

자동차 실내환기 및 공조시스템

○ 박희경 | 쌍용자동차 기술연구소 CAE팀 책임연구원
E-mail : cae0144@chol.com
한화택 | 국민대학교 기계자동차공학부 교수
E-mail : hhan@kookmin.ac.kr

1. 머리말

자동차의 대량생산으로 선진국을 중심으로 공급이 포화상태에 이르면서 생산자 위주의 공급정책에서 소비자 우선의 산업으로 발전하게 되었고 자동차 실내의 환경제어에 있어서 승객의 편안함을 제공하기 위한 기술들을 도입하기 시작하였다.

특히 차량의 실내소음 저감의 방법으로 외부와의 소음전달 경로를 차단하기 위해 공기의 누설 정도를 크게 감소시키는 경향이 있으므로 차량내 오염발생에 의한 실내공기질 문제와 환기문제가 이슈가 되고 있다. 자동차 실내의 공기흐름은 외기도입과 오염물질 제거를 위한 환기측면과 온열 쾌적감 제공을 위한 냉난방 측면에서 HVAC시스템에 의하여 유도된다. HVAC시스템은 팬과 열교환기, 그리고 원하는 지점까지 공기를 이송시켜 주는 덕트 시스템과 급기가 이루어지는 디퓨저로 구성된다. 냉방은 R134a를 냉매로 사용하는 에어컨 시스템이 담당하고 난방은 엔진 냉각수중 일부를 이용하여 HVAC 시스템내의 히터를 통하여 공기를 가열한다. 자동차의 냉난방시스템에서의 냉방부하와 난방부하는 혹서지나 혹한지를 기준으로 계산하고 풍량과 온도는 냉난방 부하와 사람의 온열감을 기준으로 설정한다.

이때 실내의 온도분포가 심한 경우 온도차에 의

한 불쾌감을 가지게 되므로 승차자가 온도 및 풍향과 풍량을 조절하여 자동차 실내의 온도 및 공기흐름을 제어할 수 있도록 하고 있다. 디퓨저의 급기량과 방향에 따라 유동 형태가 크게 바뀌게 되므로 자동차 실내의 공기흐름을 미리 예측하여 설계에 반영하는 것은 거의 불가능하지만 디퓨저의 최대 풍량과 각 디퓨저의 적절한 풍량 배분을 목표로 하여 설계한다.

자동차의 실내와 같이 협소한 공간에서 디퓨저로 토출된 공기는 제트류의 형태로 모멘텀을 잃지 않고 승차자와 직접 부딪히고 차량의 가장 큰 열원인 태양 복사열과 함께 신체에 심한 열적 불균일 상태를 만들게 되어 열적 쾌적성을 실현하는 것은 쉽지 않다. 본고에서는 자동차 실내의 외기도입에 의한 실내공기질과 냉난방에 의한 열적쾌적성에 관하여 살펴보기로 한다.

2. 외기도입과 환기효율

2.1 외기모드와 순환모드

자동차의 승차자는 외부의 공기를 내부로 유입시키는 외기모드(outdoor air mode)와 내부의 공기를 순환시키는 순환모드(recirculation mode)를 조작을 통하여 선택할 수 있다. 이는 HVAC시스템내의

