

(논문) SAE NO. 97370013

## TLC와 컬러화상처리를 이용한 자동차 실내 환기유동의 온도장 측정

### Temperature Field Measurement of Ventilation Flow in a Vehicle Interior

윤 정 환\*, 이 상 준\*\*, 김 기 원\*\*\*  
J. H. Yoon, S. J. Lee, K. W. Kim

#### ABSTRACT

The variations of the temperature field in a passenger compartment were measured by using a HSI true color image processing system and TLC(Thermochromic Liquid Crystal) solution. This temperature measurement technique was proved to be useful for analyzing the ventilation flow. The flow field in the passenger compartment was visualized using a particle streak method with pulsed laser light sheet. The temperature field and flow field in the passenger compartment were affected significantly by the ventilation mode. The panel-vent mode heating had shorter elapse time to reach a uniform temperature than the foot-vent mode under the same ventilation condition and nonuniformity inside the passenger compartment could be minimized effectively by using the bi-level heating mode. The temperature increase rate in the rear passenger compartment was lower than the front compartment, especially in the vicinity of the rear seat occupants' knee level.

주요기술용어 : TLC(Thermochromic Liquid Crystal), Temperature field(온도장), Color Image Processing(컬러화상처리), Vehicle Interior Flow(차체 내부유동), Ventilation(환기)

#### 1. 서 론

최근 들어 자동차의 고속주행성능과 안정성 뿐만 아니라 자동차 실내의 쾌적성과 승차감을 중시하는 방향으로 수요자의 선호도가 변화하고 있

다. 자동차 실내에서 승객이 느끼는 쾌적성은 실내 온도와 환기 유동의 속도, 피부와 접촉하는 공기의 습도, 탑승자의 활동량과 의복, 그리고 radiation 효과 등의 함수로 표현된다. 승객의 쾌적성을 향상시키기 위해서는 우선 자동차 실내 유동장 및 온도장 변화에 대한 정확한 지식이 요구된다.

자동차 실내 유동은 매우 복잡한 3차원 난류 유동구조를 가지고 있기 때문에 자동차 실내 환

\* 포항공과대학교 대학원

\*\* 정회원, 포항공과대학교 기계공학과

\*\*\* 현대자동차

기유동에 관한 기존의 연구는 주로 컴퓨터 시뮬레이션과 간단한 모델을 이용한 유동가시화에 의존해 왔다. Hara<sup>1)</sup>는 2차원과 3차원 자동차 모형을 이용하여 실내 공기유동을 수치해석하였으며, Han<sup>2)</sup>은 2-equation 난류모델을 사용하여 자동차 실내 냉각유동을 해석하였다. Wan<sup>3)</sup>은 환기구의 위치가 승객의 쾌적성에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. 실험적 연구로는 Ishihara<sup>4)</sup> 등이 PSV(Particle Streak Velocimetry)기법을 이용하여 자동차 차체 모형과 실차 내부유동의 속도장을 측정하였다. 반면, 자동차 내부의 온도장 측정에 관한 실험적인 연구는 거의 행해지지 않았다.

현재 온도측정에 많이 사용되고 있는 점측정(point measurement)방법은 유동의 흐름을 방해하거나 한 순간 한 점에서의 물리량만을 측정할 수 밖에 없다. 이 가운데 열전대(thermocouple)가 정확하고 가격이 저렴하기 때문에 가장 보편적으로 널리 사용되고 있다. 그러나 자동차 실내 환기유동과 같은 비정상 온도장측정에서는 기존의 점측정방법을 사용하기에는 무리가 따르므로 한 순간에 전체 온도장(temperature field)을 측정할 수 있는 새로운 측정기법을 필요로 한다. 정상유동의 온도와 속도분포의 경우 측정 센서를 일정간격으로 이송시키면서 속도장과 온도장을 측정할 수 있으나 자동차 내부 유동과 같은 비정상 유동을 해석하기 위해서는 순간적인 속도장과 온도장의 변화를 계측하는 것이 필요하다. 최근들어 컴퓨터와 전자산업 및 화상처리 기술의 급격한 발달로 인하여 이전에는 불가능하였던 복잡한 유동장 및 온도장의 정량적인 측정이 가능하게 되었다. 온도장 측정의 경우 온도에 따라 색깔이 변화하는 감온성 액정(Thermochromic Liquid Crystal, 이후부터는 TLC로 약칭함)을 이용한 실험 방법들이 개발되어 높은 정확도와 우수한 공간분해능을 가지고 만족할 만한 연구 결과들을 제공하고 있다.

