

철도 전동차내의 실내공기질 평가

- 온도 및 습도를 중심으로 -

Evaluation of Indoor Air Quality in the Railroad Electric Rolling Stock

- Focused on Temperature and Humidity -

박덕신¹⁾, 배상호²⁾, 정우성³⁾

Duck-Shin Park, Sang-Ho Bae, Woo-Sung Jung

ABSTRACT

Electric rolling stock is one of major public transportation because of an increase in population and heavy traffic problems. The passengers under the influenced of indoor air quality such as air temperature, relative humidity and air velocity. Ventilation system on passenger cars should be designed for the health and comfort of the passengers. One of the main aim is to create an acceptable thermal environment without draught problems. The draught sensation increases when the air temperature decreases and the air velocity increases. Airflow in passenger cars is turbulent. Lateral temperature and humidity gradients in the electric rolling stock have been studied. And, the difference in the mean temperature and relative humidity measured at 0.7, 0.9, 1.2, 1.7 m above from the floor.

1. 서 론

도심지역의 인구집중 및 교통량 증가로 환경오염이 가중되면서 실내환경에 대한 관심이 본격적으로 대두되기 시작했다. 하루 시간의 85% 이상을 실내공간에서 생활하는 현대인에게 쾌적한 실내 환경에 대한 요구가 절실하다. 실내 환경조건은 온도, 상대습도, 공기유동, 환기, 빛, 소음, 진동 등 다양한 물리인자들의 결과이다. 물리적인 환경은 인간의 편안함에 심각한 영향을 미치며, 다양한 환경시스템에 의해 기계적으로 조절된다. 환경시스템은 HVAC (heating, ventilation and air conditioning)를 제공하며 인간의 쾌적함을 위해 적절한 환경시스템의 작동은 일의 효율성을 증대시키고, 건강한 삶을 유지하는데 매우 중요하다.

밀폐된 좁은 공간에 다수의 승객이 체류하는 전동차의 경우 공조 상태를 쾌적하게 유지하는 데에는 많은 어려움이 있다. 전동차의 경우 승객의 안전을 위해 객실 창문의 개폐가 불가능하며 객실은 전체가 밀폐되어 자연환기가 아닌 기계환기로 공기질을 조절해야 하며, 조명에서 발생하는 대량의 열을 한정된 공간에 설치된 공조설비로 처리해야 한다.

1) 한국철도기술연구원, 선임연구원

2) 한국철도기술연구원, 연구원

3) 한국철도기술연구원, 책임연구원

본 연구에서는 전동차에서 실내공기질을 평가하기 위한 기초연구로서 비교적 정량화가 쉬운 온도와 습도를 대상으로 전동차 내에서 승객의 위치를 기준으로 0.7, 0.9, 1.2, 1.7 m의 높이에서 온도와 습도의 분포를 측정하고, 상용 코드인 Fluent를 이용한 3D 유동해석을 통해 전동차 내에서의 온도 분포에 편차가 생기는 원인을 규명하고, 환기시스템의 문제점을 파악하고자 하였다.

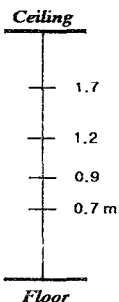
2. 연구방법

2.1 측정대상

ANSI/ASHRAE 55-1992에서는 온열환경 수직 측정위치를 지표면에서 0.1, 0.6, 1.1, 1.7 m 높이로 할 것을 추천하고 있으며, 여기서 0.1 m는 발목, 0.6 m는 착석시 인체의 중심, 1.1 m는 착석시 인체의 머리, 1.7 m는 서있을 때의 머리 높이에 해당된다. 본 연구에서는 철도청 소속 4호선 전동차에 승객이 탑승했을 때의 높이를 실측하여 ANSI/ASHRAE 55-1992의 추천 높이를 약간 변경하고, 전동차의 구조상 측정이 어려운 0.1 m 높이를 제외한 지점에서 온도와 습도를 측정했다. 수직 온도 및 습도 분포 측정지점은 그림 1과 같이 0.7, 0.9, 1.2, 1.7 m로서 0.7 m는 착석시 인체의 무릎, 0.9 m는 착석시 인체의 중심, 1.2 m는 착석시 인체의 머리, 1.7 m는 서있을 때의 머리 높이에 해당되는 높이이다. 그림 2에 전동차 내에서의 수평 온도 및 습도 분포의 측정위치를 나타내었다. 전동차의 제원은 내부를 기준으로 길이가 18.9 m이고, 폭이 2.9 m로서 수평 온도 및 습도 측정지점은 세로축의 경우 전동차의 진행방향을 기준으로 6등분으로 나누어 0.48 m의 간격으로 5지점으로 하였다. 가로축은 1.1 m 간격으로 나누어 6지점으로 하여 총 80지점을 선정하여 측정하였다.

