

# 차실내 열쾌적성 평가 및 해석기술 개발동향

■ 조 중 원 / 자동차부품연구원 열제어시스템연구센터, cwcho@katech.re.kr

신체의 열적평형상태에 의해 좌우되는 열쾌적성의 평가 및 해석에 관한 기술을 소개하고자 함.

## 열쾌적성

인간은 의식적이건 무의식적이건 자신의 신체를 항상 쾌적한 상태로 유지하기 위해 노력한다. 쾌적한 환경은 쾌적성을 확보하려는 인간의 불필요한 노력을 줄여주기 때문에 작업능률을 높여주기도 한다. 따라서 먼 과거로부터 현재까지 쾌적성을 추구하려는 인간의 노력은 건축물, 옷, 자동차 등에 반영되어 왔으며, 오늘날 열적으로 쾌적한 환경을 제공하는 것은 건축물, 자동차용 에어컨 설계에 중요한 인자가 되고 있다. 공조시스템을 단순한 실내 온도의 조절이 아닌 인간이 느끼는 열쾌적성에 초점이 맞추어 운전하는 것이 좀 더 효율적이기 때문이다.

그렇다면 열쾌적성이란 무엇을 말하는 것일까? 미국냉난방공조학회는 열쾌적성이란 “그 온도환경에 만족을 표시하는 마음상태”로 정의한다. 즉 열쾌적성은 각 개인의 심리상태, 감각 등에 의해서 좌우되는 것으로서 단순히 온도로서 열쾌적성을 정의하기에는 큰 무리가 따르게 된다. 예를 들어 같은 온도환경에 있는 사람이라 할지라도 운동량(대사량)과 착용한 의복의 종류에 따라 서로 다른 열쾌적성을 가질 수 밖에 없게 된다.

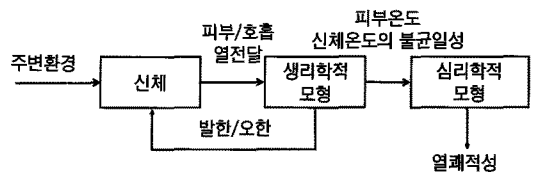
열쾌적성이란 “마음의 상태”를 나타내는 것으로 주관적인 요소가 다분히 섞여있기 때문에 객관성을 가지는 물리량으로 주관적인 열쾌적성을 평가하기란 쉽지 않다. 그러나 열쾌적성은 신체의 열적평형 상태에 크게 좌우되는 특성이 있는데, 이러한 열적평형상태는 신진대사에 의해 발생한 열량이 피부, 호흡, 땀을 통해 외부로 잃은 열량과 균형을

이루는 상태를 말한다. 따라서 이러한 열적평형상태를 측정할 수 있다면 열쾌적성의 객관적인 평가가 가능해질 수 있다.

## 열쾌적성 평가 모형

열쾌적성이란 결국 인간과 주변환경 사이에서 일어나는 열전달량에 크게 영향을 받게 된다. 따라서 주변환경과 인간의 몸이 피부를 통해서 어느 정도의 열을 주고받는지 그리고 동시에 호흡, 발한 등을 통해서 열전달이 어느 정도인지에 대한 평가가 필요하다. 이러한 신체의 열전달 특성은 피부 내부의 지방층과 근육층에서의 열발생 및 열전달 특성에 대한 정보를 알고 있어야지만 파악이 가능하다. 일반적으로 이러한 신체의 열전달 특성은 생리학적 모형(physiological model)이 담당하게 된다. 생리학적 모형은 주변온도환경에 따라 신체가 능동적으로 반응하는 오한이나 혈관의 수축 등의 현상 또한 포함할 수도 있다.

