

지하철 객차내의 공기질 현황 및 환경개선을 위한 최근 기술동향

○ 권순박 | 한국철도기술연구원 철도환경연구실
 선임연구원
 E-mail : sbkwon@krti.re.kr

1. 서 론

한국인의 일일 시간 활동양상 중 실내에서 체류하는 시간을 살펴보면, 집안, 사무실에 이어 평균 1.2시간 정도를 교통수단 내에서 보내는 것으로 조사되었다(환경부, 2001). 미국 EPA의 성인 실내 거주시간 분석에서도 약 1.3시간을 독일의 GerES II 연구결과에서도 약 0.9시간 정도를 교통수단에서 소비하는 것으로 조사되었다(Aliaga and Winqvist, 2003). 2009년 현재 수도권 도시철도 차량은 모두 3662량(서울메트로 2104량, 도시철도공사 1558량)으로 하루 평균 721만명(서울시통계연보, 2008)의 승객을 수송하고 있는 수도권의 주요한 대중교통 수단이다. 지하철 이용객은 매년 꾸준히 증가하고 있는데, 이러한 추세는 정부의 녹색성장 기조(철도 교통 중심의 대중교통체계 재편)와 지하철 외 경량 전철, 대심도 광역도시철도 등 다양한 교통수단의

도입으로 인해 더욱 증가될 것으로 예상된다. 철도 교통에서 실내공간은 크게 객실 내부, 승강장, 대합실, 매표소로 구분될 수 있으며, 철도 운영자와 상가운영자 등의 상시체류자가 체류하는 실내 공간도 포함된다.

이용객의 관점에서 철도교통 이용시 체류시간이 가장 많은 곳은 차량 객실이라고 할 수 있으며, 객실 공기질의 중요성과 관련 기술개발 연구가 진행되고 있다(한국철도기술연구원, 2010).

도시철도 차량의 주요 공조설비는 주로 냉방장치와 환기시스템이다. 차량 냉방장치는 지붕위에 2대의 냉방장치를 설치하고 천정 내에 설치된 2열의 에어덕트를 이용해 객실에 균등하게 분배하는 방식을 취하고 있으며, 객실 중앙부 리턴그릴로 순환공기를 유입하여 재공급하게 된다. 냉방장치 가동시 객실의 공기흐름도는 그림 1과 같다.

객실 단부에 위치한 배기구(exhaust outlet)의 역

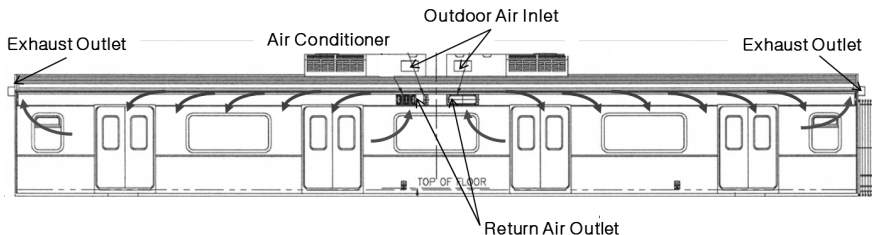


그림 1. 도시철도 차량 공조시스템

할은 냉방시 유입된 외기를 자연배기하는 것으로, 차량 내가 양압으로 유지된다는 조건에서 설계되었다(서울메트로 2호선 신조차량 기준). 그러나, 실제 운행하는 도시철도 차량의 경우 출입문과 객실 통로가 빈번하게 개폐되기 때문에 객실 내부가 양압으로 유지되기 어려우며 배기구를 통해서도 급기가 이루어 질 수 있다(권순박 등, 2009a). 이러한 경우 터널 내 오염된 공기가 유입되어 실내공기질을 악화시킬 수 있는 가능성이 높다. 최근 도입되는 차량의 경우 강제 팬을 이용하여 강제 배기방식을 취하는 경우도 있다. 수도권 도시철도 지하역사 승강장에 설치 완료된 승강장스크린도어(platform screen door; PSD)로 인해, 승강장과 대합실의 공기질 개선효과가 나타나고 있으나, 상대적으로 터널 내 오염은 악화될 것으로 예상되어 터널구간을 주로 운행하며 터널공기가 객실로 유입될 수 밖에 없는 지하철 객실 내 공기질 악화문제가 제기되고 있다. 특히 우려되는 지하철 객실 내 오염물질은 미세먼지(PM10)와 이산화탄소(CO₂)로 환경부 ‘대중이용시설등의 실내공기질관리법’의 적용대상 구역에서는 제외되어 있지만, 환경부가 2006년 12월 발표한 ‘대중교통수단 실내공기질관리 가이드라인’에 적정 관리기준이 제시되어 있다.

