

대형버스 바디모델의 후류특성 및 후미 스포일러 효과에 관한 해석적 고찰

김민호* · 국종영 · 천인범

기아자동차 상용연구소

A Numerical Investigation on the Wake Flow Characteristics and Rear-Spoiler Effect of a Large-Sized Bus Body

Minho Kim* · Jongyoung Kuk · Inbum Chyun

Commercial Vehicle R&D Center, Kia Motors Corp., Naebang-dong, Seo-gu, Gwangju 502-711, Korea

(Received 14 September 2002 / Accepted 30 December 2002)

Abstract : The aerodynamic characteristics of automobiles have received substantial interest recently. Detailed knowledge of the vehicle aerodynamics is essential to improve fuel efficiency and enhance stability at high-speed cruising. In this study, a numerical simulation has been carried out for three-dimensional turbulent flows around a commercial bus body. Also, the effect of rear-spoiler attached at rear end of bus body was investigated. The Navier-Stokes equation is solved with SIMPLE method in general curvilinear coordinates system. RNG k- ϵ turbulence model with the MARS scheme was used for the evaluating aerodynamic forces, velocity and pressure distribution. The results showed details of the three-dimensional wake flow in the immediate rear of bus body and the effect of rear-spoiler on the wake structure. A maximum of 14% reduction in drag coefficient was achieved for a model with a rear-spoiler.

Key words : Aerodynamic characteristics(공력특성), Bus body(버스바디), Turbulent flow(난류유동), Rear-spoiler(후미 스포일러), Drag coefficient(항력계수)

1. 서론

자동차 주위의 공기흐름은 복잡한 난류유동으로써 매끄러운 외형설계를 통해 저 저항 차량을 개발하기 위한 공기역학적 측면이 상당히 중요한 요소이다. 이와 관련하여 자동차가 주행할 때 공기흐름의 역학적 고찰을 통해 엔진 냉각을 향상시킬 수 있는 엔진룸 배치설계와 자동차 표면의 압력분포를 토대로 한 차내 환기용 흡기구 및 배기구의 적절한 위치 선정으로 효과적인 차내 환기가 이루어져야

한다. 또한 자동차 주위의 공기흐름은 주행시 공기저항을 감소시켜 연료를 절감하는 경제성 측면과 양력 및 횡풍 영향에 의한 조정 안정성 측면에서 중요한 의미를 갖는다. 이 중에서 공기저항은 연료소비의 증가를 초래하게 되므로 차량 개발시 설계 초기단계에서 공력성능을 평가하기 위한 연구들이 주로 수행되고 있다.¹⁾⁷⁾ 설계 초기단계에 자동차의 외형에 따른 공기저항 예측을 위해 주로 모형을 이용한 풍동 실험을 수행하고 있으나 차량 주위 유동장의 자세한 정보를 얻기 위해서는 실험장치 구성 및 모형제작을 위한 많은 비용이 소비되며 개발기간 또한 오랜 시간 소요되는 단점이 있다. 최근 들어 전

* To whom correspondence should be addressed.
amcae900@empal.com

산기 용량의 성장 및 수치해법의 비약적인 진보로 인해 CFD (Computational Fluid Dynamics) 기법을 활용하여 차량 개발 기간을 단축하고 실험을 통해 얻기 힘든 많은 유용한 정보들을 얻고 있으나 지금까지의 연구들은 주로 승용차에 국한되며 버스나 트럭과 같은 상용차에 대해서는 아직 미흡한 실정이다. 기존의 상용차에 대한 연구들을 살펴보면 Yohei Takemori⁸⁾ 등은 단순화된 1/16 축소 버스모델의 후미에 가이드 배인 부착형태에 따른 항력계수와 표면 압력분포 등을 고찰하여 항력 저감을 위한 효과적인 후류 제어(wake control)에 관한 연구를 수행하였다. Tsutomu Fujimoto⁹⁾ 등은 공기 전향장치(air deflector)의 형상변경과 요각(yaw angle) 변화에 따른 항력계수를 계산하였고 Sven Perzon¹⁰⁾ 등은 단순화된 트럭모델에 대하여 해석스킵과 난류모델에 따른 항력계수 및 압력 분포결과와 실험결과를 비교 분석하였다. Camara¹¹⁾ 등과 Nassief¹²⁾ 등은 버스모델 외관 형상변화와 레이놀즈 수 변화에 따른 압력분포 등을 고찰한 바 있다. 이와 같이 기존의 연구들은 주로 단순모델을 이용하여 항력계수를 예측하였고 실제모델을 이용하더라도 후미에서 생성되는 후류와 같은 복잡한 난류 유동장에 관한 고찰은 아직 미진한 결과를 보이고 있다.

