

# 도시철도 객실 공기질 평가모델 개발

## Development of Air Quality Assessment Model for Subway Cabin

권순박† 조영민\* 박덕신\*\* 김세영\*\*\* 박재형\*\*\*\*  
Kwon Soon-Bark, Cho Youngmin, Park Duck-Shin, Kim Se-Young, Park Jaehyung,  
조관현\*\*\*\*\* 유건중\*\*\*\*\* 김정수\*\*\*\*\*  
Cho Goan-Hyun, Yoo Gun-Jong, Kim Jung-Su

### ABSTRACT

Management of indoor air quality of underground subway station is an important issue since the limited natural ventilation, limited sunshine incoming, and highly moistured atmosphere. The improvement in IAQ of platform is expected because most stations were installed with platform screen door currently, however, the poor air quality in tunnel might be affecting subway cabin indoor. In this study, we developed the air quality assessment model based on computational fluid dynamics. The geometry of air ventilation unit, seat, LCD monitors, and passengers were modeled using commercial software (Design Modeler) and fluid pattern and pollutants trajectories were analyzed by using CFX. We predicted the thermal comfort by predicted mean vote (PMV), distribution of CO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub> concentration. It is expected that this model can be used for the performance test of air cleaners which are under development.

### 1. 서론

2009년 현재 수도권 도시철도 차량은 모두 3662량(서울메트로 2104량, 도시철도공사 1558량)으로 하루평균 721만명(서울시통계연보, 2008)의 승객을 수송하고 있는 수도권의 주요한 대중교통수단이다. 최근 수도권 도시철도 지하역사 승강장에 설치완료된 승강장스크린도어(platform screen door)로 인해, 승강장과 대합실의 공기질 개선효과가 나타나고 있으나, 상대적으로 터널내 오염은 악화될 것으로 예상되어 터널구간을 주로 운행하는 지하철 객실 공기질 악화문제가 제기 되고 있다. 이에 본 연구에서는 지하철 객실 공기질을 예측할 수 있는 해석모델을 개발하고, 향후 객실용 공기정화장치 등이 개발될 경우 공기정화효과를 사전에 예측하고자 한다. 또한, 개발된 모델을 이용하여 외부 오염물질의 유입방식에 따른 객실내 분포특성을 예측하고, 승객의 호흡과 재채기 등 인체활동에 의해 발생하는 오염물질의 유동특성을 예측하는데 활용하고자 한다.

### 2. 연구 방법

수도권에서 현재 운행중인 지하철차량 중 최근 제작되었으며, 앞으로 지속적으로 투입되어 운영될 차량(서울메트로 2호선 신조차량)을 대상모델로 선정하였다. 대상차량의 내외부 도면과 환기설비 배치자료를 활용하여 Design Modeler(ANSYS사)를 이용하여 3차원 모델링하였다. 객실구조의 대칭성과 계산시간 단축을 위하여 객실공간의 1/4을 고려하였다(그림 1).

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원 도시철도공기질개선 연구단, 선임연구원  
E-mail : sbkwon@krti.re.kr  
TEL : (031)460-5375 FAX : (031)460-5279

\* 정희원, 한국철도기술연구원 도시철도공기질개선 연구단, 선임연구원  
\*\* 정희원, 한국철도기술연구원 도시철도공기질개선 연구단, 책임연구원  
\*\*\* 비회원, 성균관대학교 기계공학과 석사과정  
\*\*\*\* 비회원, 한국철도기술연구원 도시철도공기질개선 연구단, 연구원  
\*\*\*\*\* 비회원, 서울메트로 기술연구소, 차장  
\*\*\*\*\* 비회원, 서울메트로 기술연구소, 대리  
\*\*\*\*\* 비회원, 서울메트로 기술연구소, 선임

객실내 공기흐름은 객실전체 천정부에 설치되어 있는 슬릿(slit)을 통해 냉방공기가 균등하게 분배되며, 중앙부에 설치되어 있는 선형팬(line flow fan)의 작동에 따라 객실공기의 유동패턴이 달라지게 된다(권순박 등, 2009).