본 기술지에서는 수도권 지하철 1~8호선 객실 내 공기질 특성에 대한 연구결과를 검토하고, 최근 지하철 객실 공기질 개선 기술동향에 대해 소개하고자 한다.

2. 지하철 객실 공기질 현황

(1) 지하철 객실 공기질 관리 현황

2006년 12월 발표된 환경부의 대중교통수단 실내공기질관리 가이드라인은 도시철도, 열차, 고속버스 등의 대중교통수단 객실의 PM10 및 CO₂ 농도를 일정 수준 이하로 유지하도록 함으로써 객실 공기질을 쾌적하게 유지하고, 국민의 건강을 보호하고자 설정되었다. 객실 내 PM10 및 CO₂ 농도에 대하여, 운행차량의 혼잡시와 비혼잡시로 구분하여

각각의 농도에 대한 권고기준을 제시하고 있다. 또한, 신규 차량 제작시에는 냉방장치를 통해 유입되는 외부공기량이 도시철도는 승객 1인당 12 m³/hr 이상, 열차·버스는 20 m³/hr 이상 되도록 하고 PM10 저감 장치를 설치하도록 권고하고 있다. 그러나, 일본 일부 지하철 차량에 적용된 미세먼지 저감용 롤필터(roll filter) 장치를 제외하고, 국내외적으로 객실 미세먼지 저감장치 장착사례는 거의 보고되지 않고 있다. 이처럼, 지하철 객실 내 미세먼지 저감장치의 적용사례가 없는 이유는 주로 저감장치의 미세먼지 포집효율 등 기술적인 문제가 아닌 유지보수의 편의성 및 비용 측면 때문이다. 일반 주거용 건축물 혹은 사무공간에 비하여 유입되는 공기중 미세먼지 농도가 높고 운영환경이 열악한 지하철의 경우, 고효율 필터를 사용할 경우 잦은 필터청소와 소모품 교체로 인해 지속적인 유지보수가 쉽지 않기 때문이다. 따라서 지하철 객실 공기질 개선을 위한 저감기술은 저감장치의 성능과 더불어 유지보수 측면에서 효율적인 시스템이 요구되고 있는 실정이다.

(2) 지하철 객실 공기질 조사

지하철 운행 중 혼잡시간(첨두시간)과 비혼잡시간(비첨두시간)에서 객실 내 미세먼지와 CO₂ 농도의 분포특성에 대한 연구는 환경부에서 지원으로 수도권 전동차 1호선~8호선(일산선, 파천선 포함) 및 분당선의 9개 노선에 대한 객실 공기질 특성 연구가 보고된 바 있다(환경부 2008, 환경부 2009). 일반 실내건축물과 달리 지하철 객실 내 공기질 측정 및 분석을 위해 측정장치의 설치 위치는 전동차 내 공기질을 대표할 수 있는 지점, 승객의 호흡 및 이동에 의한 영향이 크지 않은 지점, 이용 승객의 불편을 최소화할 수 있는 지점을 선정해야 한다. 그리고 측정시간이 차량 운행기준으로 시발역과 종착역을 대상으로 약 1~2시간 정도이기 때문에 미세먼지 표준 측정방식인 소용량 공기포집법, 저용량 공기포집법 및 베타선 흡수법 등을 적용하기 어렵다. 또한, 승객이 밀집된 공간에서 측정장비의 설



그림 2. 지하철 객실 공기질측정 장비 설치 모습



그림 3. 전동차 탑승 전 외기 측정 및 승객수 계수 모습

치 및 운용이 어렵기 때문에 휴대용 입자의 광산란 효과를 이용해 간접 측정하는 광산란 측정장비를 적용한다. 통상 객실 중앙지점인 2번째와 3번째 출입문 사이의 가운데 지점을 측정 위치로 선정하고, 측정 장비는 선반 위나 측정용 트레이에 장착하여 좌석 앞에 위치시킨다.