본 연구에서는 먼저 형상을 단순화한 무딘 버스 바디에 대한 공력특성을 실험결과와 비교해 봄으로써 CFD 해석의 유효성을 검증한 후 보다 유선화된 실제 버스 바디모델에 적용하였다. 본 연구를 통해 버스차량의 공력특성과 공기저항의 큰 비중을 차지하는 후류(wake flow) 유동장에 대한 상세한 정보를 얻을 수 있었다. 또한 후미 스포일러(rear-spoiler)가 후류 유동장 및 공력특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식 및 난류모델

본 연구에서는 일반 좌표계에서의 지배방정식인 연속방정식, Navier-Stoke 방정식, 난류모델방정식 등을 사용하였다. 일반적으로 난류 유동장 해석에 사용되는 기존의 k-ε 난류모델은 이차적인 변형률 효과(secondary straining effect)를 고려하지 못하기

때문에 후향계단(backward-facing step) 유동에서 발생하는 재부착 길이(reattachment length)를 실험결과에 비해 짧게 예측¹⁶⁾ 한다고 보고된바 있으며 본 연구의 해석 대상인 버스 바디 후미에서 발생하는 후류와 같은 압력 구배 영향이 큰 유동에서 실험결과 수치해석 결과에 많은 오차를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 RNG k-ε 모델¹³⁻¹⁵⁾을 사용하였다. RNG k-ε 모델은 기존의 표준 k-ε 모델의 소산율 방정식에 박리 등에 의해 생성되는 유동의 비등방성 효과를 모사하기 위해 부가적인 생성항인 $-\rho R$ 항이 첨가된 모델이다. 부가된 R 항은 변형률(rate of strain)을 의미하며 다음의 식 (1)과 같이 정의된다.

$$R = 2 \frac{\mu}{\rho} S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial y_j} \frac{\partial u_j}{\partial y_i} \quad (1)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial y_j} + \frac{\partial u_j}{\partial y_i} \right)$$

또한 위의 R 항은 다음의 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$R = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

$$\beta = 0.012, \eta_0 = \sqrt{\frac{C_{\epsilon 2} - 1}{C_\mu (C_{\epsilon 1} - 1)}}$$

$$C_\mu = 0.085, C_{\epsilon 1} = 1.42, C_{\epsilon 2} = 1.68$$

여기서 $\eta = Sk/\epsilon$ 는 난류와 평균 변형률의 시간 척도를 나타내며 $S^2 = 2 S_{ij} S_{ij}$ 은 변형률의 크기를 의미한다.

2.2 해석조건

입구유속은 약 27.8m/s로 입구면에 수직한 방향으로 유입되도록 처리하였으며 입구 평균 속도와 차량 높이를 기준으로 한 레이놀즈 수는 5.27×10^6 이다. 해석을 위해 범용 유동해석 코드인 STAR-CD (Ver. 3.1)를 사용하였고 주행중 지면효과(ground effect)를 고려하기 위해 격자계 밑면에 차량 주행속도와 동일한 유속을 갖는 벽면 조건을 적용하였다. 모델의 대칭성을 이용하여 오른쪽 반만을 모델링하였고 대칭 경계면에서는 대류 유속과 수직 방향으로의 종속 변수들의 구배를 0으로 한 대칭 경계조

건을, 나머지 벽면과 버스 바디표면에 대해서는 점착조건을 부여하였다. 그리고 벽면에 인접한 제어체에 대해서도 벽함수(wall function)를 사용하였으며 벽면 근처의 계산 셀들을 세분화하였다. 대류항 이산화를 위해 이차 정확도 차분도식인 MARS (Monotone Advection and Reconstruction Scheme)을 적용하였으며 이 기법은 Seven Perzon 등¹⁰⁾에 의해 수행된 유한 차분도식에 따른 해석과 시험결과의 비교에서 예측의 정확도가 높은 것으로 보고된 바 있다. 수렴조건은 반복 계산시 전체 내부 격자계에서 질량 및 운동량 잉여량이 입구에서의 질량 유입량과 운동량 유입량의 0.1%이하가 되면 수렴된 것으로 설정하였다.

