

승용차 모형주위의 유동에 관한 연구

A Study on Flow Around a Passenger Vehicle Model

장 성 원*, 유 정 열**, 이 택 식**
S. W. Chang, J. Y. Yoo, T. S. Lee

ABSTRACT

A wind tunnel experiment for the flow around a 1/5 scale passenger vehicle model has been carried out. A 5-hole Pitot tube is used for measuring velocity distributions around the model and a scanivalve with 48 ports is used for measuring surface pressure distribution at various Reynolds numbers. In order to observe the flow on the surface and in the wake region, a flow visualization experiment has been performed using wool tuft with and without paper cones. In addition, a 2-dimensional viscous calculation considering only the mid-plane section of the model has been performed.

A complex wake structure in the immediate rear of the model has been confirmed. The distributions of the surface pressure coefficient are not sensitively dependent on the Reynolds Number. In the first half of the model, they do not seem to vary from section to section. However, in the second half, they do vary from section to section, especially at the bottom surface, which indicates that the cross flow vortex is more affected by the bottom surface than the top surface. The qualitative agreement of the measured and calculated velocity field also explains the usefulness of the 2-dimensional calculation in the limited sense.

기 호 설 명

C_μ : eddy 확산율에 관련된 $k-\epsilon$ 모델의 상수	Re : L 을 특성 길이로 하는 레이놀즈 수
d : 지면판과 모형의 간격	U : x 방향 평균 속도 성분
H : 지면판을 기준으로 한 모형의 높이, $d+h$	u : x 방향 요동 속도 성분
h : 모형의 높이	V : y 방향 평균 속도 성분
L : 모형의 전체 길이	v : y 방향 요동 속도 성분
P : 압력	W : 모형의 폭
	X : 모형의 뒷면을 기준으로 한 하류방향 좌표
	x : 유동 방향 좌표
	Y : 모형의 뒷면을 기준으로 한 횡방향 좌표

* 서울대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

- y : 수직 방향 좌표
 Z : 모형의 뒷면을 기준으로 한 수직방향 좌표
 ϵ : 난류 운동 에너지 소산율
 μ : 점성 계수
 η : 계산 영역에서 y 좌표에 대응하는 좌표
 ξ : 계산 영역에서 x 좌표에 대응하는 좌표
 σ_ϵ : ϵ 방정식의 Prandtl 수
 σ_k : k 방정식의 Prandtl 수

1. 서 론

최근의 자동차 산업에서는 소형 경량의 보다 효율적인 엔진의 개발, 차체축소 및 재료 대체를 통한 가볍고 안전한 자동차의 개발 등 연료의 경제성을 증진시키기 위한 여러가지 방안에 대하여 많은 관심들이 기울여지고 있으며, 이와 관련하여 공기역학적인 측면에서 매끄러운 외형 설계를 통한 항력 감소문제도 상당한 비중을 차지하고 있다.^{1~3)} 즉, 풍동을 이용하여 승용차 모형 또는 실차에 대한 실험적 연구를 수행하거나, 컴퓨터를 이용하여 수치 해석적 연구를 수행함으로써, 자동차가 주행할 때의 공기역학적 특성을 보다 잘 이해하고 이를 근거로 효과적인 외형설계를 하고자 하는 많은 노력이 기울여지고 있다. 사실상 이 문제는 오랜 역사를 가지고 있으나, 1970년 대로부터 현재에 이르는 최근의 연구 경향은 단순한 유선 형태에 가까운 외형 설계보다는 특정한 외형을 회생시키지 않으면서도 훌륭한 공기유동 특성을 얻을 수 있도록 자동차의 세부적인 형태를 최적화 시키는데 주안점을 두고 있다.³⁾ 따라서, 자동차의 외형 설계에 대하여 공기역학적 원리를 본격적으로 적용하게 된 것은 불과 10수년 밖에 되지 않았다고 할 수 있는데, 참고문헌 [4]에서는 이 주제와 관련하여 최근에 수행되었던 대표적인 국내의 연구들에 대하여 자세히 기술하고 있다.

본 연구에서는 시판되고 있는 승용차의 모형을 대상으로 하여 자동차 주위의 유동에 대한 공기 역학적 특성을 종합적으로 파악하고자 5공 피토관을 사용한 평균 유동 속도 측정, 스캐니 밸브(scani-valve) 등을 이용한 표면

압력 측정 및 울터프트(wool tuft)와 종이원추(paper cone)를 사용한 유동 가시화 실험을 수행하였으며, $k-\epsilon$ 난류 모델은 채택하여 모형의 중앙 대칭 단면에서의 유동을 2차원으로 가정한 수치 계산을 수행하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험이 수행된 풍동은 시험부의 크기가 $900 \times 900 \times 3,600$ mm이며 최대 속도 60m/s까지 연속적으로 조절이 가능하고, 유속이 40m/s 일 때 균일도가 0.3%, 난류 강도가 0.2% 이내인 폐 순환형 Göttingen형 철제 풍동이다. 실험에 사용된 모형은 H자동차 회사의 fast back 소형 승용차의 1/5척도 모형에 해당되는 길이(L) 800mm, 높이(H) 260.9mm 및 폭(W) 275mm를 가진다.

