

철도차량 객실의 온열환경 해석 및 평가

철도차량 객실의 온열환경 해석 및 열적 쾌적성 평가에 대한 중요성과 최근의 연구 현황을 소개하고자 한다.

연 봉 준, 박 원 구, 김 만 회

한국과학기술원 기계공학과(manhoe.kim@kaist.ac.kr)

냉동기나 HVAC 시스템은 주거 및 상업용 건물, 교통수단, 공장 등의 현대식 시설에는 꼭 필요한 설비로 재실자의 쾌적함과 건강을 유지시켜 줄 뿐 아니라 실험용 밀폐공간이나 공장/상업용 건물에서 필요한 운영조건을 만족시켜 주는 장치이다. 종래의 공기조화에서는 공기조화의 4대 요소인 온도, 습도, 기류 및 공기청정 중에서 온도제어가 주 목표였다. 그러나 재실자의 쾌적함과 건강을 위해서는 각 공간별 열 환경과 더불어 실내의 공기의 질, 기류, 음향을 포함하는 실내 환경의 질(IEQ, Indoor Environmental Quality)에 대한 전반적인 검토가 필요하다. 또한 우리나라는 에너지의 98%를 수입에 의존하고 있는데, 이는 총 수입액의 20% 정도를 차지하고 있으며 에너지 소비 증가율도 세계 4위이다. 따라서 쾌적한 실내 환경의 유지는 물론 에너지의 합리적 사용을 위한 HVAC 시스템의 설계 및 운영은 매우 중요한 일이다. 본 고에서는 신형 무궁화 객차의 실내공간에 대한 열유동 특성을 수치적으로 해석하고 이를 토대로 객차내의 열적 쾌적성을 평가하기로 한다.

오늘날 많은 사람들이 장거리 이동수단 뿐 아니라 도심 속의 출퇴근 수단으로 철도를 많이 이용하고 있다. 그 만큼 철도 차량내에서 머무르는 시간이 많아지고 있는 것이다. 무궁화호의 경우 서울~대전간 2시간 서울~부산간 5시간 반의 운행시간이 소요된다. 이와 같이 승객들은 주어진 실내 환경에서 비교적 많은 시간을 특수한 상황인 철도 차량 내에서 머

무르게 되므로 철도차량의 객차나 운전실의 온열 쾌적성은 매우 중요하다. 또한, 산업의 고도화와 생활 수준의 향상으로 승객들은 보다 건강하고 쾌적한 실내 환경을 요구하고 있다. 그러나 아직도 철도 차량의 공기조화는 객차내의 온열 쾌적성을 평가하지 않고 차량내의 냉방부하에 적합한 공조기의 사양을 결정하여 실내온도를 제어하는 방식으로 설치 운전되고 있다. 철도 차량의 온열 쾌적성 평가를 위해서는 열차가 가지고 있는 특수성을 고려해야 한다. 철도 차량의 객실 내 열유동 분포는 지하나 터널에서 운행과 냉기/신선외기의 덕트 구조나 철도 차량의 형태에 따라 크게 변한다. 또한, 철도차량이 점차 고속화 되면서 승객이 창문을 열고 닫을 수 있는 예전의 방식과는 달리 현재는 고속주행에 따른 승객의 안전과 미관상 밀폐형 창문으로 열차를 채용하고 있다. 이와 같은 복잡하고 특수한 사정으로 철도 차량에 대한 온열 쾌적성 평가는 중요하지만 건물이나 자동차에 비하여 상대적으로 매우 미미한 실정이다.

온열 쾌적성

사람이 느끼는 온열 쾌적성은 같은 온도라도 개인적/심리적/물리적인 차이 등으로 인해 서로 다르며, 이를 공학적으로 응용하기 위해서는 온열 쾌적성의 정도를 수치로 표시할 수 있어야 한다. 온열 쾌적성을 평가하는 지수는 현재 여러 가지가 개발되어 있

으나, P.O Fanger[1]가 1970년에 제안한 PMV(Predicted Mean Vote) 이론이 1984년에 ISO 7730으로 국제규격으로 등록되어 가장 많이 사용되고 있다. PMV는 인체와 주위환경간의 열적 평형상태를 기준으로 -3에서 +3까지로 축고, 더움을 그 정도로 표시한다. 가장 쾌적한 상태는 중립상태로 PMV가 0인 상태이다. 쾌적성에 영향을 끼치는 요인은 크게 개인적인 요소와 물리적인 요소로 나뉜다. 개인적인 요소로는 활동량, 착의량, 나이 및 성별이 있고, 물리적인 요소로는 공기 속도, 평균 복사온도, 공기 온도, 습도가 있다. 앞서 기술한 바와 같이 개인적인 차이로 인한 쾌적성 평가를 보완하기 위해 PPD(Predicted Percent Dissatisfied)라는 지수가 사용되고 있다. 이는 동일한 온열 환경에서 불만족을 표시하는 사람의 비율을 백분율로 표시한 것이다. 가장 이상적인 상태인 PMV가 0인 중립상태에서도 PPD는 5%로 평가된다. 즉 가장 쾌적하다고 판단되는 온열 환경에 대해서도 실험군의 5%가 불만족을 표시한다. ISO 7730에서는 PMV가 ± 0.5 사이에 존재하도록 권장하고 있다. PMV는 실내 공간의 전반적인 온열 쾌적성을 평가하는 지수이며, 국소적인 불만족도를 평가하기 위해 DR(Draught), 비대칭 복사, 수직 온도차 등에 의한 영향도 평가하고 있다.