객실 공기질 측정과 더불어 중요한 변수인 외기

농도, 승객 수 및 운행시간에 대한 정보가 요구된다. 측정일의 외기 농도는 실제 측정 노선에서의 전동차 탑승 전후에 승강장에서 측정하며, 영향요인 분석시에는 기상청에서 제공하는 서울시 평균 자료를 활용한다. 각 정차역 승객수의 변화는 역에서 출발 한 뒤 다음 역에 도착하기 전까지 차량 내에 탑승하고 있는 인원을 계수하고, 출입문 개폐 및 운

행 시간에 대한 정보를 얻기 위하여 출발역에서부터 다음 역에 도착할 때까지의 시간과 도착 후 출발 직전까지의 시간을 각각 기록한다.

(3) 지하철 객실 공기질 현황

가. 노선평균 오염물질 농도

대중교통수단 실내공기질 관리 가이드라인에서 제시하고 있는 미세먼지(PM10) 관리기준은 혼잡시간대 노선평균 농도 $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을, 비혼잡시간대 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 이하를 유지하도록 권고하고 있다. 2008년 추계와 동계기간 및 2009년 춘계 측정기간대 혼잡시간과 비혼잡시간대의 계절별 각 노선의 미세먼지 측정 평균값에 대한 산출 결과 모든 노선에서 대중교통수단 실내공기질 관리 가이드라인 이하의 수준으로 나타났다. 침투 시간대 중 가장 높은 미세먼지 농도가 나타난 노선은 추계 측정에서 $170.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 보인 6호선이었으며, 그 다음은 $150.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 보인 7호선인 것으로 나타났다. 비침투 시간대의 경우 침투 시간대와 마찬가지로 6호선에서 $151.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 측정값을 보여 가장 높은 수준인 것으로 나타났으며, $139.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 측정값을 보인 7호

선이 그 뒤를 따랐다. 이러한 측정 결과를 볼 때, 상대적으로 1기 지하철에 비해 2기 지하철이 높은 수준의 미세먼지 농도를 보이는 것을 알 수 있었다. 계절별 평균값은 추계 침투 시간대에 $108.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 추계 비침투 시간대에 $83.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정 시간대와 상관없이 추계에 가장 높게 나타났으며, 그 다음 동계와 춘계 순으로 나타났다(Park et al., 2010).

객실 내 CO₂의 경우 평균농도가 가장 높게 측정된 노선은 추계 1호선 구간으로 2,478 ppm 이었으며, 그 다음은 2,285.2 ppm의 농도가 나타난 추계 2호선 구간이었다. 전체 노선에 대한 평균값은 침투시간인 출근시간대에 계절별로 2008년 추계는 2,007.7 ppm, 2009년 동계는 1,480 ppm 그리고 2009년 춘계는 1,631.8 ppm 이었으며, 비침투 시간대의 계절별 평균값은 2008년 추계는 1,058.8 ppm, 2009년 동계는 1,024.9 ppm 그리고 2009년 춘계는 906.0 ppm 이었다. 본 연구를 통해 측정된 노선의 출발역에서부터 종착역까지의 전체 CO₂의 노선별 평균값은 대중교통수단 실내공기질 관리 가이드라인에서 제시하고 있는 침투 시간 기준 3,500 ppm, 비침투 시간 기준 2,500 ppm을 초과하는 노선은 없는 것으로 조사되었다.