Fig.1에는 본 연구에서 채택된 지면판과 모형의 위치 및 크기에 대해 나타내었다. 경계 층이 두꺼워지는 것을 줄이기 위하여 지면판 앞 끝을 45° 로 가공하였고, 또한 모형의 바퀴 밑부분을 지면판의 바닥으로부터 10mm 높여서 고정하였는데 이것은 지면판의 경계층 두께를 확인하는 예비 실험으로부터 지면판이 약 10mm의 경계층을 이루고 있음을 확인하여 결정하였다. 실험에 사용된 지면판은 폭 860mm, 길이 1,800mm, 두께 10mm인 아크릴 판이며 풍동 바닥면에 높이 100mm인 I형강을 받침으로 하여 길이방향으로 2장이 매끄럽게 연결되도록 설치하였다.

지면판이 유동장과 평행인가를 알아보기 위해 수준계를 사용하여 4곳 귀퉁이를 보정하였고, 지면판단 설치후 지면판 선단에서 길이 방향으로 300mm까지 유동을 측정하여 경계층 두께의 변화가 없음을 확인하였다.

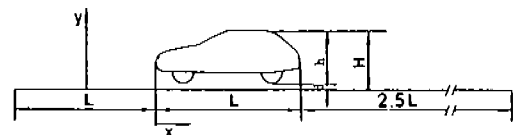


Fig.1 The schematic diagram of model and ground plane

모형을 지면판에 설치할 때는, 지면판으로 인해 생기는 경계층이 모형의 앞부분에 영향을 주지 않도록 하여야 하고, 또한 모형에 의해 생성된 후류와 지면판 밑을 지나는 유동이 간섭 효과를 일으키지 않도록 하여야 하는데, 본 실험에서는 이를 위하여 모형 앞으로 모형 길이(L)만큼, 모형 뒤로 모형 길이의 2.5배 이상이 되는 충분한 길이를 가지는 지면판을 설치하였다.⁴⁾

본 실험에서 채택된 측정기기 및 주변장치의 구성도를 Fig.2에 나타내었다. 자동차의 후류 내부의 흐름은 외류에 의한 전압력 손실이 현저하여 이러한 흐름장을 정확히 측정하는데 적합한 기구가 다공 피토판(multi-hole pitot tube)이다. 본 실험에서는 Vortex사 제품의 5공 피토판을 사용하였는데, 이 피토판은 측정부가 직경 8mm의 구형이고 각 구멍 사이의 각도는 중심 구멍을 기준으로 각각 40°이다.

5공 피토판의 보정 방법은 매우 다양하나 본 연구에서는 다음의 방법을 사용하였다. 피토판을 좌우로 회전시키며 양 옆의 측압공의 압력이 같아지는 지점을 찾아 기준으로 정하고 이곳(yaw 각 0°)에서 pitch 각을 2°씩 변화시키며 측정값을 얻었고 yaw 각이 0°가

아닌 곳에서는 pitch 각을 5°씩 변화하며 보정 실험을 하였다. 이때 yaw각의 범위는 -40°에서 40°까지로 하였으나 pitch 각에 대하여도 위에서 언급한 yaw각의 경우와 같은 방법으로 동일한 범위에서 보정 실험을 하였다.

모형 실험시 5공 피토판의 각각의 구멍에서 얻어지는 압력은 48J 4-1 스캐니밸브(scanivalve)를 사용하여 YEW TYPE 265 계수형 압력기로 받아들이고, 이곳에서 나오는 신호를 TAKEDA RIKEN TR 2721 멀티 채널 디지털 레코더(multi-channel digital recorder)를 통하여 한 후 IEEE-488 인터페이스 카드(interface card)를 사용하여 Apple-II plus micro computer로 전송하고 이곳에서 10~20회의 측정 평균 값을 얻어서 플로피 디스크(floppy diskette)에 저장하였다.

Fig.3에는 5공 피토판을 사용하여 모형의 후류 영역에서 평균 유동 속도를 측정된 단면들을 표시하였다. 모형의 중앙 대칭 단면을 연장한 XZ 평면위에서 모형의 뒤끝 면으로부터 하류 방향으로 500mm, 지면판에서부터 높이 400mm까지를, 상하 두 구역으로 나누어 측정하였으며, 유동의 흐름에 수직한 두개의 YZ 평면들(X/L=1/8, X/L=3/8)에서 측정하였다.

이송 장치는 2개의 2상 스텝 모터(step moter)와 2개의 콘트롤러(controller)로 구성하였다. 이 이송 장치는 풍동의 윗 부분에 설치되었는데, 최대 이송 거리는 길이 방향으로 300mm, 상하 방향으로 210mm이다. 이송 장치는 Apple-II plus micro computer로