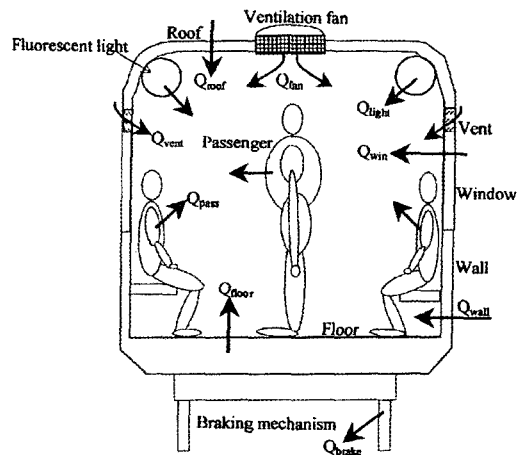
국내외 연구현황

철도 객차나 운전실의 온열 쾌적성에 대한 연구는 건물이나 자동차에 비해 상대적으로 발표된 연구사례가 적다. 그러나 최근 들어 이에 대한 관심이 높아지면서 국내외에서 연구가 활발히 진행되고 있다.

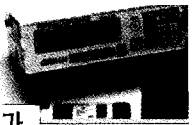
Ampofo 등[2]과 Maidment and Missenden[3]은 영국의 지하철 객실의 온열 쾌적성을 향상시키기 위하여 경제적이고 친환경적인 지하수를 이용하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 그들은 정확한 온열 쾌적성 평가를 위해 그림 1과 같이 객차의 냉방부하를 계산하였다. 인체의 온도에 따른 현열과 잠열, 조명부하, 객실 벽과 지하공간의 열전달, 제동장치의 열 생성 및 전달 등을 수학적 모델링을 통해 계산하여 객실 벽, 유리창, 바닥, 지붕, 조명, 승객의 현열 및 잠열을 각각 얻었다. 지하철의 공조 설비는 지하 공간이라는 특수성으로 인해 많은 제약이 있으며 그

로 인해 많은 비용이 발생한다. 특히 지하 침출수는 지하철 운행시의 유지, 보수 및 배관에 있어 많은 비용을 초래하지만 평균 12℃의 온도와 그 유량을 고려하면 무려 10 MW의 Cooling Potential을 가지고 있는데, 필요한 에너지는 100 kW가 채 안되므로 COP가 100 이상 되는 좋은 에너지원으로 활용될 수 있다. 그들은 지하 침출수의 활용에 따른 결과를 비교하기 위해 지하수를 사용하지 않았을 경우와 사용했을 경우를 비교하였다. 그 결과 지하수를 사용하지 않은 경우, 객실 온도는 평균 32℃, 습도 53%이며, 온열 쾌적성 지수 PMV는 2.44, PPD는 92%로 매우 불쾌한 상황이었지만, 지하수를 이용하여 터널 내 공기를 냉각한 경우에는 객실 온도가 27℃로 떨어지며 PMV는 0.9, PPD는 22%까지 향상되는 것으로 보고하였다. 또한, 자연적으로 얻어지는 지하수를 이용했기 때문에 친환경적이며, 매우 경제적이기 까지 하므로 활용가치가 매우 크다는 결론을 얻었다.

Lian[4]은 중국의 철도 차량의 객실 내로 유입되는 냉기 입구의 위치에 따른 쾌적성 평가를 수행하였다. 이 연구에서는 중국에서 사용되는 Chinese type-25 객차를 대상으로 실험과 수치해석을 병행하여 연구하였다. Fanger [1]가 제안한 PMV와 같은 쾌적성 지수를 사용하지는 않았지만 적정 온도 구간을 만족하는 지점의 비율을 통계를 내어 쾌적성을 평가하였다. 실험에서는 실제 승객 대신 인체와 같은 발열량을 가



