

(논 문) SAE NO. 96370012

자동차 하단부 형상이 항력과 양력에 미치는 영향

Effect of the Underbody Shape of Road Vehicles on Drag and Lift

류 종 우,* 조 성 권,* 양 준 모,* 최 해 천,* 유 정 열,** 이 준 식**
J. Ryu, S. K. Cho, J. M. Yang, H. Choi, J. Y. Yoo, J. S. Lee

ABSTRACT

Numerical and experimental studies are performed to investigate the effect of the underbody shape of the simplified road vehicle on drag and lift. Four different vehicle models with front and rear slanted variations at the lower surface are used in this study. Cases with a slanted underbody surface at front have smaller drag than those without a slanted surface. Also, cases with a slanted underbody surface at rear have smaller lift than those without a slanted surface. Pressure distributions along the model surfaces and velocity fields at the wake region are examined in detail. In general, numerical solutions are in agreement with experimental results.

주요기술용어 : Drag, Lift, Underbody shape, Road vehicle

1. 서 론

유체 속을 움직이는 물체(예를 들면 배, 자동차, 항공기 등)에 대한 해석은 오래전부터 많은 관심의 대상이 되었다. 특히, 자동차의 주행시에 발생하는 유동 특성은 많은 사람들에 의해 연구되고 있는데, 이는 공기 저항의 감소에 의한 연료의 절약뿐만 아니라, 조정 안정성 및 안락한 승차감 등이 자동차 설계에 있어서 중요한 요소가 되고 있기 때문이다.

과거 10여년 동안 자동차의 저항을 감소시키는 방법들에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다. 자동차 주위의 유동장에서 특히 관심이 모아지는 영역은 박리가 일어나는 영역이다. 이는 자동차 차체의 저항 중 대부분은 압력에 의한 저항(form drag)이고, 이러한 현상은 자동차의 뒷부분에서 발생하는 유동의 박리에 그 원인이 있기 때문이다¹⁾. 이런 이유로 항력이 발생하는 메카니즘을 이해하기 위하여, 둔체(bluffbody) 또는 자동차에 관한 지면 효과를 고려하여 자동차 뒷부분에 발생하는 후류(wake flow)를 해석하는 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

자동차에 미치는 공기역학적 힘들이 주로 압력

* 서울대학교 기계공학과

** 정회원, 서울대학교 기계공학과

에 의한 것이라는 데에서 착안을 하여, 자동차 형상을 바꿈으로써 유동현상의 변화와 공기역학적 힘의 변화를 알아보는 연구가 많이 진행되었다. 자동차 앞부분에서 커다란 크기의 박리가 생기지만 않는다면, 항력은 자동차 앞부분의 형상에 그다지 영향을 받지 않는다²⁾. 형상 설계에 주의할 기울인다면 자동차 앞 부분에서의 박리에 의한 항력은 줄일수 있지만 자동차 뒷 부분에서의 박리는 피할 수 없다. 자동차 뒷 부분의 박리 현상은 차체의 항력에 큰 영향을 미치므로 이 부분에 대한 연구가 많이 수행되었다. 이 중에서 자동차 뒷 부분 상단부의 경사각에 대한 영향을 알아 보는 연구가 주로 이루어져 왔다^{3,4,5)}. 이들의 연구 결과에 의하면, 자동차 뒷 부분 상단부의 경사각이 항력에 미치는 영향은 크고, 항력을 최소로 하는 최적 경사각이 존재한다. 한편, 자동차 뒷 부분 하단부의 경사각에 대한 연구도 부분적으로 진행되었다^{6,7)}. 이 결과 자동차 뒷부분 하단부의 경사도 항력과 양력에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. Han et al.⁸⁾은 자동차 뒷 부분에서의 상단부, 하단부, 측면부 등 세가지의 요소가 항력과 양력에 어떠한 영향을 미치는가를 연구하였다.

본 연구의 목적은 자동차 하단부 형상의 변화에 의한 공기역학적 힘들의 변화를 살펴보는 데 있다. 이를 위하여 자동차 주위의 외부유동을 유한체적법 (finite volume method)을 적용한 수치해석으로 유동장을 분석하고, 이를 풍동실험 결과와 비교하였다. 자동차의 모형으로는 기존에 출시된 자동차를 단순화시킨 모형을 채택했으며, 이차원 및 준 삼차원 모형에 대한 수치해석과 준 삼차원 모형의 풍동실험을 각각 행하였다.

2. 수치해석방법과 실험장치

2.1 수치해석방법

본 연구에서는 일반좌표계에서의 지배방정식들(연속방정식, Navier-Stokes 방정식, RNG k-ε모형⁹⁾)을 사용하였다. 격자계는 비엇갈림 격자계(non-staggered mesh)를 사용하였다. 이에 따라서 미소 검사체적의 면과 모서리에 대하여

운동량 및 스칼라양의 보간이 필요하게 되었으며, 이에 필요한 수치적기법과 주요 알고리즘은 Peric¹⁰⁾의 방법을 사용하였다. 점성항은 중심차분법을 사용하였고, 대류항은 일차 정확도 상류차분기법과 이차 정확도 상류차분법을 각각 사용하여 비교하였다. 압력항 처리는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다¹¹⁾.

본 연구에서는 난류 운동 에너지와 난류 소산율에 대하여 RNG k-ε 모델⁹⁾을 적용하였다. RNG k-ε 모델은, 표준 k-ε 모델에 비하여, 박리를 수반하는 유동이나 평균유동의 곡률이 존재하는 유동을 비교적 잘 예측하는 것으로 알려져 있다⁹⁾. 난류운동에너지 k 방정식은 표준 k-ε 모델과 같고, 난류운동에너지 소산율 ε 방정식은 기존의 ε 방정식에 다른 하나의 생성항 -ρR을 추가한다. 여기서 R은 rate of strain항이고 아래와 같이 정의된다.

$$R = 2 \frac{\mu}{\rho} S_{ij} \overline{\frac{\partial u_i}{\partial y_j} \frac{\partial u_j}{\partial y_i}}$$

이 항을 RNG k-ε 모델에서는 다음과 같이 처리하였다.

$$R = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial y_j} + \frac{\partial u_j}{\partial y_i} \right)$$

여기서 $\eta = \frac{Sk}{\epsilon}$, $S^2 = 2S_{ij}S_{ij}$, $\beta = 0.012$, RNG k-ε 모델에서 제시된 상수들의 값은 다음과 같다.

$$C_\mu = 0.085 \quad C_1 = 1.42 \quad C_2 = 1.68$$

$$\sigma_k = 1/1.39 \quad \sigma_\epsilon = 1/1.39$$

$$\mu_1 = \mu \left[1 + \sqrt{\frac{C_\mu \rho}{\mu} \frac{k}{\sqrt{\epsilon}}} \right]^2, \eta_0 = \sqrt{\frac{C_2 - 1}{C_\mu (C_1 - 1)}}$$

2.2 실험장치

실험이 수행된 풍동은 시험부의 크기가 900 × 900 × 3600mm이며 최대속도 60m/s까지 연속적

으로 조절이 가능하고, 유속이 40m/s일 때 균일도가 0.3%, 난류강도가 0.2% 이내인 폐순환식 Götting형이다.