2.2 측정장치 및 방법

창문이 있는 실내공간은 복사열에 의해 온도분포에 많은 영향을 받으므로 전동차 내부의 온도와 습도의 측정은 햇볕이 차단된 차고에서 수행하였다. 전동차 내부의 온도분포를 고르게 하기 위해 측정 시작 30분전 환기시스템을 정상 운영 상태로 가동하였다. 전동차내의 온도분포는 Datalogger (UCAM-20PC, Kyowa Co.)를 이용하여 Thermocouple 16개를 전동차의 가로 방향으로 설치하여 설치위치를 계속 이동하면서 한 지점에서 최소 5분간 측정하여 측정값을 평균하였다. 전동차내의 습도분포는 전기 커패시터 방식의 센서를 이용하여 온도분포 측정위치와 동일한 위치에서 측정하였다.



a) 수직 측정위치

b) 전동차 내부 전경

그림 1. 전동차내 수직 온도/습도 분포 측정위치 및 내부전경

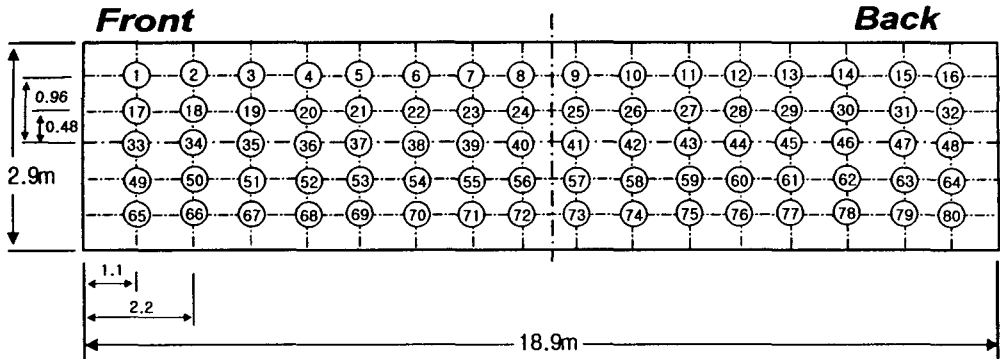


그림 2. 전동차내 수평 온도 및 습도 분포 측정위치 (m)

3. 유동해석 및 결과

3.1 경계조건 및 공조

전동차 내부의 유동해석에는 상용 열유체 해석 프로그램인 Fluent Ver 6.0을, 격자의 구성에는 Gambit Ver. 2.0을 사용했다. 유동해석에 적용한 난류 모델로는 표준 k- ϵ 모델을, 벽면근처의 처리에는 standard wall function을 사용했다. 운동량 계산에는 Quick 기법을, 압력-속도 연성에는 SIMPLEC, 난류에너지 (turbulence kinetic energy), 소산율 (turbulence dissipation rate)의 계산에는 2차 상향차분법을 사용하였다. 완화계수 (under relaxation factor)는 압력의 경우 0.3, 운동량은 0.7, 난류에너지 및 소산율은 0.8로 정하여 계산을 수행하였다. 연속방정식 X, Y, Z 방향 속도, 난류에너지 및 소산율의 수렴판정조건은 10^{-3} 이며, 에너지 방정식은 10^{-6} 을 수렴조건으로 하였다.

전동차의 용적은 133 m^3 이고, CO₂ 필요 환기량은 승객 160명을 기준으로 28.9 m^3/min 이고, 환기량은 31.6 m^3/min 으로 설정되어 있다. 전동차 공조의 특징은 공기 유입구가 좌우 대칭으로 2열로 구성되어 있다. 그리고, 두 곳의 리턴그릴이 있으며, 이곳을 통해 유입된 공기가 전부 배출된다. 배출공기의 70 %는 재순환되고, 30 %는 외기로 배기된다. 유입공기의 유속은 0.51 m/sec이며, 전동차 내부의 유속은 평균 약 0.2 m/sec로 계산되었다.

