

PIV 측정을 통한 자동차 후류 3 차원 와구조의 정량적 해석

이석종* · 성재용† · 김진석** · 김성초*** · 김정수*** · 최종욱***

On the Visualization of Three-Dimensional Vortical Structures in the Wake behind a Road Vehicle by PIV Measurements

Sukjong Lee*, Jaeyong Sung[†], Jinseok Kim**, Sungcho Kim***, Jeongsoo Kim***,
Jongwook Choi***

Abstract

Three-dimensional vortical structures in the wake behind a road vehicle has been visualized with the help of two-dimensional PIV measurement data. A three-dimensional velocity field has been reconstructed from several sectional measurement data in the x-y, y-z and z-x planes. Isovorticity surface observed by stacking only the sectional data in each plane, does not show the vortical structures within the recirculation region but represents only the strong shear flows. Thus, in the present study, the velocity component normal to the x-y plane is obtained by interpolating those velocities in the z-x plane. Then, a λ_2 -definition which captures the local pressure minimum or vortex core, is applied to visualize the vortices in the recirculation region. The final results represent a successful configuration for the three-dimensional vortices.

Key Words : PIV(입자영상유속계), Road Vehicle(자동차), Three-Dimensional Wake(3 차원 와류), Velocity Gradient Tensor(속도구배 텐서)

1. 서 론

자동차 후류의 3 차원 유동의 높은 레이놀즈수와 더불어 복잡한 자동차의 형상으로 인해 해석하는데 있어 어려움이 많다. 수치해석적 접근 방법은 많은 정보를 얻을 수 있음에도 불구하고 실물 자동차에 적용하기에는 문제점이 많다. 따라서 대부분의 정량적인 데이터는 실험을 통해서 획득하고 있다. 그러나 자동차의 공기역학적 성능과 이에 영향을 주는 후류의 3 차원 와 구조의 연관성을 체계적으로 파악하는 것은 아직 문제로 남아 있다.

최근, 정량적 가시화기술인 PIV(particle image

velocimetry) 기법이 발전하면서 이를 이용하여 차량 주위의 유동을 분석하고자 하는 시도들이 많이 있었다. Cogotti & Gregorio⁽¹⁾는 실제 차량의 백미러 후류 영역과 차량 왼쪽 바퀴 주변의 유동구조를 정량적으로 측정하였다. McCutcheon 등⁽²⁾은 단순화된 자동차 모형에서 해치백(hatchback) 각도에 따른 후류유동 특성을 고찰하였고, Al-Garni 등⁽³⁾과 Heineck & Walker⁽⁴⁾는 트럭 후류의 난류유동 특성을 PIV 계측을 통해 해석하였다. 그러나 이상의 연구들이 단편적인 유동 특성을 고찰하는데 그쳤고 후류의 3 차원 와 구조에 대한 전체적인 분석은 이루어지지 않았다.

한편, 3 차원 와 구조에 관해서는 오래전부터 기초적인 유동에 대하여 해석하는 기법들이 연구되어 왔으며, Chong & Perry⁽⁵⁾, Chong 등⁽⁶⁾은 임계점 이론(critical point theory)를 바탕으로 2 차원 또는 3 차원 공간에서 나타나는 다양한 와류 구조에 대해 체계적으로 정리하였다. 또한 Jeong & Hussain⁽⁷⁾은 3 차원 와류의 응집구조를 파악하기 위해서 λ_2 -정에 의한 와 구조 해석 기법을 제안하였으며, 현재

* 서울산업대학교 기계공학과

E-mail : jysung@snut.ac.kr

† 서울산업대학교 에너지환경대학원

** 순천대학교 대학원 기계공학과

*** 순천대학교 기계자동차공학부

까지도 비압축성 유동의 경우 가장 정확한 방법으로 평가받고 있다.