2.3 해석조건

본 연구의 대상모델은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 대형 버스로서 계산의 정확성을 향상시키기 위해 관심 영역인 바디 전후 영역의 격자는 조밀하게 하는 비균일 격자계를 사용하였다. 총 격자수는 스포일러 유무에 따라 각각 290여만개와 200여만개의 셀을 사용하였다. 모델 생성시 버스 바디와 루프에 어كن 조립체만을 고려하였고, 차량 전면과 후면부

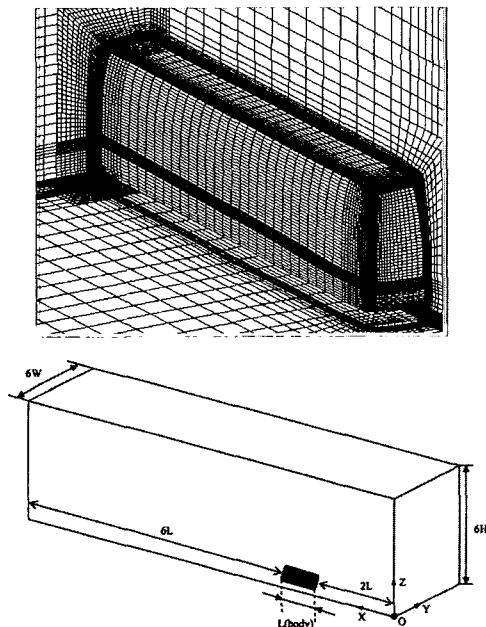


Fig. 1 Computational domain and grid generation

의 경사진 밑면은 범퍼 끝단과 일치시킨 경사진 평면으로 처리하였으며 차량 중앙부의 하단부는 지면과 평행하게 처리하였다. 본 연구에서 고려한 버스 바디의 재원은 길이(L)와 높이(H)가 각각 12m와 3.05m 이고, 폭(W)은 2.5m이다. 격자모델의 치수는 차량 상류쪽과 하류쪽으로 각각 차량길이의 2배와 6배로 하였고, 차량의 높이 방향으로는 차량 높이의 6배, 폭 방향으로는 차량 폭의 6배로 하였다.

3. 수치해석의 유효성 검증

본 연구에서는 Yoke Takemori⁸⁾가 실험적으로 고찰한 바 있는 Fig. 2와 같은 1/16스케일 단순 버스모델을 동일하게 모델링 하여 실험결과와 비교하여 해석의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 후류의 유동패턴을 Fig. 3에 도시하였는데 W. T. Mason¹⁶⁾ 등이 보고한 바 있는 버스나 트럭과 같은 무딘 물체(bluff body) 후류에서 전형적으로 나타나는 올려흐름(upwash)이 발생하였고 이로 인한 역 흐름이 재차 바디후면에 재 부착하여 바디 하단부에서 재순환 영역(recirculation region)을 형성하고 있음을 볼 수 있다.

이와 같이 해석과 실험이 동일한 흐름을 보이며 높이 방향으로 압력 구배가 큰 특성을 갖는다. 항력 계수 또한 해석결과 0.518로 나타나 실험값인 0.540

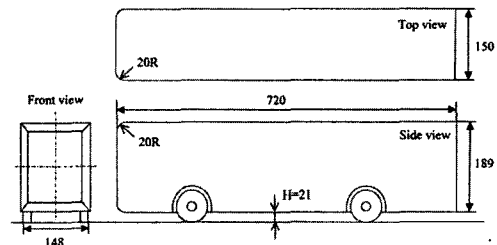


Fig. 2 Simplified bus model [mm]

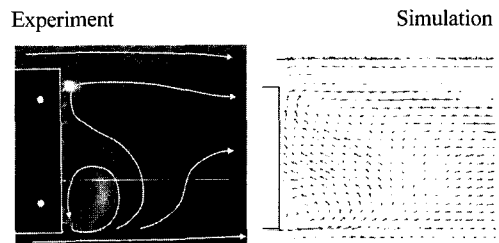


Fig. 3 Visualization of wake flow

과 비교해 볼 때 약 4%이내로 잘 일치하는 결과를 나타내었다.

4. 수치해석 결과 및 검토

4.1 버스 바디 전후부 주위의 유동특성

바디 전후부 표면에서의 속도벡터를 Fig. 4에 도시하였다. 바디 전면부에서 속도분포를 살펴보면 상류에서 유입되는 초기 균일유동은 바디 전면 유리창 하부에서 일부 속도 정체 영역을 형성하며, 다시 이 부분을 기점으로 전체유동이 상하 좌우로 나뉘어져 원활한 흐름을 보이다가 각 곡률부에서 유동 속도가 급격히 빨라지는 현상을 볼 수 있다. 이렇게 형성되는 전면에서의 속도 정체영역은 높은 압력을 발생시키면서 항력을 유발시키는 주된 원인이 된다. 이러한 속도정체 영역의 형성은 설계 시 피할 수 없는 부분이지만 어떻게 이 영역을 축소시킬 수 있는지가 차량의 항력감소에 관건이 되기도 한다. 후면부 유동은 후면 가장자리에서 시계방향의 와류(vortex)가 형성되는 것을 볼 수 있으며 상부 측면의 유동은 바디 아래 방향을 향해 진행하고 하부에서의 전반적인 유동은 바디 측면쪽으로 진행함을 볼 수 있었다.

