

자동차 후류에 대한 3 차원 유동의 PIV 측정

김진석* · 김성초† · 성재용** · 김정수* · 최종욱*

PIV Measurements of Three-Dimensional Wake Around a Road Vehicle

Jinseok Kim, Sungcho Kim, Jaeyong Sung, Jeongsoo Kim and Jongwook Choi

Abstract

The PIV measurements are performed to get the quantitative flow visualization around a road vehicle. The model scaled with 1/48 is located in the middle test section of the closed-loop water tunnel and the measuring system consists of CCD camera, diode laser, synchronizer, and computer. The experimental data are obtained at two Reynolds numbers of 50,000 and 100,000 based on the model length. The quasi-three-dimensional iso-vorticity surfaces, based on two-dimensional velocity field data, are generated. There is little difference between the results in part of the recirculation region and the vorticity contour according to the Reynolds number. Also a little bit complicated three dimensional flows are predicted behind the road vehicle.

Key Words : PIV technology(입자화상처리에 의한 속도장 측정기술), Quantitative visualization (정량적 가시화), Closed-loop water tunnel(순환형 수동), Iso-vorticity surface(등와도 면)

1. 서론

자동차 주위의 유동 특성은 실물 자동차나 그 모형을 이용하여 실험하는 방법과 수치적 기법을 통한 해석 방법으로 연구되고 있다. 실험에 의한 연구가 실제 자동차에 대해서 이루어지기도 하지만, 실험을 하기에 규모가 너무 커서 새로운 모델을 개발하는데 많은 비용과 시간 및 노력이 필요하므로 풍동에서 모형을 대상으로 실험하는 경우가 많다. 풍동 실험에서는 밸런스를 사용하여 항력과 표면 압력 등을 주로 측정하며, 실(tuft), 연기(smoke) 또는 기름(oil)을 이용하여 유동에 대한 가시화도 이루어진다[1-9]. 이러한 풍동 실험의 결과를 바탕으로 효율적인 설계가 많이 이루어졌지만, 아직까지 기본적인 유동 구조를 충분히 규명하지 못하고 있다.

한편, 수치해석으로도 유동 구조 및 항력 계수를 예측할 수 있으며, 형상 또는 유동 조건에 따른 항력 계수의 변화를 비교적 쉽게 예측할 수 있다[10-13]. 그러나 Adeyd 와 Greaves[14]는 Phoenix 를 사용하여 Sterling 825 에 대하여 항력 계수가 격자수에 민감함을 보였다. Shaw 와 Shaw 등[15,16]은 Jaguar XJ6 를 대상으로 Flow 3D 와 Phoenix 를 사용하여 유동장을 예측하고 항력 계수를 구했는데 실험값과 비교하여 150~230% 정도의 차이가 있음을 보였다. 이러한 연구에서 알 수 있듯이 자동차에 주위의 유동은 주로 수치해석 방법으로 접근되었으며, 실험에 의한 정량적인 유동장의 예측은 그다지 많지 않다.

따라서 본 연구에서는 순환형 수동(closed-loop water tunnel)의 시험부(test section)바닥에 고정된 축소 모형 자동차의 후류 유동에 대해서 PIV(particle image velocimetry) 기법을 사용하여 2 차원의 정량적인 가시화(quantitative visualization)를 시도하였으며 이를 바탕으로 준 3 차원적인(quasi-three dimensional) 해석까지 보였다.