본 연구에서는 자동차 후류에 대하여 3 차원 공간에서 3 차원 속도성분을 모두 포함하는 유동장을 계측하고, 이를 바탕으로 와 구조를 해석하고자 한다. 이를 위해서 순환형 수동(closed-loop water tunnel)의 시험부 바닥에 고정되어 있는 실제 스포츠카 모형의 축소 자동차 후류 유동장을 PIV 시스템을 이용하여 3 차원 공간에서 단면별로 계측한다. 세 가지 방향의 단면에서 측정된 2 차원 시간평균 유동장으로부터 Lagrange 보간법을 이용하여 3 차원 속도성분을 모두 포함하는 데이터로 재구성한다. 최종적으로 속도구배 텐서를 계산하여 3 차원 와도성분을 구하고, 와도의 절대값 및 λ_2 -정의에 의한 와 구조를 비교 고찰함으로써 그 특성에 대해 논의한다.

2. 실험장치 및 구성

Fig. 1은 개략적인 실험장치 구성을 나타낸다. 본 실험에 사용된 PIV 시스템은 순환형 수동, 2-head Nd:Yag 레이저, CCD 카메라, 동기화장치 및 데이터 처리용 컴퓨터로 구성된다. 시험부는 투명한 아크릴로 제작되었는데, 그 크기는 가로, 세로, 높이가 각각 $700 \times 100 \times 150 \text{ mm}^3$ 이다. Nd:Yag 레이저의 출력은 120 mJ이며, CCD 카메라의 해상도는 1280×1024 픽셀이다. 또한 산란입자의 평균 지름은 $10 \mu\text{m}$ 이고, 실험에 사용된 모형 자동차는 Mercedes Benz 회사의 CLK-GTR 모델을 1/48로 축소한 것으로 길이, 높이, 폭이 $112.86 \times 25.56 \times 45.35 \text{ mm}^3$ 인 제원을 갖는다. 이때 모형은 레이저 빛이 차량 표면에 반사되어 산란되는 것을 방지하기 위해 검정색으로 무광택도색을 하였으며 시험부의 바닥에 고정되었다.

Fig. 2에서 보이는 바와 같이 자동차의 길이(L), 높이(H), 폭(W)의 좌표 방향을 각각 x , y , z 라고 할 때, 자동차 후류 영역의 x - y 평면(크기 $63 \times 50 \text{ mm}^2$)을 자동차의 대칭면인 중앙단면($z/W=0$)으로부터 $z/W=0.6$ 의 범위에 걸쳐 $z/W=0.05$ 씩 이동시켜 가면서 모두 13 개의 단면에서 속도 벡터장을 얻었다. y - z 평면(크기 $46 \times 70 \text{ mm}^2$)은 $x/L=0$ 으로부터 $x/L=0.5$ 까지 $x/L=0.1$ 씩 이동시켜서 모두 6 개의 단면에서 유동장에 대한 속도정보를 취득하였다. y - z 평면의 유동을 계측하기 위하여 자동차 모형으로부터 300 mm 떨어진 시험부 바닥에 거울($50 \times 60 \text{ mm}^2$)을 설치하여 90° 로 반사된 영상을

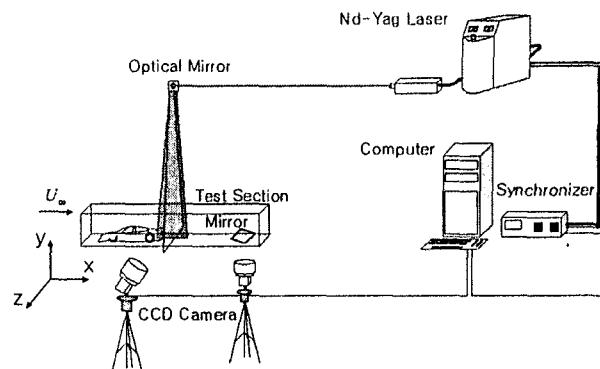


Fig. 1 Schematic diagram of the PIV

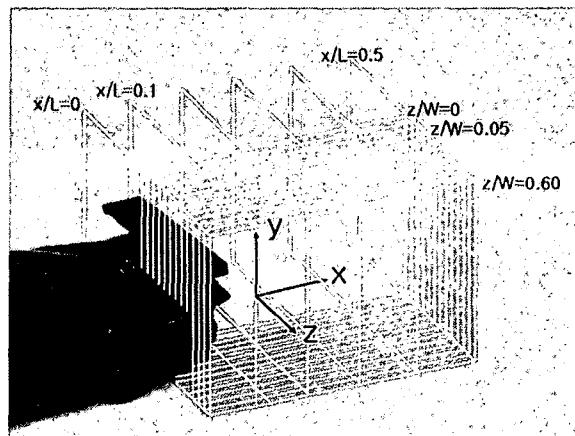


Fig. 2 The longitudinal and streamwise measurement planes behind a load vehicle.

