

CFD를 이용한 지능형 객차 공기조화시스템 설계

A Design of Intellectual Air-conditioning System using by CFD

배상호* 박덕신** 양우봉*** 박태영****
Sang-Ho Bae Duck-Shin Park David Yang Tae-young Park

ABSTRACT

Railroad car is one of major public transportation because of an increase in population and heavy traffic problems. We design the concept with air filtration of HVAC system using CFD, select environment-friendly components and compose intellectual HVAC system. For this object, the research to connect HVAC system which control temperature, humidity, air flow with pollutant controlling system which can deal with particular dust, nasty smell. In case of train, fresh air should be provided continuously for pleasant environment of the cabin every season. The air will control outer dust, inner particular dust, CO₂ density by air conditioning, heating, humidity regulating, air filtering and ventilating. Ventilation system on passenger cars should be designed for the health and comfort of the passengers.

1. 서 론

현대는 삶에 대한 질적 향상이 이루어지면서 실내 공기질에 대한 중요성과 관련 기준이 점차 강화되고 있다. 이에 실내 공기조화시스템은 단지 실내공간의 재실자가 쾌적하게 느낄 수 있는 온도, 습도 등 열환경 변수에 대한 제어뿐만 아니라, 대기질의 관점에서 청정한 공기를 공급하는 지능형 환경 제어 시스템으로 변모되어야 한다. 철도차량의 경우 쾌적한 실내 환경을 위해서는 외부로부터 신선공기의 연속적인 공급이 필요하다. 신선공기를 실내에 공급하려면 외부 공기는 그 상태에 따라서 냉방, 난방, 습도조절, 공기정화, 환기를 통한 외부 먼지 및 실내에서 발생하는 분진, 재실자에 의한 CO₂의 농도를 제어해야만 한다. 공조된 공기는 공기오염 정화장치를 통과하면서 각종 오염물질인 VOCs, 악취, 미세먼지 등이 제거된 후 차량 실내로 급기 되어 쾌적한 실내 환경을 유지시켜 준다. 전체

* (주) 에이디에스레일, 사원
** 한국철도기술연구원, 선임연구원
*** (주) 에이디에스레일, 상무이사
**** (주) 에이디에스레일, 과장

시스템은 어떠한 조건에서도 실내 환경이 최적으로 유지되고 에너지 비용이 최소화되도록 제어 되어야만 한다. 이를 위하여 실내 오염도를 예측하고 피드백 제어를 수행하는 지능형 제어장치의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 CFD를 이용 객실에 대한 유동해석을 실시하여 유동에 따른 공기 질과 쾌적성의 영향을 살펴보고, 분석을 통해 실내차량 공기조화시스템의 공간배치 최적화 및 전반적인 기술적 접근을 통해 설계를 추진하고자 한다.

2. 연구방법

현재 운행 중인 철도차량의 객실에서 유동에 따른 공기 질과 쾌적성의 영향을 살펴보기 위하여 유동해석을 실시하였다. 유동해석에는 새마을호, 구형 무궁화호, 신형 구궁화호, 전동차를 대상으로 객실 내부의 유동을 살펴보았다. 객실 내부의 유동해석에는 상용 열유체 해석 프로그램인 Fluent Ver 6.0을, 격자의 구성에는 Gambit Ver. 2.0을 사용했다. 유동해석에 적용한 난류 모델로는 표준 k-ε모델을, 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. 표 1과 표2,3에 전산유체 해석 적용방법 및 해석 경계조건을 나타내었다.

표 1. 전산유체해석 적용방법 및 조건

항 목	적용방법 및 조건
Inlet Area	천장슬롯, 좌석하부, 창틀
Momentum equation skim	Quick
Turbulence energy scheme	Up-wind
Pressure-velocity coupling - Steady flow	Simplec
계산 수렴 판정조건	
- Movement equation	1×10 ⁻³
- Energy equation	1×10 ⁻⁶
- Continuity equation	1×10 ⁻³

표 2. 새마을호, 구형 무궁화호 객실 해석 경계조건

경계조건	위치	새마을호	구형 무궁화호
Velocity Inlet	천장	- 유속 : 0.51 m/sec - 난류강도 : 10%	- 유속 : 1.27 m/sec - 난류강도 : 10%
Out-flow 1 (Return grill)	천장	- 외부압력(대기압) - 전체 유량의 70%	- 외부압력(대기압) - 전체 유량의 70%
Out-flow 2 (Exhaust fan)	천장	- 외부압력(대기압) - 전체 유량의 30%	- 외부압력(대기압) - 전체 유량의 30%
Wall	차체	- 단열조건	- 단열조건