실험에 사용된 모형은 H자동차회사의 단순화된 Fast Back 소형 승용차의 1/5척도로 PVC 판을 사용하여 제작하였고, 각각의 하단부에 변화를 주어 네가지 형태로 하였다(3.1절 참고). 이때 모형은 길이(L) 780mm, 높이(H) 220mm, 폭(W) 300mm의 크기이다.

실험장치는 모형, 지면판, 밸런스, 자료획득장치로 구성된다. 지면판은 길이 3,600mm, 폭 860mm, 두께 10mm로서 경계층의 두께를 줄이고 바리를 피하기 위하여 앞끝을 원형으로 제작하였고, 모형에 의해 생성된 후류와 지면판 밑의 유동이 상호간섭을 하지 않도록, 차체 앞끝으로부터 상류쪽으로 L만큼, 차체 뒤끝으로부터 하류쪽으로 2.62L만큼 지면판이 존재하도록 하였다.

자동차 모형 표면에서의 정압은 표면을 따라 48개의 구멍을 뚫고 이를 Scani valve를 거쳐 Validyne사의 압력계를 통과하여 측정하였다. 구멍을 뚫는 위치는 이차원 계산 결과를 참고하여 구멍간의 간격을 조정하였다. 항력과 양력을 측정하기 위한 밸런스는 서원풍력기계주식회사의 6분력 피라미드형으로서, 부하범위는 양력 $\pm 110\text{kg}$, 항력 $\pm 55\text{kg}$ 이다. 도르레와 기준 추를 이용하여 점정실험한 결과 매우 양호한 선형성과 서로의 힘간에 간섭이 매우 작음을 알 수 있었다. 반복 실험을 수행하여 점정곡선의 기울기는 양력의 경우 0.1401Volt./kg, 항력의 경우 0.2684Volt./kg 임을 알았다. 또한, 자동차 하단부의 변화에 따른 자동차 후류의 변화를 고찰하기 위하여, 5공 피토판 측정을 수행하였다. 본 실험에서 사용한 5공 피토판은 Vortex사 제품인 구형으로서 측정부 직경이 6mm이고, 각 구멍사이

의 각도는 중앙의 구멍을 기준으로 각각 40° 이다.

3. 이차원 모형에 대한 외부유동 해석

3.1 해석 모형

본 연구에서 사용한 네가지 형태의 이차원 자동차 모형을 Fig.1에 나타내었다. 본 연구에서 관심을 두는 부분은 자동차의 하단부가 항력과 양력에 미치는 영향이므로, 모형들의 주된 차이는 하단부에서 앞, 뒤의 경사각을 가지고 있는가 하는 점이다. 참고로 case 4가 실제 자동차의 설계로부터 단순화시킨 모형이다. 유체의 속도는 10m/s이고 자동차의 길이를 기준으로 레이놀즈 수 $Re=5.17 \times 10^5$ 이다. 이 수치는 실제 자동차 주행시의 레이놀즈 수보다 한 차수(order of magnitude)가 낮은 값이다.

본 연구에서 사용된 자동차 모형의 길이 대 높이의 비는 3.545 : 1이다. 하단부의 앞 부분이 경사진 경우의 경사각은 10.6° 이고, 뒷 부분이 경사진 경우는 19.8° 의 경사각을 이루고 있다. 이러한 수치는 기존에 출시된 자동차의 설계를 바탕으로 한 것이다.

실제 상황을 모사하기 위해서 윗 벽과 아랫 벽에서의 경계 조건을 다음의 세가지로 나누어 계산을 수행하였다. 첫째는 두 벽이 모두 고정되어 있고, 두번째는 아랫 벽만이 입구 속도와 같은 속도로 움직이고, 세번째는 모든 벽이 입구 속도와 같은 속도로 움직이는 조건이다.

3.2 외부 유동 해석

이차원 해석은 그 자체로서 의미를 가질 수 없으나, 대칭면에서의 압력계수등을 통하여 실제

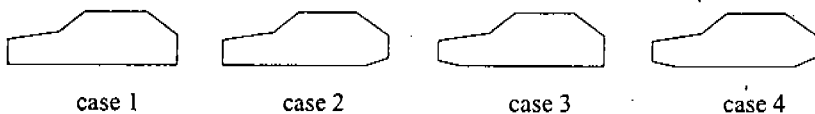


Fig.1 Shapes of 2-D models

모형의 유동 특성을 개략적으로 평가할 수 있으므로, 삼차원 해석을 위한 기본 단계라 할 수 있다. 본 연구에서는 이차원 모형에서의 결과를 비교, 분석함으로써 모형에 따른 물리적 현상 변화를 이해하고, 이를 바탕으로 준 삼차원 계산으로 확장하여 그 변화를 살펴보았다.

이차원 계산에 사용된 격자수는 주유동 방향으로 200개, 높이 방향으로 88개이다. 격자계에 의한 영향을 비교하기 위해서 100×44의 경우

를 해석한 결과, 격자계 200×88의 경우에 비해서 6~10% 정도의 큰 항력계수 값과 10~15%의 큰 양력계수의 값을 얻었다. 그러나, 압력분포나 속도 분포 등의 경향은 유사하므로 이 절에서는 200×88의 격자에 대해서 결과를 논하고자 한다.