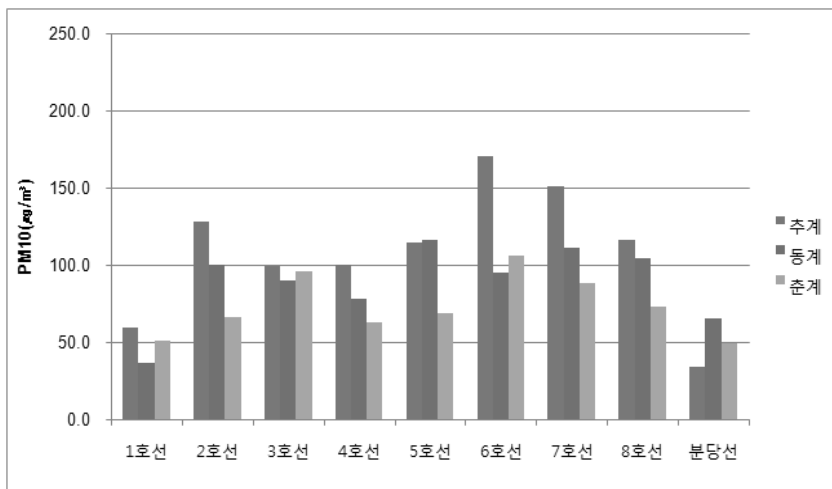


그림 4. 계절 및 노선별 출근시간대 PM10 농도 변화

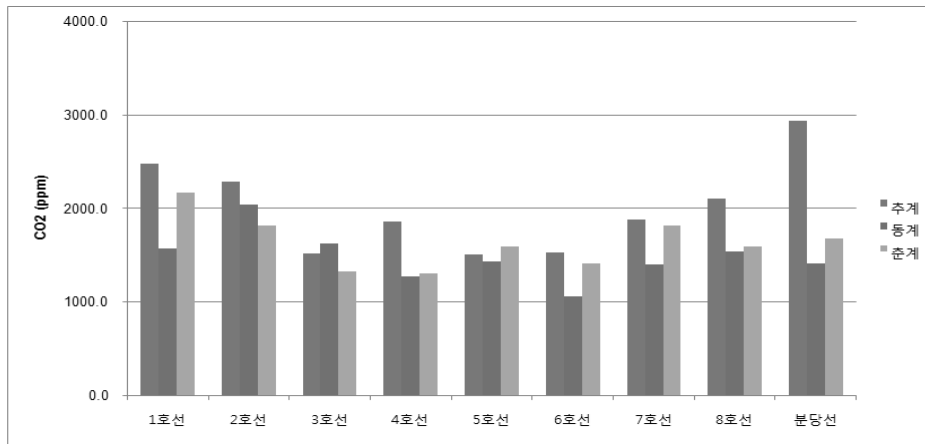


그림 5. 계절 및 노선별 출근시간대 CO₂ 농도 변화

나. 정차역별 오염농도 변화양상

각 노선에서 정차역간 평균농도를 이용하여 객실 내 CO₂, 미세먼지, 승객수, 온도, 습도 변화 추이를 살펴보았다. 그림 6과 그림 7은 5호선 출근시간대 정차역 기준으로 CO₂, 승객수, 미세먼지 농도의 변화량을 나타내고 있다.

추계, 동계, 춘계 측정일에 승객수는 정차역 기준으로 유사한 양상을 나타내었으며, 춘계에 다소 많은 인원이 탑승한 것으로 조사되었다. 승객수는 추계와 춘계에는 오목교-양평 구간에서 동계에는 신길-여의도 구간에서 최대인원을 기록했다. 객실 CO₂ 농도의 경우 승객수의 변화양상과 거의 동일한 양상을 나타내며 최대 탑승인원을 기록한 정거장 이후에 최대값을 나타내는 경향을 보였다. PM10의 경우 동계>추계>춘계 순으로 높게 측정되었다. 춘계측정일에는 출근시간대 서울시에 약 7.5 mm의 강우가 관측되었으며, 외기 PM10 농도가 21.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 매우 낮게 관측된 날이다. 동계측정일 외기 PM10 농도는 94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 추계측정일 외기 PM10 농도는 63.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 관측되어, 5호선 객실 PM10농도가 외기 PM10농도에 영향을 받는 것으로 나타났다. 5호선 외 다른 노선의 역간 변화추이에서도 객실 내 CO₂, PM10, 승객수, 온도, 습도의 변화추이는 위와 유사한 양상으로 조사되었다.