CCD 카메라를 통해 획득하였다. z - x 평면(크기 $55 \times 68 \text{ mm}^2$)은 $y/H=0$ 으로부터 $y/H=0.1$ 씩 이동시키면서 총 14 개의 단면에서 유동장에 대한 속도 정보를 취득하였다. 또한 각각의 단면에서 총 488 장씩의 순간 유동장을 촬영하고 이것을 바탕으로 평균 유동장을 계산하였다.

3.3 차원 와 구조의 해석 기법

속도장 데이터로부터 3 차원 와류 구조를 규명하기 위해 지금까지 여러 가지 방법이 사용되어 왔다. 일반적으로 가장 널리 쓰이는 방법은 와도의 절대값에 대한 등와도면(isovorticity surface)을 그려서 해석하는 것이었다. 그러나 이 방법은 전단류가 강할 경우 와류의 중심을 잘 표현하지 못할 뿐더러 축대칭 와류에 있어 와관(vortex tube)의 크기가 축방향으로 변화가 심한 경우 와관이 끊어져 독립된 와류로 해석될 수 있는 문제점가 있다.

따라서 본 연구에서는 Jeong & Hussain⁽⁷⁾이 제안한 λ_2 -정의에 의한 와류해석 기법을 도입하였다. 이 방법에서는 와류의 중심에서 국소 최저 압력(local pressure minimum)이 발생하고, 이 중심은 속도구배 텐서 $\nabla \bar{u} = u_{i,j}$ 의 대칭성분(symmetric part) $S_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$ 과 반대칭성분(antisymmetric part) $\Omega_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} - u_{j,i})$ 의 제곱합인 $S_y^2 + \Omega_y^2$ 텐서에 있어 두 개의 음수 고유치(eigenvalue)를 연결한 영역으로 정의한다. $S_y^2 + \Omega_y^2$ 텐서는 대칭이므로 항상 실수의 고유치를 가지며, 세 개의 고유치 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 가 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ 의 관계를 가질 때, 와 중심에서는 두 번째 크기인 λ_2 가 음수인 영역으로 정의하는 것과 동일하다.

λ_2 -정의에 의한 와 구조 해석 방법 외에도 Δ -정의, Q -정의 등이 있으나 Jeong & Hussain⁽⁷⁾은 λ_2 -정의가 비압축성 유동에서 와 구조를 가장 잘 표현한다고 하였다.

4. 결과 및 고찰

본 실험에서는 모형 자동차 길이를 기준으로 레이놀즈 수가 100,000 인 경우에 대해서 측정하였으며, 3 차원 공간에서 3 차원 속도장을 획득하기 위하여 세 개의 평면(x-y 평면, y-z 평면, z-x 평면)에서 시간평균된 속도장을 구하고 이를 재구성하였다. 우선, 각각의 단면에서 측정된 시간평균 속도장의 유선 및 와도분포를 Fig. 3-5에서 나타내었다. Fig. 3에서는 $z/W=0, 0.25$ 인 두 개의 x-y 평면에 대해 살펴보았는데, 자동차 트렁크 윗 부분에서 발생한 강한 전단류에 의해 후면에 큰 재순환 영역이 형성됨을 볼 수 있다. 이 재순환 유동 내에는 초점(Focus)과 안장점(Saddle)이 존재하며, 중심면에서 측면으로 갈수록 두 점이 합쳐지면서 바닥면에서의 강한 역흐름(reverse flow)을 만든다. Fig. 4에서는 두 개의 y-z 평면에서 살펴본 주유동 방향 와류를 나타내었다. 자동차 후류의 대표적인 유동 방향 와류는 C-Pillar 와류로서 자동차 측면부에서 발생하여 후류로 길게 이어진다. C-Pillar 와류는 Fig. 4(a)와 같이 트렁크 윗부분에서 떨어져 나와 하류로 가면서 바깥에서 재순환영역으로 유입(entrainment)되는 유체로 인하여 Fig. 4(b)와 같이