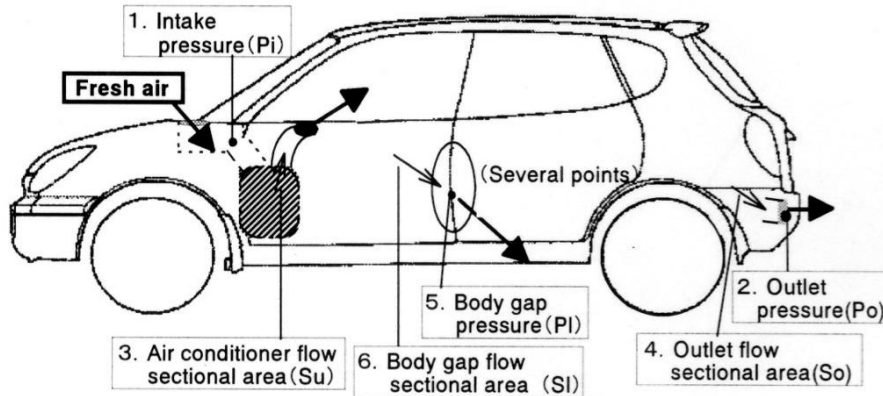


그림 1. 자동차의 환기 시스템

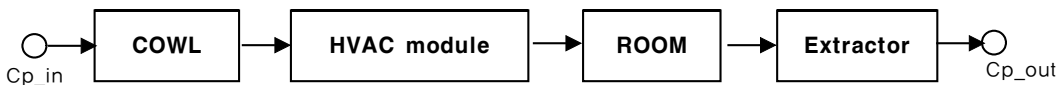


그림 2. 자동차의 환기 흐름도

공기흐름을 댐퍼와 액츄에이터를 이용하여 조정함으로써 가능하고 외기모드시 유입구를 통해 외부의 공기를 HVAC시스템으로 끌어들이고 차량 실내를 거쳐 뒤쪽의 배기구(extractor)를 통해 배출된다. 순환모드의 경우 계기판 안쪽에 있는 HVAC시스템으로 공기를 끌어들이며 재가열 혹은 재냉각한 후 디퓨저를 통하여 다시 급기 된다. 냉방시 외부의 공기를 도입하지 않는 순환모드의 경우 실내유입구는 보조운전석 아래에 위치하여 더워진 공기가 빨리 제거되지 못하는 단점이 있어 실내의 온도분포의 불균일이 심해지는 특성이 있고 외기의 유입은 매우 적어 실내공기질을 떨어뜨리는 요인이 된다. 여기서는 우선 외기모드시 환기시스템에 관하여 살펴보기로 한다.

2.2 환기 시스템의 구성

환기시스템은 외부의 공기를 자동차 실내로 공급하기 위한 시스템으로 주행시 자동차 외부로 공기의 흐름이 형성되며 자동차표면에서는 압력분포

가 발생하게 된다. 따라서 환기량은 유입구 및 배출구 위치의 압력에 따라 영향을 받게 된다. 유입구 및 배출구에서의 압력뿐 아니라 환기 시스템의 압력손실에 의해서도 환기량이 변화하므로 환기에 영향을 미치는 압력계수와 압력손실이 중요하다. 차량내부로의 공기유입은 그림 1에 주어진 인자들에 의해 결정된다.

자동차 기밀도가 높아짐에 따라 틈새를 통한 누설공기가 적다고 가정하고 입출구를 통해서만 공기가 유입 및 유출이 된다고 생각하면 그림 2.와 같은 환기경로를 만들 수 있다.

2.3 환기량과 실내공기질

환기를 위해서는 외부의 공기를 실내로 유입시키는 장치와 배출하는 장치가 필요한데 HVAC시스템을 작동시키지 않아도 최소한의 환기가 유지될 수 있도록 하는 것이 중요하다. 팬을 작동시키지 않는 경우 차량의 주행에 따른 표면의 압력차를 이용하여야 하며 HVAC시스템과 가까운 와이퍼 부분의

COWL부분에서 유입시키고 이때 비가 오는 경우를 고려하여 물방울이 HVAC내로 유입하지 않게 설계를 수행하여야 한다. COWL부분의 압력계수는 대략 0.2~0.3이며 차량의 형태에 따라 유입부분의 적절한 압력을 얻기 힘든 경우도 있다. 실내의 공기를 배출하기 위해서는 중립 또는 음압이 작용하는 곳에 배출구를 설치하며 일반적으로 뒤쪽 범퍼의 안쪽에 숨겨져 있고 배기가스 및 소음차단을 위해 얇은 고무재질의 판을 이용하여 실내의 압력에 따라 열리고 닫히게 만든다. 외기모드인 경우 고무판이 열려서 실내의 공기가 배출되지만 순환모드의 경우 바깥쪽의 배기가스와 소음이 실내로 유입되지 않도록 닫혀있게 된다. 환기에 사용되는 통로는 차체의 구조물의 빈 공간을 이용하며 통로를 적절하게 유지하는 것이 힘든 경우가 자주 발생하므로 초기 설계시 통로를 고려한다.

