한국대기환경학회지 제 24 권 제 2 호
J. KOSAE Vol. 24, No. 2 (2008) pp. 153~161
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment

출입문 개폐에 의한 전동차 객실 CO_2 저감효과 분석

Quantitative Analysis of CO_2 Reduction by Door-opening in the Subway Cabin

권순박* · 조영민 · 박덕신 · 박은영[1)]
한국철도기술연구원 환경화재연구팀,
[1)]과학기술연합대학원대학교 미래첨단교통시스템공학부

(2007년 6월 15일 접수, 2008년 2월 1일 채택)

Soon Bark Kwon*, Youngmin Cho, Duck-Shin Park and Eun Young Park[1)]
Environment and Fire Control Research Team, Korea Railroad Research Institute,
[1)]Department of Future Modern Traffic System Engineering,
Korea University of Science and Technology

(Received 15 June 2007, accepted 1 February 2008)

Abstract

The guidelines for indoor air quality of public transportations such as subway, train and bus was presented by Korean Ministry of Environment last end of year 2006 based on the great consequence of indoor air quality in daily life. Two main parameters, carbon dioxide (CO_2) and particulate matters smaller than 10 μm (PM_{10}), were selected as index pollutants for the management of indoor air quality. The former pollutant, CO_2, is regarded as index of ventilation status and the major source of CO_2 in the train or subway is the exhalation of passengers. It is publically perceived that the high CO_2 concentration in a crowded subway will be reduced and ventilated with outdoor air by door-opening taken every 2 or 3 minutes when the train stops each station. However, there has not been any scientific proof and quantitative information on the effect of door-opening on the CO_2 reduction by ventilation with outdoor air. In this study, CO_2 concentration and number of passengers were measured at each station on the 3 lines of Korail metropolitan subway. In order to evaluate the effect of CO_2 reduction by door opening, the theoretical approach using the CO_2 balance equation was performed. By comparing the predicted data with monitoring one, the optimum CO_2 dilution factor was determined. For the first time, it was quantified that about 35% of CO_2 concentration in the subway indoor was removed by the door-opening at each station.

Key words : Subway, CO_2 dilution factor, Door-opening, Indoor air quality

1. 서 론

대중교통수단 실내공기질 관리 가이드라인(환경부, 2006a)이 발표된 후, 버스 및 철도 등의 CO_2 농

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)31-460-5375, E-mail : sbkwon@krri.re.kr

도와 미세먼지(PM_{10})의 현황 및 저감기술에 대한 관심이 증대되고 있다. 이보다 앞선 2003년 홍콩에서는 버스 및 철도차량의 실내공기질을 관리하기 위해 CO_2 농도에 대한 가이드라인을 발표하였다(홍콩환경부, 2003). 실내공기질에 대한 사회적 관심이 크게 증대되고 있으며, 이에 따라 실내공기질 기준도 향후 강화될 것으로 예측된다. 특히, 인구집중도가 높고 지하운영 구간이 많은 수도권 전동차의 실내공기질 문제가 중요한 이슈로 부각되고 있다. 혼잡시간대에 CO_2 농도가 급격히 증가하는 수도권 전동차의 경우 효과적인 CO_2 저감방안이 요구되고 있으며, 한국철도기술연구원에서는 건설교통부의 차세대 객차용 청정시스템 개발과제를 통해 객실 CO_2 저감장치를 현재 개발하고 있는 실정이다(한국철도기술연구원, 2007). 현재, 대부분의 수도권 전동차 환기는 출입문 개폐에 의한 자연환기를 통해 이루어지고 있다. 최근, 환기장치를 장착한 도시철도 차량이 적용되고 있지만 실제 환기장치를 정상작동하며 운행하는 경우는 흔치 않은 실정이다(환경부, 2006b).