Klein<sup>5)</sup>은 천이경계층의 유동가시화 연구에 TLC를 최초로 사용하였으며, Lemberg<sup>6)</sup>는 비정상상태 조건하에서 이와 유사한 실험을 수행하였다. 그러나, 이들이 사용한 캡슐화되지 않은

TLC의 경우 그 분자구조가 온도와 전단응력의 영향을 받아 변화함으로써 온도측정의 정확도가 떨어졌다. McElderry<sup>7)</sup>는 이를 극복하기 위해 캡슐화된 TLC를 이용하여 Klein과 유사한 실험을 수행하여 좋은 결과를 얻었다. TLC를 이용한 초기의 온도장 측정은 대부분 일반 카메라를 이용한 정상적인 유동가시화를 통하여 이루어졌으나, 최근에는 컴퓨터와 화상처리기술을 이용하여 가시화된 결과를 분석함으로써 정량적인 온도 측정이 가능하게 되었다. Kimura<sup>8)</sup>는 표면온도 측정에만 사용되던 TLC를 열유동의 내부 온도 측정에 응용하였다. 캡슐화된 TLC를 유체와 혼합함으로써 TLC가 유동의 움직임을 나타내는 추적입자(tracer) 및 온도센서로 사용할 수 있다. 이 방법은 열유동 내부의 유동해석과 온도장 측정에 효과적이다.

본 연구에서는 TLC와 컬러화상처리장치를 이용한 온도장 측정기법을 확립하고 이를 자동차모델의 실내환기 유동에 적용하여 자동차 실내 환기유동의 온도장 변화를 해석하고자 한다. 또한, 자동차 실내 환기 유동을 파악하여 쾌적한 환기 시스템 설계를 위한 기반을 구축하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 TLC(thermochromic Liquid Crystal)

본 실험에 쓰여진 TLC는 Cholesteric 액정으로 온도에 따라 색깔을 선택적으로 반사한다. Fig.1은 TLC의 분자구조를 나타낸 것으로 나선형 분자구조가 1회전하여 동일한 방향을 갖게 되는 두 층 사이의 거리를 1피치(pitch)로 정의하며, 이 피치는 온도가 증가하게 되면 감소한다. 따라서 온도가 증가함에 따라 TLC는 낮은 파장의 빛을 선택적으로 반사하게 된다. 온도에 따른 이러한 변화는 발색범위(color play region)내에서 가역적으로 일어나기 때문에 온도 측정용 센서로 사용하는 것이 가능하다. Fig.2는 온도에 따른 TLC의 색깔변화를 보여주는 것으로 온도가 증가함에 따라 빨강색에서, 노랑, 초록 그리고 파란색으로 차례로 바뀌게 된다.

일반적으로 컬러영상은 RGB(Red, Green, Blue)