3.2 유동해석 결과

표 1에 전동차 해석 경계조건을 나타내었다. 천장에 위치한 유입구에는 Velocity Inlet 조건을 주고, 유속은 0.51 m/sec, 온도는 10 $^{\circ}C$, 난류강도는 10 %로 하였다. 리턴그릴은 Out-flow로 외부 압력 (대기압) 조건을 주었으며, 전체 유량이 배출되게 하였다. 전동차 벽면은 Wall로 처리하고, 단열조건을 주었으며, 온도는 25 $^{\circ}C$ 로 설정하였다.

유동해석 결과 전동차 중앙 통로 쪽으로 향하는 슬롯에 의해 유입된 공기는 중앙 통로로 하강하여 바닥을 거쳐 창문과 측면을 따라 상승하다가 천장의 리턴그릴로 순환되는 흐름을 보였다. 또 다른 슬롯에 의해 유입된 공기는 선반 쪽으로 향한 후 창문을 타고 내려오다가 중앙으로의 순환을 보였다. 그림 4에 전동차 측면에서의 속도분포를 나타내었다. 그림 3의 전동차 계산모델에서 return grill이 위치한 곳의 속도분포가 지배적인 것을 알 수 있었다.

표 1. 전동차 전산유체해석 경계조건

Boundary Conditions	Position	Values
Velocity Inlet	Ceiling	- Velocity : 0.51 m/sec - Temperature : 10 °C - Turbulence intensity : 10 %
Out-flow (Return grill)	Ceiling	- Out pressure (atmospheric pressure) - 100 % of flow
Wall	Train body	- Adiabatic condition - Temperature : 25 °C

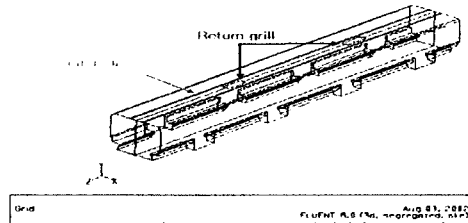


그림 3. 전산유체해석에 사용된 전동차 계산모델

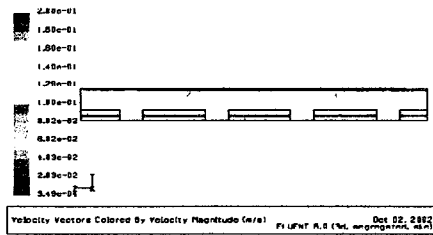


그림 4. 전동차 측면에서의 속도분포

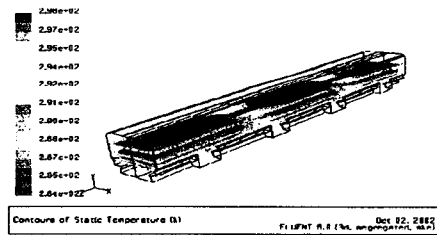


그림 5. 전동차 높이별 측정위치에서의 온도분포

그림 5에 전동차 수직 온도분포 측정위치별 (지표면에서 0.7, 0.9, 1.2, 1.7 m) 온도분포를 제시하였다. 그림에서 온도분포가 뚜렷하게 구분되는 것을 볼 수 있다. 이것은 return grill에 의해 형성된 속도분포에 의해 다른 곳보다 다소 높은 공기가 배기 되면서 나타난 형상으로 보여지며, 온도분포도는 지표면에서 상층으로 올라갈수록 기온차이가 더 심해지는 것으로 나타났다.

4. 측정결과 및 고찰

4.1 온도분포

그림 6에 전동차 바닥 면에서 측정위치별 온도분포를 2D로 도식화하였다. 그림 6 b)는 0.9 m 높이에서의 온도분포 측정결과로서 그림 6 a)와는 다소 다른 분포 특성을 보이는 것으로 나타났다. 그림 6의 온도분포 측정결과를 유동해석 결과인 그림 5와 비교해보면 온도분포 특성에 약간의 차이가 있는 것을 알 수 있다. 그림 6에서 최대 온도가 나타난 지점은 전동차 천장에 return grill이 위치한 곳인 가로축 6과 7 사이이지만 전동차의 측면에서 볼 때 또 다른 return grill이 위치한 대칭지점인 가로축 11과 12 사이에 고온의 온도분포가 형성되지 않았다. 이것은 측정 대상 전동차의 환기용량의 불균형 때문으로 판단된다.