철도차량의 객실 환기량은 탑승객수를 기준으로 설정되고 있는데, 장거리 객차의 경우 승객 1인당 최저 신선공기 환기량을 외기온도에 따라 10～15 m^3/h로 권장하고 있다(UIC Code 553, 2004). 역간 운행시간이 2분 이하이며 탑승객의 변동이 큰 도시철도에서는 기준 환기량을 1인당 9 m^3/h 또는 그 이하로 적용할 수 있다(ASHRAE, 2003). Chow (2002)는 강제환기가 이루어지는 홍콩지하철에서 객실 CO_2 농도를 특정농도 이하로 유지할 수 있는 필요 환기량에 관해 이론적 연구를 수행하였다. 조용성 등(2005)은 전동차 객실의 적정환기율 및 이산화탄소 농도기준치에 관한 고찰에서 지하철객실 내 CO_2 농도 예측식을 이용하여 승객수와 탑승시간에 따른 CO_2 농도를 예측하였으나 출입문 개폐에 의한 CO_2 희석 효과는 적용되어 있지 않다. Lin *et al.* (2007)은 일반 사무실에서 출입문의 개방위치에 따른 CO_2 및 휘발성유기화합물질(VOCs) 농도변화를 수치해석적 방식으로 연구하였다. 김신도 등(1993)은 일산화탄소(CO)를 추적가스로 사용하여 실물모형($3 \times 3 \times 2.5$ m^3) 내 농도변화를 측정하였으며, 이를 이용하여 실제 환기량을 추정하는 연구를 수행하였다. 그러나, 아직까지 도시철도 차량의 출입문 개폐에 따른 환기효과에 관한 연구나 정량적 정보는 없는 실정이다. 현재 우리나라에 운영되고 있는 다수의 도시철도는 객실환기문제에 있어서 잦은 출입문 개폐로 인한 자연환기가 타당한 수준으로 이루어지고 있다고 인식되고 있으나 이에 대한 근거제시 및 정량적 분석이 요구된다. 이에, 본 연구에서 최초로 전동차 객실의 출입문 개폐에 의한 CO_2 저감효과에 대한 정량적 분석을 수행하였다.

2. 연구 방법

2.1 측정연구

현재 운행 중인 코레일(Korail) 수도권 전동차 노선 중 경부선 일부구간(서울-천안), 경인선(구로-인천), 분당선(선릉-보정) 구간의 출퇴근 시간대 객실 CO_2 농도를 연속 측정하고 탑승객수를 각 정차역마다 기록하였다. CO_2 농도의 측정에는 비분산적외선(non-dispersive infrared) 방식의 센서가 사용되었으며, 측정센서는 실내환경종합측정기(IES3000, Sibata)에 내장되어 매 1초 단위로 농도를 측정한다. 측정은 객실 중앙지점 높이 약 1 m에서 이루어졌으며, 운행노선에 따라 1～7초 단위로 데이터를 저장하였다. CO_2 농도측정기는 0.3 L/min의 유량으로 객실 공기를 흡입하여 측정한다. 탑승객 수는 전동차를 임의의 구역으로 나누어 몇 몇 대표구역에서 승객 수를 세어 전체 승객 수를 산정하는 방식으로 기록하였으며, 탑승객 수가 적은 구간에서는 승객전원을 세어 기록하였다. 측정기간은 2007년 3월 20～23일이며 상세한 측정일정은 표 1과 같다. 각 노선의 출퇴근 시간대에 측정이 이루어졌으며 서울도심을 중심으로 상행 및 하행으로 구분하였다. 종점에서 탑승하여 측정하는 경우 장비를 탑승 전 미리 가동하였으며, 종점이 아닌 구간에서는 측정이 이루어지기 전에 탑승하여 측정지점을 확보하고 장비를 가동하여 장비가동 초기의 측정오류를 최소화시켰다. CO_2 측정을 위해 IAQ모니터(Wolfsence, model IQ410)를 동일지점에 추가로 설치하여 동시 측정하였으며, 두 기간의 상관관계를 분석하여 측정데이터의 신뢰도를 향상시켰다. 본 연구에 사용된 실내환경종합측정기는 CO_2 농도 외에 일산화탄소(CO), 미세먼지(PM_{10}), 온도, 습도, 기류속도, 평균복사온도를 동시에 측정하여 실내온열환경평가를 수행할 수 있는 장비이며 이에 대한

Table 1. Time schedule for in-train measurement.

Date	Lines	Direction	Rush Hour (RH)	Time table
20 March	Bundang	Outbound	Evening RH	Seolleung 19:00 ~ Bojeong 19:46
21 March	Bundang	Inbound	Morning RH	Bojeong 07:35 ~ Seolleung 08:23
	Gyeongbu	Outbound	Evening RH	Seoul St. 18:19 ~ Cheonan 20:18
22 March	Gyeongbu	Inbound	Morning RH	Cheonan 06:54 ~ Seoul St. 09:01
	Gyeongin	Outbound	Evening RH	Guro 18:58 ~ Incheon 19:42
23 March	Gyeongin	Inbound	Morning RH	Incheon 07:31 ~ Guro 08:19

연구결과는 다른 논문을 통해 발표할 예정이다.