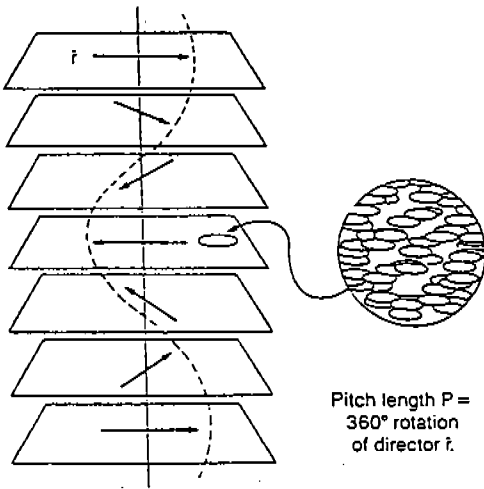


Fig.1 The cholesteric liquid crystal structure

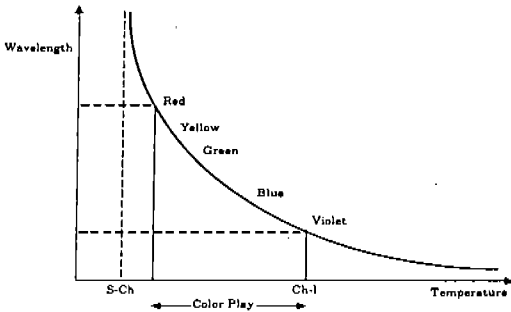


Fig.2 A typical reflected wavelength and temperature response of TLC

나 HSI(Hue, Saturation, Intensity)라는 인식이 가능한 특성값으로 표현되어진다. 본 실험에서는 색을 표현하는 특성치중에서 TLC 컬러영상의 hue값을 실제온도와 보정하여 사용하였다. 열전대로 측정된 온도와 같은 위치에서의 TLC 컬러를 동시에 기록한뒤, 실제온도와 기록된 hue값 사이의 상관관계를 계산함으로써 TLC컬러영상의 온도정보를 정량적으로 구할 수 있다.

### 2.2 컬러화상처리 시스템

Fig.3은 본 실험에 사용되어진 컬러화상처리 시스템의 구성도를 나타낸다. 모든 실험과정과 온도보정은 칼라 3-CCD(Sony DXC-930)카메라로 기록되어 NTSC 신호방식으로 VCR(Panasonic AG-7750)에 저장된다. 저장된 영상을 분석하기 위해 NTSC신호를 디코더에 의해 RGB의 세가지 신호로 분리한 후, DT2871프레임그래버(frame grabber)를 이용하여 각 신호를 256레벨(8bit)의 디지털값으로 저장한다. RGB로 구성된 컬러정보는 프레임그래버에 자체 내장된 RGB/HSI 컨버터에 의해 HSI값으로 변환되어진다.

### 2.3 자동차 모델

Fig.4는 자동차 실내 환기유동을 해석하기 위해 본 연구에서 사용되어진 1/10 스케일의 자동차 모델을 나타낸 것으로 흡입 vent와 exhaust

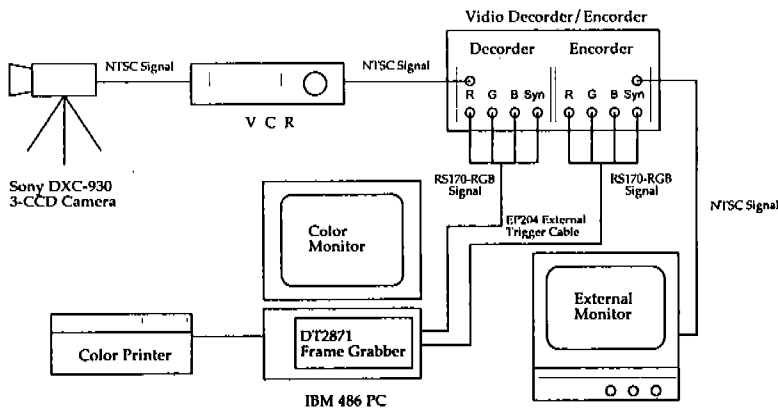


Fig.3 Schematic diagram of a true color image processing system

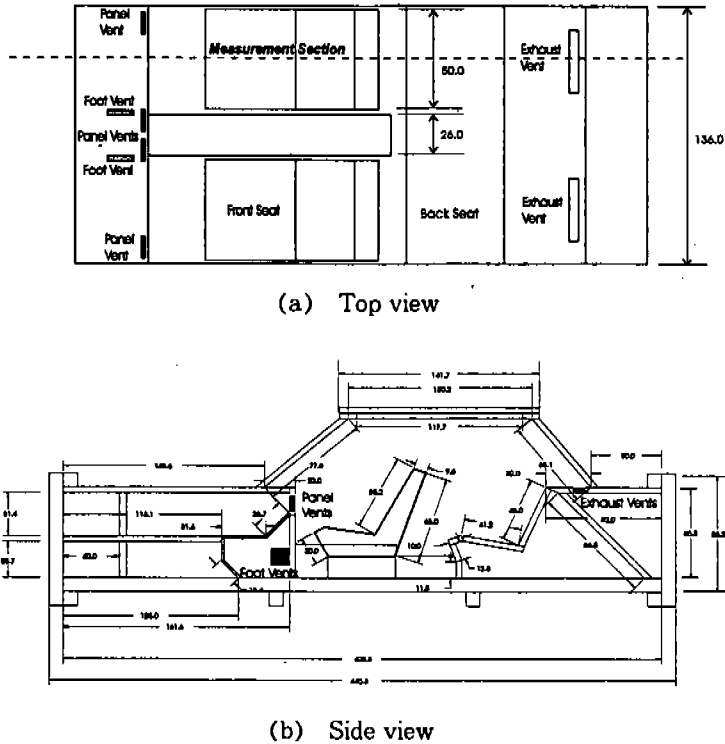


Fig.4 Passenger compartment model and ventilation vents(unit:mm)