각 모형에 대한 항력 계수와 양력 계수에 대한 변화를 Table 1과 Fig.2에 나타내었다. 각 모형에 대해서 항력계수를 비교하면, 지면이 고정되

Table 1 Comparison of drag and lift coefficients of 2-D models

	case 1		case 2		case 3		case 4	
	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L
fixed	0.939	0.701	0.985	-2.337	0.838	1.344	0.836	-3.131
bottom wall moving	0.934	0.481	0.976	-2.377	0.828	1.145	0.817	-3.196
both walls moving	0.830	0.759	0.879	-2.986	0.722	1.414	0.711	-4.580

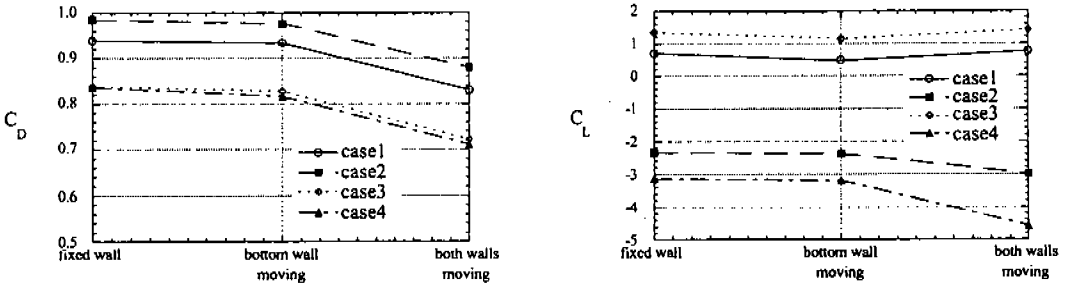
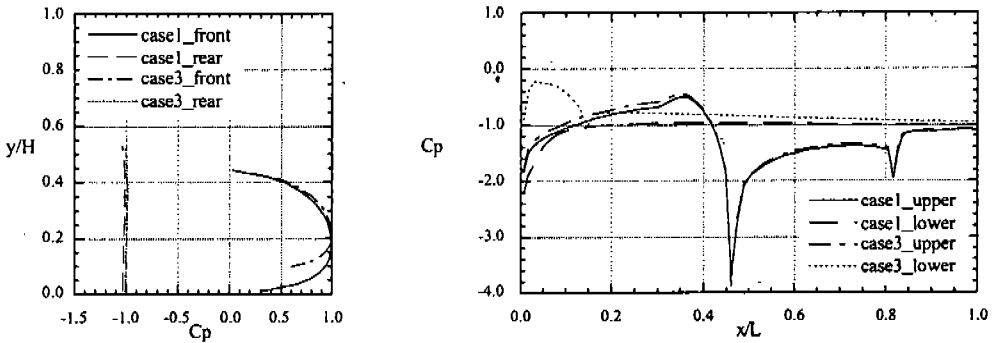


Fig.2 Drag and lift coefficients of 2-D models



(a) front and rear surfaces

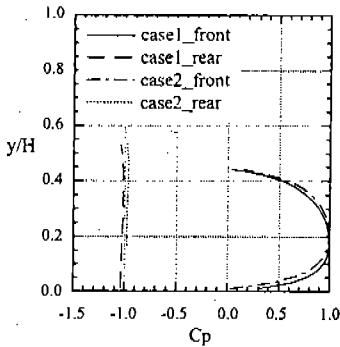
(b) upper and lower surfaces

Fig.3 Pressure distribution of case 1 and 3

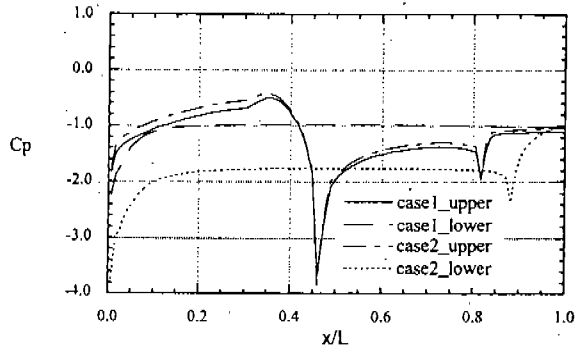
어 있는 경우에 case 3과 case 4가 case 1과 case 2에 비해서 작은 항력계수를 가짐을 알 수 있다. 이는 하단부의 앞 부분을 경사지게 하였을 때 작은 항력을 받음을 의미한다. 이러한 결과를 분석하기 위하여 Fig.3의 압력 분포를 보면서 case 1과 case 3을 비교하자. 먼저 밑 면의 압력 분포를 보면(Fig.3(b)), 앞 부분이 경사진 곳 까지가 차이가 나고 그 이하는 비슷한 값을 보이고 있다. case 1의 경우, 밑 면이 평행하므로, 밑 면의 압력은 항력과 무관하다. 반면에 case 3의 경우는 하단부의 앞 면이 경사지므로, 그 부근의 압력은 항력을 증가시키는 방향으로 작용하게 된다. 한편 앞 면에서의 압력 분포를 보면(Fig.3(a)) 압력이 작용하는 면적의 차이가 항력변화의 주 요인임을 알 수 있다. 즉, 앞 면의 면적이 작은 case 3이 case 1에 비해서 항력을 덜 받게 된다. 윗 면에서의 압력 분포와 뒷 면에서의 압력분포는 전반적으로 같은 값을 가짐을 보여주고 있다. 그러므로 전체적으로 하단부의 앞 면을 경사지게 할 때, 항력이 감소함을 알 수 있다. 이러한 현상은 자동차 밑의 지면을 이동시킬 때와 위, 아래의 벽을 동시에 이동시킬 때에도 일관된 결과를 보여 주고 있다(Fig.2). 그리고, 각 모형의 경우에 벽을 고정시켜 놓은 경우에 비해 아래 벽만을 움직일 때는 항력계수가 약간 감소하지만 위, 아래의 벽을 동시에 이동시킬 때는 항력계수가 많이 감소함을 알 수 있다

(Fig.2).