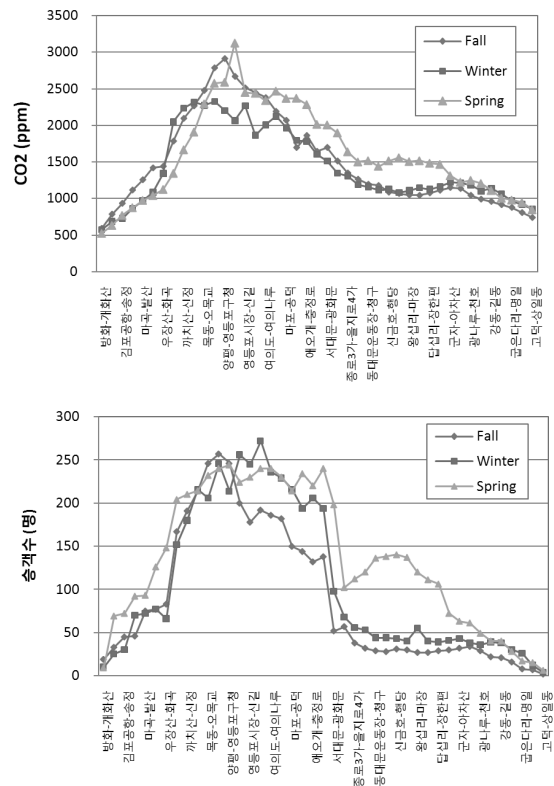


그림 6. 5호선 출근시간대 객실 내 CO₂농도 및 승객수 변화

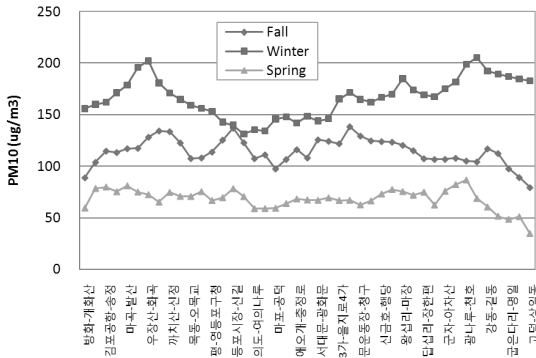


그림 7. 5호선 출근시간대 객실 내 PM10 변화

다. 지상구간과 지하구간 영향

9개 대상노선에서 지상구간은 43개역, 지하구간은 250개역으로 구분하여 분석한 결과 그림 8 및 그림 9와 같이 계절별로 농도값 차이는 다소 있었으나 모든 대상에서 지하구간의 농도가 높게 나타났다. 지상구간 대비 지하구간에서 평균농도 증가율은 PM10의 경우 51.9%, CO₂의 경우 28%로 분석되었다. 이는 지하구간의 평균 CO₂ 농도 및 PM10 농도가 지상구간에 비하여 높기 때문이다. PM10의 경우 측정기간(추계, 동계, 춘계) 오전 출근시간대 평균 외기 PM10 농도는 54.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 지상구간의 PM10 평균농도인 64.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 유사한 수준으로 나타나, 지상구간에서 외기의 직접적인 영향을 받는 것으로 나

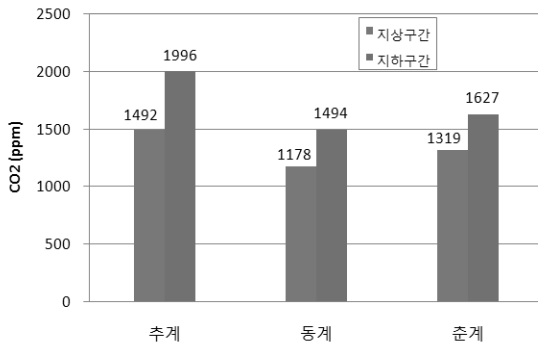


그림 8. 지상구간과 지하구간에서의 객실 내 평균 CO₂ 농도

타났다. CO₂ 농도의 경우 PM10에 비하여 지하구간에서의 CO₂ 증가율이 낮게 나타났는데, 이는 CO₂의 경우 외기의 영향과 더불어 객실 내 승객수에도 영향을 받기 때문이다(권순박 등, 2009b).

