

< 논문 >

자동차 후류에서 에어스포일러의 영향에 대한 PIV 측정

김진석* · 김성초† · 성재용** · 김정수*** · 최증욱***

(2005년 8월 24일 접수, 2005년 12월 30일 심사완료)

Effects of the Air Spoiler on the Wake Behind a Road Vehicle by PIV Measurements

Jinseok Kim, Sungcho Kim, Jaeyong Sung, Jeong Soo Kim and Jongwook Choi

Key Words : PIV(입자영상유속계), Three-dimensional Wake(3 차원 후류), Air Spoiler(에어스포일러), Road Vehicle(자동차), Isovorticity Surface(등와도 면)

Abstract

A particle image velocimetry (PIV) technique has been applied to measure the quantitative flow field characteristics behind a road vehicle with/without an air spoiler attached on its trunk and to estimate its effect on the wake. A vehicle model scaled in the ratio of 1/43 is set up in the mid-section of a closed-loop water tunnel. The Reynolds number based on the vehicle length is 10^5 . To investigate the three-dimensional structure of the recirculation zone and vortices, measurements are carried out on the planes both parallel and perpendicular to the free stream, respectively. The results show significant differences in the recirculation region and the vorticity distributions according to the existence of the air spoiler. The focus and the saddle point, appearing just behind the air spoiler, are disposed differently along the spanwise direction. Regarding the streamwise vortices, the air spoiler produces large wing tip vortices. They have opposite rotational directions to C-pillar vortices which are commonly observed in case that the air spoiler is absent. The wing tip vortices generate the down-force and as a result, they can make the vehicle more stable in driving.

1. 서론

자동차 주위 유동을 해석하기 위해 많은 실험과 수치계산 연구가 수행되어 왔다. 전산유체역학에 의한 LES(large eddy simulation)방법^(1,2) 등이 3 차원 후류(wake)에서 유동 구조와 항력 계수 등의 공력 특성(aerodynamic characteristics)에 대해 유용한 자료를 제시하고 있음에도 불구하고 수치해석에 의한 결과는 자동차의 복잡한 기하학적 형상과 높은 레이놀즈 수에서 실험 결과와 아직까지 많은 차이가 있다. 반면에 실물 자동차에 대한 실험 등을

통해서 유동장에 대한 비교적 정확한 정보를 얻을 수 있다. 대부분의 기존 연구는 열선 풍속계(hot-wire anemometry), 레이저 위상 속도계(laser doppler velocimetry), 압력 측정 장비, 다분력계(multi-component balance) 등을 사용하여 자동차에 작용하는 공기역학적인 힘과 모멘트를 측정하고 난류 구조를 이해하고자 노력하였으며,⁽³⁻⁵⁾ 유동장을 가시화하기 위해서 실(tuft), 연기(smoke) 또는 기름(oil)을 이용하였다.⁽⁶⁻¹⁰⁾ 그러나 이러한 가시화 기법들은 정성적인 면에서 현재도 사용되고 있지만 공간 분해능력이 제한되기 때문에 3 차원 유동 구조를 정량적으로 규명하는 것이 어려워서 아직까지 자동차 주위의 유동구조가 충분히 밝혀지지 않고 있다.

한편, 최근들어서 정량적 가시화기술인 PIV(particle image velocimetry) 기법을 이용하여 차량 주위의 유동을 계측한 연구들이 있었으며, Cogotti 와 Gregorio⁽¹¹⁾는 실제 차량의 백미러 후류 영역과 차