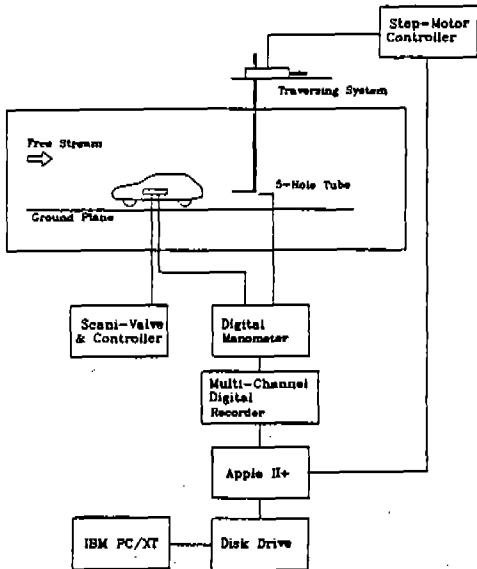


Fig.2 The schematic diagram of data acquisition system

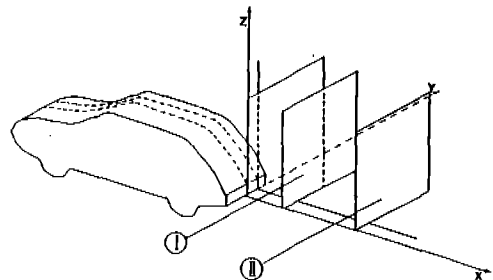


Fig.3 Cross sections in the wake region where mean velocities are measured

이송하고자 하는 길이에 상응하는 시간만큼 콘트롤러를 열어주는 신호파를 보내서 구동하였다.

유동장 측정시 이송 장치(traversing apparatus)의 제약으로 인해 피토판의 이송은 XZ 평면의 경우 측정 단면을 상하 둘로 나누어 각각 앞에서부터 뒤로 이송하면서 측정하였으며 YZ 평면의 경우는 상하 두면으로 나누어 측정하기는 XZ 평면의 경우와 같으나 우선 아래 단면에서는 왼쪽으로부터 오른쪽으로 측정하고 윗 단면에서는 오른쪽으로부터 왼쪽으로 측정하였다. 유동장의 자유 유동 속도는 30m/s로 고정하였으며, 한 위치에서 각각의 구멍으로부터 얻어진 자료는 10회의 평균값을 구하여 처리하였다. 유동장을 5공 피토판으로 측정할 때는 한 지점에서 각각 다섯 구멍에 대하여 측정을 행하여야 한다. 이때 한 구멍에서 측정되어 자료 처리 장치를 통과하는 자료는 자료 처리 장치속에 얼마간 계속 남아 있게 되므로 다음 구멍에서 측정된 값에 영향을 줄 수 있다. 그러므로 정확한 자료를 얻기 위해서는 각 구멍에서 측정하는 사이에 얼마간의 시간 지연(time lag)이 필요하다. 본 실험에서는 몇 회의 예비 실험으로 얻어진 경험적 지식에 의하여 충분하다고 생각되는 시간지연을 주었는데, 약 3초 정도로 정하였다.

표면 압력은 모형의 중앙 대칭 단면(mid section of the body)과 모형의 뒤에서 보아 왼쪽 끝과 중앙 대칭 단면의 중심 단면(3/4 section of the body)에 대해서 윗면과 아랫면 각각 48점의 값을 측정하였다. 모형의 표면에는 내부에서부터 표면에 직경 1mm인 스테인레스(stainless)관을 심고, 이것을 비닐 관으로 풍동 바깥에 설치된 스캐니 밸브에 연결시켜서 자료 처리 장치에 연결하였다. 자유 유동 속도를 10m/s, 20m/s, 30m/s로 바꾸며 압력 측정을 하여서 레이놀즈수의 변화에 대한 표면 압력의 변화를 관찰하였다.

풍동 시험을 행할 때는 봉쇄 효과(blockage effect) 때문에 모형의 주위 유동의 속도가 운동학적 상사를 이루기 위한 속도보다 빨

라지므로 보정을 해야 한다. 일반적으로 사용되는 경험적인 보정방법은 참고문헌 [5]의 방법인데 그것은 다음과 같다.

$$\frac{q_w}{q} = 1 - 2\alpha, \quad (2.1)$$

$$\alpha = \frac{1}{4} \frac{A}{S_0}. \quad (2.2)$$

여기서 α 는 물체와 후류에 의한 속도 증가량의 함이고, S_0 는 시험부 면적이며 A 는 물체의 최대 단면적이다. 일반적으로 시험부 단면적에 대한 모형의 최대 단면적의 비가 4~5% 일때 압력 측정의 오차는 1~2% 정도이며 봉쇄율이 커질수록 그 오차도 증가하게 된다.⁶⁾

본 실험에서는 봉쇄율(A/S_0)이 약 12%이며, 이에 따라 표면 압력에 대한 보정 계산이 이루어졌다.

한편 자동차 표면 주위의 유동 현상 및 후류의 구조 특히 후류의 주유동 방향으로의 발달 과정 및 유동에 수직인 평면에서 유동 구조가 하류 방향으로 발달하는 과정을 현상학적으로 이해하기 위하여 유동 가시화를 필요로 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 wool tuft 및 paper cone을 사용하는 방법을 채택하였는데, 실은 모형의 표면에 약 2,000여점에 부착하였으며, cone은 모형의 뒷 부분에서 볼 때 표면의 왼쪽에만 약 500여점에 부착하였다. 모형을 통과한 후류에 대해서는 참고문헌 [4]에서와 같은 방식으로 모형의 뒷부분의 중앙 대칭 단면에서 모형으로부터 50mm 떨어진 곳에서부터 50mm 간격으로 각각 15개 내외의 실이 매어달린 7줄의 철사줄을 설치하여 유동의 흐름 방향으로의 재순환 영역을 관찰할 수 있었다.