2.2 CO_2 농도 예측연구

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 개폐에 의해 이루어진다고 볼 수 있다. 객실의 CO_2 농도증가는 탑승객의 호흡작용에 의한 토출의 결과이므로, 탑승객 수와 1인당 평균 CO_2 토출량을 이용하면 객차의 출입문이 닫혀있는 시간, 즉 정거장 출발 후 다음 정거장에 도착하여 출입문이 열리기 직전까지의 CO_2 농도를 예측할 수 있다. 출입문이 열리면 외부공기와의 희석을 통해 객실 CO_2 농도는 낮아지게 된다. 객실의 강제환기가 이루어질 경우 실내 CO_2 농도는 외기 CO_2 농도와 환기유량에 따라 저감된다. 객실내의 국부적 CO_2 농도차가 존재하지 않고, 승객의 객차 간 이동에 따른 탑승인원 변화는 탑승객 수 산정에서 제외하였으며, 외기의 CO_2 농도는 일정하다고 가정하였다. 강제환기가 이루어지지 않는 객실에서 출입문 개폐에 따른 CO_2 농도 저감률(dilution factor: D) 변수를 도입하면, 다음과 같이 i번째 정차역에서 다음 정차역까지 객실 CO_2 농도($CO_{2,i}$)에 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 CO_2 토출량(m^3/h)을 나타내고, N_i와 t_i는 각각 i번째 정차역에서 다음 정차역까지 승객수와 소요시간(s)이다. V_c는 객실 유효부피(m^3)로 좌석과 전장품 등을 제외한 부피이며, V_b는 승객의 평균 신체 부피(m^3)이다. $\Delta CO_{2,i-1}$는 i번째 정차역의 전 역(i−1번째 정차역)에서 배경농도대비 CO_2 농도(ppm)의 변화량($\Delta CO_{2,i-1}=CO_{2,i-1}-CO_{2,bg}$)을 나타낸다. CO_{2bg}는 배경농도로 본 연구에서는 외기농도와 동일하다고 가정하였다. CO_2 농도 저감률(D)은 i번째 역에서 출입문이 닫힌 후부터 다음 정차역에서 출입문이 열렸을 때 객실 CO_2 농도의 저감비율(0~1)을 의미한다.

식(1)에서 우변은 탑승객에 의한 객실 CO_2 농도의 증가와 전 역에서의 배경농도 대비 객실 CO_2 농도 증가분($\Delta CO_{2,i-1}$)의 합으로 나타나 있으며, 출입문이 개방되었을 때 제거되는 CO_2 농도 저감률을 포함하는 수식과의 곱으로 이루어져 있다. 식(1)에 적용된 출입문 개폐에 따른 CO_2 농도 저감률(D)은 실제 측정결과를 이용하여 예측해야 하는 값으로, 0에서 1사이의 값을 가지고 있다고 가정한다. 즉, 저감률이 1이면 승객에 의해 증가된 CO_2 농도와 전 정차역에서 축적된 CO_2 농도가 현재 정차역에서 출입문 개폐를 통해 100% 제거된다는 의미이며, 저감률이 0이면 객실 CO_2 농도가 저감되지 않는다는 의미이다. 본 연구에서 전동차 객실 CO_2 농도 측정이 이루어진 기간에 각 노선에서 운행된 전동차는 강제환기가 이루어지지 않았으며, 식(1)을 이용하여 각 정차역별 CO_2 농도를 예측하여 측정결과와 비교함으로써, 출입문 개폐에 따른 CO_2 저감률(D)을 예측하였다.

3. 결 과

3.1 수도권 전동차 측정결과

각 정차역에서 측정된 탑승객수와 CO_2 농도의 노선평균값을 표 2에 나타내었다. 환경부의 대중교통수단 공기질 가이드라인에서는 출퇴근시와 같은 혼잡시간대에 CO_2의 경우 3,500 ppm의 권고기준을 제시

Table 2. Number of passengers and CO_2 concentration.

		Bundang line		Gyeongbu line		Gyeongin line	
		Inbound	Outbound	Inbound	Outbound	Inbound	Outbound
No. passengers	Avg.	124	87	128	94	88	72
	Std. dev.	26	34	50	65	62	51
	Range	63~156	17~138	48~207	8~206	6~190	2~156
CO_2 (ppm)	Avg.	1975	1895	2427	1912	1373	1678
	Std. dev.	325	331	663	877	606	570
	Range	915~2614	768~2772	1163~3884	737~3700	538~2344	785~2597

하고 있다(환경부, 2006a). 각 노선의 측정결과 경부선의 출근시간대(Inbound) 2,427 ppm을 제외하고 전 노선에서 2,000 ppm을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 이 때, 대상차량 모두에서는 강제환기장치가 작동되지 않았으며, 자연환기에 의한 객실환기가 이루어지고 있었다. 출근시간대에 비해 퇴근시간대 탑승객 분산효과로 퇴근시간대 승객수가 적게 나타났으며 CO_2 농도도 이에 비례하여 낮게 나타났으나 경인선의 경우 탑승객수는 적었지만 CO_2 농도가 높게 나타났다. 표 2에 각 노선에서의 승객수와 CO_2 농도의 평균값, 표준편차(standard deviation), 최소 및 최대값의 범위를 제시하였다. 경부선 퇴근시간대(Outbound)에 평균승객수의 표준편차가 65명으로 가장 높게 나타났으며, 이에 따라 CO_2 농도의 표준편차도 877 ppm으로 대상구간 중 가장 높게 나타났다.

