

## 거대 화상용 PIV 시스템을 이용한 실차 내부 공기벤트 토출흐름의 속도장 측정 연구

이진평\* · 김학림\*\* · 이상준†

### PIV Measurements of Ventilation Flow from the Air Vent of a Real Passenger Car

Jin Pyung Lee, Hak Lim Kim and Sang Joon Lee

**Abstract.** Most vehicles have a heating, ventilating and air conditioning (HVAC) device to control the thermal condition and to make comfortable environment in the passenger compartment. The improvement of ventilation flow inside the passenger compartment is crucial for providing comfortable environment. For this, better understanding on the variation of flow characteristics of ventilation air inside the passenger compartment with respect to various ventilation modes is strongly required. Most previous studies on the ventilation flow in a car cabin were carried out using computational fluid dynamics (CFD) analysis or scale-down water-model experiments. In this study, whole ventilation flow discharged from the air vent of a real passenger car was measured using a special PIV (particle image velocimetry) system for large-size FOV (field of view). Under real recirculation ventilation condition, the spatial distributions of stream-wise turbulence intensity and mean velocity were measured in the vertical panel-duct center plane under the panel ventilation mode. These experimental data would be useful for understanding the detailed flow structure of real ventilation flow and validating numerical predictions.

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

## 1. 서 론

기존의 자동차 관련 기술개발 연구는 엔진의 성능 향상과 함께 고속 주행 성능을 높이고 소음을 줄이는 등의 자동차 차체의 공기 역학적 문제들을 주로 다루어 왔다. 그러나 생활수준의 향상과 고급화되어 가는 소비자의 선호도 변경에 따라 자동차 실내의 쾌적성 향상에 대한 요구가 크게 증가하고 있다. 실내의 쾌적성은 외부의 신선한 공기를 실내로 빠르게 유입시켜 운전자의 졸림을 방지하고, 승객의 피로를 경감시켜 자동차 운전의 안정성 향상에도 크게 영향을 미치게

된다. 따라서, 자동차의 주행 성능뿐만 아니라 실내 환경의 쾌적성을 증시하는 수요자의 선호도 변화에 부응하고 주행 안정성을 높이기 위해서는 기본적으로 탑승 공간 내부 공기 흐름을 제대로 분석하여 자동차 내부 환기유동에 대한 이해를 증대시켜야 한다.

자동차 내부 환기유동에 대한 기존의 연구는 주로 간단한 2차원 모델을 이용한 정성적인 유동가시화<sup>(1, 2, 3, 6, 8, 9)</sup> 혹은 수치해석적 방법<sup>(4, 5, 6, 7, 9)</sup>에 의해 이루어져오고 있다. 예를 들어 Yoon & Lee<sup>(1)</sup>는 PIV 속도장 측정기법을 1/10 축소모형에 적용하여 차량내부의 환기유동을 정량적으로 가시화하였다. Qi 등<sup>(2)</sup>은 환기유동의 속도분포 변화를 측정하기 위해서는 정상상태 유동(steady flow)으로 가정하고 측정센서를 일정간격으로 이송시키면서 속도 분포를 측정하였다. Aroussi & Aghil<sup>(3)</sup>은 1/10 축소모형을 이용하여 승용차 내부구조의 변화와 운전자의 탑승 유무 등이 자동차 내부 환기

