

전동차 실내의 적정 환기율 및 이산화탄소 농도 기준치에 관한 고찰

A survey of the optimal ventilation rate and the permissible CO2 concentration in the saloon

조용성*
Cho, Yong-Sung

강석택**
Kang, Seok-Teak

박영훈***
Park, Young-Hoon

ABSTRACT

Electric Multiple Unit is one of the major mass public transportation systems and passengers are under the influence of indoor air quality such as air temperature, relative humidity and concentration of CO₂ gas. Therefore ventilation system of Electric Multiple Unit should be designed for both healthy and comfortable environments. We survey the optimal ventilation rate and the permissible CO₂ concentration in the saloon with the consideration of the cooling and heating capacity and fresh air induced from tunnel.

1. 서 론

2004년 5월 30일부터 시행중인 「다중이용시설등의 실내공기질 관리법」은 적용대상인 지하역사, 지하도상가, 도서관, 미술관 등 17개 시설군에 대하여 미세먼지(PM10), 이산화탄소, HCHO, 총부유세균, CO 의 5개 항목의 유지기준을 설정하여 실내 공기질을 적정하게 유지, 관리하고 있으며, 「다중이용시설등의 실내공기질 관리법」의 적용을 받지 않는 영화관, 업무시설, 대형음식점 등 미적용 다중이용시설과 지하철, 버스, 기차 등 대중운송수단 등에 대해서도 다중이용시설의 실내공기질 관리범위를 점진적으로 확대해 나갈 예정이다. 따라서 대중교통의 실내 공기질 기준치 및 환기량 규제가 몇 년 안에 이루어 질 것이라 예상되고, 이를 위해 체계적인 연구가 선행되어야 할 것이며, 특히 지하구간을 운행하는 지하철 객실내의 환기는 터널내의 공기를 이용한다는 특수성이 있기 때문에 환기방식 및 실내공기질 기준치를 정하는 데에 더 많은 검토와 조사가 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 지하철 환기에 적용 가능한 기준을 찾기 위해, ASHRAE 62에서 제시된 필요 환기량 식에 의한 값과 ASHRAE Fundamental 과 UIC553에 언급된 전동차 객실내 1인당 환기량 기준을 비교 검토하고, ASHRAE 62에 제시된 식에 의하여 시간에 따라 객실내의 CO₂농도 변화를 예측하였다. 또한 국내에서 처음으로 객실 내 이산화탄소 농도를 감지하여 환기장치를 제어하는 HVAC를 적용한 서울시2호선 신조차량의 실제 영업운전 중 객실 및 외부의 이산화탄소 농도를 측정하여 기존차량보다 개선된 점과 향후 「다중이용시설등의 실내공기질 관리법」의 확대 방안에 대한 준비와 지하철을 이용하는 승객들의 더 쾌적한 객실내의 공기질 향상을 위하여 개선할 점을 고찰하고자 한다.

* 책임저자 : (주)로템 기술연구소 주임연구원

** (주)로템 기술연구소 책임연구원

*** (주)로템 기술연구소 수석연구원

2. 다중이용시설등의 실내공기질 관리법

2004년 5월 30일부터 시행중인 「다중이용시설등의 실내공기질 관리법」에서는 적용대상 다중이용시설을 종전의 「지하생활 공간 공기질 관리법」에서 관리하던 지하역사, 지하도상가 2개 시설 군에서 도서관, 의료기관, 실내주차장, 대규모 점포 등 17개 시설군으로 확대하여 도표1. 과 같이 관리하고 있다. 또한 현재 「다중이용시설등의 실내공기질 관리법」의 적용을 받지 않는 시설 및 대중운송수단 등을 ‘특수실내환경’이라 규정을 짓고, 점차적으로 「다중이용시설등의 실내공기질 관리법」의 적용범위를 ‘특수실내환경’에까지 확대 시키려 하고 있다. 이에 몇 년 전부터 지하철, 버스, 기차 등 대중운송수단등에 대한 실태조사가 환경부 주관에 실시되고 있으며, “차세대 핵심환경기술”사업을 통하여 특수한 상황의 실내 환기방법 등에 대한 연구가 진행 중이다.