vent의 위치도 함께 보여주고 있다. 모델 좌우의 관측장 부분은 선명도가 뛰어난 plexiglas로 제작되었으며 나머지 부분은 아크릴로 제작되었다. 환기를 위한 vent는 운전석과 조수석 앞쪽의 대쉬보드(dashboard) 패널에 4개의 panel-vent가 있으며, 조수석과 운전석 아래의 발목 높이에 2개의 foot-vent가 뚫어져 있다. 모든 환기 vent는 8×8mm 크기의 정사각형 형태로 하였다. 배기구(exhaust-vent)는 뒷유리 아래 뒷좌석 선반에 좌우대칭으로 2개가 위치하고 있다. 온도장 측정과 유동가시화는 조수석의 중앙을 가로지르는 2차원 단면을 조명하여 조수석쪽의 plexiglas를 통하여 측정하였다.

#### 2.4 온도장측정

Fig.5는 온도장측정에 사용된 실험장치를 찍은 사진으로 실험장치는 자동차 모형, 두 개의 항온조, 컬러 3-CCD카메라(Sony DXC-930),

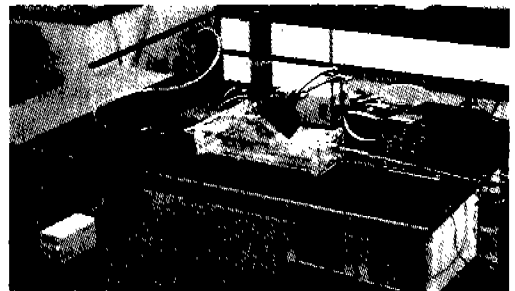


Fig.5 Photograph of the experimental apparatus

컬러화상처리시스템, 할로겐 백색광원, 열전대 및 다점온도측정장치(Keithley 740)로 구성되어 있다. 항온조(NESLAB RTE221, 211)는 ±0.01℃의 정확도로 온도조절이 가능하며, 항온조 내부에 내장된 펌프를 이용하여 작동유체를 자동차 내부로 순환시킨다. 조명으로는 단열필터가 내장

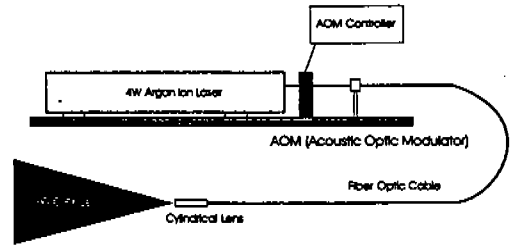
되어 있어 복사열전달을 차단할 수 있는 상온의 백색광(cold light)을 이용하였으며, 광케이블과 원주형 렌즈를 이용하여 조수석을 지나는 중앙단면을 조명하였다. 가열된 유체가 흡입vent로 분출된 직후부터 시간경과에 따른 비정상상태의 온도장변화를 측정하기 위하여 발색범위가 4°C인 Hallcrest사 TLC제품(BM100/R29C4W)을 사용하였다. 사용된 TLC입자의 평균직경은 100 $\mu$ m이며 증류수와의 질량비가 0.05%가 되도록 혼합하여 사용하였다.