한편 양력의 경우에는 case 2와 case 4가 case 1과 case 3에 비해 작은 값을 가지고 있다. 이러한 현상은 case 2와 case 4가 공통적으로 하단부의 뒷 부분이 경사진데 기인한다고 볼 수 있다. 이러한 현상의 원인을 살펴보면, 자동차의 밑 면과 밑 벽이 평행할 때는 유동이 채널 유동의 형태를 가지다가 하단부의 뒷 부분이 경사진 부분에서 디퓨저 효과 또는 벤츄리 효과라고 불리는 현상때문에 속도가 감소하고 압력이 국부적으로 증가하게 된다. 자동차 뒷 면 부근은 후류 지역이기 때문에 모형의 형상에 관계없이 압력값이 비슷하다는 점을 고려하면, case 2의 경우는 자동차 하단부 뒷 면에서부터 하단부 앞 면으로 갈수록 압력이 떨어졌다가 다시 증가하는 경향을 보이고, case 1의 경우는 앞 면으로 갈수록 압력이 증가하므로, 전체적으로 보면 case 1이 case 2보다 압력선도가 윗 쪽에 있게 된다. 이는 고정 벽 조건에서 자동차의 윗 면과 아랫 면에서의 압력분포도(Fig.4(b))를 보면 명확히 나타나고 있다. 이를 확인하기 위해 유선을 살펴본 결과 case 2와 case 4가 case 1과 case 3의 경우에 비해 자동차 밑 면과 아랫 벽 사이를 지나는 유량이 많음을 알 수 있었다. 유량이 많아지면 단면적이 일정한 상태에서 속도가 빨라지고, 베르누이 정리를 따르면 압력이 떨어진다. 그러므로 Fig.4의 결과가 타당함을 간접적으로



(a) front and rear surfaces



(b) upper and lower surfaces

Fig.4 Pressure distribution of case 1 and 2

확인할 수 있다. 아울러 나머지 두 가지 벽조건에 대해서도 같은 경향을 가짐을 확인하였다.

본 연구에 사용된 모든 모형에 대하여 자동차 윗 면을 따른 압력분포를 보았을 때 (Fig.3, Fig.4), $x/L=0.85$ 부근에서 국소적으로 압력이 감소하였다가 다시 증가하는 현상을 보이는 데, 이는 구석유동(corner flow)에서 박리가 생기지 않고 유체가 표면을 따라서 흐르게 되면 나타나는 현상이다. 유정열 등¹²⁾에 의하면, 후반부 윗 면에서의 경사각이 어느 임계각보다 작을 때 박리가 생기지 않고 물체를 따라가는 유동 현상이 나타나고, Fig.3, 4와 같은 국소적인 압력강하가 나타난다. 그러나, 임계각보다 커지게 되면 박리가 발생하고 후반부 윗 면의 경사면이 재순환 영역에 들어가게 되며, 그 부근의 압력은 거의 일정하게 된다. 이에 대한 자세한 고찰은 제 4절에서 행하였다.

4. 준 삼차원 모형에 대한 외부 유동 해석

완전한 삼차원 모형에 대하여 유동 해석을 하

는데 있어서 가장 큰 어려움은 격자 생성과 격자수의 증대를 들 수 있다. 이러한 어려움을 피하기 위하여 이차원 모형을 횡방향으로 단순 확장한 준 삼차원 모형에 대한 유동 해석을 수행하고, 이차원 모형에서의 유동 경향이 삼차원 모형과 어떠한 차이점을 보이는가를 연구하였다. 준 삼차원 모형의 경우에 측면 형상이 실제 자동차와 달리 예리한 모서리를 가지기 때문에 측면에 곡률이 있는 실제 형상에 비해 항력이 다소 높게 예측되지만, 삼차원 효과를 보기에 적합하다^{13),14)}. 계산 격자는 case 1, case 2 그리고 case 3에 대해서는 $100 \times 44 \times 27$ 이고, case 4에 대해서는 $100 \times 52 \times 27$ 이다. case 4의 경우에 있어서 하단부와 아랫 벽 사이에 격자를 더 분포시켰다.

준 삼차원 계산과 실험에 의해 측정된 항력계수와 양력계수의 값을 Table 2와 Fig.5에 나타내었다. 이 결과를 보면, 이차원 계산에서와 마찬가지로 하단부의 앞 부분이 경사진 case 3과 case 4는 case 1과 case 2에 비해 작은 항력을 가지고, 뒷 부분이 경사진 case 2와 case 4가 낮은 값을 가진다. 여기서 case 2와 case 4의

Table 2 Comparison of drag and lift coefficients of 3-D models

		case 1		case 2		case 3		case 4	
		C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L
Calculation	fixed	0.725	0.246	0.736	-0.408	0.606	0.352	0.624	-0.417
	bottom wall moving	0.714	0.211	0.704	-0.405	0.595	0.317	0.616	-0.474
	all walls moving	0.701	0.249	0.676	-0.341	0.585	0.359	0.592	-0.391
Experiment	fixed	0.721	0.050	0.700	-0.331	0.615	0.062	0.607	-0.101

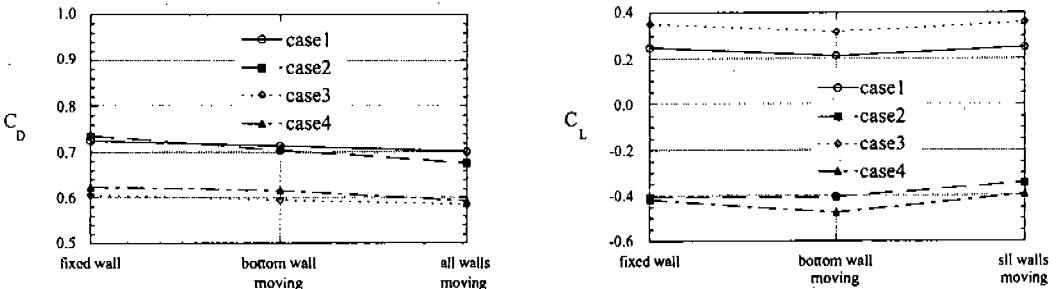


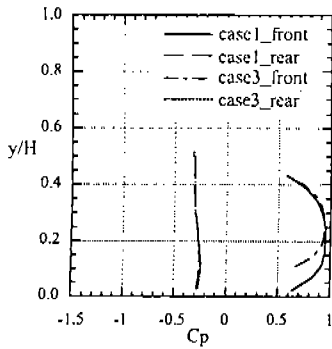
Fig.5 Drag and lift coefficients of semi 3-D models

경우에 나타나는 negative lift 현상은 George⁶⁾, Bearman et al.⁷⁾에 의해서 실험 결과가 보고된 바 있다. 벽 조건의 경우에 있어서 Bearman et al.⁷⁾은 밀 벽이 움직이는 경우가 고정된 벽 조건 일 때에 비해 항력은 8% 감소하고 양력은 30% 감소함을 보였는데, 본 계산에서는 감소율이 이 보다 낮은 수치를 보여주고 있다.