†포항공과대학교 기계공학과 교수  
E-mail : sjlee@postech.ac.kr

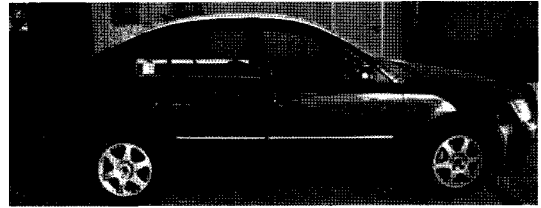
\*포항공과대학교 환경공학부

\*\*포항공과대학교 기계공학과

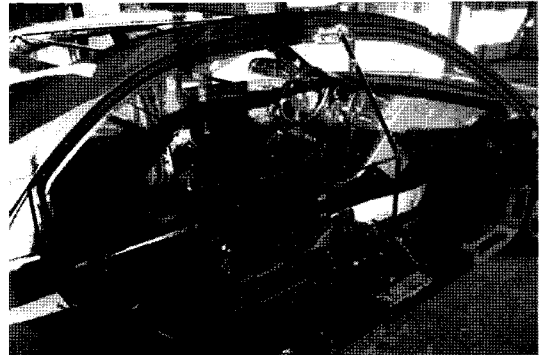
유동에 미치는 영향에 대해 실험적으로 연구하였으며, 같은 형상의 차체 model을 사용하여 얻은 수치해석 결과와 비교하기도 하였다. Han<sup>(4)</sup>은 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식들을 이용하여 자동차 탑승공간 내의 속도장과 온도분포를 계산하였으며, 이공희 등<sup>(5)</sup>은 CFD를 이용하여 냉방모드시의 차량 내부의 온도분포를 계산하였고, Aroussi 등<sup>(6)</sup>은 defrost 모드 조건에서의 windshield와 차량 내부의 속도분포는 물론 온도분포를 수치해석으로 구하고 이를 실험결과와 비교하였다. Kataoka & Fusada<sup>(7)</sup>은 탑승객이 느끼는 쾌적성에 대한 결과를 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 모델 내부에 공기가 아닌 물을 이용한 환기유동 실험은 많은 한계점을 가지고 있다. 이러한 실험적 문제를 없애기 위해 Yang 등<sup>(8)</sup>은 1/2축소모형에 식물성 오일을 추적입자로 사용한 공기 실험을 하였다. 그러나, 실제 차량 실내의 환기유동은 여러 가지 변수들에 의해 매우 복잡한 3차원 난류구조를 가진다. 또한, 축소모형과 CFD에 사용된 차량 모델들은 핸들이나 dashboard 등 실제 차량의 복잡한 내부 구조를 완벽하게 재현하기가 거의 불가능하다. 따라서 차량 내부의 복잡한 유동을 제대로 측정하고 해석하기 위해서는 첨단적 정량적 유동가시화 기법이 필요하며, 실제 환기유동을 제대로 해석하기 위해서는 실차를 이용하여 실제 운전조건하에서 실험하여야 한다. Aronson 등<sup>(9)</sup>은 실제 Volvo S80 차량을 이용하여 패널 덕트(panel-duct)에서 나오는 공기의 흐름을 가시화하고 이를 CFD 결과와 비교하였으나, 차량 내부 전체가 아닌 패널 덕트 주위만 가시화하였으며, 실제 상황과는 달리 문을 제거한 상태에서 실험을 수행하였다.

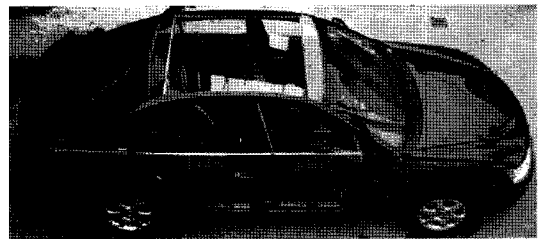
본 연구에서는 기존 실험과 수치해석의 문제점을 해결하고, 승용차 탑승공간 내부 환기흐름의 유동특성을 정확하게 해석하기 위해 실차를 실험모델로 사용하고 탑승공간 내부 환기유동의 속도장을 PIV 기법으로 측정하였다. 실험에 사용된 모델은 실제 운전이 가능한 국내 H사의 자동차이며, 실제와 같은 운전모드에서 실험이 이루어졌다. 본 실험에서는 실내 환기모드 중 가장 많이 사용되는 panel 모드 조건에서 패널 덕트를 빠



(a) Original car (NF Sonata)



(b) Removal of side doors and loop of car



(c) Tested car model with transparent windows

Fig. 1. Photograph of experimental car model

져 나오는 공기 흐름과 탑승공간 내부 전체 유동구조를 연구하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험모델