도표 1. 실내공기질 유지기준

오염물질 항목	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO ₂ (ppm)	HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	총부유세균 (CFU/ m^3)	CO (ppm)
다중이용시설					
지하역사, 지하도상가·여객자동차터미널의 대합실 및 철도역사의 대합실(연면적 2000 m^2 이상), 공항시설중 여객터미널(연면적 1500 m^2 이상), 향만시설중 대합실(연면적 5000 m^2 이상), 도서관·박물관 및 미술관(연면적 3000 m^2 이상), 장례식장 및 찜질방(연면적 1000 m^2 이상), 대규모점포	150 이하	1,000 이하	120 이하	800 이하	10 이하
의료기관(연면적 2000 m^2 이상 또는 병상수 100개 이상), 국공립 보육시설(연면적 1000 m^2 이상), 국공립 노인전문요양시설·유료노인전문요양시설 및 노인전문병원(연면적 1000 m^2 이상), 산후조리원(연면적 500 m^2 이상)	100 이하				
실내주차장(연면적 2000 m^2 이상)	200 이하				

3. 지하철 객실내 필요환기량

3.1 환기의 목적과 필요환기량 식

환기(ventilation)이란 실내에서 발생된 오염공기를 배출하고 외부의 청정한 공기를 실내로 공급하여 실내공기를 희석함으로써 오염농도를 제어하는 과정을 말한다. 따라서 그림1.과 같이 오염물질의 평형관계에 의하여 식(1)과 같은 오염농도가 구해진다.

$$C = C_o + \frac{M}{Q} \quad (1)$$

여기서 M은 실내에서의 오염 발생량이고 C와 C_o는 각각 실내외의 오염농도이다. 실내농도제어를 위해 필요한 환기량을 산정하기 위해서는 실내의 오염농도 대신 오염허용기준을 대입하면 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$Q = \frac{M}{C - C_o} \quad (2)$$

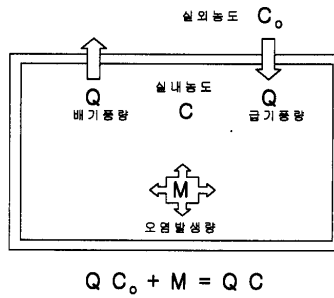


그림 1. 오염물질의 평형관계

3.2 ASHRAE 및 UIC553에서 규정하는 지하철 객실내 환기량

- (1) ASHRAE 2003 HVAC Application 에서는 통근형 전동차의 경우 기계환기 외에 ‘승객들의 출입을 통한 환기’와 빈번히 열리는 ‘출입문에 의한 자연환기’의 효과를 필요환기량에 포함시켜야 한다고 언급되어 있으며, 역간의 거리가 2분 이내일 경우 일반적으로 승객 1인당 필요환기량 2.5L/s(9m³/h)를 적용한다고 명시되어 있음.
- (2) UIC553(Ventilation)에서는 'Coach'(장거리 객차)의 경우 승객 1인당 필요환기량을 10~15 m³/h 로 정의하고 있다.

3.3 실내 공기환경의 쾌적 조건을 위한 기준치

인체에서는 호흡이나 활동에 의하여 CO₂, 습기, 먼지, 미생물, VOCs 등을 공기중으로 방출한다. 인체의 생리작용에 의하여 방출되는 척도로 CO₂ 농도를 지표로 설정하여 실내의 오염물질 발생농도나 공기청정기기의 유무, 외기의 농도와 환기효율 등에 따른 환기 기준을 결정하는데 합리적인 방법으로 평가되고 있다. 하지만, CO₂ 자체가 인체에 해로운 가스는 아니기 때문에 실내 공기질의 총체적인 평가를 CO₂ 농도의 수치的高低으로 판단하기에는 주의가 필요하다.

현재 우리나라의 「다중이용시설등의 실내공기질 관리법」에서는 도표1.과 같이 다중이용시설에서의 실내 CO₂농도를 1000ppm으로 규정하고 있으나, 다중이용시설에 포함되지 않은 학교의 경우는 ‘학교환경위생기준’을 개정(2004.2)하여 실내 CO₂농도 기준치를 1500ppm으로 하였고, 미국의 경우 아직 실내의 CO₂농도 기준치가 없으나 ASHRAE Std 62.1에는 실내의 CO₂농도는 외기 농도보다 700ppm 높은 값을 기준으로 채택하고 있다.

지하철의 경우 「다중이용시설등의 실내공기질 관리법」에 포함되지 않는 터널내의 공간을 운행하며 터널내의 공기를 이용하여 환기를 하는 메카니즘을 가지고 있기 때문에 지하철 객실내의 CO₂ 농도 기준치, 미세먼지, 총부유세균 등의 기준치를 「다중이용시설등의 실내공기질 관리법」상의 이용시설과 같은 기준으로 관리하기에는 무리가 따를 것이라 판단된다.

