PIV를 이용한 실차 내부 환기유동의 정량적 속도장 측정

이진평* · 이상준†

PIV Measurements of Ventilation Flow inside a Passenger Compartment

Jin Pyung Lee and Sang Joon Lee

Abstract. The improvement of climatic comfort is crucial not only for passenger comfort but also for driving safety. Therefore, a better understanding on the flow characteristics of ventilation flow inside the passenger compartment is essential. Most of the previous studies investigated the ventilation flow using Computational Fluid Dynamics (CFD) calculations or scale-down water-model experiments. In this study, the ventilation flow inside the passenger compartment of a real commercial automobile was investigated using a Particle Image Velocimetry (PIV) velocity field measurement technique. Under real operating conditions, the velocity fields were measured at several vertical planes for several ventilation modes. The experimental data obtained from this study can be used to understand the detailed flow characteristics in the passenger compartment of a real car and to validate numerical predictions.

Key Words: PIV(입자영상유속계), Passenger compartment(탑승공간), Velocity field(속도장), Ventilation flow(환기유동)

1. 서 론

과학기술의 발달에 따라 승용차의 주행 안정성이 크게 향상되었으며, 최근 들어 생활수준이 향상됨에 따라 탑승자들이 느끼는 냉·난방 부문의 쾌적성이 중요하게 인식되고 있다. 이에 따라 자동차 실내 환기유동의 쾌적성이 소비자들의 자동차 선정 시 고려하는 주요 인자 중 하나가 되었다. 이러한 탑승자가 느끼는 쾌적성의 향상을 위해서는 차량 실내의 환기유동에 대한 정확한 정보가 필수적이다.

자동차 내부 환기유동에 대한 기존의 연구는 주로 간단한 2차원 모델을 이용한 정성적인 유동가시화^(1, 2, 3, 6, 8, 9) 혹은 수치해석적 방법^(4, 5, 6, 7, 9)에 의해 이루어졌다. 예를 들어, Yoon & Lee⁽¹⁾는 PIV 속도장 측정기법을 축소모형을 이용한 물(water)실험에 적용하여 차량내부의 환기유동을 정량적으로 가시화하였다. Qi 등⁽²⁾은 유속측정 센서를 일정간격으로 이동시키면서 환기유동의 속도

분포 변화를 측정하였다. Aroussi & Aghil⁽³⁾은 축소모형을 이용하여 승용차 내부구조의 변화와 운전자의 탑승 유무 등이 자동차 내부 환기유동에 미치는 영향에 대해 실험적으로 연구하였으며, 같은 형상에 대한 수치해석 결과와 비교하기도 하였다. Han⁽⁴⁾은 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식들을 이용하여 자동차 탑승공간 내부 환기흐름의 속도장과 온도분포를 계산하였으며, 이공희 등⁽⁵⁾은 CFD를 이용하여 냉방모드시의 차량 내부의 온도분포를 계산하였다. Arossi 등⁽⁶⁾은 상용프로그램인 Fluent를 이용하여 전면유리 부분은 물론 탑승부 전체의 유동장을 계산하고, 이를 축소모형과 thermo-graphy를 이용하여 구한 실험결과와 비교하였다. Kataoka & Fusada⁽⁷⁾은 탑승객이 느끼는 쾌적성은 수치해석과 실험을 통해 도출하고자 하였다.

수치적 해석방법은 유동가시화 실험과 상호 보완적으로 사용될 수 있지만, 계산 시 격자의 개수, 격자 방식, 벽 부근 경계조건 등에 따라 실제와 다소 상이한 결과를 보여주기도 한다. 또한, 축소 모델을 이용한 실험에서는 실제 자동차와는 달리 곡선 형태의 전면유리나 대시보드(dash-board) 등의 구조물을 직선화하였다. 또한, 축소모형과 CFD에 사용된 차량 모델들은 핸들이나

†포항공과대학교 기계공학과 교수

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

*포항공과대학교 환경공학부

의자, 대시보드 등 실제 차량의 복잡한 내부 구조를 완벽하게 재현한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서 실제 자동차 내부의 공기벤트(air-vent) 노즐에서 토출되는 환기 유동을 제대로 측정하고 해석하기 위해서는 실차를 이용하여 실제 운전조건하에서 실험을 수행하는 것이 이상적이다.