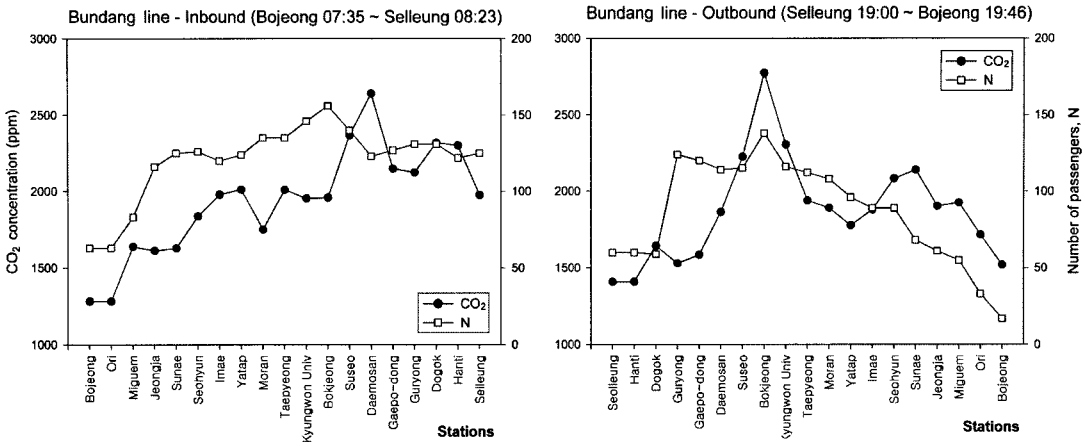
각 노선의 정차역별 승객수와 CO_2 농도 변화를 그림 1에 나타내었다. 분당선, 경부선, 경인선의 세 노선에서 모두 CO_2 농도는 운행 중 크게 변화하고 있으며, 경부선의 경우 승객수가 150명 이상인 경우 3,500 ppm을 초과하는 구간이 나타나 CO_2 농도가 탑승객수에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

그림 1(b)의 경부선 출근(Inbound) 데이터 중 천안(Cheonan)~세마(Sema)구간의 CO_2 농도 측정결과는 데이터 손실로 제외되었다. CO_2 농도와 탑승객수의 상관관계를 분석해보면 그림 2(a)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 전 노선의 측정결과에 대해 CO_2 농도와 탑승객수의 상관관계는, R^2=0.577로 나타났는데, 승객 1명이 증가할 때 약 10 ppm의 CO_2 농도 증가가 이루어지는 것으로 나타났다(CO_2=916.8+9.84×N). 각 노선에 대해 그 상관관계를 분석해보면 그림 2(b)와 같이, 경인선에서의 상관관계가 가장 뚜렷(R^2=0.690)하게 나타났으며, 분당선의 경우(R^2=0.259) 상관관계가 낮게 나타났다. 권순박 등(2007)은 수도권 전동차 수원-청량리 구간에서 유사한 연구를 수행하여 탑승객수와 CO_2 농도간의 선형적 상관관계(CO_2=1266+7.93×N, R^2=0.710)를 보고하였다. 지상구간에서 운행되는 중국 베이징 도시철도(Beijing Ground Railway Transit System) 13호선의 경우 객실 CO_2 농도와 승객수 사이의 상관관계연구에서 R^2=0.807의 높은 상관관계가 보고되었다(Li *et al.*, 2006).