측정된 TLC의 컬러영상과 실제온도와의 관계식을 구하기 위하여 본 실험에 앞서 보정실험을 수행하였다. 보정실험은 항온조를 이용하여 자동차 모델 내부의 온도가 일정할 때까지 작동유체를 순환시킨 뒤 차체모델 윗쪽으로부터 자동차 실내로 열전대를 삽입하여 온도를 측정함과 동시에 그 온도에 해당하는 TLC 컬러영상을 획득하여 VCR에 기록하였다. TLC의 컬러영상은 온도만의 함수가 아니라 조명과 카메라의 위치에도 영향을 받기 때문에 본 실험과 보정실험에서의 조명 및 카메라 상태를 동일한 조건으로 유지하였다. 본 실험에서는 먼저 저온( $T_L=29.1^\circ\text{C}$ )으로 유지되어 있는 첫번째 항온조의 밸브를 열어 차체 실내온도를 균일하게 유지시킨 후 높은 온도( $T_H=30.1^\circ\text{C}$ )로 설정된 두번째 항온조의 밸브를 열어 자동차 차체 내부로 물을 순환시킨다. 더운 물이 순환되어 차체 내부로 더운물이 들어가기 시작하는 시간을  $t=0$ 로 설정하여 조수석 단면에서의 TLC 색깔변화를 CCD 카메라로 촬영하였다.

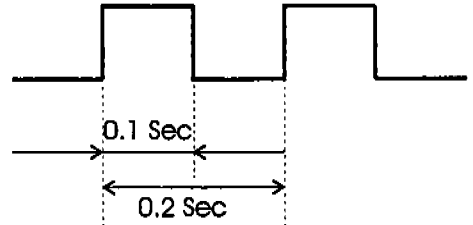
2.5 유동가시화

정상상태의 자동차 차체 내부 환기유동을 pulsed laser light sheet를 이용한 입자유적법(particle streak method)으로 가시화하였다. Fig.6은 유동가시화에 사용된 laser light sheet와 pulse timing 선도를 보여주고 있다.

추적입자로는 직경 200 $\mu$ m의 TLC입자를 사용하였으며, 온도장 측정과 동일한 유량에서 실험하였다. 4W Ar-ion 레이저를 조명으로 사용하였으며 AOM(Acoustic optic modulator)을 이



(a) Laser light sheet



(b) Timing diagram of laserbeam gating

Fig.6 Laser light sheet and pulse timing diagram

용하여 레이저빔을 chopping하였다. AOM은 광학적인 chopper로써 굴절율이 큰 매질에 초고주파음을 광학적 주파수에 공진시켜 레이저빔을 차단시키는 장치이다. 작동유체가 유입된 뒤 정상상태에 이를 때까지 충분히 기다린 후 일반 카메라를 이용하여 1초간의 노출로 촬영하였다.

3. 결과 및 토의

TLC를 이용한 온도장 측정에 필요한 TLC의 색깔과 온도사이의 상관관계를 구하기 위하여 열전대가 설치된 위치에서 51x51 pixel의 컬러정보를 평균하여 hue값을 구하고 열전대로 실제온도를 측정하였다. Fig.7은 TLC용액의 hue값과 실제온도사이의 보정결과를 보여주고 있는데, 온도가 증가함에 따라 hue값이 증가하며 hue값이 커질수록 기울기가 크게 증가하고 있다.

이와 같이 구해진 TLC 보정식을 본 실험에서 측정된 TLC 컬러영상의 hue값에 대입하여 실제온도를 구하였다. 컬러영상의 intensity와 satu-

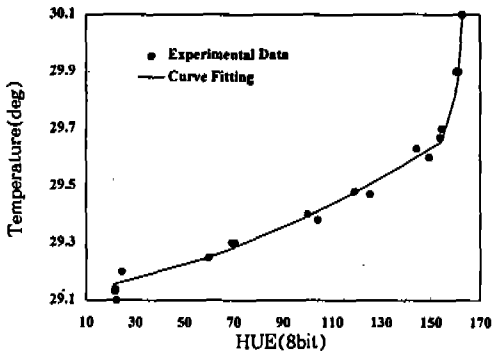


Fig.7 Relationship between TLChue and true temperature



Fig.8 Axial image of ventilation flow in a car interior with panel-vent mode heating at P=0.6GPM

ration은 조명의 세기와 입자의 단위 면적당 분포갯수에 따라 변화하기 때문에 온도 측정에 사용하기 어렵다. 그러나, intensity가 너무 낮은 경우 색깔정보의 정확도가 떨어지기 때문에 본 실험에서는 일정한 intensity 이하의 색정보는 무시하였으며 저역필터(low-pass filter)를 이용하여 노이즈를 제거하였다.