* 회원, 순천대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 서울산업대학교 기계공학과

*** 회원, 순천대학교 기계자동차공학부

† 책임저자, 회원, 순천대학교 기계자동차공학부

E-mail : ksc@sunchon.ac.kr

TEL : (061)750-3534 FAX : (061)753-3962

량 앞 바퀴 주변의 유동구조를 정량적으로 측정하였다. McCutcheon 등⁽¹²⁾은 단순화된 자동차 모형에서 해치백(hatchback) 각도에 따른 후류유동 특성을 고찰하였고, Al-Garni 등⁽¹³⁾과 Heineck 및 Walker⁽¹⁴⁾는 트럭 후류의 난류유동 특성을 PIV 계측으로 해석하였다. 그러나 이상의 연구들이 단편적인 유동 특성을 고찰하는데 그쳤고 후류의 3 차원 와 구조에 대한 전체적인 분석은 이루어지지 않았다. 차량 후미에서 발생하는 복잡한 3 차원 와류 현상은 차량의 주행 안정성 및 연료 소비율에 큰 영향을 미치므로 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 실제 스포츠카 후류에서 발생하는 3 차원 와 구조를 PIV 시스템을 이용하여 해석한다. 이를 위해서 순환형 수동(closed-loop water tunnel)의 시험부(test section) 바닥에 고정되어 있는 축소 자동차 모형의 후류 유동장을 3 차원 공간에서 단면별로 계측한다. 주유동방향의 유동 특성과 횡방향 와류의 유동구조를 이해하기 위해서 각각 주유동방향과 평행인 면과 수직인 면에서 측정하며(이들 면은 모두 지면에 수직임), 공력 특성을 개선하기 위해서 자동차 트렁크 위에 장착하는 에어스포일러(air spoiler) 또는 리어 스포일러(rear spoiler)의 유무에 따른 자동차 후류 유동의 변화를 관찰한다. 각각의 단면에서 측정된 2 차원 유동장에 대한 자료를 바탕으로 등와도 면(isovorticity surface)과 와관들(vortex tubes)을 준 3 차원적(quasi-three dimensional)으로 재구성한다.

2. 실험장치 및 구성

Fig. 1 은 개략적인 실험장치 구성을 나타낸다. 본 실험에 사용된 PIV 시스템은 순환형 수동, double-head Nd:Yag 레이저, CCD 카메라, 동기화장치 및 데이터 처리용 컴퓨터로 구성된다. 시험부는 투명한 아크릴로 제작되었는데, 그 크기는 길

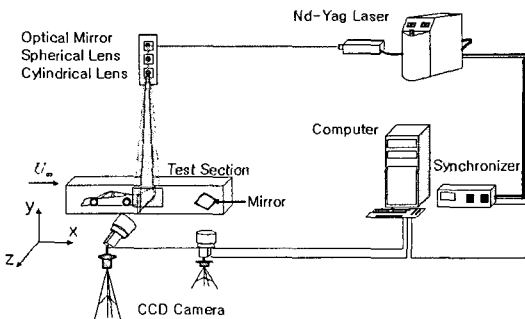


Fig. 1 Schematic diagram of the PIV system

이, 높이, 폭이 각각 $700 \times 100 \times 150\text{mm}^3$ 이다. Nd:Yag 레이저의 출력은 120 mJ 이며, CCD 카메라의 해상도는 1280×1024 픽셀이다. 또한 산란입자는 평균 지름이 $10 \mu\text{m}$ 인 Hollow Glasses Spheres 이고, 실험에 사용된 모형 자동차는 Mercedes Benz 회사의 CLK-GTR 모델을 1/43 로 축소한 것으로 길이, 높이, 폭의 제원은 $112.86 \times 25.56 \times 45.35 \text{mm}^3$ 이다. 또한 레이저 빛이 차량 표면에 반사되어 산란되는 것을 방지하기 위해 모형은 검정색으로 무광택 도색되어 시험부의 바닥에 고정되었다. 스포일러와 트렁크 사이의 부분을 레이저로 조사하기 위하여 시험부(test section) 바깥쪽 바닥면에 사각 평면거울을 수평면에 대하여 약 10° 정도 기울여 부착하였다. 본 실험은 물속에서 진행되는 특성상 정지된 바닥면 상태에서 측정이 이루어졌다. Hackett 등⁽¹⁵⁾에 의하면 고정된 지면을 사용하여도 실험결과에 큰 영향이 없다는 것을 알 수 있다.

Fig. 2 에서 보이는 바와 같이 자동차의 길이(L), 높이(H), 폭(W)의 좌표 방향을 각각 x, y, z 라고 할 때, 리어 스포일러를 포함한 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 $\Delta z/W=0.05$ 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 $\Delta x/L=0.1$ 씩 이동시켜서 모두 6 개의 단면에서 유동장에 대한 속도정보를 취득하였다. 또한 각각의 단면에서 에어스포일러의 장착 유무에 따른 유동장 변화를 관찰하기 위해 모양이 같은 두 개의 모형 자동차를 이용하였다. 또한 각각의 단면에서 총 488 장씩의 순간 유동장을 촬영하고 이것을 바탕으로 평균 유동장을 계산하였다.

