

전동차 실내공기질 측정 및 CO₂ 농도 예측

A Prediction of CO₂ Concentration and Measurement of Indoor Air Quality in the EMU

소진섭[†] · 유성연^{*}

Jin-Sub So · Seong-Yeon Yoo

Abstract In December 2006, the Ministry of Environment Republic of Korea established the guideline which is "Indoor Air Quality Management Guidelines in Public Transportation." as control items, CO₂ (carbon dioxide) and PM10 (particle matter) are classified two categories, that is, Level 1 (non-rush hour), Level 2 (rush hour). Therefore, the quality of air in train and subway should be controlled in accordance with the guideline. We took a measure the air freshness inside train twice at Line 4 (Tangogae-Oido), in Sep. 2007 and at Line 1 (Dongincheon-Yongsan) in Nov. 2007, respectively and, also expected the emitted CO₂ concentration by using a property of matter such as EMU (Electric Multiple Unit) design reviewing specification and air. According to the measured values, the concentration of PM10 was 44, 57, 45% and the concentration of CO₂ was 39, 36, 44% respectively, all measured values are within the guideline and also, as a result we found the expected value and measured value are similar.

Keywords : Electric Multiple Unit, CO₂, PM10, Indoor Air Quality

요 지 환경부는 2006년 12월에 「대중교통수단 실내공기질 관리 가이드라인」을 제정하였다. 관리항목으로 이산화탄소(CO₂)와 미세먼지(PM10)에 대해 각각 Level 1(평상시)과 Level 2(혼잡시)로 가이드라인을 제시하였다. 이에 열차와 전동차에 대해 실내공기질 관리가 필요하게 되었다. 본 연구는 2007년 9월과 11월에 4호선(당고개-오이도), 1호선 급행(동인천-용산) 전동차 운행구간을 대상으로 실내공기질을 측정하였다. 또한 전동차 설계검토 사양과 일반적인 공기인자 등의 물성값을 적용하여 CO₂ 농도를 예측하였다. 그리고 전동차 실내공기질 실측치와 비교분석 하였다. 측정결과 PM10 농도는 환경부 가이드라인에 각각 44, 57, 45% 수준, CO₂농도는 각각 39, 36, 44% 수준으로 양호하였다. 또한 CO₂ 농도 예측치와 실측치를 비교한 결과 예측치는 실측치에 유사한 결과로 나타났다.

주요어 : 전동차, 이산화탄소, 미세먼지, 실내공기질

1. 서론

수도권과 각 주요 도시에서 운행하고 있는 전동차는 우리 일상생활에서 가장 필수적인 교통수단이다. 특히 출·퇴근 시간대에는 설계정원(160명)을 초과하여 승차함으로 인해 고객의 불만이 높다. 따라서 이를 해소하고자 무정차 구간을 확대하거나, 급행 전동차 운행을 탄력적으로 확대하고 있다.

현재 KORAIL은 청정하고 쾌적한 전동차 운행을 위한 사업추진을 지속적으로 추진하고 있다. 일부 CO₂센서를 객실 내 설치하여 외부 신선공기 급기가 가능하도록 하고 있다.

이와 같이 철도차량 공기조화장치는 실내 환경과 에너지 효율, 그리고 고객의 쾌적함과 건강을 유지시켜주는 종합적인 시스템으로 그 중요성이 매우 크다.

환경부는 대중교통수단 실내공기질 관리 가이드라인을 2006년 12월말에 제정하였다. 열차와 전동차 실내공기질 관리항목으로 이산화탄소(CO₂)와 미세먼지(PM10)에 대해 Table 1과 같이 제시하였다[1]. 전동차 실내공기질 연구는 주로 한국철도기술연구원에서 지속적으로 진행하고 있고, 2006년부터는 KORAIL 철도연구원 자체 기술연구과제[2-

[†] 책임저자 : 정희원, 한국철도공사, 철도연구원, 기술연구팀
E-mail : sojin71@korail.com
TEL : (042)609-3991 FAX : (042)609-3720