본 연구에서는 자동차 탑승공간 내부 환기흐름의 유동특성을 정확하게 해석하기 위해 실차 내부 환기유동의 속도장을 PIV 기법으로 측정하였다. 실험에 사용된 모델은 실제 운전이 가능한 국내 H사의 NF Sonata이며, 실제와 똑같은 운전 조건에서 실험이 이루어졌다. 본 실험에서는 패널모드(panel mode), 풋모드(foot mode), 믹스 모드(mix mode) 등 3가지 환기모드에 대해 자동차 실내 환기유동을 연구하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험모델

Fig. 1은 본 실험에 사용하기 위해 일부 개조한 실차 모델과 실험장치의 구성을 보여주고 있다. 레이저를 조사하기 위하여 차량의 천정 부위를 제거하고, 차량 내부 유동을 카메라로 촬영할 수 있게 조수석 쪽의 앞문과 뒷문, 앞쪽 펜더(fender) 부위를 제거하였다. 제거된 부분에는 지지용 철재를 붙이고, 빛이 잘 투과하도록 고강도의 강화유리로 대체하는 방식으로 개조하였다. 강화유리를 가시화용 관측창으로 사용하여 빛의 왜곡을 줄이고, 실험과정에서 유리에 달라붙는 추적입자를 쉽게 제거할 수 있었다. 또한, 차량 내부로 추적입자를

Fig. 1. Photographs of the real passenger car model and experimental setup.

Fig. 2. Measurement planes of the car model.

Fig. 3. Schematic diagrams of three different operating modes.

주입하고 필요 시 전선 등을 차량 내부로 집어넣기 위해 차체 바닥에 구멍을 뚫었는데, 사용하지 않을 경우에는 이 구멍을 막았다. 자동차 외장의 일부분을 제외하고는 실차를 그대로 사용하였기 때문에 실제 주행도 가능한 상태이다. 본 연구에서는 이렇게 가시화 실험용으로 개조된 실차를 이용하여 실제 상황에서와 똑같이 시동을 걸고 실험조건에 따라 환기모드를 작동시킨 후, 유동이 정상상태에 도달하면 실험을 수행하였다. 환기 유동의 속도장은 Fig. 2에 나타난 것처럼 운전석의 중앙단면과 자동차 전체의 중앙단면, 조수석의 중앙단면 등 3개의 수직 단면에서 측정하였다. 실험에 사용된 환기 모드는 대시보드의 전면부에서 바람이 나오는 패널 모드와 탑승자의 발쪽으로 바람이 나오는 풋 모드, 위의 두 가지 모드가 동시에 작동하는 믹스 모드 등 총 3 가지의 운전모드 조건에 대해 실험이 이루어졌다(Fig. 3). 패널 모드의 경우, 공기가 나오는 공기벤트의 각도를 수평방향과 수직방향으로 다양하게 조절할 수 있으나, 본 실험에서는 이를 수직, 수평으로 고정시켰으며, 모든 실험은 같은 유량 조건과 실내순환 모드 상태에서 수행하였다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 200 mJ Nd:YAG 레이저, 4대의 2K×2K CCD 카메라, 영상처리장치, 컴퓨터, 동기장치 등으로 구성된 PIV 시스템이 사용되었으며, 추적입자로 올리브 오일을 사용하였다. 여러 광학부품들을 거쳐 형성된 1 mm 두께의 레이저 평면광(light sheet)을 차량의 천정을 통해 수직방향으로 탑승공간 내부를 조사하였으며, 카메라의 노출 시간은 0.1 ms로 하였다.