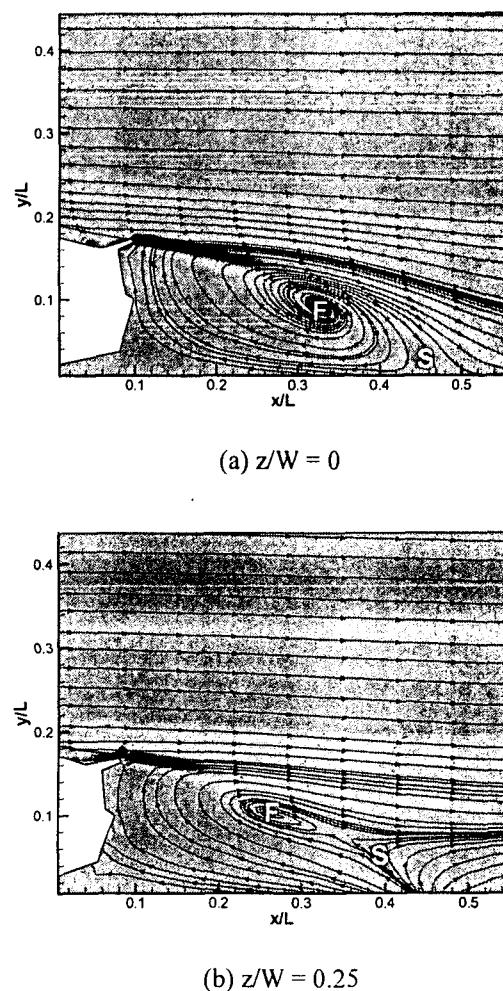


Fig.3. Streamline Patterns and vorticity distributions in the x-y plane. The characters "F" and "S" denote the positions of focus and saddle point, respectively.

강한 와류 쌍을 이룬다. Fig. 5에서는 z-x 평면에서 살펴본 후류의 모습을 나타내었다. Fig. 5(a)와 같이 $y/H=0.1$ 의 바닥면 근처에서는 측면부에서 발생한 강한 전단류에 의해 자동차 후면에서 두 개의 와쌍이 크게 형성된다. 이 와쌍에 의해 중심축에서는 역흐름이 나타나며, 그 역흐름의 시작이 되는 노드점(node)은 x-y 평면에서 살펴본 안장점에 해당된다. 트렁크 바로 윗면에 해당되는 Fig. 5(b)의 $y/H = 0.5$ 에서는 자동차 윗면을 타고온 주유동 속도와 만나면서 와쌍이 없어지고, 노드점이 상류로 옮겨가 약해짐을 알 수 있다.

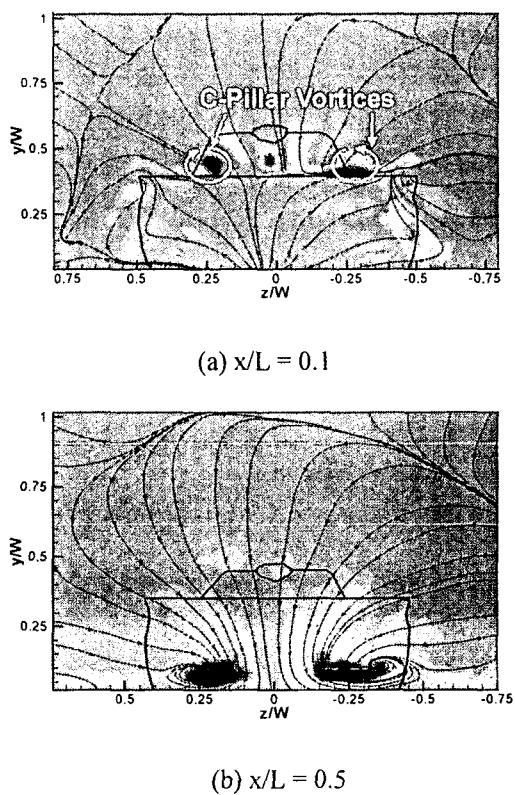


Fig.4. Streamline Patterns and vorticity distributions in the y-z plane.