2. 실험장치 및 구성

* 순천대학교 기계공학과

** 서울산업대학교 기계공학과

† 순천대학교 기계공학과

E-mail : ksc@sunchon.ac.kr

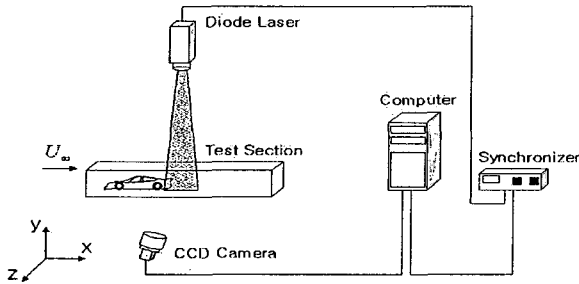


Fig. 1 Schematic diagram of the PIV system

본 실험에 사용된 PIV 시스템은 순환형 수동, 다이오드레이저, CCD 카메라, 동기화장치, 컴퓨터로 구성된다. 시험부의 크기는 700mm(가로) x 100mm(세로) x 150mm(높이)이고, 다이오드 레이저의 출력은 500 mW 이며, CCD 카메라의 해상도는 1390 x 1024 픽셀이다. 또한 산란입자(silver coated hollow glass sphere)의 평균직경은 40 μ m 이고, 실험에 사용된 모형 자동차는 Mercedes Benz 회사의 CLK-GTR 모델을 1/48 로 축소한 것으로 112.86mm(길이) x 25.56mm(높이) x 45.35mm(폭)의 크기를 갖는다. 이때 모형은 시험부의 바닥에 고정되어 있다.

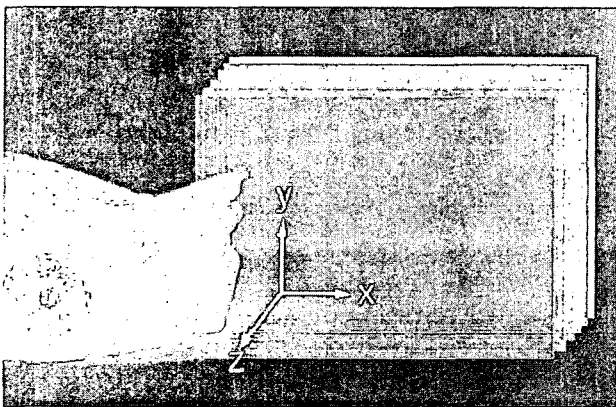


Fig. 2 Six fields to be measured

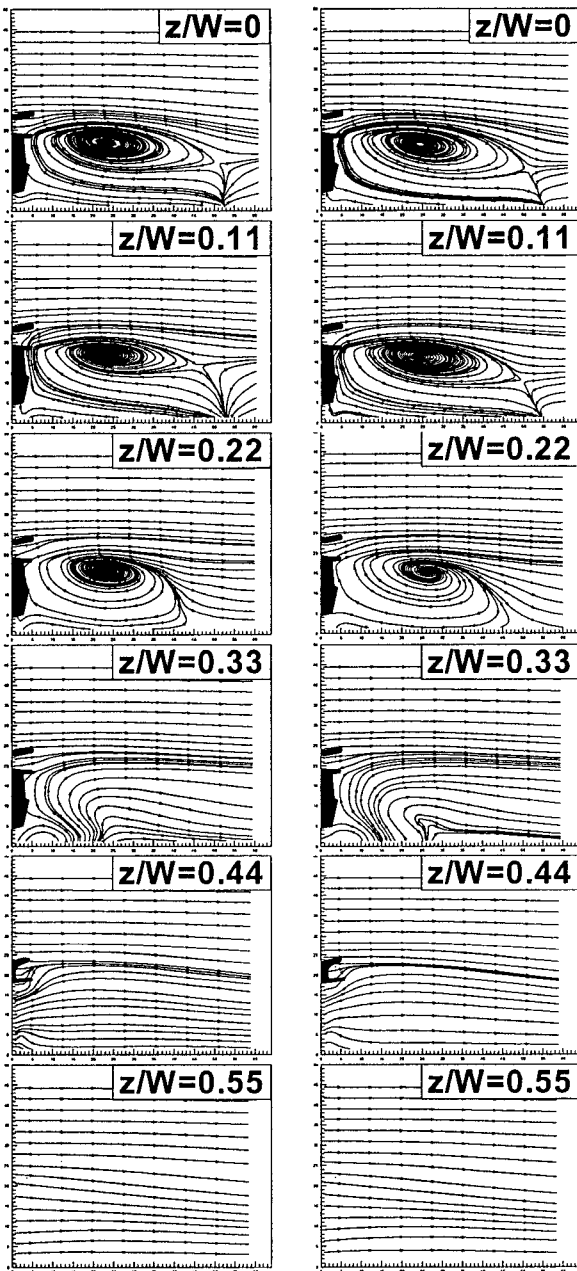
Fig. 2 에서 보이는 바와 같이 자동차의 길이(L), 높이(H), 폭(W) 방향을 각각 x, y, z 라고 할 때, 리어 스포일러(rear spoiler)를 포함한 자동차 후류부의 x-y 평면(63mm x 49 mm)을 자동차 중앙단