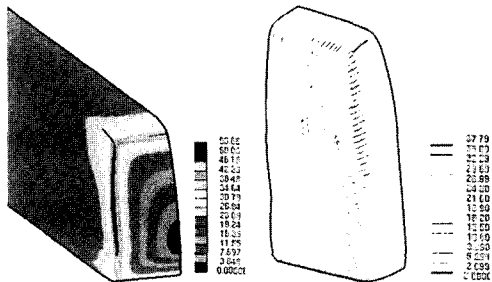


Fig. 4 Velocity distribution on the front and rear body surface in half model

4.2 후류특성

바디 후부 상하면의 각 단면에서의 유동장을 Fig. 5에 도시하였다. $Y=0$ 인 단면의 유동형태는 바디 전면부를 지난 유동이 바디 길이방향을 따라 뒤쪽으로 원활히 흐르다가 바디 후부의 곡률 시작점부터 유동이 박리(separation)되고 있음을 볼 수 있다. 전체 유동이 엔진룸 배기구(exhaust hole)를 중심으로 상하로 분리되고 있으며 후면 상단을 타고 흐르는

올려흐름 유동과 박리되는 유동이 만나면서 유동방향이 변경되고 미소하나마 재순환 유동이 존재함을 볼 수 있다. 또한 범퍼(bumper) 하면에서는 바디 표면을 따라 차량 하면을 향하는 유동과 지면과 바디 하부사이를 통과하는 비교적 빠른 유동이 만나 이들 경계면에서 반시계 방향의 와류가 형성되었다.

후면 상단부에서 형성된 재순환 유동이 $Y=0.34$ 단면에서는 보다 확장되었고 바디 표면에 근접한 위치로 천이 되어 있음을 볼 수 있으며 차량 상부를 통과하는 유동은 $Y=0$ 인 단면의 유동에 비해 지면쪽으로 향하는 유동성분이 더 크게 나타났다. 차량 하부에서는 $Y=0$ 인 단면에서와 동일하게 시계방향의 와류가 보다 넓게 형성되었고 차량 하부에서 올라오는 올려흐름의 영향이 더욱 커짐을 볼 수 있었다. $Y=0.68$ 단면에서는 전반적으로 차량 상부를 통과하는 유동의 방향이 $Y=0$ 과 $Y=0.34$ 단면의 그것보다

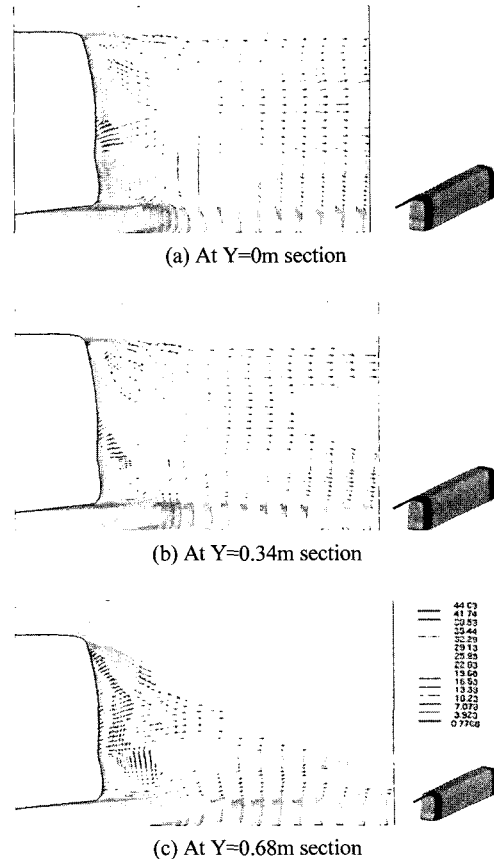


Fig. 5 Velocity distribution around a rear body

더욱 지면쪽으로 향하고 있으며 차량 상부에서 형성되었던 재순환 유동은 소멸되어 있음을 볼 수 있다. 위와 같이 차량의 측면으로 갈수록 유동의 형태는 새로운 양상을 보이는데 이러한 주된 원인은 바다 측면 곡률을 지나는 빠른 유동이 상하면을 지나는 유동을 지배하기 때문이라 여겨진다.