표 3. 신형 무궁화호 객실 해석 경계조건

경계조건	위치	구형 무궁화호
Velocity Inlet 1	창문 밑	- 유속 : 1.2 m/sec - 난류강도 : 10%
Velocity Inlet 1	좌석 하부	- 유속 : 2.7 m/sec - 난류강도 : 10%
Out-flow 1 (Return grill)	좌석 하부	- 외부압력(대기압) - 전체 유량의 70%
Out-flow 2 (Exhaust fan)	객실 맨 앞, 뒤	- 외부압력(대기압) - 전체 유량의 30%
Wall	차체	- 단열조건

3. 유동해석 및 결과

3.1 새마을호 객실

그림 1은 새마을호 객실의 유동특성 해석에 사용된 계산모델로서 실제 객실의 형상과 최대한 같게 하였다. 이 모델은 실제 차량 제작에 사용되는 2D CAD 파일을 입수하여 기본 도면으로 삼고, 3D로 변형하는 작업을 통해 형상을 만들었다. 실제 객실내부에서의 유동을 최대한 모사하기 위해 의자의 형상을 단순화하여 4개씩 16열, 총 64석을 배치하였다. 리턴그릴은 객실 전후와 하부에 각각 2곳씩 총 4곳에 있고, 배기 팬은 객실 중앙에 좌우 대칭으로 2곳이 있다. 객실 및 공조기의 위치가 좌우 대칭이므로 객실내 공기의 유동을 해석하기 위해서 전체 객실의 1/2만 모델링하고, 경계조건으로 대칭 조건을 주었다. 모델링은 직교좌표계를 사용하였으며, 계산 격자는 tetrahedral을 이용하였다. 경계조건을 포함한 총 계산 셀의 수는 약 320,000개로 구성하였다. 의자와 객실 내부 형상을 실제에 가깝게 구성하여 기존의 해석에서 보다 셀 수가 월등히 많아져 계산에 더 많은 시간이 소요되었다. 그림 2에 수렴까지의 변수별 계산 오차를 나타내었다. 수렴까지 총 169번의 계산을 거쳤으며, 계산수렴에 약 15시간이 소요되었다. 그림 3(a)에 새마을호 객실 단면에서의 공기 유동을 나타냈다. 천장의 슬롯은 두 방향으로 향하고 있다.

유동해석 결과 중앙 통로 쪽으로 향하는 슬롯에 의해 유입된 공기는 중앙 통로로 하강하여 바닥을 거쳐 창문과 객실 측면을 따라 상승하다가 선반에 부딪혀 객실 중앙부로 순환되는 흐름을 보였다. 또 다른 슬롯에 의해 유입된 공기는 승객이 앉은 좌석 쪽으로 향한 후 창문을 타고 내려오다가 중앙으로의 흐름을 보였으며, 일부 유입 공기는 선반 위에 작은 순환기류를 형성하는 것으로 보인다. 객실 내부에서의 유동은 그림 3(b)를 통해 보다 명확히 알 수 있었다. 경계조건에서 나타낸 바와 마찬가지로 슬롯을 통해 유입된 공기는 천장에서 하부로 향하고 있으며, 리턴그릴과 배기 팬에 의해 형성된 기류는 객실의 측면에서 보면 좌·우측으로 공기의 유동이 나누어지는 것을 볼 수 있다.

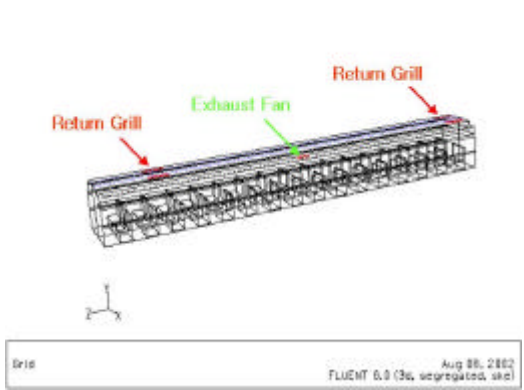


그림 1. 새마을호 객실의 계산모델

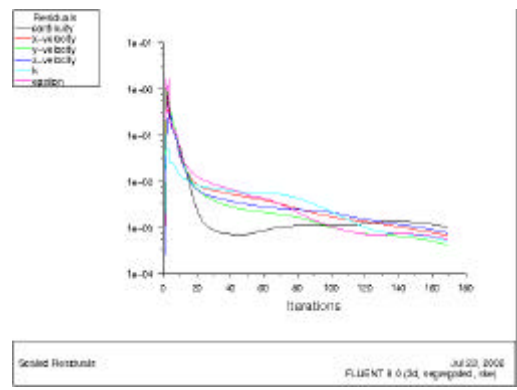
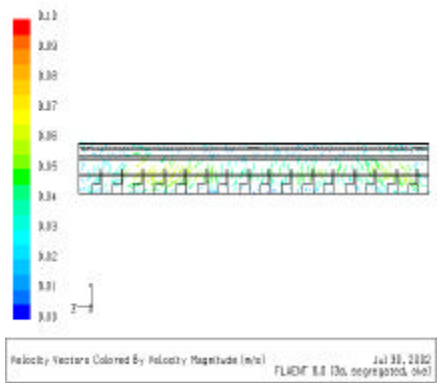
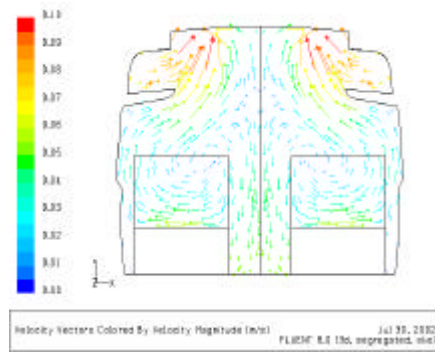