Fig. 1은 본 실험에 사용되었던 실제차량과 이를 가시화 실험용으로 개조한 차량을 찍은 사진이다. 본 실험에서는 국내 H사에서 연구용 차량으로 기증한 NF 소나타를 개조하여 실험을 수행하였다 (Fig. 1 (a)). 레이저 평면광을 조사하기 위하여 차량의 천장 부위를 제거하고, 차량 내부 유동을 카메라로 촬영할 수 있게 조수석 쪽의 앞문과 뒷문, 앞쪽 ힹ다(fender) 부위를 제거하였다. 또한, 차량 내부로 추적입자를 주입하고 필요 시 전선 등을 차량 내부로 집어 넣기 위해 차체 바

닥에 구멍을 뚫었는데, 사용하지 않을 경우에는 막을 수 있도록 하였다 (Fig. 1 (b)). 제거된 조수석쪽 문짝과 천정부분에는 지지용 철판을 붙이고 거기에 고강도의 투명한 강화유리를 붙여 차량을 가시화용으로 개조하였다 (Fig. 1 (c)). 강화유리를 사용함으로써 빛의 왜곡을 줄이고, 추적입자가 차창에 붙어도 쉽게 제거할 수 있었다. 개조된 일부분을 제외하고는 실차 그대로를 사용하여 실제 주행에도 문제가 없는 상태이다. 본 연구에서는 이렇게 가시화 실험용으로 개조된 실차를 이용하여 실제 상황에서의 같이 시동을 걸고 환기모드를 정상적으로 작동시킨 상태에서 실험을 수행하였다. PIV 속도장은 Fig. 2에 나타난 것처럼 조수석의 왼쪽 부분에 있는 panel-duct의 중앙단면에서 측정하였다. 운전석 쪽의 경우 덕트에서 나오는 공기 흐름이 핸들 등에 의해 방해받으나, 조수석의 경우 이러한 유동고란도 없고 주변 구조물에 의해 측정이 방해받지 않아 속도장 측정에 유리하다. 실차의 경우 유량을 총 8단계로 선택할 수 있으며, 이중 중간 단계인 5단계로 고정하여 본 연구를 수행하였다. 또한, 패널 모드외의 경우, 공기가 나오는 공기벤트(air-vent)의 각도를 수평방향과 수직방향으로 다양하게 조절 할 수 있으나 (Fig. 2), 본 실험에서는 이를 수직, 수평으로 고정시키고 실내순환모드 상태에서 실험을 수행하였다.

**2.2 실험방법**

본 연구에서는 레이저와 디지털 화상처리 기법을 이용한 PIV 기법을 사용하여 자동차 내부 환기유동의 속



Fig. 2. Panel-duct center plane of PIV measurements and air vent shape of panel-duct

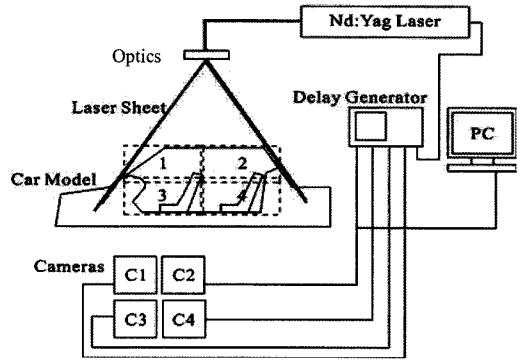


Fig. 3. Schematic diagram of experimental setup

도장을 측정하였다. PIV기법은 주어진 짧은 시간간격 ( $\Delta t$ ) 동안 움직인 추적입자들(tracer particles)의 변위정보를 CCD 카메라로 취득하여 레이저 평면광으로 조사된 유동단면 내부 추적입자들에 대한 입자영상을 2차원 화상 data로 저장한 후, 디지털 화상처리기법을 이용하여 추적입자들의 변위를 계측하여 2차원 속도 벡터의 공간분포를 구하는 것이다.

Fig. 3은 본 실험에 이용되어진 PIV 속도장 측정시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 본 실험에 사용된 PIV 시스템은 200 mJ Nd:YAG 레이저, 4대의 2kx2k CCD 카메라, 영상처리장치, 제어 및 계산용 컴퓨터, 동기장치 등으로 구성되어 있으며, 공기유동의 추적입자로는 지름이 1~5  $\mu\text{m}$ 인 올리브 오일을 사용하였다. 레이저 평면광은 여러 광학부품들을 거치면서 두께 1 mm 정도의 시트(sheet)의 형태로 바뀌어 차량의 천장을 통해 수직방향으로 탑승공간 내부를 조사하게 된다.