3.4 지하철 객실내 필요환기량 계산(강제환기 관점)

3.1에서 3.3까지 언급한 내용을 바탕으로 지하철 객실내의 필요환기량 값을 구하면 다음과 같다.

- (1) 3.1의 식(1)의 계산 조건
 - 가) 실내의 CO₂발생량: 좌석 승객의 상태와 입석 승객의 상태를 1)구분하여 좌석시 13.3L/h, 입석시 17.1L/h의 값을 대입하였다.
 - 나) 승객수: 160명(좌석:54명, 입석: 106명)
 - 다) 객실내 CO₂농도 기준치: 1500ppm(환기계산의 일반적인 기준)
 - 라) 외기 CO₂농도(터널내): 600pm(실제 측정치)

1) “지하철 내의 CO₂측정을 통한 적정환기량 산정에 관한 연구”, 서울시립대, 유재홍(p16) 한국체육과학연구원 측정 결과

(2) 필요한기량 계산

$$Q = \frac{M}{C - C_o} = \frac{(54 \cdot 13.3 + 106 \cdot 17.1) \cdot 10^{-3}}{(1500 - 600) \cdot 10^{-6}} = 2812 (m^3/h)$$

상기 값을 1인당 환기량으로 환산하면, $Q_{person} = 17.5 (m^3/h)$ 이다.

(3) 객실 내 필요 강제 환기량 결정: 상기의 계산에 의한 환기식은 전체환기량(강제환기+자연환기)이라 볼 수 있으며 3.2항의 ASHRAE 에 언급된 내용과 같이 통근형 전동차의 경우 객실 출입문에 의하여 이루어지는 자연환기량을 역시 고려해야 하므로 지하철 객실내의 필요한 강제 환기량은 자연환기량 및 냉/난방 부하에 따라 합리적으로 결정해야 한다.

4. 지하철 객실 내 CO2 농도 예측 식

지하철 객실내 CO2 방출농도가 시간에 따라 변화할 경우에는 3.1항 식(1)의 실내 평형관계식은 하기의 식(3)과 같이 표시할 수 있으며 승객수, CO2 기준치에 따라 그림 2, 그림3, 과같은 결과를 볼 수 있다.

$$C(t) = C_o + \frac{M}{Q} (1 - e^{-\frac{Q}{V}t}) \quad (3)$$

여기서,

C_o (외기의 CO2농도(mg/m3)): 실측값의 평균인 600으로 계산 함.

M (실내 CO2 발생율(L/s)): 승객수를 달리하여 계산 함.

Q (신선공기 유입율(L/s)): 승객수를 달리하여 계산 함.

V (객실내 체적(m3)): 객실의 내부 체적에 승객의 체적을 제외한 값

t (시간(min))