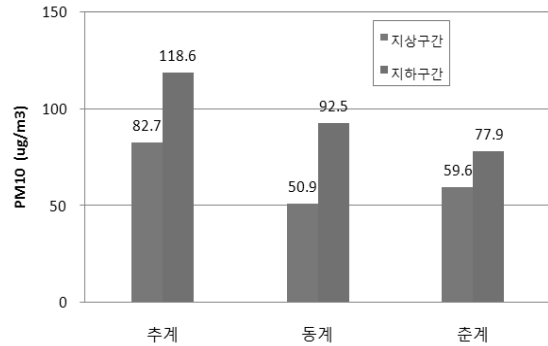


그림 9. 지상구간과 지하구간에서의 객실 내 평균 PM10 농도

3. 지하철 객실 공기질 개선기술 동향

(1) 객실 내 공기청정 모듈화 기술

한국철도기술연구원에서는 지하철 객실 내 오염물질 분포특성, 차량환기 특성을 분석하여 객실 내 공기정화에 적합한 공기청정 모듈기술을 개발하고 있다. 박덕신 등 (2010)은 도시철도에 비하여 장거리 운행을 하는 무궁화 철도차량의 외기도입부에 적용할 수

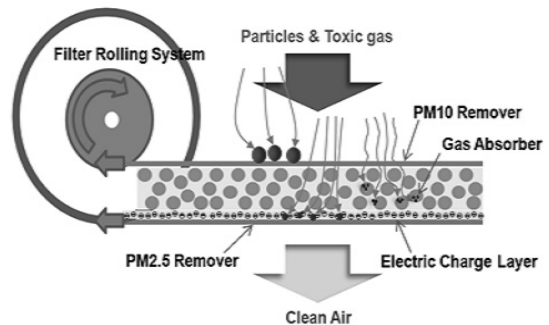


그림 10. 지하철 객실 내 미세먼지 및 유해가스 저감장치 개념도



그림 11. 시험차량을 이용한 공기청정 모듈 평가시험

있는 사이클론 방식의 원심분리장치와 실내 롤필터 기술을 이용하여 객실공기질 향상연구를 수행하였다. 도시철도 터널 및 차량의 공기질 개선기술 개발 연구단(한국철도기술연구원)에서는 지하철 객실 내 미세먼지 저감을 위해 검토된 다양한 저감방식 중 유지보수주

기를 증대시킬 수 있는 이중(double-layer) 롤필터 기술이 채택되었으며(김세영 등, 2009), 필터 재질로는 정전부직포 필터에 대한 평가가 진행중에 있다. 객실 공간 구조상 공기청정 모듈의 크기에 제약조건이 많기 때문에, CO₂ 등의 유해가스를 저감하는 흡착제를 롤필터와 연계하여 사용되는 방안이 추진중에 있다. 개발된 시제품은 시험차량 평가 및 운행차량 적용평가를 통해 2012년부터 상용화 될 수 있을 것으로 기대된다.

(2) 수치해석을 활용한 지하철 객실 공기질 평가모델

지하철 객실 내 유동패턴 및 오염물질의 확산 경로 예측은 객실 공기질 개선기술 개발에 필수적인 요소이다. 이를 위해, 객실 내 공기흐름을 공조설비와 승객 영향에 대해 수치해석적 기법을 활용하여 평가하고, 개발되는 공기청정 모듈의 사전평가에 활용할 수 있다. 개발된 수치해석 모델을 활용하여

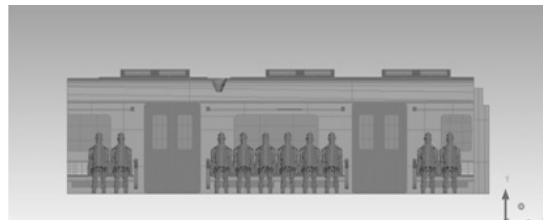
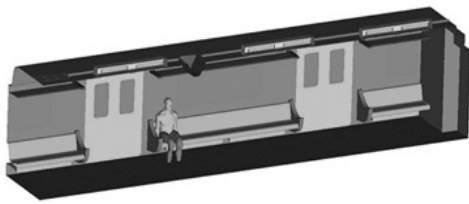