면으로부터 $z/W=0.11$ 씩 이동시켜 6 개의 벡터장을 얻는다. 본 실험에서는 레이놀즈 수(Reynolds no.)가 각각 50,000, 100,000 일 때의 유동장을 측정한다. 이때 레이놀즈 수에 사용되는 특성길이는 자동차 모형의 길이로 한다.

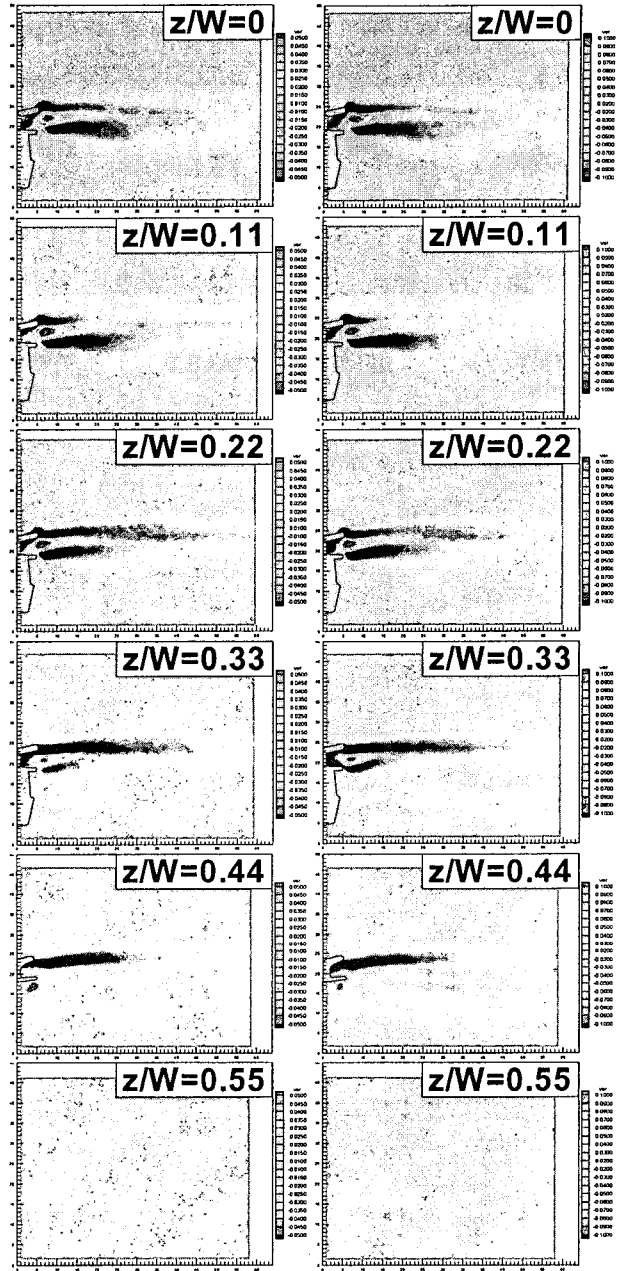
3. 결과 및 검토

자동차 후류 부분의 유선은 Fig. 3 이고 와도장은 Fig. 4 와같으며, 레이놀즈 수가 각각 50,000 일 때와 100,000 일 때의 결과를 나타낸 것이다. 또한 각단면에서의 유동장은 488 장의 순간유동장을 평균하여 구한 데이터이다. Fig. 3 의 유선장을 보면, 중앙대칭면인 $z/W=0$ 에서는 큰 규모의 재순환 영역(recirculation region)이 형성되는 것을 알 수 있고, 이때 레이놀즈 수에 따른 유선의 변화는 거의 없으며, 대칭면 근처에서 큰 규모의 단일 와류(single vortex)가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 더욱이 3 차원 박리(separation) 유동에서 나타나는 초점(focus)과 안장점(saddle point)을 볼 수 있으며, 이 가운데 안장점은 레이놀즈 수에 관계없이 $z/W=0.11$ 과 $z/W=0.22$ 사이에서 사라지고, 대신에 두갈래선(bifurcation line)과 유사한 일종의 극한유선(limiting streamline)이 발생함을 알 수 있었다. 전반적으로 $z/W=0.22$ 정도의 범위에서는 자동차 뒤에서 역류 현상이 발생하고, 지면 효과(ground effects) 등으로 후향 계단(backward-facing step)에서와 같은 2 차 와류는 발견되지 않는다. 이것은 자동차 후류가 대단히 복잡한 3 차원 흐름임을 의미하는 것이다. 앞에서 언급한 단일 와류는 $z/W = 0.33$ 이상이 되면 더 이상 존재하지 않게 된다.