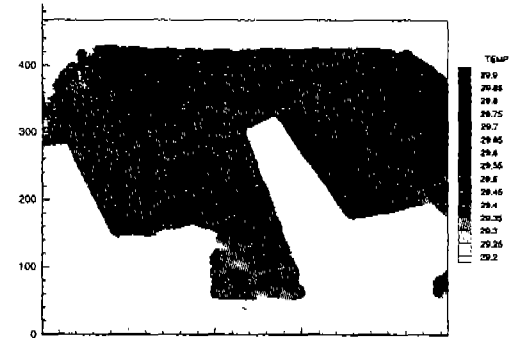
Fig.8은 foot-vent를 닫고 pentel-vent의 유량을 p=0.6 GPM(Gallon per Minute)으로 유지시켜 얻은 정상상태의 유동가시화 결과를 나타낸 것으로 레이저빔을 chopping하여 조수석 중앙단면에 있는 입자들의 유적(streak)을 보여주고 있다. Fig.9는 29.1℃로 유지되어 있는 자동차 실내로 30.1℃의 환기유동이 흡입vent로 들



(a)  $\tau=20\text{sec}$



(b)  $\tau=40\text{sec}$



(c)  $\tau=60\text{sec}$

Fig.9 Temperature field variations in a passenger compartment with panel-vent mode heating at P=0.6GPM

어오기 시작하는 시간으로부터 20초 간격으로 측정된 온도장 분포를 나타내고 있다. panel-vent에서 분사된 높은 온도의 유동이 앞좌석에 부딪친 후 아래방향과 윗방향으로 나누어져 진행

하기 때문에 조수석의자 등받이를 따라 상하로 높은 온도의 영역을 관찰할 수 있다. 뒷방향으로 향한 유동은 자동차 천정에 부딪친 후 천정을 따라 앞유리창 방향으로 향하여 나아가는 유동과 뒷쪽 compartment로 나아가는 유동으로 갈라진다. 앞방향으로 향한 유동은 천정과 앞유리를 따라 흐르다가 승객 눈높이 위치에 중심을 둔 시계 방향의 큰 와동(vortex)을 형성한다. 반면 뒤로 향한 유동은 앞좌석 뒷면 상부에 반시계방향의 큰 와동을 형성한다. 따라서 의자 윗부분의 천정을 따라서 다른 부분에 비해 좁은 온도영역을 관찰할 수 있다. 반면 앞좌석 승객의 눈높이 부분과 가슴 앞부분은 와동의 중심에 위치하여 운동량 전달이 늦어 상대적으로 낮은 온도를 유지하고 있다. 그리고, 뒷좌석과 앞좌석 승객의 무릎 아래부분 또한 환기유동의 속도가 매우 낮기 때문에 열전달이 원활하지 못함을 알 수 있다. 뒷좌석 승객의 무릎 아래부분에서는 유동이 앞좌석 의자 밑을 통하여 앞으로 향하고 있기 때문에 환기효율을 크게 떨어뜨리는 요인이 되고 있다. 뒷좌석 compartment의 경우 전반적으로 앞좌석에 비해 낮은 온도분포를 보이고 있으며 시간에 따른 온도의 상승도 상대적으로 느리게 나타나고 있다.

Fig.10은 panel-vent를 잠그고 foot-vent만을 유량  $F=0.6$  GPM으로 환기시켰을 때 자동차 실내의 유동가시화 결과이며 Fig.11은 같은

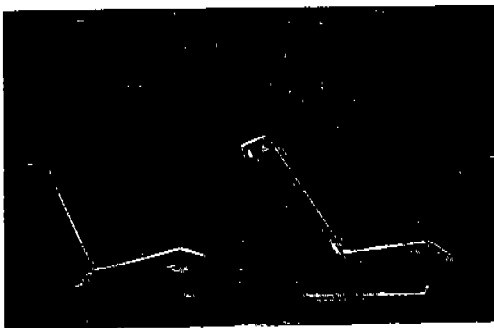


Fig.10 Axial image of ventilation flow in a car interior with foot-vent mode heating at  $F=0.6$ GPM