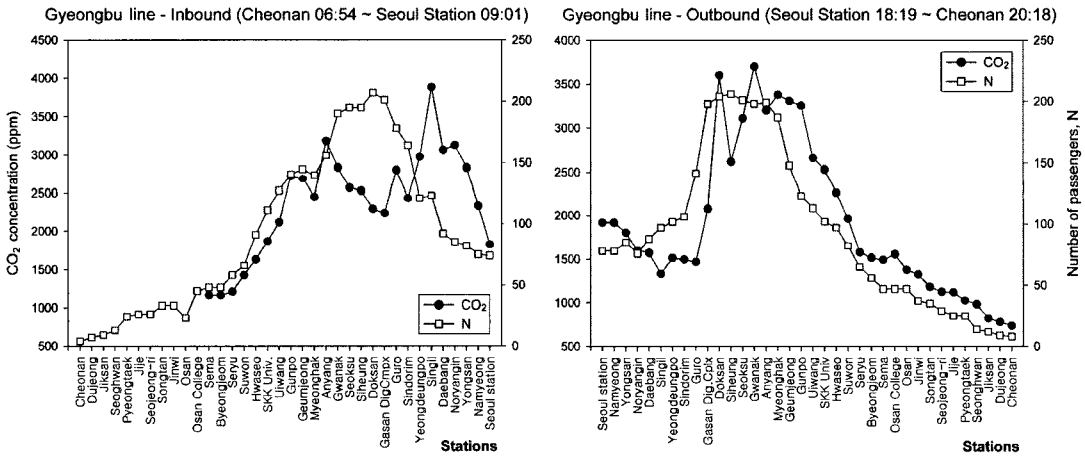
3. 2 출입문 개폐에 의한 CO_2 저감률 예측식

전동차의 환기장치가 작동되지 않는 경우 식(1)을 이용하여 출입문 개폐에 의한 CO_2 저감률을 예측할 수 있다. D값을 0에서부터 1까지 변화시키면서 측정결과와 가장 잘 일치하는 값을 분석하였다. 먼저 식(1)에 대하여 아래의 특정조건(표 3)에 대하여 D값을 변화시키면서 객실 CO_2 농도변화를 예측해 보았다. 탑승객 수(N)는 100명을 기준으로 하였으며, 1인당 평균 CO_2 토출량(M)은 기립상태의 0.017 m^3/h (유재홍, 1998)으로 설정하였으며 이는 Chow (2002)의 0.018 m^3/h과 유사한 수준이다. 정차역 간 평균 이동시간(Δt)은 150초로 가정하였으며, 객실의 유효부피는 100 m^3으로 설정하였다. 이는 통상적 도시철도 차량의 재원인 길이 19 m, 폭 3 m, 높이 2.5 m의 객실(부피 142.5 m^3)에서 좌석 등의 내장재의 부피를 제외한 대략적 수치이다. 승객의 평균 부피는 인체의 밀도를 1,000 kg/m^3으로 가정하여 평균체중 60 kg을 이용하여 산정하였으며, 초기 객실 CO_2 농도는 500 ppm으로 가정하였다. 강제환기가 이루어지지 않는 전동차에 승객 100명이 탑승하여 2분 30초의 역간 평균운행시간으로 운행될 때 그림 3과 같은 CO_2 농도변화가 예상된다.

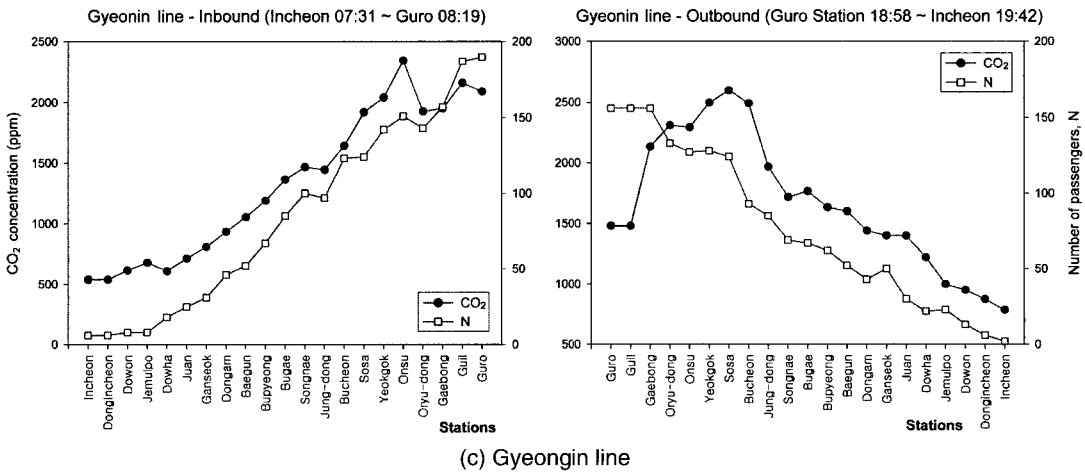
출입문이 열렸을 때, 객실 내 CO_2가 저감되지 않



(a) Bundang line



(b) Gyeongbu line



(c) Gyeongin line

Fig. 1. Trends of CO_2 concentration with number of passengers on board.