환기량은 환기경로를 따라 압력계수 C_p , 유로저항 K , 각 부분의 대표 단면적 A , 차량속도 V 를 이용하여 구할 수 있다. 각 부분에서의 유로저항을 시험이나 유동해석을 통하여 구하면 식 (1)을 이용하여 환기량을 구한다.

$$Q = \frac{V_{car} \sqrt{\Delta C_p}}{\sqrt{\left(\sum_{cowl} K \left(\frac{1}{A_{cowl}}\right)^2 + K_{HVAC} \left(\frac{1}{A_{hvac}}\right)^2 + \left(\sum_{ext} K \left(\frac{1}{A_{ext}}\right)^2\right)} \quad (1)$$

필요환기량은 도로교통법상 정해져 있지는 않으나 CO₂농도를 기준으로 졸음 및 두통이 발생되지

않는 최소의 환기량을 정하여 설정하며 환기량이 정해지면 각각의 부분의 통기저항을 적절히 설정하여 목표를 이루도록 한다. 다음은 서로 다른 네 차종의 순환모드와 외기모드에 대하여 2명이 탑승한 경우 20분이 지난 후의 산소농도와 이산화탄소 농도의 측정 예를 보인다. 이산화탄소 농도의 경우 일반 실내기준인 1000 ppm을 모두 넘고 있다.

2.4 환기효율

자동차의 이산화탄소 농도는 운전이 영향을 끼치고 협소한 공간 내에서 발생한 오염원은 불쾌감을 준다. 자동차와 같은 작은 공간에서 급기되는 곳은 여러 곳이 될 수 있고 사용자에게 따라 방향도 달라질 수 있다.

그러나 배기구는 자동차 설계시 고정되므로 배기효율에 보다 관심을 가지는 것이 타당하다 볼 수 있다. 따라서 차량의 배기구의 위치에 따른 배기효율을 이용하는 것이 좋다. 배기효율을 구하는데 있어 유용한 인자는 평균잔여 체류시간이다.

평균잔여 체류시간(local mean residual lifetime)이라 함은 임의의 점을 지나는 공기입자가 배기구를 빠져 나갈 때까지의 평균시간이므로 전공간의 유동의 방향을 역으로 취했을 때 배기구에서 들어오는 공기입자가 그 지점까지 도달하는 평균시간과 같다.

디퓨저에서는 제트 형태로 분출되고 실내 배기구에서는 포텐셜 유동형태를 지니고 있으므로 그

표 1. 차량내의 산소 및 이산화탄소 농도측정에

	City	Motorway	City	Motorway	City	Motorway
	Recirculation Mode		Outdoor Air Mode		Outdoor Air Mode (CO ₂ , ppm)	
Ford Falcon	20.5%	20.7%	20.5%		1300	
Holden Commodore	20.2	20.4%	20.4%	20.5%	1600	1300
Mitsubishi Magna	19.2%	20.3%	20.0%	20.6%	3000	1000
Toyota Camry	19.1%	19.4%	20.2%	20.4%	2300	1600

위치만 바꾸면 유동장의 형태가 달라지므로 반드시 정상적으로 해를 구한 후 유동장을 뒤집는 방법이 필요하다.

또 확산계수를 음으로 주어야 하나 분자확산보다는 난류에 의한 확산이 매우 크므로 확산계수를 그대로 두어도 무방하다 할 수 있다.