한편 Z방향을 기준으로 잘라본 유동형태는 Fig. 6과 같으며 전반적인 유동형태는 바다 측면을 따라 길이방향으로 흐르는 유동과 폭 방향으로 흐르는 유동이 만나 이들 간에 유동간섭이 생기고 이로 인해 박리 현상이 발생하여 새로운 방향으로의 유동을 만들어 내는 것을 볼 수 있다. 바다 하단부인 범퍼에 인접한 $Z=0.8$ 인 단면보다 배기구에 인접한 $Z=1.97$ 단면에서 바다 중앙쪽으로 향하려는 속도 성분이 보다 큰 값을 가지므로 이의 영향으로 비교적

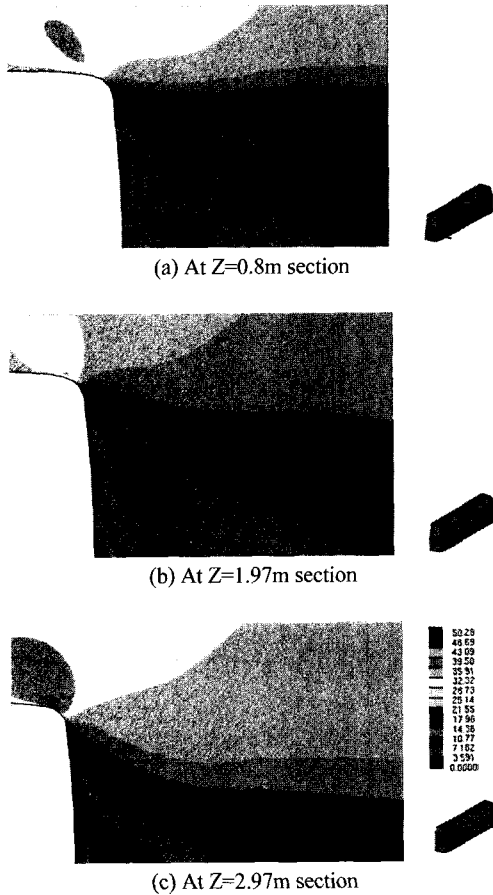
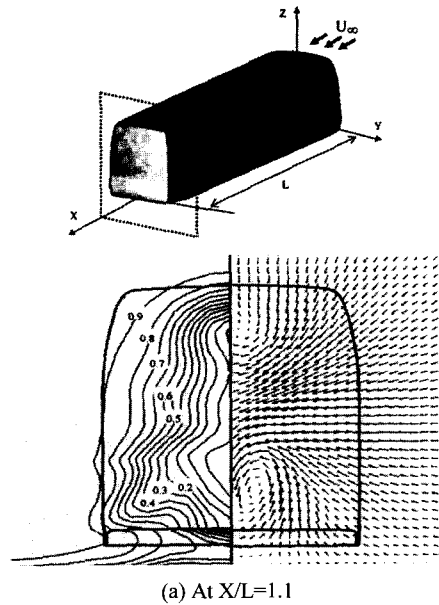


Fig. 6 Velocity distribution at horizontal plane around a rear body

넓은 영역에 걸쳐 와류가 형성되고 있고 차량 상단부인 $Z=2.97$ 단면에서는 측면을 지난 유동이 보다 지배적임을 알 수 있었다. 바다 코너부위의 유동은 바다 하단부 측면 곡률시작점에서부터 유동 박리가 발생하였고 바다 상단부 단면의 경우 측면 곡률이 끝나는 위치에서 발생함을 알 수 있었다.

Fig. 7에는 바다 후면과 평행한 단면에서의 후류 특성을 고찰하고자 왼쪽에는 축방향 유속(U/U_∞)을 오른쪽에는 Y방향과 Z방향에 대한 속도 성분을 도시하였다. 후면과 약 1.2m떨어진 $X/L=1.1$ 단면에서는 바다 표면 흐름에서 볼 수 없었던 반시계 방향의 와류가 바다 하단부에서 생성되고 있다. 이는 바다 상단부 및 측면의 흐름이 아래로 밀어 내리는 성질을 가지며 특히 바다 하단부에서 진행하던 비교적 빠른 흐름이 범퍼 끝 단에서부터 확산되면서 바다 하부쪽으로 진행하는 유동을 다시 상부 쪽으로 밀어 올리려는 특성을 지니기 때문으로 판단된다. 바다 상단 표면에서 생성되었던 와류도 차량의 중앙쪽으로 옮겨져 있는데 이는 바다 표면을 벗어난 곳에서는 측면 유동이 더욱 지배적이라는 것을 의미한다. 또한 $X/L=1.3$ 단면과 $X/L=1.5$ 단면에서와 같이 차량 후면과 점차 멀어질수록 생성된 와류의 중심은 차량의 측면과 하부쪽으로 이동해 가며 점