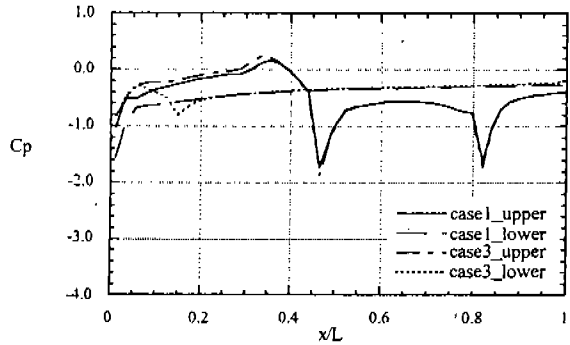
하단부의 앞 부분 형상이 주는 영향을 알아 보기 위해서 case 1과 case 3에 대해서 윗 면과 아랫 면, 그리고 앞 면과 뒷 면에 대한 압력선도를 Fig.6에 나타내었다. 이차원 계산 결과에 비해서 전반적으로 뒷면과 아랫 면, 윗 면에서 압력이 키졌을 뿐 경향은 유사하다. 한편 하단부 뒷 부분 경사각의 영향을 보기 위해서 case 1과

case 2에 대해서 압력선도를 Fig.7에 나타내었다. 특이한 것은 이차원에서는 아랫 면에서의 압력이 앞 부분부터 차이가 났으나 삼차원에서는 뒤로 가면서 차이가 발생한다는 점이다.

case 2와 case 4에 대하여 대칭면에서의 압력분포를 Fig.8에 나타내었다. 우선 이차원 계산의 결과(Fig.4)와 비교해 볼 때 준 삼차원 계산의 경우에 압력이 더 높게 나타나고 있다. 이는 이차원 square cylinder와 삼차원 cube에 대한 압력분포를 생각하면 타당한 것으로 생각이 된다. 자동차 모형의 윗 면과 아랫 면의 경우 동일하게 압력이 상승하기 때문에 양력에 주는 차이가 없으나, 앞 면에서의 변화가 작은 상태에서 뒷면의 변화가 심하기 때문에 항력에 커다란 영

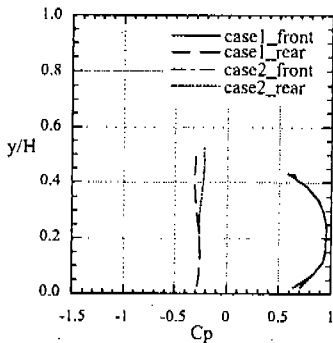


(a) front and rear surfaces

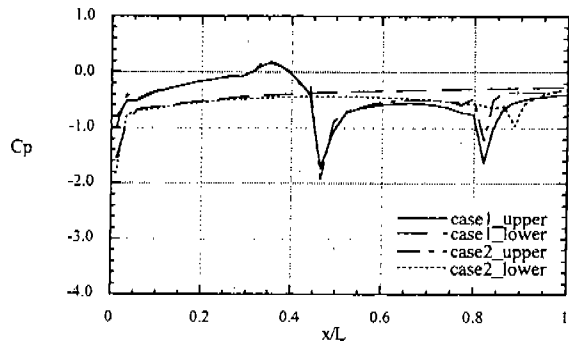


(b) upper and lower surfaces

Fig.6 Pressure distribution of semi 3-D case 1 and 3



(a) front and rear surfaces



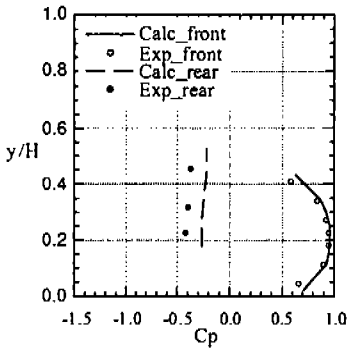
(b) upper and lower surfaces

Fig.7 Pressure distribution of semi 3-D case 1 and 2

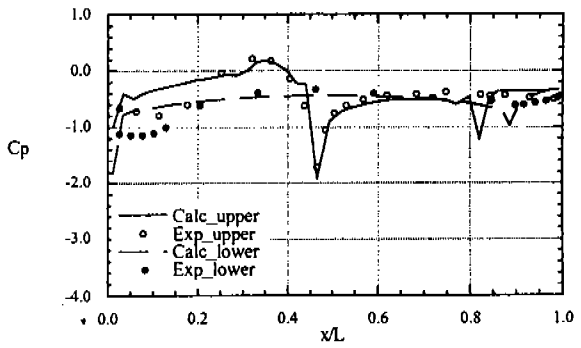
향을 미치게 된다.

윗 면에서의 압력분포를 실험결과와 비교하면 $x/L=0.2$ 되는 지점까지가 일치하지 않는다(Fig. 8). 이는 자동차 모형의 윗 면 모서리에서 각이 예리하기 때문에 박리현상이 생기는데, 계산에서는 이러한 박리현상을 제대로 예측하지 못하기 때문이다. 그리고 이차원 계산 결과에서 설명했던 것처럼 $x/L=0.80$ 지점에서 $x/L=0.85$ 지점까지 압력이 갑자기 감소했다가 다시 회복하는 결과를 보여주고 있다. 반면에 실험결과를 보면 이 부근에서의 압력이 일정하기 때문에 박리가 일어나고 있다고 해석된다. 따라서, 수치해석적으로 이 부근의 박리현상을 예측하지 못하고 있다고 설명할 수 있다. 이에 관해서는 차분기법문

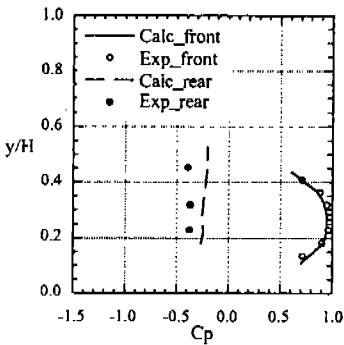
제를 다룰 때 다시 언급하겠다. 아랫 면에서도 윗 면과 마찬가지로 $x/L=0.2$ 까지 일치하지 않는 부분이 있는데, 이 또한 박리현상의 영향인 것으로 추정된다. 한편, 이차원 모형 계산에서 나타났던 밑면 경사부근의 디퓨저 효과가 case 2, case 4의 계산 결과에서 나타나고 있다. 실험 결과를 보면, case 2의 경우는 디퓨저 효과가 나타나고 있지만, case 4의 경우는 디퓨저 효과가 약하게 나타나고 있다. 디퓨저 내에서 유량이 증가할 때 박리가 일어나듯이, 본 연구에서도 case 4의 경우 지면과 자동차 하단부 사이의 유량이 증가하여 박리가 생기고, 그로 인해 자동차 하단부 끝부분에서 압력이 거의 값을 나타내는 것으로 추정된다.