각각의 단면에는 그 단면에 수직인 방향의 와도 성분을 구할 수 있으며, 여러 위치에서의 2 차원 시간평균 유동장을 3 차원으로 재구성하여 Fig. 6 과 같이 각 와도 성분($\omega_x, \omega_y, \omega_z$)에 대한 등와도면을 구성할 수 있다. Fig. 6(a)의 ω_z 는 트렁크 끝에서 발생되는 강한 전단류로 의해 속도 구배가 크게 나타나므로 재순환 영역 위에서 길게 형성되어 있다. Fig. 6(b)의 ω_x 는 C-Pillar 와류의 와관을 보여 주고 있으며, 트렁크 윗부분에서 와 쌍으로 발생하여 재순환 영역을 지나서 바닥면으로 내려온다. Fig. 6(c)의 ω_y 는 측면부에서 발생되는 강한 전단류에 의해 지배적인 영향을 받으며, 하류 방향으로 크게 형성되어 있다.

이상의 그림에서 볼 수 있듯이 각 와도 성분에 등와도면은 자동차 후류에 있어 전단류를 표시하는 정도에 그치고 재순환 영역 내부에 와류 구조에 대해서는 전혀 살펴볼 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 λ_2 -정의에 의한 와 구조를 파악하고자 하였으며, 이를 위해서는 3 차원 공간에서의 3 차원 속도성분이 모두 필요하다. 각 평면의 데이터에 의한 3 차원 재구성은 각 평면에 수직인 속도

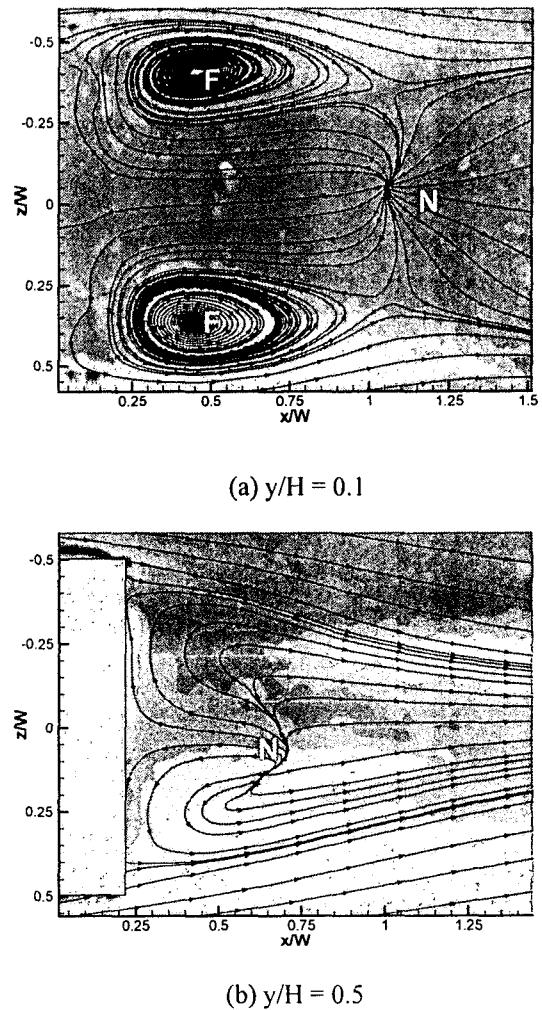


Fig.5. Streamline Patterns and vorticity distributions in the z-x plane. The characters "F" and "N" denote the positions of focus and node, respectively.

성분이 결여되어 있어 3 차원 와도 성분을 모두 구할 수 없으며, 본 연구에서는 서로 다른 평면에서의 3 차원 데이터를 조합하여 누락된 속도성분을 보완하고 이로부터 3 차원 와도 성분을 구하였다. 기준 평면으로서 x-y 평면을 사용하였으며, x-y 평면에서 나타나지 않는 z 방향 속도성분을 z-x 평면의 3 차원 데이터에서 Lagrange 보간법을 이용하여 보간하여 얻었다. 이 방법을 적용함에 있어 육면체 요소(brick element)에 대한 선형 형상함수(linear shape function)를 사용하였다. 최종적으로 얻어진 3 차원 속도장 데이터로부터 속도구배 텐서를 구하고, 3 차원 와도의 절대값 $|\bar{\omega}|$ 및 λ_2 의 값을 구하였다.