그런데 이러한 생리학적 모형만으로는 인간의 감정을 완벽하게 예측하기란 무리이다. 즉 인간의 감정은 단순한 열전달량 뿐 아니라 피부온도나 온도 상승의 속도, 신체 각 부위의 불균일한 온도상태 등에도 크게 영향을 받을 수 있으며 사람마다 이러한 환경에 영향을 받는 정도도 제각각이다. 객관적



[그림 1] 열쾌적성 평가를 위한 모형



으로 측정된 물리량만으로 인간의 주관적인 감정을 설명하기에는 한계가 존재하는 것이다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해서는 생리학적 모델 뿐 아니라 객관적으로 측정된 물리량으로 다분히 주관적인 열쾌적성을 예측해주는 심리학적 모델(psychological model) 또한 요구된다. 결과적으로 열쾌적성 예측모형이란 실내 조건이 인간의 감정에 끼치는 영향을 생리학적, 심리적 모델을 사용하여 규명하는 것으로 여기에서 얻어진 열쾌적성 자료는 실내 공조의 성능 및 효율 향상에 큰 도움을 줄 수 있다. 즉 기존의 공조시스템이 단순히 목표 온도를 조절하는 수준으로 개발된 반면에 열쾌적성 기술이 접목된 공조시스템은 한 단계 더 나아가 인간의 감정을 만족시킬 수 있는 수준을 목표로 개발되고 있다는 점이다. 차 실내 공조를 예로 들면 미국, 유럽, 일본 등지에서는 성별, 연령층별, 기후 조건별 다양한 인체실험을 바탕으로 열쾌적성 평가 기술개발이 되어 있으며, 이를 차량과 접목하여 열 쾌적성을 바탕으로 한 공조장치의 운전전략 개발이 활발히 연구되고 있는 추세이다. 또한 승객 요구의 다양성으로 인한 요구조건이 상이하기 때문에 생리학적 모형을 기반으로 만들어진 열마네킨(thermal manikin)을 차량에 적용하여 탑승자의 편의성을 증대하고, 차량의 동력소모를 저감하기 위한 연구를 진행하고 있다.

## 열쾌적성을 고려한 차실내 공조기술의 해외 기술동향

차량 실내의 열쾌적성에 대한 관심은 지난 40년간 꾸준히 증가해 오고 있지만 이에 대한 연구는 건축분야에서 수행된 연구 성과에 크게 의존하고 있는 실정이다. 차량 실내의 열환경 특성은 일반 건축구조물 내부와는 몇 가지 다른 특성을 갖고 있기 때문에 이를 보완하기 위한 기술개발이 필요한 상태이다. 가장 대표적인 차실내 열환경 특성은 빈번히 발생하는 불균일한 온도분포이다. 건축구조물 내부에서는 그리 강하게 나타나지 않지만 차량 실내에서는 공간이 좁고 시트 등이 공기흐름을 막기 때문에 빈번히 발생한다. 인간의 몸은 각 부위마다 주변온도에 반응하는 특성이 약간씩 틀리기

때문에 이를 반영한 열쾌적성 예측이 필요하게 되며 앞서 기술한 생리학적 모델을 사용하여 열쾌적성을 평가하는 연구도 활발히 진행되고 있다.

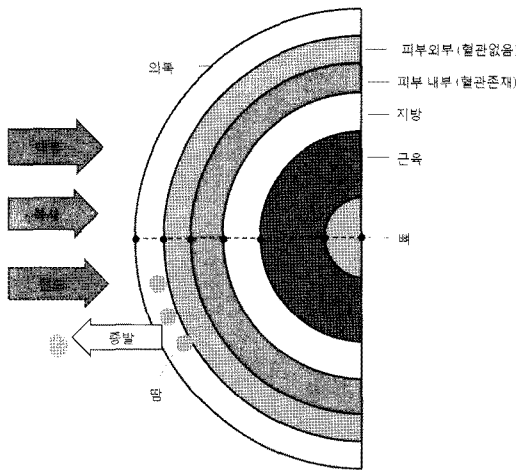
인간의 피부를 통과하는 열전달량과 신진대사량에 따른 발열량의 비교를 통하여 열쾌적성을 예측하려는 것이 생리학적 모델의 주목적이다. 그런데 인간은 심부온도를 일정하게 유지하려는 메카니즘이 항상 작동하기 때문에 생리학적 모델은 이러한 특성 또한 정확하게 반영해주어야 한다. 즉 추위를 느끼면 소름이 돋고 더우면 땀이 나는 작용이 그 대표적인 예이다. 이러한 신체의 능동적인 체온 조절 메카니즘은 열쾌적성과 매우 밀접한 관계에 있다. 그런데 이러한 능동적인 체온조절 메카니즘은 인간의 열적 특성을 모사하는 열마네킨(thermal manikin)에서 구현하기가 쉽지 않으며 이것이 가능하다 해도 비용이 대단히 증가한다. 따라서 이러한 특성들은 생리학적 모델을 통하여 해석적으로 접근하는 것이 좀 더 경제적인 선택이 될 수 있다.