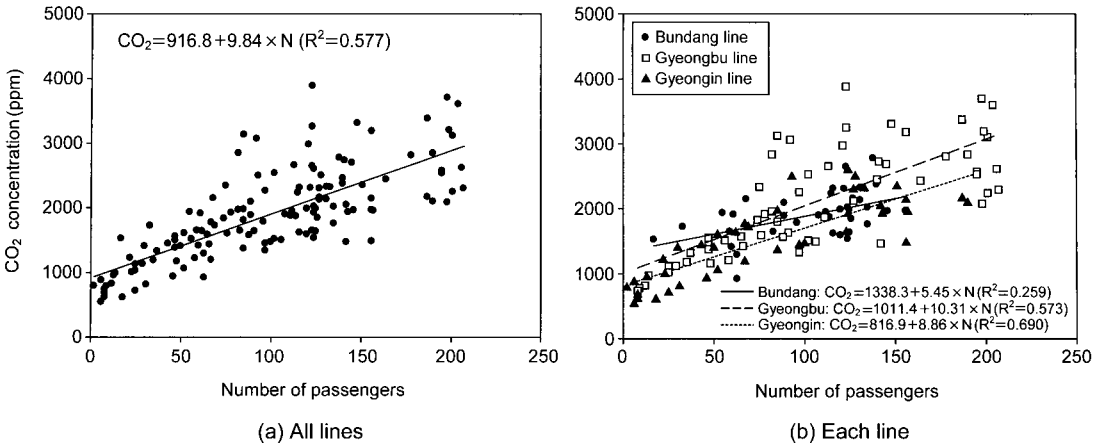


Fig. 2. Correlation between CO_2 concentration and number of passengers.

Table 3. Parameters for simulating the effect of dilution factor (D).

Parameters	Unit	Values	Remarks
Number of passengers, N	[-]	100	
CO_2 exhaust per person, M	m^3/h	0.017	
Journey time between stations, Δt	sec	150	Design capacity at standing condition
Effective volume of cabin, V_c	m^3	100	
Average volume of human body, V_b	m^3	0.06	
Initial CO_2 concentration	ppm	500	

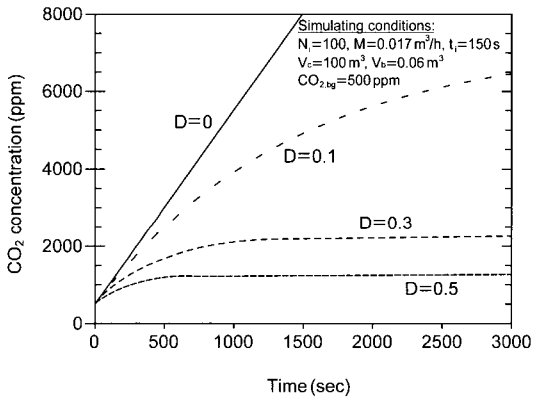


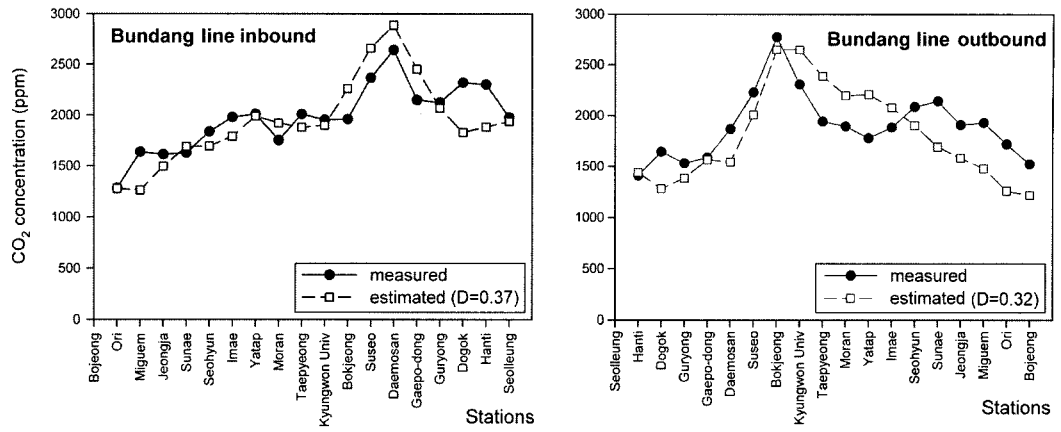
Fig. 3. CO_2 prediction by changing dilution factor (D) from 0 to 0.5.

는 경우 즉 D=0인 경우 CO_2의 농도는 1,000초가 지나면서 5,000 ppm을 초과하게 되며 선형적으로 증가된다. 그러나 출입문 개폐에 의한 CO_2 저감효과가 있는 경우(D=0.1, 0.3, 0.5) CO_2 농도는 시간이 지나면서 증가율이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 특히, D=0.3인 경우, 즉 객실 CO_2 농도의 30%가 각 정차역마다 감소하는 경우에는 1,500초가 경과하면서부터 2,500 ppm 이하로 지속적으로 유지되는 것으로 예측되었다.