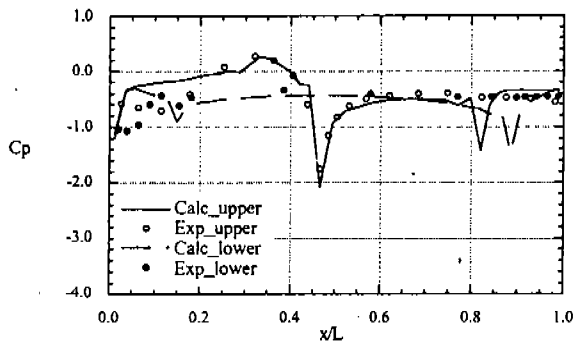
(a) front and rear surfaces



(b) upper and lower surfaces



(c) front and rear surfaces
(semi3-D case 4)

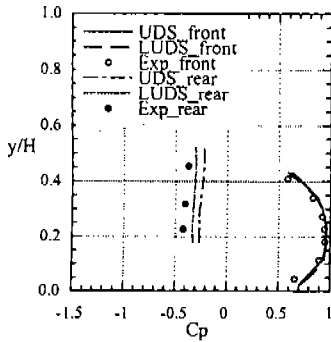


(d) upper and lower surfaces
(semi3-D case 4)

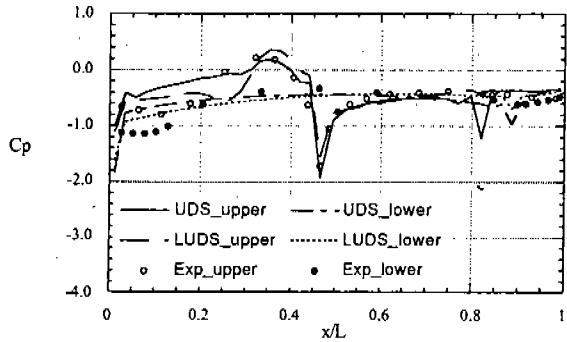
Fig.8 Pressure distributions of semi 3-D models

Fig.8의 압력선도들 중에서 윗 면의 $x/L=0.80$ 지점에서 $x/L=0.85$ 지점까지 갑자기 감소했다가 다시 회복하는 현상은 실험과 일치하지 않고 있다. Fig.2에서 Fig.8까지 제시된 결과들은 Navier-Stokes방정식과 $k-\epsilon$ 방정식의 대류항을 일차 정확도의 상류차분법(UDS : Upwind Scheme)으로 해석하여 구해진 것이다. 본 연구에서는 이차 정확도의 상류차분법(LUDS : Linear Upwind Scheme))을 사용하여, 그 결과를 비교하여 보았다(Fig.9). LUDS를 사용한 경우 앞 면 및 뒷 면에서 실험치에 더 가까운 값을 예측할 뿐만 아니라 자동차 윗 면 $x/L=0.80-0.85$ 의 위치에서 실험치에 가까운 값을 예측함을 볼

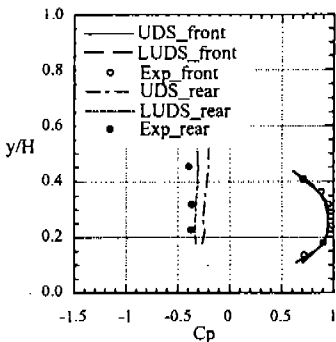
수 있다. 즉, 일차정확도 상류차분법은 계산 셀 표면에서의 값을 상류에서의 값을 이용하기 때문에 $x/L=0.80$ 지점 이전의 큰 속도값이 계속 영향을 미쳐서 모형 뒷 쪽에서 박리가 작게 예측된다. 그러나 이차 정확도 상류차분법은 계산 셀 표면에서의 값을 상류 셀 두개의 값으로 보간을 하기 때문에 기울기가 반영이 된다. 이로 인해 자동차 모형 뒷 쪽에서의 후류영역이 크게 예측이 된다(Fig.10). 일차 정확도 상류차분법인 경우에 후반부 경사면의 1/3지점에서 박리가 생기지만 이차 정확도 상류차분법의 경우에는 경사가 시작되는 부분에서 박리가 시작되고 이후는 재순환영역을 이루고 있다. 장성원 등¹⁵⁾에서 사용한 자동



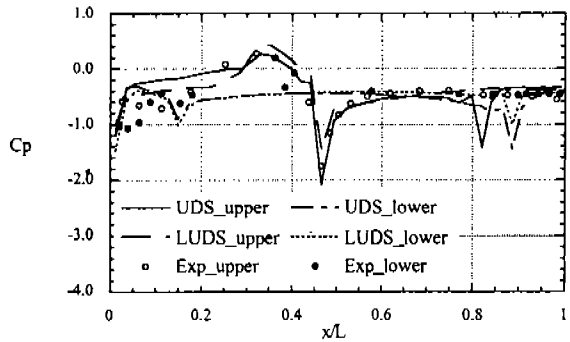
(a) front and rear surfaces (semi 3-D case 2)



(b) upper and lower surfaces (semi 3-D case 2)



(c) front and rear surfaces (semi 3-D case 4)



(d) upper and lower surfaces (semi 3-D case 4)

Fig.9 Pressure distribution of semi 3-D models with different schemes

차 모형의 실험결과에도 모형의 뒷 경사면이 시작되는 부분에서 박리가 시작하고 있다. 대류항의 차분기법으로 인한 항력계수 양력계수의 변화를 Table 3에 나타내었다. 항력계수값을 비교할 때, case 1과 case 3의 경우 일차정확도 상류차분법이 실험치에 가까워 보이나 이는 앞부분과 뒷 부분이 모두 어긋나기 때문이고, 이차정확도 상류차분법은 뒷 부분을 잘 예측했으나 앞 부분에서의 불일치로 차이를 나타내고 있다. 양력계수의 값은 두가지 수치기법 모두 실험치와 일치하고 있지 않다.