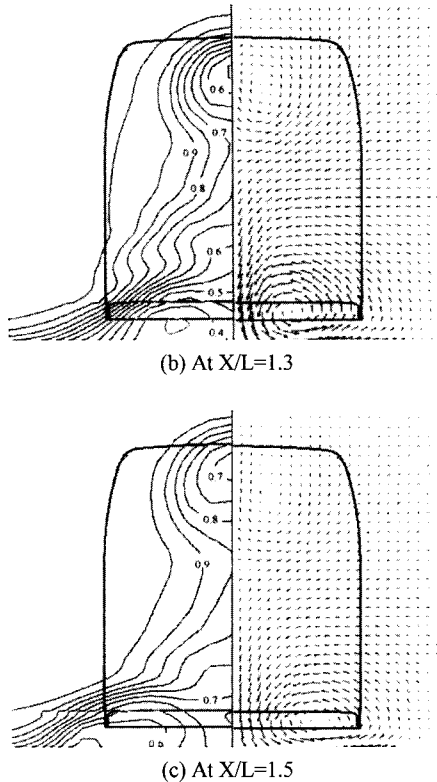


Fig. 7 Axial velocity distribution(U/U_∞) and velocity vectors on a cross plane

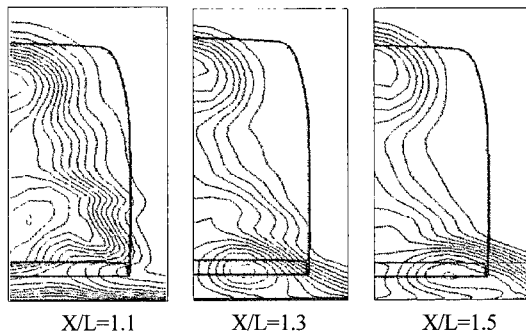


Fig. 8 Total pressure distribution($P_{tot}/P_{tot(\infty)}$) on a cross plane

차 그 강도 또한 감소하고 있다. Fig.7에 도시한 축방향(U/U_∞) 유속분포 양상은 Fig. 8에 도시한 전압력의 강하 양상과 유사하게 나타나고 있는데 이로부터 축방향 속도 성분이 나머지 방향(Y, Z)의 속도 성분보다 상대적으로 매우 크므로 축방향 유속이 전압력에 결정적인 영향을 미침을 알 수 있다.

후류의 흐름을 입자추적(*particle tracking*) 기법을

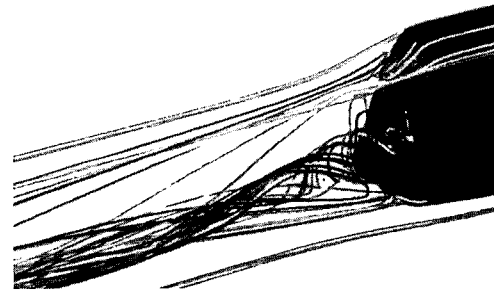


Fig. 9 Particle tracking of wake flow

통해 그려보면 Fig. 9와 같으며 후류 영역에서는 3차원의 복잡한 흐름이 형성되는 것을 잘 나타내 주고 있으며 바디 끝 단으로부터 대략적으로 0.7m 떨어진 곳에서 하나의 반시계 방향의 와류만을 형성하는 것을 볼 수 있다.

4.3 후미 스포일러 효과

바디 주위의 압력분포는 Fig. 10과 같으며 전반적으로 바디 전면부에서 높은 정압의 정체압력부가 형성되고 나머지 부분에서는 부압이 형성되고 있음을 알 수 있다. 이러한 압력분포에서 양력은 차량의 상 하면에 형성되는 압력차에 기인하므로 양력(*lift force*)을 감소시키기 위해서는 차량의 루프 끝단, 즉 유동의 박리점 부근에서 형성되는 낮은 부압 값을 크게 함으로써 가능하고 이를 위해 차량 상단에 가이드 베인(*guide vane*)이나 스포일러(*spoiler*) 등의 장착을 고려해 볼 수 있다. 본 연구에서는 스포일러에 의한 공력특성 변화를 고찰해 보고자 Fig. 11과 같은 후미 스포일러를 제작한 후 해석적 고찰을 위해 3차원 선도 및 형상 데이터를 생성하였다. 스포일러를 부착한 경우 투영 단면적은 $3.609m^2$ 이며 스포일러가 없는 모델에 비해 약 1%정도 증가되었다.

Fig. 12에는 스포일러를 장착한 모델의 후류 속도분포를 도시하였다. 기존 차량 후미 상단부에서 Y축을 기준으로 발생하던 심한 와류는 스포일러를 장착함으로써 제거되었으나 센터 단면에서는 스포일러를 통과한 공기가 유리창을 타고 유출되지 못하고 일부는 하부로부터 형성된 올려흐름과 만나 새로운 와류를 형성하고 일부는 차량 측면쪽으로 진행함을 볼 수 있다.