이러한 유동장을 뒤집어서 계산하면 평균잔여체류시간은 다음과 같이 간단하게 구할 수 있다.

$$LMR = \frac{C(\infty)}{\dot{m}} \quad (2)$$

여기서 \dot{m} 는 단위체적당 오염발생량이고 $C(\infty)$

는 역유동계산법에 의하여 실내 임의지점에서 계산된 정상상태 농도이다.

국소배기효율은 $\varepsilon = \tau_n / LMR$ 와 같이 정의되고, 실내평균 배기효율은 전 실내공간에 대한 평균값으로 정의된다. 여기서 τ_n 은 명목상 시간상수로 환기회수의 역수이다.

그림 3과 그림 4는 전산유체역학 프로그램을 이용하여 FOOT모드 경우에 대하여 배기효율을 해석한 예이며 FOOT모드일지라도 벤트 디퓨저(vent diffuser)와 디프로스터 노즐(defrost nozzle)로 전체 풍량 중 대략 30%정도를 급기하고 나머지 풍량은 아래쪽 디퓨저를 통하여 급기된다.

실내 배기구에서 멀수록 대체적으로 체류시간이

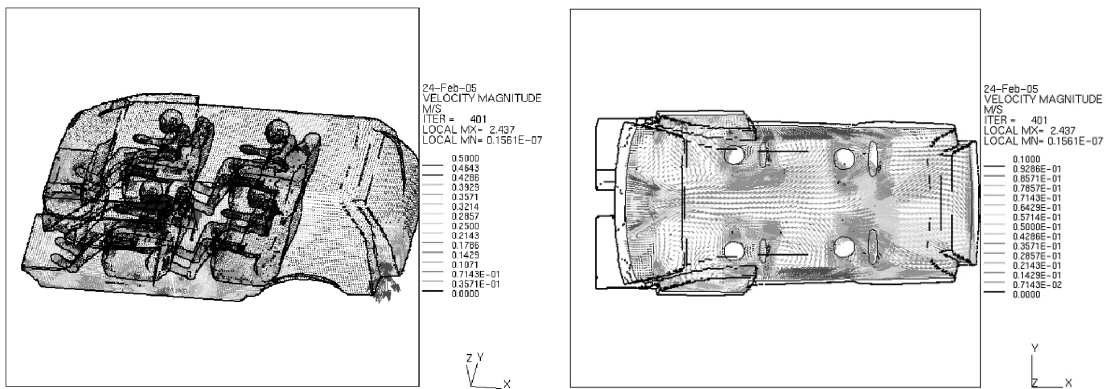


그림 3. 실내의 공기흐름 해석에

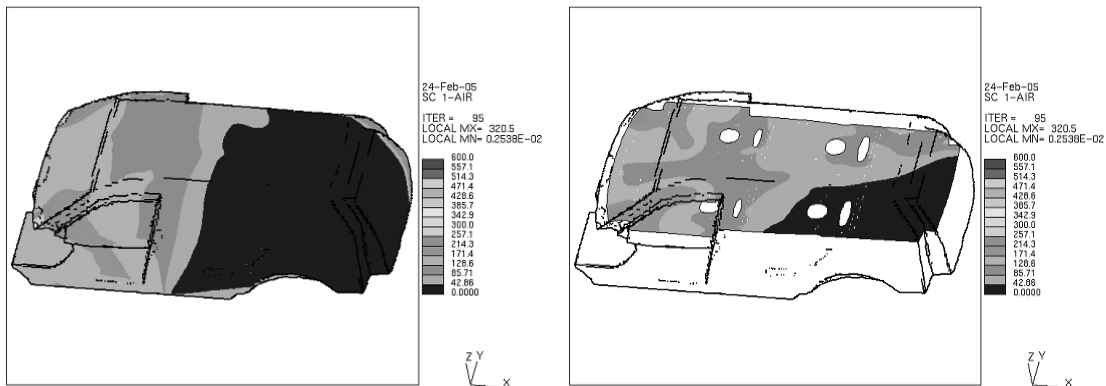


그림 4. 실내의 평균 잔여체류시간 해석에

증가하며 국소적으로 체류시간이 상당히 긴 부분이 발생하는 것을 볼 수 있다.