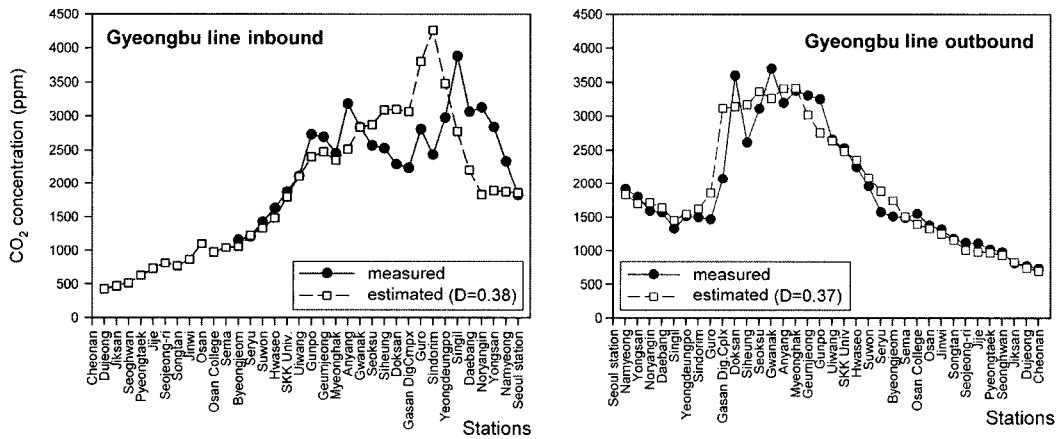
3. 3 측정결과와 예측결과의 비교

식(1)을 실제 측정결과와 비교하기 위하여, 정차역별로 측정된 탑승객 수와 소요시간을 적용하고 1인당 CO_2 토출량, 객차의 실내유효부피, 승객의 신체부피는 표 3의 값을 사용하였다. 실제 측정결과와 예측결과 사이의 상관성 분석을 통해 각 노선의 측정결과와 가장 잘 일치하는 CO_2 농도 저감률(D)을 추정하였으며, 그 결과를 그림 4에 제시하였다.

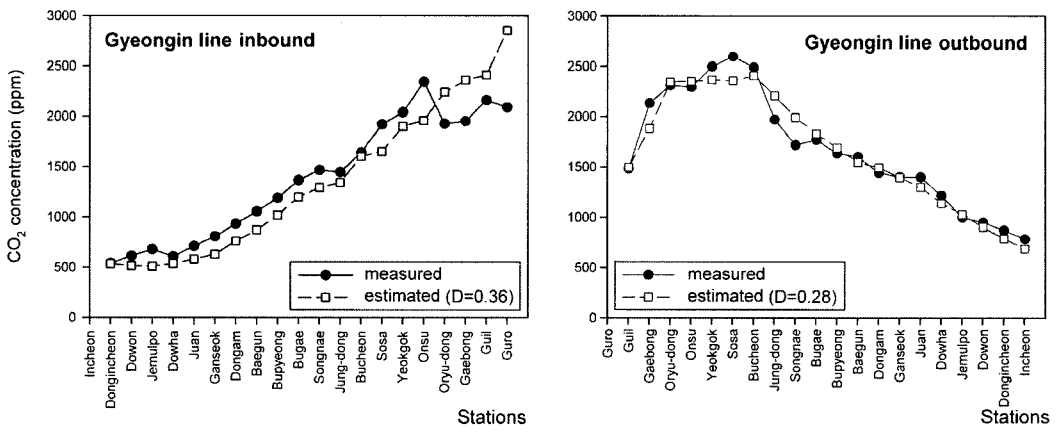
그림 4에서와 출근시간대에 CO_2 농도 저감률은 세 노선에서 0.36~0.38사이로 나타났으며, 퇴근시간대에는 0.28~0.37로 상대적으로 큰 편차가 나타났다. 각각의 노선에서 CO_2 농도 저감률을 이용한 CO_2 농도 예측결과는 측정결과를 매우 잘 모사하는 것으로 나타났다. 측정대상구간에 적용된 평균 CO_2 농도 저감률은 0.35 (표준편차 0.039)로 나타났으며, 경인선 퇴근시간대를 제외한다면 평균 0.36 (표준편차



(a) Bundang line



(b) Gyeongbu line



(c) Gyeongin line

Fig. 4. Comparison of predicted CO_2 concentration with measured data.

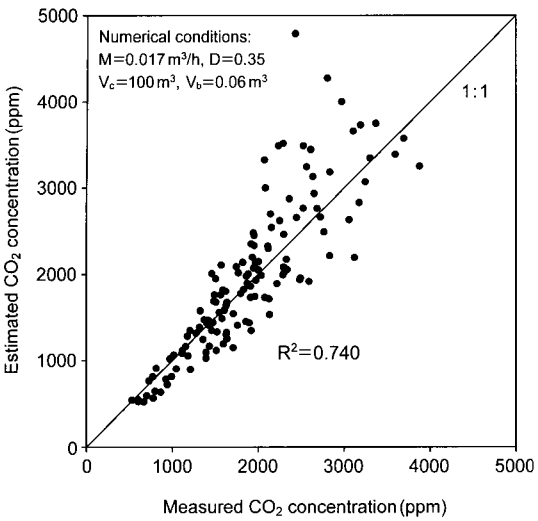


Fig. 5. Correlation between measured and predicted CO_2 concentrations (D=0.35).