^{*} 충남대학교, 기계설계공학과, 교수

3]로 수행하였다. 지하역사와 대합실, 다중이용시설에 추가하여 전동차 실내공기질 측정, 객실 환기량 산정, CO₂저감 및 CO₂예측에 대한 연구로 다음과 같다. 유재홍[4]은 지하철 내의 CO₂측정을 통한 적정 환기량 산정에 관한 연구를 통해 승객 1인당 기여하는 평균 CO₂농도가 약 12 ppm 정도이라고 제시하였고, 지하철내의 배경 CO₂농도는 약 600 ppm 정도라고 제시하였다. 조용성 등[5]은 전동차 실내의 적정 환기율 및 이산화탄소 농도 기준치에 관한 고찰에서 지하철 객실 내 CO₂농도 예측식을 이용하여 승객수와 탑승시간에 따른 CO₂농도를 예측하였다. 권순박 등[6]은 KTX를 대상으로 터널구간과 CO₂농도 상관관계를 제시하였고, 또한 전동차 실내에 대해서도 승객수와 운행패턴에 따른 CO₂농도 상관관계를 제시하였다. 그리고 지하철 객실 CO₂농도 예측식을 개발하였고, 이를 통해 운행패턴에 따른 정차 시 자연환기효과를 제시하였다. 임호주[7]는 대중운송수단 내 실내공기 오염물질의 노출 및 위해성 평가를 통해 승객 혼잡율과 전동차 체적을 고려한 CO₂농도를 예측하였고, 호흡으로 인한 예측과 실측CO₂농도를 제시하였다. Yasuo ZENDA[8]는 신간선 차량 환기량 검토 시 呼吸시 CO₂ 발생량 16L/h으로 제시한 수치를 적용하였고, 외기 CO₂ 농도는 400ppm으로 시뮬레이션 초기 조건을 설정하여 계산하였다.

ASHRAE Handbook[9]에 일반적인 대기 중 CO₂ 농도는 0.035%로 제시하고 있다. 그리고 Steady-state 상태에서의 실내오염농도식이 제시되어 있다.

일본 JIS A 1406규격[10]에서는 실내공기 중 CO₂ 농도가 시간에 따라 변화할 경우에 대해 제시되어 있다.

한국고속철도건설공단 차량본부[11]에서는 KTX 차량환기에 대한 설계단계에서 CO₂ 농도 예측식을 제시하였다. KTX가 터널 진입시 발생하는 고압의 압력파가 객실 내로 유입되어 이명현상을 방지하기 위해 차량의 플랩이 터널 입구에 설치된 감지 장치에 의해 터널의 존재가 확인하면, 자동으로 플랩이 닫히도록 되어 있어서, 이에 따른 실내 CO₂ 농도가 승객수 변동, 외부의 깨끗한 공기(신선공기) 공급량과 신선공기 유입이 없는 조건, 그리고 이동거리, 운행패턴 시간, 객실 체적, 실내온도 등을 고려하여 계산한 바 있다.

KTX CO₂농도 예측식을 적용하여 계산하기 위해서는 운전패턴과 터널길이, 그리고 KTX 차체에 설치되어 있는 플랩이 열리고 닫히는 신호시점에 따라 오차가 있다. 또한 KTX 객차 컴퓨터는 실내온도를 센서에 의해 자동으로 급기량을 조절하고 있으므로, 예측치와 실측치는 다소 오차가 있다. 따라서 운행 환경조건과 터널 구간의 시·종점을 통과하는 시간이 다르므로, KTX 동력차에 설치되어 있는

ATESS 기록파일 분석이 추가적으로 필요하다고 본다. KTX CO₂ 농도 예측에는 운행구간의 터널 구간의 거리와 터널 구간 시·종점을 통과하는 시간, 그리고 외부의 깨끗한 공기(신선공기) 공급량은 KTX 차체에 설치되어 있는 플랩이 열리고 닫히는 신호시점을 알아야 한다. 따라서 전동차 CO₂ 농도 예측에서는 플랩이 열리는 신호시점은 전동차가 정차하여 출입문이 열릴 때를 환기시점으로, 플랩이 닫히는 신호시점은 전동차가 출입문이 닫히고 운행시점으로 하였다. 계산에 필요한 조건은 Table 2와 같이 설계제작 사양과 공기 물성치를 반영하였고, 초기 객실 CO₂ 배경 농도와 실내온도, 승객수는 실측치를 적용하여 오차범위를 최소화 하였다. 이와 같이 일반적인 조건으로 식 (1-3)을 이용하여 전동차 CO₂농도를 예측하였다. 그리고 환경부 대중교통수단 실내공기질 관리 가이드라인 어느 정도인지 실내환경종합측정기(IES-3000)를 이용하여 측정하였다. 이 실측치와 전동차 CO₂농도 예측식에 의해 계산된 예측치를 서로 비교하였다.