[그림 1] 지하철의 냉방부하



진 heater를 설치하여 측정하였고, Simulation 결과와 비교하였다. Simulation과 실험의 결과가 온도에 있어서는 최대 2.36℃, 상대오차 9.16%로 비교적 유사한 결과를 얻어서 Simulation의 타당성을 검증하였다. 객실의 입구의 위치에 따른 쾌적성 평가에서 상부 취출형 시스템보다 하부 취출형 시스템이 에너지 효율 면에서 25~50% 좋은 결과를 얻었다. 에너지 효율성 평가는 다음 식을 이용하여 평가하였다.

$$\eta = \frac{T_p - T_o}{T_n - T_o}$$

여기서 η 는 에너지 효율성, T_p 는 리턴되는 공기의 온도, T_o 는 공급되는 공기온도, T_n 은 객실 평균온도를 나타낸다. 하부 취출형 시스템에서 출구는 천정에 있기 때문에, 리턴공기의 온도는 승객이 위치해 있는 지점의 온도보다 높게 된다. 따라서 에너지 효율, $\eta > 1$ 이 된다. 또한, 이 연구에서는 보다 쾌적한 환경을 만들기 위한 객실의 급기 시스템으로 그림 2와 같은 Chair-back air supply system(CASS)을 도입하였다. 연구에 사용된 Chinese type-25는 우리나라 객차와는 다르게 앞 뒤 좌석이 서로 마주보는 형태이므로 의자 하나에 등받이를 기준으로 앞뒤 승객이 서로 등을 지고 앉게 된다. CASS는 이 공통의 등받이에 덕트를 설치하여 객실로 공기를 유입하는 시스템이다.

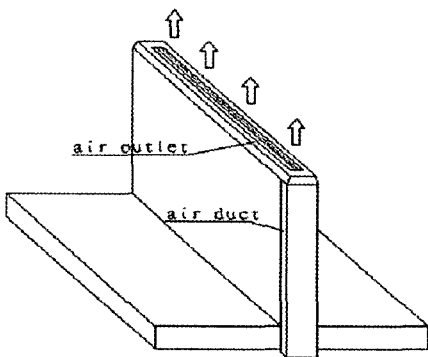
저자가 제안한 CASS로 Simulation 한 결과 쾌적성에 대한 적정 범위를 만족하는 객실 내 지점의 비율이 90%이상으로 향상되었고 에너지 효율도 20%가

량 증가함을 보였다.

국내에서도 철도차량 객차내의 열유동해석을 수행한 연구는 최근에 많이 있으나, 온열 쾌적성을 평가한 연구는 상대적으로 적다. 철도공사(5)에서는 차량 객실 내의 열유동 해석을 인체발열, 태양열 및 실내 조명 부하 등을 고려하여 수행하고 열 환경 평가를 수행하였다. 이 연구에서는 180km/h 급 차량에서 온열 쾌적성을 향상시킬 수 있는 HVAC 설비를 평가하는 것이 목적이었다. 상용코드를 이용한 수치해석을 수행하였는데, 대공간임에도 불구하고 많은 격자를 가지고 객실의 비대칭성, 부속실 그리고 덕트 시스템까지 전체적으로 계산을 수행하였다. 쾌적성 평가의 기준이 되는 가이드 라인에 따라 객실로 유입되는 찬공기의 유량을 충족시키기 위해 신선공기 팬과 공급팬의 용량, 그리고 배기팬의 용량을 선정하였다. 객실로 유입되는 각 입구의 유량을 비교하고, 다공성 물질인 리턴그릴의 압력강하에 따른 유량 변화에 대한 연구도 수행하였다. 또한 실제와 가까운 온열환경을 계산하기 위해 인체의 발열과 태양 복사 및 조명, 기기 부하 등을 복합적으로 고려하여 객실 내 온도 분포 및 유동흐름을 계산하였다. 현재 '차세대 객차용 청정시스템 개발'이라는 제목으로 연구가 진행중이다 [6]. 이 연구는 2003년부터 2008년까지 5년에 걸쳐 한국철도기술연구원 주관으로 객차 공기질 청정화를 통한 이용 승객의 쾌적성 향상을 목적으로 하여 진행 중이다.

신형 무궁화호의 온열 쾌적성 평가

철도차량의 객차 내 온열쾌적성 평가의 사례로 신형 무궁화호의 객차 내의 열유동분포와 PMV/PPD 평가 결과를 승객의 존재 여부에 따라 간략하게 기술하기로 한다. 신형 무궁화호는 구형 무궁화나 새마을호와는 다르게 공조기가 객실 바닥 밑에 위치하고 있으며 덕트를 통해 객실로 냉기가 유입된다. 수치계산은 상용코드인 Fluent를 이용하였고 객실은 열차 진행방향으로 기하학적 대칭이므로 계산의 효율성을 위해 객실의 반만 모델링하여 계산하였다. 먼저 승객이 없는 경우에 대해 고찰하기로 한다. 계산격자는 그림 3과 같이 정렬격자를 사용하였는데, 신형 무궁화호의 객실 내 형상은 그림 4와 같다. 실