본 실험처럼 넓은 측정영역을 일반적인 PIV 측정기법으로 측정할 경우, 측정범위가 넓어 한 대의 카메라로 취득하면 입자 영상의 크기가 너무 작아 개개의 입자들을 구분하지 못하고 광학적 왜곡 현상도 발생하게 된다. 이와 같은 문제점들을 해결하기 위해 Fig. 3에서와 같이 고해상도 CCD 카메라를 여러 대 사용하고 이들을 동기시켜 넓은 관측 영역의 입자영상을 취득하는 기술을 개발하고 이를 사용하여 거대화상의 유동영상을 획득하였다. 여러 대의 CCD 카메라를 일정한 간격으로 배치하고 동기신호를 이용하여 유동장 전체를 동시에 측정하는 이러한 실험기법은 대면적의 측정단면에 대한 유동영상을 취득할 수 있으며, 카메라 렌즈에 기인한 영상왜곡도 크게 줄일 수 있다. 본 실험에서는 3대나 4대의 카메라를 측정영역에 따라 정사각형이나

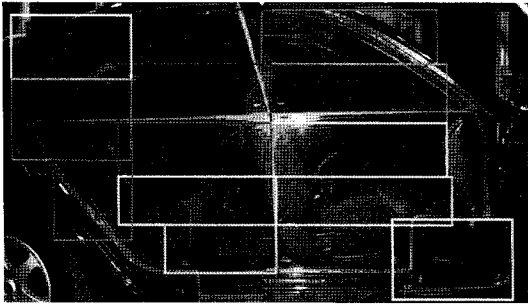


Fig. 4. 13 measurement sections for Ventilation flow inside the passenger compartment

일자형태로 배치하였다. 카메라 현대의 관측영역(field of view)을  $26 \times 26 \text{ cm}^2$ 로 설정하였으며, 4대의 카메라를 정사각형으로 배치 했을 시 전체 측정영역의 크기는  $50 \times 50 \text{ cm}^2$ 이다.

여러 대의 CCD 카메라를 동시에 사용한다 하여도 실제 차량 내부를 한꺼번에 측정하기는 어렵다. 이에 따라 본 연구에서는 거대화상 PIV 시스템을 이송시켜 가며 자동차 실내를 여러 부분으로 나누어 속도장을 측정하였다. 전체 탑승공간을 총 13개 부분(sub-section)으로 나누고 (Fig. 4), 각 부분에서의 유속과 유동형태에 따라 카메라의 배치, 시간간격  $\Delta t$  등의 실험 조건을 다르게 하여 측정하였다. 이렇게 13개로 나누어 측정된 속도장결과를 합쳐 전체 측정단면에 대한 결과를 얻었다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 패널 모드에서의 환기유동

Fig. 5는 패널 모드에서 유량을 일정하게 고정한 후 얻은 정상상태의 속도장 결과를 보여주고 있다. 여기에서 볼 수 있듯이, 패널 덕트에서 분사되어 탑승공간 전반부를 가르는 제트형태의 유동을 관찰할 수 있다.

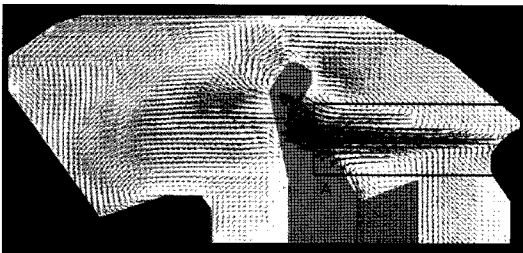


Fig. 5. Mean velocity field along the center plane of the panel vent.