$$m = m_{\infty}(1 - e^{-at}) + m_0e^{-at} \quad (1)$$

$$C_t = C_o + \left(\frac{M \times t}{V \times CO_{2,density}} \right) \times 10^6 \quad (2)$$

$$C_t = \frac{M}{Q} \left[1 - e^{-\left(\frac{Q_{freshair,t}}{V} \right)} \right] + C_o \left(\frac{V \times CO_{2,density}}{10^6} \right) e^{-\left(\frac{Q_{freshair,t}}{V} \right)} \times \left(\frac{10^6}{V \times CO_{2,density}} \right) \quad (3)$$

여기서,

m_0 : 객실내에 초기 CO₂ 질량(kg)

m_{∞} : CO₂의 평형 또는 최종 질량(kg)

C_t : t시간 후 실내공기중의 CO₂ 농도(m³/m³)

C_o : 급기중의 CO₂ 농도(m³/m³)

M : 시간당 실내에서 발생된 CO₂ 농도량(m³/h)

t : 측정시각에서 측정완료까지 경과시간(h)

Q : 급기량(m³/h)

V : 객실의 체적(m³)

CO₂, density : CO₂ 밀도

Q, fresh air : 신선공기 급기량

Table 1. The Ministry of Environment Republic of Korea guidelines

Pollutants	Public Transportation	Level 1	Level 2
Carbon dioxide (CO ₂ , ppm)	Subway	< 2,500	< 3,500
	Train	< 2,000	< 3,000
Particulate matter (PM10, µg/m ³)	Subway	< 200	< 250
	Train	< 150	< 200

Table 2. Specification and Properties of EMU

Dimension	Gas	Conversion factor		
Density	O ₂	1.1	kg/	
	CO ₂	1.67	kg/	
Molecular weight	O ₂	32	kg/kmol	
	CO ₂	44	kg/kmol	
	Air	28.96	kg/kmol	
Car Volume		158.18	m ³	L19.5×W3.12×H2.6
No. Person	측정값	People		설계정원 160명
Fresh Air Rate		1620	m ³ /h	설계 조건
Temperature	측정값		°C	
Press		101300	atm = Pa	
Universal gas constant		8310	J/kmol·K	
O ₂ consumption Rate		17	L/h/person	조용히 앉아있는 상태

Table 3. Measurement result of indoor air quality in the EMU

Date	Station	Temp. (°C)	Hum. (%)	CO ₂ (ppm)	PM10 (µg/m ³)	No. (person)	
09.11	Tanggogae → Ohido	max	22	72	1853	169	112
		min	17	48	700	76	7
		mean	20	54	1362	111	64
09.12	Ohido → Tanggogae	max	24	75	1872	222	130
		min	19	49	520	107	3
		mean	21	61	1266	143	70
11.23	Dongincheon → Yongsan	max	24	77	3103	141	167
		min	21	50	706	79	13
		mean	21	67	1536	114	93

Table 4. Comparison of CO₂ predicted and measured

Date	Station	CO ₂ of Predicted (ppm)	CO ₂ of Measured (ppm)	Ratio	
09.11	Tanggogae → Ohido	max	2251	1853	0.82
		min	580	700	1.21
		mean	1412	1362	0.96
09.12	Ohido → Tanggogae	max	2077	1872	0.90
		min	534	520	0.97
		mean	1408	1266	0.90
11.23	Dongincheon → Yongsan	max	3312	3103	0.94
		min	672	706	1.05
		mean	1980	1536	0.77

2. 실내공기질 측정 및 CO₂ 농도 예측

2.1 실내공기질 측정

전동차 실내공기질 측정은 2007년 9월과 11월에 IES-3000를 이용하여 측정하였다. 9월11일은 당고개역을 출발하여 오이도역 도착까지 퇴근시간대에 측정하였다. 9월12일은 오이도역을 출발에서 당고개역 도착까지 출근시간대에 냉방가동 조건에서 전동차 운행 진행방향 2호차 중앙 좌측에서 측정하였다. 11월23일은 1호선 급행 전동차를 대상으로 동인천역을 출발하여 용산역 도착하는 운행구간으로 퇴근시간대에 난방을 하지 않은 조건에서 진행방향 2호 객차와 5호 객차 중앙 우측에서 각각 측정하였다. 측정 결과는 Table 3과 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 나타내었다.