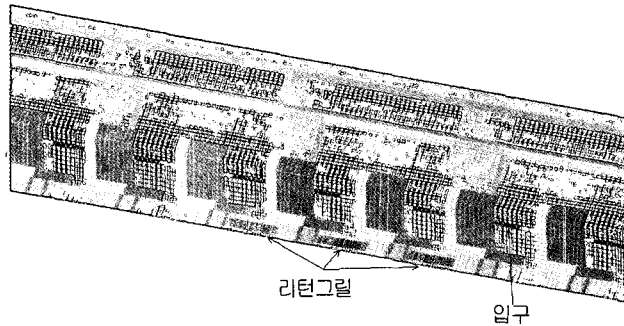
[그림 2] Chair-back air supply system

제 객차의 운행조건을 고려하여 유리창을 통과하는 태양 복사에너지와 조명부하 및 벽을 통과해 들어오는 에너지에 대한 열 유속을 경계조건으로 주었다.

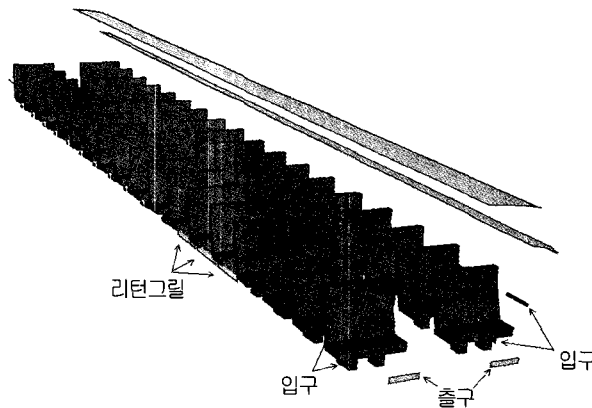
객실내의 냉기 입구에 대한 경계조건으로는 냉기 덕트 내의 열유동을 먼저 계산하고 그 결과를 사용하였다. 다양한 종류의 리턴그릴의 위치에 따른 쾌적성 평가를 수행하였는데, 여기서는 두 가지 경우만 소개하기로 한다. Case 1은 기존 객차의 형상에 대한 경우이고 Case 2는 리턴그릴의 위치를 변화시킨 구조로, 각 경우에 대한 형상을 그림 5에 표시하였다.

그림 6과 7에 계산 결과를 도시하였는데, 이는 각각 창측과 복도측의 온도 분포를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 리턴그릴이 위치해 있는 좌석에서의 온도가 상대적으로 높게 분포하고 있음을 관

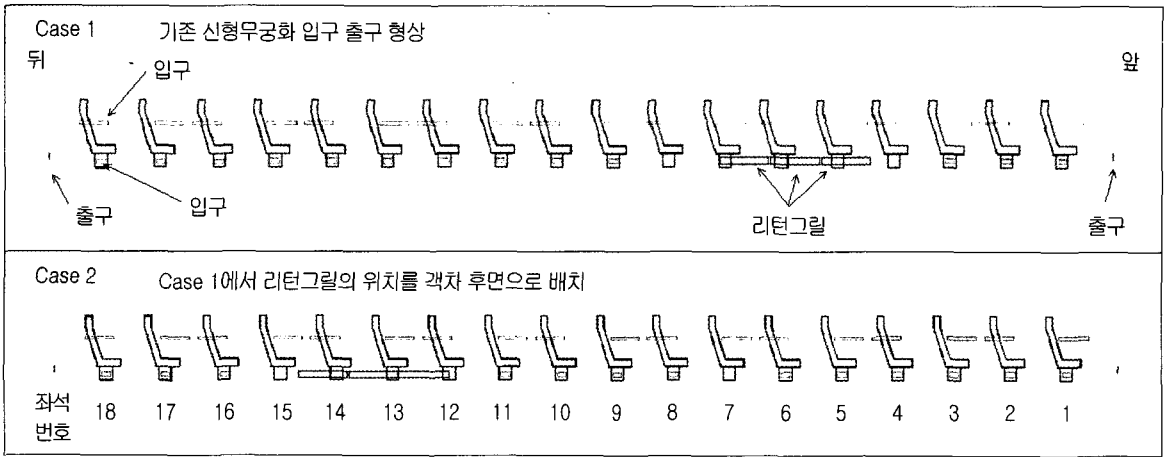
찰할 수 있다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 리턴그릴의 위치를 뒤쪽으로 배치한 Case 2는 Case 1과 같이 리턴그릴이 위치해 있는 좌석에서 높은 온도 분포를 나타내고 있으나, 상대적으로 균일한 분포를 나타내고 있다. 그림 8과 9는 각각의 경우에 대한 PMV와 PPD를 계산한 결과이다. ISO 7730을 만족시키는 좌석의 수도 8개에서 12개로 증가 했을 뿐 아니라 Case 1의 PMV는 (-1.63, 2.16) 사이에 존재하며 PPD도 최대 83.3%이지만 Case 2는 (-1.7, 1.15) 사이에 존재하며 PPD는 최대 61%이다. ISO 7730에서는 -0.5와 0.5 사이를 쾌적 조건으로 규정하고 있지만 그 다음으로 요구하는 수준은 -0.7과 0.7사이이며 이 조건을 만족시키는 Case 1은 11개인 반면 Case 2는 16개로 Case 1에 비하여 개선된 결과를 보이고 있다.