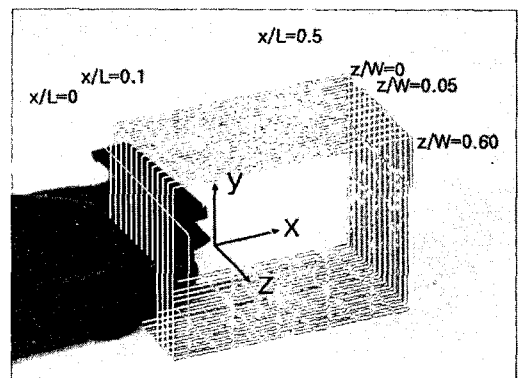


Fig. 2 The spanwise and streamwise measurement planes behind a road vehicle

3. 결과 및 토론

본 실험에서는 모형 자동차 길이를 기준으로 한

두 가지의 레이놀즈 수 즉 50,000 과 100,000 에 대해서 측정하였는데 유동장에서 큰 차이를 발견할 수 없었다. 따라서 여기서는 레이놀즈 수가

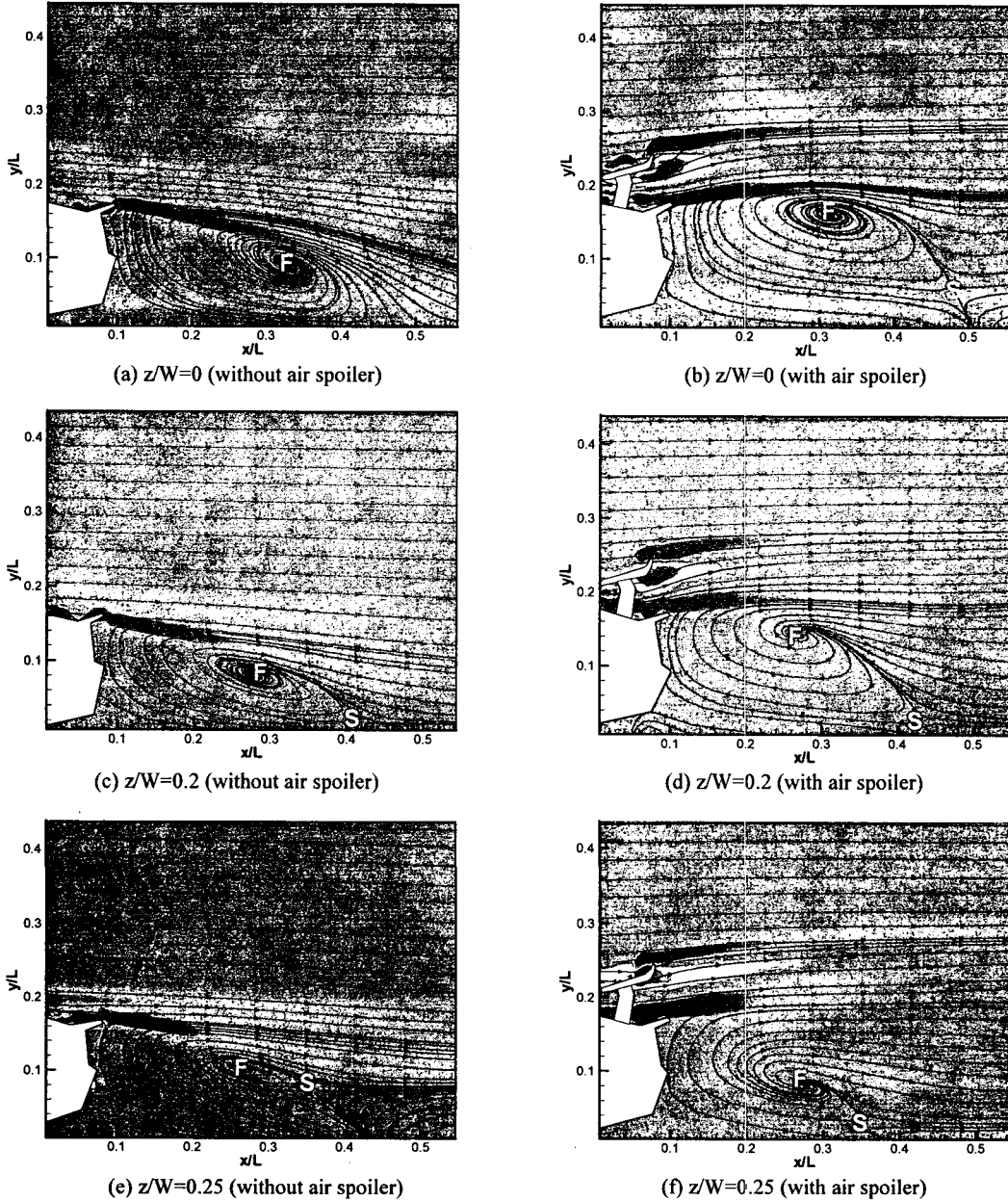
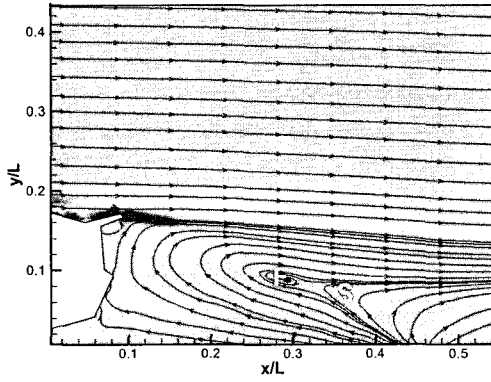
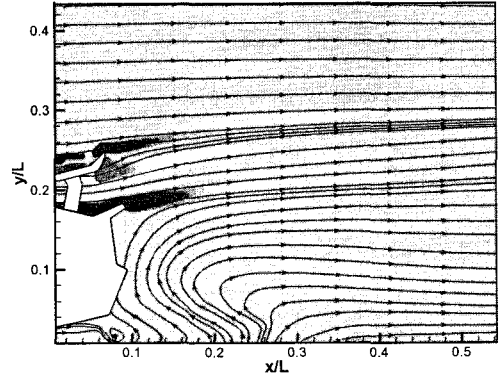