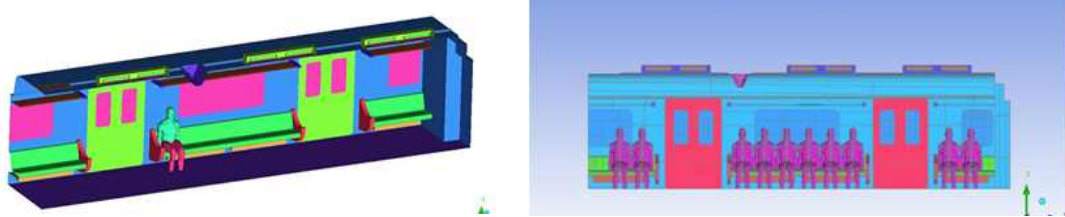


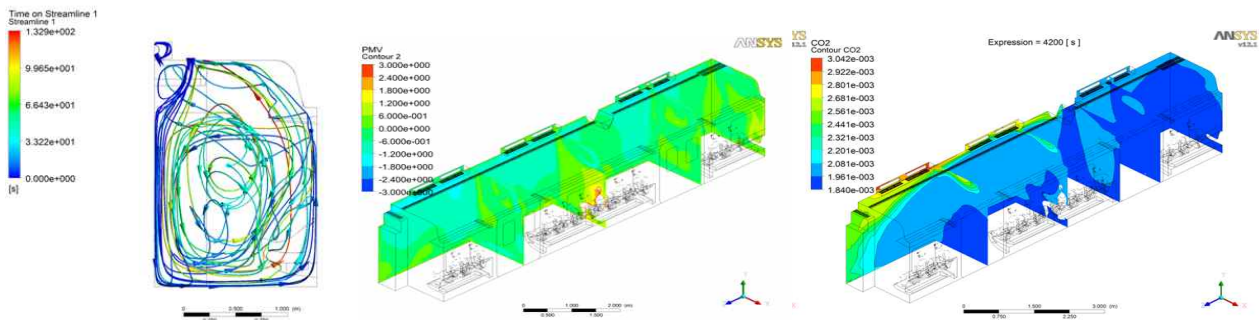
Fig. 1. Subway-cabin quarter model

객실내 공기의 유동현상을 해석하기 위하여 상용 수치해석 프로그램인 CFX(ANSYS사)를 활용하였다. 객실내 승객의 예상온열냉감(predicted mean vote; PMV) 계산을 위해 Fortran 코드를 추가로 입력하였으며, 미세먼지 농도예측을 위해 입자추적기법(Lagrangian particle tracking)을 적용하였다. 개발된 모델의 검증을 위해 냉방장치 가동시 객실내 온도분포 예측과 승객의 예상온열냉감을 평가하였으며, 승객에 의해 발생하는 이산화탄소 농도분포, 외부에서 유입되는 미세먼지의 농도분포 특성을 해석하였다. 또한, 개발중인 이산화탄소 저감장치의 공차내 성능평가시험 결과와 수치해석적 결과를 비교하였다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 객실 공기질 예측결과

개발된 수치해석 모델을 활용하여 냉방장치 가동시 객실 온열환경평가(PMV분석), 유동장 패턴 분석을 수행하였으며, 승객의 호흡에 따른 CO2농도 증가현상을 해석하였다(그림 2). 객실의 단면을 기준으로 천정부에서 토출되는 공기와 선형팬의 가동에 따라 전체적으로 객실 중앙부에서 수직하강하여 창문 방향으로 회전하고 다시 천정부로 유입되는 형상으로 나타났으며, 이에 따라 착석한 승객의 머리 윗 부분 영역에서 다소 더위를 느낄 수 있는 것으로 분석되었다. CO2농도의 경우 승객수 증가에 따라 빠른 속도로 객실전체 CO2농도 증가에 영향을 주었다.