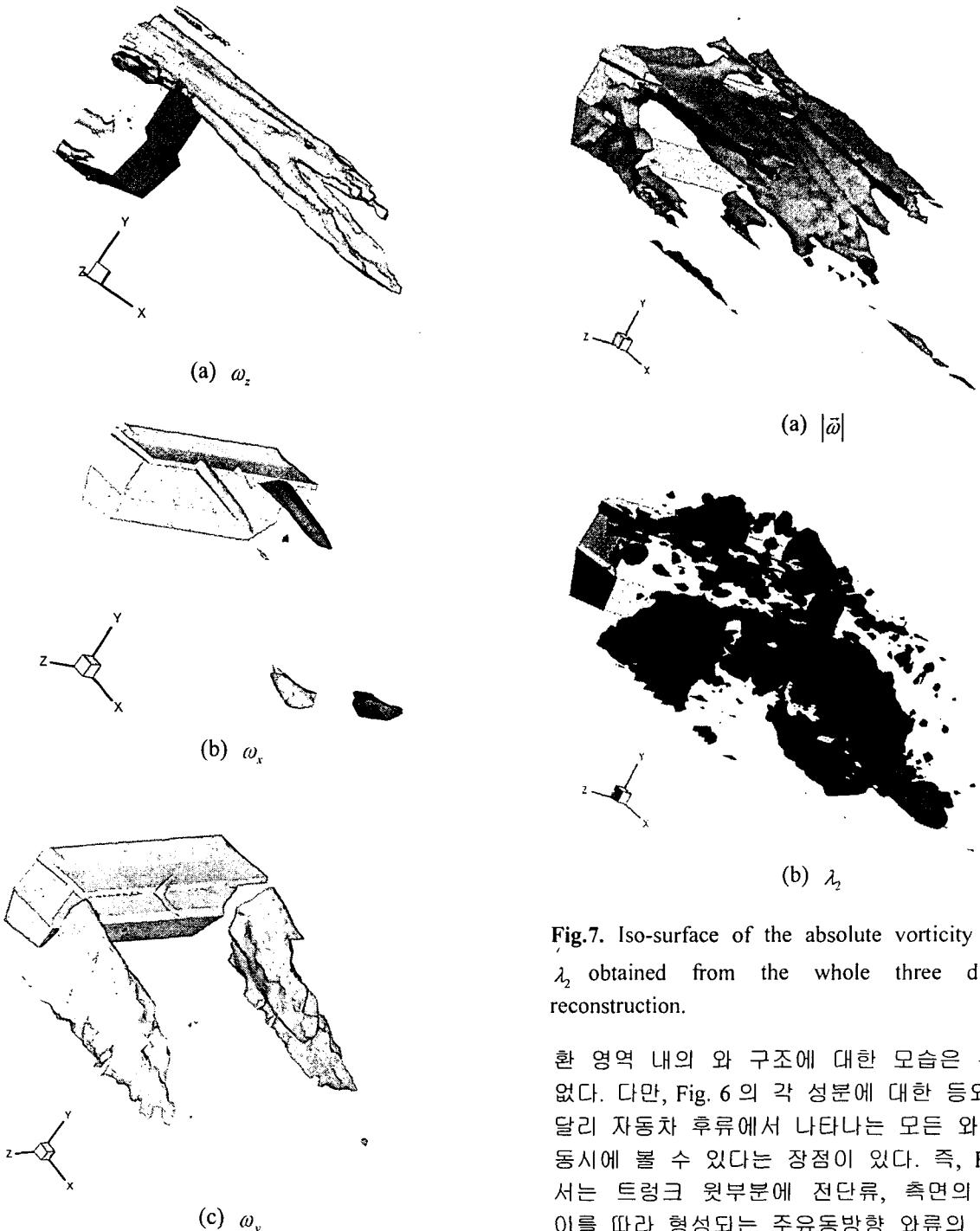


Fig.6. Isovorticity surfaces obtained from the three dimensional data for each plane.