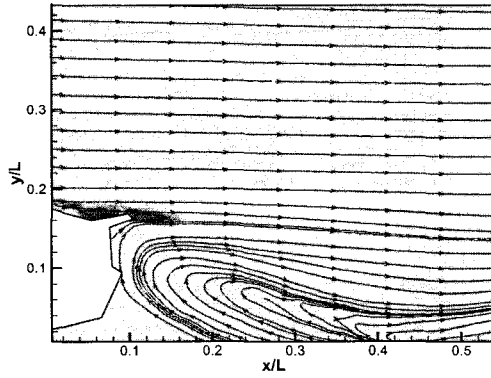
Fig. 3 Streamline patterns and vorticity distributions in the x-y plane. The characters “F” and “S” denote the positions of focus and saddle point, respectively



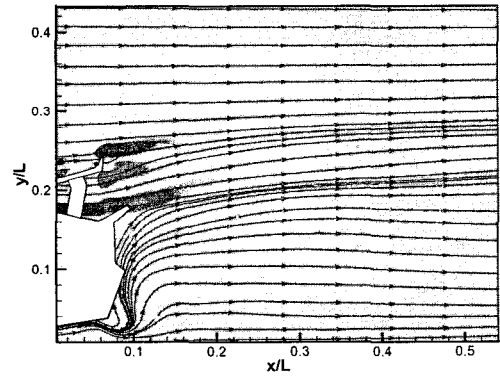
(g) $z/W=0.3$ (without air spoiler)



(h) $z/W=0.3$ (with air spoiler)

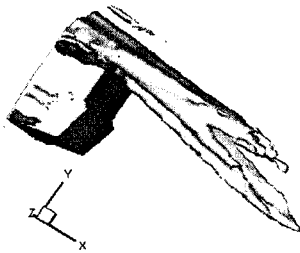


(i) $z/W=0.35$ (without air spoiler)



(j) $z/W=0.35$ (with air spoiler)

Fig. 3 Continued



(a) Without air spoiler



(b) With air spoiler

Fig. 4 Isovorticity surfaces obtained from the three-dimensional reconstruction of the spanwise vortices in the x-y plane

100,000 인 경우에만 기술한다. 본 연구는 에어스포일러의 존재에 따른 후류 구조의 변화를 고찰하고자 하는 것인데, 에어스포일러는 양력을 발생시키는 익형을 뒤집은 형태로 설치되어 음의 양력(negative lift)이 발생되도록 설계되었다. 이는 자동차가 고속으로 주행할 때에 다운포스를 증가시켜 주행안정성을 높이기 위한 것이다.^(3,9)

자동차 후류의 x-y 평면에서 유선 형태(streamline patterns)와 와도 분포(vorticity distribution)를 Fig. 3에 표시하였다.

