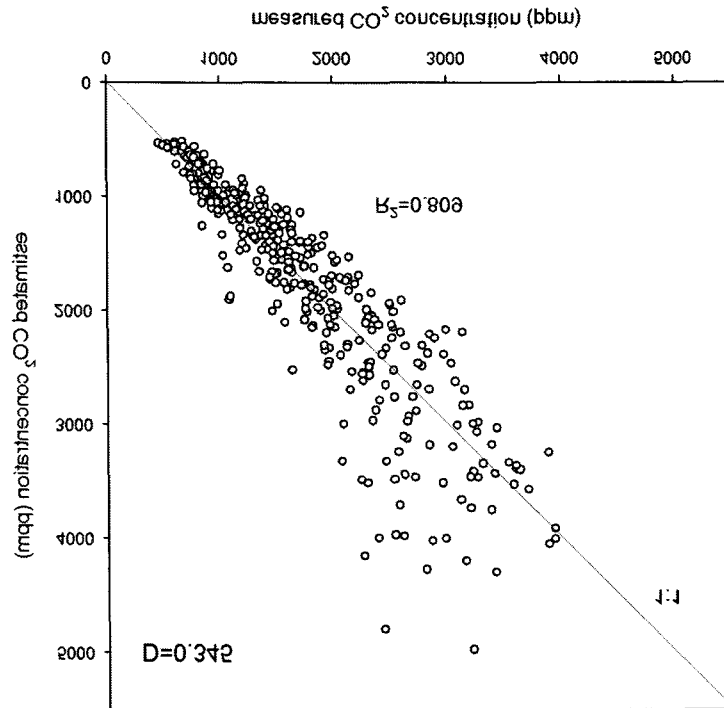


Fig. 2. Correlation between estimated (D=0.345) and measured CO₂ concentrations for all lines studied.

4. 결론

수도권 전동차의 객실 CO₂농도변화를 측정하여, 농도변화가 탑승객수와 높은 상관관계에 있음을 밝혔으며, 출입문 개폐에 의한 CO₂ 저감효과를 분석하기 위하여 CO₂농도 예측식을 개발하였다. CO₂농도 예측식은 승객 1인당 토출되는 평균 CO₂농도, 정차역별 탑승시간, 전동차의 유효체적 및 승객의 평균체적을 이용하여 계산하였으며, 출입문 개폐에 의한 CO₂농도 저감률을 변수로 설정하여 측정데이터와 비교하였다. 비교분석 결과 실제 측정결과와 예측결과가 가장 잘 일치하는 경우는 출입문의 개폐에 따른 CO₂저감률이 35% (D=0.345)임을 밝혀냈다. CO₂저감률이 출입문 개폐시 외기 CO₂농도 및 외기조건(온도, 습도, 압력)에 따라 영향을 받는 점과 객실의 혼잡도에 따라 저감효과가 달라질 수 있는 점을 감안하여 향후 출입문 개폐시의 CO₂저감효과에 대한 추가적인 분석이 필요할 것으로 고려된다.

5. 참고문헌

- 1) Chow, W.K. (2002) "Ventilation of enclosed train compartments in Hong Kong", *Applied Energy*, 71, 161-170.
- 2) 권순박, 조영민, 박덕신, 박은영 (2007) 전동차 객실의 실내공기질 평가-CO₂농도와 승객 수, 한국철도학회 춘계학술대회.