(a) Stream line

(b) PMV distribution

(c) CO2 distribution

Fig. 2. Prediction of flow pattern, PMV and CO2 concentrations

객실 내부의 미세먼지 이동경로를 예측하기 위하여 입자추적기법(lagrangian particle tracking)과 additional variable을 이용하여 입자의 거동과 분포 특성분석을 수행하였다. 입자추적기법은 입자의 양이 전체유동에 영향을 주지 않을 정도로 작다는 가정하에 one-way coupling 방식으로 해석하였다. 그림3은 천정부 냉기토출부(slit)를 통해 미세먼지가 유입되거나, 승객의 영향으로 발생하거나 혹은 출입문 개방을 통해 발생하는 미세먼지의 입자거동특성을 나타내고 있다. 냉방장치 가동시 신선공기의 유입으

로 인해 미세먼지가 포함되어 있는 터널공기가 객실로 유입될 경우 그림3(a)와 같이 천정부 냉기토출부를 따라 객실 전체에 유사한 영향을 줄 수 있으며, 착석한 승객에 의해 발생하는 경우와 출입문 개방에 의해 유입되는 경우에는 객실환기에 의해 국부적 상승이 예상된다.

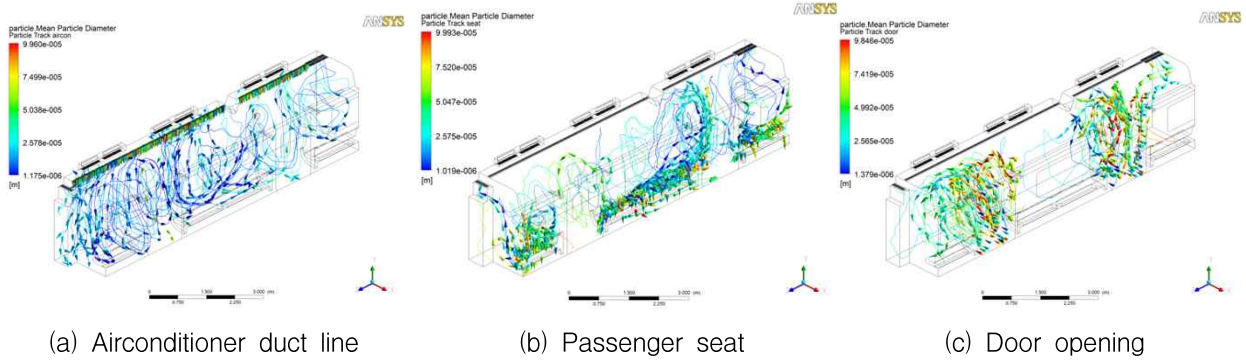


Fig. 3. Particle pathline in the cabin by the source position

### 3.2 객실 온열환경 예측결과

객실 온열환경 평가를 위해 객실내에 인체형상 모델을 개발하였다. 인체에서 배출되는 오염물질(이산화탄소)을 모사하고, 객실내 유동장 흐름의 변화를 예측할 수 있으며, 승객의 온열쾌적성을 시뮬레이션 할 수 있는 모델로 개발되었다. 그림 4에 앉아 있는 승객의 인체모형을 제시하였다.