에어스포일러의 장착 유무가 후류 유동장에 비교적 큰 영향을 미친다고 할 수 있다. 전체적인 유동 형태로 볼 때 에어스포일러가 존재하면 중앙대칭면에서 후류의 유선이 떠오르게 되고 재순환영역(recirculation region)이 위쪽으로 크기가 커지는 것을 볼 수 있으며 이는 최 등⁽³⁾의 연구결과와 잘 일치한다. 이와는 달리 자동차 폭 방향으로의 재순환영역 크기는 에어스포일러가 없을 경우에 $z/W=0.35$ 까지 뚜렷하게 남아있으나 에어스포일러를 장착하면 $z/W=0.35$ 에서 재순환 영역이 완전히 없어지고 균일한 흐름을 보인다. 또한 초점(focus)과 안장점(saddle point)의 존재도 에어스포일러가 없는 경우에는 중앙대칭면에서 $z/W=0.3$ 범위까지 존재하나 에어스포일러를 장착하면 $z/W=0.25$ 범위까지만 남아 있음을 확인할 수 있다.

한편, 에어스포일러가 없는 경우에 초점의 높이는 $y/L=0.1$ 근처에서 거의 일정하게 유지되며, 바닥면 근처에 있던 안장점은 바깥으로 갈수록 점점 초점쪽으로 다가가 합쳐지는 모습을 보인다. $z/W=0.35$ 에서는 합쳐진 초점과 안장점에 의해 바닥 근처에서 강한 역흐름(reverse flow)이 생성되는 것으로 나타났다. 반면, 에어스포일러가 장착되면 초점의 위치가 중심면에서 바깥쪽으로 갈수록 x 방향으로 큰 변화가 없으나 y 방향으로 바닥 쪽으로 이동하게 된다. 그리고 안장점의 위치는 바깥쪽으로 갈수록 점점 상류로 이동한다. 따라서 에어스포일러의 존재는 바닥면에서의 역흐름을 최소화하고 측면부에서 불규칙적인 전단와류의 발생을 억제하여 전체적으로는 주행안정성을 높이는 데 기여하는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 x-y 평면에서 측정된 횡방향 와류를 3차원적으로 재구성하여 각각 $\pm 0.1 \text{ s}^{-1}$ 의 값을 갖는 등와도 면을 그린 것으로 에어스포일러가 없는 경우와 있는 경우에 대해 비교하였다. 에어스포일러가 없는 경우는 트렁크 바로 윗면에서 강한 전단류(shear flow)에 의해 음의 와도가 형성되지만 에어스포일러가 있으면 스포일러 바로 뒤에 양의 와도가 그리고 그 위와 아래에 각각 음의 와도가 좁고 길

게 분포된다. 이는 에어스포일러 바로 아래 부분의 틈새를 통하여 강한 전단류가 흐르기 때문이다.

자동차 후류의 y-z 평면에서 유선 형태와 와도 분포를 Fig. 5에 나타냈다. y-z 평면의 유동을 계측하기 위하여 자동차 모형으로부터 300 mm 떨어진 시험부 바닥에 거울($60 \times 50 \text{ mm}^2$)을 설치하여 90°로 반사된 영상을 CCD 카메라를 통해 획득하였다. 측정면은 에어스포일러를 포함한 트렁크 부분에서부터 시작된다. 이 결과에는 측정시 후류 바닥에 부착된 거울과 카메라의 위치 및 각도 조절의 어려움으로 약간의 비대칭성이 나타나고 있으나 전체적인 유동 형태를 파악하는 데는 크게 문제되지 않는다. 또한 모형 차량이 설치되어있는 상태에서 거울이 측정단면의 유동에 영향을 주는지 확인하기 위해 거울을 설치했을 때와 설치하지 않았을 때의 두 경우에 대해서 x-y 단면을 측정하여 서로 비교한 결과, 재순환 영역에서의 안장점과 초점의 위치가 일치함으로써 거울이 유동장 측정에 중요한 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있었다. 전반적으로는 에어스포일러를 장착하면 스포일러 양 끝단에서 강한 유동방향 와류가 발생하여 먼 후류까지 유지되는 것을 알 수 있다. 이것은 비행기 날개 끝(wing-tip)에서 발생하는 와류(trailing vortex)와 유사하다. 다만 날개의 경우와는 반대로 회전하기 때문에 음의 양력(negative lift)이 발생된다. 이것은 에어스포일러의 받음각(angle of attack)이 전체적으로 음이라는 것을 반증하는 것이고, 특히 이것이 자동차가 고속으로 주행할 때 안정성을 높여주는 결과에 기여한다⁽²⁾. 자동차에서 에어스포일러의 채택은 항력이 감소함과 동시에 음의 양력을 발생시켜 조종 안정성을 확보하려는 의도로 볼 수 있다.⁽⁹⁾