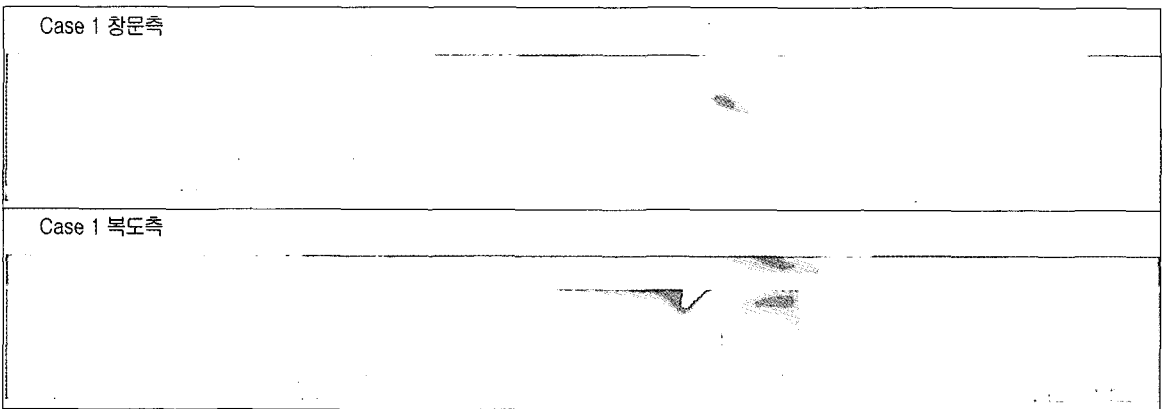
[그림 3] 계산에 사용된 격자



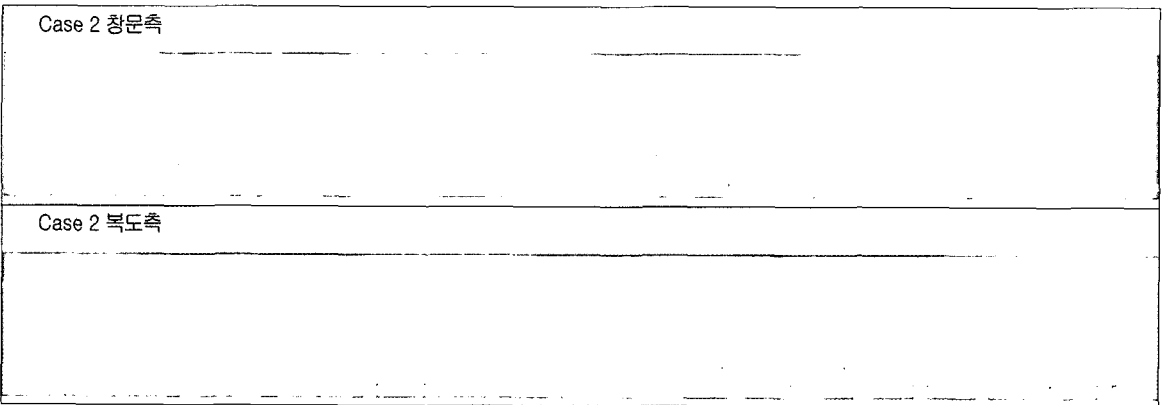
[그림 4] 신형 무궁화 객실 내부 형상



[그림 5] Case 1과 Case 2



[그림 6] Case 1의 온도분포

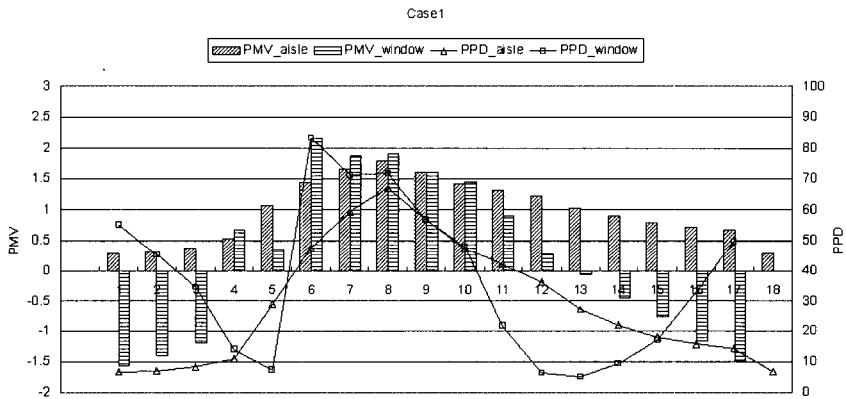


[그림 7] Case 1의 온도분포

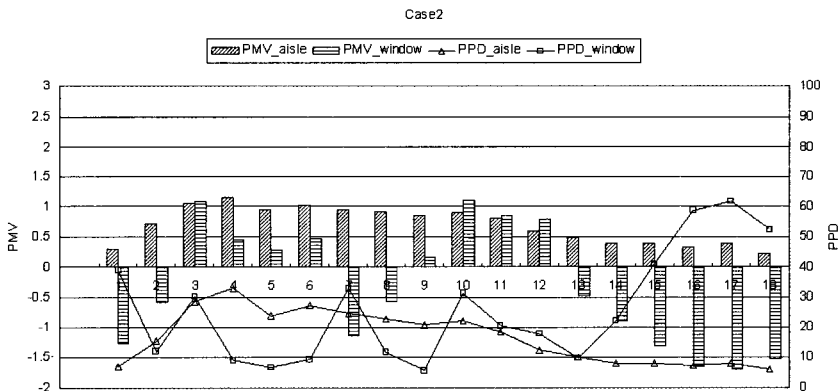
그러나 이는 승객이 없는 아주 단순한 경우로 실제 조건과는 차이가 많다. 승객이 존재할 경우는 인체도 하나의 열원으로 고려해야 하므로 승객이 없는 경우와는 그 결과가 매우 다르게 나올 것이라 예상할 수 있다. 현재까지 승객을 고려한 온열 쾌적성 평가를 수치적으로 수행한 연구는 찾아보기 어렵고, 그 모델링 또한 매우 복잡하기 때문에 일부 실험 자료가 뒷받침되어야 한다. 여기서는 신형 무궁화 객차내에 승객이 있는 아주 단순한 경우에 대하여 고찰하기로 한다. 그림 10에 승객이 탑승한 경우의 신형 무궁화 객실 내부와 덕트 형상(Case 1)을 나타내었는데, 객차내의 18개 좌석중 10개 좌석에만 의자당 2명씩 총 20명이 탑승한 경우이다. 인체표면적

은 표준 체형(키 1.73 m, 몸무게 70 kg, 표면적 1.8 m²)의 경우[7]를 수치적으로 모델링하여 계산한 값(1.695 m²)을 사용하였으며, 일반적인 계산은 참고문헌[8]에서 제시한 방법으로 수행하였다.

인체에 대한 경계조건으로는 등온조건과 균일열유속 조건을 사용하여 비교하였는데, 이 경우 각각 피부표면의 온도와 열유속을 33℃와 50 W/m²로 하였다. 인체의 방출 열량은 땀의 증발에 따른 잠열과 피부온도와 주위공기의 온도차에 의한 대류에 의한 열손실(현열)로 나눌 수 있는데, 본 계산에서는 현열만 고려하였다. 그림 11은 승객의 위치에 따른 실내의 온도분포를 나타내었다. x축은 2명이 앉을 수 있는 18개의 좌석번호이며 y축은 1인당 머리와 가슴 그리



[그림 8]