이 유동은 일반적인 제트 유동처럼 출구에서 멀어질수록 폭이 점차 확대되면서 발달해 나가고 있다. 대부분의 유동은 앞의 두 좌석 사이 공간을 통해 뒷좌석 공간으로 넘어가지만, 일부는 앞좌석 등받이에 충돌 후 다시 앞으로 돌아가는 반시계 방향의 와유동(vortex)을 형성하였다. 뒷좌석 공간으로 넘어간 유동의 일부는 낮은 압력영역인 앞으로 다시 흘러가 시계방향으로 회전하는 상대적으로 큰 와유동을 형성하고, 나머지 부분은 천장을 따라 뒷좌석 후방으로 이동하거나, 뒷좌석에 충돌한 후 반시계 방향으로 회전하는 와유동을 형성하게 된다. 앞좌석에 의해 환기 유동의 이랫부분이 가로막혀 제트 확산이 위아래로 균등하지 못하고 주로 위쪽 방향으로 이루어지고 있다. 위쪽 방향의 확산유동은 차량 천장에 의해 가로막히게 된다. 뒷좌석 공간에서는 여러 형태의 유동들이 혼합된 3차원 유동특성을 보여주고 있다. 전체적으로는 뒷좌석 공간으로 넘어간 유동은 앞좌석의 머리 지지대부분이나 의자 밑 틈새를 통해 다시 앞좌석 공간으로 이동하는 재순환유동 형태를 보여주고 있다. 앞으로 이동된 공기들은 앞좌석의 발부분에 있는 흡입구에 의해 다시 HVAC 내부로 들어가게 된다. 하지만, 본 실험에서는 앞좌석과 대쉬보드 등으로 인해 레이저 빔이 아랫부분까지 조사되지 않아 결과에서는 이 부분이 보이지 않게 되었다.

자동차 패널 덕트로부터 빠져나온 유동은 하류로 나아감에 따라 확산되는 일반적인 제트의 유동 특성을 보여주고 있다. 그러나, 차량 내부 밀폐된 공간과 그 공간 내에 위치한 구조물, 차량 외부와는 차단된 내부순환모드라는 특징 때문에 제트 전단층의 위아래에 위치한 와유동의 크기와 위치가 다르고, 확산되는 제트유동의 폭이 비대칭적인 특징들을 보여주고 있다. 또한, 본 연구에서는 측정하지 않았지만, 자동차 패널에 설치된 4개의 공기 덕트로부터 분사된 유동은 각각 3차원 사각 난류제트 형태로 하류영역에서 이윳한 제트들의 상호 간섭으로 인해 매우 복잡한 유동구조를 가질 것으로 생각되어진다. 이러한 유동특성을 밝히기 위해 차후 수평방향의 측정평면에 대한 환기유동의 속도장을 측정함으로써 각 패널 덕트들의 상호 간섭과 유동 발달에 대한 추가적인 연구를 수행할 계획이다.

#### 3.2 패널 덕트 근접 제트 유동

앞서 설명한 바와 같이, 패널 덕트를 통해 분사된 유

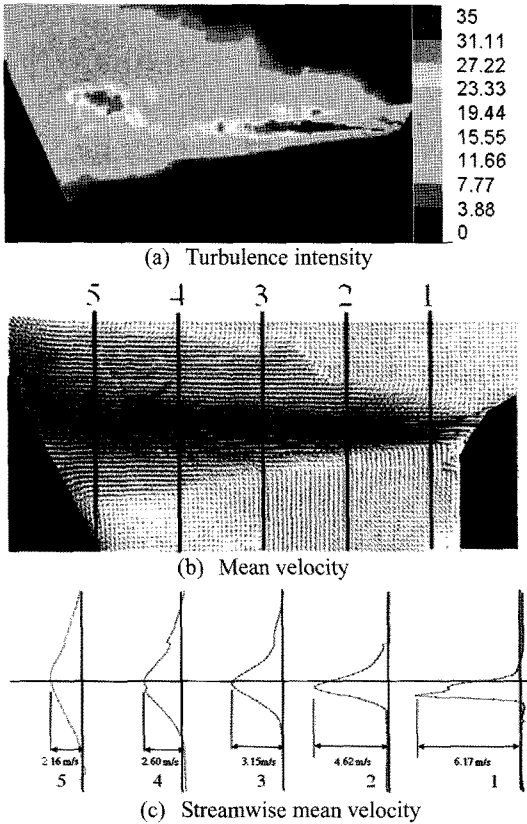


Fig. 6. Spatial distributions of streamwise turbulence intensity and mean velocity profile in the section A of Fig. 5.