자동차 후류의 대표적인 유동방향 와류는 C-Pillar 와류로서 Fig. 5(c)에서 나타낸 바와 같이 자동차 측면부에서 발생하여 후류로 길게 이어진다. 스포일러가 없는 경우에 C-Pillar 와류는 트렁크 윗부분에서 떨어져 나와 하류로 가면서 바깥에서 재순환영역으로 유입(entrainment)되는 유체로 인하여 Fig. 5(g)와 같이 강한 와류 쌍을 이룬다. 유선의 분포에서도 알 수 있듯이 유입되는 유체는 자동차 후면에서 큰 반원 형태로 존재하며, 그 경계가 하류로 갈수록 점점 커지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(e)의 $x/L=0.3$ 위치에서는 노드(node)가 존재하는데, 이 노드는 Fig. 3(a)에서 나타난 횡방향 와류의 초점 바로 아래 위치하고 있으면서 바깥의 유체를 강하게 흡입한다. 기존의 연구들은 대부분 $x/L=1.0$ 이상에서 계측하였으며,⁽¹²⁾ 본 실험에서 얻은 $x/L=0.5$ 의 결과와 유사한 형태를 보인다. 그러나 본 연구는 자동차 근접 후류에서 나타나는

C-Pillar 와류의 발달과정을 가시화했다는 점에서 그 의의가 있다.

에어스포일러가 있는 경우는 Fig. 5(d)에서와 같이 자동차 후면 근처에서 C-Pillar 와류가 발견되

지만 스포일러의 양 끝에서 발생하는 강한 와류에 의해 그 영향력은 아주 미약한 것으로 나타났다. 스포일러 끝단에서 발생된 강한 횡방향 와류(wing-tip vortices)는 C-Pillar 와류와 방향이 반대이