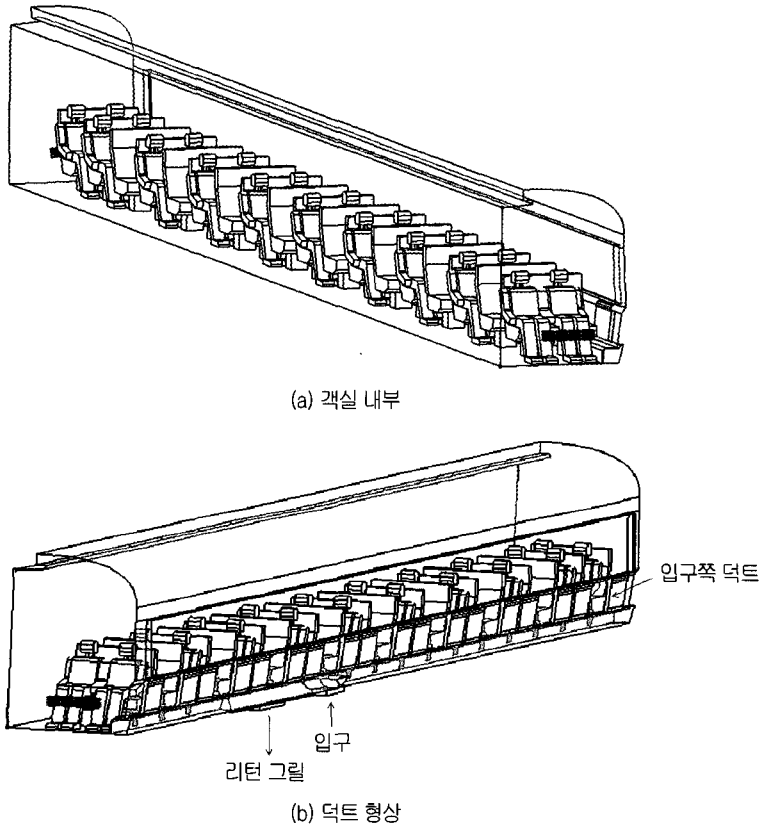


[그림 9]

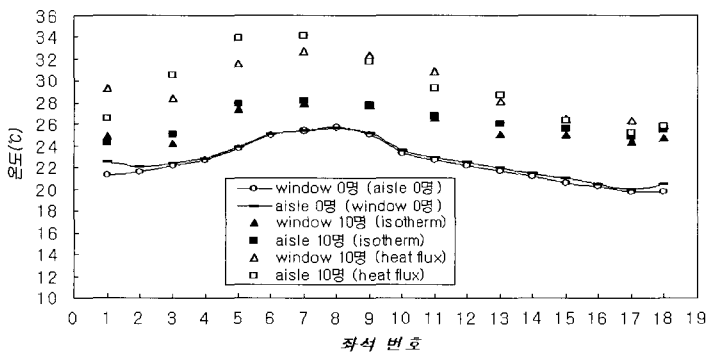


고 종아리 양쪽, 무릎 양쪽, 허벅지 양쪽, 팔 양쪽, 어깨 양쪽의 총 12개 지점에서 인체와 접한 부분에서의 평균온도이다. 그림 11에서 균일 열유속 조건으

로 계산한 경우(△, □)와 등온조건으로 계산한 경우(▲, ■)에 대한 온도분포를 승객이 없는 경우(○, —)와 비교하여 도시하였다. 그림에서 관찰 할 수



[그림 10] 승객이 탑승한 경우의 신형 무궁화 객실 내부와 덕트 형상



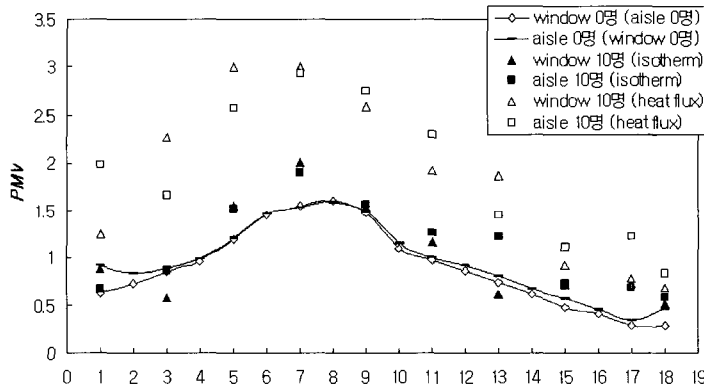
[그림 11] 승객이 탑승한 좌석에 따른 온도분포

있듯이 좌석 위치에 따른 12개 지점의 평균온도는 경계조건에 따라 큰 차이(균일 열유속: 25~34℃, 등온: 24~28℃)를 나타내었으며, 승객이 없는 경우(19~25℃)에 비하여 높은 온도 분포를 나타내고 있다. 그림 12와 13은 PMV와 PPD에 대한 결과를 나타내었는데, 그 경향은 서로 유사하나 절대 값이 많은 차이를 보이고 있다. 본 계산에서 알 수 있듯이 차량내의 열유동 특성은 인체를 포함한 정확한 경계조건을 설정하는 것이 필요하며 보다 정확한 온열 쾌적성 평가를 하기 위해서는 실험이 병행되어야 한다.