차분기법에 따른 유동장의 변화를 알아보기 위해 후류영역에서 유동에 수직한 단면에서의 속도 벡터를 살펴보았다. Fig.11은 case 1 모형의 후류($x/L=1.353$ 과 $x/L=1.737$ 지점)에서 YZ 단면의 속도벡터를 보여준다. 이때 $x/L=1.0$ 은 모형의 뒷면에 해당된다. 단면의 왼쪽이 수치해석결과이고 오른쪽이 실험결과이다. 일차 정확도

상류차분법의 경우에는 $x/L=1.353$ 에서부터 보텍스 중심이 보이고 $x/L=1.737$ 지점에서는 더욱 강해졌다. 실험결과와 비교해 보면, 계산결과의 경우 보텍스 중심의 위치가 보다 윗 쪽에 나타나 있다. 그러나, 이차 정확도 상류차분법의 결과는 $x/L=1.353$ 지점에서 보텍스 중심이 생기기 시작하고 있고 $x/L=1.737$ 지점에서는, 일차 정확도 상류차분법의 경우와는 달리, 보텍스가 약하고 단면 전체적으로 속도가 작게 예측이 되었다.

모형 하단부의 형상이 후류의 형태에 주는 영향을 살펴보기 위해서 각 모형에 대해서 Fig.11과 같은 위치에서의 속도 분포를 Fig.12에 나타내었다. case 2의 경우는 case 1과는 달리 모형 뒷 면 높이의 반 이하 부근에서는 유동이 지면에서 상승하고 있다. 이러한 현상은 case 2의 하단부 압력이 case 1보다 낮아졌으므로 보다 많은 유량이 자동차 하단부와 지면사이에 형성되고, 이 유량이 자동차 윗 면에서 내려오는 속도를 이기고 위로 올라가고 있는 상태이다. case 2의 경우 후류에서의 보텍스의 방향이, case 1에 비해, 정반대로 형성되는 것은 매우 흥미로운 현상이다. 수치해석의 결과를 보면, case 3은 case 1과 유동형태가 비슷하고, case 4는 case 2의 경우와 유사하다. case 4의 경우에 실험결과를 보면 $x/L=1.353$ 지점에서 위로 올라가는 유동이 보이지만 $x/L=1.737$ 지점에서는 오히려 밑으로 내려오는 속도분포를 나타내고 있다. 제 3절에서 언급한 유정열 등¹⁶⁾의 결과를 고려하면 case 4의 하단부 뒷 경사면에서 박리가 생기는 것으로 추정이 된다. 박리가 생김으로 인해서 윗 쪽에서 내려오는 유동이 지배적이게 되고, 모형에 가까운 부분에서는 높이의 반 이하에서 위로 올라가는 유동이 존재하지만 더 하류로 가면 밑

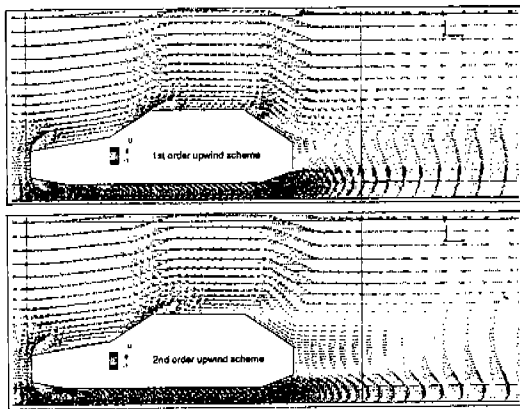


Fig.10 Velocity vectors at the symmetry plane of semi 3-D case 4

Table 3 Comparison of drag and lift coefficients of semi 3-D models with different schemes

		case 1		case 2		case 3		case 4	
		C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L
Calculation	UDS	0.725	0.246	0.736	-0.408	0.606	0.352	0.624	-0.417
	LUDS	0.636	-0.201	0.702	-0.437	0.510	-0.082	0.595	-0.426
Experiment		0.721	0.050	0.700	-0.331	0.615	0.062	0.607	-0.101