생리학적 모델은 외부의 정적 혹은 동적 온도조건을 입력조건으로 하여 인간이 느끼는 각 신체 부위별 쾌적성을 예측할 수 있게 해준다. 현재까지 다양한 형태의 생리학적 모델이 개발되어 왔는데, 가장 단순한 형태의 모델은 인체를 여러 개의 격자점(node)으로 나누어 각각의 격자점에서 열전달을 계산하는 1-D 형태의 모델이다. 그러나 이러한 1-D 모델은 인체내부 열전달의 85%를 담당하는 혈액순환에 대한 모델링이 매우 빈약하다. 따라서 1990년대 Kansas 주립대학에서 이를 보강할 수 있는 유한요소 모델을 개발하여 발전시켜 왔으며 NREL에서도 이 모델을 발전시켜 사용하고 있는 중이다. 유한요소 모델을 사용하면 다양한 자세를 취하는 인체와 복잡한 차량 내부구조를 표현할 수 있을 뿐 아니라 태양복사, 공기유동 등에 의해 발생하는 영향이 신체 각 부위에 어떠한 영향을 줄 수 있는지 예측할 수 있게 된다.

Kansas 주립대학의 모델(KSU)은 신체조직 열전달 모델과 발한, 혈관운동, 오한 등의 체온조절 메커니즘 모델로 구성되어 있는데, 인간의 몸을 15개의 원통으로 분류하였으며 각 부위에서 피부, 근육, 뼈를 모델링하였다. 또한 심장과 동맥으로 연결

되는 혈액순환 뿐 아니라 모세혈관에서의 혈액순환까지 모사가 가능하여 혈액순환에 의한 신체내부열전달 효과를 자세히 반영할 수 있게 개발되었다. KSU는 인체뿐 아니라 의복의 영향도 반영이 가능하게끔 설계되었는데 NREL에서는 탑승자의 키, 몸무게, 성별, 나이와 같은 정보를 반영하여 KSU 모델을 다양한 탑승자군에도 적용이 가능하게끔 하는 생리학적 모델로 발전시켜 사용하고 있다.

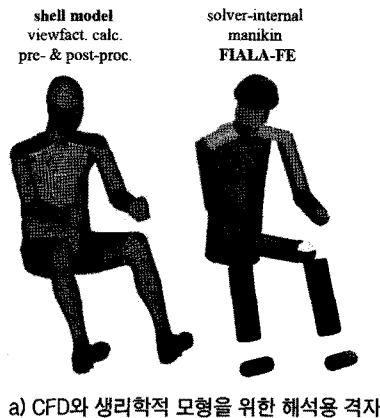
열쾌적성을 예측하기 위해서는 인간의 몸에서 일어나는 열전달 현상을 설명해 주는 생리학적 모델