자동차 실내 전체의 속도장을 구할 경우, 측정범위가 넓어 한 대의 카메라로 전체 단면을 찍게 되면 개개의 입자들을 구분하지 못하고 광학적 왜곡 현상도 발생하게 된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 고해상도 CCD 카메라 여러 대를 설치하고 이들을 동기시켜 넓은 관측영역의 입자영상을 취득하였다⁽¹⁰⁾. 여러 대의 CCD 카메라를 일정 간격으로 배치하고 동기장치를 이용하여 유동장 전체를 동시에 측정하는 이러한 실험기법은 대면적의 측정단면에 대한 실험에 적합하며, 카메라 렌즈에 기인한 영상왜곡도 줄일 수 있다⁽¹¹⁾. 본 실험에서는 4대의 카메라를 측정영역에 따라 정사각형태로 배치하였다. 카메라 한대의 관측영역(field of view)을 26×26 cm²로 설정하였으며, 전체 측정영역의 크기는 50×50 cm²이었다. 카메라를 여러 대 사용할 경우 생기는 경계면에서의 정합문제를 해결하기 위해 각 카메라 측정영역이 10%정도 겹치게 하였다. 이러한 거대화상용 PIV 시스템을 이송시켜가며 자동차 실내를 여러 부분으로 나누어 속도장을 측정하고 이를 하나의 그림으로 합쳐 최종결과를 얻었다.

3. 결과 및 토의

3.1 패널 모드에서의 환기유동

Fig. 3은 패널모드에서 측정한 각 단면에서의 평균 속도장결과이다. 운전석 중앙 단면에서의 실험 결과(Fig. 4(a))를 보면, 운전석의 머리 부분에서 시계 방향으로 움직이는 큰 와류가 발생되며, 이 중 일부는 앞좌석 부분으로 다시 되돌아 가지만, 대부분은 자동차 내부 천정을 따라 뒷좌석 쪽으로 빠르게 빠져 나가는 것을 볼 수 있다. 차량의 전면 유리 쪽은 상대적으로 유속이 느리며, 운전석의 허리부분에서는 반시계 방향으로 회전하는 와류가 형성된다. 뒷좌석 쪽에는 상대적으로 큰 반시계방향으로 회전하는 와류가 형성되며, 와류의 중심이 뒷좌석 중앙위치로부터 약간 좌측에 형성되

Fig. 4. Mean velocity contours and streamlines inside the passenger compartment for the panel-vent mode.

어진다. 전체적인 공기 흐름이 앞좌석의 뒷면과 뒷좌석을 경계로 하여 움직이는 것을 볼 수 있다. 뒷좌석의 다리부분에서 약한 와류가 형성되며, 뒷좌석의 공기들이 앞좌석과 바닥면의 사이 공간을 통해 다시 앞좌석 공간으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

자동차 전체의 중앙 단면(Fig. 4(b))에서는, 공기가 지붕에서 내려오는 것 같은 유동패턴은 볼 수 있다. 이것은 자동차의 운전석과 조수석의 양쪽 맨트에서 나온 공기들이 중앙에서 만나기 때문인 것으로 보인다. 앞좌석 쪽에서 공기는 앞쪽으로, 뒷좌석쪽은 뒤쪽방향으로 움직인다. 앞좌석과 뒷좌석 모두 반시계방향으로 회전하는 와류가 형성되며, 운전석과 조수석 시트들 사이의 빈 공간으로 머리와 가슴 부위에서는 뒷좌석 방향으로, 허리부분에서는 공기가 앞좌석 쪽으로 움직이는 현상을 볼 수 있다.