또한 뒷부분에서 유동 방향(Fig. 3의 YZ 평면) 와류를 관찰하기 위해 50mm 간격으로 가로 15개 세로 12개의 격자를 만들었다. 여기에 지면판으로부터 모형의 높이만큼 중앙 대칭 단면에서 좌우로 모형의 넓이만큼의 영역에서는 가로 8개 세로 6개의 격자를 더 보충하여 총 228개의 점으로 격자를 구성하였다. 이 격자로 모형의 바로 뒷 부분부터 500mm 하류 영역까지 100mm 간격으로 실험을 수행

하였다. 이 실험은 풍동의 밖에서 비정상 상태 유동의 사진을 비스듬한 각도에서 촬영해야 하는 어려움 때문에 확실히 현상을 촬영할 수 없는 아쉬움이 따랐으므로 좀더 확실한 관찰을 위해 모형의 바로 뒤에서 촬영하는 방법을 고안할 필요가 있다.

3. 2차원 점성 계산

자동차 주위의 유동에 대한 수치적 모사 (numerical simulation)도 많은 연구자들의 관심의 대상이 되고 있는데, 아직까지도 차분 방법, 계산 알고리즘 등에 따라 수렴해가 영향을 받게 되는 문제점들이 완전히 해결되지 않고 있다. 그 이유는 자동차가 가지는 기하학적 복잡성 및 이에 따른 복잡한 주변 현상, 항공기와는 달리 차체 후미의 광범위한 영역에 존재하는 후류의 취급관점에서 생기는 모사(simulation)의 한계성 등 때문이다.⁷⁾

본 연구에서는 실험을 수행한 모형의 중앙 단면과, 지면판을 기초로 하여 계산을 수행하였으며, 정상, 비압축성 2차원 유동의 지배 방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(U_j) = 0 \quad (3.1)$$

운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} P + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial}{\partial x_j} U_i + \frac{\partial}{\partial x_i} U_j \right) - \overline{u_i u_j} \right\} \quad (3.2)$$

여기서 레이놀즈 응력항 $\overline{u_i u_j}$ 에 대하여서는 $k-\epsilon$ 난류 모델을 이용하여 모델링을 한다.

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3.3)$$

등방성 확산 계수 ν_t 는 난류 에너지 k 와 난류 에너지 소산율 ϵ 을 사용하여 국소 등방성을 가정할 수 있는 높은 레이놀즈수 영역에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.4)$$

잘 알려진 바와 같이 k 와 ϵ 은 다음의 전달 방정식들로부터 구한다.

난류 에너지 k :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \rho(G - \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} k \right\} \quad (3.5)$$

에너지 소산율 ϵ :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \epsilon) = \rho \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon_1} G - C_{\epsilon_2} \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \epsilon \right\} \quad (3.6)$$

여기서 G 는 난류 생성항으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$G = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial}{\partial x_j} U_i \quad (3.7)$$

경계 조건의 경우 정확성을 기하기 위하여 body-fitted coordinate를 사용하였다. 이에 따른 지배 방정식의 좌표 변환을 수행하여야 하는데 본 연구에서는 물리적 영역인 x, y 좌표계의 해로 수치해석을 위하여 계산 영역인 ξ, η 좌표계를 택하는 Thompson의 방법⁸⁾을 채택하였다. 위의 $k-\epsilon$ model에서 사용된 상수들과 자세한 내용은 참고문헌 [9]에 보고되어 있다.

각 경계면에서의 경계 조건은 다음과 같다.

(1) 입구 단면

$$U = U_0, V = 0, k = 0, \epsilon = 0$$

(2) 출구 단면

$$\frac{\partial U}{\partial \xi} = \frac{\partial V}{\partial \xi} = \frac{\partial k}{\partial \xi} = \frac{\partial \epsilon}{\partial \xi} = 0$$

(3) 무한 경계면

$$U = U_0, \frac{\partial V}{\partial \eta} = 0, k = 0, \epsilon = 0$$

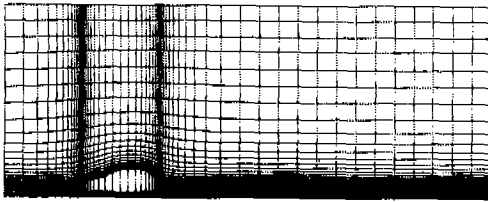
풍동 윗벽 효과를 고려할 경우에는 무한 경계면의 조건이 다음의 벽면 조건으로 대체된다.

(4) 물체 표면과 벽면

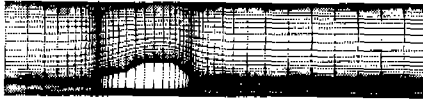
벽면에서는 점착 조건을 사용하였으며 벽에 평행한 속도 성분에 대하여는 다음의 벽법칙을 사용하였다.