그림 12. 지하철 객실 공기질 평가용 수치모델

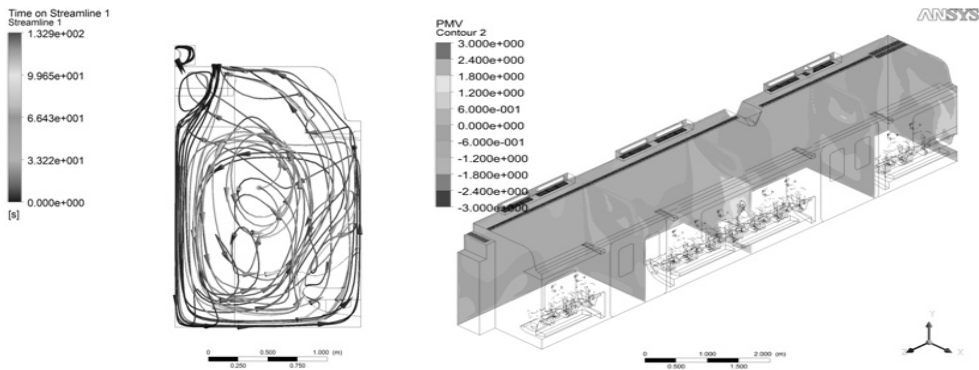


그림 13. 객실 내 공기흐름 분포 및 승객의 온열쾌적성 평가

냉방장치 가동시 객실 온열환경평가(PMV분석), 유동장 패턴 분석을 수행하였으며, 승객의 호흡에 따른 CO₂농도 증가현상 및 미세먼지 확산현상을 해석하였다(권순박 등, 2010a).

미세먼지 오염원의 위치에 따라 객실 내 분포양상은 달라지게 되는데, 에어컨 외기 유입부를 통해 유입되거나, 승객의 영향으로 발생하거나 혹은 출입문 개방을 통해 유입되는 미세먼지의 입자거동 특성은 그림 14와 같다.

냉방장치 가동시 신선공기의 유입으로 인해 미세먼지가 포함되어 있는 터널공기가 객실로 유입될 경우 (a)와 같이 천정부 냉기토출부를 따라 객실 전체에 유사한 영향을 줄 수 있으며, 착석한 승객에 의해 발생하는 경우와 출입문 개방에 의해 유입되는 경우에는 객실 환기에 의해 국부적 상승이 예상된다.

(3) 객실 내 감염성 질환 예방기술

홍콩지하철의 공기질 개선을 위한 노력은 고온다습한 기후로 인해 세균, 박테리아, 바이러스(SARS, 조류독감 등) 및 악취제거에 집중되고 있다. 세균 및 바이러스에 의한 감염예방을 위해 객실 손잡이의 광촉매 코팅과 승강장에 이온발생장치(ionizer)를 설치하여 운영하고 있다(권순박 등, 2008). 광촉매 코팅은 가장 널리 사용되는 TiO₂ 재질을 스프레이나 페인트 방식으로 표면에 도포하여 적절한 빛의 과장에서 가스상 오염물질을 분해하는 방식이다.

한국철도기술연구원에서는 밀집된 객실 내에서 감기, 신종플루 등의 감염성 질환자의 재채기나 대화 등을 통해 토출되는 부유미생물에 대한 특성 파악 연구를 수행하고 있다(권순박 등, 2010b). 토출

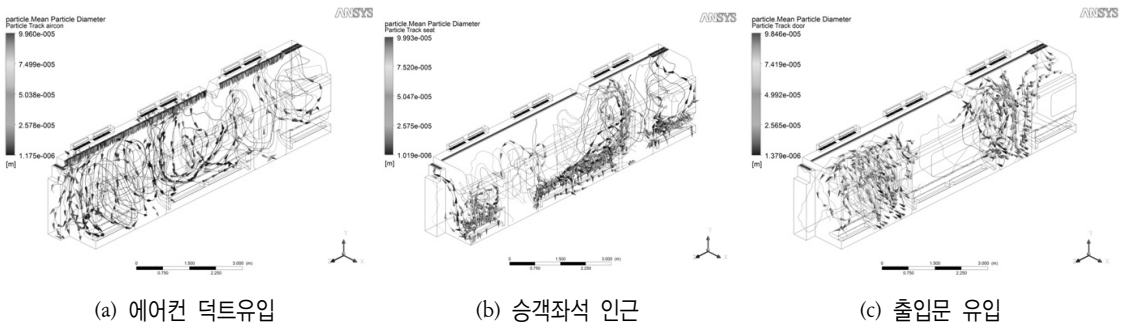


그림 14. 미세먼지 유입위치에 따른 객실 확산 특성



그림 15. 홍콩지하철 객실 내 손잡이 등의 코팅작업 및 완료 모습

비말의 속도 및 크기분포 측정 및 감염전파 가능성에 대한 수학적 모델 개발을 통해 지하철 및 KTX 등 대중교통수단을 통한 공기감염 전파가능성에 대한 기초적인 데이터를 제공함으로써, 공기감염 예방기술 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