조수석 중앙단면에서의 유동(Fig. 4(c))을 보면, 앞좌석 허리부분에서 운전석에서와 마찬가지로 반시계방향

의 와류가 형성되고 있다. 앞좌석 다리부분에서는 유동이 앞쪽 1시 방향으로 향하는데, 이것은 내부순환모드에서 차체 내부의 공기를 빨아들이는 흡기벤트가 이 곳에 위치해 있기 때문이다. 뒷좌석 쪽에서는 반시계 방향으로 회전하는 두 개의 와류가 형성되며, 다리 부분에서는 운전석에서와 유사하게 조수석과 바닥 사이의 빈 공간으로 공기가 앞좌석 공간으로 이동함을 볼 수 있다.

본 연구에서는 기존 연구들^(1,4)과는 달리 운전석과 조수석에서의 유동구조가 다르게 나타났다. 특히 조수석 중앙단면에서의 유동은 운전석에 비해 상대적으로 복잡한 유동구조를 보여주고 있으며, 속도의 크기 또한 보다 큰 값을 가진다. 이는 상대적으로 단순한 대시보드 형상과 흡기벤트의 존재에 기인한 것으로 보인다. 운전석에서는 운전대와 계기판 등 복잡한 구조물들로 인하여 유동이 크게 교란을 받아 그 흐름이 원활하지 못한 반면, 조수석의 경우 대시보드의 형상이 단순하여 환기 유동의 발달이 원활하며 앞좌석 승객 다리부분에 존재하는 흡기벤트의 존재로 인해 유동이 가속되어짐을 알 수 있다.

패널 모드에서는 전체적으로 뒷좌석 공간에서 유속이 앞좌석 공간보다 빠른 것으로 나타났다. 이는 패널 덕트를 빠져나온 공기가 대부분 뒷좌석 공간으로 빠져나가고⁽¹¹⁾, 이들이 다시 앞쪽으로 나오면서 속도가 크게 줄어들었기 때문이다.

3.2 풋 모드에서의 환기유동

Fig. 4는 풋모드일 때 각 측정단면에서의 평균 속도장 결과를 보여주고 있다. 실험에 사용한 차량에는 운전석과 조수석의 발쪽으로 향하는 대시보드의 아래쪽에 위치한 풋벤트(foot-vent)와 뒷좌석 쪽으로 바람을 내보내는 운전석과 조수석 좌석밑의 풋벤트 등 총 4개의 공기벤트가 있다. 운전석의 중앙 측정단면을 보면 (Fig. 5(a)), 뒷좌석의 승객 발 부분에서 뒤쪽으로 향하는 강한 유동이 형성되어 있다. 이것은 운전석 아래 부분에 존재하는 공기벤트에서 나오는 유동으로 뒷좌석과 충돌 후 뒷좌석 등받이를 따라 움직이고 있다. 그리고 아래쪽으로 내려오면서 뒷좌석의 중앙부분에 약한 와류를 형성하게 된다. 앞좌석 쪽에서는 자동차의 내부구조물로 인해 정확하게 관찰할 수는 없지만, 아래에서 위쪽방향으로 올라오는 유동을 통해 앞쪽 풋벤트에서 만들어진 유동이 앞좌석과 대시보드를 따라 위로

Fig. 5. Mean velocity contours and streamlines inside the passenger compartment for the foot-vent mode.

올라오는 유동현상을 볼 수 있다.

자동차의 중앙단면(Fig. 5(b))에서는 뒷좌석 승객의 발부분에서 위로 올라오는 공기흐름을 볼 수 있다. 이것은 앞쪽 풋벤트에서 나온 공기들이 중앙에서 만나 위로 상승하는 현상으로 보인다. 이렇게 위로 상승한 공기들은 일부는 뒷좌석 후방으로 빠져나가고 대부분은 운전석과 조수석의 사이 공간을 통해 앞좌석 공간으로 이동하고 있다.