$$V_i^+ = y^+ (y^+ < 11.63)$$

$$V_i^+ = \frac{1}{k} \ln(E y^+) (y^+ > 11.63)$$



(a) Semi-infinite flow field



(b) Flow field with bounded upper wall

Fig.4 Numerical grid generation around the model

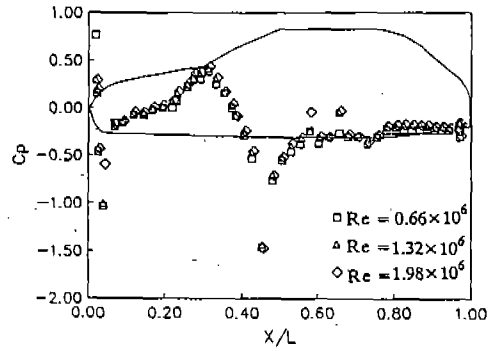
본 연구에서 생성된 격자계를 Fig.4(a)와 4(b)에 나타내었다. 각각의 격자계는 반 무한 평면(CASE 1)과 풍동의 벽면에 의하여 제한되는 평면(CASE 2)에서의 자동차의 유동을 모사하기 위하여 생성하였다. 이때 격자수는 각각 61×66 과 54×73 이다.

계산 프로그램은 SIMPLE 알고리즘¹⁰⁾을 이용하여 해를 구하는 TEACH-code¹¹⁾를 변환하여 사용하였고, 공간에 대하여는 Hybrid scheme을 사용하였다. 차분화된 지배방정식이 수렴 조건을 만족할 때까지 반복 계산하여 해를 구하였는데, 수렴 조건은 다음과 같다. 여기서 상첨자 *는 이전 단계에서의 계산값을 표시한다.

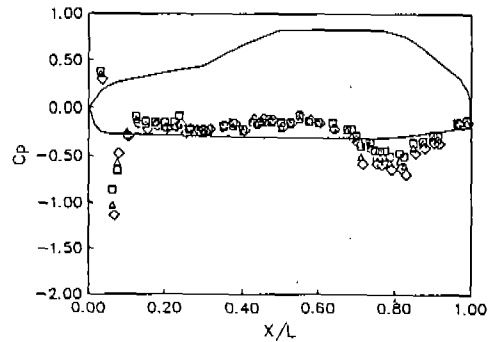
$$\frac{MAX(\phi - \phi^*)}{MAX(\phi)} < 10^{-3}$$

4. 결과 및 검토

레이놀즈수의 변화에 따른 압력 계수의 변화를 살펴보기 위하여 세가지 다른 속도(10 m/s, 20 m/s, 30 m/s)에서 실험한 압력 계수의 값을 Fig.5에 나타내었다. Fig.5에서 알 수 있듯이 레이놀즈수의 변화에 따른 압력 계수의 변화는 거의 없다. 이로 미루어서 표면 압력을 적분하여 얻는 항력계수도 레이놀즈수의 변화에 대해 거의 변화가 없음을 예측할 수 있다. 또한 Fig.6을 보면 모형의 중앙 대



(a) Upper surface of the mid-plane section



(b) Lower surface of the mid-plane section

Fig.5 Distributions of the surface pressure coefficient for three different Reynolds numbers

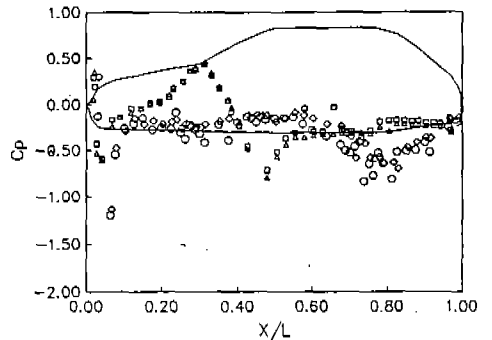
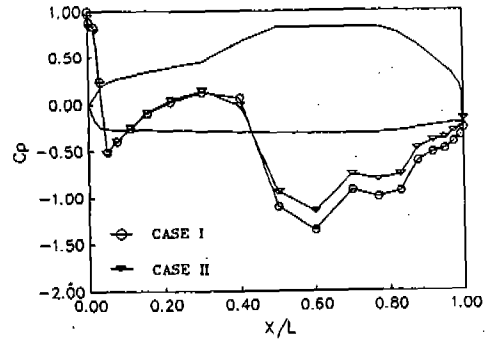


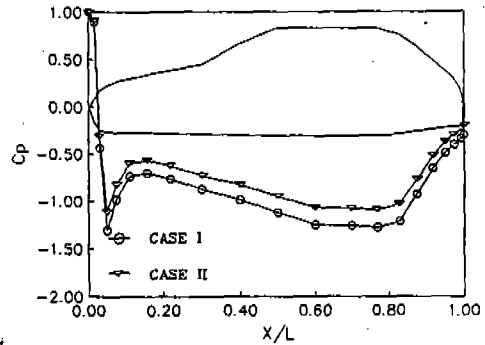
Fig.6 Distributions of the surface pressure coefficient at mid-plane section and 3/4-plane section of the model(□; upper mid section, △; upper 3/4 section, ◇; lower mid section, ○; lower mid 3/4 section)