그림 2. 수렴까지의 변수별 계산 오차



(a) 새마을호 객실 측면에서의 공기유동



(b) 새마을호 객실 단면에서의 공기유동

그림 3. 새마을호 객실의 유동해석 결과

3.2 무궁화호 객실 (구형, 신형)

그림 4에 구형 무궁화호 객실 공기 유입구와 유출구 형태를 나타내었다. 구형 무궁화호의 경우 냉방 및 난방이 분리된 형태이며, 냉방장치는 덕트가 필요 없는 지붕장착 분산형 방식을 채택하고 있다. 구형 무궁화호 천장에는 유입구 8개, 유출구 4개를 한 세트의 유입·유출구가 설치되어 있다. 배출구는 객차의 앞, 뒤에 각각 1개씩 있다. 24개의 유입구로 유입된 공기는 중앙 통로를 향해 이동하며, 이 유동은 바닥으로 향한 후 창틀과 선반을 거쳐 중앙의 유출구와 배출구로 유입된다. 공기 유동 결과 천장의 유입구에서 유입된 공기는 중앙 통로로 하강하여 바닥을 거쳐 창문과 객실의 측면을 따라 상승하다가 선반에 부딪혀 객실 중앙부로 순환된 후 유출구로 향하는 흐름을 보였다. 유동해석 결과 중 단면 속도벡터결과 유입구인 천장슬롯에서 유입되는 유입속도는 1.27m/sec이나 객실 내부의 유속은 평균 약 0.34m/sec인 것으로 해석된다. 구형 무궁화호 객실 내부의 유동은 새마을호 객실과는 다른 양상을 보이고 있으며, 유입구와 유출구가 있는 곳에서의 유

동이 훨씬 지배적인 것으로 나타났다.

그림 5는 신형 무궁화 객실 내부를 나타내었다. 신형 무궁화호의 경우 냉방 및 난방을 동시에 취하는 공조시스템으로 차량하부에 위치시키는 형태는 주로 고속전철에서 볼 수 있다. 외부 공기 유입구는 좌석 측면과 좌석하부에 각각 위치해 있다. 리턴그릴은 좌석하부 유입구와 동일한 위치에 열차 진행방향으로 객실의 전반부 좌우측에 총 6곳이 있다. 이곳으로 유입 공기의 70%가 덕트로 보내진 후 재순환된다. 배기 팬은 객실 맨 앞과 뒤의 하부에 좌우 대칭으로 총 4곳이 있으며, 유입 공기의 30%가 외부로 배출된다. 신형 무궁화호의 유동해석 결과는 구형 무궁화호 객실에서와는 전혀 다른 복잡한 유동을 나타내는 것을 볼 수 있다. 객실 측면에서 유입된 공기는 창문과 벽면을 타고 올라간 후 중앙 통로로 향하고, 좌석하부에서 유입된 공기 역시 중앙 통로로 향하여 순환된 후 객실 중앙 좌석 하부에 있는 리턴그릴로 향하거나 객실 맨 앞과 뒤에 있는 배기 팬으로 향한 후 배기되는 흐름을 보였다. 객차 내에서의 유속은 대체적으로 일정한 0.35m/sec의 유속 분포로 계산되었다.