2008년 추계 및 동계기간과 2009년 춘계 기간에 측정된 수도권 지하철 1~8호선 및 분당선 객실 내 노선 평균 미세먼지와 CO₂ 농도는 환경부에서 제시한 권고기준 이하인 것으로 조사되었으나, 일반 실내 공간에 적용되는 기준치에 비해서는 다소 높은 것으로 나타났다. 또한, 노선 평균값이 아닌 정차역 별로 구분하였을때는 객실내 승객 혼잡도가 높은 구간에서 오염물질의 농도가 급격히 증가하는 것으로 조사되었다.

지하철 객실 내 공기질은 승객수와 더불어 외기 조건에도 영향을 받는데, 지하구간을 운행할 경우 지상구간 운행시 보다 미세먼지는 약 1.5배, CO₂는 약 1.3배 가량 증가하는 것으로 나타났다. 지하철 객실 내 공기정화 기술은 미세먼지와 CO₂ 저감이 가능한 복합형 모듈기술 개발로 진행되고 있으며, 유지보수성이 용이한 제품으로 개발될 경우에 한해 상용화가 가능할 것으로 판단된다.

그밖에, 객실 공기질에 대한 수치해석 모델 개발과 최근 이슈화되고 있는 부유미생물의 전파경로에 대한 예측기술 개발 연구가 진행되고 있다.

지하철 공기질에 대한 사회적 관심이 증대되고 있고, 지하철 운영처의 공기질 개선을 위한 유지관리 및 새로운 설비구축이 진행되고 있으며, 공기질 실태조사 및 오염원 규명을 위한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 그러나 승객의 주요 체류공간인 지하철 객실 공기에 대한 복합적인 평가연구, 공기질 개선을 위한 상용화기술 개발, 인체노출 위해성 평가 등 많은 부분에 있어서는 보다 적극적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

- 참고문헌 -

1. Aliaga, C., and Winqvist, K., 2003, "Comment les femmes et les hommes utilisent leurs temps- Resultats de 13 pay europeens", *Eurostat*, KS-NK-03-012-FR-N.
2. Park, E.Y. *et al*, 2010, "Air quality levels of passenger cabins in Seoul Metropolitan Subway", *Air & Waste Management Association Specialty Conference*.
3. 권순박 등, 2009a, "도시철도 객실 배기구에 의한 실내공기질 영향분석", 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집.
4. 권순박 등, 2009b, "오전 출근시간대 2호선 전동차 객실 미세먼지 농도 경향 분석", 한국입자 에어로졸학회 학술대회논문집.
5. 권순박 등, 2010b, "재채기에 의한 실내 공기감염 특성 연구-속도분포 측정", 한국대기환경학회 춘계학술대회논문집.
6. 권순박 등, 2008, "홍콩지하철의 실내공기질 개선사례 연구", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집.
7. 권순박 등, 2010a, "전산수치해석 모델을 활용한 지하철 객실공기질 예측기술", 한국대기환경학회 춘계학술대회.
8. 김세영 등, 2009, "철도차량용 미세먼지 분리장치 필터의 2중 간격에 따른 입자포집효율", 한국철도학회 추계학술대회논문집.
9. 박덕신 등, 2010, "대중교통수단에서 PM10, PM2.5 및 CO₂의 농도 현황과 저감기술에 관한 연구", 한국입자 에어로졸학회, 6권 1호, pp. 9-20.
10. 서울시통계연보, 2008, "지하철 수송"
11. 한국철도기술연구원, 2010, "도시철도 터널 및 차량의 공기질 개선기술 개발 연구 1차년도 보고서".
12. 환경부, 2001, "노출계수핸드북".
13. 환경부, 2008, "대중교통수단 실내공기질 실태조사 (열차, 지하철)".
14. 환경부, 2009, "대중교통수단 실내공기질 실태조사 및 효율적 관리방안 연구".