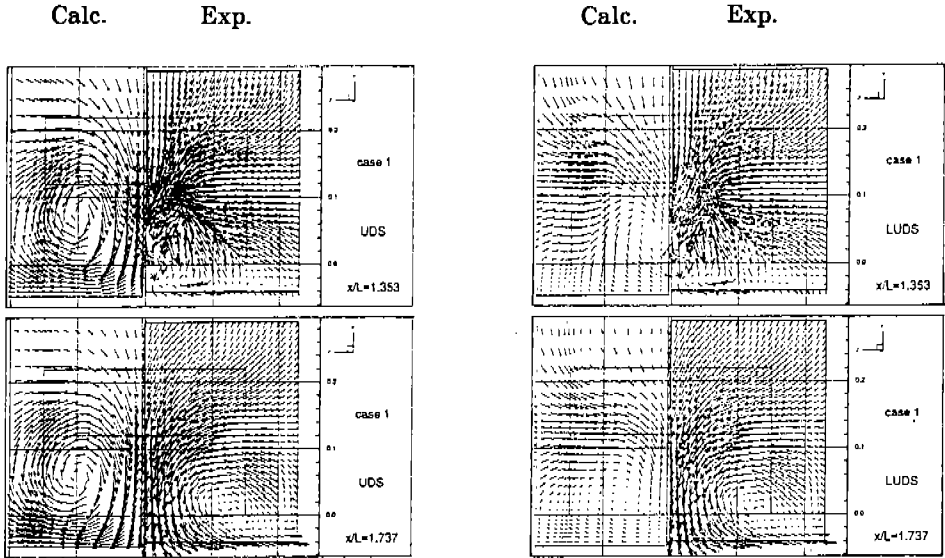


Fig.11 Secondary velocity vectors in the wake region of semi 3-D case 1

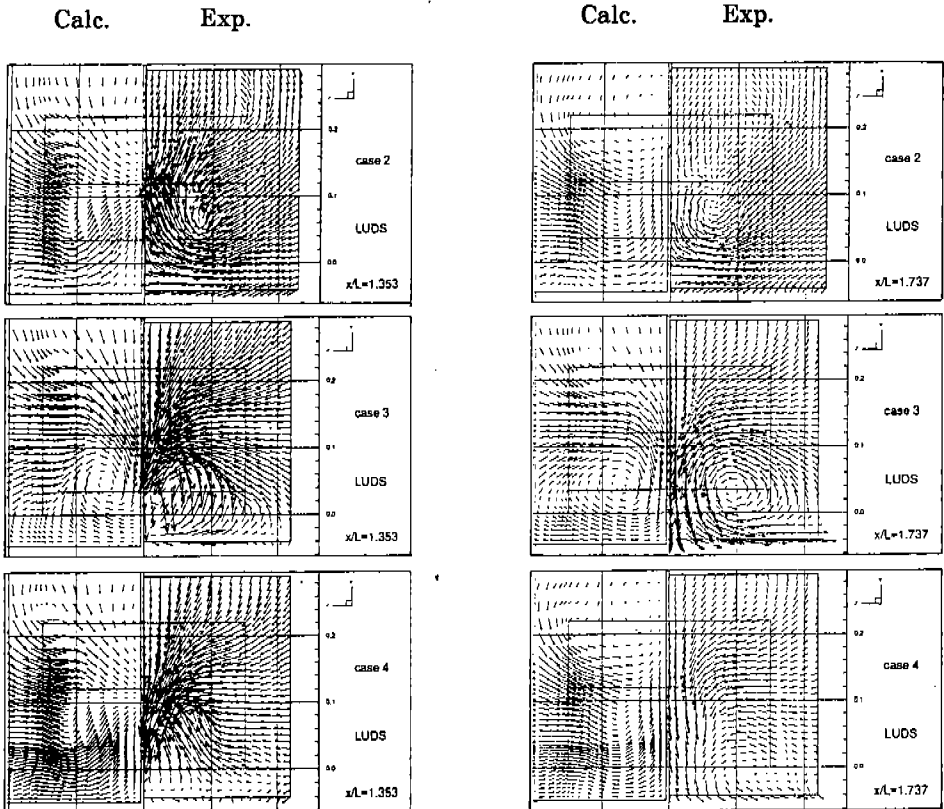


Fig.12 Secondary velocity vectors in the wake region

으로 내려오는 유동이 더 지배적이게 된다. 실험에서의 압력분포를 보면 하단부의 뒷 경사면에서 압력이 일정하게 유지되므로 이러한 사실을 유추할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 자동차 외부유동에 대하여 수치해석과 풍동실험을 각각 수행함으로써, 자동차가 받는 항력과 양력을 구하였다. 특히 하단부의 형상이 자동차의 항력과 양력에 주는 영향을 알아보기 위해 네가지 모형을 사용하였다. 수치해석은 일반 곡선좌표계에 대해 표현된 Navier-Stokes 방정식에 대해서 유한 체적법을 사용하였고, 난류모델의 경우 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 한편, 풍동실험에서는 계산에 사용된 준삼차원 모형을 PVC판으로 제작하였고, 밸런스를 이용하여 항력과 양력을 측정하였다. 그리고, 자동차 후류의 변화를 고찰하기 위하여 5공 피토포 측정기를 하였다. 실험과 수치해석 결과를 종합해 본 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 자동차 하단부의 형상변화는 자동차 주위의 공기역학적 특성에 큰 영향을 미친다. 자동차 하단부 앞 부분의 변화는 주로 항력에 변화를 가져오고, 뒷부분의 변화는 양력의 변화를 가져오게 된다.
- 2) 자동차 뒷 부분에서는 바리가 생겨서 후류영역이 주된 현상이 되고, 이 현상을 수치해석적으로 예측할 때에는 차분기법의 영향을 고려하여야 한다.
- 3) 본 연구 결과에서 자동차 하단부의 앞 부분과 뒷 부분을 동시에 경사지게 하였을 때는 각각의 경우에서 구해진 결과들의 합성에 못 미치는 결과를 나타내는 것으로 보아 앞, 뒷 부분의 각에 대한 이상적인 조합이 있을 것으로 추정 된다. 이를 위해서는 최적(optimization) 기법을 이용하여 두 각의 조합을 찾는 것이 앞으로의 과제이다.

참 고 문 헌

1. G. W. Carr, "Correlation of Aerodynamic Force Measurements in MIRA and Other Automotive Wind Tunnels," SAE-Paper 820374, Detroit, 1982.
2. Morel, T., "Theoretical Lower Limits of Forebody Drag," Aeronautical Journal, Paper 639, pp.23-27, Jan. 1979.
3. S. R. Ahmed, "Wake Structure of Typical Automobile Shapes," Trans. of the ASME, Vol.103, March, 1981.
4. T. Han, "Computational Analysis of Three-Dimensional Turbulent Flows Around Bluff Body in ground Proximity," AIAA Journal, Vol.27, No.9, pp.1213-1219, 1989.
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-Vehicle Bodies," ASME J. of Fluids Engineering, Vol. 103, pp.631-638, 1981.
7. Bearman, P. W., Beer, D. De, Hamidy, E., Hamidy, E., Harvey, J. K., "The Effect of a Moving Floor on Wind-Tunnel Simulation of Road Vehicles," SAE Paper 880245, 1988.
8. T. Han, D. C. Hammond Jr., and C. J. Sagi, "Optimization of Bluff Body for Minimum Drag in Ground Proximity," AIAA Journal, Vol.30, No.4, pp.882-889, 1992.
9. Thangam, S. and Speziale, C. G., "Turbulent Flow Past a Backward-Facing Step: A Critical Evaluation of Two-Equation Models," AIAA Journal, Vol.30, No.5, pp. 1314-1320, 1992.

10. Peric M., "A Finite Volume Method for the Prediction of Three-Dimensional Fluid flow in Complex Ducts", Ph.D. Thesis, Imperial College, 1985.
11. Suhas V. Patankar, "Numerical Heat transfer and Fluid," Hemisphere, New York, 1980.
12. 유정열, 김사랑, 강신형, 백세진, 이택식, 김응서, "단순화된 2차원 자동차형 물체주위의 유동에 관한 실험적연구," 대한기계학회 논문집, 제13권 제 1호, pp.178-189, 1989.
13. 조장형, 강성중, "3차원 외부 유동 해석 및 2차원 엔진 룸 유동 해석," 자동차 기술, Vol.5, No.1, pp.78-88, 1993.
14. 김창중, "T-CAR에 대한 공기역학 해석," 아세아기보, Vol.19, pp.25-34, 1994.
15. 장성원, 유정열, 이택식, "승용차 모형 주위의 유동에 관한 연구," 한국자동차공학회지 제12권 제 3호, pp.53-62, 1990.