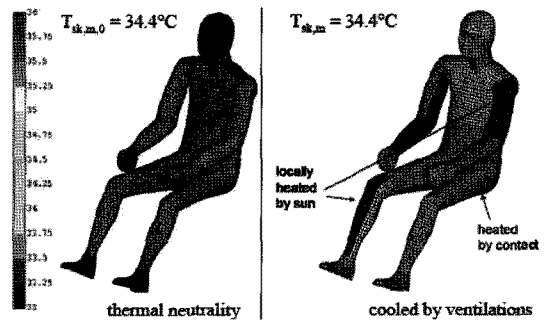
[그림 2] 열쾌적성 평가를 위한 신체열전달의 생리학적 모델링

뿐 아니라 생리학적 모델의 결과물로부터 인간의 감성을 예측할 수 있는 심리학적 모델 또한 필요하다. 이러한 심리학적 모델들은 수년간 개발되어 왔지만 이러한 모델들의 대다수는 정상상태, 균일한 온도 조건 등에서만 적용이 가능한 것들이 대다수인 실정이다. 그러나 최근에 개발된 몇 종류의 모델들은 정상상태이면서 불균일한 온도장에 적용할 수 있도록 개발되고 있다. 이러한 종류의 모델들은 EHT(Equivalent Homogeneous Temperature)를 사용함으로써 불균일 온도장의 문제점을 해결한 것이다. 하지만 현재로서도 비정상상태이면서 동시에 불균일한 온도장에서의 열쾌적성을 설명해 줄 수 있는 적절한 모델은 존재하지 않는다. 따라서 NREL에서는 동적이면서 불균일한 온도변화가 신체의 각 부위에서 어떠한 열적인 쾌적함을 줄 수 있는지, 그리고 신체의 각 부위에서 느껴지는 열쾌적성이 통합적으로 어떻게 탑승자의 감정에 영향을 줄 수 있는지에 대한 연구가 진행되고 있다.

최근에는 컴퓨터의 성능이 발전하면서 CFD에 생리학적/심리학적 모델을 접목시킨 연구도 활발히 진행되고 있다. 이는 인체의 표면에서 발생하는 복잡한 대류열전달 현상과 신체내부에서 발생하는 열전달 현상을 동시에 해석하려는 시도에서 시작되었다. 자동차 실내는 상대적으로 매우 좁고 A/C 시스템에서 나오는 공기가 탑승자에게 직접 충돌하기 때문에 탑승자가 느끼는 신체의 온도 불균

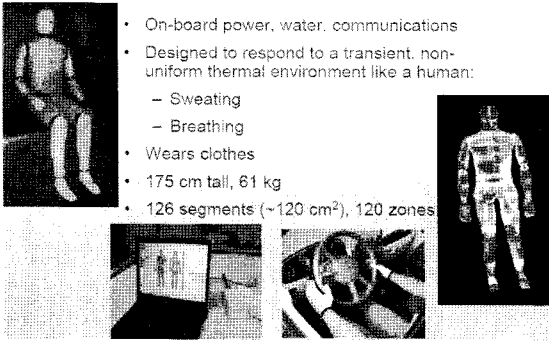


a) CFD와 생리학적 모형을 위한 해석용 격자



b) CFD를 통한 탑승자의 피부온도 해석결과

[그림 3] THESEUS-FE와 FIALA-FE를 활용한 차실내 열쾌적성 해석사례(Stefan Paulke and Stefan Wagner, Some Considerations on Global and Local Thermal Comfort Based on Fiala's Thermal Manikin in Theseus-FE)



[그림 4] 열쾌적성 평가를 위한 열마네킨 ADAM의 특성 (J. Rugh, D. Bharathan and L. Chaney, Predicting Human Thermal Comfort in Automobiles, NREL/PR-540-38236)

일성은 매우 크다. 따라서 이러한 대류현상에 의해 발생하는 불균일한 열전달 현상을 CFD를 통하여 계산해 주면 비교적 실제상황과 가까운 신체표면의 온도분포를 얻을 수 있게 된다. 따라서 이를 바탕으로 피부 표면에서 정의되는 열전달계수를 인체 생리학적 모델의 입력값으로 사용하게 되면 보다 정밀한 열쾌적성 분석이 가능하게 된다. 결과적으로 전체적인 계산과정은 인체 주변의 공기유동은 3-D 해석으로 접근하게 되며 인체내부의 생리학적 변화는 1-D로 접근하여 계산하게 되고 각 알고리즘은 상호간에 결과 데이터를 주고 받으며 계산이 진행된다.

이러한 기술은 델파이가 버클리대학과 함께 VTCE(Virtual Thermal Comfort Engineering) 기술을 개발하며 활발히 연구되고 있으며 여기서 개발된 해석기술은 다음과 같은 상황을 고려할 수 있다.