3. 냉난방과 열적 쾌적성

3.1 HVAC 시스템

HVAC 모듈 내부는 팬, 증발기와 히터, 에어필터 등의 주요부품과 공기의 흐름을 제어할 수 있는 여러 개의 댐퍼와 댐퍼를 작동시키는 액츄에이터 등으로 이루어져 있다. HVAC 시스템의 토출공기의 온도조절은 에어컨의 증발기를 통과하는 공기와 히터를 통과하는 공기를 적절하는 장치를 마련하여 수동으로 조절하는 방식과 오토에어컨처럼 자동으로 조절하는 방식이 있다.

냉방시 자주 사용되는 디퓨저는 계기판에 있으며 HVAC시스템에서 디퓨저까지의 덕트가 계기판 바로 뒤로 지나가게 된다. 차량의 크기에 따라 다르지만 1인당 대략 최대 90CMH의 풍량으로 급기하며 승차자가 팬의 전압을 변화시켜 풍량을 조절하는 방식으로 되어 있다. 계기판에 있는 디퓨저는 각각의 풍량을 조절하는 댐퍼가 장착되어 있고 각 디퓨저의 풍량 조절이 가능하고 풍향도 조절할 수 있어 승차자가 풍량과 풍향을 결정하기 때문에 자동

차 실내의 기류의 예측은 매우 어렵다.

각각의 디퓨저에서의 풍량은 실내의 쾌적성 및 성능에 맞추어 적정하게 배분하고 디퓨저의 토출 온도가 각 디퓨저마다 차이가 나지 않도록 설계한다. 각 디퓨저에서 요구되는 풍량을 만족하기 위해서는 덕트시스템의 설계가 매우 중요하며 자동차의 덕트 루트(route)는 안전 및 자동차의 성능에 영향을 미치는 차체구조에 영향을 주지 않는 범위와 실내의 미관을 고려해서 설정한다. 덕트의 단면적 대비 길이가 적은 편이므로 압력저항은 길이에 의한 것 보다는 형상의 변화에 의해 좌우된다.

따라서 원하는 풍량을 얻기 위해서 각 덕트의 단면적을 일정하게 유지하는 것이 중요한 설계 변수가 되고 형상에 의한 압력저항을 적절히 유도하여야 한다. 협소한 공간 내에서 많은 풍량이 급기되는 경우 드래프트(draft)가 발생하여 불쾌한 느낌이 발생하므로 샤워덕트를 이용하여 공기가 낮은 속도로 토출하게 함으로써 이 현상을 방지하는 방법도 있다.

3.2 급기 방식과 성에 제거

HVAC 시스템의 급기 방식은 크게 VENT모드와 FOOT모드 그리고 DEF모드로 구분된다. VENT모드의 경우 약간의 풍량을 아래쪽 디퓨저로 보내고

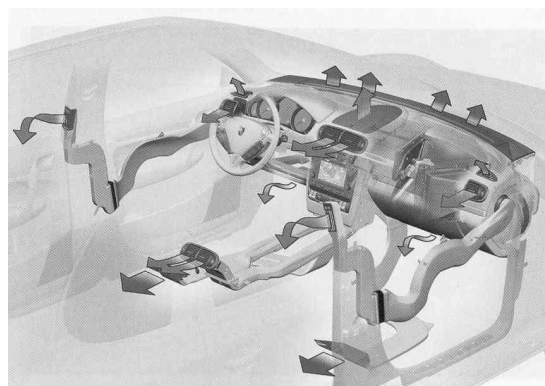
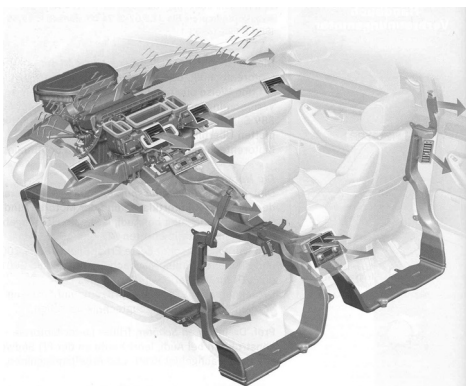