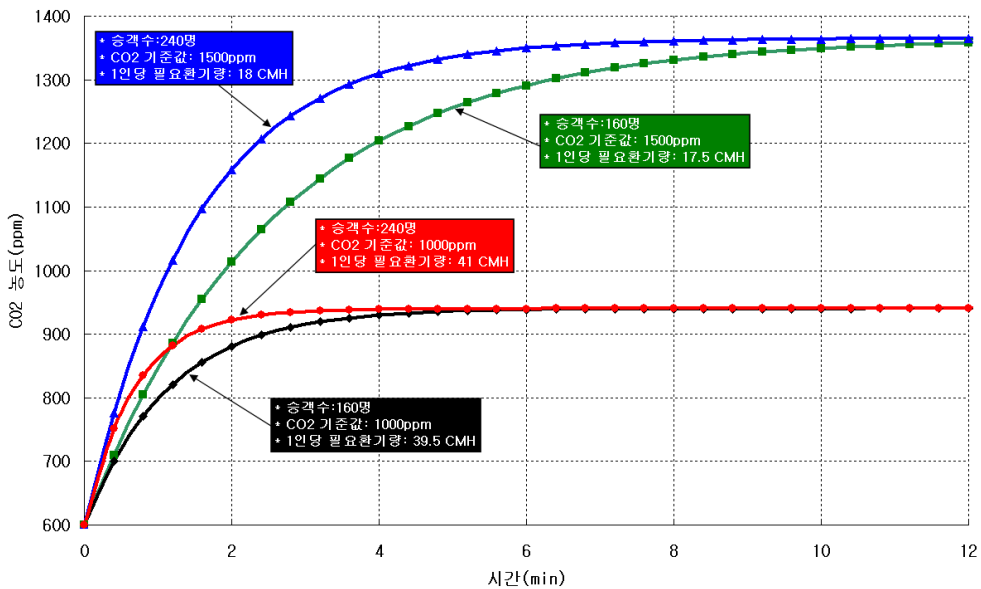


그림 2. 시간에 따른 지하철 객실내의 CO2농도 예측 결과

상기 식의 결과는 객실내의 CO2농도 기준치와 승객수를 달리하면서 필요환기량 및 시간에 따라 객실의 농도가 변화하여 수렴되는 현상을 예측 할 수 있었다. 수렴되는 시간은 승객의 수가 증가하면서 객실의 실용적이 작아져 빠르게 수렴되는 것을 볼 수 있었고, CO2 농도가 기준치가 낮을수록 필요 환기량이 증가하여 기준치에 이르는 시간이 짧아지는 것을 알 수 있었다.

5. 실제 지하철에서의 객실내 CO2 농도 측정 및 실외 농도 측정

상기의 나타난 예측식의 결과들은 승객의 출입이 없고, CO2농도의 발생량도 일정하며 역간의 출입문에 의한 자연환기에 의한 효과가 배제되어 있어서 지하철 객실내의 CO2농도 경향을 판단하기에는 한계가 있기 때문에 본 연구를 위해 2005년 10월 18일 서울시지하철2호선 신조차량에서 출근시간(am 8:00 ~am9:35) 및 퇴근시간(pm 4:46~pm 6:18)동안 순환노선 한 Cycle을 운행하는 동안 객실내와 실외(터널내)의 CO2농도를 연속 측정하였다.

±20ppm의 오차값을 지닌 센서는 30초마다 데이터를 저장할 수 있었고 센서의 설치 위치는 실내에 객실 천장에 2지점, 중앙부 바닥에서 1.5m 높이에 1개, 객실 중앙부 바닥에서 높이를 달리 하면서 총 4개의 센서로 측정을 하였고, 실외는 차량 외부 각 단부에 하나씩 두개의 센서로 측정을 하였다. 정확한 승객수를 측정하기 위해 역마다 차량의 AS(공기스프링 압력)값을 TCMS에서 받아 승객하중을 1인당 승객하중 2)62kg로 나누어 승객수를 얻을 수 있었다.