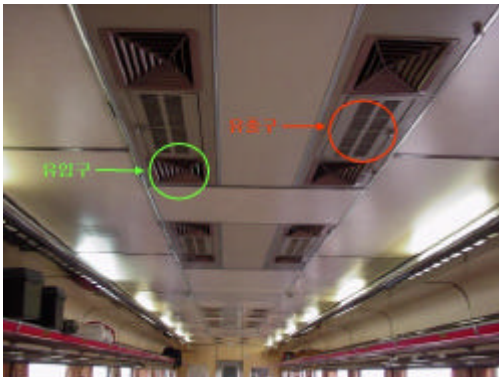


그림 4. 구형무궁화호 객실의 유입구와 유출구

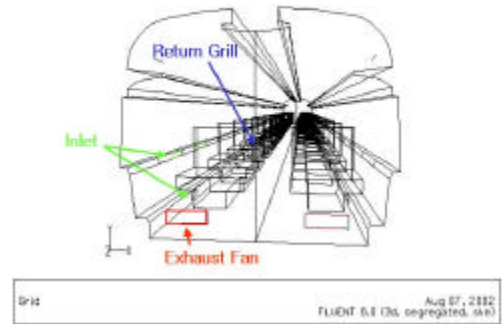


그림 5. 신형무궁화호 객실의 유입구와 유출구

3.3 전동차 객실

전동차의 용적은 133 m³이고, CO₂ 필요 환기량은 승객 160명을 기준으로 28.9 m³/min이고, 환기량은 31.6 m³/min으로 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. 그림 6에 전동차의 유동해석에 사용된 계산 모델을 나타내었다. 전동차 내부의 유동은 강제환기에 의존하므로 3D 전산유체해석 프로그램으로 전동차 내부의 환기특성과 유동을 파악하였다. 그림 7에서 전동차 내부의 유동해석 결과 슬롯으로 유입된 외부 공기가 다시 천정의 return grille로 향한 후 외부로 나가는 것을 볼 수 있다. 경계조건에서 나타낸 바와 마찬가지로 슬롯을 통해 유입된 공기는 천장에서 하부로 향하고 있으며, 전동차 중앙의 속도분포가 지배적인 것을 확인하였다.

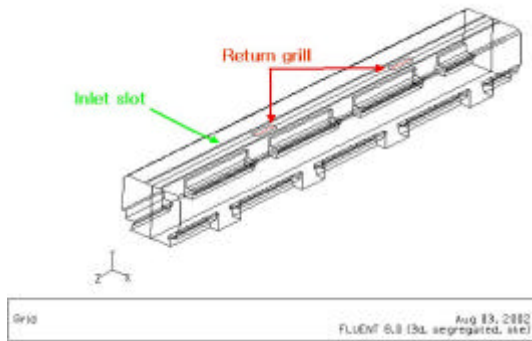


그림 6. 전동차 유동해석의 계산모델

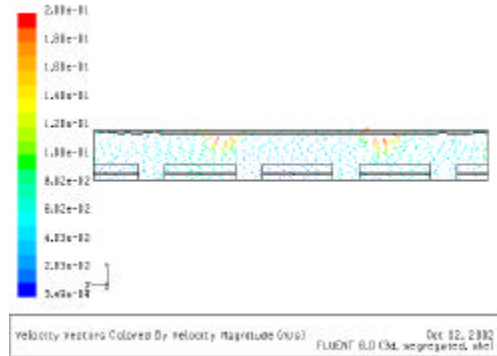


그림 7. 전동차 측면에서의 속도분

4. 결 론

철도차량의 경우 승객에게 1차적으로 접하는 객실 공기질은 재실자들의 쾌적성에 크게 영향을 미치게 된다. 승객들의 객실환경에 대한 인식이 온열감각에 대한 만족도뿐만 아니라, 건강에 장애를 일으키지 않는 조건을 갖는 공간을 추구하고 있다. 본 연구에서는 CFD를 이용하여 철도 차량별 객실내 유동의 흐름을 살펴보았다. 철도차량의 경우 시기적으로 뒤늦은 감이 있지만 종래의 객실공기 청정도 유지차원의 연구뿐만 아니라 객실 공기질에 대한 문제로 확장하여 보다 상세히 취급하려는 연구를 진행하여야 할 것이다. 이에 철도 차량별 객실내의 유동해석 결과에 따라, 향후 지능형 철도차량 공조시스템의 최적 공간배치와 전반적인 기술적 접근을 통해 설계를 추진하고자 한다.

참고문헌

- [1] 한국철도기술연구원 (2002) 객실 실내 공기질 향상 방안에 관한 연구, 철도청.
- [2] 한국철도기술연구원 (2002) 실내 쾌적성 향상 기술 개발, 철도청.
- [3] 한국철도기술연구원 (1998) 전동차 공기조화 시스템 연구보고서, 건설교통부.
- [4] 김윤신 (1999) 실내공기질 연구의 현황과 전망, 한국대기 환경학회지 15(4), 371-383.
- [5] 최익순, 정광섭, 박영칠, 한화택, 이정재 (2001) 개별공조시스템(PACS)을 적용한 작업공간에서의 온열환경 특성 및 쾌적성 평가, 설비공학논문집 13(2), 106-114.
- [6] 조용, 권혁승, 김성현, 김영일 (2000) 사무실 공간의 냉방시 천장 및 바닥 급기 공조 방식에 따른 열환경 평가 실험, 설비공학 논문집 12(9), 810-816.
- [7] 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.
- [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.