칭 단면과 3/4면에서의 압력계수의 분포는 $x/L \leq 1/2$ 에서는 거의 일치하나 $x/L \geq 1/2$ 에서는 모형의 아랫면에서 다소간 차이가 난다. 그러므로 모형의 밑면에서 주유동 방향에 대하여 수직 방향의 유동이 존재함을 알 수 있는데 이것은 후류영역의 크기와 관계가 있을 것이다. 즉 주유동 방향의 유동만을 가정하는 2차원 수치해석 또는 실험 결과는 아무리 정확하다 할지라도 3차원 모델을 사용한 실험보다 더 큰 후류 영역을 예측할 것이다. 그리고 풍동 벽의 존재 유무에 관계되는 정도를 비교하는 Fig.7은 풍동 윗벽의 효과를 보여주는데, CASE1에서의 계산보다 CASE2에서의 계산이 더 큰 값으로 예측되어 $x/L \leq 1/2$ 에서는 어느 정도 모형실험의 결과에 정성적으로 접근하고 있으나 $x/L \geq 1/2$ 에서는 Fig.6과 비교하여 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 모형 길이의 반 정도를 지나면서 모형의 밑면에서부터 가장자리 부근으로 발산하는 유동이 발생하는 효과를 2차원 연구로는 고려할 수 없기 때문인 것으로 생각된다. 중앙 대칭 단면에서 측정된 모형의 후류 영역 속도 벡터를 Fig.8에 나타내었다. 후류는 약 $x/L = 0.3 \sim 0.4$ 까지 존재하는데, 이것은 수치 계산 결과를 나타내는 Fig.9에서의 후류 영역과 크기가 거의 비슷하다. Fig.9는 후류가 상하로 나누어져 2개의 재순환 영역을 구성하고 있음을 예측하게 한다. 한편 Fig.8과 Fig.9는 동일 평면에서의 유동 가시화 사진인 Fig.10과 비교하여 보다 잘 이해할 수 있다. Fig.11은 실험으로 측정된 모형 후류 내의 cross flow 속도 벡터이다. 단면 I에서는 외류의 회전 중심을 정확히 알기 어려우나, 모형의 가장자리에서 와류가 존재하고 있음을 예견할 수 있으며, 이것은 단면 II에서 보여지듯이 그 성분들이 약해지며 중앙 대칭면 쪽으로 말려들어가서 뚜렷한 와류 중심이 생긴다.

Fig.12에서는 모형에 접했던 유동이 모형의 끝부분에서 어떤 경로를 가지는가를 알 수 있는데, 모형에 접한 유동은 모형의 앞경사 부분과 옆면이 만나는 곳에서는 앞 경사면에서 옆면의 위쪽으로 유동이 생기며, 이로 인하여



(a) Upper surface



(b) Lower surface

Fig.7 Distributions of the calculated surface pressure coefficient for CASE I and CASE II

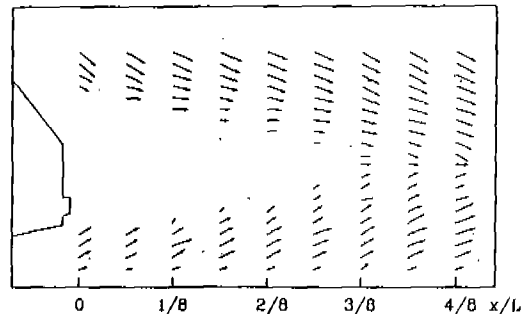


Fig.8 Velocity vectors measured in the wake region along the mid-plane section of the model

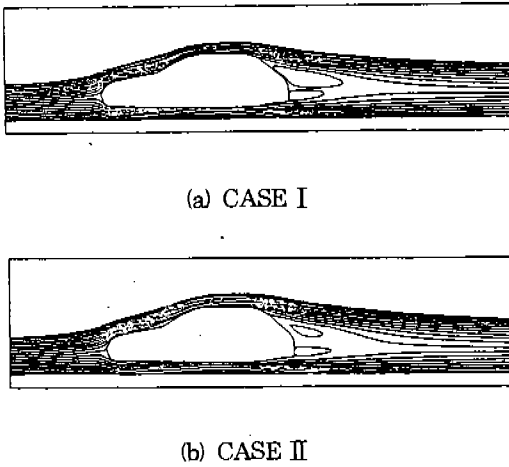


Fig.9 The calculated streamlines for CASE I and CASE II

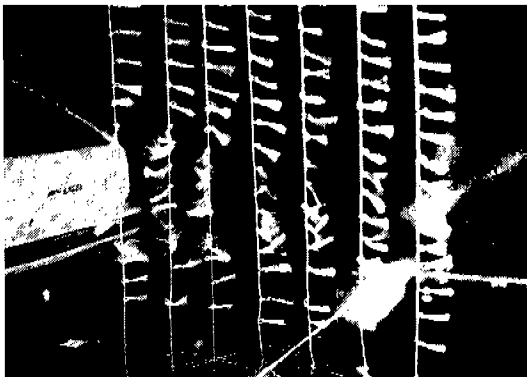
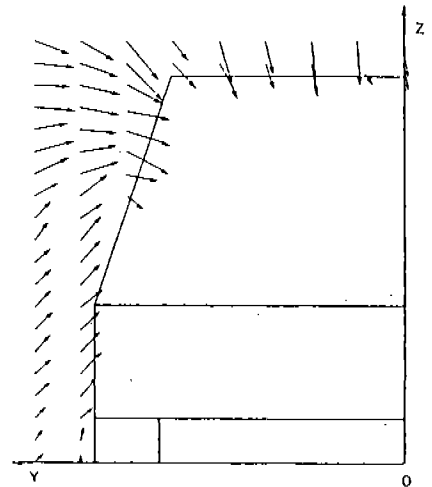