그림 3. CO2센서



그림 4. 객실중앙 측정



그림 5. 객실 천정 측정

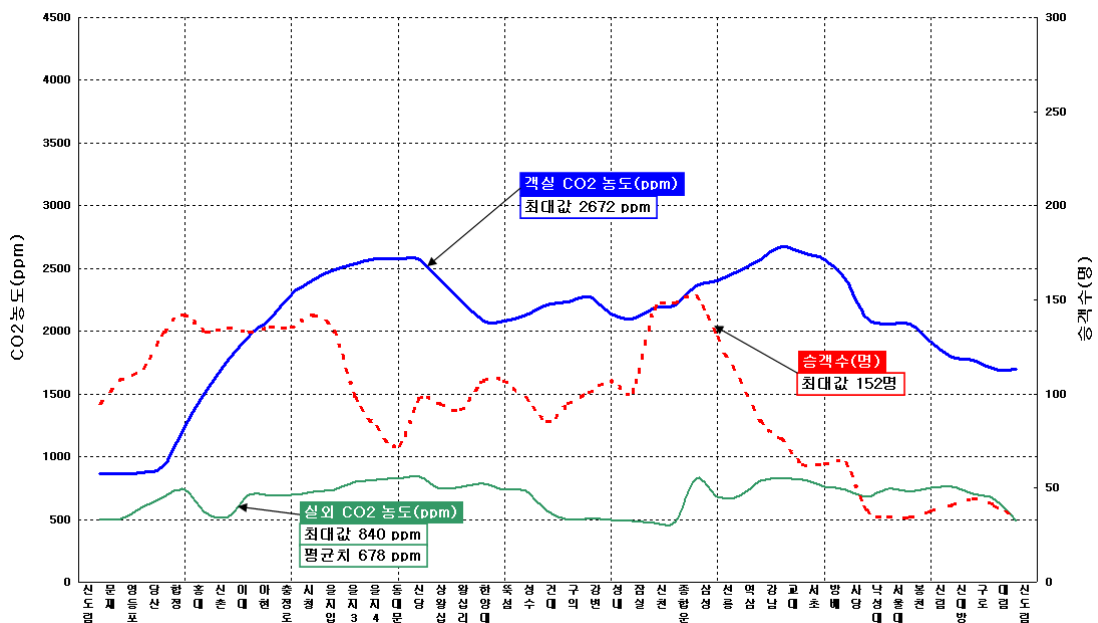


그림 6. 출근시간대 이산화탄소 농도 측정

2) 건설교통부고시 제 1998-53호의 승객 1인당 하중값

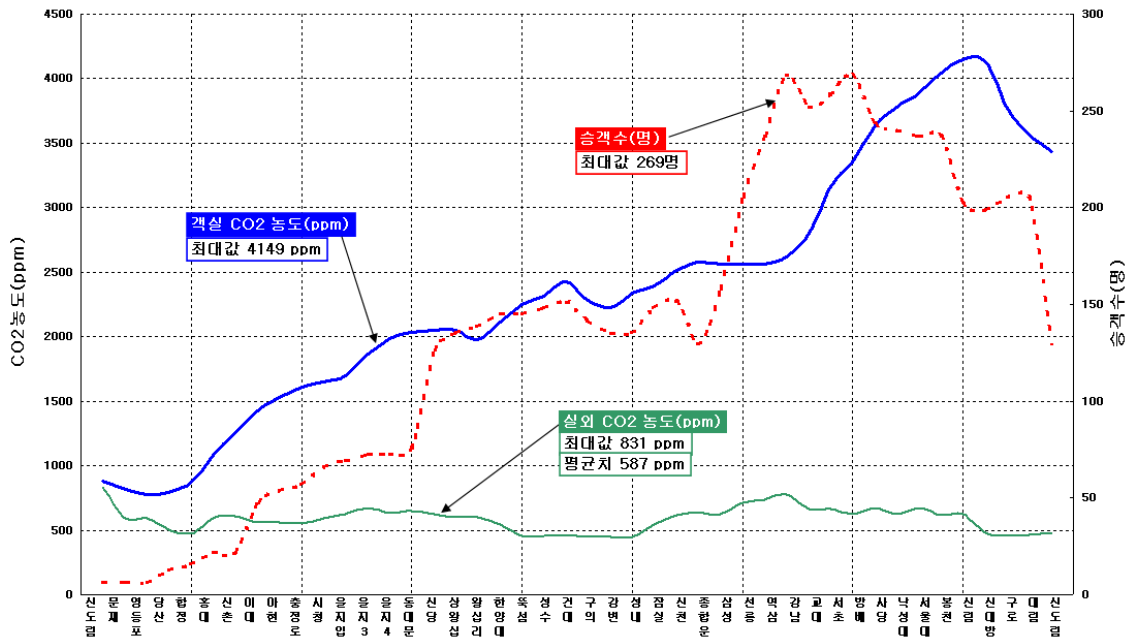


그림 7. 퇴근시간대 이산화탄소 농도 측정

출근시간대 및 퇴근시간대의 측정결과는 CO2농도의 평균값으로 그림6. 과 그림7.에 나타내었다. 측정위치별로 CO2농도값의 차는 100ppm이내로 거의 없었지만, 객실 천장부의 농도가 가장 높았다. 객실내의 CO2농도는 승객수의 증/감 경향에 따라 변화하지만 일정한 시간차를 갖고 변화하는 것을 볼 수 있었다. 실외 CO2 농도의 측정결과 지하구간에 비하여 지상구간의 농도가 약 200ppm정도 낮게 측정되었고, 이는 외기를 유입시켜 환기를 하는 객실내의 공기에도 영향을 주어 객실의 CO2농도가 낮아짐을 볼 수 있었다.

6. 결론

지하철 객실내의 필요환기량을 CO2농도의 기준치에 의하여 계산하였고, 실제 지하철에서 객실 및 실외의 CO2농도를 측정하였다. 「다중이용시설등의 실내공기질 관리법」의 적용 확대 방안이 대두되고 특수 실내환경인 지하철 객실내에 까지 적용이 될 전망이기 때문에 지하철 객실내의 환기방안에 대하여 성급한 개선책을 적용하기 보다는 철저한 현상 파악의 조사와 검토가 이루어져 하며, 나아가 가장 합리적이고 쾌적한 객실내의 공기질 향상을 위한 개선점을 찾아가야 할 것이다.

참고문헌

1. 한국공기청정협회, 제3회 실내환경 전문가 양성교육 교재(2005년 10월)
2. ASHRAE 2003 HVAC Applications, Chapter 9 Surface Transportation
3. ASHRAE Std. 62 (1989)
4. UIC 553, Ventilation, heating and air-conditioning in coaches, p16, 4-Air Supply
5. 서울시립대학교, 유재홍, “지하철 내의 CO2측정을 통한 적정환기량 산정에 관한 연구”, 공학석사학위논문, pp16-18