2.2 CO₂ 농도 예측

CO₂ 농도 예측 계산에는 Table 2와 같이 KORAIL 전동차 공기조화시스템 설계 자료와 인버터제어 전동차 제작 사양을 적용하였다. 전동차 실내 체적은 158.18m³(L:19.5m, W:3.12m, H:2.6m)이며, 신선외기 흡입풍량 27m³/min(1620m³/hr)이다. 또한 냉방장치와 별도로 실내 풍량을 골고루 해주기 위해 라인테리아가 출입문 근처 천정에 설치되어 있다. 정차 중에는 신선외기 흡입풍량이 전부 들어오는 것으로 하였다. 그리고 ASHRAE Handbook에 일반적인 대기 중 CO₂ 농도로 제시된 0.035%와 실내 O₂ 소비율은 승객이 조용히 앉아 있는 상태로 17L/h를 적용하였다. 초기 전동차 실내 CO₂ 배경농도는 예측치와 오차범위를 최소화하기 위해 실측치를 적용하여 계산하였다.

3. 결 과

3.1 PM10 농도 측정결과

9월11일은 당고개역을 출발하여 오이도역 도착까지 퇴근 시간대에 측정하였다. 그리고 9월12일은 오이도역을 출발에서 당고개역 도착까지 출근시간대에 냉방가동 조건에서 측정한 PM10 평균 농도 결과는 Table 3과 Fig. 1(a), (b)에 나타내었다. 측정결과 각각 111, 143µg/m³으로, 이는 환경부 가이드라인 Level 2(평균 250µg/m³ 이하, 혼잡시)에 각각 44%, 57% 수준으로 나타났다. 특히 Fig. 1(b)의 08:07분 급정역과 08:34분 남태령역에서는 선행열차 대기를 위해 출입문이 2분 이상 열릴 때 PM10 농도는 미미한 영향이 있음을 확인하였다. 11월23일은 1호선 급행 전동차를 대상으로 동인천역을 출발하여 용산역 도착하는 운행구간으로 퇴근시간대 측정된 결과는 Table 3과 Fig. 1(c)에 각각 나타내었다.