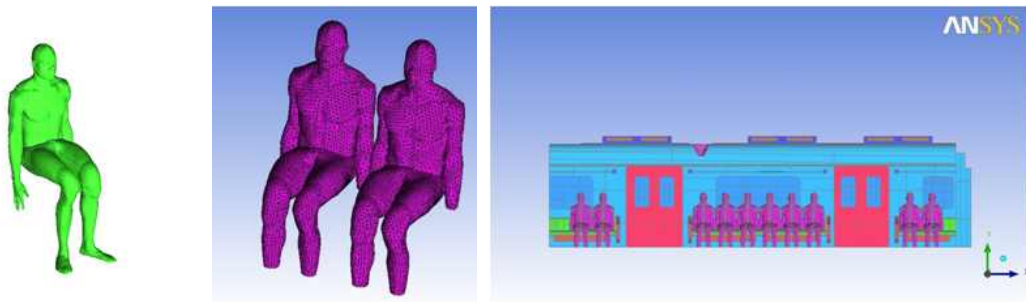


Fig. 4. Passenger model in the subway cabin

예상온열냉감(PMV)와 예상불만족률(PPD)해석을 위해 Fortran 코딩 및 추가적 변수를 입력하였으며, 복사해석을 수행하였다. 그림 5는 객실 내부의 PMV, PPD 해석결과이다 오른쪽의 PMV를 보면 37도의 온도를 설정한 인체모형주위에서 PMV의 수치가 높아 승객들이 덥게 느낀다는 점을 확인할 수 있다. 또한 에어컨의 바람이 바로 내려오는 중앙부분은 PMV의 수치가 낮아 승객들이 서늘하게 느끼는 것을 알 수 있다. 오른쪽의 PPD 결과를 보면 탑승한 승객이 많지 않아 대부분의 객실 공간에서 만족도가 좋으나, 인체모형 주위의 더운 공간과 에어컨 주위의 서늘한 공간에서 불만족도가 높은 것을 알 수 있다. 이와 같이 PMV, PPD를 평가함으로써 객실 내부의 승객만족도 여부를 유동해석을 통하여 평가할 수 있다.

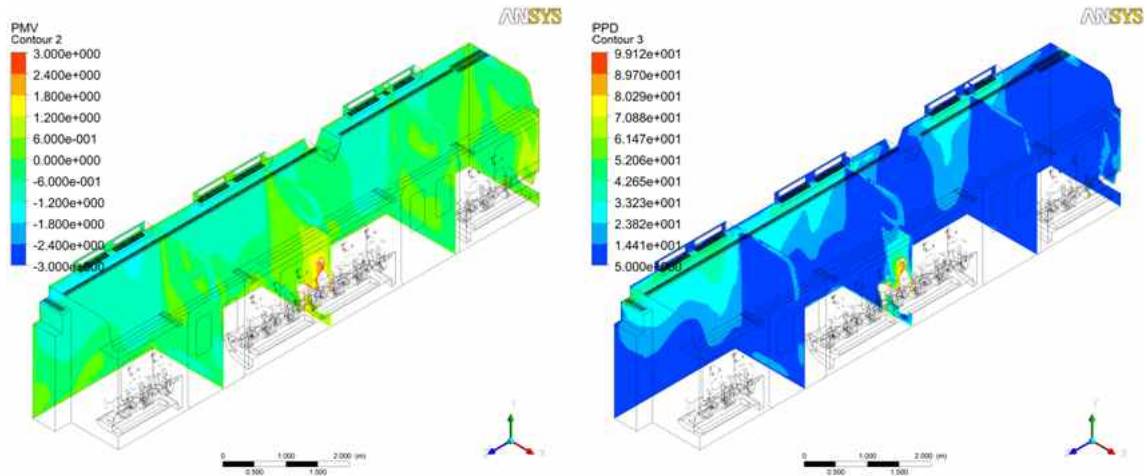


Fig. 5. PMV and PPD distribution including passenger effect

#### 4. 결 론

도시철도 차량의 내부형상과 승객을 모델링하여 객실 공기질 예측을 할 수 있는 수치모델을 개발하였다. 개발된 모델을 활용하여, 현재의 도시철도 차량 공기질 특성 분석은 물론 향후 개발되는 공기청정장치에 대한 사전 성능평가를 수행할 계획이다. 현재, 공기질 예측모델을 통해 얻어진 데이터와 측정치와의 비교분석을 통한 검증연구가 진행되고 있다. 향후, 재채기와 같은 인체활동에 의해 토출되는 감염성 오염물질의 이동경로의 객실내 분포 예측에도 활용하고자 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래도시철도기술개발사업(도시철도 터널 및 차량의 공기질 개선기술개발 연구단)의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

권순박, 김세영, 박덕신, 조영민, 배광호, 유건중, 김정수 (2009) 도시철도 객실 배기구에 의한 실내공기질 영향분석, 한국대기환경학회 추계학술대회  
 서울시통계연보 (2008) 지하철수송