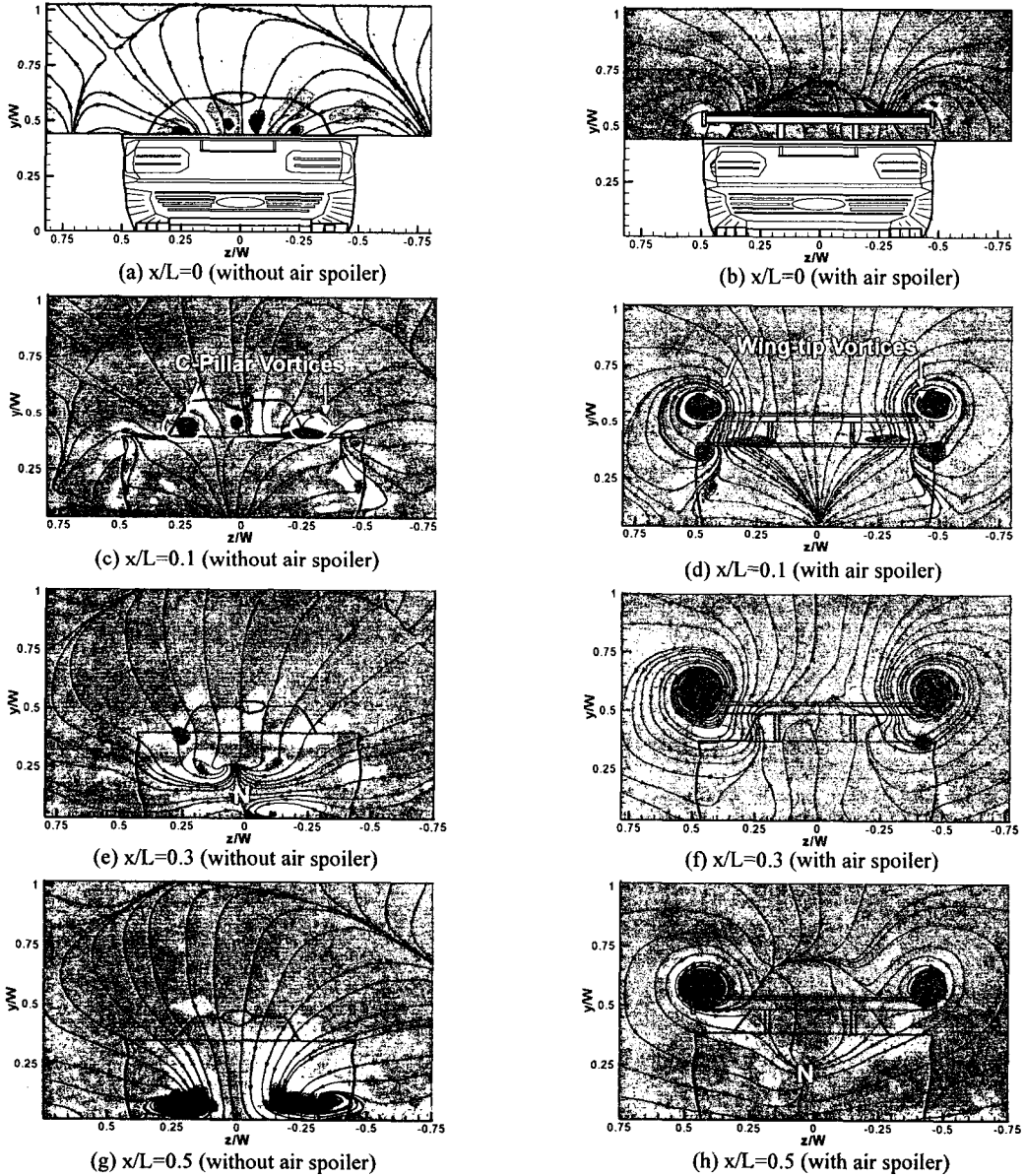


Fig. 5 Streamline patterns and vorticity distributions in the y-z plane The characters "N" denotes the positions of node

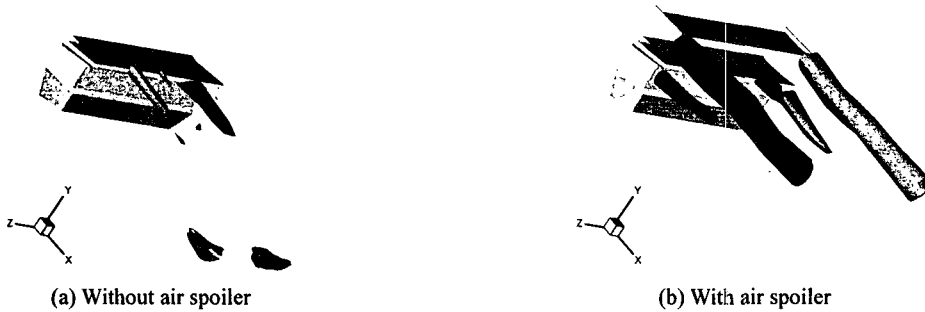


Fig. 6 Isovorticity surfaces obtained from the three dimensional reconstruction of the streamwise vortices in the y-z plane

며, 하류로 이동하더라도 그 위치가 거의 변하지 않고 Fig. 5(h)와 같이 먼 후류($x/L=0.5$)에서 노드로 유체가 유입되도록 하는 역할을 한다. 이 유동방향 와류의 노드는 Fig. 3(b)에서 볼 수 있듯이 횡방향 와류의 안장점과 비슷한 위치에서 형성된다.

결론적으로 에어스포일러의 존재는 자동차 근접 후류에서 양의 양력 증가의 원인이 되는 내리 씻음(down-wash)과 C-pillar 와류를 감소시키는 강한 익단와류(wing-tip vortex)를 형성함으로써 음의 양력을 발생시키는 원인이 된다.⁽⁹⁾

Fig. 5 에 보인 $x/L=0.1$ 부터 $x/L=0.5$ 까지의 2 차원 유동장의 데이터를 바탕으로 $\pm 0.03 \text{ s}^{-1}$ 값을 갖는 등와도 면을 Fig. 6 에 나타내었다.