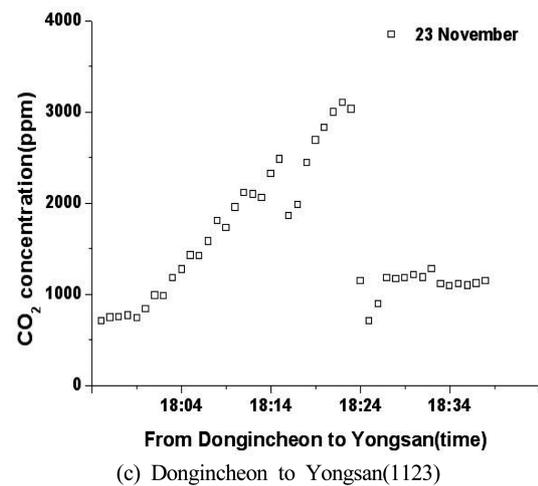
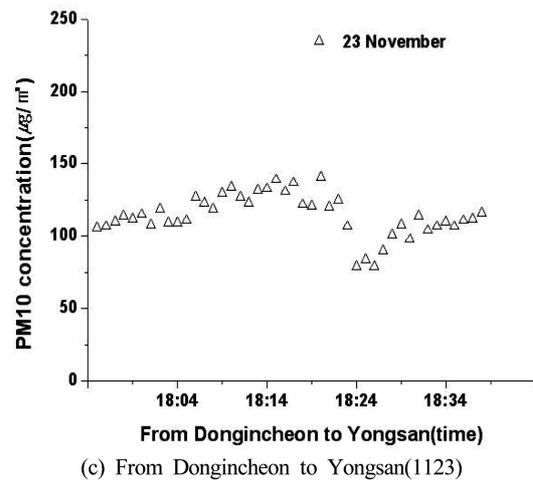
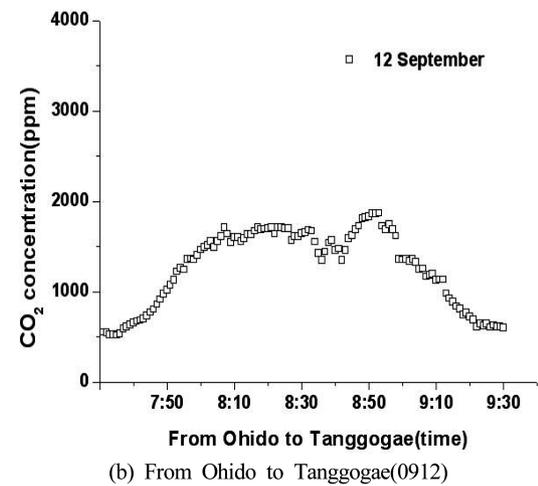
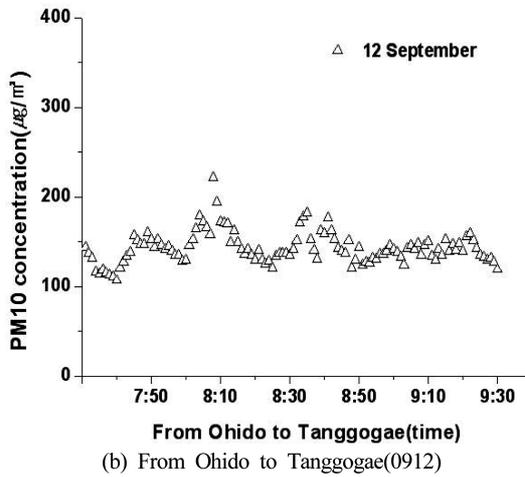
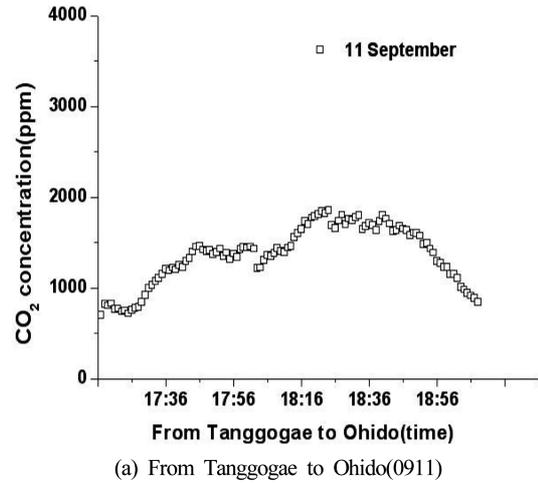
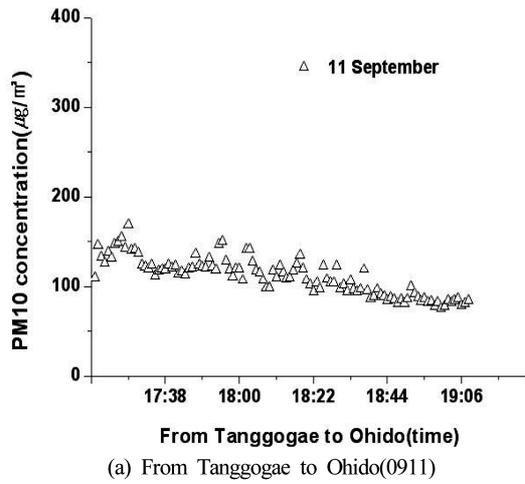


Fig. 1. Changes in PM10 concentration during the EMU

Fig. 2. Changes in CO₂ concentration during the EMU

PM10 평균 농도가 114 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 이는 환경부 가이드 라인 Level 2(혼잡시)에 45% 수준이다. 특히 Fig. 1(c)의 18:25분에 구로역에서 신호대기로 정차 중 출입문을 열어 두고 대기하는 과정에서 PM10 농도는 미미하지만 증가하

는 것으로 나타났다. 그리고 PM10 농도 증가에 승객인원 수와 상관관계가 있는지 분석한 결과, 선형 상관계수 R^2 는 각각 0.0013, 0.0922, 0.146으로 낮게 나타났다.