그림 5. HVAC 덕트와 토출 개략도

대부분의 풍량은 계기패널 쪽의 디퓨저를 통하여 공기를 토출한다. 뒷좌석의 쾌적성을 고려하여 뒷좌석으로 충분한 풍량을 보내기 위해 앞좌석 사이에 있는 콘솔박스에 디퓨저를 설치하고 덕트를 통하여 콘솔박스까지 공기를 이송한다. 고급차량의 경우 그림 5에서 보는 것과 같이 B필라 상단부에 디퓨저를 설치하여 보다 안락함을 제공하기도 한다. 공기가 토출되면 직접, 간접적으로 승차자의 주위를 흐르면서 자동차 실내의 공기온도를 상승 혹은 하강시키고 덥혀진 공기는 부력에 의해 위로 상승하고 차가운 공기는 아래로 내려가게 되고 순환 모드시 유입구의 위치에 따라 공기의 흐름형태가 달라지므로 대부분의 차종에서 취입구가 일반적으로 계기판 안쪽에 있으므로 더워진 공기가 떠있는 상태가 지속되게 된다.

FOOT모드의 경우 대부분 난방시 사용되는 공기 토출 방식으로 디프로스터 노즐과 벤트 디퓨저에 대략 30%의 풍량을 보내고 대부분 풍량은 아래쪽 덕트를 통하여 사람의 발 위치로 공기를 토출시켜 난방시 보다 쾌적성을 느끼도록 한다.

앞쪽 디퓨저는 HVAC에서 직접 토출하고 뒤쪽의 승차자를 위한 디퓨저는 앞좌석의 아래에 있는 것이 보통이다. 기류 형태 중 VENT모드와 FOOT모드를 섞어서 쓰는 혼합모드가 있다. 회사마다 시험기준은 다르지만 협소한 실내공간에 요구되는 풍량이 크기 때문에 실내의 온도 불균일을 해결하

는 것이 힘든 것이 보통이며 승차자의 쾌적성을 근거로 하여 실내 온도 측정점을 설정하고 측정된 공기의 온도차가 걱정 범위 내에 들어가도록 하고 있다. 순환모드, 혹은 일부 외기모드에서도 승차자에서 발생하는 습기가 실내와 실외의 온도차에 의해 유리면에 수증기가 응결하여 시야를 방해하게 된다. 이를 제거 혹은 방지하기 위해서 FOOT모드에서 10~20%정도의 풍량을 디프로스터 노즐을 통하여 토출시킨다.

DEF모드는 유리면 안쪽의 습기제거 혹은 겨울철 앞 유리면의 바깥쪽의 성에를 제거하는 기능으로 디프로스터 노즐은 계기판의 상단에 앞유리 아래에 위치하여 있다. 겨울철 앞유리 면에 성에가 달라붙거나 눈이 와서 어는 경우 운전이 방해가 되므로 미국 자동차 안전법규에 FMVSS 103에서는 성에 제거 능력을 법적으로 규제하고 있다.

이 법규에서는 일정량의 성에를 유리면에 도포하고 성에제거 모드를 이용하여 시인성을 확보할 수 있는 성에 제거영역을 정하고 있으며 요즘은 이러한 법규만족 여부뿐만 아니라 녹이는 도중의 미관도 고려하여 디프로스터 노즐의 형상설계를 수행하고 있는 추세이다. 디프로스터 노즐에서의 전형적인 유동은 아래에서 보는 것과 같이 앞유리의 하단면을 목표지점으로 하여 공기를 토출하고 유동이 앞유리를 따라 흐르면서 유리에 열량을 공급하는 방식이다.