에어스포일러가 없는 경우는 C-Pillar 와류 쌍이 트렁크 윗면에서 떨어져 나와 재순환영역에서 주위유체가 유입되어 하류에서 크고 강한 와류로 발전해 가는 것을 볼 수 있다. 반면, 에어스포일러가 있으면 Fig. 6(b)와 같이 C-Pillar 와류는 거의 나타나지 않고 스포일러 양 끝단에서 발생한 반대방향의 와류쌍이 후류를 지배하게 된다.

4. 결론

자동차 후류에서 나타나는 복잡한 3 차원 와류 현상을 가시화하고 에어스포일러 장착에 따른 후류의 변화를 고찰하였다. 본 실험은 레이놀즈 수가 100,000 일 때 축소모델에 근접한 후류 유동을 PIV 기법으로 측정하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

비행기 날개와 반대방향으로 설계되어 장착된 에어스포일러에 의해 횡방향(spanwise) 와류의 재순환영역이 중앙대칭면 부근에서는 더욱 크게 형성되고 측면부 방향으로서는 짧게 형성된다. 횡방향 와류의 초점과 안장점의 위치도 상당한 차이를 보였는데,

측면부로 갈수록 초점은 아래로 이동하고 안장점은 상류방향으로 이동하는 것이 특징이다.

유동방향(streamwise) 와류는 에어스포일러에 의해 정반대 방향의 흐름을 보였다. 통상적으로 존재하는 C-Pillar 와류가 매우 약해지고 에어스포일러 양 끝단에서 발생한 익단 와류가 후류를 지배하면서 전체적으로 음의 양력을 발생시키므로 주행안정성에 기여하는 것으로 해석된다. 또한 유동방향 와류의 노드가 횡방향 와류의 안장점과 비슷한 위치에 형성됨으로써 측면부에서 나타나는 횡방향 와류의 강한 역흐름을 억제하는 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 2004 년도 순천대학교 공과대학학술재단 연구비에 의하여 연구되었으며, 또한 2004 년도 교육인적자원부의 지방대학 혁신역량 강화사업(NURI)에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Krajnovic, S. and Davidson, L., 2004, "Large-Eddy Simulation of the Flow Around Simplified Car Model," *SAE Paper* 2004-01-0227.
- (2) Han, T., 1989, "Computational Analysis of Three-Dimensional Turbulent Flow Around a Bluff Body in Ground Proximity," *AIAA Journal*, Vol. 27, No. 9, pp. 1213~1219.
- (3) Choi, J. H. and Lee, S. J., 1996, "Experimental Study on Drag Reduction of Ground Vehicle Using a Rear-Spoiler," *Trans. of the KSAE*, Vol. 4, No. 3, pp. 31~39.
- (4) Ahmed, S. R., Ramm, G. and Faltin, G., 1984, "Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake," *SAE Paper* 840300.
- (5) Lienhart, H. and Becker, S., 2003, "Flow and Turbulence Structure in the Wake of a Simplified Car Model," *SAE Paper* 2003-01-0656.

- (6) Azim, A. F. A. and Gawad, A. F. A., 2000, "A Flow Visualization Study of the Aerodynamic Interference Between Passenger Cars," *SAE Paper* 2000-01-0355.
- (7) Gilhome, B. R., Saunders, J. W. and Sheridan, J., 2001, "Time Averaged and Unsteady Near-Wake Analysis of Cars," *SAE Paper* 2001-01-1040.
- (8) Jenkins, L. N., 2000, "An Experimental Investigation of the Flow Over the Rear End of a Notchback Automobile Configuration," *SAE Paper* 2000-01-0489.
- (9) Kee, J. D., Kim, M. S. and Lee, B. C., 2001, "The Coanda Flow Control and Newtonian Concept Approach to Achieve Drag Reduction of Passenger Vehicle," *SAE Paper* 2001-01-1267.
- (10) Landman, D. and Koster, E., 2000, "A Full-Scale Wind Tunnel Test of a Short Track Race Car," *SAE Paper* 2000-01-3548.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) 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.
- (14) Heineck, J. T. and Walker, S. M., 1999, "3D PIV in Wind Tunnel Applications : Measurements of a Truck Wake," *SAE Paper* 1999-01-5600.
- (15) Hackett, J. E., Baker, J. B., Williams, J. E. and Wallis, S. B., 1987, "On the Influence of Ground Movement and Wheel Rotation in Tests on Modern Car Shapes," *SAE Paper* 870245.