3.2 CO₂ 농도 측정결과

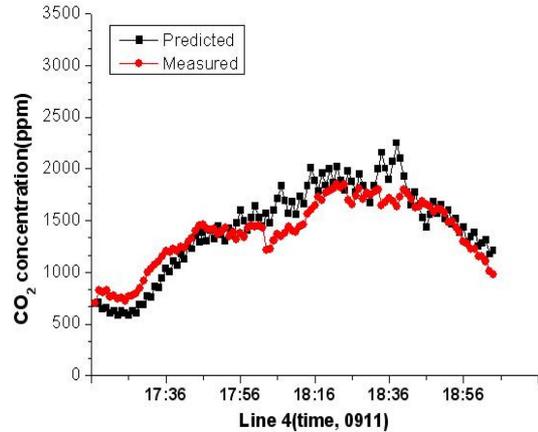
9월11일은 당고개역을 출발하여 오이도역 도착까지 퇴근 시간대에 측정하였다. 그리고 9월12일은 오이도역을 출발에서 당고개역 도착까지 출근시간대에 냉방가동 조건에서 측정한 측정결과, 각각 1362ppm, 1266ppm으로 나타났다. 이는 환경부 가이드라인 Level 2(평균 3500ppm 이하)에 각각 39%, 36% 수준으로 나타났다. Fig. 2(a)에서는 사당역(18:12)에서 금정역(18:36)까지 승객 인원수는 97명 이상 최고 112명까지 승차한 구간으로 CO₂ 농도가 가이드라인을 다소 상회하는 것으로 나타났다. Fig. 2(b)에서는 상록수역(07:52)에서 숙대역(08:53) 입구까지 운행구간으로 승객인원수는 93명 이상 최고 130명이 승차를 하였는데 이에 따른 영향으로 보인다. 그리고 남태령역(08:34)에서는 열차간격 조정을 위한 신호대기로 2분 이상 출입문 개방에 따른 영향으로 CO₂ 농도가 낮게 나타났다. 11월23일은 1호선 급행 전동차를 대상으로 동인천역을 출발하여 용산역 도착하는 운행구간으로 퇴근시간대에 난방을 하지 않은 조건에서 측정한 결과는 Table 2와 Fig. 2(c)에 나타내었다. 측정결과 CO₂ 농도는 1536ppm으로, 이는 환경부 가이드라인에 44% 수준으로 나타났다. 승객수를 보면, 부평역(18:06)에서 142명이 승차하여 구로역(18:25) 구간에서는 최고 167명이 승차하여 역곡역에서 구로역까지 약 6분 정도 운행을 계속할 때 CO₂ 농도가 다소 상회하는 것으로 나타났다. 그리고 CO₂농도 증가에 승객인원수와 상관관계가 있는지 분석한 결과, 선형 상관계수 R²는 각각 0.7408, 0.8161, 0.5605로 나타났다.

PM10농도의 상관관계와는 반대로 매우 높은 상관관계로 나타났다. 이는 전동차 운행 특성상 공기조화장치를 통해 외부 신선공기를 많이 확보하기에는 어렵기 때문에 CO₂ 농도는 실내 승객수의 증가와 영향이 있음을 알 수 있었다.

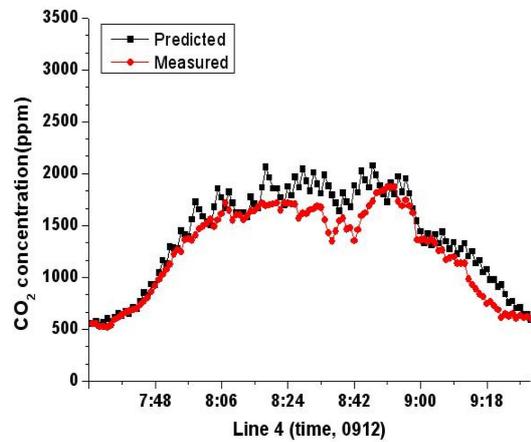
따라서 CO₂ 농도는 승객이 승·하차 시 출입문 열림 시간이 보통 1분 이내로 짧지만 선행열차 대기 및 신호대기, 환승역 등에서 출입문 열림이 2분 이상에서는 CO₂ 농도가 급격하게 하락하는 것으로 나타났다.