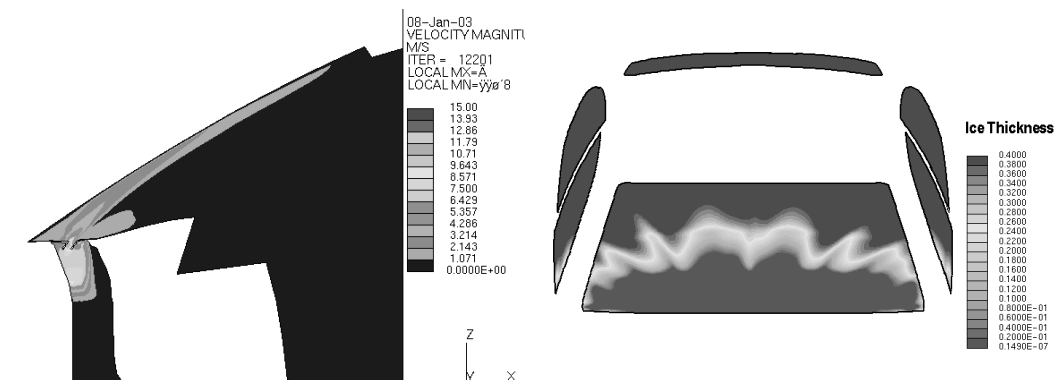


그림 6. 디프로스터의 토출공기 흐름 및 성에제거 패턴 예

3.3 열적 쾌적성

자동차 실내의 공기흐름은 승차자에게 열적인 쾌적함을 제공하는 것이 주 목적이므로 공기흐름에 의한 열적 쾌적성을 고려하지 않을 수 없다. 일반 건물구조물에서 유도된 열적 쾌적성 인자인 예상 온열감반응(PMV: predicted mean vote)을 이용하여 자동차 내부의 PMV의 분포를 구할 수 있으나 자동차 실내와 같이 협소한 공간에 적용하기에는 여러 가지 문제가 있다.

협소한 공간 내에 사람의 존재에 따라 기류가 변화하고 온도의 불균일성과 복사 열전달의 불균일성에 의해 PMV의 기초가 되는 인체의 열평형을 구할 수 없기 때문이다. 디퓨저와 사람 사이의 거리가 매우 적어 승객의 위치에서의 평균속도를 구하기가 매우 어렵고 인체의 위치에 대한 평균 온도를 정하기 매우 곤란하다.

자동차 실내의 열공급원 중 가장 큰 비중을 차지하는 태양열 복사의 경우 매우 심한 불균형이 발생하므로 평균복사온도(MRT: mean radiant temperature)의 정의를 사용하기 힘들다. 이때 사용되는 것이 열마네킹(thermal mannequin)이며 국외에서 다양한 연구가 진행되고 있다.

열마네킹 중 단순한 모델이 등은 열마네킹이며

표면에 온도를 사람의 평균표면온도인 34°C 정도로 일정하게 유지시키고 손실되는 열량을 측정하여 PMV를 계산하는 방법으로 인체 모형에서 열전달 계수 및 신체 표면의 온도가 다르기 때문에 단순한 대류 열전달 계수를 사용하는 것은 의미가 없어 보정 계수를 사용하는 것이 타당하다.

유효온도(T_{eq})는 온열 쾌적성의 인자 중 중요한 인자로서 열마네킹의 표면온도(T_{sk})와 공급된 열량(Q),

보정된 열전달계수(h_{cal})를 이용하여 $T_{eq} = T_{sk} - \frac{Q}{h_{cal}}$ 와 같이 구할 수 있다. 열마네킹의 기술이 점점 발전하고 있으며 혈액 시스템과 근육, 뼈 등을 모델화하여 보다 상세한 쾌적성 분포를 구하는 작업이 수행되고 있다. 그림 7은 열마네킹의 의복 표면온도와 열손실량의 해석예를 보인다.