동은 사각 난류제트의 유동특성을 보여주고 있다. 이를 보다 자세히 알아보기 위해 제트가 발달하는 Fig. 5의 A 구간을 따로 분석하였다. Fig. 6은 덕트를 빠져나온 제트가 발달하는 근접 제트영역에서 난류강도와 평균 속도장 분포, 그리고 평균 속도의 수직분포변화를 나타낸 것이다. 제트의 난류강도는 약 10~35%의 값을 가지며, 중앙을 기준으로 대칭을 이루지 않고 아래쪽 영역에서 보다 큰 값을 가졌다 (Fig. 5 (a)).

이것은 일반적인 제트유동과는 다소 다른 유동특성으로 Fig. 2에 나타난 것처럼 공기가 나오는 벤트의 모양이 하나의 큰 사각 덕트가 아니라, 여러 개의 사각채널 덕트가 모여 나오는 구조이며, 여기에 연결된 자동차 HVAC 시스템이 엔진룸 내부에 위치하여 HVAC에서 나오는 공기가 약간 상승하여 공기벤트에 연결되기 때문인 것으로 보인다. Fig. 6 (b)는 덕트로부터 분사된 유동의 평균 속도장 분포를 보여준다. 전반적으로

duct에서 멀어짐에 따라 제트유동의 폭이 확산되어가는데, 위쪽 영역으로의 확산이 더욱 크게 나타나고 있다. 이것은 하부 전단층에서 속도가 상대적으로 빠르고, 앞 좌석 충돌로 인해 발생한 와류동에 의해 확산이 다소 방해받아 상부 전단층에 비해 확산이 상대적으로 느리게 이루어지기 때문으로 보인다. Fig. 6 (c)는 패널 덕트로부터의 거리에 따라 수직방향으로의 속도분포를 나타낸 것이다. 앞에서 설명한 바와 같이 아래쪽부분의 유속이 보다 빠르며, 최고 속도는 6.17 m/s이었다. 유동이 하류로 나아가면서 발달함에 따라 에너지의 균형을 맞추어가게 되며, 평균유속이 감소하고, 최고속도값을 가지는 지점이 제트 중심축 쪽으로 이동하여, 분포는 점점 정규분포를 가지는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 자동차 실내 환기흐름의 유동특성을 연구하기 위하여 실차 일부를 투명창으로 개조하여 실험 차량으로 사용하고 거대화상용 PIV 시스템을 이용하여 자동차 실내 환기유동의 속도장을 실험적으로 측정하였다. 기존의 연구와는 달리 실차를 그대로 사용하여 실제 운전 상황과 같은 실험조건하에서 실험을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 실험결과는 수치적 해석연구에 필요한 검증 데이터로 제공하고, 자동차 설계 단계에서 환기유동과 관련된 중요한 유동정보로 사용되어질 것으로 예상된다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 실제 운전상황과 같은 환기조건에서 실차의 탑승 공간 내부 실내 환기흐름의 유동특성을 연구하였다.
- 2) 패널 모드에서 패널 덕트로부터 나오는 환기유동은 난류제트의 유동특성을 가지나, 근접 제트 영역의 하부 전단층에서 평균속도와 난류강도가 보다 큰 값을 가졌다.
- 3) 여러 대의 고해상도 CCD 카메라를 매트릭스 (matrix) 형태로 조합하여 배치하고 입자영상 획득과정을 동기화하여 넓은 측정영역의 전체 속도장을 한꺼번에 측정할 수 있는 기술을 개발하였으며, 이는 본 연구에서 매우 유용하였다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부의 자동차핵심기반기술 개발

사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

### 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) 이공희, 박준영, 백제현, 1998, "냉방모드에 대한 승용차 탑승부 내의 유동해석에 관한 연구," 한국자동차 공학회 1998년도 추계학술대회 논문집, 98380220, pp. 475~480.
- 6) Aroussi, A., Hassan, A., 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., Chroneer, Z., Elofsson, P. and Fellbom, H., 2000, "Comparison between CFD and PIV Measurements in a Passenger Compartment," *SAE Technical Paper 2000-01-0977*.