항력과 양력은 차량에서 바람직하지 못한 현상이

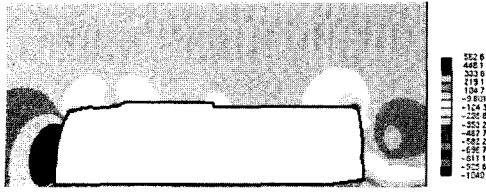


Fig. 10 Pressure distribution around bus body at the center section

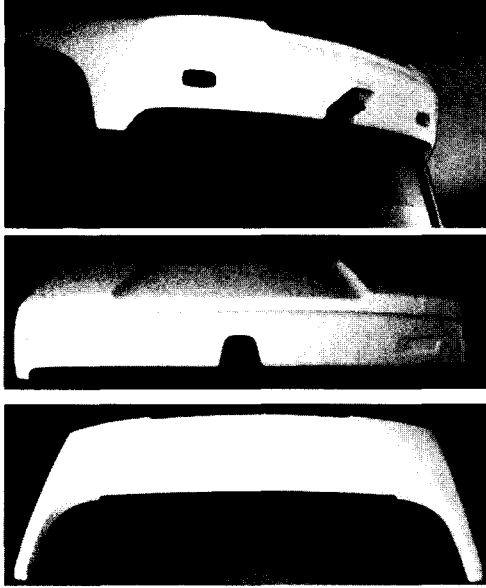


Fig. 11 Shape of rear spoiler

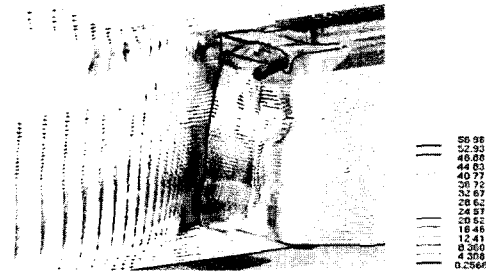


Fig. 12 Velocity vectors at wake region in case of model with rear-spoiler

며 특히 양력의 증가는 바퀴의 견인력을 감소시키고 조정성을 떨어뜨리는 원인이 된다. Table 1과 Table 2에는 주행속도 변화 및 후미 스포일러 유무에 따른 공기역학적 계수들의 변화를 나타내었다.

바디 표면에서의 압력 및 마찰계수(C_f)를 이용하

Table 1 Variation of drag and lift coefficient according to the presence of rear-spoiler

주행조건 (km/h)	C_D		C_L	
	with	without	with	without
80	0.529	0.605	-0.360	0.017
100	0.527	0.610	-0.355	0.032
120	0.525	0.611	-0.352	0.041

Table 2 Variation of pitching moment coefficient and reduction rate

주행조건 (km/h)	C_M		Reduction rate	
	with	without	$\Delta C_D(\%)$	ΔC_L
80	-0.055	-0.176	0.076(12.6)	0.377
100	-0.054	-0.178	0.083(13.6)	0.387
120	-0.054	-0.180	0.086(14.1)	0.393

여 아래의 식으로부터 항력계수(C_D), 양력계수(C_L) 및 피칭모멘트 계수(C_M)들을 계산하였다.

$$C_D = C_{DP} + C_{DF}$$

$$C_{DP} = \frac{1}{A_b} \int_s (-C_p) \vec{n} \cdot \vec{d}_1 ds$$

$$C_{DF} = \frac{1}{A_h} \int_s (C_f) \vec{m} \cdot \vec{d}_1 ds$$

$$C_L = \frac{1}{A_h} \int_s (-C_p) \vec{n} \cdot \vec{d}_2 ds$$

$$C_M = \frac{1}{A_h L} \int_s (x) \vec{d}_1 \times (C_p) \vec{d}_2 ds$$

여기서 C_{DP} 는 바디 전두부와 후미부에서 압력분포에 의한 압력저항 계수이고 C_{DF} 는 점성으로 인한 마찰 항력계수이며 전체 항력계수는 두 값을 더한 것이다. 또한 A_b 는 주 유동방향에 대한 바디의 투영 단면적이고 A_h 는 수평 단면적이며 L 은 바디의 전체 길이이다. 적분에 사용된 단위벡터인 m, n, d_1, d_2 는 각각 바디표면의 접선 방향, 수직방향 및 주 유동방향 그리고 주 유동방향에 대한 수직한 연직 방향을 나타낸다.