4. 맺음말

자동차 실내의 공기환경과 온열환경은 승차자의 쾌적성 뿐만 아니라 안전운전과도 직결되는 문제이다. 소음차단을 위해 자동차의 기밀도가 높아지고 내장재로부터의 오염발생에 의해 소위 새차증후군의 문제가 발생하고 있다. HVAC시스템의 팬이 가동되지 않을 때에도 실내공기질을 유지하기

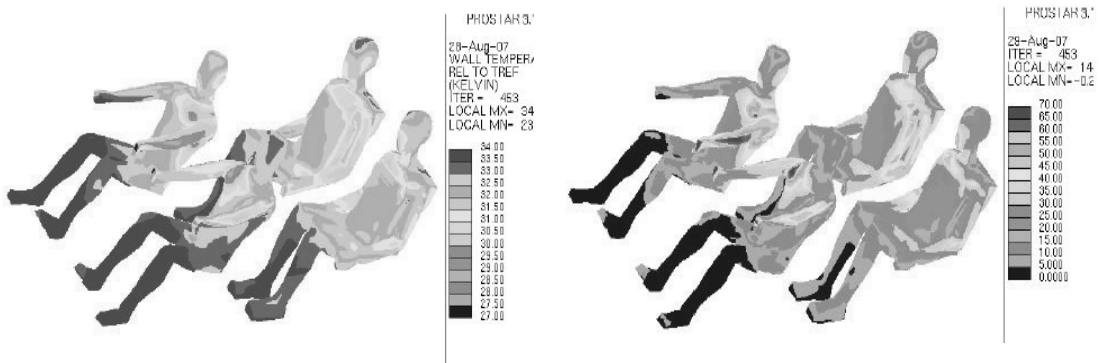


그림 7. 열마네킹의 Tclo 및 열손실량 해석예

위하여 최소한의 외기도입이 필요하다.

환기시스템의 설계에 있어서 차량 외부 압력분포를 이용하여 유입구나 배출구의 위치선정이 중요하고, 적절한 공기순환을 유도하고 오염물질의 제거를 위하여 주로 배기성능에 근거한 환기효율을 고려해야 한다.

차량 내부의 온습도 제어는 승차자의 열적 쾌적성 유지와 앞유리의 성에 발생방지 측면에서 중요하다.

특히 좁은 공간에서 토출 기류에 직접적으로 노출되고 태양열 복사와 같은 불균일 열원이 존재하는 환경이기 때문에 열적 평형에 추가하여 국부적인 열적 불균일성을 해소하는 것이 필요하다.

차량의 실내환경은 건축환경과 다른 나름대로의 독특한 특성이 있기 때문에 적절한 실내기류를 형성하고 열적쾌적성을 유지하는데 있어서 기술적으로 해결해야 할 흥미로운 과제가 많이 있다.

앞으로 차량의 고급화와 승객의 편안함을 제공하기 위한 기술로서 차량의 실내환경 제어기술에 대한 많은 관심이 요구된다.

- 참고문헌 -

1. 이정운, 박희경, 2007, “차량실내공간의 쾌적성에 관한 연구,” 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집.
2. 한국자동차공학회, 1999, ‘자동차 기술 핸드북,’ 한국 자동차 공학회.
3. 한화택, 1992, “환기효율에 관한 수치해석적 접근,” 공기조화 냉동공학회지, 제21권, 제4호, pp. 271-281.
4. 한화택, 1992, “난류유동해석을 통한 환기효율의 수치해석적 연구,” 공기조화 냉동공학 논문집, 제4권, 제4호, pp. 253-262.
5. Nilsson, H., Holmer, I., Bohm, M., and Norren, O., 1999, “Definition and theoretical background of the temperature,” CABCLI 1999 seminar.
6. Proceedings of the 3rd International Meeting, 1999, “Thermal Manikin Testing 3IMM,” National Institute for Working Life.