4.2 습도분포

그림 7은 각 높이별 습도 분포를 2D로 도식화하여 나타낸 것이다. 측정결과 착석시 인체의 머리 지점인 1.2 m 높이에서 비교적 높은 값을 나타내었다. 최대 습도를 나타낸 지점은 전동차 천장에 return grill이 위치한 곳인 가로축 6에서 8 사이이지만 전동차의 측면에서 볼 때 또 다른 return grill이 위치한 대칭지점인 가로축 11과 12 사이에 높은 습도분포가 형성되지 않았다. 이는 온도분포와 유사한 형태로 전동차의 환기용량의 불균형 때문으로 사료되며, 향후 보다 많은 측정과 면밀한 분석이 요구된다.

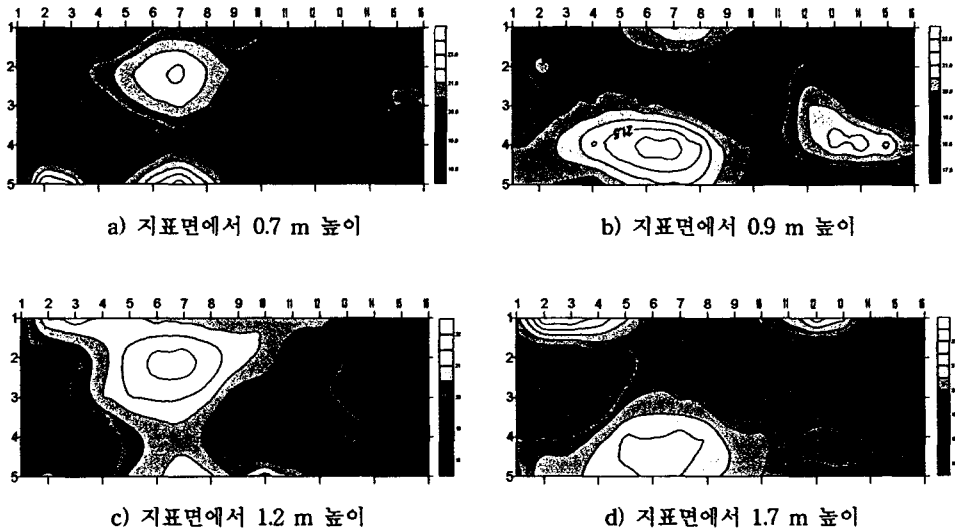


그림 6. 전동차내 수직 측정 위치에서의 2D 온도분포

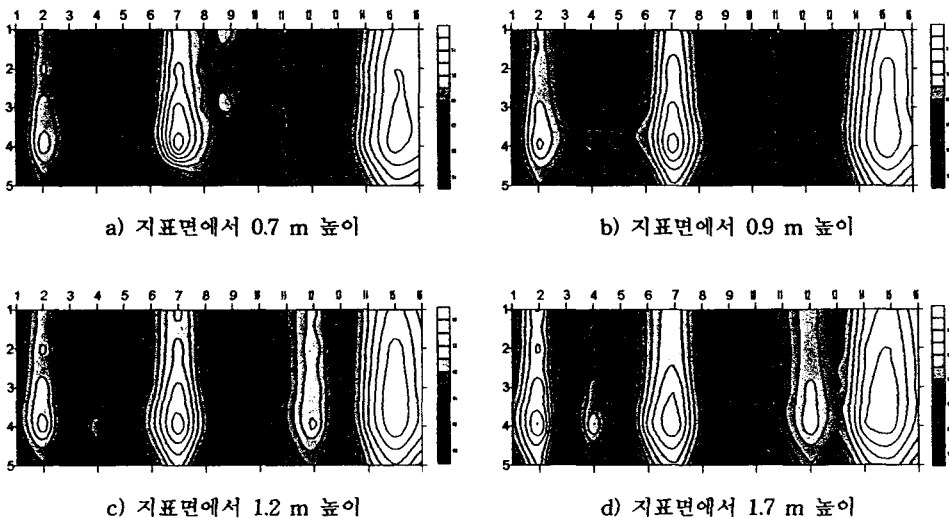


그림 7. 전동차내 수직 측정 위치에서의 2D 습도분포

5. 결론

전동차 내에서 비교적 정량화가 용이한 온도와 습도를 대상으로 실내공기질을 평가하기 위한 기초연구를 수행하였다. 전동차 내부의 유동은 강제환기에 의존하므로 3D 전산유체해석 프로그램으로 전동차 내부의 환기특성과 유동을 파악하였다. 해석결과 전동차 내부의 유동은 천정의 return grill에 의해 지배되며, return grill에 의해 형성된 속도분포로 다른 곳보다 다소 높은 공기가 배기 되면서 전동차 내부의 온도분포에 불균형이 발생하는 것으로 나타났다. 온도분포는 지표면에서 상층으로 올라갈수록 온도의 차이가 더 심해지는 것으로 나타났다.

탑승 승객의 위치를 기준으로 0.7, 0.9, 1.2, 1.7 m의 높이에서 온도분포 측정결과를 유동해석 결과와 비교해보면 온도분포 특성에 약간의 차이가 있는 것을 알 수 있다. 이것은 측정 대상 전동차로 유입되는 공기의 분포가 불균일하기 때문으로 판단된다. 습도분포 역시 온도분포와 유사하게 전동차 내에 장착된 공조시스템의 설치위치와 덕트 형상 등 여러 요인에 의해 불균형이 나타나는 것으로 사료되어 진다.

본 연구는 전동차 내부의 실내공기질을 평가하기 위한 기초연구로서 추후 온도와 습도 이외에 기류속도와 인간과 주위의 6가지 열환경 요소를 이용한 온열감 평가지표인 예상 온열감(PMV, predicted mean vote) 등을 구하여 전동차 제작시 전동차 내부의 온도와 습도분포를 보다 균일하게 하는데 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