0.023)으로 분석되었다. 그림 4(b)의 경부선 상행(Inbound)에서 천안(Cheonan)~세마(Sema)구간의 측정결과는 데이터 손실로 제외되었으며, CO_2 농도 예측결과만 그림에 나타내었다. 평균 CO_2 농도 저감률(D=0.35)에 의한 예측결과의 정확도를 보다 정확하게 파악하기 위하여 전 구간에 평균 저감률을 적용하여 측정결과 사이의 상관관계를 분석하였다(그림 5). 측정농도가 높을수록 예측결과 차이가 커지는 경향이 발견되었으나, 전반적으로 예측결과와 측정결과 사이에는 높은 상관관계(R^2=0.740)가 나타나 본 연구에서 개발된 출입문 개폐에 의한 CO_2 저감률 산정(D=0.35)이 타당한 수준임이 증명되었다.

4. 결 론

수도권 전동차의 객실 CO_2 농도변화를 측정하여, 농도변화가 탑승객수와 높은 상관관계에 있음을 밝혔으며, 출입문 개폐에 의한 CO_2 저감효과를 분석하기 위하여 CO_2 농도 예측식을 개발하였다. CO_2 농도 예측식은 승객 1인당 토출되는 평균 CO_2 농도, 정차역별 탑승시간, 전동차의 유효체적 및 승객의 평균체적을 이용하여 계산하였으며, 출입문 개폐에 의한 CO_2 농도 저감률을 변수로 설정하여 측정데이터와 비교하였다. 비교분석 결과 실제 측정결과와 예측결과가 가장 잘 일치하는 경우는 출입문의 개폐에 따른 CO_2 농도 저감률이 각 노선에서 0.28~0.38 사이에 놓이는 것으로 나타났으며, 전 대상구간의 평균 저감률은 약 35%(D=0.35)로 분석되었다. 이러한 결과는 본 연구의 측정대상구간인 코레일 수도권전동차(경부선일부, 경인선, 분당선)의 2007년 3월 출퇴근시간대 측정결과를 분석하여 도출된 결과로, CO_2 농도 저감률이 출입문 개폐시 차량외부 CO_2 농도 및 외기조건(온도, 습도, 압력 등)에 따라 영향을 받는 점을 감안한다면, 본 연구에서 제안된 CO_2 농도 저감률은 추가적인 연구를 통해 검증되어야 할 것이다.

감사의 글

한국철도기술연구원 수도권 전동차 종합측정연구의 원활한 수행을 위해 현장에서 도움을 주신 코레일 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

권순박, 조영민, 박덕신, 박은영(2007) 전동차 탑승객 수와 객실 내 CO_2 농도와의 상관관계, 환경공동학술대회 초록집, 213pp.

김신도, 김태식, 이희관, 이정주(1993) 실내환기효율의 공간적 변화특성에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(3), 236-241.

유재홍(1998) 지하철 내의 CO_2 측정을 통한 적정환기량 산정에 관한 연구, 서울시립대학교 환경공학과 석사논문.

조용성, 강석택, 박영훈(2005) 전동차 실내의 적정 환기율 및 이산화탄소 농도 기준치에 관한 고찰, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 312-317.

한국철도기술연구원(2007) 차세대 객차용 청정시스템 개발, 4차년도 연차보고서.

홍콩환경부(2003) Practice note for managing air quality in air-conditioned public transport facilities-railways.

환경부(2006a) 대중교통수단 실내공기질 관리 가이드라인.

환경부(2006b) 지하철 등 대중운송수단의 실내공기질 실태조사 및 관리방안, 최종보고서.

ASHRAE(2003) HVAC applications, Chapter 9 Surface Transportation.

Chow, W.K. (2002) Ventilation of enclosed train compart-

ments in Hong Kong, Appl. Energ, 71, 161-170.

Li, T.-T., Y.-H. Bai, Z.-R. Liu, J.-F. Liu, G.-S. Zhang, and J.-L. Li (2006) Air quality in passenger cars of the ground railway transit system in Beijing, China, Sci. Total Environ, 367, 89-95.

Lin, Z., T.T. Chow, and C.F. Tsang (2007) Effect of door opening on the performance of displacement ventilation in a typical office building, Build. Environ, 42, 1335-1347.

UIC Code 553 (2004) Ventilation, heating and air-conditioning in coaches.