Fig.10 Flow visualization in the wake region of the model

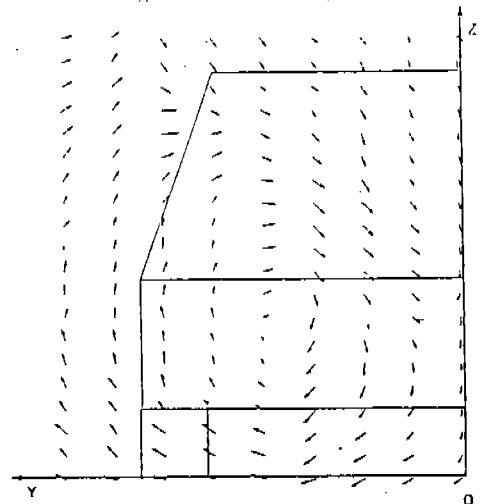
모형의 옆면 윗 부분에서 박리가 발생할 것으로 예측되나 그 강도가 자유 유동의 강도에 비하여 매우 작아서 전반적인 유동 현상에 대하여 영향을 거의 주지 못한다.

Fig.13은 모형의 뒷 경사면에서의 유동 사진이다. 주 유동에 대하여 역방향으로 생기는 뒷경사면에서의 유동은 모형의 윗면과 옆면에서 불어오는 자유 유동과 만나서 모형의 뒷경사각 윗 끝면으로부터 생성되는 cross flow vortex를 형성하게 된다.

또한 모형의 뒷 끝면에서 보이는 역방향 유동은 모형의 바로 뒷면으로부터의 재순환 영



(a) Section I



(b) Section II

Fig.11 The cross flow velocity vectors in the wake region

역의 존재를 확인하여 주는 것으로서 모형의 아랫면에서의 빠른 흐름을 고려할 때에 윗쪽과 아래쪽에 두 개의 horseshoe vortex가 존재함을 알 수 있게 한다.

이상으로 예측되는 자동차 모형의 후류에 대한 복합적인 구조를 Fig.14에 도식적으로 나타내었다. 이것은 Ahmed 등의 연구¹²⁾와 같이 설명될 수 있다. 모형의 바로 뒤에서는 아

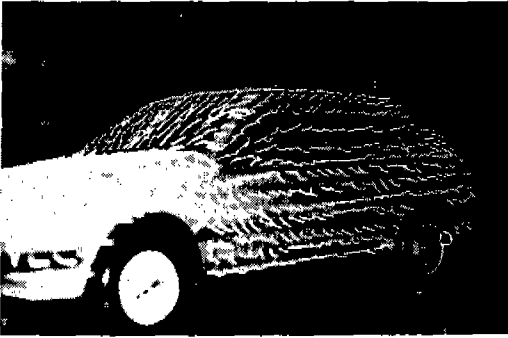


Fig.12 Flow visualization of the body surface flow

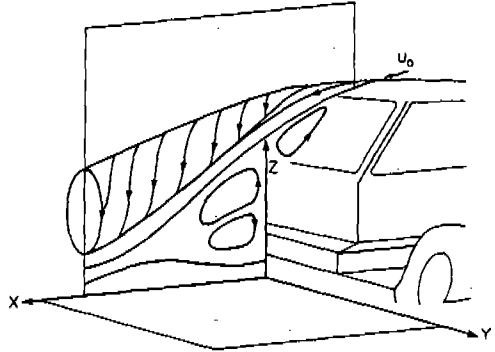
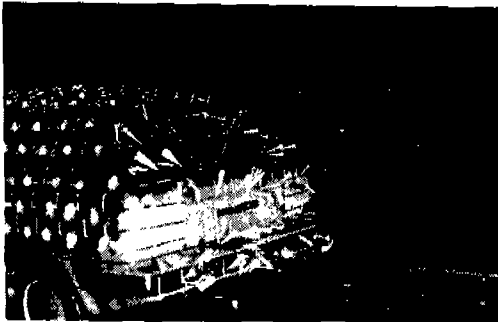
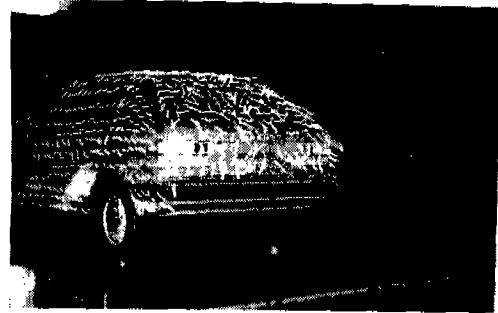


Fig.14 Sketch of the car wake structure



(a) cone method



(b) tuft method

Fig.13 Flow visualization in the back slant of the body surface

래, 위쪽에 두개의 horseshoe vortex가 생기고 이 와류는 모형의 옆면에서 자유 유동과 만날 때까지 원주형으로 존재하며, 크기는 중앙 단면에서 가장 크고 옆면의 자유 유동과 전단이 일어나는 영역에서 소멸된다. 한편 모형의 뒷경사면의 윗쪽 면에서 박리되어 나온 유동은 안쪽으로 밀려들어오며 cross flow vo-

rtex를 이루며 이것은 모형의 윗쪽을 넘어온 자유 유동과 만나서 그 성분이 점차 약해지며 넓은 범위로 퍼지게 된다. 또한 모형의 뒷경사면 바로 위에서는 작은 재순환 영역이 존재하는데, 이 영역으로 인하여 모형의 윗면을 넘어온 유동은 모형의 표면에 부착되지 못하고 horseshoe vortex의 윗쪽과 cross flow vortex를 약화시키는 역할을 한다. 이 구조는 모형의 밑부분을 빠져나온 빠른 유동이 윗면을 지나온 유동과 다시 만날때까지 하류 방향으로 길게 유지되며 이 영역내에서는 cross flow vortex가 존재하나 하류로 갈수록 점점 약화된다.