참고문헌

- [1] 김윤신 (1999) 실내공기질 연구의 현황과 전망, 한국대기 환경학회지 15(4), 371-383.
- [2] 송희봉, 민경섭, 한계희, 김종우, 백성욱 (1995) 대구지역 공중이용시설의 실내·외 공기중 기준성 오염물질의 농도, 대한환경공학회, 추계학술연구발표회 논문초록집.
- [3] 최익순, 정광섭, 박영철, 한화택, 이정재 (2001) PMV 지표에 의한 개별 공조시스템(PACS)의 쾌적성 평가에 관한 연구, 설비공학 논문집 13(7), 647-652.
- [4] 최익순, 정광섭, 박영철, 한화택, 이정재 (2001) 개별공조시스템(PACS)을 적용한 작업공간에서의 온열환경 특성 및 쾌적성 평가, 설비공학논문집 13(2), 106-114.
- [5] Melikov, A.K., U. Kruger, G. Zhou, T. L. Madsen and G. Langkilde (1997) Air Temperature Fluctuations in Rooms, *Building and Environment*, 32(2), 101-114.
- [6] 이철희, 배귀남, 최항철, 이춘식 (1994) 여름철 사무실내 온열환경 특성 및 쾌적성 평가, 공기조화·냉동공학 논문집 6(9), 206-217.
- [7] 조용, 권혁승, 김성현, 김영일 (2000) 사무실 공간의 냉방시 천장 및 바닥 급기 공조 방식에 따른 열환경 평가 실험, 설비공학 논문집 12(9), 810-816.
- [8] Hiroyuki, T., M. Ishizaki, Y. Hirota, J. Hiram and K. Nagase (1998) A Study on Evaluation of Comfortableness in Passenger Room of Trains, *J-Rail '98*, 393-396.
- [9] 한국철도기술연구원 (2002) 실내 쾌적성 향상 기술 개발, 철도청.
- [10] 한국철도기술연구원 (2002) 객실 실내 공기질 향상 방안에 관한 연구, 철도청.
- [11] 한국과학기술연구원 (1994) 실내환경 쾌적성 평가방법에 관한 연구(Ⅱ)-온열 및 공기질에 대하여, 과학기술처.