와도(vorticity)는 유동의 회전성을 나타내는 척도인데, 가장 간단하면서도 대표적인 예가 경계층 흐름이다. 즉 와도가 존재하면 그만큼 유동 손실이 있다는 증거이고 그 영역이 넓고 절대 값이 클수록 점성에 의한 영향도 크다고 할 수 있으며 와도 자체로써는 순환(circulation)과도 관련된다. Fig. 4 는 유동구조의 변화를 보기위해 무차원화된 와도 분포를 단면 위치와 레이놀즈 수에 따라서 나타낸 것이다. 같은 위치에서는 레이놀즈 수에 따른 유동구조의 변화는 관찰되지 않았다. 반시계 방향으로 표현되는 양의 와도는 리어 스포일러 끝에 집중되고 대칭면에서 바깥쪽으로 갈수록 그 범위가 줄어들며 궁극적으로는 자동차 뒷부분으로 이동하다가 소멸되는 것으로 보인다. 전반적으로 절대값이 큰 와도장은 리어 스포일러 뒤에 형성된다. Fig. 5 와 Fig. 6 은 등와도(iso-vorticity) 값을 갖는 면을 3 차원적으로 재구성한 것인데, 역시 리어 스포일러 근처에서 양의 와도가 분포하는 것을 알 수 있다.



(a) $Re=50,000$ (b) $Re=100,000$
 Fig. 3 Streamlines



(a) $Re=50,000$ (b) $Re=100,000$
 Fig. 4 Vorticity contour

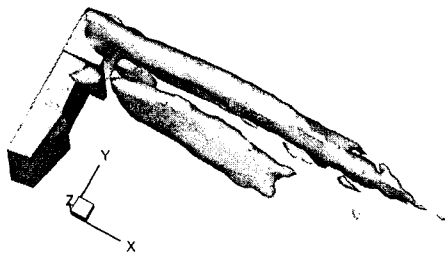


Fig. 5 Iso-vorticity surfaces at $Re=50,000$

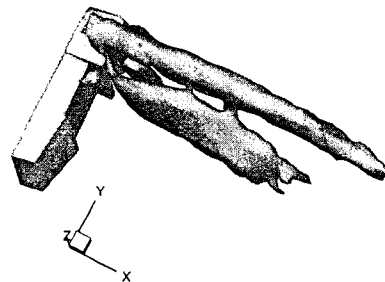


Fig. 6 Iso-vorticity surfaces at $Re=100,000$

4. 결론

모형 자동차 후류의 유동장을 레이놀즈수가 50,000 과 100,000 일 때 PIV 기법으로 측정된 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 모형 자동차 후류에서 강한 단일 와류가 형성되었고, 복잡한 3 차원 유동 박리 현상이 나타났다.
2. 반시계 방향의 절대값이 큰 와도는 리어스 포일러 끝에 집중되며, 본 실험에서 사용된 레이놀즈 수 범위에서는 레이놀즈 수에 따른 유동구조의 변화는 거의 보이지 않았다.