- (a) 실내 구조
- (b) 태양복사
- (c) 승객과 주변 환경과의 복사
- (d) 냉난방 장치
- (e) 인체 생리학적 모형

열쾌적성 평가를 위해 CFD를 활용한 해석적 접근 뿐만 아니라 열마네킨을 이용한 실험적 접근 또한 활발하게 진행되고 있다. 미국 NREL에서는 탑승자의 쾌적성을 만족시킴과 동시에 공조시스템의 에너지 소비량을 감소시키기 위하여 열마네킨을 개발하여 사용하고 있다. 즉 인간이 느끼는 열쾌적성을 만족

시키는 한도 안에서 에너지 소비를 최소로 줄이겠다는 것이 연구의 목표인 것이다. NREL에서는 이를 위해 크게 진보된 열마네킨인 ADAM을 개발하여 연구를 진행하고 있는데 ADAM은 전체 표면적이 120개의 영역으로 분리되어 각 영역에서 온도, 열, 땀 분포 등을 측정 또는 조절이 가능하며 각 영역에서의 온도는 4개의 써미스터(thermistor)를 이용하여 측정한다. 또한 호흡 및 땀으로 인한 발열을 모사할 수 있기 때문에 주변온도에 반응하는 인간의 체온조절 메카니즘까지 재현이 가능하며 자체 배터리가 있어 이동이 간편하고 관절부가 있어 다양한 인간의 자세를 재현할 수 있다. ADAM은 자동차 실내의 열쾌적성 연구용으로 개발된 것으로 그 특징을 요약하면 다음과 같다.

- (a) 다중 신체 분할로 인한 각 부위별 쾌적성 측정
- (b) 관절부 작동으로 착좌 가능
- (c) 디지털 제어
- (d) 호흡과 땀으로 인한 열전달 효과 재현
- (e) 빠른 열 응답성

### 열쾌적성을 고려한 차실내 공조기술의 국내 기술동향

국내의 열쾌적성 관련 연구는 건축물의 실내 환경을 제어하기 위한 목적으로 수행되어졌다. 특히 2000년 이후 에어컨 보급이 증가하면서 기존의 중앙식 공조방식을 벗어난 시스템에어컨 등의 개별식 공조방식이 도입되기 시작하였는데 이는 궁극적으로 재실자에 대한 열쾌적성을 더욱 증가시키기 위한 노력의 일환이었다. 또한 의류산업에서도 열쾌적성 관련기술이 연구되고 있는데 피복 내부의 온습도를 측정함으로써 인간의 감성에 맞춘 의류를 개발하는데 주력하고 있다.

국내의 열 쾌적성 관련기술개발은 언급한 바와 같이 대부분 건축환경 설계나 의류개발에서 관심을 두고 진행하고 있으나 이를 활용한 차 실내의 열쾌적성 관련 기술개발은 미진한 형편이다. 차 실내 환경은 건축물의 실내 환경과는 매우 큰 차이점을 가지고 있다. 즉 차 실내 열환경은 태양복사의 영향을 크게 받으며 온도가 매우 빠르게 변화한다는 점이다. 따라서 기존의 열쾌적성 관련 연구 자

료를 그대로 자동차에 접목시키기에는 무리가 따른다.

또한 인간 감성에 큰 영향을 끼치는 인체 표면의 온도측정을 위한 기술개발도 아직은 미흡한 실정이다. 일반적으로는 적외선 센서를 사용하고 있지만 온도분해능이 떨어지며 특히 의복내의 피부온도를 측정하는데 어려움이 있어 노출된 인체표면에 대해서만 측정이 가능하다. 반면 써미스터(thermistor)를 사용할 경우 온도를 정확하게 측정

할 수 있으나 접촉식이라는 단점이 존재한다.

결론적으로 국내의 차실내 열쾌적성 연구는 초기 단계이다. 하지만 탑승자의 온열감을 모니터링 하고, 감성에 따라 쾌적성과 감성을 제공해주는 열쾌적성 원천 기술을 개발 완료시 세계적인 경쟁력을 갖는 선도적 기술로 상대적 우위를 확보할 수 있으며 수출 자동차의 상품성 향상에도 크게 기여할 것으로 기대된다. ●