5. 결 론

1/5축소 승용차 모형을 대상으로 하여 5공 피토판을 이용한 속도 측정 실험, scani valve를 이용한 압력 측정 실험 및 후류 영역과 모형의 표면에서의 유동 가시화 실험을 수행하였으며, 모형의 중앙 대칭 단면에서 이차원 점성 계산을 수행하여 다음의 결과를 얻었다.

1. 관심 대상 영역인 후류 영역에서 시간 평균된 후류의 복합 구조를 확인하였다.

(a) 후류 영역에서는 모형의 바로 뒷부분에서부터 하류 방향으로 한쌍의 horseshoe vortex가 존재하고 그 크기는 약 0.3~0.4L 정도임을 알 수 있다.

(b) 뒷경사면의 윗쪽 양옆 부분으로부터 cross flow vortex가 생성되어 하류로 넓게 퍼져가며 강도가 약해지고 먼 하류에서는 하나로 합쳐진다.

(c) 모형의 뒷경사면 위에 작은 재순환 영역이 존재하여 cross flow vortex 표면을 넘어온 자유 유동으로부터 horseshoe vortex의 윗부분을 보호해 주어서 하류 방향으로 horseshoe vortex의 존재 영역을 넓혀준다.

2. 모형 중앙 단면의 표면에서의 압력 계수 분포는 실험 범위 내에서 레이놀즈수의 변화에 크게 민감하지 않다. 중앙 단면과 3/4 단면에서의 압력 계수 분포는 모형의 전반부에서는 차이가 크지 않고 후반부의 아랫면에서는 다소간 차이가 발생하는데, 이로 인해 하류 방향으로 후류의 크기가 2차원 연구 결과보다 작게 됨을 알 수 있다. 또한 cross flow vortex는 모형의 윗면 유동보다는 아랫면 유동의 영향을 더 받는 것을 알 수 있다.

3. 5공 피토판의 평균 유동 측정은 가시화 실험 결과와 일치한다.

4. 이차원 계산으로도 표면 압력의 분포 경향 및 재순환 영역의 크기 등 중앙 대칭 단면의 현상을 예측할 수 있으나 3차원 유동에 대한 실험과는 뒷부분에서 차이를 보인다.

5. 자동차형 물체의 관심 영역의 유동을 tuft나 cone 등을 사용하여 가시화 실험을 수행할 때 tuft나 cone들로 인하여 유동이 어느 정도 간섭을 받을 수 있으나, 본 연구의 결과로 미루어보아 간섭의 효과에도 불구하고 그 타당성이 인정된다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단의 연구비 지원과 현대자동차의 모형 지원으로 수행되었음을 밝히며, 이에 모든 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. "Automotive Aerodynamics", Progress in Technology Series, Society of Automotive Engineers, Inc., No.16, 1978.
2. D.J., Holt, "Aerodynamics: the New Automotive Frontier", Automotive Engineering, Vol.89, No.1, pp.50-59, 1981.
3. W.H., Hucho, L.J., Janssen, H.J., Emmelmann, "The Optimization of Body Details-a Method for Reducing the Aerodynamic Drag of Road Vehicles", SAE/PT-79/18, 1979.
4. 유정열, 김사량, 강신형, 백세진, 이택식, 김용서, "단순화된 2차원 자동차형 물체 주위의 유동에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집, 제13권 제1호, pp.178~189, 1989.
5. D.S., Gross, W.S., Sekscienski, "Some Problems Concerning Wind Tunnel Testing of Automotive Vehicles", SAE/PT-78/16/, pp.37-51, 1978.
6. 성봉주, 장병희, "Van형 자동차의 후류 구조에 대한 실험적 해석", 한국자동차공학회지, 제10권 제3호, pp.51~59, 1988.
7. R., Himeno, K., Fujitani and K., Kuwahara, "Finite Difference Analysis of Two-Dimensional Flow Around an Automobile", 일본기계학회 논문집(B편) 제53권 486호, 1986.
8. J.F., Thompson, Z.U.A., Warsi and C.W., Mastin, "Numerical Grid Generation", North-Holland, N.Y., 1985.
9. 장성원, "승용차 모형 주위의 유동에 관한 연구", 서울대학교 공학석사학위논문, 1988.
10. S.V., Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill, 1980.
11. A.D., Gosman, F.J.K., Ideriah, and M.P., Arnal, "Teach-2E: A general computer program for two-dimensional, turbulent, recirculating flows", Rep. FM-83-2, Univ. of California, Berkeley, 1983.
12. S.R., Ahmed, G., Ramm and G., Faltin, "Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake", SAE-Paper 840300, Detroit, 1984.