감사의 글

이 논문은 2004 년도 순천대학교 공과대학학술재단 연구비, 두뇌한국 21 사업 및 지방대학 혁신역량 강화사업(NURI)에 의하여 지원(연구)되었음.

참고문헌

- 1) Cho, J.S., "Experimental Research on Improving the Aerodynamic Performance of an Automobile," 공사논문집, 제 17 보, 1983.
- 2) 유정열, 김사랑, 강신형, 백세진, 이택식, 김응서, "단순화된 2 차원 자동차형 물체주위의 유동에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집, 제 13 권 제 1 호, pp.178-189, 1989.
- 3) 성봉주, 장병희, "Van 형 자동차의 후류 구조에 대한 실험적 해석", 자동차공학회지, 제 10 권 제 3 호, pp.51-59, 1988.
- 4) 배귀남, 박승오, "노치-백 자동차의 공기 역학적 임계 현상에 관한 실험적 연구", 자동차공학회지, 제 9 권 제 5 호, pp.41-48, 1987.
- 5) Ahmed, S.R., "Influence of Base Slant on the Wake Structure and Drag of Road Vehicles," J. of Fluids Engineering, pp.429-434, 1983.
- 6) George, A.R., "Aerodynamic Effects of Shape, Camber, Pitch, and Ground Proximity on Idealized Ground-Vehicles Bodies," ASME J. of Fluids Engineering, Vol.103, pp.631-638, 1981.
- 7) Harijono Djojodihardjo, "Aerodynamics Aspects of Passenger Vehicles; Review and Analysis," SAE-Paper 852186, Detroit, 1985.
- 8) Buchheim, R., Deutenbach, K.R. and Luchoffk, H.J., "Necessity and Premises for Reducing the Aerodynamic Drag of Future Passenger Cars," SAE-paper 810185, Detroit, 1981.
- 9) Hucho, W.H., Janssen, L.J. and Emmelmann, H.J., "The Optimization of Body Details - A Method for Reducing the Aerodynamic Drag of Road Vehicles," SAE/PT-79/181, 1979.
- 10) 김창중, "T-CAR 에 대한 공기역학 해석", 아세아기보, Vol. 19, pp.25-34, 1994.
- 11) 최도형, 최철진, "점성-비점성 유동 반복 계산 방법을 이용한 2 차원 자동차 모형의 공력 특성 예측", 자동차공학회지, 제 8 권 제 1 호, pp.52-61, 1986.
- 12) 최장섭, 최도형, 박승오, "자동차 중앙 대칭 단면 부근의 3 차원 경계층 계산", 자동차공학회지, 제 10 권 제 2 호, pp.61-69, 1988.
- 13) 이영림, "지면 효과를 고려한 2 차원 물체 주위의 난류 유동에 대한 수치 해석", 서울대학교 공학 석사 학위 논문, 1987.
- 14) Adey, P.C. and Greaves, J.R.A., "The Application of a 3-D Aerodynamics Model to the Sterling 825 Body Shape and Computation with Experimental Data," SAE-paper 880456, 1988.
- 15) Shaw, C.T., "Predicting of Vehicle Aerodynamics Using Computational Fluid Dynamics - A User's Perspective," SAE-paper 880455, 1988.
- 16) Shaw, C.T. and Simcox, S., "The Numerical Prediction of the Flow Around a Simplified Vehicle Geometry," Supercomputer Applications in Automotive Research and Engineering Development, A Cray Research Inc., pp.233-256, 1988.