조수석의 중앙단면(Fig. 5(c))에서도 운전석 중앙단면과 마찬가지로 뒷좌석 승객의 발 부분에서 뒤쪽으로 향하는 강한 유동과 시계방향으로 회전하는 와류를 볼 수 있다. 하지만, 와류의 위치가 운전석에서처럼 탑승부 위에 위치한 것이 아니라 뒷좌석의 무릎부근과 앞좌석 사이에 생성되고 있다. 또한 벤트에서 토출된 공기가 뒷좌석 공간으로 이동하지 못하고, 빠르게 앞좌석 공간으로 이동하는 현상도 관찰되었다. 앞좌석 공간에서는 가슴부분에 약한 시계방향의 와류가 형성되고 대부분의

공기가 아래쪽으로 이동하고 있다. 이것은 조수석 승객의 무릎 앞부분에 존재하는 실내순환용 흡기벤트에 기인한 것으로 보인다. 조수석의 발 부근에서는 앞쪽 흡기벤트 쪽으로 이동하는 유동과 함께 바닥 쪽에서 약하게 뒤쪽으로 이동하는 유동현상이 관찰되고 있다.

운전석과 조수석 중앙단면 뒷좌석 공간에서는 풋벤트에서 토출되는 공기 흐름을 볼 수 있지만, 앞좌석 공간에서는 풋벤트에서 토출되는 공기 흐름을 볼 수 없다. 이것은 뒷좌석 공간으로 향하는 풋벤트의 경우 운전석과 조수석 각각의 중앙에 위치하지만, 앞좌석 공간으로 향하는 풋벤트의 경우 운전자석의 오른쪽과 조수석의 왼쪽에 위치하여 하나의 중앙측정단면만으로 가시화하기에는 어려움이 있었다.

3.3 믹스 모드에서의 환기유동

Fig. 5는 패널모드와 풋모드를 동시에 작동시켰을 때, 탑승부 내부의 평균속도장 결과를 보여주고 있다. 운전석 중앙단면(Fig. 6(a))과 조수석의 중앙단면(Fig. 6(c))을 보면, 탑승공간의 윗부분에서는 패널모드의 특징이 나타나고, 아랫부분에서는 풋모드의 특징이 지배적으로 나타나고 있다. 운전석과 조수석 중앙단면에서 나타나는 역시 유동의 차이는 핸들과 같은 내부 구조물들과 앞좌석 승객 무릎 전방에 존재하는 흡기벤트 때문인 것으로 보인다. 모든 환기 모드에 있어서, 운전석의 핸들과 같은 차체 내부 구조물이 유동을 교란시킴을 알 수 있다. 자동차 중앙단면(Fig. 6(b))의 뒷좌석 공간의 경우, 패널모드의 특징과 유사하게 유동패턴이 나타나고 있다. 하지만, 앞좌석의 탑승공간에서는 전혀 다른 유동패턴을 보여주고 있다. 뒤쪽에서 내려온 공기가 일부는 전면유리와 대시보드를 따라 아랫부분으로 내려가고, 일부는 뒷좌석 공간으로 빠져나가거나, 뒷좌석 쪽에서 넘어온 공기와 충돌하여 다시 앞쪽공간으로 이동하게 된다. 패널모드와 풋모드가 동시에 작동하는 믹스 모드의 경우, 두 가지 환기모드가 각각 윗부분과 아랫부분에서 지배적으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

속도장의 공간 분포를 보면, 다른 모드에 비해 고르게 분포되어 있다. 이것은 두 가지의 모드가 동시에 작동함으로써, 각각의 벤트에서 나온 공기가 차량 내부의 위와 아래 공간으로 동시에 움직여 보다 활발한 혼합을 일으키고, 난류혼합에 기인하여 각각의 벤트에서 토출된 공기가 전체적으로 고르게 분포하기 때문이다. 이로 인해 탑승공간 내부의 쾌적성도 전체적으로 고르게

Fig. 6. Mean velocity contours and streamlines inside the passenger compartment for the mix mode.