Fig. 7에서는 이상으로부터 얻은 $|\vec{\omega}|$ 및 λ_2 에 대한 등 3 차원 곡면을 표시하였다. Fig. 7(a)에서 보여진 $|\vec{\omega}|$ 는 각 방향 성분 중에서 가장 큰 값에 의해 지배를 받으며, 앞에서 설명한 바와 같이 전단류에 의한 속도구배 및 와도값이 크기 때문에 재순

Fig.7. Iso-surface of the absolute vorticity ($|\vec{\omega}|$) and λ_2 obtained from the whole three dimensional reconstruction.

환 영역 내의 와 구조에 대한 모습은 확인할 수 없다. 다만, Fig. 6의 각 성분에 대한 등와도면과는 달리 자동차 후류에서 나타나는 모든 와류 현상을 동시에 볼 수 있다는 장점이 있다. 즉, Fig. 7(a)에서는 트렁크 윗부분에 전단류, 측면의 전단류와 이를 따라 형성되는 주유동방향 와류의 일부를 관찰할 수 있다. 반면, Fig. (b)의 λ_2 -정의에 의한 와 구조에서는 전단류는 거의 찾아 볼 수 없으며, 재순환 영역 내에서의 복잡한 와 구조를 자세히 보여주고 있다. 또한 트렁크 윗부분에서 나타나는 C-Pillar 와류와 재순환 영역 이후 바닥면에 존재하는 C-Pillar 와류를 뚜렷이 관찰할 수 있다. 이상의 기법으로 살펴본 자동차 후류의 3 차원 와 구조는 자동차의 공기역학적 저항 및 주행안정성 설계에 있어 매우 중대한 영향을 미치며, 향후 이들의 상

관관계를 밝히는 것이 필요하다. 그리하여 자동차의 외형을 설계하는데 많은 기여를 할 것으로 기대된다.

5. 결 론

자동차 후류의 3 차원 와 구조를 해석하기 위하여 PIV 측정기법을 이용하여 세 가지 방향으로 여러 단면에서의 시간 평균속도장을 획득하였다. 와 구조를 규명함에 있어 각 방향 와도 성분 또는 3 차원 와도의 절대값을 이용하면 강한 전단류에 의해 재순환 영역과 같은 실제 와류 현상을 볼 수 없는 문제점을 확인하였다. 이에 대한 해결방안으로 2 차원 속도장 데이터를 기반으로 3 차원 공간에서의 3 차원 속도장을 재구성 하였으며, 이를 기반으로 λ_2 -정의에 의한 와 구조 해석기법을 적용하였다. 그 결과 재순환 영역 내 복잡한 와 구조를 볼 수 있었으며, 추후 자동차에 미치는 힘과 와 구조와의 상관관계를 밝히는 계기를 마련하였다.

참 고 문 헌

- (1) Cogotti, A. and Gregorio, F. D., 2000, "Presentation of Flow Field Investigation by PIV on a Full-Scale Car in the Pininfarina Wind Tunnel," *SAE Paper 2000-01-0870*.
- (2) McCutcheon, G., McColgan, A. H., Grant, I. and Hurst, D., 2002, "Wake Studies of a Model Passenger Car Using PIV," *SAE Paper 2002-01-3335*.
- (3) Al-Garni, A. M. and Bernal, L. P., 2003, "Experimental Investigation of the Near Wake of a Pick-up Truck," *SAE Paper 2003-01-0651*.
- (4) Heineck, J. T. and Walker, S. M., 1999, "3D PIV in Wind Tunnel Applications : Measurements of a Truck Wake," *SAE Paper 1999-01-5600*.
- (5) Perry, A. E. and Chong, M. S., 1987, "A Description of Eddying Motions and Flow Patterns Using Critical-Point Concepts," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 19, pp. 125-155.
- (6) Chong, M. S. and Perry, A. E., 1990, "A General Classification of Three-Dimensional Flow Fields," *Phys. Fluids A*, Vol. 2, No. 5, pp. 765-777.
- (7) Jeong, J. and Hussain, F., 1995, "On the Identification of a Vortex," *J. Fluid Mech.*, Vol. 285, pp. 69-94.