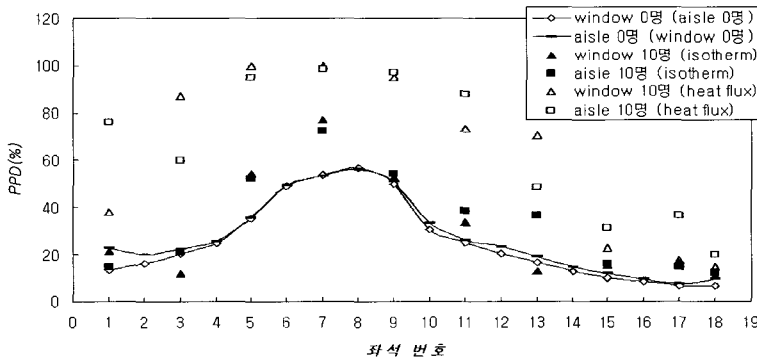
맺음말

산업의 고도화와 생활수준의 향상으로 철도차량의

대형화와 고속화가 추진되면서 철도를 교통수단으로 이용하는 사람들이 점차 증가하고 있다. 열차는 다른 교통수단과는 달리 고속으로 이동하므로 승객의 안전을 위하여 창문이 대부분 고정문이고 객실 내부가 밀폐된 공간으로 되어있어 침기가 일어나기 어렵다. 따라서 환기를 포함하는 실내 환경의 쾌적성이 상대적으로 중요하다. 열차 객실내의 쾌적성은 소음 및 진동과 같은 물리적인 특성 뿐 아니라 공기 조화, 의자의 크기와 간격, 안락함, 실내 디자인과 분위기, 승무원의 친절도 등과 같은 시각적, 공간적 및 상대적인 여러 요소가 복합적으로 작용하기 때문에 한마디로 정의하고 이를 정량적으로 평가하기가 어려워 객실내의 종합적인 쾌적성 평가에 대한 지표는 아직 뚜렷하게 확립되어 있지 않다. 철도공사에



[그림 12] 승객이 탑승한 좌석에 따른 PMV



[그림 13] 승객이 탑승한 좌석에 따른 PPD

서도 180 km/h급 차량에 사용될 HVAC시스템이 승객이 만족할 수 있는 수준의 쾌적성을 확보하기 위한 설비가 되기 위한 연구를 수행한 바 있다. 또한 현재 건설교통부에서 진행중인 차세대 객차용 청정시스템 개발 사업에서도 객실내의 온열쾌적성을 평가하는 내용을 포함하고 있다. 객차내의 온열환경을 평가하기 위해서는 실내공간에 위치한 여러 장치를 모사하고 실내공간의 형상 및 주위 조건 등에 따른 경계조건을 수립하고 수치적으로 해석하는 것이 필요하다. 수치해석을 통한 온열 쾌적성 평가는 근사적인 모델링도 중요하지만 실제 실험을 통해 수치해석 상 중요한 경계조건을 얻는 것이 중요하다. 수치계산의 결과는 간단한 실험을 통한 검증 후 다양한 실내구조 및 덕트/디퓨저의 구조, 환기 시스템의 급기 및 배기구의 위치 등에 따른 매개변수 연구를 수행하여 체계적인 실내 열환경 자료를 구축할 수 있다. 그리고 오염원의 위치 및 확산에 대한 과장도 공간의 기하학적 형상 및 공조 설비의 설치 위치에 따른 시뮬레이션을 수행하여 건물의 실내의 기하학적 형상에 따른 HVAC 시스템의 설치 운영에 필요한 자료를 구축하는 일도 중요하다. 수치계산의 효율성을 높이기 위한 방법으로는 수치적으로 근사할 수 있는 모델, 예를 들면 2차원 모델이나 3차원 주기모델 등을 고안하여 그 상관관계를 찾아 설계상에 반영할 수 있는 기법을 만드는 것도 좋은 방법이라 생각된다. 객실 뿐 아니라 화장실 등의 부속실도 해석에 포함 시키는 것이 실제적인 쾌적성 평가이며 입석승객 뿐 아니라 승객의 잦은 이동에 따른 영향 평가, 그리고 온열 쾌적성 평가 뿐 아니라 환기량 및 오염물질

의 전과 및 배출에 관한 연구를 수행하여 철도 차량내의 실내 환경에 대한 종합적인 평가가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. P.O. Fanger, Thermal Comfort, Robert E. Krieger Publishing Company, 1982.
2. F. Ampofo, G. Maidment, J. Missenden, Underground railway environment in the UK, Applied Thermal Engineering, Vol 24, pp. 611-631, 2003.
3. G.G. Maidment, J.F. Missenden, Evaluation of an underground railway carriage operating with a sustainable groundwater cooling system, International Journal of Refrigeration, Vol 25, pp. 569-574, 2002.
4. Zhiwei Lian, Presentation and evaluation of a new type of air supply system in a passenger carriage in China, Applied Thermal Engineering, Vol 24, pp.703-715, 2004.
5. HVAC 및 압력 안락성 기술개발, 한국철도공사, 2005.
6. 박덕신, 차세대 객차용 청정시스템 개발 2차년도 보고서, 건설교통부, 2005.
7. K.C. Parsons, Human Thermal Environments, 2nd Edition, Taylor & Fransis, 2003.
8. 홍성호, 자동차 실내공간의 열적 쾌적성, 한국과학기술원 석사학위 논문, 2006. ㉠