나타날 수 있음을 유추할 수 있다. 믹스모드에서 풋 벤트부위의 속도는 풋벤트를 단독으로 사용한 경우에 비해 작은값을 가진다. 이것은 같은 유량조건에서도, 패널 벤트와 풋 벤트 두 방향의 덕트로 공기가 유출되기 때문에, 풋 벤트쪽에서는 상대적으로 적은 양의 공기가 공급되기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 여러 가지 환기모드에서 대한 실차 내부 환기흐름을 정량적으로 가시화하고 유동특성을 분석하였다. 본 연구를 위해 실차의 일부를 투명창으로 개조하여 실험모델로 사용하였고, 큰 측정단면에 적합한 거대 화상용 PIV 시스템을 이용하여 환기유동의 속도장을 측정하였다. 본 연구를 통해 얻은 실험결과는 수치적 해석연구의 검증 자료로 사용되고 환기유동의 유동특성을 이해하는데 도움이 될 것으로 기대된다. 본

연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 실제 운전상황과 같은 환기조건에서 실차의 탑승 공간 내부 환기흐름의 유동특성을 분석하였다.
- 2) 환기모드 변화에 따라 환기유동은 크게 다른 3차원 유동특성을 보였으며, 조수석과 운전석 중앙단면에서 유동구조가 다르게 나타났다. 이것은 핸들과 대시보드, 흡기벤트 등과 같은 자동차 실내 구조물들이 비대칭적으로 배치되어 있기 때문으로 보인다.
- 3) 믹스모드에서는 패널 모드와 풋 모드의 유동특성이 각각 윗부분과 아랫부분에서 지배적으로 나타났으며, 패널모드와 풋모드에 비해 탑승부 내부의 속도 분포가 고르게 나타났다.

후 기

본 연구는 자동차핵심기반기술 개발사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Yoon, J. H. and Lee, S. J., 2003, "Velocity Field Measurements of Ventilation Flow in a Vehicle Interior," *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 31, pp. 96~111.
- 2) Qi, Z. G., Chen, J. P., Chen, Z. J., Hu, W. and He, B., 2007, "Experimental Study of an Auto-controlled Automobile Air Conditioning System with an Externally-controlled Variable Displacement Compressor," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 927~933.
- 3) Aroussi, A. and Aghil, S., 2000, "Characterization of the Flow Field in a Passenger Car Model," *Optical Diagnostics in Engineering*, Vol. 4, pp. 1~15.
- 4) Han T. Y., 1989, "Three-dimensional Navier-Stokes Simulation for Passenger Compartment Cooling," *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 10(2), pp. 175~186.
- 5) Lee, G. H., Park, J. Y. And Beak J. H, 1998, "A Study on the Vehicle Passenger Compartment Interior Flow Simulation for the Air-Conditioning Mode", 1998 Fall Conference of KASE, 98380220, pp. 475~480.
- 6) Aroussi, A., Hassan, A. and Morsi, Y. S., 2003, "Numerical Simulation of the Airflow over and Heat Transfer through a Vehicle Windshield Defrosting and Demisting System," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 401~405.
- 7) Kataoka, T. and Fusada, Y., 1998, "Evaluation of Thermal Environment in a Vehicle Compartment Using a Model of Human Thermal System," *The Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 628, pp. 4261~4266.
- 8) Yang, J. H., Kato, S. and Nagano, H., 2009, "Measurement of Airflow of Air-Conditioning in a Car with PIV," *J. of Visualization*, Vol. 12(2), pp. 119~130.
- 9) Aronson, D., Chroner, Z., Eloffson, P. and Fellbom, H., 2000, "Comparison between CFD and PIV Measurements in a Passenger Compartment," *SAE Technical Paper 2000-01-0977*.
- 10) Lee, J. P. and Lee, S. J., 2010, "Quantitative Visualization of Ventilation Flow for Defrost Mode in a Real Passenger Car", *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol. 8, pp. 40~44.
- 11) Lee, J. P. and Lee, S. J., 2009, "거대 스케일 유동의 속도장 측정 기술", *Journal of KSME*, Vol. 49(10), pp. 28~32.