후미 스포일러를 부착한 경우 항력계수는 약 0.08 정도 감소하여 전반적으로 12% 이상의 항력 저감 효과가 있었으며 양력계수는 후미 스포일러가 없는 경우 미소하나마 양력이 발생하고 있으나 후미 스포일러를 부착한 경우 지면방향으로 음의 양력(downforce)이 작용하고 있으며 차량 무게중심을 기준으로한 피칭모멘트 계수는 보다 감소하여 개선되는 특성을 보였다. 특히 고속 주행시에 양력계수는 음의 방향으로 증가의 폭이 커지므로 스포일러의

부착은 고속 주행시 항력저감 및 주행안정성을 향상시키는 특성을 갖는 것으로 판단된다.

5. 결론

상용 버스차량 주위의 3차원 난류유동 및 후미 스포일러에 의한 공력특성 변화를 해석적으로 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 버스 바디 후류에는 복잡한 3차원 와류가 발생하고 있음을 확인할 수 있었다. 바디후미 곡률부에서 유동이 박리되고 있으며 엔진룸 배기구를 중심으로 상하 방향으로 나뉘는 흐름이 형성되어 상단부에서는 후면 유리창을 타고 흐르는 올려흐름이 형성되었고 바디 하단부인 범퍼에 인접한 영역에서는 재순환 영역이 발생하였다.

2) 바디 후방에서 바라본 유동은 바디 상단에서 끌어내리는 흐름과 지면으로부터 올라오는 흐름이 형성되고 있으며 바디 하단부에는 반시계 방향으로 회전하는 한쌍의 와류가 형성되었다. 또한 바디 후면과 떨어질수록 전압력 강하영역은 확장되고 와류의 중심은 지면쪽으로 천이되며 와류세기 또한 약화됨을 알 수 있었다.

3) 후미 스포일러를 부착한 경우 상단부에 생성된 심한 와류를 소멸시켜 부착하지 않은 경우에 비해 항력 계수는 약 12%정도 감소하고 주행 안정성은 향상되었다.

References

- 1) K. P. Garry, "Development of Container-Mounted Devices for Reducing the Aerodynamic Drag of Commercial Vehicles," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1981.
- 2) K. P. Garry, J. L. Stollery, "Reducing the Aerodynamic Drag of Commercial Vehicles," *International Journal of Vehicle Design*, Vol.3, No.2, 1982.
- 3) O. Baysal, I. Bayraktar, "Computational Simulations for the External Aerodynamics of Heavy Trucks," SAE 2000-01-3501, 2000.
- 4) J. Barlow, R. Guterres, R. Ranzenbach, "Wake Structure of Rectangular Bodies with Radiused Edges Neat a Plane Surface," SAE 1991-01-0648, 1991.
- 5) J. Williams, J. Barlow, R. Ranzenbach, "Experimental Study of CD Variation with Aspect Ratio," SAE 1991-01-0649, 1991.
- 6) A. J. Przekwas, "Unstructured Adaptive Grid Solution Methodology for Automotive Aerodynamics," SAE 970142, 1997.
- 7) K. Unida, K. Okumura, T. Kuriyama, "The Development of Practical Aerodynamic Simulations," SAE 9531516, 1995.
- 8) Y. Takemori, S. Kato, Y. Masumitsu, T. Mizutani, "Drag Reduction of Bluff-Based by Wake Control Vanes," FISITA World Automotive Congress, F2000G357, 1992.
- 9) T. Fujimoto, A. Niinuma, K. Sakai, "Shape Study for a Low- Air Resistance Air Deflector-The Second Report," SAE 950633, 1995.
- 10) S. Perzon, J. Janson, L. Hoglin, "On Comparison Between CFD Methods and Wind Tunnel Tests on a Bluff Body," SAE 1999-01-0805, 1999.
- 11) S.-F. Camara, "On the Aerodynamic Analysis of a Bus Model," SAE 952265, 1995.
- 12) M.-M. Nassief, A.-F. El-Sayed, "An Investigation in to the Aerodynamics of the External Flow Around a Bus(Daewoo Model)," SAE 962173, 1996.
- 13) V. Yakhot, L. M. Smith, "The Renormalization Group, The e-Expansion and Derivation of Turbulence Models," *J. Sci. Comput.*, Vol.1, No.3. 1986.
- 14) S. A. Orszag, "Renormalization Group Modeling and Turbulence Simulations," *Proceedings of the Int. Conference on Near-Wall Turbulent Flows*, Tempe, Arizona, U. S. A., 15-17 March, pp.1031-1046.
- 15) V. Yakhot, S. A. Orszag, "Renormalization Group Analysis of Turbulence : 1. Basic Theory," *J. Sci. Comput.*, Vol.1, No.3. 1986.
- 16) W. T. Mason, P. S. Beebe, "The Drag Related Flow Field Characteristics of Trucks and Buses," in *Aerodynamics Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles*, Plenum Press, 1978.