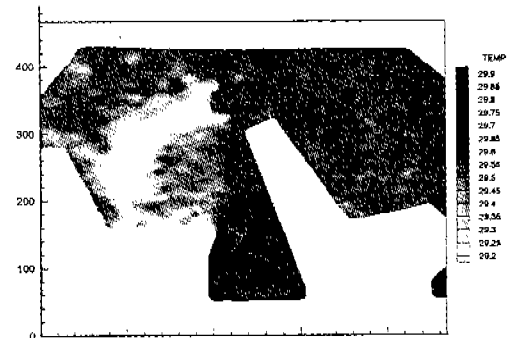
유량조건에서 시간에 따른 온도장 변화를 보여주고 있다. Foot-vent의 위치가 조수석과 운전석의 발목 근처이기 때문에 분사된 작동유체의 대부분은 앞좌석 의자 밑으로 흐르고 나머지 일부



(a)  $\tau=20$ sec



(b)  $\tau=40$ sec



(c)  $\tau=60$ sec

Fig.11 Temperature field variations in a passenger compartment with foot-vent heating at  $F=0.6$ GPM

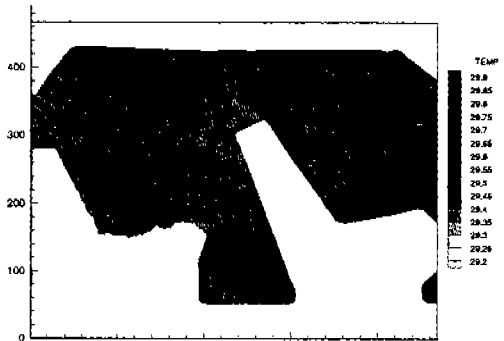
는 앞좌석 가장자리 부위에 부딪친 후 위로 향하게 된다. 앞좌석 의자 아랫부분을 통과한 유체는 뒷좌석 아랫부분에 부딪친 후 앞좌석의 뒷부분을 따라 상승하여 반시계 방향의 와동을 형성한다. 따라서 가장 먼저 온도가 상승하는 부분은 조수석의 아랫부분과 뒷좌석 승객의 무릎 아랫부분이다. Fig.9에서와 마찬가지로 차체 실내에 형성된 와동의 중심부는 속도가 낮고 혼합이 잘 일어나지 않기 때문에 온도가 가장 늦게 상승하게 된다. 앞유리창의 아랫부분은 foot-vent에서 직접 위로 올라온 더운 유동과 뒷좌석을 통해 천정에 부딪쳐 다시 앞쪽으로 향한 유동의 상호작용으로 주위보다 상대적으로 빨리 더워지는 것을 관찰할 수 있다.

Fig.12와 Fig.13은 bi-level 모드로써 panel-vent와 foot-vent의 유량을  $P=0.6\text{GPM}$ ,  $F=0.6\text{GPM}$ 으로 같게 하여 자동차 실내를 환기시킬 때 속도장과 시간에 따른 온도장 변화를 나타낸다. 전체적인 온도장 변화는 Fig.11의 foot-vent mode보다는 Fig.9의 panel-vent mode의 결과와 유사하다. 이는 panel-vent에서 나온 환기유동이 조수석을 향해 직접분사되고 조수석쪽의 온도변화는 foot-vent의 영향을 상대적으로 적게 받기 때문이다. 반면 뒷좌석 승객의 무릎 아랫부분에서는 조수석 의자 아래를 통하여 뒷좌석 쪽으로 유입된 유동에 의해 속도가 증가하고 시계방향으로 회전하는 와동을 생성시키게 된다.

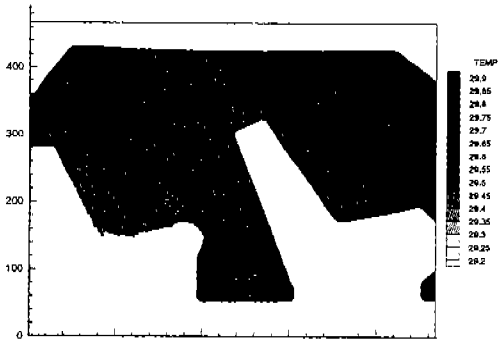
이 경우에 해당하는 유동가시화 결과를 Fig.8과 비교해 보면 앞좌석 밑을 통해 앞으로 향하던 유동이 사라졌기 때문에 차체내부에서 재순환되는 유동이 감소함을 알 수 있으며 이는 환기효율의