3.3 CO₂ 농도 예측 결과

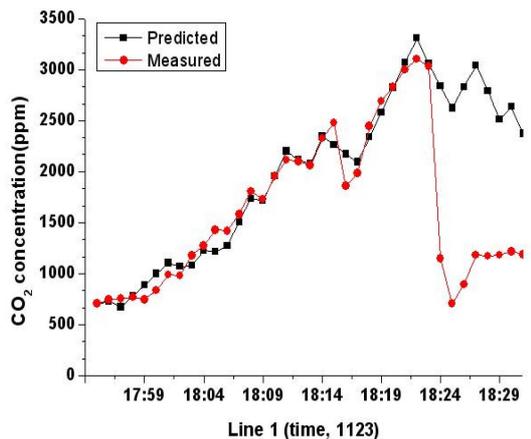
전동차 객차 실내 CO₂ 농도 예측 결과는 Table 4와 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a) 4호선 당고개역에서 오이도역까지 실측치는 평균 1362ppm, 예측치는 1412ppm으로, 실측치에 예측치가 96% 수준이다. Fig. 3(b) 4호선 오이도역에서 당고개역까지 실측치는 평균 1266ppm, 예측치는 1408ppm으로, 실측치에 예측치가 90% 수준으로 나타났다. 반면에 Fig. 3(c)는 동인천역에서 용산역까지 운행하는 급행 전동차로 실측치는 평균 1536ppm, 예측치는 1980ppm으



(a) From Tanggogae to Ohido(0911)



(b) From Ohido to Tanggogae(0912)



(c) From Dongincheon to Yongsan(1123)

Fig. 3. Changes in CO₂ concentration during the EMU service & predicted

로, 실측치에 예측치가 77% 수준으로 다소 낮게 나타났다. 이는 구로역(18:25)에서 신호대기관계로 출입문을 2분 이상 열려 있을 때의 영향으로 CO₂ 농도 예측치보다 실측치가 더 급격하게 하락하는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구는 환경부 대중교통수단 실내공기질 관리 가이드라인 어느 정도인지 실내환경종합측정기(IES-3000)를 이용하여 측정하였다. 이 실측치와 전동차 CO₂농도 예측식에 의해 계산된 예측치를 서로 비교하였다.

전동차 실내공기질 관리항목인 PM10 평균농도는 환경부에서 제시하고 있는 가이드라인에 각각 44, 57, 45% 수준이며, CO₂평균농도는 각각 39, 36, 44% 수준으로 매우 만족하게 나타났다. 그리고 전동차 운행패턴과 실내 승객수의 일반적인 조건에서 CO₂ 농도 예측치와 실측치의 비교 분석결과 0.96, 0.90, 0.77로 유사하게 나타났다.

따라서 전동차 CO₂ 농도 예측은 CO₂와 O₂의 밀도와 분자량, 승객 1인당 O₂소비율과 소비량, 초기 공기질량, 초기 CO₂질량, 신선공기 공급량, 객실의 체적, 급기량, 객실 내 승객수에 따른 CO₂ 농도량, 신선공기중에 CO₂ 농도량, 시간당 실내에서 발생된 CO₂ 농도량, 전동차 승객수 변동과 정차역 운행거리 시간을 통해 예측이 가능한 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. 환경부(2006), “대중교통수단 실내공기질 관리 가이드라인”.
2. 한국철도공사(2006), “열차 객실 공기청정도 향상 방안 연구”, 철도연구개발센터.
3. 한국철도공사(2007) “열차 객실 공기청정도 조사 분석 연구”, 철도연구원.
4. 유재홍(1997), “지하철내의 CO₂측정을 통한 적정환기량 산정에 관한 연구,” 석사학위논문, 서울시립대학교.
5. 조용성, 강성택, 박영훈(2005), “전동차 실내의 적정 환기율 및 이산화탄소 농도 기준치에 관한 고찰,” 한국철도학회 학술대회 논문집, pp.20-25.
6. 권순박, 박덕신, 조영민, 박은영, 김세영, 정미영(2007), “지하철 객실 CO₂ 농도 예측실 개발,” 한국대기환경학회 학술대회논문집, pp.73-74.
7. 임호주(2007), “대중운송수단 내 실내공기 오염물질의 노출 및 위해성 평가,” 박사학위논문, 가톨릭대학교.
8. Yasuo ZENDA (1988), “Study on the Ventilating System of Shinkansen Vehicle by Simulating the Internal Pressure,” RTRI REPORT, Vol. 2, No. 12, pp.41-48.
9. ASHRAE Fundamentals Handbook (1997), Environmental Control for Animals and Plants, pp.25.4.
10. 日本工業規格(1974), “室内換氣量測定方法(炭酸ガス法),” JIS, A 1406, pp.2.
11. 한국고속철도건설공단(1996), “Calculation of CO₂ Build-Up in Trailer Car Passenger Areas,” BECHTEL, pp.6-8.

접수일(2008년 2월 1일), 수정일(2008년 7월 11일), 게재확정일(2008년 7월 18일)