(a)  $\tau=20\text{sec}$



(b)  $\tau=40\text{sec}$



(c)  $\tau=60\text{sec}$

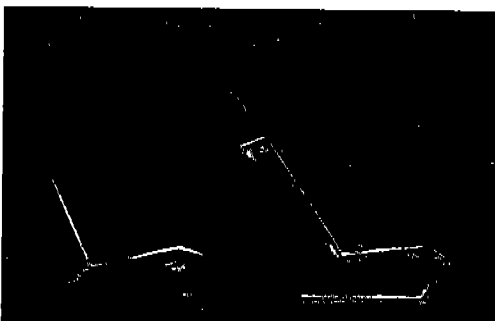


Fig.12 Axial image of ventilation flow in a car interior with bi-level mode heating at  $P=0.6\text{GPM}$ ,  $F=0.6\text{GPM}$

Fig.13 Temperature field variations in a passenger compartment with bi-level mod heating a  $P=0.6\text{GPM}$ ,  $F=0.6\text{GPM}$



증가를 의미한다. 또한 뒷좌석 전면 상단부분에 존재하는 와동의 속도가 증가하고 혼합이 촉진되어 차체내부가 균일한 온도분포를 갖는데 걸리는 시간이 감소하게 된다.

위의 3가지 환기모드를 서로 비교해 보면, 같은 유량조건하에서 foot-vent mode보다 panel-vent mode를 사용할 경우 상대적으로 빠른 시간 내에 균일한 실내온도를 얻을 수 있었다. 환기개시 후  $t=60$ 초에서의 결과를 비교하여 보면 foot-vent mode의 경우(Fig.11(c)) 뒷좌석 부분에 낮은 온도구간이 많이 존재하는데 비해, panel-vent mode의 경우(Fig.9(c)) 일부분을 제외하면 거의 균일한 온도분포를 보여주고 있다. 반면 panel-vent와 foot-vent를 조합으로 환기시키는 bi-level vent mode의 경우 뒷좌석 부근의 온도변화와 속도에 크게 영향을 미쳐 앞의 두경우에 비해 환기효율이 뛰어난 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 온도에 따라 색깔이 변화하는 감온성 액정과 컬러화상처리 기법을 이용하여 정량적으로 온도장을 측정할 수 있는 측정기법을 개발하고, 이를 자동차 실내 환기유동에 적용하였다. 또한 자동차 차체 내부유동을 펄스형 레이저 시트로 조명하여 입자유적(particle streak)은 가시화하였다. 실험결과, 같은 유량조건에서 panel-vent를 이용하는 쪽이 foot-vent쪽보다 전체적으로 균일한 온도분포를 얻는데 걸리는 시간이 짧았다. 뒷좌석의 경우, 앞좌석에 비해 온도상승에 많은 시간이 걸렸으며 와동의 중심부에서 열전달이 원활하지 않았다. 반면 panel-vent와 foot-vent의 조합인 bi-level mode로 환기시킬 경우 자동차 실내 온도분포를 보다 균일하게 할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 현대자동차 승용제품개발연구소의 과제지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. J.Hara, "Computer Simulation of Passenger Compartment Airflow", SAE 881749, 1988.
2. T. Han, "Three-Dimensional Navier-Stokes Simulation for Passenger Compartment Cooling", *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 10, No.2, pp. 175~186, 1989.
3. J. W.Wan and J. Kooi, "Influence of the Position of Supply and Exhaust Opening on Comfort in a Passenger Vehicle", *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 12, No. 5/6, pp. 588~597, 1991.
4. Y. Ishihara, "Analysis of Interior Airflow in a Full-Scale Passenger-Compartment Model Using a Laser-Light-Sheet Method", SAE 920206, 1992.
5. E. J. Klein, "Liquid Crystals in Aerodynamic Testing", *Astronaut Aeronaut*, Vol. pp. 70~73, 1968.
6. R. Lemberg, "Liquid Crystals for the Visualization of Unsteady Boundary Layers", *3rd Canadian Congress of Applied Mechanics*, Calgary, 1971.
7. E. D. McElderry, "Boundary Layer Transitions on a Flat Plate", *Air Force Flight Dynamics Lab Report*, FDMG TM 70~73, 1970.
8. R. Kimura, "Visualization of Temperature Fields of Water by Liquid Crystals", *Proc. 2nd. Symp. on Flow Visualization*, Japan, pp. 99~102, 1974.